

ELEKTRICKÉ STROJE V ENERGETICE

Karel Chmelík.

POKYNY KE STUDIUI

Tento modul je určen pro studium absolventů vysokoškolského studia , kteří absolvovali některý obor elektrotechnického zaměření, případně i jiný technický obor s předměty z obecné elektrotechniky.

Pro studium obdrží uchazeči:

- Texty pro distanční studium
- CD-ROM s animacemi vybraných částí
- Harmonogram průběhu studia v prezenční i distanční části

Texty se dělí na kapitoly, které odpovídají obecnému základu elektrických strojů a jednotlivým druhům těchto strojů. Studium je zaměřeno na získání praktických dovedností a proto texty obsahují řadu příkladů z praxe.

Vlastní studium může podpořit uvedení

Času ke studiu

Čas je uveden před každou kapitolou nebo ucelenou částí. Jeho délka musí být pochopitelně individuálně korigována studentem podle jeho dosavadních znalostí či praxe.

Cíl

Vždy se uvádí cíl, kterého je nutno dosáhnout studiem kapitoly nebo části tozn. Jaké znalosti mají být získány.

Výklad

Látka je pak vyložena buď v textu případně i v prezenční části. Jsou definovány pojmy a uvedeny příklady. Závěr vždy obsahuje shrnutí pojmů.

Otázky

Pro zopakování jsou uvedeny v závěru otázky. Na nich si můžete ověřit zvládnutí učiva.

Příklady k řešení

Studium tohoto předmětu musí být doplněno i řešením početních příkladů. Na nich je možno ověřit zvládnutí látky a porozumění problémům. Výsledky řešení jsou uvedeny v závěru tohoto textu.

1 . ZÁKLADY ELEKTRICKÝCH STROJŮ

ČAS: 20min

Cíl: Prostudováním této kapitoly budete umět

- Vysvětlit co je to stroj , co je elektrický stroj

- Rozdělení a funkce el. strojů
- Popsat energetickou bilanci ve stroji

Výklad

Elektrický stroj je elektrické zařízení, jehož činnost je závislá na elektromagnetické indukci, která může mít i části schopné vykonávat relativní pohyb a které je určeno na přeměnu energie. Jsou to i zařízení pro regulaci napájení nebo absorbování jalové energie.

Rozdělení elektrických strojů

Elektrický stroj přeměňuje energii působením elektromagnetické indukce. Podle způsobu přeměny energie rozdělujeme elektrické stroje na:

- Generátory, které mění mechanickou energii na energii elektrickou. Podle druhu proudu pak generátory dále dělíme na
 - dynamy, které jsou generátory stejnosměrného proudu
 - alternátory, vyrábějící střídavý proud.
- Motory, měnící elektrickou energii na energii mechanickou.
- Měníče, které mění elektrickou energii jedněch parametrů na elektrickou energii jiných parametrů (např. střídavý proud na stejnosměrný nebo naopak, střídavý jedné frekvence na střídavý jiné frekvence apod.).

Elektrické stroje se dále dělí podle druhu proudu na stejnosměrné a střídavé. Další dělení je podle principu působení a konstrukce. Z tohoto hlediska rozeznáváme:

- transformátory
- asynchronní stroje
- synchronní stroje
- stejnosměrné stroje
- střídavé stroje s komutátorem.

Můžeme si zde uvádět jistě ještě další dělení např. na stroje statické (transformátory) a pohybové a to s pohybem rotačním nebo lineárním, což však pro další rozbor není podstatné a bude na to upozorněno vždy při rozboru činnosti podle principu.

Každý elektrický stroj má čtyři hlavní části:

- magnetický obvod, složený obvykle z feromagnetických plechů
- elektrický obvod vstupní, většinou tvořený měděným vinutím
- elektrický obvod výstupní opět tvořený vinutím
- konstrukční části umožňující činnost stroje jako kostra, štíty, ložiska, ventilace, hřídel apod.

Lze předpokládat, že elektromotory zůstanou i nadále hlavním zdrojem mechanické energie v pohonech průmyslových zařízení, zařízení pro domácnost, v dopravě i jinde. Nejpoužívanějšími budou i nadále motory asynchronní, které se budou více uplatňovat i v regulačních pohonech. Stejnosměrné motory budou v regulačních pohonech nahrazovány asynchronními a synchronními motory. U synchronních motorů se uplatní buzení se statických měničů.

Energetická bilance v elektrických strojích

Přeměny energií:

- užitečné*
- změny parametrů el. energie (transformátory, měniče)
 - elektromechanické přeměny (motory, generátory)
 - kombinace změn parametrů i přeměn (indukční měniče kmitočtu).
- parazitní*
- síly a momenty, které budí vibrace, chvění a hluk
 - ztráty .. mechanické (ventilační, v ložiskách, v kartáčích)
 - elektrické (ve vinutí, v mg. obvodu)

Při činnosti každého zařízení, tedy i elektrické stroje vznikají ztráty energie, takže účinnost žádného stroje není 100%.

Ztráty snižující účinnost užitečných přeměn energií. Dělí se na:

- závislé na zatížení (t.j. na proudu)
- závislé na napětí (v železe)
- stálé (mechanické)

Energie $P_1 \cdot dt$, dodávaná do stroje za dobu dt , se v něm mění na energii $P \cdot dt$, kterou stroj odevzdá a na ztráty ve stroji $\Delta P \cdot dt$. Tyto ztráty se mění v teplo a ohřívají jednotlivé části stroje. Ztráty, vznikající ve strojích dělíme na:

- elektrické, vznikající průchodem proudu ve vodičích vinutí případně v dalších elektricky vodivých obvodech,
- magnetické, vznikající hysterezí a vířivými proudy ve feromagnetických částech stroje, nacházejících se ve střídavém magnetickém poli,
- mechanické vznikající třením v ložiskách, ventilační ztráty a třením kartáčů po komutátoru nebo kroužcích,
- dielektrické v izolaci, která se nachází ve střídavém elektrickém poli – tyto ztráty přicházejí v úvahu u strojů na vysoké napětí u strojů na nízké napětí jsou nepatrné.

Jak bylo uvedeno ztráty se v elektrickém stroji mění v teplo a tak se jednotlivé části stroje oteplují. Teplo se ze stroje odvádí chlazením. Způsobů chlazení je několik a bude mu věnována samostatná část. Pro velikost oteplení jednotlivých částí stroje je podstatné, z jakého materiálu a jak tepelně odolného jsou tyto části vyrobeny.

Poměr výkonu a příkonu nebo energií odevzdané a přivedené nazýváme účinnost. Tedy

$$\eta = \frac{P}{P_1}$$

Jak již bylo naznačeno je účinnost vždy menší než 1. U současných velkých elektrických strojů bývá účinnost až 97 – 99%., malé a střední stroje mají účinnost 80 – 90%, stroje malých výkonů sériově vyráběné např. jednofázové asynchronní motory mají účinnost kolem 50%.

Při přeměně mechanické energie v elektrickou nebo naopak platí pro točivé stroje rovnice

$$P = M \cdot \omega$$

kde P je mechanický výkon na hřídeli
 M točivý moment na hřídeli stroje
 ω úhlová rychlost stroje.

Točivý moment M v motoru koná užitečnou mechanickou práci – překonává zátěžný moment nebo jinak řešeno protimoment poháněného stroje nebo zařízení.

U generátoru směřuje točivý moment proti momentu poháněcího stroje – např. turbíny.

U transformátoru, který nemá rotační části nebo jinak se pohybující, nejsou mechanické ztráty a také se neodvádí mechanická energie.

Výkon, na který je stroj navržen se nazývá jmenovitý výkon a je uveden na výkonnostním štítku. Na výkonnostním štítku bývají uvedeny také další jmenovité hodnoty jako napětí, proud, otáčky, atd.

V každém elektrickém stroji může být směr přeměny energie změněn na směr opačný. Mechanická energie dodává pře hřídel do stroje může být změněna na elektrickou energii. Naopak, elektrická energie přiváděná do vinutí téhož stroje může být změněna na mechanickou. Každý generátor může tedy pracovat jako motor a naopak motor jako generátor. Směr energie může být obrácen v každém měniči např. v transformátoru. Tato vlastnost se nazývá vratností elektrického stroje. V praxi se většina strojů navrhuje pouze pro jeden směr přeměny energie, ve kterém pracuje převážně i když během provozu se mohou vyskytnout případy, kdy stroj pracuje v opačném směru. Např. jeřábový asynchronní motor při spouštění břemene, trakční motor při brždění apod.

Shrnutí pojmů

Stroj je zařízení na přeměnu energie. Když se jedná o elektrický stroj, pak energie přeměňovaná nebo přeměněná musí být elektrická. Při přeměně energie vzniká kromě energie užitečné i energie parazitní, jejíž podstatnou částí jsou ztráty.

POZOR: Každý elektrický stroj je vratný tj. v každém el. stroji může být změněn směr přeměny energie (generátor –motor, motor-generátor).

Otázky

1. Co nazýváme strojem?
2. Jaký je rozdíl mezi generátorem a motorem ?
3. Vyjmenujte druhy netočivých el. strojů
4. Vyjmenujte druhy točivých el. strojů
5. Kde vznikají v el. stroji ztráty ?

2. Materiály a konstrukční části elektrických strojů

2.1 Materiály používané při stavbě elektrických strojů

Čas: 30 min

Cíl Studium této kapitoly budete umět

- Popsat materiály používané pro el. stroje
- Uvést konstrukční části strojů
- Definovat způsoby chlazení el. strojů a jejich tvary.

Výklad

Materiály používané pro stavbu elektrických strojů můžeme v podstatě rozdělit na:

- materiály elektricky vodivé
- materiály magneticky vodivé
- izolanty
- spojovací a konstrukční materiály.

Jako materiálů **elektricky vodivých** se v elektrických strojích nejčastěji používá měď, nebo její slitiny bronz a mosaz a dále pak hliník. Někdy se jako materiálu elektricky vodivého používá ocel – na kroužky synchronních strojů. Z mědi, výjimečně i z hliníku, se zhotovují cívky pro vinutí strojů, a spojovací vedení – vývody na svorkovnice, ke kartáčovým držákům apod. Hliník se v hojné míře používá pro výrobu klecových vinutí asynchronních motorů. U stejnosměrných strojů se mědi používá na výrobu komutátorů. Slitin mědi se užívá pro výrobu svorníků, kroužků pro asynchronní motory s vinutým rotorem i synchronní stroje. Hojně je použití těchto slitin pro klece asynchronních motorů, nebo tlumiče synchronních strojů. Zvláštním vodivým materiálem používaným v elektrických strojích je uhlík. Používá se ho na kartáče a to jak ve formě kovografitu (střídavé stroje), elektrografitu (stejnosměrné stroje), přírodního grafitu (střídavé stroje) a speciálních grafitů (komutátorové stroje střídavé).

Části **magnetického obvodu** se ponejvíce vyrábějí z tenkých ocelových plechů speciálně určených pro elektrotechniku. Dále se magnetické obvody provádějí z lité oceli nebo z litiny. Vlastnosti tenkých ocelových plechů pro elektrotechniku jsou předepsány normou ČSN 420230. Tloušťky těchto plechů, které jsou mezi sebou izolovány, bývají zpravidla 0,5 a 0,35 mm, ale mohou být i 1 mm či jiné. Plechy pro elektrotechniku jsou legovány křemíkem a dříve se pro ně vzil název "dynamové plechy". S rostoucím obsahem křemíku klesají hysterézní ztráty a protože se zároveň zvyšuje měrný elektrický odpor, klesají i ztráty vířivými proudy. Obsah křemíku však zvyšuje křehkost plechů a ztěžuje jejich zpracování. Dynamové plechy rozlišujeme od transformátorových plechů, které mohou mít vyšší obsah křemíku, protože u nich není nutné prostřihování drážek.

Důležité jsou přitom ztráty spojené se střídavým přemagnetizováním magnetického obvodu. Tyto jsou způsobeny:

- hysterézí
- vířivými proudy
- magnetickým zpožděním.

Hysterézní ztráty odpovídají energii spotřebované při přemagnetování a jsou úměrné ploše uzavřené hysterézní smyčky.

Ztráty vířivými proudy vyplývají z otáčení magnetických momentů atomů při přemagnetování. To, že musíme magnetický obvod skládat z plechů, se mj. projeví tím, že objem magnetického obvodu není zcela vyplněn feromagnetickým materiálem. Toto je vyjadřováno zmíněným činitelem plnění k_{Fe} , který je dán poměrem měrné hmotnosti svazku plechů k měrné hmotnosti materiálu plechů (někdy také poměrem objemů či průřezů).

Hodnota činitele plnění závisí na tloušťce izolace a na toleranci či nerovnosti plechů. Dále je nutno zamezit degradaci vlastností magnetického obvodu nevhodnou technologií zpracování či nevhodnou úpravou plechů. Významným zdrojem degradace jsou mechanická napětí, která vznikají v plechu při stříhání. Tato mechanická pnutí musí být pak odstraněna žíháním.

V malých motorech pro domácí spotřebiče a automobilový průmysl se používají bezkřemíkové plechy. Jsou lacinější a zvýšené ztráty u těchto spotřebičů nejsou rozhodující.

Materiály pro trvalé magnety jsou používány ve stavbě stejnosměrných strojů pro motory i tachodynamy (místo budících vinutí), pro rotory zubových generátorů apod. Jsou to magnetické slitiny niklové a železo-kobaltové. Např. kobaltová ocel Permag (ALNICO).

Nejnověji se magnetický obvod transformátorů vyrábí z amorfního kovu (kovové sklo) což jsou slitiny krystalické struktury. Vyznačují se magnetickou měkkostí a výrazně nižšími ztrátami při přemagnetování.

U **izolačních materiálů**, které mohou mít skupenství pevné (slída, papír apod.), kapalné (olej) i plynné (vzduch), je důležitá zvláště jejich tepelná odolnost. Současně používané izolační materiály jsou zařazeny do tepelných tříd.

Izolační materiály se používají jednak pro izolaci vodičů pro vinutí (smalt, skelná vlákna), izolaci cívek (slída, vrstvený papír nebo tkaniny), izolaci drážek (slídový papír, různé fólie), drážkové klíny (sklotextil), mezivrstevové izolace apod. V celku pak hovoříme o izolačním systému elektrického stroje. Velmi důležitým faktorem je stárnutí nebo také degradace vlastností izolačních systémů. Stárnutí je postupné snižování elektrických a mechanických vlastností působením degračních (znehodnocovacích) činitelů. K nejdůležitějším patří teplota, vibrace, napěťové namáhání, namáhání okolním prostředím atd.

Konstrukční materiály jsou ocel, litina, které se používají pro kostry strojů, hřídele, základové desky, stahovací konstrukce apod. Dále se používají ložiskové kovy pro kluzná ložiska – olovené bronzy apod. Nemagnetický ocelový drát se používá na bandáže rotorových vinutí. Může být pro tyto bandáže použito i pásků ze skelných vláken impregnovaných umělou pryskyřicí.

Krytí, tvary, montážní rozměry a chlazení elektrických strojů

Krytím elektrického stroje se rozumí každé opatření tvořící součást stroje na ochranu proti nebezpečnému dotyku osob a na ochranu proti vniknutí cizích předmětů a vody do stroje. Stupeň krytí elektrického stroje označujeme

IP x x . .

- IP mezinárodně přijaté označení krytí
- x na prvním místě je stupeň ochrany proti nebezpečnému dotyku a vniknutí cizích předmětů
- x číslice na druhém místě znamená stupeň ochrany proti vniknutí vody.
- .. nepovinná písmena A, B, C, D a H, M, SW

Nejběžnější krytí u elektrických strojů je IP 21 a IP 44.

Do prostorů s **nebezpečím výbuchu** plynu, par apod. musíme elektrické stroje konstruovat jako nevýbušné. Nevýbušné je takové zařízení, které nemůže za předpokládaných provozních podmínek inicializovat výbušnou směs. Druhy nevýbušného provedení jsou:

- zajištěné provedení
- jiskrově bezpečné zařízení vznikající jiskření není schopno vznítiti výbušnou směs
- nevýbušný závěr je kryt, který buď brání přístupu výbušné směsi k jiskřícím částem, nebo vznikne-li výbuch uvnitř krytu zabrání jeho přenosu do okolí.

Každý výrobek tvořící samostatné nevýbušné provedení musí mít na viditelném místě znak nevýbušnosti. Znak ve tvaru čtverce má v horní polovině zkratku druhu nevýbušného provedení, v dolní polovině zkratku skupiny výbušnosti a teplotní třídy. Příklad znaku: ExdIIBT4

Ex označení nevodivého elektrického zařízení
d znamená pevný závěr
IIB svítiplynová skupina výbušnosti
4 tepelná třída

Tvarem stroje se rozumí konstrukční úprava mechanických částí stroje z hlediska způsobu jeho upevnění k základu nebo poháněnému mechanismu, dále z hlediska mechanického spojení s poháněným mechanismem, s ohledem na umístění ložisek a také na tvar a polohu konce hřídele. Podle ČSN 350002 se tvar stroje označuje dvěma písmeny a čtyřmi číslicemi:

IM x xx x

IM jsou mezinárodně přijatá písmena pro označení tvaru
x první číslice je skupinové číslo tvaru stroje
xx číselný znak podle způsobu montáže
x čtvrtá číslice je znak podle konce hřídele.

Příklad IM 1001 – patkový stroj s ložiskovými štíty patky ve vodorovné poloze s jedním válcovým koncem hřídele, IM 3001 – přírubový stroj s přírubou na ložiskovém štítu ve vodorovné poloze a s jedním válcovým koncem hřídele.

Základní montážní rozměry jsou předepsány ČSN 350040 a platí pro patkové, přírubové a patkopřírubové motory vyráběné našimi výrobci. Nejzákladnější je výška osy hřídele H. Dalšími základními rozměry patkového stroje jsou rozteče patek vzdálenost konce hřídele od otvoru v patce a velikost otvoru v patkách .

Podobně jsou předepsány základní montážní rozměry v závislosti na velikosti stroje i u jiných tvarů strojů. Dále jsou předepsány rozměry válcových a kuželových konců hřídelí a umístění svorkovnice.

Chlazením se rozumí způsob odvádění tepla z elektrického stroje. Pro rozlišení chlazení uvádí ČSN 350006:

- podle druhu chladiva (A vzduch, H vodík, W voda atd.)

- podle oběhu chladiva označuje 0 – 9 oběhů např. otevřený oběh, kdy chladivo obíhá strojem a stále se obnovuje, zavřený oběh – chladivo obíhá strojem a předává teplo sekundárnímu chladiči nebo povrchu kostry atd.
- podle zdroje energie a umístění zařízení pro oběh chladiva např. zařízení závislé – je poháněné energií vyvozovanou chlazeným strojem
- podle způsobu odvodu tepla z částí, kde ztráty vznikají – chlazení přímé kdy chladivo je v přímém styku s chlazenou částí,
- podle počtu chladících oběhů – primární a sekundární oběh.

Označení IC x xx

IC	mezinárodně přijatá písmena
x	druh chladiva - písmeno
x	číslice označující oběh chladiva
x	číslice označující zdroj energie pro oběh chladiva

Příklad: IC A01 – stroj je chlazený vzduchem, vzduch je nasávaný z výfukového prostoru, v němž stroj pracuje a je uváděn do pohybu ventilátorem na hřídeli.

Základní uspořádání točivých strojů

U elektrických točivých strojů jsou vodiče na statoru i na rotoru. U speciálních strojů může být některé vinutí nahrazeno např. permanentními magnety. Rotor se pohybuje (otáčí) v dutině statoru. Mezi státorem a rotorem je vzduchová mezera.

Vinutí elektrických strojů se skládá z cívek, a cívky pak ze závitů. Podle druhu strojů je různé uspořádání vinutí. U stejnosměrných strojů (hlavní a pomocné póly) a u synchronních strojů (budící vinutí) jsou kompaktní cívky umístěny na pólech. Vinutí rozložené v drážkách mají asynchronní stroje, kotvy stejnosměrných a synchronních strojů, kompenzační vinutí stejnosměrných strojů apod.

Statorové případně i rotorové vinutí (funkce statoru a rotoru může být zaměněna) vytváří buď stejnosměrné magnetické pole, které má stálou velikost, směr i smysl (stejnoseměrné stroje) nebo točivé magnetické pole (asynchronní stroje, synchronní stroje). Vytvořené pole může být také pulzující (střídavé) magnetické pole (jednofázové asynchronní motory). Charakter pole tedy závisí na druhu stroje.

Otázky ke kap. 2.1

1. Vyjmenujte aktivní a konstrukční materiály v el. strojích
2. Úkoly izolačního systému v el. stroji
3. Jaká chladicí média se používají v el. strojích?
4. Čím je v el. stroji zajištěna ochrana proti nebezpečnému dotyku ?
5. Co vyznačuje tvar el. stroje?

2.2 . Vinutí elektrických točivých strojů.

2.2.1 Obecně o vinutí

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Co je to vinutí el. stroje točivého a k čemu slouží
- Definovat části vinutí
- Popsat různé druhy vinutí

Výklad

Vinutí je aktivní část elektrického obvodu stroje, která se skládá z cívek navzájem spojených a spřažených magnetickým tokem tak, aby vyhovovaly požadované funkci stroje . Vinutí je tvořeno izolovanými i neizolovanými dráty , tyčemi a pásy, izolací vinutí a dalšími konstrukčními částmi .

Cívka je tvořena závitů (nebo pouze závitem) – obr .2.1. Všechna vinutí elektrických strojů točivých se dělí podle účelu, použití, provedení a jiných hledisek na řadu skupin.

Druh a provedení vinutí je určeno a technologicky ovlivněno:

- druhem stroje(asynchronní, synchronní,stejnoseměrný)
- druhem napětí a proudu
- provedením stroje (zavřený,otevřený atd.)
- pracovním prostředím(mokré, tropy,chemické vlivy)
- teplotou(třídy izolace)

Podle uložení je vinutí statorové, rotorové nebo vinutí pólů.

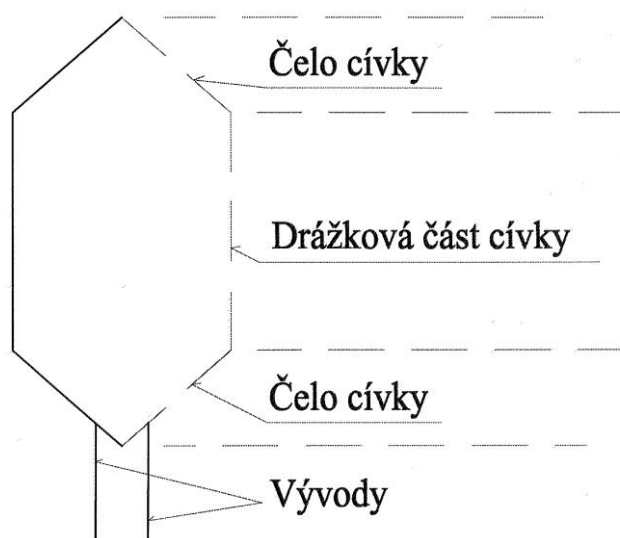
Podle druhu proudu dělíme vinutí na

- stejnosměrné
- střídavé

Podle funkce:

- pracovní vstupní (primární) připojené k síti nebo k jinému zdroji proudu
 výstupní připojené k síti, které odvádí el. energii anebo k jinému spotřebiči
 budící k vytvoření hlavního magnetického toku
 kotevní uložené v kotvě a indukuje se v něm napětí otáčením v magnetickém poli anebo točivým mg. polem.
- pomocné kompenzační kompenzuje některé účinky proudu v jiných vinutích
 tlumící spojené nakrátko
 vyrovnávací pro vyrovnávání nesymetrií
 rozběhové k vytvoření rozběhového momentu včetně pomocné fáze

Zadní strana cívky



Přední strana cívky (strana vývodů)

Obr. 2.1

Hlavní požadavky na vinutí

- elektrické elektrická pevnost izolace
dobré elektrické využití
- mechanické odolávat odstředivým silám a dynamickému namáhání
- technologické málo pracné
- chlazení dobrý odvod tepla

Základní názvosloví

Smyčkové vinutí je dvouvrstvé vinutí, které má všechny závity umístěné pod jednou dvojicí hlavních pólů zapojeny do série, a cívkové skupiny umístěné pod dvojicemi hlavních pólů po sobě jdoucích jsou vzájemně spojeny ve stejném sledu jaký mají tyto dvojice pólů.

Vlnové vinutí, dvouvrstvé vinutí jehož sled zapojení je takový, že do série zapojené po sobě jdoucí sekce vinutí jsou v jednom směru kolem stroje umístěny pod sousedními dvojicemi hlavních pólů.

Závit vodič nebo svazek vodičů, které tvoří jednu vodivou smyčku

Cívka je fyzikální sestava jedné nebo několika elektrických sekcí cívek, obvykle obklopených společnou izolací

Čelo cívky je kterákoliv ze dvou částí cívky, které spojují cívkové strany.

Vyložení vinutí je částí vinutí přesahující konec jádra.

Vsypávané vinutí jednotlivé vodiče mají v cívkové straně libovolnou polohu

Vkládané vinutí je vsypávané, ale vodiče jsou vkládány do drážek otevřením drážky.

Drážková rozteč je obvodová vzdálenost mezi odpovídajícími body dvou sousedních zubů.

Celkový krok je počet drážkových roztečí, které oddělují drážky v nichž jsou uloženy dvě strany cívky.

Cívkový (přední) krok je celkový krok ke spojenému konci vinutí.

Spojkový (zadní) krok je celkový krok k nespojenému konci vinutí.

Pólová rozteč je obvodová vzdálenost mezi odpovídajícími body dvou sousedních pólů, vyjádřená obvykle počtem drážkových roztečí

Komutátorový krok je počet lamel komutátoru mezi začátkem a koncem jedné sekce cívky.

Činitel kroku se týká rozloženého vinutí a bere zřetel na snížení indukovaného napětí, jestliže poměrný krok vinutí není 100%.

Činitel vinutí je součin činitelů rozložení a kroku.

Činitel zešíkmení drážky bere zřetel na snížení indukovaného napětí, jestliže drážky statoru a rotoru nejsou rovnoběžné.

Počet pólů je počet severních a jižních pólů ve stroji. Označuje se $2p$ čímž se vyjadřuje, že tento počet musí být vždy uveden jako sudé číslo. **Počet pólových dvojic** je pak uveden p .

Počet paralelních větví vinutí označujeme $2a$ tedy opět to musí být sudé číslo. Počet paralelních větví určuje druh vinutí

$a = 1, p > 1$ jde o sériové vinutí

$a > p$, několika paralelní vinutí

$a = p$ paralelní vinutí

$1 < a < p$ sérioparalelní vinutí.

Otázky ke kap 2.2.1

1. Popište funkci vinutí v točivém stroji
2. Z jakých elementů je vinutí tvořeno
3. Vyjmenujte hlavní druhy vinutí
4. Co musí vinutí splňovat

2.2.2 . Vinutí střídavých strojů

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- vysvětlit funkci vinutí v el. stroji na střídavý proud
- vyjmenovat hlavní druhy střídavých vinutí
- vypočítat krok cívky
-

Výklad

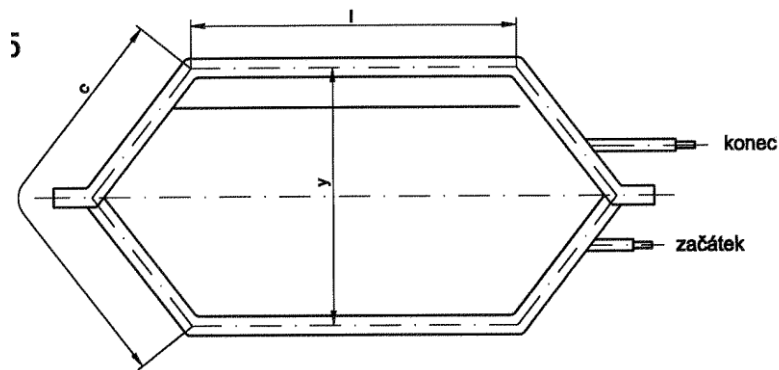
Hlavní druhy střídavých vinutí

Podle počtu fází se střídavá vinutí dělí na:

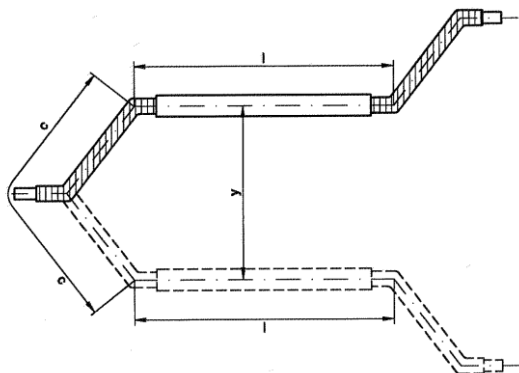
- jednofázová, dvoufázová, trojfázová, vícefázová.

Podle způsobu provedení se vinutí dělí na

- cívková – obr.2.2
- tyčová - obr. 2.3



Obr. 2.2



Obr.2.3

Střídavé vinutí mají dvě základní funkce:

- vytvářet ems, potřebnou pro činnost stroje
- budit magnetické pole nutné k přeměně energie

Vinutí střídavých strojů je rozloženo v drážkách statoru nebo rotoru. Většinou se zde budeme zabývat vinutím asynchronních a synchronních strojů, přičemž budící vinutí synchronních strojů, protékající stejnosměrným proudem zde nezahrnujeme. Vinutí všech střídavých strojů jsou v zásadě stejná a jsou obecně m-fázová, ale nejčastěji třífázová.

Základním prvkem vinutí je vodič, který pak tvoří závit. Několik závitů (vyjimečně i jeden závit) pak tvoří cívku. Každý závit nebo cívka má dvě strany, uložené v drážkách (drážková část cívky). Každá strana cívky je umístěna pod jiným pólem. Cívkové strany někdy nazýváme jako přední strana cívky a zadní strana cívky. Vzdálenost obou stran se rovná pólové rozteči u cívky s nezkráceným krokem (plným krokem). Strany cívek vzájemně propojují čela cívek, které nejsou uloženy v drážkách.

Charakteristickým znakem každého vinutí je počet drážek na pól a fázi q , který s celkovým počtem drážek ve stroji Q je vyjádřen rovnicí

$$q = \frac{Q}{2pm}$$

kde $2p$ je počet pólů stroje

Jak již bylo uvedeno rozpětí cívky nazýváme krok cívky. Rovná se pólové rozteči a počítá se v drážkách. Např. krok 5 drážek znamená, že mezi oběma cívkovými stranami je 5 drážkových roztečí t.j. cívka má své strany v drážkách 1 a 6, nebo 2 a 7, atd.

Krok se vypočte

$$y = \frac{Q}{2p} \text{ v počtu drážek.}$$

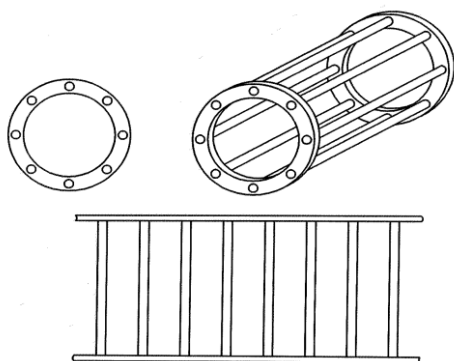
Cívková vinutí jsou vyrobena z izolovaných vodičů a jejich tvar je dán použitými šablonami, případně roztažením na speciálním zařízení. Do drážek pak mohou být

- vsypávaná po jednotlivých závitech (u strojů s polouzavřenými drážkami)
- vkládaná jako celek tj. včetně cívkové izolace a to u strojů s otevřenými drážkami.

U nejmenších strojů se cívky navíjejí přímo do drážek a to většinou strojně.

Tyčová vinutí se skládají z izolovaných tyčí, které se vkládají buď do otevřených drážek nebo se i zasouvají do drážek polouzavřených.

Zvláštním případem jsou klecová vinutí rotorů asynchronních motorů (AM), která se většinou zhotovují vstřikováním hliníku do drážek rotoru ve speciálních vstřikovacích lisech, kde se rovněž zhotoví i spojovací kruhy. – obr .2.4.



Obr. 2.4

Podle počtu drážek na pól a fázi rozlišujeme vinutí

- s celým počtem drážek na pól a fázi
- zlomková, u kterých q není celé číslo.

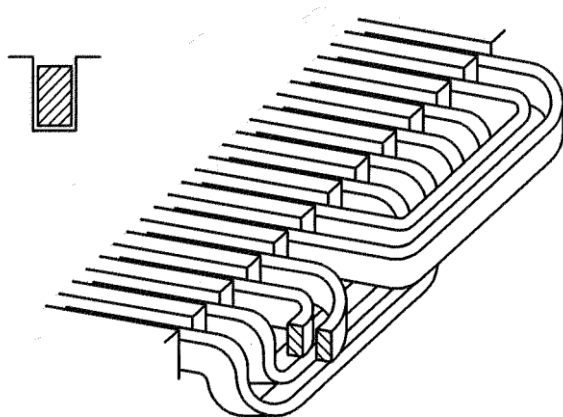
Podle tvaru cívek se vinutí dělí na

- vinutí se stejnými cívkami
- vinutí se soustřednými cívkami

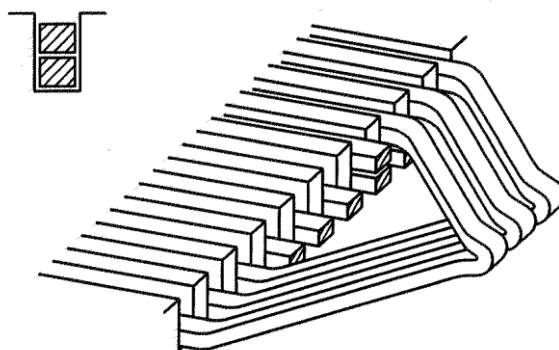
Podle uložení cívek v drážkách jsou vinutí

a) jednovrstvá – v každé drážce je jen jedna cívková strana, a proto je počet cívek poloviční než počet drážek – obr . 2.5

$$N_c = \frac{Q}{2}$$



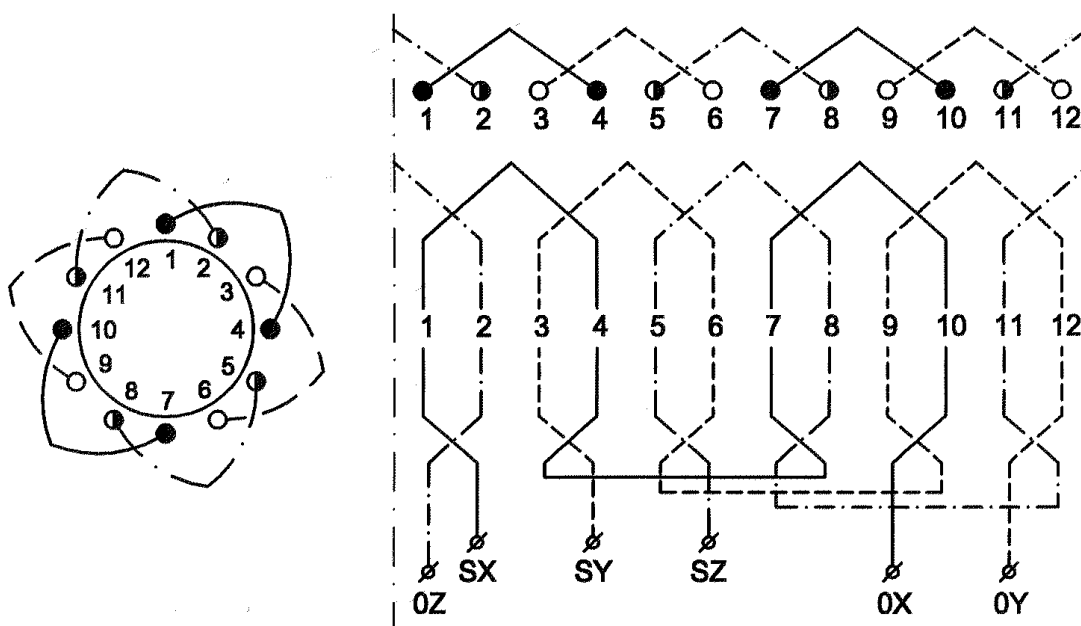
Obr. 2.5



Obr. 2.6

b) dvouvrstvá - cívka zaplňuje jednou cívkovou stranou dolní polovinu drážky a druhou cívkovou stranou horní polovinu drážky. V drážce jsou dvě cívkové strany různých cívek. Cívek je tolik, kolik je drážek, tedy $N_c=Q$, viz obr.2.6.

Jak vinutí jednovrstvé tak i dvouvrstvé mohou být provedena se stejnými cívkami nebo s cívkami soustřednými. Při kreslení schémat vinutí kreslíme cívky jednoduchými čarami, jako by cívky měly jeden závit, Schémata se mohou kreslit mnoha způsoby . Nejčastější způsob kreslení je pohled do dutiny rozvinutého statoru nebo rotoru. Stator nebo rotor je rozvinut do roviny. Takto je možno nakreslit celé cívky i s vnějšími spoji v jednom obrázku. Na obr.2.7 je nakreslen příklad kreslení takového vinutí. Pro rozlišení fází jsou kresleny různými čarami. Elektromotorická napětí indukovaná pod sousedními póly mají opačný smysl což se znázorňuje šipkami.



Obr. 2.7

Výhodou dvouvrstvých vinutí je možnost zkrácení kroku . Vhodným zkrácením kroku se zlepši tvar magnetického pole. Nevýhodou je, že při zkrácení kroku přijdou do jedné drážky cívkové strany různých fází, takže vrstvy musí být izolovány na plné sdružené napětí. Dvouvrstvých vsypávaných vinutí se soustřednými cívkami se užívá u malých nízkonapěťových strojů. Jako příklad je na obr.str.31 (DO PŘÍLOHY??) uvedeno vinutí $2p=4$, $q=4$, $Q=48$, $m=3$. Krok je zkrácen na $5/6$ tj.

$$y = \frac{5}{6}t_p = \frac{5}{6}mq = \frac{5}{6} \cdot 3 \cdot 4 = 10$$

Takto byl vypočítán střední zkrácený krok. Skutečné kroky jednotlivých cívek jsou

- $y_1 = 13$ drážek tj. z drážky 1 do 14
- $y_2 = 11$ drážek 2 do 13
- $y_3 = 9$ drážek 3 do 12
- $y_4 = 7$ drážek 4 do 11

Činitel vinutí k_v

Jak bylo uvedeno v základech elektrických strojů je velikost indukovaného napětí ovlivněna také činitelem vinutí. Činitel vinutí k_v vyjadřuje zmenšení indukovaného napětí rozložením vinutí do drážek , zkrácením kroku, případně dalšími nutnými konstrukčními zásahy v elektrickém stroji. (zešíkmení drážek atd.). Čím větší je tento činitel tím lepší je využití

vinutí a tím i stroje. Obecně se činitel vinutí rovná podílu geometrického a aritmetického součtu drážkových napětí, tedy

$k_v = \text{geometrický součet drážkových napětí} / \text{algebraický součet drážkových napětí}$

Pokud je krok plný je činitel vinutí k_v roven činiteli rozlohy k_r . To je případ jednovrstvých vinutí. Je-li však krok vinutí zkrácen nebo prodloužen, je třeba respektovat také tuto skutečnost, která ovlivňuje zmenšení výsledného elektromotorického napětí, což se děje zavedením činitele kroku k_y . Celkový činitel vinutí se pak stanoví

$$k_v = k_r \cdot k_y$$

Zešikmení drážek

Dosavadní úvahy o indukovaném napětí byly odvozeny pro statorové a rotorové vinutí, jejichž osy drážek byly rovnoběžné s osou stroje. Jak bude dále uvedeno otevřené drážky na statoru vyvolávají při malé vzduchové mezeře, což je příznačné pro asynchronní stroje, pulsace magnetického toku, a tím přídavné ztráty na povrchu rotoru. V křivce toku vznikají drážkové harmonické. Těmto drážkovým harmonickým se bráníme zešikmením drážek o úhel γ . Napětí indukované v zešikmeném vodiči se zmenší proti nezešikmenému v poměru vektorového součtu k aritmetickému součtu indukovaných napětí.

Otázky ke kap.2.2.2

Jaké druhy střídavých vinutí znáte

1. Popište rozdíl mezi jednovrstvým a dvouvrstevným vinutím
2. Co vyjadřuje činitel vinutí
3. Proč se zešikmují drážky
4. Vypočítejte krok vinutí je-li dán počet drážek Q a počet pólů $2p$

2.2.3 Vinutí stejnosměrných strojů

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly bude student umět

- Vysvětlit základní pojmy stejnosměrných vinutí
- Popsat funkci a účel vinutí ve stejnosměrných strojích

Výklad

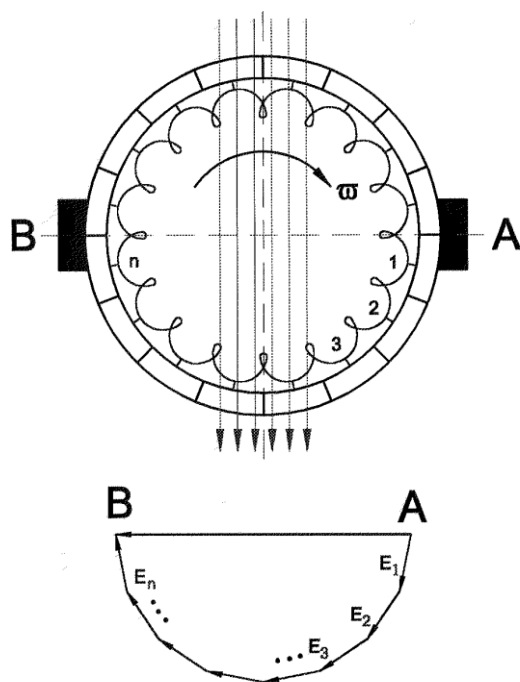
Základní pojmy a rozdělení vinutí

Stejnosemné stroje mají několik druhů vinutí. Jsou to

- vinutí hlavních pólů nebo také budící vinutí je tvořeno kompaktními cívkami, které jsou nasazené na mg. jádra hl. pólů,
- vinutí pomocných pólů nebo také komutačních pólů jsou opět tvořena cívkami nasazenými na jádra pomocných pólů. Oproti cívkám hlavních pólů jsou však tvořeny méně závitů a vodiči většího průřezu neboť jimi protéká kotevní proud,
- kompenzační vinutí je většinou vytvořeno z tyčí uložených v drážkách pólových nástavců hl. pólů. Tyče jsou izolovány a vzájemně pospojovány. I tímto vinutím protéká kotevní proud,
- vinutí kotvy, které je rozloženo v drážkách rotoru spojeno s komutátorem.

Pokud tedy zde budeme rozebírat stejnosměrná vinutí budeme mít vždy na mysli vinutí kotvy.

Vinutí kotvy stejnosměrného stroje je ta část stroje, v níž vzniká pohybem v magnetickém poli elektromagnetické napětí. Vinutí kotvy jsou téměř výhradně uzavřená tj. taková, že se při sledování obvodu kotevního vinutí pohybujeme po uzavřené dráze, takže vinutí nikde nezačíná a nikde nekončí. Z vinutí jsou vyvedeny odbočky k lamelám komutátoru. Nejmenší část vinutí, ležící mezi dvěma sousedními vývody nazýváme cívkou. Obecně však vývody cívky nemusí vždy vést ke dvěma sousedním lamelám. U uzavřeného vinutí není proudový obvod přerušen a komutující cívka se pouze přesouvá z jedné paralelní větve do druhé, která má opačnou polaritu. Uzavřenost vinutí vyplývá také z požadavku souměrnosti všech cívek tvořících dohromady celé vinutí. Pokud z každého vývodu se přiložením kartáčů dělí dvě poloviny do dvou paralelních větví elektricky naprosto stejných. Minimální počet paralelních větví je tedy dvě. Počet paralelních větví musí být vždy sudý. Z tohoto důvodu mluvíme u ss strojů o párech paralelních větví, jejichž počet označujeme a . Počet paralelních větví je pak $2a$. Stejnosměrné uzavřené vinutí je schématicky znázorněno na obr. 2.8.



Obr. 2.8

Aby bylo zvlnění svorkového napětí u dynama a průběh kolísání momentu u motoru co nejmenší má být počet cívek co největší.

Během vývoje ss strojů se dospělo k používání vinutí uloženého v drážkách. Obě strany cívky jsou aktivní, což znamená, že se v obou indukuje elektromotorické napětí. Jedna strana cívky leží pod severním pólem a druhá pod jižním pólem a jsou navzájem spojeny v sérii.

Vinutí kotev ss strojů dělíme podle různých hledisek:

- a) podle tvaru cívky a uspořádání spojek ke komutátoru
 - vinutí smyčková, jejichž aktivní strany i všechny spojky dávají tvar smyčky

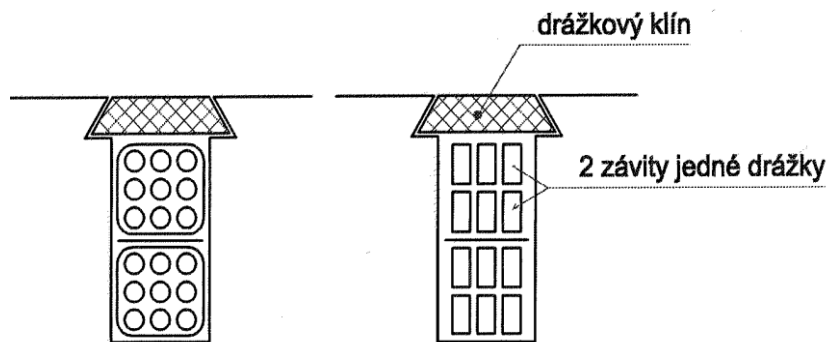
- vlnutí vlnová, jejichž aktivní strany a spojky jsou ve tvaru vlny
- smíšená vlnutí, skládající se ze dvou samostatných vlnutí a to jednak vlnového jednak smyčkového a jsou připojeny k jednomu komutátoru. Obvykle bývají čtyřvrstvá.

Tedy cívka vlnutá z drátů je v podstatě stejná u vlnutí vlnového a smyčkového – liší se navzájem pouze připojením konců ke komutátoru.

b) podle počtu závitů v cívce

- má-li cívka více závitů, obecně N_Z jde o vlnutí závitové
- je-li $N_Z = 1$ tj. cívka má pouze jeden závit jedná se o vlnutí tyčové

U stejnosměrných strojů se téměř zásadně používá vlnutí dvouvrstevných. Přední strana cívky se ukládá do horní vrstvy v drážce – blíž vzduchové mezery a zadní do spodní vrstvy. Řez drážkami s takovýmto vlnutím je na obr. 2.9.



a Obr. 2.9 b

Obr. 2.9a představuje drážku s jednou přední a jednou zadní stranou dvou různých cívek, které se skládají z devíti závitů z kulatého izolovaného vodiče. Obr. 2.9b ukazuje drážku se čtyřmi předními a čtyřmi zadními cívkovými stranami vedle sebe tj. počet cívek v drážce $u = 3$. Každá cívka může být buď z více závitů (na obr. ze dvou nad sebou) nebo pouze z jedné tyče. Odpovídající druhé strany cívek jsou uloženy v drážkách vzdálených o krok cívek (obvykle o t_p). Počet cívek stroje se rovná počtu lamel. V jedné drážce je „u“ cívkových stran ve dvou vrstvách..

Vlnové vlnutí

Je tak nazváno podle tvaru cívek- viz obr... Cívka zde má rozpětí – tedy krok, přibližně rovné pólové rozteči, aby se v jejich cívkových stranách indukovalo napětí opačné polarity pod různými póly. Na obr. ..b je cívka s více závitů, ale začátek a konec cívky je připojen ke komutátoru jako u cívky s jedním závitěm. V obou případech jsou konce vlnové cívky připojeny ke dvěma lamelám, které jsou vzdáleny od sebe přibližně o dvě pólové rozteče, takže cívka může spojit dva souhlasné kartáče nakrátko nebo opačně (cívka je zkratována dvěma kartáči téže polarity vzdálené od sebe o dvě pólové rozteče) pochopitelně za využití spojky mezi oběma kartáči.

Na dalším obr. .. je schéma překresleno, aby bylo vidět spojení kartáčů s cívkami. Jde o vlnové vlnutí s 9 cívkami v 9 drážkách, připojených k 9 lamelám.

Na obr. je čtyřpólové vlnutí vlnové při pohledu na komutátor. Mezi nesouhlasnými kartáči jsou každým směrem tři cívky. Zbývající dívky jsou spojeny nakrátko souhlasnými kartáči. V každé poloze kotvy vůči kartáčům je počet cívek mezi nesouhlasnými kartáči

stejný. Protože jsou souhlasné kartáče spojeny nakrátko cívkami, mohla by stačit jedna řada kartáčů pro každou polaritu. Obvykle se však dávají všechny řady.

c) podle provedení spojek ke komutátoru

- vinutí nekřížená (spojky ke komutátoru se nekříží - obr. 65a)
- vinutí křížená (spojky ke komutátoru se kříží – obr. 65b)

e) podle počtu dvojic paralelních větví

- vinutí sériová s $a = 1$
- sérioparalelní s $a < p$
- paralelní s $a = p$
- několikaparalelní s $a > p$ nebo také $a = k \cdot p$

f) podle počtu pólů

- dvupólová $2p = 2$, čtyřpólová $2p = 4$, šestipólová, atd.

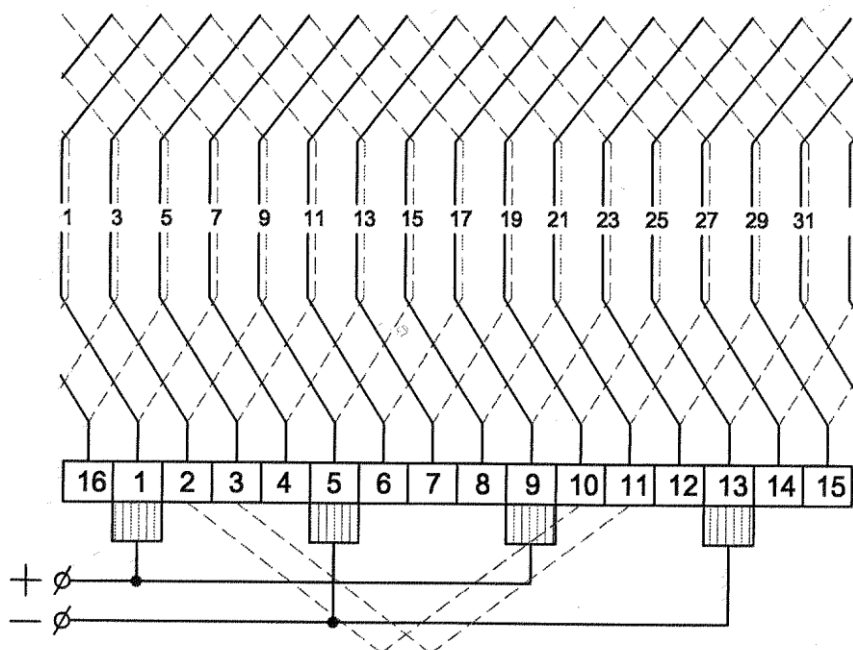
g) podle kroku vinutí

- vinutí s plným krokem rovným pólové rozteči t_p
- vinutí se zkráceným nebo prodlouženým krokem přičemž krok v počtu drážek lze vyjádřit celým číslem, tato vinutí se také nazývají vinutí šablonová,
- vinutí s krokem zkráceným nebo prodlouženým, u nichž krok v počtu drážek je zlomkové číslo – tzv. vinutí přestupné.

h) podle souměrnosti

- vinutí pravidelné
- vinutí nepravidelné

Příklad vinutí stejnosměrného stroje je na obr. ...



Otázky ke kap. 2.2. 3

1. Vyjmenujte vinutí ve stejnosměrném motoru a jejich funkci
2. Kolik řad kartáčů má čtyřpólový motor
3. Jaká vinutí se používají v kotvách stejnosměrných strojů

3. Základní zákony (principy)

3.1 Tvary magnetických polí elektrických strojů

Čas

Cíl Po prostudování této části bude umět

- Popsat mg. pole v el. stroji
- Vysvětlit kmitavé pole
- Popsat vznik točivého pole

Výklad

V elektrotechnice se setkáváme s fyzikálními veličinami jako napětí, proud, magnetický tok apod., které se periodicky mění s časem nebo s polohou. periodické změny nebývají obvykle sinusové, ale mohou mít obecný tvar.

Takovéto periodické nesinusové funkce rozkládáme podle Fouriera na řadu harmonických, a to sinusových i kosinusových a argumenty $x, 2x, 3x \dots vx$ jejich perioda je 2π . Řád příslušné harmonické je v . Obecně lze periodickou křivku $f(x)$ vyjádřit

$$f(x) = a_1 \sin x + a_2 \sin 2x + a_3 \sin 3x + \dots + a_v \sin vx + b_0 + b_1 \cos x + b_2 \cos 2x + b_3 \cos 3x + \dots + b_v \cos vx$$

kde konstantní člen b_0 udává střední hodnotu dané funkce. Tento člen můžeme vyloučit tím, že posuneme osu X do polohy X' o hodnotu b_0 od původní osy. Konstanty $a_1, a_2 \dots$ a jsou amplitudy sinusových členů a podobně amplitudy kosinusových členů jsou b_1, b_2, \dots . Hodnoty těchto amplitud určíme ze vztahů

$$a_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin vx dx \quad v = 1, 2, 3, \dots$$

$$b_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos vx dx \quad v = 1, 2, 3, \dots$$

Příklady magnetických polí:

Obdélníkové pole – vytvoří jeden závit s plným krokem na kotvě elektrického stroje. Jelikož křivka je souměrná k ose X a k počátku, bude Fourierova řada obsahovat jen liché sinusové členy.

Je-li $y = f(x)$ rovnicí křivky, která zobrazuje tvar pak je amplituda v –té sinusové

harmonické dána $a_v = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \sin vx dx$, kde π je pólová rozteč stroje. Mějme obdélníkové pole

indukce ve vzduchové mezeře o konstantní velikosti B (např. u synchronních strojů) pak

$$y = konst = B.$$

Koeficienty řady se pak určí ze vztahu

$$a_v = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I}{v}, \text{ kde } v \text{ je liché číslo}$$

a rozklad obdélníkového průběhu má tvar

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \cdot I \cdot \left(\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right)$$

Prochází-li osa Y středem obdélníku pak sinusové členy budou rovny nule a koeficienty kosinusových členů vypočítáme ze vztahu

$$b_v = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I}{v} \cdot \sin\left(v - \frac{\pi}{2}\right)$$

Pro sudé v je $b_v = 0$. Je-li v liché a tvaru $v = 4n + 1$ bude $\sin \frac{\pi}{2} = 1$ a podobně pro $v = 4n - 1$

bude $\sin \frac{\pi}{2} = -1$, kde n je celé číslo amplitudy jednotlivých harmonických budou dány

$$b_v = \pm \frac{4I}{\pi v}$$

Křivka pak bude vyjádřena řadou

$$f(x) = \frac{4I}{\pi v} \cdot \left(\cos x - \frac{1}{3} \cos 3x - \frac{1}{5} \cos 5x - \frac{1}{7} \cos 7x \dots \right)$$

Kmitavé magnetické pole

V předcházející kapitole jsme se zajímali o tvary magnetických polí. Všimněme si nyní jak se s časem mění velikost amplitudy magnetického pole. Předpokládejme, že máme dlouhou cívku protékanou proudem i . Směr siločar uvnitř cívky určíme pravidlem pravé ruky nebo také pravotočivého šroubu – obr. 1. Siločáry jsou rovnoběžné, takže hovoříme o homogenním magnetickém poli.

Magnetický tok určíme z Hopkinsonova zákona $\phi = \frac{F_m}{R_m}$ kde $F_m = N \cdot i$ pak $\phi = \frac{N \cdot i}{R_m}$.

Tato rovnice je platná jak pro okamžité střídavé hodnoty, tak i pro hodnoty efektivní a časově neproměnné. Mezi tokem ϕ a budícím proudem i není žádný časový posuv. To znamená, že protéká-li cívkou proud, jehož okamžitá hodnota je

$$i = I_{\max} \cdot \sin \omega t$$

vzniká magnetické pole, jehož okamžitá hodnota, za předpokladu = konst. (uvažován vzduch), je

$$\phi = \phi_{\max} \cdot \sin \omega t$$

Magnetické pole mění svoji velikost od 0 do ϕ_{\max} , do 0 a do $-\phi_{\max}$, podobně jako budící proud – **obr. 12**. Toto pole je magnetické pole kmitavé nebo také pulsující.

V případě, že magnetický obvod není vzduch, ale feromagnetický materiálem nebude změna toku při sinusovém budícím proudu sinusová, ale v důsledku nasycení bude její průběh obsahovat i jiné harmonické, tedy obecně bude nesinusový.

Točivé magnetické pole

Rozebereme si nejdříve výsledné magnetické pole dvou cívek A a B, které jsou navzájem kolmé a jsou napájeny střídavými proudy navzájem posunutými o 90° el. Uspořádání cívek je znázorněno **na obr. 13** a průběh magnetických indukcí cívek A a B a vektoru výsledného pole je **na obr. 14**.

Z uvedených obrázků je patrné, že dostáváme rovnoměrné točivé magnetické pole. Výsledné pole má stejnou velikost a během jedné periody se otočí o 360° .

Součtem dvou točivým polí různých amplitud, otáčejících se v opačných smyslech vznikne točivé pole eliptické nebo je-li fázový posun obou polí menší než 90° el. Vektor eliptického magnetického pole se otáčí proměnlivou rychlostí a přitom mění svoji velikost.

Dvoufázových proudů a tedy i točivých polí se užívá výjimečně.

Účinky 2p pólového statorového vinutí si můžeme naznačit 2p pólovým permanentním magnetem, který se otáčí rychlostí n . Uvnitř tohoto pole se otáčí rotor (naznačený i vodičem) otáčkami $n < n_s$ (**viz fólie**).

U elektrických strojů se užívá převážně třífázových proudů a tedy i třífázových točivých polí. Toto bude vytvořeno třemi cívkami A, B, C prostorově posunutými o 120° . Budící proudy těchto cívek jsou vzájemně časově posunuty rovněž o 120° . Průběhy magnetických indukcí všech tří cívek a výsledného pole jsou patrné z **obr. 15**.

Tři cívky napájené třífázovým proudem nebo v praxi třífázové vinutí rozložené v drážkách po obvodu stroje, vytvoří točivé pole, jehož velikost je stálá a toto pole se otáčí rovnoměrně synchronní rychlostí.

Podle **obr. 15** máme ve statoru rozložené tři vinutí, jejichž osy jsou vzájemně pootočený o 120° a na tato vinutí jsme přivedli sinusové napětí.

Pro magnetickou indukci B v obecném bodě posunutí od osy vinutí A o úhel α platí

$$B = B_A + B_B + B_C$$

Při sinusovém napětí pak ϕ i B necht' bude také sinusové. Pak označíme-li maximální hodnotu platí $B = B_m \cdot \cos \omega t$

$$B_A = B_{A0} \cdot \cos \alpha = B_m \cdot \cos \omega t + \cos \alpha$$

$$B_B = B_{B0} \cdot \cos(\alpha + 120) = B_m \cdot \cos(\omega t - 120) \cdot \cos(\alpha + 120)$$

$$B_C = B_{C0} \cdot \cos(\alpha + 240) = B_m \cdot \cos(\omega t - 240) \cdot \cos(\alpha + 240)$$

kde B_m je maximální hodnota indukce v ose každého vinutí

$B_{A(b,c)0}$ jsou magnetické indukce v osách příslušného vinutí

Sečtením výrazů

$$B = B_A + B_B + B_C = \frac{3}{2} B_m \cdot \cos(\omega t + \alpha)$$

Magnetické pole se tedy otáčí ve směru hodinových ručiček s úhlovou rychlostí ω a $\alpha = 2\pi$ to odpovídá $2t_p$ za dobu T rovno jedné periodě střídavého proudu. Hodnota fázoru výsledné indukce je konstantní, přičemž rozložení indukce po obvodu statoru je podle sinusového zákona.

Mechanická úhlová rychlost při rozložení vinutí do p pólových dvojic je

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p} \quad [s^{-1}, \text{Hz}]$$

Otáčky pole jsou pak

$$n_s = \frac{\Omega_s}{2\pi} = \frac{f}{p} \quad [\text{ot/s}, \text{Hz}]$$

Jinak také

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad [\text{ot/min}, \text{Hz}]$$

Protože v běžné distribuční síti je frekvence $f = 50\text{Hz}$ a tedy nejvyšší synchronní otáčky pro $2p = 2$ ($p = 1$) jsou 300 ot/min , $2p = 4$ 15000 ot/min , atd.

Sled fází rozhoduje o smyslu otáčení magnetického pole. To tedy znamená, že smysl otáčení lze změnit záměnou přívodů dvou fází u třífázového vinutí.

Otázky k části 3.1

Jaký je obecný tvar mg. pole v el. stroji

1. Kdy vznikne kmitavé pole
2. Jaké jsou podmínky pro vznik točivého pole

3. Vysvětlíte vznik trojfázového kruhového pole
4. Vysvětlíte točivé eliptické pole

3.2 Napětí indukované ve vinutí a elektromechanická přeměna v točivém stroji

Čas – 20 min

Cíl Prostudováním tohoto odstavce získáte vědomosti

- O indukovaném napětí v el. strojích
- Principu elektromechanické přeměny energie

Výklad

Elektrický stroj je jednotný elektromagnetický systém, ve kterém jsou vzájemně spojena magnetická a elektrická pole. Nepřetržitá změna magnetického pole v elektrických strojích se uskutečňuje buď mechanicky nebo elektricky. Základní výpočet provedeme pro sinusové magnetické pole první harmonické. Předpokládáme dále, že se křivka magnetické indukce B či toku ϕ ve vzduchové mezeře stroje pohybuje ve směru kladné osy X úhlovou rychlostí $\omega = 2\pi f$ – **obr. 16**.

V cívkce se podle indukčního zákona indukuje napětí

$$e = -N_c \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

kde N_c je počet závitů cívky spojených v sérii

a jak je patrné z obr. 16 uvažujeme cívku s plným krokem tj. stany cívky jsou od sebe vzdáleny o pólovou rozteč t_p , tedy krok cívky $y = t_p$.

Okamžitá hodnota magnetického toku může však u točivého stroje být funkcí okamžité hodnoty magnetické indukce a také okamžité hodnoty plochy otáčející se cívky, pak

$$e = -N_c \cdot \frac{db}{dt} \cdot S - N_c \cdot \frac{ds}{dt}$$

kde b je okamžitá hodnota magnetické indukce

s je okamžitá hodnota plochy cívky S

První člen rovnice představuje transformační napětí a druhý člen indukované pohybové napětí.

Podle druhu stroje se pak uplatňuje buď jedno nebo druhé napětí a ve výjimečných případech obě napětí (transformační napětí ve stejnosměrných strojích).

Rozebereme si nejdříve případ, kdy B je konstantní – **obr. 17**. Zde platí $s = D \cdot l \cdot \cos\alpha$,
 $\alpha = \omega t$, $D = 2r$, $v = r\omega$ - obv. rychlost

Pak elektromotorické napětí

$$e = -N_c \cdot B \cdot 2rl \cdot \frac{d \cos \omega t}{dt} = N_c B \cdot 2r \cdot l \cdot \omega \cdot \sin \omega t = N_c \cdot 2B \cdot l \cdot v \cdot \sin \omega t$$

Maximální napětí bude indukováno při $\sin \alpha = 1$, tedy $\alpha = 90^\circ$.

Pak $E_{\max} = 2N_c \cdot B \cdot l \cdot v$

Uvažujeme případ, kdy plocha cívky S je konstantní a indukce se mění **podle obr. 16**. Položíme okamžitou hodnotu magnetického toku $\phi = \phi_{\max} \cdot \cos \omega t$. Dosadíme do vztahu

$$e = -N_c \cdot \frac{d\phi}{dt} = N_c \phi_m \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

maximální hodnota bude odpět při $\sin \omega t = 1$ tj. $\omega t = \pi/2$, pak

$$E_{\max} = N_c \cdot \phi_{\max} \cdot \omega$$

a efektivní hodnota

$$E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot N_c \cdot \phi_{\max} \cdot f = 4,44 N_c \cdot \phi_{\max} \cdot f$$

V předcházejících úvahách jsme předpokládali plný krok jedné cívky. Vinutí točivých strojů však je složeno z více cívek a krok cívky nemusí být plný, ale může být zkrácený tj. menší než pólová rozteč a výjimečně i prodloužený, tj. větší než pólová rozteč. Tyto skutečnosti pak respektujeme tzv. činitelem vinutí k_v . Při respektování tohoto činitele vinutí a celkového počtu závitů jedné fáze spojených v sérii N , bude efektivní hodnota elektromotorického napětí m je počet fází

Elektromechanická přeměna energie

Princip elektrického stroje si vysvětlíme na příkladu elementárního stroje tj. vodiče nacházejícího se v magnetickém poli.

Přiložíme k vodiči zevně sílu F a začneme jim pohybovat stálou rychlostí v ve směru kolmé k vektoru indukce B . Ve vodiči se indukuje elektromotorická síla (v názvosloví v souladu s ČSN 010305) nebo jiný používaný název je také elektromotorické napětí

Jestliže k vodiči připojíme odpor R , začne vodičem protékat proud, jehož směr je dán pravidlem pravé ruky (jde zřejmě o Sumcovo pravidlo pravé ruky - indukce B nechť vstupuje kolmo do dlaně pravé ruky, jejíž palec ukazuje směr a smysl rychlosti "v" totožný s mechanickou silou F . Palec je vztyčený kolmo k ostatním prstům, které ukazují směr e a tedy taky proudu i). Je-li magnetické pole neměnné, je i proud konstantní.

Na vodič protékající proudem i bude působit v magnetickém poli elektromagnetická síla, působící proti pohybu vodiče (podle pravidla levé ruky – levou ruku držíme tak, aby vektory B vstupovaly do dlaně a prsty, kromě palce směřovaly ve směru i . Palec, který natočíme tak, aby byl kolmý na ostatní prsty a ležel s nimi v jedné rovině, ukazuje směr síly F_{em}).

Vnější síla působící na vodič, musí být v rovnováze s touto elektromagnetickou silou F_{em} , tedy

$$-F = F_{em}$$

a protože mechanický výkon je $-F \cdot v = p_m$, jsou oba výkony stejně velké, ale opačných znamének. Pak

$$P_e = -P_m$$

Dosud jsme předpokládali, že pohybujeme vodičem a v něm se indukuje elektromotorické napětí. Šlo tedy o elementární generátor.

Jestliže k vodiči nepřiložíme vnější sílu F , ale napájíme jej ze zdroje elektrické energie o napětí e , bude vodičem protékat proud i . Pak v homogenním poli o indukci B bude na vodič působit pouze elektromagnetická síla F_{em} , která podle pravidla levé ruky způsobí pohyb rychlostí v .

V ustáleném stavu stroje bez ztrát, dosáhne rychlost v takové hodnoty, aby elektromagnetická síla F_{em} byla v rovnováze s mechanickou silou, která je dána pouze pasivními odpory. Smysl rychlosti v souhlasí se smyslem elektromagnetické síly. Tento provozní stav je stav motorický.

Elektrický příkon dodávaný tomuto stroji je $p_e = u \cdot i$. Napětí u musí být rovno elektromotorické síle e a úbytku napětí na odporu R

$$u = e + R \cdot i$$

Příkon odebíraný ze sítě

$$u \cdot i = e \cdot i + R \cdot i^2$$

nebo také

$$u \cdot i = B \cdot l \cdot v \cdot i + R \cdot i^2$$

po úpravě

$$u \cdot i = F_{em} \cdot v + R \cdot i^2$$

Elektrický příkon motoru se částečně mění na mechanický výkon, částečně se spotřebovává na krytí elektrických ztrát v motoru.

Jak jsme již uvedli elektrických stroj může pracovat buď jako motor nebo generátor, záleží pouze na tom zda stroji dodáváme mechanický výkon p_m nebo elektrický výkon p_e .

Při analýze mechanického obvodu vycházíme z d'Álembertova principu – vektorový součet vnější a vnitřní síly působící na pohybující se těleso a setrvačné síly tělesa je v každém časovém okamžiku roven nule. Tedy

$$F_k + F_K^* = 0$$

kde F_K je vektor vnějších a vnitřních sil
 F_K^* je vektor setrvačné síly jinak řešeno setrvačný odpor

U rotačních elektrických strojů tento princip převádíme na rovnováhu momentů

$$m_i + \sum m_r = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

kde m_i je vnitřní elektromagnetický moment stroje
 $\sum m_r$ součet všech vnějších aktivních i pasivních momentů působících na hřídeli

$J \frac{d\omega_m}{dt}$ moment setrvačných sil

J moment setrvačnosti rotujících hmot

ω_m mechanická úhlová rychlost rotoru

Otázky ke kap. 3.2

1. Jakými způsoby vzniká indukované napětí

2. Vysvětlete d'Álembertův princip
3. Mění se v elektromotoru elektrická energie na mechanickou přímo ?

4. Transformátory

Čas 20 min

Cíl Po prostudování budete umět

- Definovat transformátor
- Popsat různé druhy
- Znat štítkové hodnoty

Výklad

4.1. ROZDĚLENÍ TRANSFORMÁTORŮ

Transformátor je střídavý elektrický stroj, který pracuje na principu elektromagnetické indukce. Používá se k přeměně elektrické energie určitého napětí na elektrickou energii jiného; případně stejného napětí bez přispění mechanické energie.

Normy rozdělují transformátory na obyčejné transformátory nízkého a malého napětí, síťové napájecí transformátorky, oddělovací ochranné transformátorky, třífázové olejové transformátorky, třífázové říditelné transformátorky, natáčivé transformátory apod.

Setkáváme se také s transformátory pro speciální účely např. pecovými, zkušebními, svařovacími, měřícími apod.

Třífázové transformátory mívají maximální výkony až 1000 MVA a to v třífázovém provedení nebo jako tři jednofázové jednotky. Jmenovitá napětí dosahují 420 i více kV.

V energetické rozvodné síti je široký sortiment energetických transformátorů, říditelných a neříditelných od největších výkonů až pro transformátory distribuční a spotřebitelské sítě.

Podle chlazení aktivních částí se transformátory dělí na:

- suché - chlazení vzduchem, plynem nebo tuhým dielektrikem
- olejové - chlazení olejem nebo jinou izolační kapalinou
- s litou izolací.

4.2. ŠTÍTKOVÉ ÚDAJE TRANSFORMÁTORŮ:

- 1) Druh transformátorů např. distribuční.
- 2) Stanovený výkon v kV.A, MV.A
- 3) Stanovené napětí (u vícefázových transformátorů je to obvykle napětí mezi fázovými svorkami) v kV.
- 4) Stanovený proud (u vícefázových transformátorů je to obvykle proud v přívodním, síťovém vodiči) v A.
- 5) Stanovený kmitočet v Hz.
- 6) Počet fází.
- 7) Znak spojení (u třífázových transformátorů)

např. Yy6 Y vstupní vinutí do hvězdy
y výstupní vinutí do hvězdy
6 hodinový úhel

D,d,z - zapojení vstupního vinutí do trojúhelníka, výstupního vinutí rovněž do trojúhelníka nebo lomené hvězdy.

Hodinový úhel není časový údaj, ale vyjadřuje fázový posuv mezi napětím vstupního a výstupního vinutí. Jedna hodina představuje fázový posuv o 30°.

- 8) Napětí nakrátko u_k (e_k - starší transformátory) v %.
- 9) Druh zatížení - trvalé se značí S1, krátkodobý chod S2, přerušovaný chod - S3, přerušované zatížení - S6, atd.
- 10) Druh chlazení
 - druh chladiva se označuje písmeny např. olej - O, plyn - G, voda - V, vzduch A, pevný izolant - S
 - způsob oběhu chladiva přirozený - N, nucený neřízený - F, nucený řízený - D

příklad označení: ODAF -olejový transformátor s nuceným řízeným oběhem oleje a nuceným ofukováním.
- 11) Druh prostředí, ve kterém může transformátor pracovat.
- 12) Krytí transformátoru.
- 13) Třída izolace vinutí.

Kromě těchto údajů je na štítku uvedena hmotnost potřebná např. pro přepravu nebo nosnost podlahy, hmotnost olejové náplně apod.

4.3. VYMEZENÍ POJMŮ A DEFINIC

Výkonový transformátor je statický předmět se dvěma nebo více vinutími, které pomocí elektromagnetické indukce transformuje jeden systém střídavého napětí a proudu obvykle rozdílných hodnot při stejném kmitočtu za účelem přenosu elektrického výkonu.

Jádrový transformátor má magnetický obvod ve tvaru sloupků. Vinutí bývá obvykle souosé.

Plášťový transformátor má svazek plechů, které tvoří jádro nebo plášť, obklopuje vinutí a obvykle obepíná jeho větší část. Mají obvykle prostřídané vinutí.

Autotransformátor je takový, u něhož alespoň dvě vinutí mají společnou část.

Hermetizovaný transformátor je tak utěsněn, že nemůže dojít k významné výměně mezi jeho obsahem a atmosférou. Dělí se do dvou skupin:

- a) transformátory u nichž celkový objem oleje, vzduchu nebo jiného plynu nebo jakýkoliv vzájemný poměr bude vždy stejný v celém teplotním rozsahu,
- b) transformátory u nichž výše uvedený poměr bude proměnný v závislosti na teplotě. Změny se kompenzují hermetizovanou dilatační nádobou nebo pružnou membránou.

Vinutí je sestava závitů tvořící elektrický obvod připojená na jedno z napětí předepsaných pro transformátor.

Primární vinutí v provozních podmínkách získává činný výkon z napájecí sítě a naopak **sekundární vinutí** předává činný výkon obvodu zátěže.

Jmenovité údaje:

Stanovené napětí vinutí přiložené napětí nebo indukované napětí při chodu naprázdno mezi fázovými svorkami vícefázového vinutí nebo jednofázového vinutí.

Stanovený převod napětí je poměr napětí jednoho vinutí k stanovenému napětí jediného odpovídajícího vinutí, jehož stanovené napětí při chodu naprázdno je nižší nebo stejné.

Stanovený výkon smluvní hodnota zdánlivého výkonu, na kterou jsou transformátory navrženy. Slouží pro garanci výrobce a pro zkoušky. Z ní se určuje hodnota stanoveného proudu při stanoveném napětí za daných podmínek. Obě vinutí dvojvinutového transformátoru mají stejný výkon. U transformátorů s více vinutími může být stanovený výkon jednotlivých vinutí různý.

Stanovený proud protékající fázovou svorkou vinutí je dán dělením stanoveného výkonu vinutí stanoveným napětím vinutí a příslušným fázovým činitelem.

Ztráty naprázdno je činný výkon spotřebovaný v transformátoru při přiložení stanoveného napětí stanoveného kmitočtu ke svorkám jednoho z vinutí a při rozpojení ostatních. Proud naprázdno je proud tekoucí fázovou svorkou vinutí při přiložení napětí stanoveného kmitočtu, když svorky druhého vinutí jsou rozpojeny.

Ztráty nakrátko je činný výkon spotřebovaný při průchodu stanoveného proudu stanoveného kmitočtu přes fázové svorky jednoho z vinutí při zkratovaných svorkách jiného vinutí.

Přídavné ztráty při zkoušce nakrátko je rozdíl ztrát nakrátko a ztrát $R I^2$. **Celkové ztráty** jsou součtem ztrát naprázdno a nakrátko.

Napětí nakrátko je napětí, které je třeba přiložit při stanoveném kmitočtu k fázovým svorkám jednoho z vinutí transformátory s více vinutími, aby se při zkratovaném druhém vinutí vytvořil stanovený proud.

Impedance nakrátko ekvivalentní impedance ve spojení do hvězdy při stanoveném kmitočtu vyjádřená v ohmech na fázi a vztažená k jednomu vinutí. Měří se mezi svorkami jednoho vinutí, když druhé je zkratováno.

Úbytek nebo vzrůst napětí je aritmetický rozdíl mezi napětím naprázdno daného vinutí a napětím na svorkách téhož vinutí při daném zatížení a daném účinníku, když napětí přiložené k druhému vinutí se bude rovnat stanovenému napětí

Zapojení do hvězdy - jeden konec každého vinutí každé fáze je zapojen do společného bodu tj. uzlu a druhý konec je připojen k odpovídající fázové svorce.

Zapojení do trojúhelníka je uspořádané tak, že fázová vinutí trojfázového transformátory pro stejné stanovené napětí, které tvoří trojfázovou skupinu jsou spojena do série a vytvářejí uzavřený obvod.

Zapojení do lomené hvězdy - jeden konec každé fáze vícefázového vinutí je připojen do společného uzlu, přičemž vinutí každé fáze sestává ze dvou částí do nichž se indukují napětí s fázovým rozdílem.

Fázové posunutí, fázový rozdíl je úhlový rozdíl mezi fázory reprezentující napětí mezi středem dvou vinutí.

Z N A K S P O J E N Í dohodnuté označení pro druhy spojení vinutí vyššího, středního (je-li) a nižšího napětí. Jejich relativní fázový rozdíl se skládá z kombinace písmen a hodinového čísla.

Otázky (kap. 4.1 ,4.2,4.3)

1. K čemu slouží transformátor
2. Proč musí mít transformátor štítek
3. Vyjmenujte vinutí transformátorů
4. Rozdíl mezi jádrovým a plášťovým transformátorem

4.4 Provoz transformátorů

Čas : 1 hod

Cíl Po prostudování budete umět

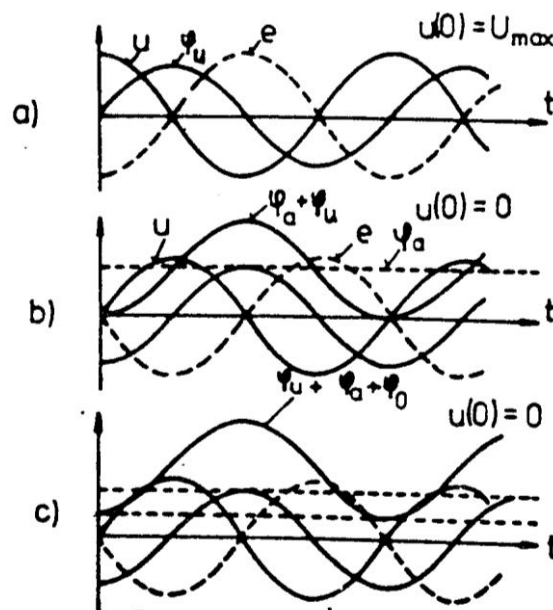
- posoudit děje při zapínání transformátoru
- vysvětlit účinky a příčiny zkratu na transformátoru
- zhodnotit nesymetrické děje v transformátoru

Výklad

4.4.1 ZAPÍNACÍ PROUD

Poměrně velký proud může protékat vinutím transformátoru nejen při zkratech, přetíženích apod., ale i při zapnutí transformátoru na síť. Proud naprázdno je v ustáleném stavu obvykle malý a činí jen několik procent jmenovitého proudu (1 - 10% - nižší hodnota platí pro větší transformátory). Při připojení transformátoru na síť může vzniknout přechodný děj, během kterého proud naprázdno dosáhne větší hodnoty než jmenovitý proud.

Nejprve uvažujeme připojení jednofázového nezátíženého transformátoru na síť. Pro zjednodušení zanedbejme ohmický odpor vinutí a ztráty v železe. Pak se proud zpožďuje za napětím o 90° .



obr. 4.1

1. Je-li transformátor připojen v okamžiku, kdy napětí dosáhne maxima (obr.4.1), pak tok v jádře (magnetickém obvodu), neuvažujeme-li remanenci a úbytky napětí, prochází nulou.

Je tedy zpožděn o 90° za napětím. Fázový posun mezi napětím a tokem v okamžiku zapnutí odpovídá fázovému posunu v ustáleném stavu. Přechodný děj nevznikne.

2. Transformátor je připojen k síti v okamžiku, kdy napětí prochází nulou (obr.4.1). Nulovému napětí odpovídá maximální hodnota toku při ustáleném stavu. V okamžiku zapnutí je skutečný tok nulový (neuvažujeme remanenci). Vzniká přechodový děj, při kterém vznikne stejnosměrná přechodová složka. Ta je v tomto případě maximální a přičítá se k ustálenému průběhu toku. Výsledný tok v tomto případě může dosáhnout až dvojnásobné hodnoty. Stejnosměrná složka zaniká u velkých transformátorů asi po 20 sek. u menších asi po 4 - 6 sek.
3. Dosud jsme zanedbávali remanentní tok φ_0 . Ten může zvětšit hodnotu výsledného toku jak je naznačeno na obr. 4.1.

Uvažujeme-li i vliv remanence, může zapínací proud dosáhnout $(50 - 100) I_0$ 4 - 6-ti násobku jmenovitého proudu

$$I_{zap} = (4-6)I_n$$

Přesné zjištění zapínacího proudu u třífázového transformátoru je ztíženo, protože je obtížné zjistit hodnotu a smysl remanentního toku, vzájemný vliv jednotlivých jader a případnou možností nestejného časového okamžiku zapnutí jednotlivých fází.

Dynamické a tepelné účinky zapínacího proudu nejsou nebezpečné. Může však dojít k chybnému odpojení transformátoru při zapínání, a proto je nutno s tímto zapínáním proudu uvažovat při návrhu jisticích prvků transformátoru.

4. 4.2 STAV NAKRÁTKO A ZKRAT TRANSFORMÁTORU

Při měření nakrátko jsou svorky výstupního vinutí spojeny nakrátko. Na svorky vstupního vinutí je přiloženo takové napětí, aby oběma vinutími tekly jmenovité proudy. Toto napětí vstupního vinutí nazýváme napětím nakrátko.

$$U_{1k} = Z_{1k} \cdot I_{1k}$$

U_{1k} napětí nakrátko, když vinutími prochází jmenovitý proud, je podstatně nižší než jmenovité

I_{1k} jmenovitý proud

Z_{1k} impedance nakrátko

Hodnota napětí nakrátko se obvykle vyjadřuje v procentní hodnotě ve vztahu k jmenovitému napětí. Jeho hodnota je uvedena na štítku transformátoru a bývá nejčastěji 3 – 12 %.

$$u_{1k} = \frac{U_{1k}}{U_{1n}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Postupným zvyšováním napětí vstupního vinutí až na jmenovitou hodnotu, by proud vzrůstal až dosáhne hodnotu, kterou nazýváme ustáleným zkratovým proudem. Při zkoumání přechodného děje proudů náhlého zkratu jej nazýváme ustálenou složkou zkratového proudu i'_{1k} .

Jeho efektivní hodnotu můžeme vypočítat

$$I'_{1k} = I_{1n} \cdot \frac{U_{1n}}{U_{1k}} = I_{1k} \cdot \frac{100}{u_{1k}}$$

Zkrat transformátoru je poruchový stav, kdy při jmenovitém napětí jsou svorky výstupního vinutí náhle zkratovány. Zkrat všech tří svorek výstupního vinutí nazýváme symetrický, ostatní označujeme jako nesymetrické. Zkratové proudy ve vinutí transformátoru jsou největší při symetrickém zkratu. Výjimku tvoří zapojení hvězda. Při jednopólovém zkratu, na straně lomené hvězdy, protéká zkratovaným vinutím proud přibližně o 40 % větší než u symetrického zkratu.

Při rozboru zkratového proudu musíme přihlížet k přechodnému ději. Nevystačíme jen s ustáleným zkratovým proudem. Při tom budeme vycházet ze symetrického zkratu. Při řešení napěťových rovnic vstupního vinutí pro zkrat dostaneme pro zkratový proud vztah, kdy okamžitá hodnota zkratového proudu nakrátko při přechodném ději je rovna součtu ustálené a přechodné stejnosměrné složky proudu.

$$i_{1k} = i'_{1k} + i''_{1k}$$

i_{1k} okamžitá hodnota zkratového proudu při přechodném ději

i'_{1k} okamžitá hodnota zkratového ustáleného proudu

i''_{1k} přechodná stejnosměrná složka zkratového proudu

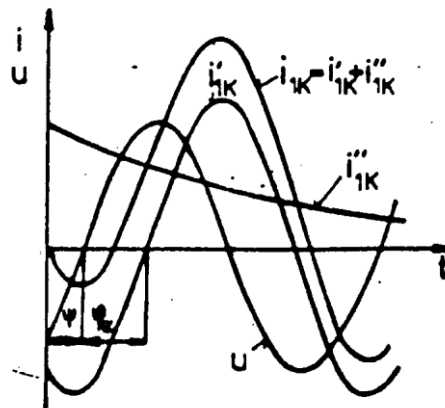
Přechodná složka s časovou konstantou

$$\tau_k = \frac{L_{1k}}{R_{1k}}$$

L_{1k} reaktance nakrátko

R_{1k} odpor při chodu nakrátko

Grafické zobrazení přechodného děje zkratového proudu je na obr.4. 2.



Obr. 4. 2

Přechodná stejnosměrná složka zkratového proudu nevznikne, jestliže zkrat nastane v okamžiku, kdy napětí vstupního vinutí dosáhne své maximální hodnoty.

Přechodná stejnosměrná složka má maximální hodnotu, když dojde ke zkratu, v okamžiku, kdy vstupní napětí prochází nulou.

Je pochopitelné, že v okamžiku vzniku zkratu je v každé fázi jiná okamžitá hodnota napětí. Tedy i velikost okamžité hodnoty přechodné stejnosměrné složky bude v každé fázi různá.

4.4.3 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ

Při provozu transformátoru může dojít k nesymetrickému zatížení vyvolanému obvykle velkou jednofázovou zátěží (např. el. pece apod.). Proudů a napětí jednotlivých fází jsou pak různé. Nesymetrické zatížení se řeší pomocí metody souměrných složek, tj. rozkladem nesouměrné soustavy na soustavu souslednou, zpětnou a netočivou. Při všech úvahách předpokládáme, že na primární straně je trafo připojeno na souměrná napětí.

Chování transformátorů při nesymetrickém zařazení je ovlivněno zapojením jeho vinutí. Z tohoto důvodu musí být rozbor prováděn pro jednotlivá zapojení vinutí samostatně. Ve všech těchto rozbořích zanedbáváme magnetizační proud I_m (nebo je 1 – 10 % I_n).

Pro souslednou a zpětnou soustavu má transformátor stejné rozptylové reaktance, protože jeho vinutí a mg. obvody se nepohybují. Pro netočivou soustavu může mít reaktanci různou podle uspořádání mg. obvodu. Netočivou soustavu tvoří soustava veličin základního kmitočtu, které mají v každém okamžiku stejnou fázi a velikost (konfázni veličiny). Na chod transformátoru má nepříznivý vliv právě netočivá soustava, a proto se v dalším budeme zabývat zvláště účinky této soustavy. Jde o to, zda proudy netočivé soustavy ve vinutí mohou být kompenzovány podobnými proudy ve vinutí výstupním. A to právě záleží na spojení vstupního a výstupního vinutí. Ve výkladu se omezíme pouze na krajní případ nesymetrického zatížení tj. zatížení jedné fáze.

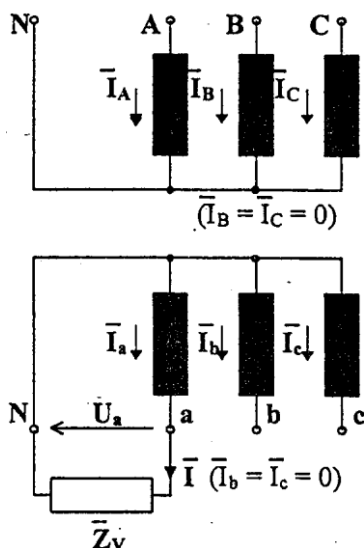
Spojení vinutí Y_y s vyvedeným uzlem na vstupním i výstupní vinutí (Y_{yn})

Při jednofázovém zatížení např. fáze A, jak je naznačeno na obr. 4.3, protéká proud I_a touto fází a uzavírá se zpět přes nulový bod. Odpovídající proud ve vstupním vinutí I_{1A} uzavírá se opět přes nulový bod, vyvolá kompenzující mmn výstupní strany. Tedy musí platit

$$\Phi_{Hdl} = N_1 I_1 = N_2 I_a \quad \text{a pak}$$

$$N_1 I_1 = N_2 I_a$$

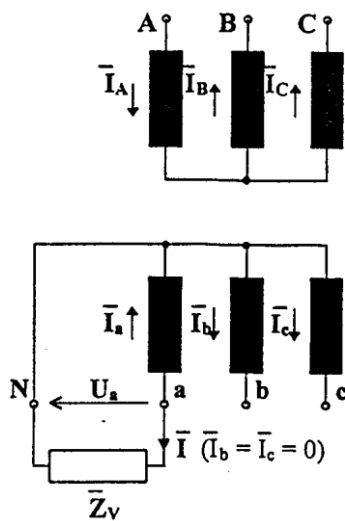
Vstupní fáze bude mít zatížení odpovídající výstupní fázi. Nesymetrické zatížení takto zapojeného transformátoru je tedy možné bez omezení, neboť vstup i výstup jsou v rovnováze.



obr. 4.3

Spojení Y_y s vyvedeným uzlem pouze na výstupní straně

Na obr. 4.4 je znázorněno jednofázové zatížení proudem I pouze ve fázi A. Pro sekundární stranu platí, že $I_a = -I$, $I_b = I_c = 0$ a dále $U_a = -I_a Z_v$, kde Z_v je impedance zátěže. Výstupní proud se tedy uzavírá fází a nulovým vodičem.



obr.4.4

Při předpokladu zanedbání magnetizačního proudu, musí být výsledné mg. napětí na uzavřené dráze $\oint H dl$ - na obr. 4.4 vyznačeno čarami I a II nulové, takže platí

$$I_a N_2 - I_A N_1 - I_B N_1 = 0$$

$$I_B N_1 - I_C N_1 = 0$$

Z druhé rovnice plyne, že $I_B = I_C$ a dosazením do rovnice o dostaneme

$$I_a - 2I_B - I_B = 0$$

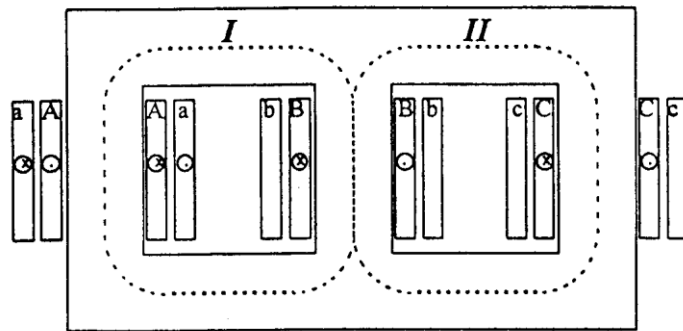
$$\text{Tedy } I_B = I_C = -\frac{I_a}{3}$$

$$a \quad I_A = -\frac{2}{3}I_a \quad \text{nebo také} \quad N_1 I_A = \frac{2}{3}N_2 I_a$$

Na každém jádru zůstávají nekompenzované netočivé magnetické toky, vytvořené jejich mmn. Netočivá soustava magnetických toků indukuje ve všech fázích konfázní napětí, které jsou stejné co do velikostí i do fáze a vytvářejí konfázní toky, které se uzavírají rozptylovými cestami. U plášťových transformátorů se tyto toky uzavírají i přes hlavní mg. obvod (železo), a proto jsou silně vyvinuty. U trojjádrových transformátorů jsou tyto toky nuceny se uzavírat rozptylovými cestami (přes nádobu apod.), indukují vířivé proudy a znamenají zvýšení přidavných ztrát a oteplení.

Indukovaná konfázní napětí způsobují deformaci hvězdice fázových napětí a posunutí nulového bodu.

Je zřejmé, že síťová napětí zůstanou souměrná, neboť při vektorovém rozdílu fázových napětí se konfázní složky algebraicky sčítají. Tento obrázek je pro jednoduchost také kreslen při zanedbání odporu R_0 a úbytku napětí vyvolaném souslednou a zpětnou složkou. K napětí každé fáze se vektorově přičítá složka $I_0 X_0 = 1/3 I_n \cdot Z_n = 1/3 U_n$. Toto má za následek snížení napětí zatížení fáze a zvýšení napětí nezatížených fází, tedy deformaci výstupních fázových napětí.



Obr.4.5

Posunutí bodu z O do o' je tím větší, čím větší je proud v nulovém bodě a impedance nulové složky. U běžných trojjádrových transformátorů, které mají poměrně malou reaktanci se připouští jednofázové zatížení, při němž proud v nulovém bodě nepřekročí 10 % I_n .

Zvláštní případ nesymetrického jednofázového zatížení může být jednofázový zkrat. tzv. $Z_v = 0$. Pak proud při zkratu

$$I_k = \frac{3U_1}{2Z_k + Z_0}$$

Vyjádříme-li si napětím u_k pak

$$I_k = \frac{3U_1}{2Z_k + Z_0} \cdot \frac{100}{\frac{Z_n}{Z_n}} = \frac{300I_n}{2u_k + z_0} \approx \frac{300I_n}{2u_k + X_0}$$

Máme-li transformátor s $X_0 = 50\%$ a $u_k = 8\%$ bude

$$I_k = \frac{300}{2,8 + 50} I_n \approx 4,5 I_n$$

Otázky – 4. 4

1. Jaké děje nastávají při připojení transformátoru na napájecí síť
2. Jsou proudy při připojení transformátoru nebezpečné
3. Proč nastává nesymetrické zatížení transformátorů
4. Jaké má nesymetrické zatížení negativní důsledky
5. Jak zmírníme negativní důsledky při nesymetrickém zatížení
6. Vysvětlíte rozdíl mezi transformátorem nakrátko a zkratem transformátoru
7. K čemu slouží napětí nakrátko

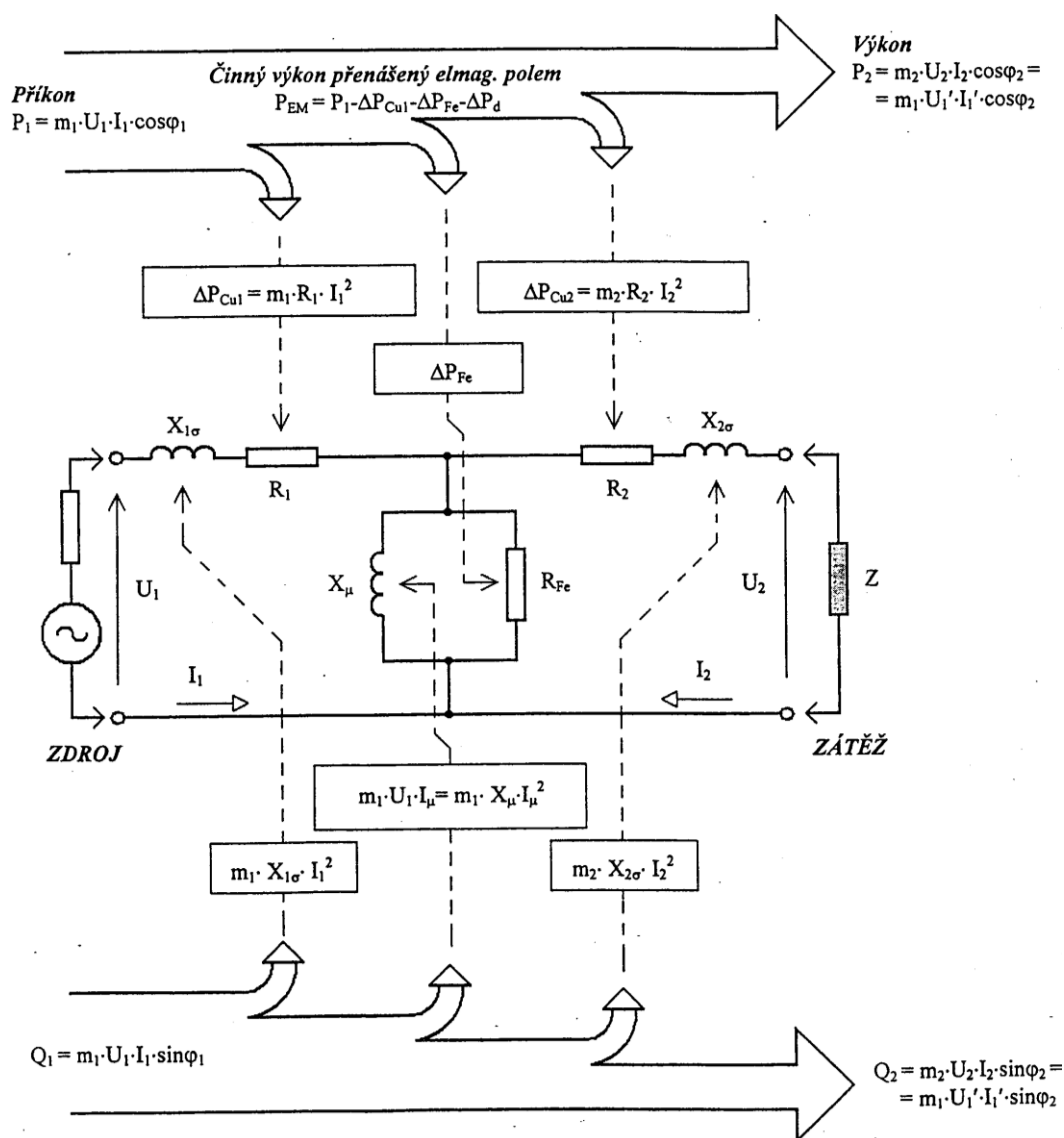
4.5 Energetická bilance transformátorů

Jestliže transformátor pracuje, pak energie přivedená na primární vinutí se, podle zákona o zachování energie, rovná energii na výstupních sekundárních svorkách transformátoru a ztrátám v transformátoru. Graficky je to znázorněno na obr. 4.6. Na tomto obrázku jsou rovněž naznačeny toky jalové tedy magnetizační energie.

Transformátory patří mezi nejvíce používané elektrické stroje a to jak v průmyslu, dopravě i domácnostech. Velmi významnou roli mají v rozvodných energetických sítích. Při úvahách o úsporách elektrické energie a ekonomice provozu je vhodné posoudit i možnosti snížení ztrát transformátorů.

Současná všeobecná tendence k úsporám elektrické energie cestou snižování ztrát při její výrobě, rozvodu i užití se týká všech prvků tohoto systému tedy i transformátorů.

Transformátory patří mezi nejvíce používané elektrické stroje a to jak v průmyslu, dopravě i domácnostech. Největší význam a také největší použití však mají v rozvodných energetických soustavách. Často se uvádí, že instalovaná výkon transformátorů v rozvodné soustavě je až čtyřikrát vyšší než výkon všech generátorů této soustavy. I když jsou transformátory aktivním prvkem energetické soustavy, spotřebují pro svoji činnost určitou část elektrické energie, kterou přenášejí či jejíž parametry přeměňují. Tato energie představuje nutné ztráty s nimiž se musí kalkulovat v nákladech na výrobu a přenos elektrické energie. Je tedy patrné, že vhodná volba transformátoru a jeho úsporný provoz mohou značnou měrou přispět k hospodárnému provozu celé elektrizační soustavy.



Obr. 4. 6

4.6.1. Vývoj transformátorů

Současná doba požaduje i od elektrotechnických výrobků, aby měly nižší hmotnost na jednotku výkonu, ale při současném zvýšení jejich účinnosti, spolehlivosti i životnosti. Často bývá prvotním požadavkem nízká cena. V mnohých elektrotechnických výrobcích se těchto kvalitativně vyšších funkčních i provozních vlastností dosahuje aplikací nových principů nebo nových materiálů. U transformátorů se uvedeným trendům můžeme přizpůsobovat velmi těžko neboť princip činnosti na němž jsou transformátory založeny je po celou dobu od jejich vzniku stejný. Navíc mnohé požadavky jsou často protichůdné (nižší hmotnost, ale vyšší účinnost apod.) a tak je nutno vždy hledat jistý kompromis. Jako u všech výrobků i zde se střetávají protichůdné zájmy výrobců a provozovatelů. Snaha výrobců směřuje vždy k maximální úspoře materiálových i výrobních nákladů. Naopak provozovatelé upřednostňují spolehlivost, nízkou energetickou náročnost a životnost, čehož není možno dosáhnout bez zvýšení nákladů na výrobu.

Uvedeným konstatováním nechceme tvrdit, že v konstrukci transformátorů a materiálech pro ně používaných nedošlo k žádnému pokroku. Podstatně byla zvýšena kvalita plechů pro magnetický obvod, jsou vyráběny transformátory jejichž magnetický obvod je vyroben z amorfních kovů. Používají se izolanty vyšších tepelných tříd a laková izolace převážně měděných vodičů. Nabízí se možnost podstatného snížení ztrát ve vinutí použitím

supravodičů. To je však stále spojeno s celou řadou problémů a tak jsou takové transformátory spíše v etapě výzkumu a vývoje. Olej, jako chladicí a izolační medium je stále používán i když byly snahy o jeho nahrazení ekologičtějšími kapalinami. Rovněž používání elektronegativního plynu SF₆ se zatím nerozšířilo kvůli jeho vysoké ceně.

Jestliže princip činnosti transformátoru zůstává stejný, pak byla pozornost zaměřena na snižování ztrát transformátorů a tedy snižování nákladů na ztrátovou energii, ale také na snižování investičních nákladů.

4.6.2. Náklady na provoz transformátoru

Při hodnocení nákladů na provoz jakéhokoliv zařízení a tedy i transformátorů, musíme respektovat jednak konstantní náklady a náklady proměnné. Někdy se mluví také o nákladech na výkon a na práci. Konstantní náklady jsou nezávislé na odběru či spotřebě elektrické energie. Patří do nich náklady na údržbu, odpisy, režie apod. U transformátorů jsou podstatnou složkou těchto nákladů náklady na ztráty v magnetickém obvodu lépe řečeno na ztráty naprázdno, které jsou při trvalém připojení transformátoru k síti nezávislé na zatížení. Proměnné náklady představují v našem případě náklady na ztráty transformátoru nakrátko. Náklady na roční provoz transformátoru pak můžeme vyjádřit vztahem

$$N_r = N_o + N_k + N_u + O$$

kde N_o jsou náklady na ztráty naprázdno

N_k jsou náklady na ztráty nakrátko

N_u představují náklady na údržbu a obsluhu

O jsou roční odpisy, režie apod.

Jestliže chceme provést rozvahu o hospodárném provozu transformátoru musíme znát a respektovat veškeré uvedené náklady. Toto platí zvláště při úvahách o modernizaci celé rozvodné sítě nebo pouze při výměně strašných typů za transformátory současně vyráběné.

Je patrné, že ve stanovení nákladů bude hrát podstatnou roli cena elektrické energie. Odběratelé elektřiny se pak dělí na kategorie, které zohledňují připojení na síť s různou úrovní napětí. Kromě sazby za odběr elektřiny účtuje dodavatel odběratelům nájemné z měřidla a pomocného zařízení i některé úkony spojené s dodávkou. Pro cenu elektrické energie jsou podstatné rovněž tarifní časová pásma, které určuje dodavatel. Cena je obvykle dvousložková a to cena za elektrický výkon a za elektrickou energii. Cena rovněž zohledňuje velikost induktivního účinníku a při nedodržení smlouvené hodnoty je cena zvyšována. Z těchto úvah vyplývá, že stanovení nákladů na ztráty elektrické energie je velmi složité. Tak např. náklady na ztráty naprázdno v transformátory by měly být vyjádřeny

$$N_o = (N_p + T_p \cdot N_A) P_0 \quad (\text{Kč/rok})$$

kde N_p jsou náklady na výkon (Kč/kWh)

T_p je roční doba provozu (hod)

N_A jsou náklady na energii (Kč/kWh)

P_0 jsou ztráty naprázdno (kW)

Stanovení nákladů na ztráty nakrátko je ještě složitější neboť je nutno respektovat poměrné časové zatížení transformátoru i proměnný účinník.

4.6.3. Ztráty transformátorů

Vývoj ztrát naprázdno a nakrátko distribučních transformátorů se vstupním napětím 22 kV za posledních téměř padesát let slovenského výrobce znázorňují obr. 1 a 2.

Podle ČSN 351121 jsou předepsány ztráty transformátoru naprázdno i nakrátko vždy ve třech variantách. Norma pak doporučuje vhodné kombinace těchto hodnot. Tak např. pro transformátor o výkonu 630 kVA mohou být $P_k = 6500 \text{ W}$ a $P_0 = 1200 \text{ W}$ nebo $P_k = 6500 \text{ W}$ a $P_0 = 800 \text{ W}$ a pod. Pokud hodnoty ztrát neodpovídají aktuálním tržním cenám elektrické energie mohou být transformátory požadovány nebo nabízeny s odlišnými ztrátami než je uvedeno v citované normě. V takovém případě by měl být, na požádání odběratele, k dispozici vzorec pro kapitalizaci ztrát. Tento vzorec může být:

$$C_C = C_T + A \cdot P_0 + B \cdot P_K$$

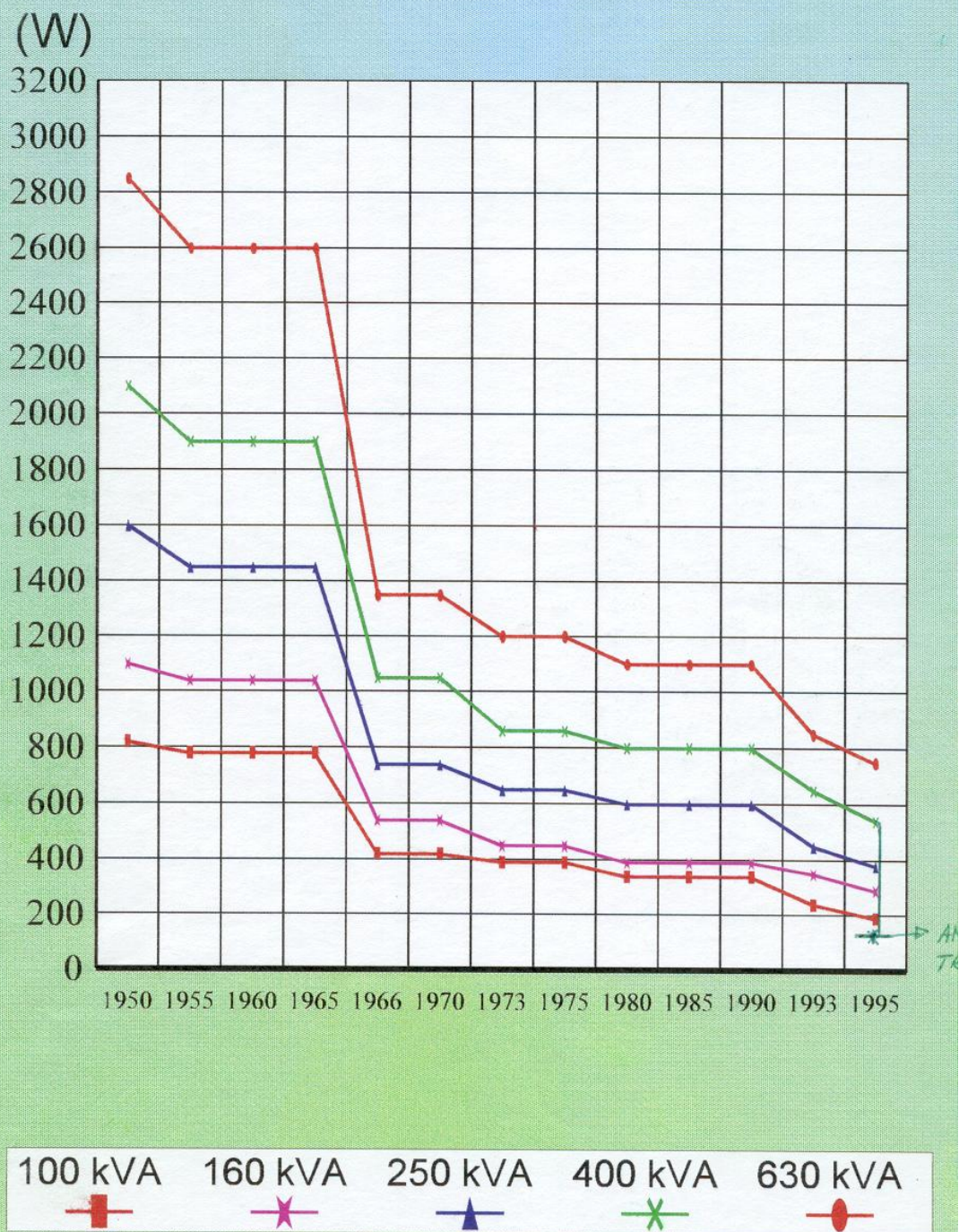
kde C_C je kapitalizovaný náklad

C_T nabídková cena

A, B je cena za 1 W ztrát naprázdno resp. nakrátko.

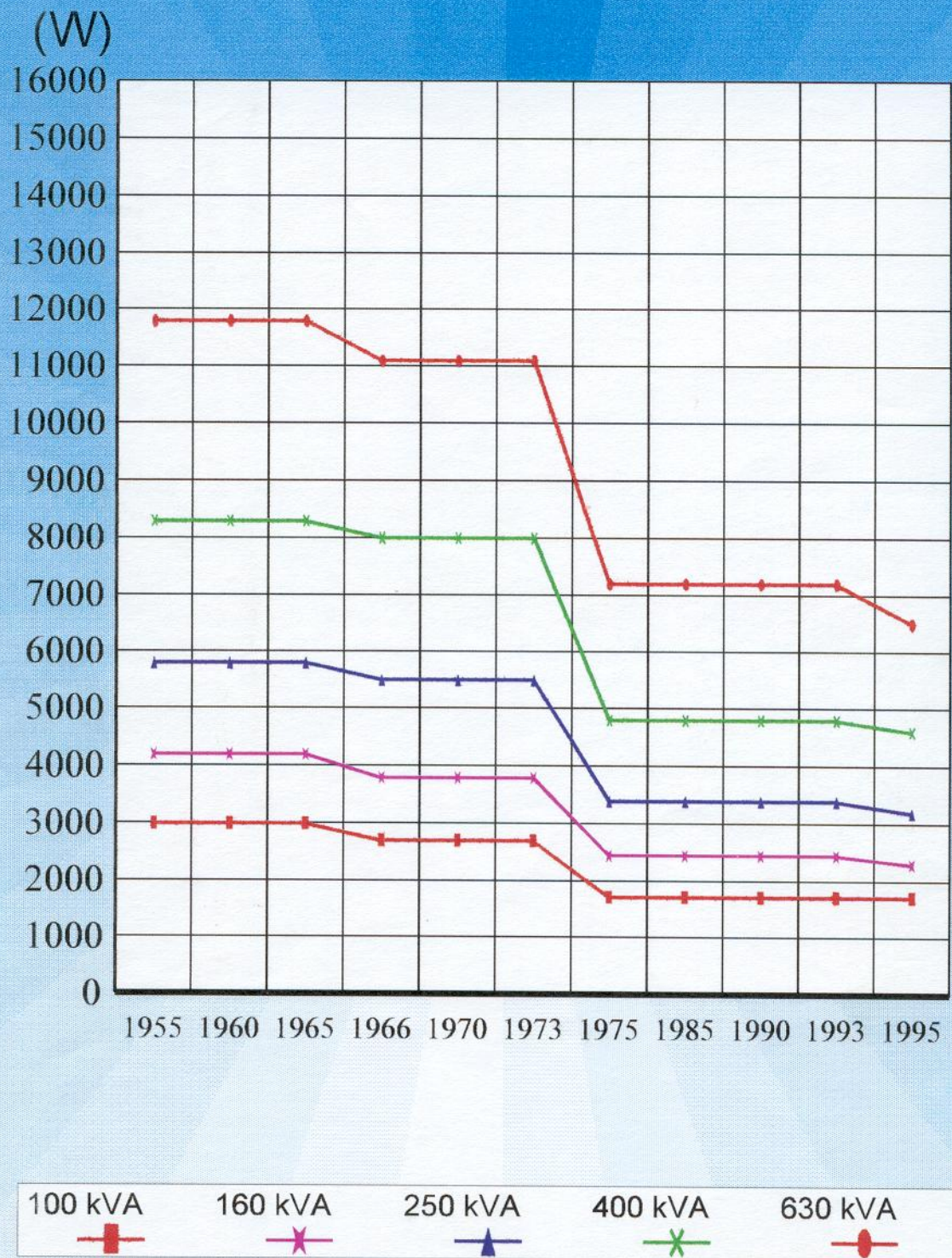
Výrobci pak nabízejí transformátory buď se standardními nebo se sníženými ztrátami naprázdno či nakrátko, ale také mohou být redukovány obojí ztráty. Odběratel si podle předpokládaných zatížení může zvolit transformátor podle výhodné ceny nebo podle velikosti ztrát.

Vývoj strát naprázdno



Obr. 4.7

Vývoj strát nakrátko



Obr. 4.8

Jestliže bychom chtěli stanovit možné úspory elektrické energie použitím účinnějších transformátorů, pak musíme vycházet z toho, že podíl ztrát transformátorů je na celkových ztrátách v distribuční síti mezi 18 až 20 %. Celkové ztráty v síti ČR se pohybuje v mezích 5 až 8% při celkové roční spotřebě elektrické energie okolo 70 TWh.

Počet distribučních transformátorů v ČR se dá stanovit kvalifikovaným odhadem na cca 50000 kusů. Dále je nutno počítat z množstvím transformátorů průmyslových pro napájení pohonů se statickými měniči. Takových transformátorů může být několik tisíc. Vzhledem k dlouhé životnosti transformátorů (desítky roků) je tempo jejich výměn malé.

Otázky kap. 4.6

1. Co přispívá ke zvýšení účinnosti transformátorů
2. Jaké ztráty vznikají v transformátoru
3. Jaký podíl tvoří ztráty transformátorů na ztrátách celé elektrizační soustavy
4. Jak stanovíte náklady na provoz transformátorů

4.7. Některé diagnostické metody používané u transformátorů

4.7.1 Měření kondenzátorových průchodek

Všeobecně

Průchodky vyrobené v ČR se zkouší dle ČSN 34 8160.

V rámci pravidelných profylaktických měření se u kondenzátorových průchodek zjišťují hodnoty ztrátového činitele a kapacity.

Měření ztrátového činitele a kapacity u průchodek, které mají měřicí vývod je možno provádět bez jejich demontáže ze stroje, u ostatních je demontáž nutná a jejich měření se provádí pouze na zkušebně při revizi nebo opravě stroje. kromě pravidelného měření v rámci profylaktiky se provádí měření ztrátového činitele a kapacity vždy před a po každé zkoušce, při které se může porušit hlavní izolace průchodky (např. napěťová zkouška průchodek nebo celého stroje).

Změna kapacity nevyvolaná změnami teploty a náhlá změna ztrátového činitele nebo překročení mezních hodnot upozorňuje na negativní jevy v izolaci průchodky.

Včasně podchycení rozvíjející se závady umožní v krajním případě průchodku vyměnit, dříve než dojde k havárii stroje. Náklady spojené s výměnou průchodky jsou o několik řádů nižší, než oprava nebo instalování celého nového stroje.

Průchodky vyrobené z "tvrdé" izolace prakticky neumožňují jinou kontrolu, než měření ztrátového činitele a kapacity (odběr izolačního oleje většinou nelze provádět).

Vyhodnocení měření

Rozhodnutí o provozuschopnosti kondenzátorových průchodek se učiní na základě vývoje hodnot z pravidelných měření, jejich vztahu k mezním hodnotám a jinak na základě napěťových zkoušek a po proměření napěťové závislosti ztrátového činitele u demontovaných průchodek na zkušebně.

Hodnoty ztrátového činitele průchodek

Druh izolace	Jmenovité napětí [kV]		
	110	220	400
Bariérová izolace			
• nová a po opravě	0,02	0,02	0,01
• v provozu	0,05	0,04	0,02
Měkká izolace			
• nová a po opravě	0,01	0,008	0,007

• v provozu	0,015	0,012	0,010
Měřicí vývod	0,03	0,02	jako hlavní izolace

4.7.2 Postup vysoušení a čistění transformátorového oleje Transformátorový olej

Transformátorový olej představuje jednu z rozhodujících složek chladicího a izolačního systému transformátoru. Jeho kvalita ovlivňuje funkční vlastnosti a životnost transformátoru. Vyrábí se z kvalitní ropy, jejíž uhlovodíky se vyznačují dobrou oxidační stálostí. Vhodnými přísadami (inhibitory) se dosáhne zvýšení tepelně oxidační stálosti, zamezí se agresivnímu působení na konstrukční a izolační systém transformátoru ap.

Za provozu transformátoru je olej znehodnocován působením prostředí a provozním zatížením. Jde zejména o to, aby nevznikaly vodní emulze, případně volná voda, dále nesmí vzniknout kaly a usazeniny.

- Emulgovaná nebo volná voda způsobuje snížení průrazného napětí oleje, pokles resistivity a zhoršení všech dielektrických parametrů. Kaly a usazeniny, kromě omezení chladicí schopnosti snižují životnost olejové náplně.

Z těchto důvodů musíme oleje kontrolovat, a to: při převímce od dodavatele, před plněním do transformátoru, před uvedením transformátoru do provozu a periodicky v průběhu provozu.

Měřením se ověřuje: ztrátový činitel, číslo kyselosti, obsah vody, průrazné napětí. Intervaly provozních kontrol jsou:

- u transformátorů wn/wn nad 100 MVA - 1 x za rok
- u transformátorů vvn/vn nad 50 MVA - 1 x za 2 roky
- u transformátorů wn/vn do 50 MVA - 1 X za 4 roky
- u transformátorů vn/vn a vn/nn - 1 x za 4 roky

Zvýšenou pozornost je nutno věnovat odběru, uskladnění a dopravě vzorků oleje do laboratoře ke zkouškám, aby nedošlo k jeho dalšímu znehodnocování. Vzorky se odebírají dvěma způsoby: - bez styku odebíraného oleje s atmosférou - odběr oleje za přístupu vzduchu.

Prvý způsob se užívá při stanovení plynů, rozpuštěných v oleji a při stanovení obsahu vody. Odběr za přístupu vzduchu do skleněné láhve je postačující pro ostatní zkoušky. Nelze jej provádět za deště, sněžení, mlhy a vysoké relativní vlhkosti vzduchu.

Pro stanovení obsahu vody v oleji je nutné odebírat vzorky z teplého stroje.

Limitní hodnoty měřených veličin olejů z provozu:

- průrazné napětí 92 kV/cm , tj. 25 kV/3 mm - číslo kyselosti max. 0,10 (0,20) mg KOH/g
- obsah vody max. 30 g/t
- bod vzplanutí min. 135 oC
- povrchové napětí min. 25 mN/m
- ztrátový činitel při 90 ~C max. 10 • atd.

Pokud nemá olej předepsané parametry, provádí se jeho filtrace, tj. jeho čištění a sušení. Při ní se odstraní z oleje pevné nečistoty, voda, vzduch a jiné plyny. _

Filtraci a vysoušení transformátorového oleje lze provádět i za provozu. (Obvykle je transformátor při filtraci vypnut a zajištěn). Za provozu lze filtrovat nebo vysoušet olej u transformátorů jen do napětí 35 kV. Přitom je nutno dodržet:

- musí být vydán příkaz B;
- je nutno zajistit prostor kolem filtrační stanice proti vstupu nepovolaných osob;
- filtrační zařízení musí být chráněno před nebezpečným dotykovým napětím;
- hadice pro připojení k olejovým výpustím nesmějí mít do délky 3 m od transformátoru kovový nebo jiný vodivý plášť;

•, připojení a odpojení filtračního zařízení lze uskutečnit pouze za vypnutého a zajištěného stavu;

Otázky ke kap. 4.7

1. K čemu slouží transformátorový olej
2. Čím je transformátorový olej degradován
3. Proč se provádí filtrace a vysoušení oleje
4. Jaká je vyhovující průrazná pevnost oleje

5. ASYNCHRONNÍ STROJE

5.1 Význam, a použití a konstrukce asynchronních strojů

Čas 40 min

Cíl Po seznámení se s touto kapitolou budete umět

- Vysvětlit význam asynchronních strojů
- Budete umět použít tyto stroje v pohonech
- Seznámíte se s konstrukčním řešením těchto strojů

Výklad

Asynchronní stroje se průmyslově používají již více jak 100 let. Vývoj těchto strojů probíhal v podstatě bez dalších senzačních vynálezů, ale při soustavném zlepšování všech detailů stroje. V poslední době se zpřesnily výpočtové metody elektrického a magnetického obvodu a zvláště pak výpočty ventilace, oteplení a mechanických částí stroje. Tento vývoj měl za následek snižování měrné hmotnosti a rozměrů těchto strojů. Snižování spotřeby materiálu mělo i své negativní stránky neboť se mnohdy snižovaly užité vlastnosti těchto strojů, zvláště pak jejich spolehlivost a účinnost. Protože asynchronní motory spotřebovávají téměř polovinu veškeré vyráběné elektrické energie, mají energetické ukazatele těchto motorů podstatný význam při hodnocení ekonomické efektivity elektrických pohonů. To byly důvody, které vedly ke snahám zvyšovat účinnost těchto motorů po energetické krizi v sedmdesátých letech.

Nejrozšířenějším elektrickým strojem vůbec je asynchronní motor. Asynchronní motor je nejčastěji používán pro svou jednoduchost, nenáročnost na údržbu, poměrně dobrou provozní spolehlivost a pro malou pořizovací cenu. K jeho rozšíření pochopitelně přispívá i všeobecně používaný rozvod el. energie střídavými třífázovými sítěmi. Rozsah výkonů vyráběných as. motorů je značný, a to od několika wattů až po několik desítek MW.

Odtud pramení i jeho použití pro pohon nejrůznějších zařízení a v dnešní době i takových, která vyžadují regulaci rychlosti. Jedná se o ventilátory, čerpadla, pračky, kompresory, stavební stroje, výtahy, jeřáby, některé obráběcí stroje, pohony dopravníků, apod.

K nevýhodám as. motorů patří zvláště odběr jalové energie z napájecí sítě, kterou tyto stroje potřebují pro svoji činnost. Velice často se v literatuře uvádí jako podstatná nevýhoda as. motorů obtížná regulace rychlosti a velký proudový náraz při spouštění. Toto je spíše nevýhoda napájení těchto motorů, neboť jak bude uvedeno v dalších kapitolách, změnou frekvence lze tyto motory regulovat plynule a spouštět bez značných proudových rázů. Jednoduchost a nízká cena asynchronních motorů nakrátko a zvláště pak pokrok v oblasti polovodičové techniky jsou důvody, pro které jsou tyto motory v posledních letech stále více používány i u pohonů s proměnnými otáčkami, kde dosud převládaly motory stejnosměrné. V současné době již finanční objem produkce střídavých měničů převyšuje produkci měničů pro stejnosměrné aplikace 2 – 3x.

Důkazem použitelnosti as. motorů pro regulované pohony je jejich současná aplikace u pohonů elektrických lokomotiv. Asynchronní motory v regulovaných pohonech postupně vytlačují z této oblasti stejnosměrné motory. V menší míře se používají rovněž asynchronní generátory např. pro malé vodní elektrárny, větrné elektrárny apod.

Jako každý elektrický stroj je i asynchronní stroj vratný, tj. může pracovat buď jako motor nebo jako generátor, přičemž přechod z jednoho do druhého stavu je zcela plynulý. Jako příklad může sloužit pohon zdvihu jeřábu, kde při zvedání břemene pracuje stroj jako motor, ale při spouštění břemene přechází do oblasti generátorické.

Asynchronní stroje mají ještě třetí pracovní oblast, a to oblast indukční brzdy. V tomto případě se rotorem otáčí proti směru točivého magnetického pole statoru. Stroj pak vytváří brzdňý moment.

Podle účelu použití dělíme dále as. motory na as. motory nakrátko všeobecného použití, jeřábové motory, válečkové motory, as. motory speciální apod. Nejrozšířenější jsou as. motory nakrátko všeobecného použití. Velké rozšíření těchto strojů způsobilo jejich hromadnou, značně automatizovanou sériovou výrobu.

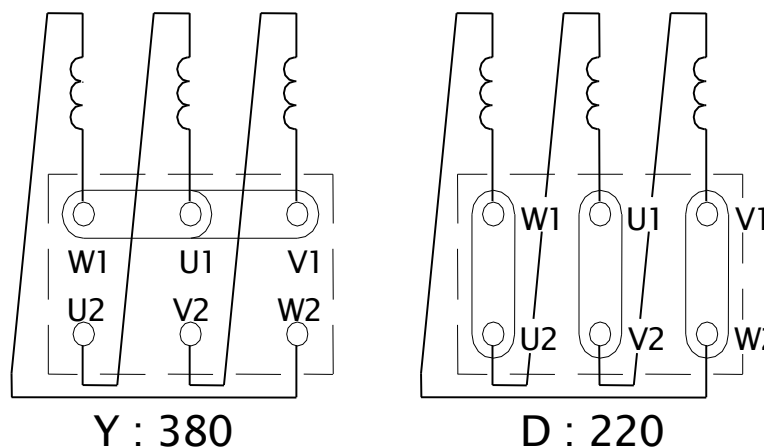
Konstrukční provedení

Asynchronní stroje mají dvě podstatné části - stator a rotor. Stator má vinutí uložené v drážkách a připojené k síti. Podle provedení rotorového (kotevního) vinutí pak rozeznáváme motory s kotvou nakrátko a s kotvou kroužkovou. U motorů s kotvou nakrátko je rotorové vinutí provedeno z tyčí uložených v drážkách, přičemž všechny tyče jsou na obou koncích spojeny nakrátko. Motory s kotvou kroužkovou mají rotorové vinutí v podstatě stejné jako statorové vinutí uložené v drážkách a jeho vývody jsou připojeny ke kroužkům na hřídeli.

Po kroužcích kloužou kartáče, které jsou na nich buď trvale nebo pouze při rozběhu motoru a pak se vinutí spojí tzv. zkratovačem nakrátko a kartáče se nadzvednou nad kroužky. Ke kartáčům se připojuje zařízení na úpravu vlastností stroje (velikosti rozběhového proudu, momentu, otáček), a to buď pouze po dobu rozběhu nebo trvale při provozu.

Magnetický obvod as. stroje je složen v plechů z elektrotechnické oceli obvykle o tloušťce 0,5 mm. Rotor je hladký a vzduchová mezera je rovnoměrná. Velikost vzduchové mezery je závislá na výkonu motoru a je u malých strojů několik desetin mm, kdežto u velkých strojů i několik mm.

Konce a začátky fází statorového vinutí jsou připojeny ke svorkovnici podle obr. 3.1. Vinutí tak může být spojeno do hvězdy nebo do trojúhelníku.

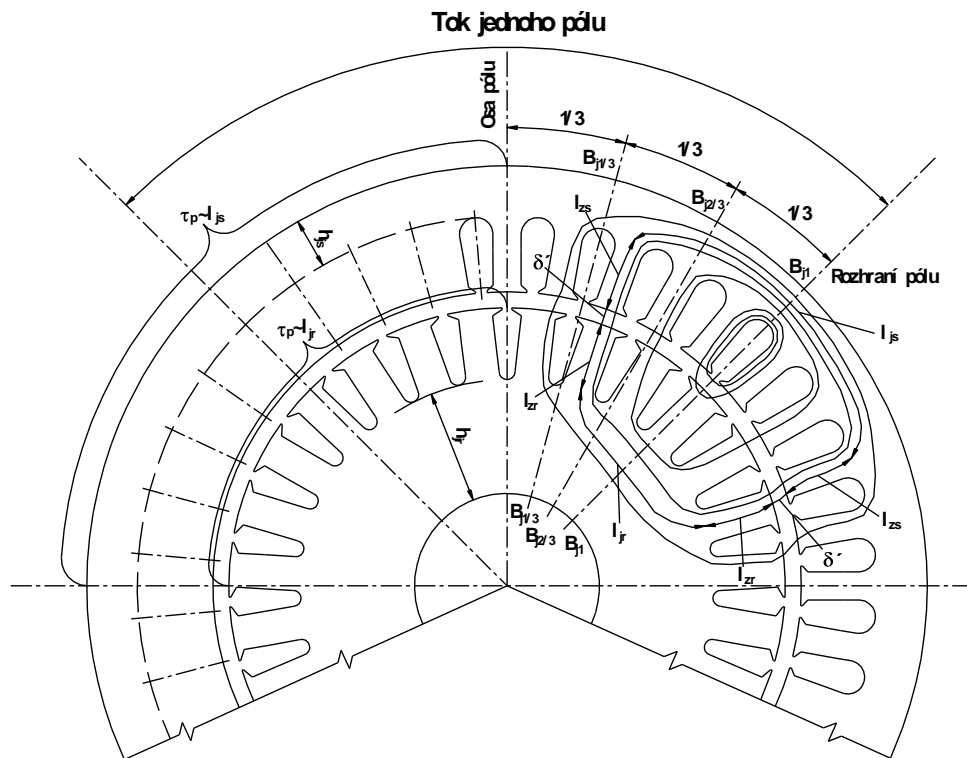


Obr.5.1

Magnetický obvod asynchronního stroje

Typický magnetický obvod asynchronního motoru s klecí nakrátko je na obr. 8.1. Stator je složený z plechů s drážkami na vnitřním obvodu. Rotor je opět prstenec složený z plechů, ale s drážkami na vnějším obvodu. Magnetický tok vychází ze statorových zubů, projde vzduchovou mezerou do rotorových zubů a obrátí se rotorovým jhem a zuby zpět do vzduchové mezery. Nakonec se uzavře přes zuby statoru a jeho statoru. Tedy magnetický

obvod můžeme rozdělit na pět částí: vzduchovou mezeru, zuby statoru a rotoru a jho statoru a rotoru.



Obr.5.2

Otázky :

1. Vysvětlíte význam asynchronních motorů pro elektrické pohony
2. Jaké jsou výhody a nevýhody asynchronních strojů
3. Jaké druhy asynchronních strojů znáte
4. Popište konstrukční části as. stroje
5. Z čeho je složen mg. obvod as. stroje

5.2 Princip funkce, indukované napětí a proud as. stroje

Čas

Cíl Po prostudování této části bude student umět

- Popsat princip práce asynchronního stroje
- Napsat vztahy pro indukované napětí a proud
- Určit velikost rotorového napětí a rotorové frekvence
- Vypočítat skluz motoru
- Popsat pracovní stavy as. strojů

Výklad

Rotor asynchronního stroje není elektricky spojen se statorem. Výkon se do rotoru přenáší elektromagnetickou indukcí a odtud je také často používán název indukční stroj. Princip asynchronního stroje je tedy založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů vyvolaných ve vinutí rotoru tímto polem. Vzduchová mezera mezi statorem a rotorem je pak co nejmenší, aby magnetická vazba byla co nejlepší. Vznik točivého pole byl již probrán v předcházejících částech.

U asynchronního stroje tedy existuje stejná magnetická vazba mezi vinutím vstupním a výstupním jako u transformátorů. Rozdíl je však v tom, že výstupní vinutí asynchronního stroje se otáčí. Aby se však v rotorovém vinutí indukovala elektromotorická síla a protékal jím proud, musí existovat relativní pohyb rotoru vzhledem k točivému poli statoru. Proto jsou otáčky zatíženého motoru vždy o něco nižší než synchronní otáčky točivého pole, tedy asynchronní.

Pokles otáček při zatížení je malý a je závislý na velikosti zatížení. Pokles otáček se nejčastěji udává jako skluz s , přičemž

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_1 / p - \Omega}{\omega_1 / p} \quad (5.1)$$

kde $n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$ jsou synchronní otáčky točivého magnetického pole statoru [min^{-1}]

n, Ω jsou otáčky a mechanická úhlová rychlost rotoru

p počet pólpárů stroje

f_1 statorová frekvence

ω_1 úhlová rychlost magnetického pole statoru

Při běžném průmyslovém kmitočtu 50 Hz jsou nejvyšší možné otáčky dvupólového motoru 3000 min^{-1} . Skluz se uvádí obvykle v % a bývá u malých motorů i 10% a u velkých motorů i pod 1% .

Předpokládejme, že stator dvupólového asynchronního motoru má trojfázové vinutí a na rotoru mnohofázové klecové vinutí – obr. 5.1.

Protéká-li statorovým vinutím proud I_1 , vytvoří magnetomotorické napětí, které si představíme jako vektor F_{m1} , otáčející se v prostoru úhlovou rychlostí

$$\omega_1 = 2\pi \cdot f_1 \cdot \frac{1}{p} \quad (5.2)$$

Rotor se pak otáčí ve stejném smyslu úhlovou rychlostí

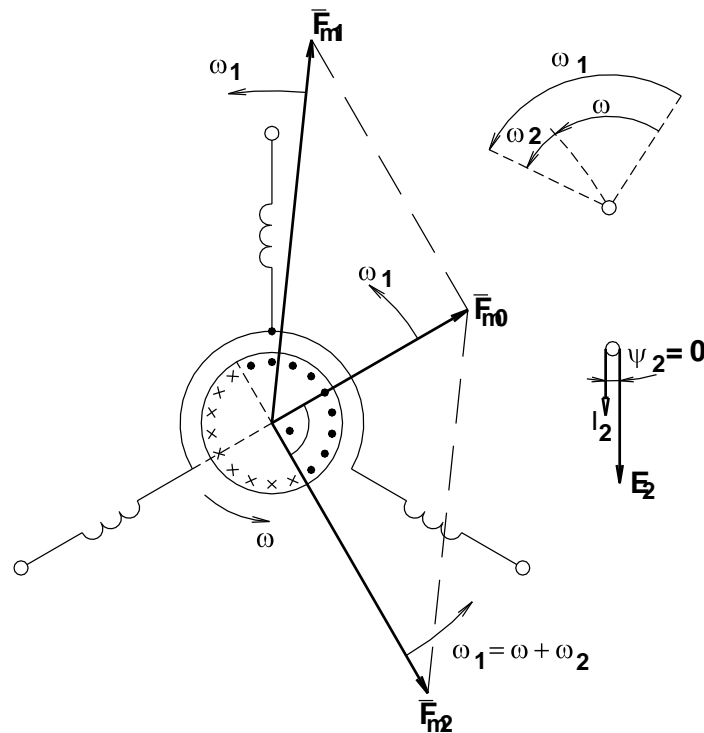
$$\omega = \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (5.3)$$

V tyčích klece rotoru se bude indukovat napětí o kmitočtu

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (5.4)$$

Rotorovými tyčemi protékají proudy, které vytvoří magnetomotorické napětí rotoru. Toto magnetomotorické napětí si lze představit jako vektor F_{m2} , který se vůči rotoru otáčí úhlovou rychlostí

$$\omega_2 = s \cdot \omega_1 \quad (5.5)$$



Obr. 5.3

Protože se rotor otáčí ve stejném smyslu úhlovou rychlostí ω , bude výsledná rychlost vektoru F_{m2} vůči statoru rovna

$$\omega_2 + \omega = \omega_1 \cdot (1 - s) + s \cdot \omega_1 = \omega_1 \quad (5.6)$$

Vektory magnetomotorických napětí statoru F_{m1} a rotoru F_{m2} se při libovolném skluzu otáčejí ve stejném smyslu konstantní úhlovou rychlostí ω_1 , jinými slovy statorové a rotorové pole se vůči sobě nepohybují. To je ale fiktivní představa, neboť ve stroji existuje pouze výsledné pole dané tokem ϕ , které se skládá z pole statoru a rotoru. Tento magnetický tok se v rozsahu zatížení (tj. od stavu naprázdno po jmenovité zatížení) příliš nemění. Pochopitelně mimo hlavní tok ϕ existují ve stroji ještě rozptylové toky spřažené buď s vinutím statoru nebo rotoru.

Z uvedeného vyplývá, že as. stroj může pracovat pouze při rovnosti úhlových rychlostí mg. napětí F_{m1} a F_{m2} . To znamená, že stator i rotor musí mít stejný počet pólů, tedy $p_1 = p_2 = p$!! Počet fází vinutí statoru a rotoru může být však v principu různý. Součet obou magnetomotorických napětí vytvoří výsledné magnetomotorické napětí

$$F_{m0} = F_{m1} + F_{m2} \quad (5.7)$$

Toto výsledné magnetomotorické napětí budí točivé magnetické pole stroje.

Magnetomotorická napětí byla uvažována jako prostorové vektory. Můžeme je však vyjádřit i jako časové vektory (fázory). Fázor magnetomotorického napětí F_{m1} a fázor proudu I_1 leží vždy ve stejném směru tj. úhel, který svírají, se rovná nule.

Indukované napětí a proud

Z fyzikálního principu indukčního stroje vyplývá, že velikost rotorového napětí i rotorového proudu bude záviset na velikosti skluzu. Podle základní rovnice pro střídavé stroje

$$U = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \phi \cdot k_v \quad (5.8)$$

bude ve statorovém vinutí indukované ideální napětí

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \phi \quad (5.9)$$

Předpokládejme motor s vinutým rotorem, který stojí a má rotorové vinutí rozpojeno.

Pak napětí rotoru – opět ideální se vypočte

$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi \quad (5.10)$$

neboť v tomto případě (stojící rotor) je $f_2 = f_1$. Rotorové napětí je maximální (vyjma pracovního stavu brždění protiproudem, jak o tom bude pojednáno dále).

Druhý krajní případ je ideální chod motoru naprázdno, kdy se rotor točí synchronními otáčkami, tedy $n = n_1$ a $s = 0$ i $f_2 = 0$. V tomto případě je rotorové napětí nulové. Napětí indukované v rotoru při libovolných otáčkách je pak

$$U_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi \quad (5.11)$$

tedy

$$U_2 = s \cdot U_{i2} \quad (5.12)$$

nebo také

$$U_2 = s \cdot U_{20} \quad (5.13)$$

kde U_{20} nazýváme napětí “naprázdno”

Stejně jako u transformátoru definujeme převod

$$p_u = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \quad (5.14)$$

$$U'_{i2} = p \cdot U_{i2} = \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \cdot 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \phi = U_{i1} \quad (5.15)$$

Indukovaným napětím se v rotoru vytvoří proud

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R_2^2 + (2\pi \cdot f_2 \cdot L_2)^2}} = \frac{s \cdot U_{20}}{\sqrt{R_2^2 + \left(\frac{X_2}{s}\right)^2}} \quad (5.16)$$

Jestliže rovnici pro rotorový proud upravíme, dostaneme výraz

$$I_2 = \frac{U_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad (5.17)$$

Z této rovnice je patrné, že asynchronní stroj se při všech otáčkách chová jako transformátor, který je na sekundární straně zatížen ohmickým odporem R_2/s .

Magnetizační proud

Předpokládejme, že vinutí jedné fáze mnohofázového stroje (m-fázi), který má 2p pólů, je tvořeno z N v sérii zapojených závitů. Předpokládejme dále, že vinutí fáze je umístěno v q drážkách pólové rozteče a je protékáno sinusovým proudem I. Obdélníkové magnetomotorické napětí nahrazujeme sinusovým a tedy podle Fourierova rozkladu pro obdélníkový průběh je

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \cdot F$$

V okamžiku, kdy proud ve fázi bude maximální, bude 1. harmonická magnetomotorického napětí jedné cívky rovna

$$F'_{ml\max} = \frac{4}{\pi} \sqrt{2} I \frac{N}{2pq} \quad (5.18)$$

Protože m-fázové vinutí je umístěno v q drážkách, pak v souladu se znalostmi o vinutí bude 1. harmonická magnetomotorického napětí vztaženo na jednu pólovou dvojici

$$F_{m1} = q \cdot F'_{m1\max} \cdot k_v$$

tedy

$$F_{m1} = 0,9 \cdot m \cdot I \cdot \frac{N_1}{p} \cdot k_v \quad (5.19)$$

Výsledné magnetické napětí pro jednu pólovou dvojici F_m je buzené magnetizačním proudem I_m ve vinutí statoru. Můžeme tedy psát

$$F_m = 0,9 \cdot m_1 \cdot I_m \cdot \frac{N_1}{p} \cdot k_{v1} \quad (5.20)$$

Tato vlna magnetomotorického napětí je však funkcí prostoru δ a času t , tedy jde o postupnou vlnu podél vzduchové mezery podle vztahu

$$F_1(\delta, t) = 0,9 m_1 I_m \frac{N_1}{p} \cdot k_{v1} \cos(\delta - \omega_1 t) \quad (5.21)$$

Velikost magnetizačního proudu vypočteme podle vztahu (8.29)

$$I_m = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} \quad (5.22)$$

Magnetizační proud a hlavně jeho velikost vzhledem ke jmenovitému proudu motoru je obrazem dokonalosti stroje resp. správnosti výpočtu geometrických rozměrů stroje a návrhu vinutí. U běžných motorů bývá jeho velikost mezi 20 ÷ 30 % jmenovitého proudu motoru. Menší hodnoty svědčí o velké spotřebě materiálu pro stroj, na druhé straně bude mít takový stroj dobrou účinnost a účinník.

POZOR POZOR srovnejte mg. proud s trafem a vysvětlete rozdíl!!

Funkce a pracovní stavy asynchronního stroje

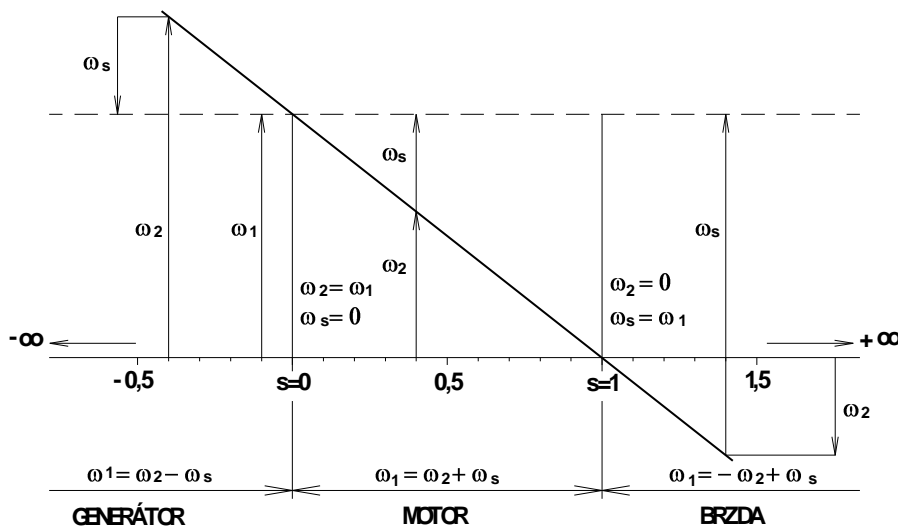
Jak již bylo uvedeno asynchronní stroj může pracovat jako motor, generátor nebo brzda. Přechod z jednoho stavu do druhého je zcela plynulý. Pracovní stav asynchronního stroje nejlépe vyjadřuje skluz, a to jednak svojí velikostí a také znaménkem. Uvažujme nejdříve, že stroj pracuje jako **motor**. Zmínili jsme se o pracovních stavech motoru tj. o chodu naprázdno a nakrátko. Jestliže by se rotor otáčel stejně rychle jako magnetické pole ve vzduchové mezeře, tj. synchronními otáčkami, nevznikne relativní pohyb mezi rotorem a točivým magnetickým polem a tedy $s = 0$ a $f_2 = 0$ a ve vodičích rotoru se neindukuje elektromotorická síla a neprotéká jimi proud. Statorové vinutí odebírá ze sítě jen magnetizační proud I_m potřebný na vytvoření magnetického toku ϕ . Tento tok indukuje ve statorovém vinutí elektromotorická síla E_1 , která je o $\pi/2$ fázově posunuta za tokem a má stejnou velikost, ale opačnou fázi jako síťové napětí U_1 . Stroj nevyvíjí žádný moment. Jde tedy o ideální **chod naprázdno**. Toto je stav idealizovaného indukčního motoru, neboť ve skutečnosti motor při chodu naprázdno musí hradit mechanické ztráty (tření v ložiskách, ventilační ztráty), a proto je vždy zatížen jistým momentem odpovídajícím těmto ztrátám. Synchronní rychlosti tedy motor nikdy nemůže dosáhnout. Skutečný motor má při chodu naprázdno rovněž úbytky napětí a ztráty v mědi a v železe.

Stavem **motoru nakrátko** rozumíme případ, kdy se rotor neotáčí, tedy $n = 0$ a $s = 1$. Rotorové vinutí je ovšem spojeno nakrátko, tedy poměry zde budou podstatně rozdílné oproti stavu stojícího motoru a rozpojeného vinutí, který byl popsán v kap. 5. Stav nakrátko se vyskytuje u motoru na počátku jeho spuštění eventuálně při zastavení vlivem přetížení. Na rozdíl od transformátoru je u asynchronního motoru mnohem větší rozptyl, neboť magnetický odpor obvodu je mnohem větší. U motoru má magnetický obvod i vzduchové mezery. Téměř všechny tok je při stavu nakrátko rozptylový, neboť pouze jeho malá část je potřebná na indukci elektromotorické síly, která je malá, protože je potřebná pouze na překonání úbytků napětí na činném odporu vinutí a jeho reaktanci. Oproti transformátoru nejde zde o časovou změnu pole, ale změnu prostorovou vyvolanou točivým polem. Proud nakrátko zde tedy dosahuje menších hodnot než u transformátoru a bývá $5 \div 7$ násobkem jmenovitého proudu motoru. V tomto stavu se všechna přivedená energie mění v teplo.

Mezi uvedenými dvěma stavy motoru, tj. nakrátko a naprázdno, je jeho pracovní stav. Zatížený motor musí mít skluz, aby napětí indukované v rotoru vyvolalo proud, který spolu s točivým mg. polem vytvoří moment motoru na hřídeli. Otáčky motoru jsou pak v mezích $0 = n = n_1$ a skluz motoru $1 = s = 0$. Skluz je kladný a rychlost otáčení rotoru má stejný smysl jako točivé magnetické pole.

Pohání-li se rotor asynchronního stroje tak, že jeho rychlost se zvýší nad synchronní otáčky, pak skluz bude záporný $s < 0$. Indukované napětí v rotoru změní smysl a elektrická energie může být dodávána zpět do sítě. K tomu, aby mohl tuto funkci plnit, musí však mít k dispozici zdroj magnetizačního proudu. Stroj tedy pracuje jako asynchronní **generátor**.

Rotor asynchronního stroje může být však také poháněn tak, že se otáčí proti směru točivého magnetického pole, což znamená, že skluz je kladný a větší než 1. Tento stav nazýváme **brzdou**. Znázornění všech funkcí asynchronního stroje je na obr. 5.4.



Obr. 5.4

Otázky :

1. Vysvětlíte princip činnosti asynchronního motoru
2. Napište vztah pro rotorovou frekvenci
3. Jaké nejvyšší napětí se může v rotoru indukovat
4. Jaké jsou pracovní stavy asynchronních strojů

5. Na čem závisí a jak je velký skluz as. motorů
6. Jak vypočítáte synchronní otáčky as. motorů
7. Jak se stanoví skluz motorů
8. Jak velký skluz může mít as. generátor a brzda
9. Uveďte velikost mg. proudu as. stroje

5.3 Zatížený asynchronní motor a momentová charakteristika

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Nakreslit názorový diagram as. motoru
- Přepočítat rotorové veličiny na statorové
- Nakreslit, odvodit a popsat momentovou charakteristiku

Výklad

5.3.1 Fázorový diagram as. motoru

Jak bylo již uvedeno součet magnetomotorického napětí (mmn) statoru a rotoru vytváří výsledné mmn $F_m = F_{m1} + F_{m2}$. S ohledem na stanovení mmn můžeme tedy psát

$$0,9m_1 \frac{I_1 N_1}{p} \cdot k_{v1} + 0,9m_2 \frac{I_2 N_2}{p} \cdot k_{v2} = 0,9m_1 \frac{I_m N_1}{p} k_{v1} \quad (5.23)$$

po úpravě

$$I_1 + I_2 \frac{m_2 N_2 k_{v2}}{m_1 N_1 k_{v1}} = I_m \quad (5.24)$$

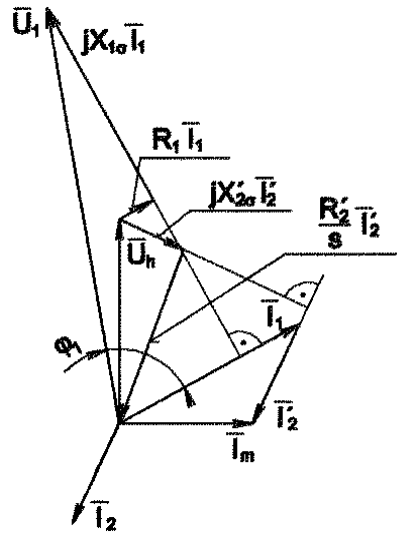
nebo také $I_1 + I'_2 = I_m$

kde I'_2 je proud rotoru přepočtený na vinutí statoru

$$I'_2 = I_2 \frac{m_2 N_2 k_{v2}}{m_1 N_1 k_{v1}} = I_2 \cdot p_{2l} \quad (5.25)$$

činitel p_{2l} se nazývá převod proudů.

Po těchto úpravách lze sčítat vektory proudů jako veličiny reprezentující příslušná magnetomotorická napětí. Fázorový diagram zatíženého as. motoru je na obr. 9.1. U skutečného motoru pak můžeme ještě respektovat ztráty v železe.



Obr. 5.5

Pro úplnost zde uvedeme znovu převod napětí

$$p_{12u} = \frac{m_1 N_1 k_{v1}}{m_2 N_2 k_{v2}} \quad (5.26)$$

Dále uvedeme přepočtení odporů a reaktancí. Platí $m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R'_2 I_2'^2$

$$R'_2 = R_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 = R_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{m_1 N_1 k_{v1}}{m_2 N_2 k_{v2}} \right)^2 = R_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 k_{v1}}{N_2 k_{v2}} \right)^2 \quad (5.27)$$

Podobně pro přepočtenou rozptylovou reaktanci rotorového vinutí píšeme

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 k_{v1}}{N_2 k_{v2}} \right)^2 \quad (5.28)$$

Výše uvedené úvahy platí pro kroužkový motor.

Přepočtení u klecového vinutí se provádí podobně jako u kroužkového motoru, ale je nutno vzít v úvahu zvláštnosti klece. Pak

$$p_r = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 k_{v1}}{N_2 k_{v2}} \right)^2 = \frac{m_1}{Q_2} 4(N_1 k_{v1})^2 \quad (5.29)$$

Fázorové diagramy satorových a rotorových obvodů asynchronního stroje jsou pak vždy grafickým vyjádřením těchto rovnic:

$$U_1 = R_1 I_1 + jX_{1\sigma} I_1 - U_i \quad (5.30)$$

$$0 = \frac{R'_2}{s} I_2' + jX'_{\sigma 2} I_2' + U_i \quad (5.31)$$

$$I_1 + I_2' = I_m \quad (5.32)$$

5.3.2 Moment asynchronního motoru

Točivé magnetické pole vybuzené mmf F_m působí vzájemně s rotorovými proudy a vytváří moment, který otáčí rotorem ve směru otáčení tohoto magnetického pole. Pro určení momentu motoru vyjdeme z mechanického výkonu

$$M = \frac{P'}{\omega} = \frac{P'}{\omega_1(1-s)} \quad (5.33)$$

Protože mechanický výkon je

$$P' = P_\delta - \Delta P_{cu2} \quad (5.34)$$

a

$$P_\delta = m_2 \frac{R_2}{s} I_2^2 \quad (5.35)$$

výkon ve vzduchové mezeře musí odpovídat výkonu na odporu sekundární větve náhradního schématu

$$P_{cu2} = m_2 R_2 I_2^2 \quad (5.36)$$

Dosazením vztahů 11.3 a 11.4 do výrazu 11.2 dostaneme

$$P' = m_2 \frac{R_2}{s} I_2^2 - m_2 R_2 I_2^2 = m_2 R_2 I_2^2 \frac{1-s}{s} \quad (5.37)$$

pak moment vypočteme

$$M = \frac{m_2 R_2 I_2^2 \frac{1-s}{s}}{\omega_1(1-s)} = \frac{m_2 R_2 I_2^2}{\omega_1 s} = \frac{P_\delta}{\omega_1} = M_\delta \quad (5.38)$$

Točivý moment asynchronního motoru můžeme tedy vyjádřit pomocí mechanického výkonu P' a úhlové rychlosti ω_2 nebo pomocí výkonu ve vzduchové mezeře P_δ a úhlové rychlosti točivého pole ω_1 .

Nyní si všimněme, na kterých veličinách je moment motoru závislý. Pro zjednodušení zanedbáme ztráty ve statoru a bude tedy přibližně platit $P_1 = P_\delta$. Pak

$$M = \frac{P_1}{\omega_1} = \frac{m_2 U_2 I_2 \cos \varphi_2}{\omega_1} = C \cdot \phi \cdot I_2 \cos \varphi_2 \quad (5.39)$$

neboť $U_2 = 4,44 \phi f_1 N_2 k_{v2}$ – za předpokladu stojícího motoru je $f_1 = f_2$.

Točivý moment je tedy úměrný součinu rotorového proudu I_2 , toku a \cos úhlu mezi I_2 a U_{2i} . V normálním chodu a při chodu naprázdno, tedy při malých skluzech je reaktance rotoru malá, takže $\cos \varphi_2 = 1$. Tedy pak je $M \doteq C I_2 \phi$.

Dále můžeme odvodit závislost momentu, skluzu a odporu rotorového obvodu. Jak jsme odvodili $P_{el} = s \cdot P_\sigma$

Tedy také

$$P_{el} = m_2 R_2 I_2^2 \quad (5.40)$$

Pak

$$P_\delta = \frac{m_2 R_2 I_2^2}{s} \quad (5.41)$$

$$\text{Protože } M = \frac{P_\delta}{\omega_1} = \frac{m_2 R_2 I_2^2}{\omega_1 s} = C \frac{R_2 I_2^2}{s} \quad (5.42)$$

Moment asynchronního motoru je tedy přímo úměrný čtverci proudu rotoru a rotorového odporu a nepřímo úměrný skluzu. U kroužkových motorů závislosti na velikosti odporu můžeme využít pro regulaci momentu.

Rovnici pro výkon ve vzduchové mezeře můžeme také vyjádřit z přepočítaných veličin rotoru na stator, tedy $P_\delta = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}$ (5.43)

Pak moment motoru

$$M = \frac{m_1 R_2' I_2'^2}{\omega_1 s} \quad (5.44)$$

Za proud I_2 dosadíme hodnotu z (6.10) tedy

$$M = \frac{m_1 R_2'}{\omega_1 s} \cdot \frac{U_1^2}{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + X_\sigma^2} \quad (5.45)$$

Jestliže si tento výraz vyjádříme pro stojící stroj, tedy pro $s = 1$, dostaneme pro záběrný moment M_z vztah vyjádřený pouze parametry stroje.

Při zanedbání absolutní hodnoty výrazu $|R_1 + jX_\sigma|$, která může být proti R_2'/s malá, můžeme výrazy pro proud I_2' a moment zjednodušit na tvar

$$I_2' = U_1 \frac{s}{R_2'} \quad (5.46)$$

$$M = \frac{m_1}{\omega_1} U_1^2 \frac{s}{R_2'} \quad (5.47)$$

Tyto rovnice platí dostatečně přesně do 1,5 násobku jmenovitého proudu, příp. momentu.

Maximální hodnotu momentu vyjádříme z rovnice (11.13) určením extrému pro derivaci $dM/ds=0$. Maximální moment M_{\max} asynchronního motoru se nazývá také moment zvratu M_{zvr} a skluz, při kterém je moment motoru maximální skluzem zvratu s_{zvr} . Po derivaci a úpravě je

$$M_{zvr} = \frac{m_1}{\omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{2(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2})} \doteq \frac{m_1 U_1^2}{\omega_1 \cdot 2X_\sigma} \quad (5.48)$$

$$s_{zvr} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2}} \doteq \pm \frac{R'_2}{X_\sigma} \quad (5.49)$$

V těchto rovnicích znaménko + platí pro motor a znaménko – pro generátor.

Tyto přibližné rovnice platí při $R_1 = 0$.

Z výše uvedených rovnic je patrné:

- moment asynchronního stroje je přímo úměrný čtverci napětí $M \approx U_1^2$
- na průběh momentu má vliv odpor rotorového obvodu R_2
- moment zvratu je rovněž přímo úměrný čtverci satorového napětí a nepřímo úměrný reaktanci nakrátko X_σ
- dále z těchto rovnic vyplývá, že velikostí ohmického odporu v obvodu rotoru neovlivníme velikost momentu zvratu, ale ovlivníme skluz zvratu.

Stanovíme-li poměr momentu motoru k jeho maximálnímu momentu tj. k momentu zvratu dostaneme výraz

$$\frac{M}{M_{zvr}} = \frac{2sR'_2 \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2} \right)}{(sR_1 + R'_2)^2 + (sX_\sigma)^2} \quad (5.50)$$

Po úpravě dostaneme rovnici

$$\frac{M}{M_{zvr}} = \frac{2(1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_{zvr}} + \frac{s_{zvr}}{s} + 2\varepsilon} \quad (5.51)$$

když jsme si označili $\varepsilon = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2}} \doteq \frac{R_1}{X_\sigma}$

Jestliže zanedbáme odpor satorového vinutí $R_1 = 0$, pak rovnice se zjednoduší na tvar

$$\frac{M}{M_n} = \frac{2}{\frac{s}{s_{zvr}} + \frac{s_{zvr}}{s}} \quad (5.52)$$

Rovnice (11.18) a (11.19) se nazývají Klossovými vztahy. Jestliže zavedeme ve výrazu (11.19) moment M_n tj. jmenovitý moment, můžeme vyjádřit přetížitelnost motoru

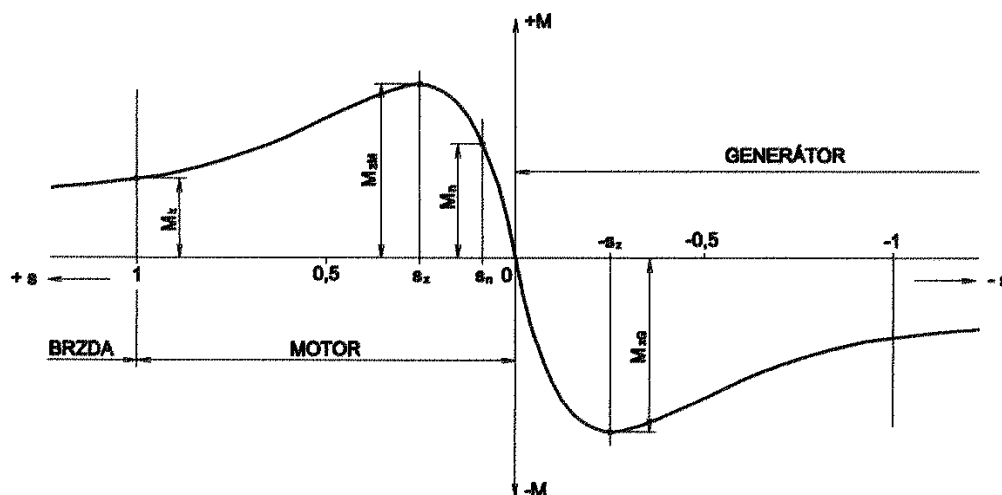
$$\frac{M_{\max}}{M_n} = \frac{\frac{s_n}{s_{zvr}} + \frac{s_{zvr}}{s_n}}{2} \quad (5.53)$$

Přetížitelnost je závislá na konstrukci motoru a u motorů kroužkových je v rozmezí 1,6 – 2,5 – podle velikosti stroje. U motorů s kotvou nakrátko bude přetížitelnost až 4.

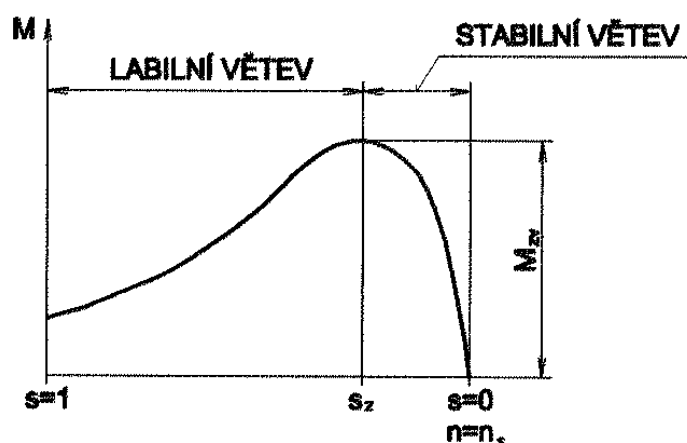
Z uvedených rovnic je patrné, že všechny asynchronní stroje mají stejný průběh točivého momentu v závislosti na skluzu. Průběh momentové charakteristiky pro všechny pracovní oblasti asynchronního stroje je na obr. 11.1.

Jak ukazuje obr. 11.2, momentová charakteristika má větev stabilní a labilní. Po spuštění asynchronního motoru se zvětšuje jeho moment a otáčky rostou. Po dosažení maximálního momentu nebo momentu zvratu a při stoupajících otáčkách moment motoru

opět klesá a to teoreticky až do nuly při synchronních otáčkách. Ve většině případů v levé – tedy počáteční části charakteristiky motor nemůže pracovat stabilně, a proto této části říkáme labilní větev, kdežto části od skluzu zvratu do skluzu rovnému nule říkáme část stabilní.



Obr. 5.6



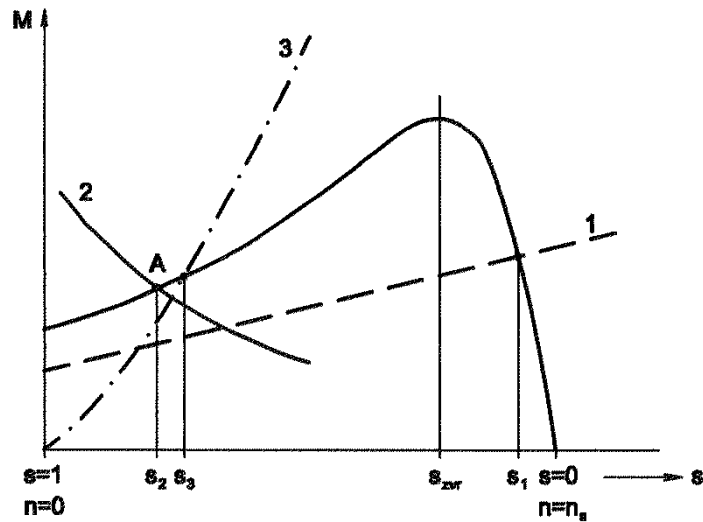
Obr. 5.7

Na obr. 11.3 jsou do průběhu momentu motoru v závislosti na skluzu vyneseny tři charakteristiky pro průběh různých zátěžných momentů 1, 2 a 3. Zátěžným momentům někdy říkáme protimomenty M_p . Asynchronní motor musí při práci vyvinout takový moment, aby překonal tento protimoment, tedy musí pracovat v bodě, který je průsečíkem momentové charakteristiky a protimomentu. Pro charakteristiku 1 je pracovní bod jednoznačně dán skluzem s_1 . Pro průběh protimomentu podle křivky 2 není stabilní provoz možný, neboť motor by se nerozběhl. Za jistých podmínek může motor pracovat i v labilní části, a to při průběhu protimomentu podle 3, tj. při kvadratické charakteristice např. u pohonu ventilátorů. Při práci v této části charakteristiky, tj. labilní, jsou proudy statoru i rotoru několikanásobně větší než jmenovité zařízení, a proto motor nemůže s těmito skluzu trvale pracovat.

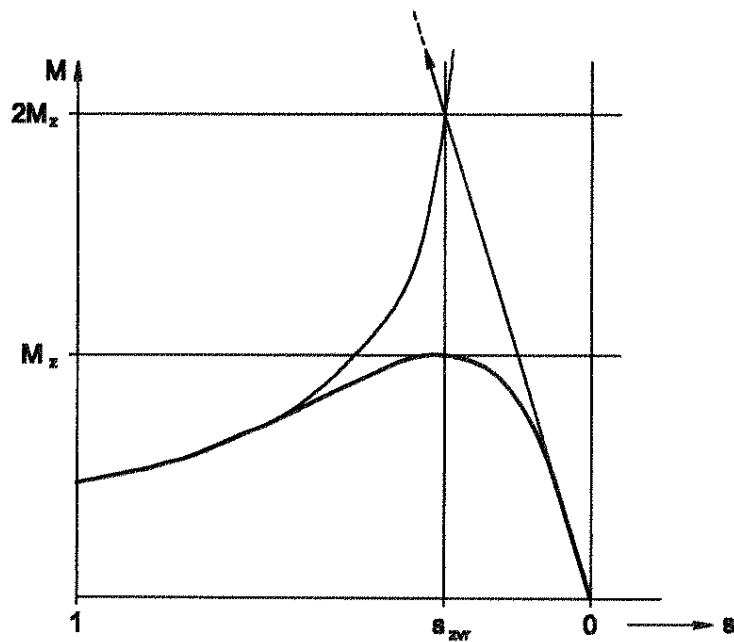
V labilní části charakteristiky, v oblasti velkých skluzů můžeme připustit, že $s \gg s_{zvt}$ a tedy $s_{zvt}/s = 0$, pak vztah (11.19) se změni na výraz

$$M = 2M_{zvr} s_{zvr} \frac{1}{s} \quad (5.54)$$

což je rovnice hyperboly viz obr. 11.4.



Obr. 5.8



Obr. 5.9

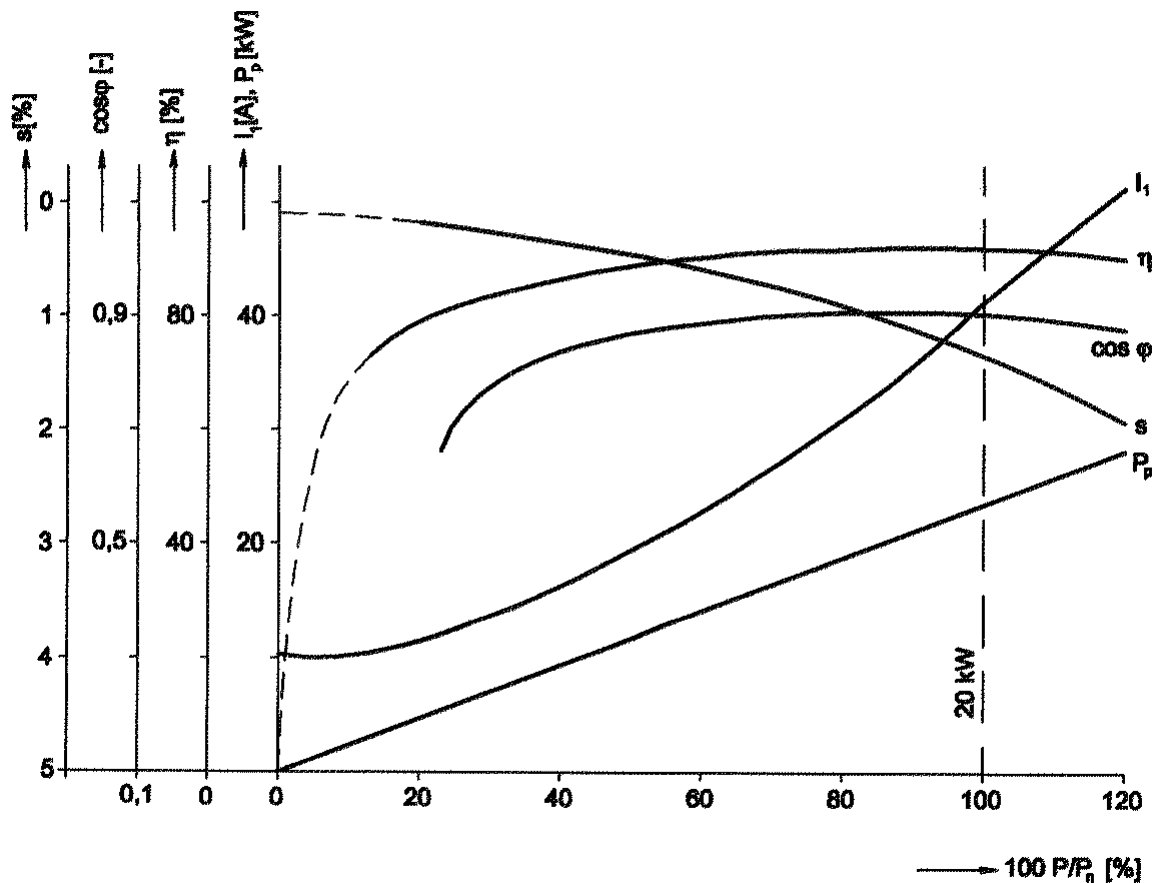
Ve stabilní části charakteristiky, kdy si dovolíme napsat, že $s \ll s_{zvr}$ můžeme položit nule výraz $s/s_{zvr} = 0$ a pak platí

$$M = 2M_{zvr} \frac{1}{s_{zvr}} \cdot s \quad (5.55)$$

což je rovnice přímky. Z těchto dvou průběhů si můžeme momentovou charakteristiku přiblížit.

Kdyby se část magnetického toku statoru i rotoru neuzavírala rozptylovými cestami, zůstával by magnetický tok ϕ ve vzduchové mezeře stálý a podle (11.7) by moment motoru rostl dále podle přímky, jak je naznačeno na obr. 11.4. Vlivem rozptylu se tok zmenšuje. Dokud je zmenšení toku rozptylem menší než zvětšení proudu, moment se zvětšuje – posuzováno od stavu naprázdno. Největší moment M_{\max} je při největším součinu toku a proudu. Když se překročí moment zvratu, je zmenšení toku větší než zvětšení proudu a moment klesá.

Pro posouzení vlastností el. stroje a jeho vhodnosti pro dané provozní podmínky, vynášejí se provozní nebo jinak nazývané zatěžovací charakteristiky stroje. Tyto charakteristiky znázorňují závislost otáček, momentu, účinníku, účinnosti, statorového proudu apod. na výkonu stroje eventuálně na momentu stroje či na poměrných jednotkách momentu či výkonu. Některé závislosti jsou vyneseny na obr. 11.5. Otáčky motoru a tedy i skluz se s zatížením mění poměrně málo, a proto mluvíme u asynchronních motorů o tvrdých charakteristikách. Účinník je při chodu naprázdno velmi malý a bývá okolo 0,05 až 0,1. Při malých zatíženích je malá rovněž účinnost.



Obr. 5.10

Otázky ke kap. 5.3

1. V jakém poměru se přepočítávají rotorové proudy na statorové
2. Uveďte vztah pro přepočet rotorového odporu a reaktance na statorové

3. Nakreslete názorový diagram as. motoru
4. Vysvětlete Klossův vztah
5. Vysvětlete rozdíl mezi záběrným momentem a momentem zvratu
6. Jak se mění moment as. motoru se statorovým napětím

5.4 Spouštění asynchronních motorů

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Vysvětlit principy spouštění asynchronních motorů
- Definovat požadavky na rozběh
- Vysvětlit energetické poměry při spouštění motorů

Výklad

Spouštění asynchronního motoru je přechodný děj, během kterého má motor přejít ze stavu klidu na pracovní otáčky. Rychlost a plynulost tohoto přechodného děje, během něhož se mění nejen rychlost motoru, ale i proudy a momenty, může mít značný vliv jak na vlastní motor, tak i na poháněné zařízení. To platí zvláště tehdy jestliže je počet spouštění za časovou jednotku velký. Např. u jeřábových asynchronních motorů bývá počet spouštění až $600 \div 900$ za 1 hodinu.

Pro rozbor spouštění a posouzení vlastností asynchronního motoru při rozběhu se používají obvykle tyto ukazatele:

- poměr záběrného proudu k proudu jmenovitému

$$k_i = \frac{I_z}{I_n}$$

V okamžiku připnutí motoru k síti protéká motorem záběrný proud omezený při jmenovitém napětí pouze impedancí motoru nakrátko. Jak jsme již uvedli tento proud může dosahovat značných hodnot a hodnota záběrného proudu asynchronních motorů nakrátko nesmí být při jmenovitém napětí a kmitočtu větší než 7,5 násobek jmenovitého proudu. Záběrný proud je dán vztahem

$$I_{Iz} = \frac{U_l}{Z_k} \quad (5.56)$$

Záběrný proud lze tedy zmenšit buď snížením statorového napětí, nebo zvětšením impedance, což je možné pouze u kroužkových motorů.

- Plynulost časové změny rozběhového proudu $I = f(t)$.
U spouštění motorů bez jakýchkoliv spouštěčů je plynulost dána poměry mezi momentem motoru a protimomentem. Při řízeném spouštění, které může být buď plynulé nebo stupňovité, záleží plynulost časové změny na regulačním zařízení (měnič frekvence apod.) a u stupňovitého řízení na správném zvolení poměru jednotlivých spouštěcích stupňů (odporových, přepínání počtu pólů).
- poměr záběrného momentu ($s = I$) k momentu jmenovitému

$$k_M = \frac{M_z}{M_n}$$

Záběrný moment může být změněn:

- napětím – moment se mění se čtvercem napětí

- zvětšením odporu v rotorovém obvodu, jak o tom bude pojednáno dále
- doba rozběhu t_a
Tato doba závisí na momentu setrvačnosti vlastního motoru i na přídatném momentu setrvačnosti, dále pak na velikosti rozdílu mezi momentem motoru a momentem zátěže

$$t_a = \frac{J \cdot (n - n_0)}{9,55 \cdot (M_m - M_z)} \quad (5.57)$$
- významné jsou rovněž ztráty energie při rozběhu, oteplení motoru při rozběhu, kdy motor s vlastním chlazením není dokonale chlazen apod.
- důležité rovněž je zda motor rozbíháme samostatně, tj. bez přídatné zátěže, anebo se zatížením, kde rovněž záleží nejen na velikosti této zátěže, ale i na průběhu protimomentu nebo zátěžového momentu. Někdy přídatné momenty setrvačnosti značně převyšují velikost setrvačného momentu motoru. Např. pro pohon ventilátorových mlýnů je moment motoru 118 kgm^2 , ale moment setrvačnosti mlýnu redukovaný na hřídel motoru je 3500 kgm^2 , tedy $30x$ větší. Doba rozběhu je tak asi $55s$.
- Dále je důležitý požadavek na opakované rozběhy. Pak je důležité znát přípustnou hodnotu počtu spouštění motoru (u velkých motorů $2 \div 3x$ po sobě nebo s určenými časovými odstupy).

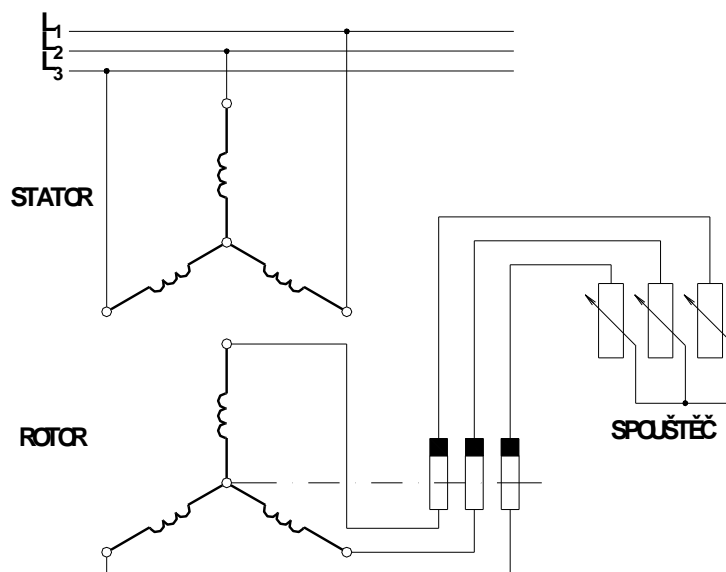
U asynchronních motorů je rozhodujícím faktorem většinou oteplení rotorové klece.

Obecně řečeno při spouštění asynchronního motoru se snažíme dosáhnout co největšího záběrného momentu a zároveň co nejmenšího záběrného proudu, aby nárazy na napájecí síť byly co nejmenší. Z tohoto důvodu používáme zvláště u motorů kroužkových, ale i u motorů nakrátko, různých spouštěcích zařízení, která mohou být většinou mimo motor, ale mohou být i součástí motoru.

Spouštění asynchronního motoru s vinutým rotorem

Asynchronní motor s kroužkovou kotvou se velmi jednoduše spouští zařazením spouštěcího rezistoru nebo i tlumivky do obvodu rotoru.

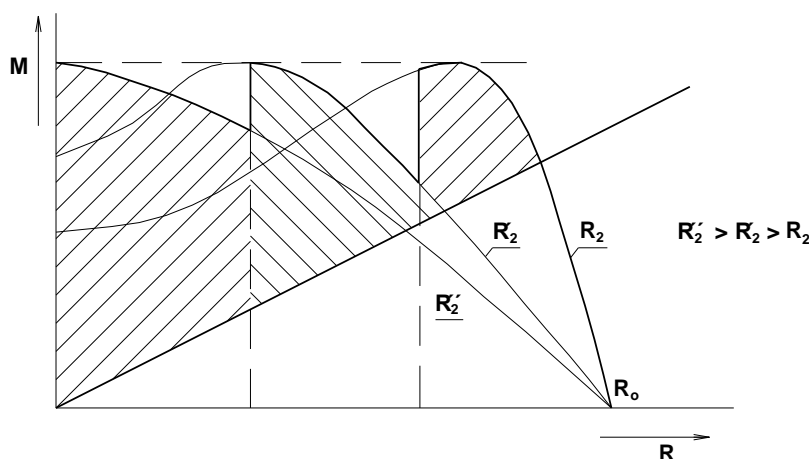
Při spouštění rezistorem se během rozběhu postupně buď plynule, nebo stupňovitě vyřazuje tento rezistor až na posledním stupni se vinutí rotoru spojí nakrátko, jak to naznačuje obr. 5.8.



Obr. 5.8 11!!!

Spojení vinutí se provede krátkospojovačem zabudovaným v rotoru, anebo pouze stykači jako je běžné u jeřábových motorů. U velkých motorů anebo i u těch, které mají dlouhou dobu chodu, se po rozběhu a zkratování krátkospojovačem nadzvednou kartáče, aby se zbytečně neopotřebovaly, jak tyto kartáče tak i kroužky. Zařízení pro nadzvednutí kartáčů se jmenuje odklápeč.

Zařazováním odporu (někdy ho nazýváme skluzovým odporem) do rotorového obvodu se posouvá momentová charakteristika, jak je naznačeno na obr. 5.9. Velikost momentu zvratu je na skluzu nezávislá. Ovšem skluz zvratu se mění přímo úměrně s odporem rotorového obvodu. Takto je možno zvětšovat záběrný moment motoru až do velikosti momentu zvratu, tj. do velikosti maximálního momentu motoru. Záběrný proud motoru se zařazováním odporu do rotoru zmenšuje. Urychlující moment je vyšrafován pro tři různé odporové stupně.



Obr. 5.9

Spouštění asynchronních motorů s kotvou nakrátko

Jak již bylo několikrát uvedeno, podstatnou nevýhodou asynchronního motoru s kotvou nakrátko je velký proudový a momentový ráz při jeho spouštění. Z tohoto důvodu je

nutno při spouštění těchto motorů učinit taková opatření, která zmenší vliv spouštění jednak na napájecí síť, jednak na vlastní motor a jím poháněné zařízení. Zařízení, která splní tento požadavek mohou být buď spouštěcí prvky, které se nacházejí vně elektromotoru (podobně jako u motorů s kotvou kroužkovou – spouštěče), nebo konstrukce elektromotoru je tak uzpůsobena, že zajistí jeho rozběh s požadovanými parametry neovlivňujícími napájecí síť ani poháněný stroj (motor se speciálním vinutím rotoru).

Všimněme si tedy dále všech možností spouštění asynchronních motorů s kotvou nakrátko.

Přímé připojení na napájecí síť

Motory, které nemají při spouštění větší ráz než 22 kVA, tj. motory se jmenovitým výkonem do 3 kW včetně, lze připojit přímo na síť nízkého napětí bez zvláštního spouštěcího zařízení.

Zásadně je možno připojovat přímo na síť motory nakrátko i většího výkonu, avšak jediné v případech zvláště dobré přenosové schopnosti sítě. Úbytek napětí, způsobený krajním spouštěcím proudem, však nesmí překročit 10 % ve dne, 5 % ve špičkách a 15 % v noci.

V průmyslových podnicích je velikost motoru spouštěného přímým připojením na síť dána konkrétní konfigurací sítě. Ve velkých podnicích se při dodržení zvláštních opatření (vyčlenění zvláštního přívodu z elektrárny apod.) jsou přímo spouštěny i motory o výkonu několika MW (2 ÷ 4 MW).

Spouštění se sníženým napětím

Tento způsob spouštění je použitelný u takových pohonů, u nichž se při spouštění nepožaduje plný záběrný moment motoru. Jak jsme již uvedli záběrný moment a celá momentová charakteristika je funkcí čtverce napětí. Tedy

$$M_{ks} = M_k \left(\frac{U_{Is}}{U_{In}} \right)^2 = M_k \left(\frac{I_{Is}}{I_k} \right)^2$$

U_{Is} snížené napětí při spouštění

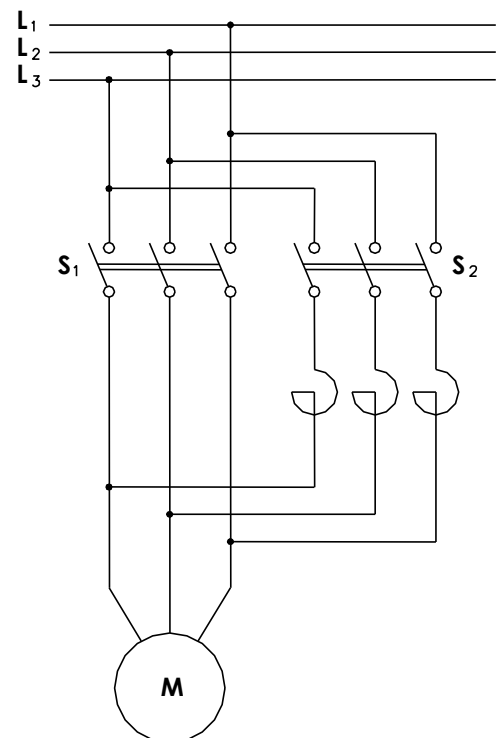
U_{In} jmen. napětí

I_{Is} záběrný proud při sníženém napětí

I_k záběrný proud při jmenovitém napětí

Snížené napětí motoru je možno docílit:

- předřazením rezistoru nebo tlumivky statorovému vinutí
- spouštěcím autotransfornátorem
- přepojením statorového vinutí nejdříve do hvězdy a pak do trojúhelníku

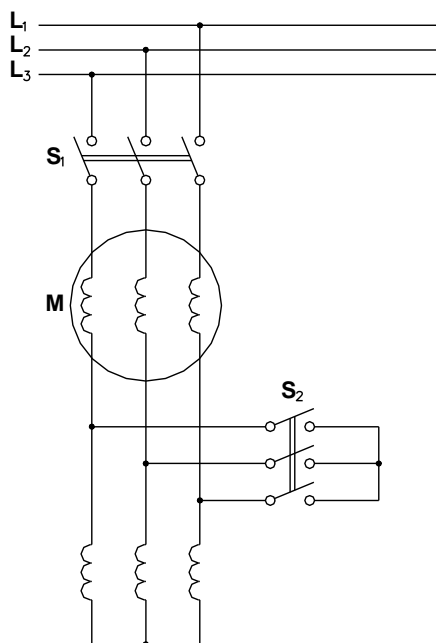


Obr. 5.10

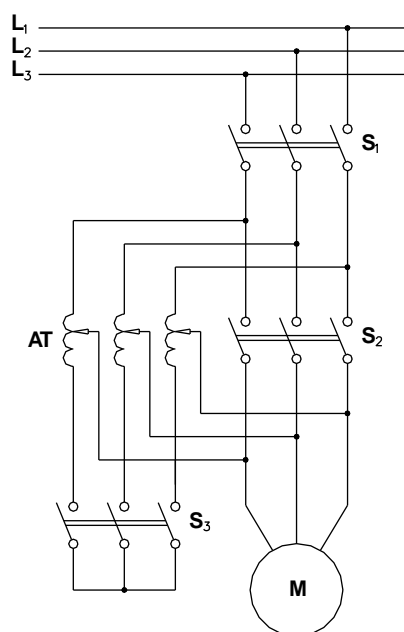
Na obr. 5.10 je nakresleno schéma s předřazenou tlumivkou. Tlumivka, zapojená do série s vinutím statoru, má snížit napětí cca na $0,6 \div 0,7 U_{In}$. Při spouštění se nejdříve zapne vypínač S_2 a pak S_1 . Motory nakrátko velkých výkonů mívají tlumivky se železným jádrem obvykle připojovány do uzlu statorového vinutí.

Tím se sníží napěťové namáhání této tlumivky (použití např. u 6 kV sítě). Při rozběhu se napětí rozdělí v poměru reaktancí motoru a tlumivky. Zapojení je znázorněno na obr. 5.11. Nejdříve se sepne spínač S_1 a po rozběhu se statorové vinutí, které má na svorkovnici vyvedeno 6 svorek, spojí spínačem S_2 do uzlu.

Při spouštění motoru autotransfornátorem, které je nakresleno na obr. 5.12, je při rozběhu spínač uzlu autotransfornátoru S_3 sepnut. Sepneme spínač S_1 a postupně se motor roztáčí. Pak se rozepte spínač S_3 a autotransfornátor může pracovat jako tlumivka. Nakonec se sepne spínač S_2 a rozběh motoru je dokončen. Při tomto způsobu rozběhu v Korndorfferově zapojení nenastává přerušení proudu a motor vytváří trvale moment. Napětí se autotransfornátorem obvykle snižuje na $0,6 \div 0,75 U_n$.



Obr. 5.11



Obr.5.12

Spouštění přepínačem hvězda trojúhelník

Tento způsob spouštění je velmi rozšířený. Používá se u menších a středních motorů asi tak do výkonu $15 \div 20 \text{ kW}$. Motory však musí být pro jmenovité provozní napětí zapojeny do trojúhelníku, tedy např. na 400 V a musí být na svorkovnici vyvedeno 6 konců vinutí. Při spouštění je vinutí zapojeno do hvězdy. Fázové napětí se při spouštění zmenší $\sqrt{3}$ krát, tj.

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}}$$

a fázový proud

$$I_{fy} = I_{sy} = \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z_f}$$

kde Z_f je impedance jedné fáze.

Při spojení do trojúhelníka (D) by byl záběrný proud jedné fáze

$$I_{fd} = \frac{U_s}{Z_f}$$

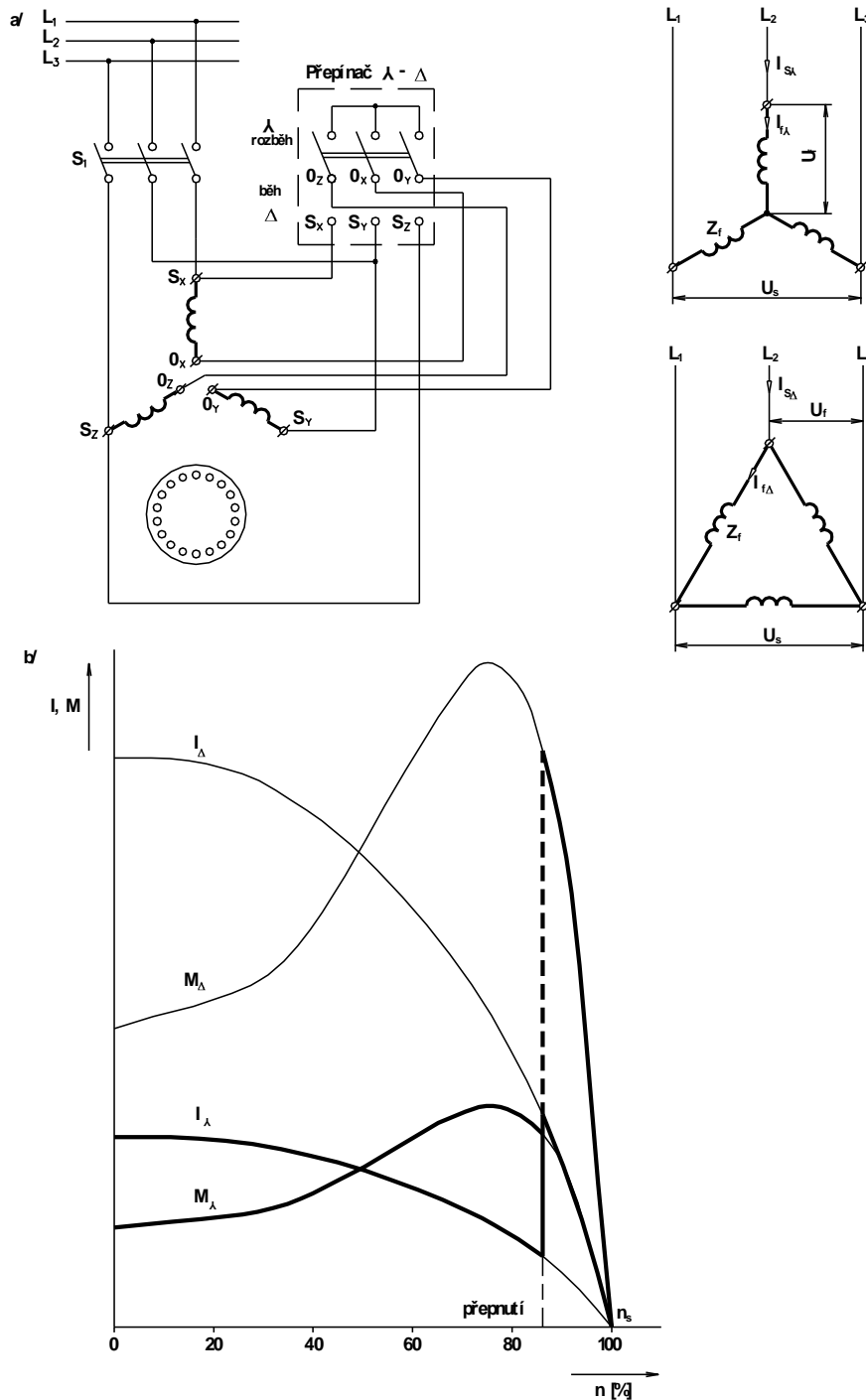
Sdružený proud ze sítě je

$$I_{sd} = \sqrt{3} \frac{U_s}{Z_f}$$

Poměr obou proudů je

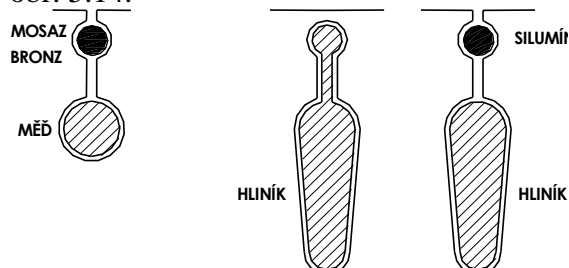
$$\frac{I_{sy}}{I_{sd}} = \frac{U_s \cdot Z_f}{3Z_f \cdot U_s} = \frac{1}{3} \quad (5.59)$$

Záběrný proud se tedy snížil na jednu třetinu, ovšem fázové napětí je menší jen o odmocninu ze tří. Záběrný moment se tedy zmenší jen na jednu třetinu jako proud. Zde je nutno poznamenat, že proudový náraz může nastat i po přepnutí z hvězdy do trojúhelníka při nevhodném okamžiku přepínání, jak je možno si znázornit na obr. 5.13.



Motory se speciálním vinutím rotoru

Spouštění asynchronních motorů se speciálním vinutím rotoru. Zařízení omezující rozběh je možno uspořádat i ve vlastním motoru. Jde o speciálně provedené rotorové vinutí jak ukazuje obr. 5.14.



Obr. 5.14

Otázky ke kap. 5.4

1. Čeho se obáváme při spouštění as. motorů
2. Jak velký je proud při spouštění motoru
3. Čím omezíme proudový náraz při spouštění motoru kroužkového
4. Může být motor spouštěn přímým připojením k síti
5. Způsoby spouštění motoru s kotvou nakrátko
6. Proč se používá dvojitá klec na rotoru

5.4 Řízení otáček asynchronních motorů

Čas

Cíl Po prostudování budete umět

- Vyjmenovat způsoby regulace otáček as. motorů
- Uvést výhody a nevýhody jednotlivých způsobů
- Posoudit energetickou náročnost regulace otáček pro jednotlivé způsoby

Výklad

Abychom mohli rozebrat možnosti řízení otáček asynchronního motoru, musíme vyjít ze základního vztahu pro otáčky asynchronního motoru

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad 5.60!!! \quad (5.30)$$

protože jsme definovali skluz jako

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (5.31)$$

pak po úpravě a dosazení dostaneme otáčky asynchronního motoru

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - s) \quad (5.32)$$

Z této rovnice je zřejmé, že otáčky motoru lze regulovat:

- změnou skluzu
- změnou počtu pólů
- změnou statorového kmitočtu

U speciálních provedení as. motorů je možno použít pro řízení otáček ještě dalších způsobů. Tato problematika však již patří do oblasti elektrických pohonů.

Při regulaci otáček asynchronních motorů je nutné pamatovat na to, že pokud při regulování pracujeme pod jmenovitými otáčkami a pak se u strojů s vlastní ventilací zhoršuje odvádění ztrátového tepla ze stroje. Zatížitelnost takovýchto strojů je při nižších otáčkách podstatně nižší než při otáčkách jmenovitých.

Řízení otáček změnou skluzu

Jak jsme si již uvedli je rotorové napětí $U_2 = s \cdot U_{20}$ a převod napětí $p_u = U_1 / U_{20}$. U normálního asynchronního motoru můžeme také psát

$$U_2 = s \cdot \frac{U_1}{p_u} = R_2 \cdot I_2 \quad (5.33)$$

Budeme-li do rotorového obvodu přivádět protinapětí U_2^* (např. u podsynchronní kaskády), bude platit

$$U_2 = R_2 \cdot I_2 + U_2^* \quad (5.34)$$

$$s \cdot U_{20} = R_2 \cdot I_2 + U_2^*$$

$$s \cdot \frac{U_1}{p_u} = R_2 \cdot I_2 + U_2^*$$

$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \left(1 - \frac{R_2 \cdot I_2 + U_2^*}{\frac{U_1}{p_u}} \right)$$

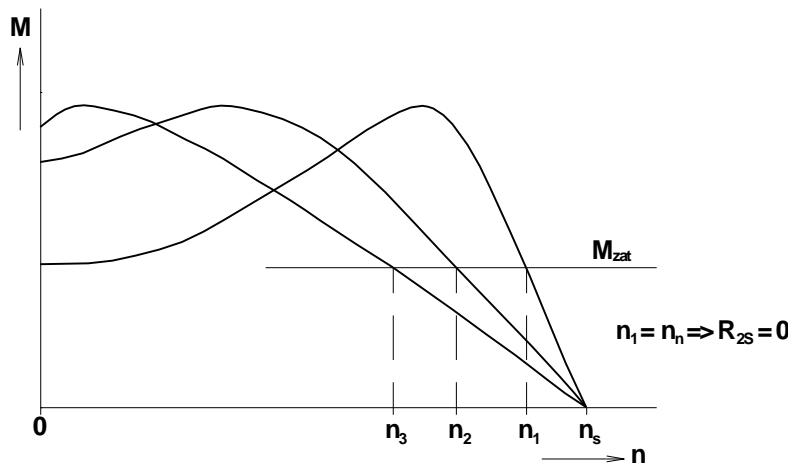
V této rovnici již máme všechny veličiny, kterými můžeme regulovat otáčky asynchronního motoru. V kap. 10 jsme si uvedli, že účinnost je

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P_1 \cdot (1-s)}{P_1} = (1-s) \quad (5.35)$$

Je tedy patrné, že s nárůstem skluzu se zhoršuje účinnost motoru.

Při skluzové regulaci můžeme tedy měnit otáčky buď **odporem v rotoru statorovým napětím** (a zároveň protimomentem) anebo **protinapětím v rotoru**. První a poslední uvedený způsob regulace se dá uskutečnit u kroužkových motorů.

Řízení otáček **změnou odporu** v rotorovém obvodu je značně nevhodné, neboť skluzová energie se maří v rotorovém odporu. Pro vysvětlení tohoto způsobu regulace můžeme použít obr. 5.15. Zařazením odporu R_{2s} do rotorového obvodu se momentová charakteristika "pokládá", tedy změkčuje. Nastavená rychlost přísluší vždy jen určitému momentu. Protože při $M = 0$ jsou otáčky $n = n_s$, a to bez ohledu na rotorový odpor, což znamená, že při chodu asynchronního motoru naprázdno nelze regulovat jeho otáčky.

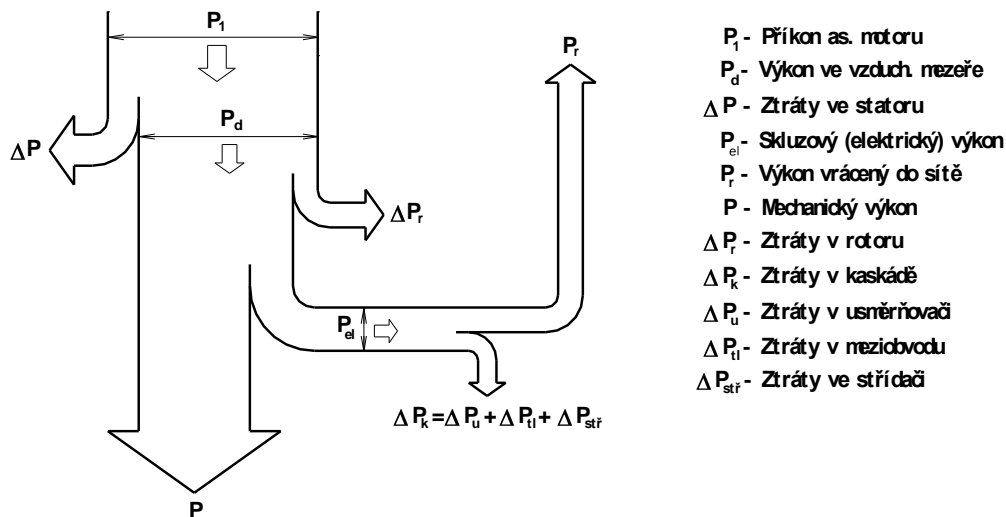


Obr. 5.15

Rozsah řízení otáček tímto způsobem bývá poměrně malý, a to maximálně do skluzu $20 \div 30 \%$. Rotorové odporníky jsou při regulaci totožné se spouštěcími odporníky, ale musí být dimenzovány na trvalý chod, nikoliv pouze na spouštění.

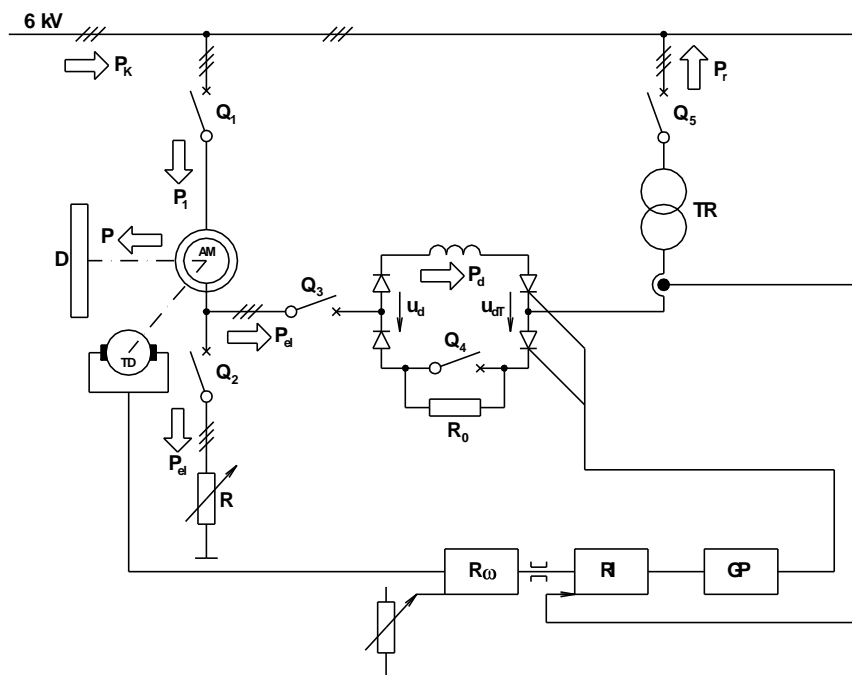
Bude-li moment motoru při regulaci konstantní $M = konst.$, potom i rotorový proud bude konstantní, a to tedy znamená, že i elektrické ztráty ve vinutí rotoru budou konstantní, a to při všech hodnotách skluzu. To pak vede k závěru, že při snižování otáček a tím zhoršování chlazení u motorů s vlastní ventilací bude vzrůstat oteplení rotorového vinutí. Aby se motor nepřehříval, musí se se zvyšováním skluzu snižovat zátěžný moment motoru a tím i proud motoru. Celkové ztráty v rotorovém obvodu se rozdělí na ztráty ve vinutí rotoru úměrné odporu fáze rotoru R_2 a druhá část, úměrná velikosti spouštěcího odporu R_{2s} , se vyvine v tomto odporníku. Otáčky motoru lze odporem v rotoru pouze snižovat pod hodnotu otáček synchronních.

Řízení otáček **přivedením protinapětí do rotorového** obvodu odstraňuje základní nedostatek předešlého způsobu, tj. nevhodnost regulace a dále tímto způsobem lze otáčky motoru zvyšovat i nad hodnotu synchronních otáček. Tento způsob řízení je realizován v kaskádním zapojení asynchronního motoru, kdy se skluzový elektrický výkon vrací zpět do sítě. Jak jsme již uvedli, elektrický výkon v rotoru se rozdělí na ztráty ve vinutí rotoru a na ztráty v rotorovém odporníku. A právě tyto ztráty v odporníku můžeme využít pro zvýšení účinnosti motoru. Rozdělení výkonů a ztrát v podsynchronní kaskádě je znázorněné na obr. 15.16.



Obr. 5.16

Asynchronní motor s podsynchronní ventilovou kaskádou je nakreslen na obr. 5.17.



Obr. 5.17

Řízení otáček asynchronního motoru se dosáhne změnou protinapětí U_{dT} v rotorovém obvodu. V ustáleném stavu platí, že $U_{dT} = U_d$, kde U_d je usměrněné napětí za diodovým usměrňovačem. Napětí U_{dT} se mění fázovým řízením střídače, kdežto U_d závisí na skluzu asynchronního motoru. Za předpokladu konstantního magnetického toku a rotorového odporu je pro potřebný moment asynchronního motoru jeho rotorový proud dán

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{s_1 \cdot U_{20}}{Z_2} \quad (5.36)$$

Bude-li v rotorovém obvodu protinapětí U_{dT} , pak k dosažení téhož proudu I_2 se musí napětí indukované v rotoru zvětšit o hodnotu protinapětí, neboť platí

$$I_2 = \frac{s_2 U_{20} - U_{dT}}{Z_2} \quad (5.37)$$

Čím je tedy větší protinapětí, tím větší musí být skluz motoru, aby rozdíl napětí motoru a protinapětí zůstal zachován.

Skluzává regulace statorovým napětím.

U normálních asynchronních motorů má změna napájecího napětí velmi malý vliv na otáčivou rychlost. Jak jsme si již uvedli, moment asynchronního motoru je úměrný druhé mocnině napětí, tedy

$$M \approx U_1^2$$

Jakmile snížíme napětí, otáčky motoru se sníží na takovou hodnotu, při které nastane rovnováha mezi zátěžným momentem a momentem motoru. Stabilní provoz motoru může probíhat jen do momentu zvratu M_{zvr} . Při změně napětí závisí otáčky na zatížení, a proto regulaci naprázdno nelze prakticky uskutečnit.

Při zanedbání ztrát ve statoru bude $P_1 = P_\delta$ a tedy

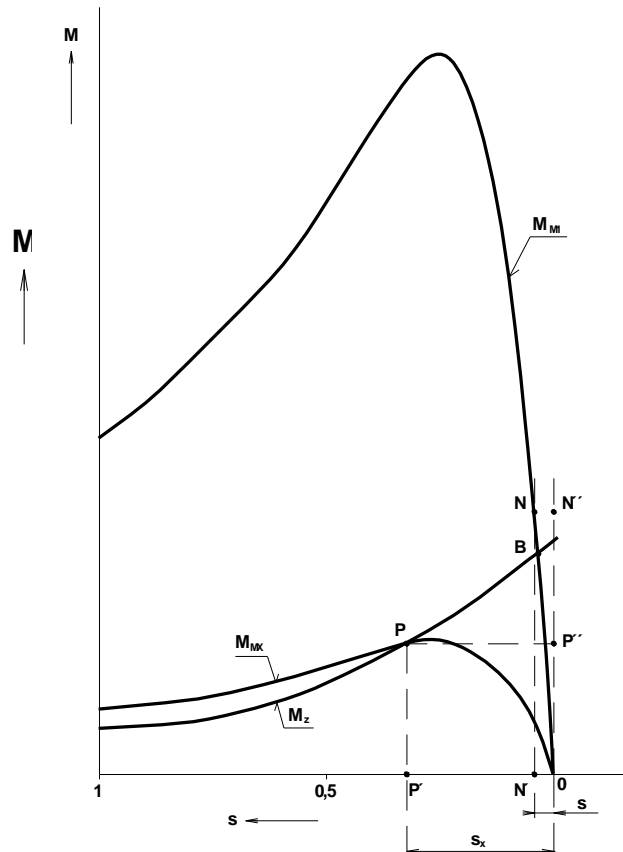
$$P_{el} = s \cdot P_\delta = s \cdot \frac{\omega_l}{p} \cdot M = \frac{\omega_l}{p} \cdot (M \cdot s) \quad (5.38)$$

Protože výraz ω_l/p je synchronní úhlová rychlost a je při $f_1 = konst.$ a pro daný počet pólů konstantní, je součin $M \cdot s$ měřítkem celkových ztrát ve spouštěcím odporníku.

Mějme pohon jehož momentové poměry znázorňuje obr. 5.18, kdy M_{MI} je momentová charakteristika při jmenovitém napětí a M_z momentová zatěžovací charakteristika. N je jmenovitý moment motoru.

Jmenovité ztráty v rotoru jsou $\Delta P_{2n} \sim M_N \cdot s_N$ a na obr. 5.18 jsou určeny plochou obdélníku $ON'NN''$. V bodě D je provozní stav pohonu a tento stav je stabilní. Jestliže nyní snížíme napájecí napětí z U_{IN} na U_{IX} , dostaneme novou momentovou charakteristiku úměrnou U_I . V obr. 5.18 je to charakteristika M_{MX} a ta protne charakteristiku M_z v bodě P . I když tento bod P je již v labilní oblasti momentové charakteristiky, nakreslený případ by byl provozně stabilní a teoreticky je možný.

Je zřejmé, že celkové ztráty v rotorovém obvodu v tomto případě jsou úměrné obdélníku $OP'PP''$ jsou značně vyšší, než ztráty jmenovité dané plochou obdélníku $ON'NN''$. Jejich velikost oproti ztrátám jmenovitým se určí z poměru ploch uvedených obdélníků. Jestliže má tedy motor pracovat trvale v tomto stavu, nesmí ztráty v rotoru překročit ztráty jmenovité ΔP_N . Navíc pokud máme motor s vlastním chlazením je toto chlazení při nižších otáčkách méně účinné a tak dovolené ztráty nesmí překročit hodnotu $P_{2dovol} = P_{2N} \cdot k_v$, kde k_v je koeficient chlazení stroje.



Obr. 5.18

Změnu statorového napětí dosahujeme většinou v současné době použitím řízených polovodičových měničů.

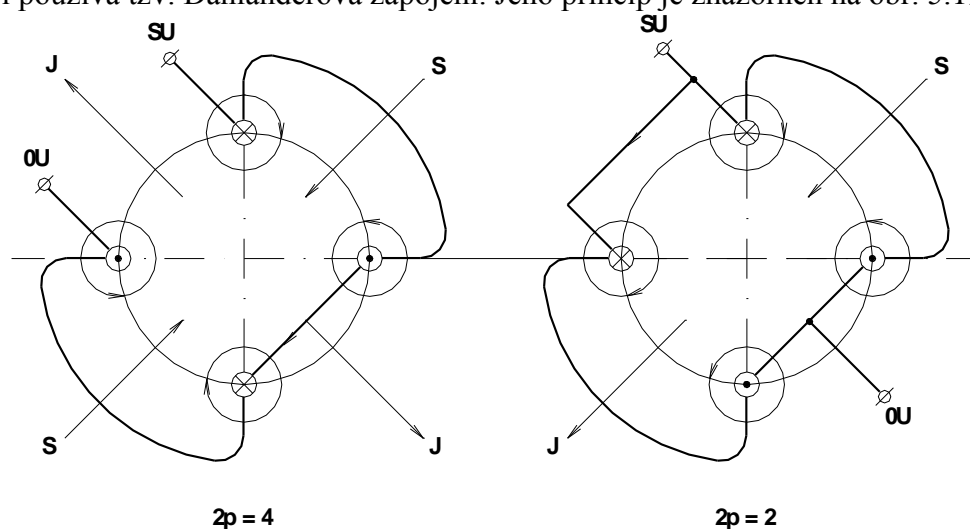
Řízení otáček změnou počtu pólů

Tento způsob řízení otáček motorů umožňuje změnu otáček pouze po stupních. Počet stupňů však nebývá veliký, běžně se používá pouze dvou stupňů. Pro zvláštní účely lze použít i větší počet stupňů. To však již vede ke značně drahým strojům a komplikovaným přepínačům.

Stupně, po kterých měníme otáčky, odpovídají synchronním otáčkám při různém počtu pólů. Stator má buď několik samostatných vinutí s různým počtem pólů (např. 18 na 24) nebo jedno vinutí přepínatelné, nebo se kombinují oba způsoby. Takovéto řešení vede ke zvětšení rozměrů a váhy stroje, poskytuje však možnost libovolného poměru rychlostí např. 1:3, ale i 1:12.

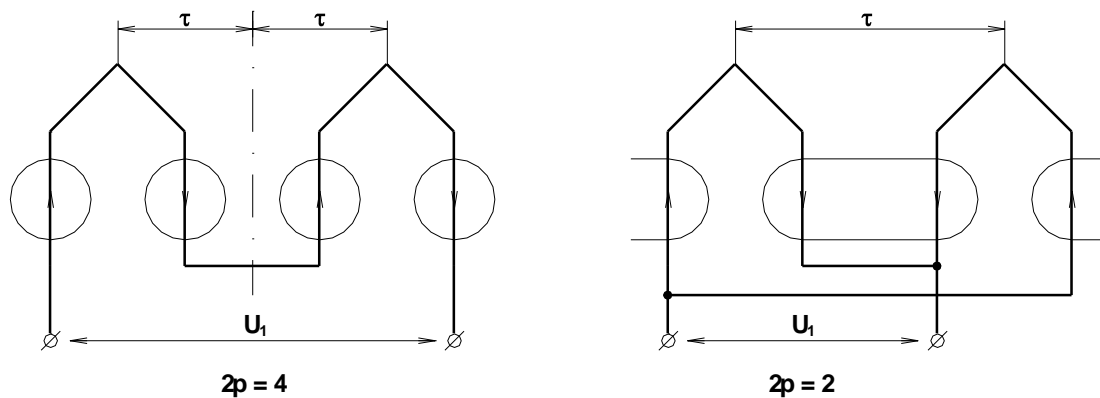
Při přepínání počtu pólů musí vinutí vyhovovat mnoha požadavkům. Jde zejména o to, aby při všech otáčkách měl motor stejný smysl otáčení, pro každé otáčky musí být stanoven jmenovitý výkon motoru, atd.

Vytvoření přepínatelného vinutí vyhovujícího všem požadavkům není jednoduché a řešení jsou obvykle patentována. Pro přepínání v poměru 1:2 motoru s jedním vinutím se nejčastěji používá tzv. Dahlanderova zapojení. Jeho princip je znázorněn na obr. 5.19.



Obr. 5.19

V jedné fázi jsou 2 cívky čtyřpólového vinutí spojeny za sebou s vyvedeným středem. Jsou-li obě cívky zapojeny v sérii, vytvářejí čtyřpólové magnetické pole. Spojí-li se paralelně, zruší se mg. pole mezi cívkami a vznikne pole dvoupólové. Pro dva póly je vinutí méně využito, neboť krok vinutí je zkrácen na $1/2 \tau_p$. Principiálně je toto vinutí nakresleno na obr. 5.20.



Obr. 5.20

Asynchronní motory mají obvykle dva způsoby přepínání počtu pólů:

přepínání hvězda – dvojitá hvězda (obr. 5.21). Výkon motoru při zapojení Y je

$$P_Y = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_Y \quad (5.39)$$

při zapojení YY

$$P_{YY} = 3 \cdot U_1 \cdot 2 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{YY} \quad (5.40)$$

Za přibližného předpokladu, že účinnky a účinnosti jsou stejné platí, že

$$P_{YY} = 2 \cdot P_Y \quad (5.41)$$

Protože moment motoru

$$M \approx \frac{P}{n}$$

a dále proto, že $n_{yy} = 2 \cdot n_y$, bude v obou případech stejný moment, tedy $M_{yy} = M_y$.

přepínání trojúhelník – dvojitá hvězda (obr. 5.22)

Fázové napětí při spojení v trojúhelníku bude

$$U_{fd} = \sqrt{3} U_1$$

pak

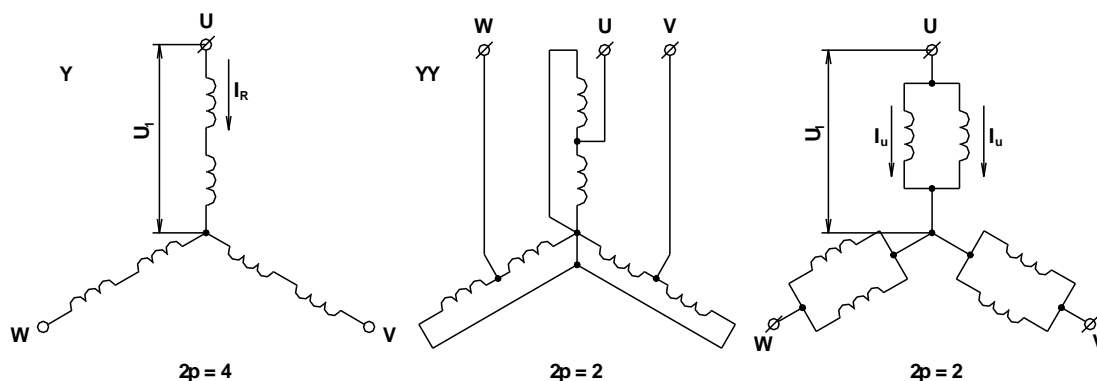
$$P_d = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_n \cdot \cos \varphi_d \quad (5.42)$$

$$P_{yy} = 3 \cdot U_1 \cdot 2 \cdot I \cdot \cos \varphi_{yy} \quad (5.43)$$

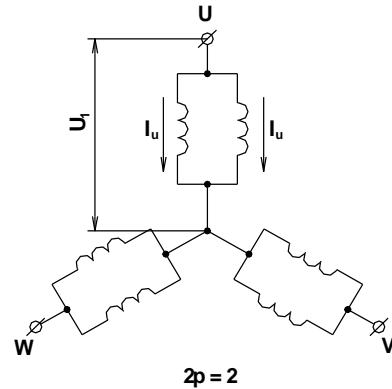
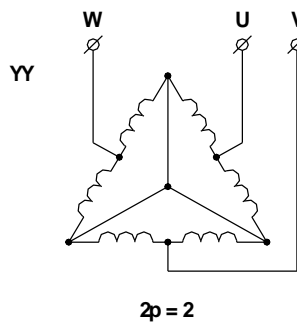
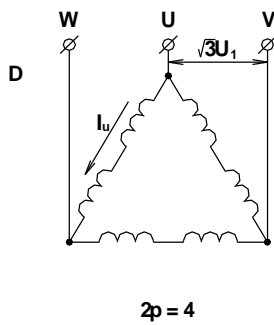
Opět za předpokladu stejných účinnků a účinností je

$$P_{yy} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot P_d = 1,16 \cdot P_d \quad (5.44)$$

Výkon je tedy konstantní (téměř) a pak moment M_d bude asi $2 \cdot M_{yy}$.



Obr. 5.21



Obr. 5.22

Řízení otáček změnou kmitočtu statorového napětí

Jak jsme uvedli v úvodu k asynchronním motorům, mnozí autoři považují za nevýhodu asynchronního motoru skutečnost, že u něj nelze plynule a v širokém rozsahu regulovat otáčky. Jak jsme uvedli změnou kmitočtu napájecího napětí je možné měnit otáčky plynule v dosti širokém rozsahu. Je však mimo motoru nutno mít k dispozici zdroj tohoto kmitočtu, tj. měnič kmitočtu. V současné době rozvinuté polovodičové techniky jsou tyto měniče kmitočtu realizovány pouze na této bázi.

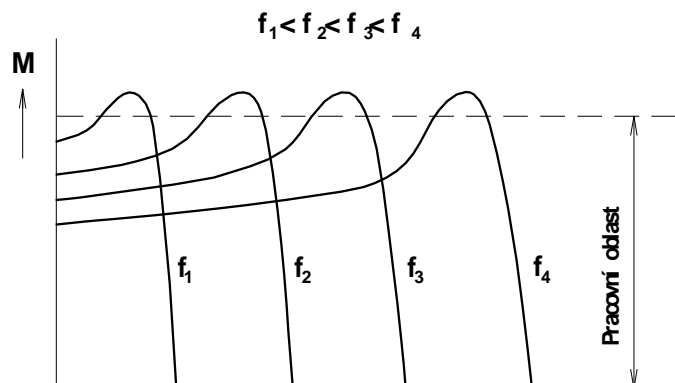
Kmitočtová regulace je jedním z nejhospodárnějších způsobů regulace otáček asynchronních motorů. Při zanedbání úbytku napětí na statoru lze psát

$$U_1 \approx \phi \cdot f_1 \quad (5.45)$$

Při snižování frekvence by při konstantním statorovém napětí vzrůstal magnetický tok ϕ . Tím by vzrůstalo nasycení stroje, magnetizační proud a tím by se zhoršoval účinnost i účinnost a vzrůstalo by i oteplení stroje. Z tohoto důvodu je nutné měnit i velikost statorového napětí tak, aby $\Phi = konst.$ Tedy $U_1/f_1 = konst.$ Tento vztah neplatí pro celý regulační rozsah. Při nízkém kmitočtu (pod 10 Hz) se projevuje vliv odporu statoru, který při sníženém kmitočtu dosahuje poměrně velké hodnoty vzhledem k reaktancím. Potřebné napětí je pak vyšší než podle tohoto vztahu, neboť je nutno kompenzovat úbytek napětí na tomto činném odporu.

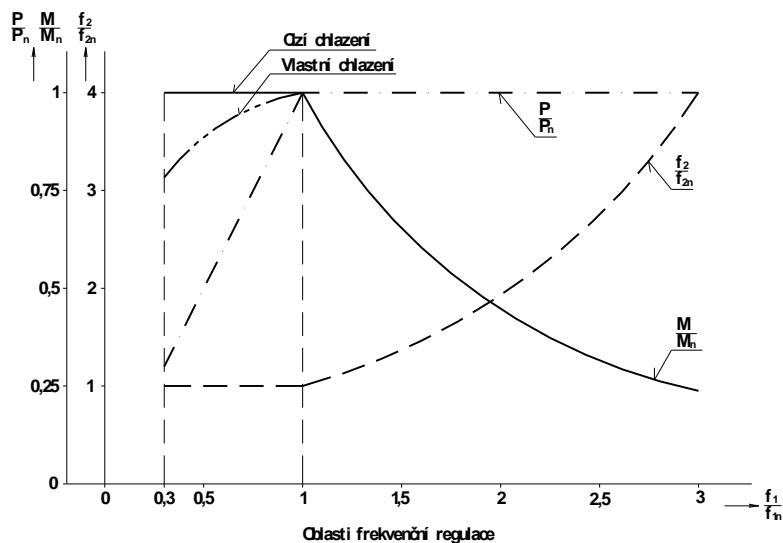
Ale také i $M = konst.$ Momentové charakteristiky asynchronního motoru při čtyřech různých kmitočtech napájecího napětí ukazuje obr. 5.23.

Změnou kmitočtu je možné regulovat otáčivou rychlost jak motorů



Obr. 5.23

kroužkových, tak i motorů s kotvou nakrátko. Při řízení otáček lze kmitočet zvyšovat i nad jmenovitou hodnotu, ale při $U_1 = konst.$ Pak tok i moment bude úměrný $1/f_1$ a výkon $P = konst.$ – tedy jako u stejnosměrných motorů (obr. 5.24).



Obr. 5.24

Otázky ke kap 5.4

1. Napište vztah pro řízení otáček as. motoru
2. Jak můžeme řídit otáčky motoru plynule
3. Popište stupňovité řízení otáček
4. Vysvětlete řízení otáček skluzem
5. Jak se dá zvýšit energetická účinnost při řízení otáček skluzem
6. V jakých poměrech se dají regulovat otáčky přepínáním počtu pólů
7. Na co musíme pamatovat při řízení otáček změnou frekvence

5.5 Vliv harmonických na činnost asynchronního motoru

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Definovat harmonické v el. stroji
- Určit zdroj harmonických
- Vysvětlit negativní účinky harmonických na činnost stroje
- Určit způsoby omezení harmonických i jejich negativních účinků

Výklad

5.5.1 Vznik harmonických a jejich druhy

Kvantitativní určení magnetického pole v točivém elektrickém stroji je velmi obtížné z následujících důvodů:

- na tvorbě magnetického pole se obvykle podílí více vinutí

- tvar magnetického obvodu zvláště vzduchové mezery je proměnný a rovněž vinutí má různé uspořádání
- magnetické pole se mění při pohybu rotoru
- magnetické materiály použité pro magnetický obvod nemají lineární vlastnosti

Při teoretických úvahách se pak přijímají různá zjednodušení jako: magnetické pole se rozdělí na pole ve vzduchové mezeře a pole rozptylové; předpokládá se, že pohybem rotoru je ovlivňováno pouze pole ve vzduchové mezeře; magnetické pole v celém obvodu se předpokládá homogenní; zanedbává se vliv drážkování; předpokládá se nekonečná permeabilita železa; linearizuje se závislost $B(H)$; atd.

Časový a prostorový průběh elektrických a magnetických veličin ve střídavých elektrických strojích není ve skutečnosti čistě sinusový. Použitím Fourierovy transformace získáme frekvenční spektrum, v němž bude vedle základní harmonické i řada harmonických a také subharmonických.

Harmonické působí na činnost elektrických strojů zpravidla negativně, proto je budeme rozebírat z hlediska jejich vzniku, účinků na vlastnosti stroje a také rozebereme možnosti jejich potlačení.

Harmonické se mohou vyskytovat v napětí, k němuž je stroj připojen, nebo kterého je zdrojem, v proudu protékajícím vinutím stroje, ale také v magnetickém poli ve vzduchové mezeře tj. v magnetickém napětí a magnetické indukci.

Dále se mohou vyskytovat v různých vinutích stroje např. statorovém a rotorovém. Jestliže bychom uvažovali lineární závislost mezi proudem a napětím, mezi magnetickým napětím a magnetickou indukcí, pak by harmonické napětí vytvářely stejné harmonické proudy, harmonické v magnetickém napětí by odpovídaly harmonickým v proudu, řády harmonických v magnetické indukci by byly stejné jako v magnetickém napětí. Protože však může dojít k nasycení magnetického obvodu a magnetická vodivost vzduchové mezery není po obvodě a délce stroje konstantní, neodpovídají harmonické proudy harmonickým v napětí a v magnetické indukci apod. Obdobně nemusí odpovídat harmonické ve vinutí rotoru harmonickým ve vinutí statoru.

V točivém elektrickém stroji může vznikat několik druhů harmonických. Příčiny jejich vzniku jsou jednak v samotném konstrukčním uspořádání elektrického stroje, dále to může být nesinusové napájecí napětí nebo proud a také poruchy elektrických i mechanických částí stroje.

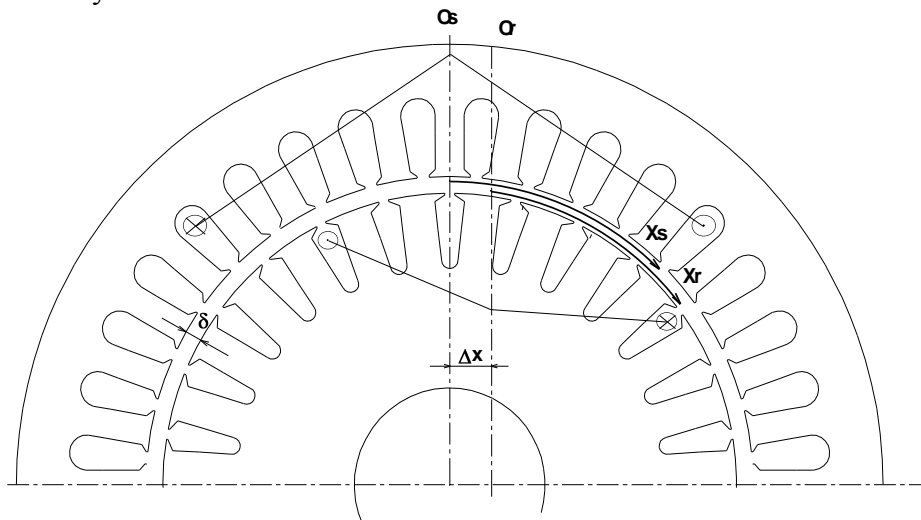
5.5.2 Prostorové harmonické

Prostorovou vlnou rozumíme prostorové rozložení jakékoliv fyzikální veličiny (např. magnetického napětí) podle sinusové funkce. V našem případě jde o rozložení podél obvodu vrtání statoru, jak je naznačeno na obr. 5.25. Pro stator platí souřadnice x_s , měřené od osy O_s , a pro rotor x_r měřeno od osy O_r . Vzájemná poloha obou soustav se liší o vzdálenost os Δx , nebo úhel α .

U elektrických strojů vycházíme z rozložení okamžitých proudů na obvodu statoru nebo rotoru a toto rozložení nazýváme lineární proudovou vrstvou A ($A \cdot m^{-1}$). Proudová vrstva je funkcí prostorové souřadnice x a času t , neboť proudy protékající vodiči se mění s časem. Pokud je vinutí uloženo v drážkách, pak je proudová vrstva nespojitá funkce prostorové souřadnice.

Jestliže je vzduchová mezera stroje teoreticky konstantní a zanedbáme odpor železa, pak vlně proudové vrstvy $A(x)$ je pevně přiřazena vlna magnetického napětí $F(x)$ a toku $\phi(x)$. Časové změny všech těchto vln jsou shodné.

Prostorových harmonických je celá řada. Ve spektru se však nemohou vyskytnout sudé harmonické a také by se neměly vyskytnout 3. harmonické a její násobky - 9, 15 atd.. pokud je třífázové vinutí zcela symetrické. To znamená, že v proudovém spektru budou zastoupeny zvláště liché harmonické tj. 5, 7, 11, 13 ... atd. Nás podrobně zajímají pouze harmonické do určitého řádu, neboť amplituda harmonických by měla klesat s jejich řádem a pak se tedy stávají neměřitelnými.



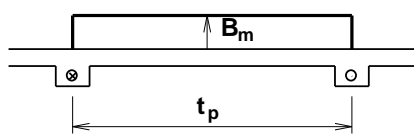
Obr. 5.25

5.5.3 Stupňové harmonické

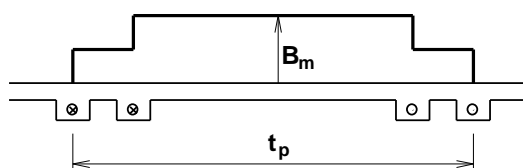
Stupňové harmonické vznikají tak, že vinutí a s ním i proudová vrstva nejsou na povrchu statoru nebo rotoru rozloženy spojitě. Vinutí je diskrétně uloženo do drážek. Proud v drážkách jsou pak omezeny pouze na otevření drážek nebo častěji se soustřeďují pouze do osy drážky. Stator i rotor může být v tomto případě pokládán za hladký.

U stroje, se statorovým vinutím s jednou cívkou na pólovou rozteč napájeným časově sinusově proměnným proudem, vzniká obdélníková vlna magnetického pole (obr. 5.26).

Tato vlna se otáčí, pokud vinutí bude vícefázové. Obdélníkové pole si můžeme rozložit na základní sinusové pole s 1. harmonickou a vyššími harmonickými.



Obr. 5.26



Obr. 5.27

Jestliže rozložíme vinutí do více drážek, vznikne stupňovité magnetické pole (obr. 5.27) a toto pole obsahuje méně harmonických, tzn., že se více blíží sinusovce. Rozložením vinutí do více drážek, lze vliv prostorových harmonických výrazně potlačit. Pro nekonečně mnoho drážek by pole bylo lichoběžníkové.

Mějme normální symetrické nezlomkové 3-fázové vinutí, u něhož se každá fáze rozkládá na $2 \times 60^\circ$ na pólpár. Toto vinutí napájené trojfázovými proudy časově posunutými o 120° vytvoří kruhové točivé magnetické pole o stálé velikosti, které však mění svou polohu. Jde tedy o vlnu konstantní amplitudy, která se pohybuje ve vzduchové mezeře mechanickou synchronní úhlovou rychlostí.

$$\omega_{1m} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = \frac{\omega_1}{p} \quad (5.46)$$

kde $\omega_{lm} = 2 \cdot \pi \cdot f_1$ a $\omega_{lm} = 2 \cdot \pi \cdot n$.
 f_1 je frekvence sítě
 n otáčky motoru
 p počet pólpárů motoru

Amplituda vlny magnetického napětí pro pól

$$F_m = 0,45 \cdot m \cdot k_{vl} \frac{N \cdot I}{p} \quad (5.47)$$

jak bylo uvedeno v kap. 8 pro dvojici pólů.

$$c = 0, 1, 2, \dots$$

Výraz můžeme upravit na

$$\nu = 2 \cdot c \cdot m \pm 1 = \frac{c \cdot Q}{p \cdot q} \pm 1 \quad (5.48)$$

neboť $Q = q \cdot m \cdot 2p$ a $m = Q/q \cdot 2p$

Q je počet drážek

q je počet drážek na pól a fázi

Jestliže uvažujeme q pouze celé číslo, můžeme vztah (5.48) psát jako

$$\nu = c \cdot \frac{Q}{p} \pm 1 \quad (5.49)$$

5.5.4 Drážkové (zubové) harmonické

V předcházejícím odstavci jsme předpokládali rovnoměrnou vzduchovou mezeru δ , tzn., že průběh magnetické indukce $b(x, t)$ by měl odpovídat průběhu magnetického napětí, tedy

$$b(x, t) = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot f(x, t) \quad (5.50)$$

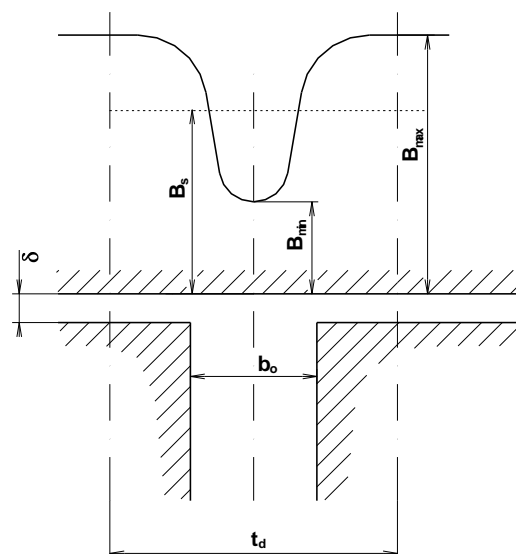
Povrch statoru a rotoru určující velikost vzduchové mezery stroje není obvykle hladký, nýbrž je drážkovaný. Magnetický odpor a tedy i magnetická vodivost je na různých místech vzduchové mezery různá. Nestejnoměrná vodivost mezery je pak příčinou vzniku vln magnetického toku, jejichž řád nemusí souhlasit s řádem vln proudové vrstvy, které tyto vlny toku budí. Magnetická vodivost vzduchové mezery bude

$$\lambda(x, t) = \frac{l}{\delta(x, t)} \quad (5.51)$$

Magnetická vodivost mezery se rovná převrácené hodnotě velikosti vzduchové mezery v daném místě. Tato vodivost je také závislá na poloze rotoru a tedy na čase.

Předpokládejme, že je drážkovaný pouze rotor. Označíme-li magnetickou indukci ve vzduchové mezeře v nedrážkované části B_{max} , pak v ose drážky, při stejném magnetickém napětí, klesne indukce na hodnotu B_{min} - viz. obr. 5.28.

Hodnota B_{min} je závislá na velikosti otevření drážky b_0 , velikost vzduchové mezery δ a drážkové rozteči t_d . Výsledná indukce bude B_s



Obr. 5.28

a jí bude odpovídat fiktivní zvětšení vzduchové mezery z δ na δ' . Obecně bude tedy platit

$$b(\omega, t) \approx f(\omega, t) \lambda(\omega, t) \mu_0 \quad (5.52)$$

Z výše uvedených důvodů neplatí úměrnost mezi průběhem magnetického napětí a magnetické indukce ve vzduchové mezeře, nýbrž na základní vlnu budou nasuperponovány další vlny od drážkování rotoru i statoru, které budou souviset s počtem drážek na pólpár. Vzniknou tak další harmonické, jejichž řád bude

$$\nu = c \cdot \frac{Q}{p} \pm 1 = 2 \cdot m \cdot q \cdot c \pm 1 \quad (5.53)$$

$$c = 1, 2, 3, \dots$$

Když srovnáme vztah (5.53) se vztahem (5.49) pak usoudíme, že tento řád harmonických již existuje i v průběhu magnetického napětí a tedy i indukce. Drážkováním se pak mohou tyto harmonické zvýraznit nebo i zmenšit.

Jestliže uvažujeme drážkovaný stator i rotor, pak bychom si mohli zjednodušeně představit, že ve vzduchové mezeře vznikají dvě skupiny zubových harmonických: jedna při drážkovaném statoru a hladkém rotoru a druhá při hladkém statoru a drážkovaném rotoru.

Příklad vlivu drážkování statoru a rotoru na tvar magnetického pole ve vzduchové mezeře ukazuje příloha 1.

5.5.5 Diferenční harmonické

Jestliže bychom si chtěli vyjádřit vliv drážkování rotoru na stupňovitou pracovní vlnu magnetického napětí statoru, která má řád $\nu_s' = Q_1 \pm p$, pak obdržíme řadu harmonických, které jsou nazývány diferenční harmonické. Tyto vznikají modulací stupňových harmonických vlnami magnetických vodivostí vzduchové mezery dané počtem drážek statoru a rotoru. Tyto harmonické mají řád

$$\nu_{dif} = Q_2 - Q_1 \pm p \quad (5.54)$$

a nezávisle na svém vzniku a při každých otáčkách stroje působí stejně jako stupňovité nebo drážkované harmonické.

5.5.6 Časové harmonické

Zdrojem nesinusového napájení střídavých elektrických strojů a tedy časových harmonických jsou zejména střídavé měniče používané pro snadnou regulaci otáček střídavých elektromotorů. Nejčastěji to mohou být frekvenční měniče, které zajistí energeticky nejvýhodnější regulaci otáček, tzn. téměř bezztrátovou. Přes značnou hospodárnost přeměny přináší nesinusové napájení některé závažné problémy.

V současné době však ani rozvodné sítě, zvláště v průmyslových podnicích, nezaručují čistě sinusové napájení. V křivce napětí se nejčastěji objevují 3, 5, 7 atd. harmonické.

Nesinusové napájení se na chodu asynchronního motoru projevuje jednak vznikem parazitních momentů, vibrací, hluku a zvýšeného napět'ového namáhání izolačního systému, ale také vyššími ztrátami vlivem harmonických proudů a napětí.

Na velikost a rozložení harmonických napětí a proudů má podstatný vliv druh, způsob zapojení a pracovní režim měniče použitého pro napájení motoru. Omezíme-li se pouze na měniče frekvence, pak jde o přímé měniče, tj. cyklokonvertory a dva druhy měničů se stejnosměrným meziobvodem, tj. měniče napět'ové a proudové.

U napět'ových měničů má napětí buď tvar obdélníku nebo je ve tvaru pulsů. Tedy u těchto měničů obsahuje značné množství harmonických křivka napětí. U proudového měniče

je proud připojeného motoru blízký obdélníku či lichoběžníku a naopak napětí je blízké sinusovce s komutačními špičkami.

Cyklokonvertor jako zdroj nízkého kmitočtu generuje sinusové proudy i napětí s relativně menším obsahem harmonických. Potom jsou negativní vlivy menší než u výše uvedených měničů.

Obsah harmonických bude u všech měničů také záležet na poměru velikosti řízené veličiny k její jmenovité hodnotě. Při výpočtech pochopitelně uvažujeme jmenovité hodnoty.

Při výpočtech se většinou teoreticky předpokládá, že harmonické střídavého proudu a napětí při napájení elektrického stroje z měničů mají řád

$$\mu = k \cdot p \pm 1 \quad (5.55)$$

kde p je počet pulsů měniče

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

Při napájení motoru z měniče frekvence odebírá měnič ze sítě také proudy, jejichž frekvence není celým násobkem frekvence 1. harmonické. Pro tyto meziharmonické frekvence platí vztah

$$f_{\nu} = \mu \cdot f_N \pm n \cdot p_M \cdot f_M \quad (5.60)$$

kde f_N je základní frekvence

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

p_M je počet pulsů střídavého měniče na straně motoru

f_M je proměnná frekvence motoru

Časové harmonické napětí nebo proudy mají vyšší frekvenci než základní harmonická. Otáčky točivých magnetických polí, které jsou těmito vyššími harmonickými tvořeny, budou

$$n_{vs} = \frac{\mu \cdot f_l}{p} = \mu \cdot n_{ls} \quad (5.61)$$

Tyto otáčky jsou vyšší než jsou otáčky magnetického pole vytvořeného základní časovou harmonickou.

Omezení časových harmonických v napětí nebo proudu se docílí vhodným zapojením a volbou měniče. Harmonické, které se vyskytují v síti, mohou být filtrovány.

Harmonické polí statoru a rotoru spolu vzájemně působí, vytvářejí kladné i záporné točivé momenty, které mohou podstatně ovlivnit činnost stroje. Momenty vyvolané vyššími harmonickými polí dělíme na

- asynchronní
- synchronní
- vibrační

Harmonické můžeme potlačit vhodnou volbou počtu drážek rotoru a počtu drážek statoru, zvětšením vzduchové mezery, magnetickým klínem, zešíkmením drážek a zkrácením kroku.

5.5.7 Asynchronní momenty

Podobně jako vytváří základní harmonická magnetického toku statoru se základní harmonickou rotoru asynchronní moment, vytvoří každá harmonická statoru s harmonickou rotoru parazitní asynchronní moment. Výsledný moment stroje je pak dán součtem momentu první harmonické a momentů všech vyšších harmonických. Praktický význam však mají jen ty momenty vyšších harmonických, které jsou silně vyjádřeny tedy např. 5 a 7 harmonické.

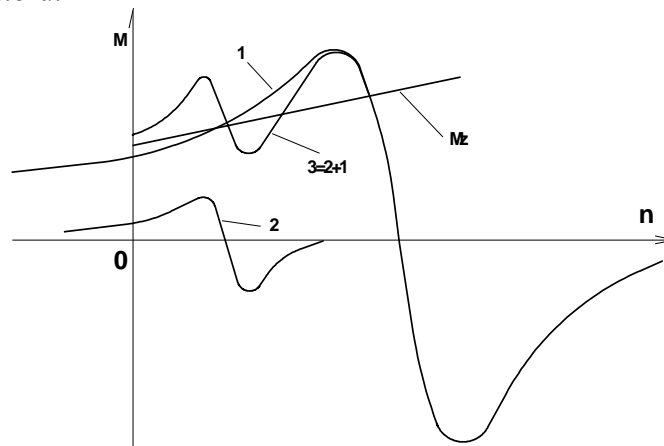
Synchronní rychlost těchto momentů je $-n_1/5$ a $+n_1/7$.

Účinkům harmonických se musíme snažit zabránit, neboť zátěžný moment by mohl momentovou charakteristiku protnout v oblasti sedla obr. 5.29 a motor by pracoval s velmi

malými otáčkami, velkým skluzem a tedy i velkým proudem a lehce by se zničil. Nejúčinnější je potlačit harmonické statoru již při návrhu stroje vhodným zkrácením kroku vinutí y_1 na $5/6 \cdot t_p$ a tím se potlačí asynchronní momenty – 5. a 7. harmonické. Asynchronní momenty harmonických – 11, 13, atd. je možno potlačit vhodnou volbou vzájemného počtu drážek na rotoru a statoru. Počet drážek rotoru má být

$$Q_2 \leq 1,25 \cdot Q_1$$

Momenty harmonických je možno potlačit i natočením drážek rotoru o jednu drážkovou rozteč statoru.



Obr..5.29

5.5.8 Synchronní momenty

Některé harmonické pole, zvláště zubové harmonické, vytvářejí tzv. synchronní momenty. Při určitých otáčkách rotoru se jednotlivé harmonické zubového pole statoru mohou otáček stejně rychle, tedy synchronně, jako některé harmonické zubového pole rotoru. Tak vzniknou synchronní momenty jejich vzájemným působením. Zubové harmonické magnetického pole statoru bývají řádu podle (20.6).

Má-li být vytvořen synchronní moment harmonické statoru i rotoru stejného řádu pak

$$\frac{Q_1}{p} \pm 1 = \frac{Q_2}{p} \pm 1 \quad (5.62)$$

Z toho plyne, že synchronní momenty vznikají a zvláště výrazně se projeví když

$$Q_1 = Q_2$$

a při

$$Q_1 = Q_2 \pm 2 \cdot p$$

Synchronní momenty působí vždy jen při jistých otáčkách odpovídajících synchronnímu otáčení určitých harmonických. Proto působí v úzkém pásmu. Synchronní momenty mohou být potlačeny správnou volbou počtu drážek statoru a rotoru a opět také natočením drážek.

Zvláštním případem synchronního momentu je tzv. lepení rotoru. Nastává tehdy, když synchronní momenty jsou vyjádřeny při $n = 0$ a znemožní rozběh motoru.

5.5.9 Vibrační momenty

Harmonické magnetického pole, vytvářející synchronní momenty, se neprojevují jen při synchronním otáčení, ale v celém rozsahu otáček stroje. Vyvolávají periodicky se měnící

točivé momenty působící po jednu půlperiodu jedním směrem a druhou půlperiodu opačným směrem. Tyto momenty způsobují chvění rotoru i dalších částí stroje. Při nevhodném poměru drážek vznikají i radiální síly přemísťující se při otáčení podle obvodu vzduchové mezery a také způsobují vibrace stroje. Vibrační momenty se projevují zvláště silně když

$$Q_1 - Q_2 = \pm 1 \pm 2p \quad (5.63)$$

nebo

$$Q_1 - Q_2 = \pm 2 \pm 4p$$

5.5.10 Hluk při činnosti asynchronního stroje

Asynchronní stroj může hlučet z mnoha důvodů mechanických, ale také magnetických. Mechanické důvody jsou nevyváženost rotoru, špatný stav ložisek nebo i nesprávně volenou ventilací.

Nás zde zajímá hluk magnetický, vyvolaný harmonickými magnetického pole. Feromagnetické části stroje, nacházející se ve střídavém magnetickém poli kmitají a hlučí. Hluk může být ještě zesílen v blízkosti vlastního mechanického kmitočtu rezonancí. Příпустné hladiny hluku elektrických strojů udávají normy. S ohledem na hluk se nesmí rovnat

$$Q_1 - Q_2 = 0, 1, 2, 3 \dots atd. \quad (5.63)$$

Otázky ke kap. 5.5

1. Co je v el. stroji zdrojem prostorových harmonických
2. Odkud se do stroje dostávají časové harmonické
3. Jaké negativní účinky mají harmonické na činnost stroje
4. Způsoby omezení harmonických
5. Jak se vypočítají drážkové harmonické
6. Které harmonické se ve stroji vyskytují
7. Co je to lepení motoru
8. Co je zdrojem hluku v el. strojích

5.6 Energetická bilance asynchronního stroje

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Určit energetickou bilanci as. motoru, generátoru a brzdy
- Stanovit výkony ve vzduchové mezeře a na hřídeli stroje
- Určit ztráty ve stroji
- Určit účinnost as. stroje

Výklad

Činný příkon, který odebírá asynchronní motor z napájecí sítě je

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (5.18)$$

V primárním vinutí vznikají ztráty ve vinutí

$$\Delta P_{cul} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (5.19)$$

Dále vznikají ztráty v železe, které můžeme vyjádřit

$$\Delta P_{Fe} = m_1 \frac{U_1^2}{R_{Fe}} \quad (5.20)$$

Výkon ve vzduchové mezeře, tj. výkon přenesený ze statoru do rotoru

$$P_\delta = P_1 - (\Delta P_{cu1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d) \quad (5.21)$$

kde ΔP_d jsou přídavné ztráty ve statoru

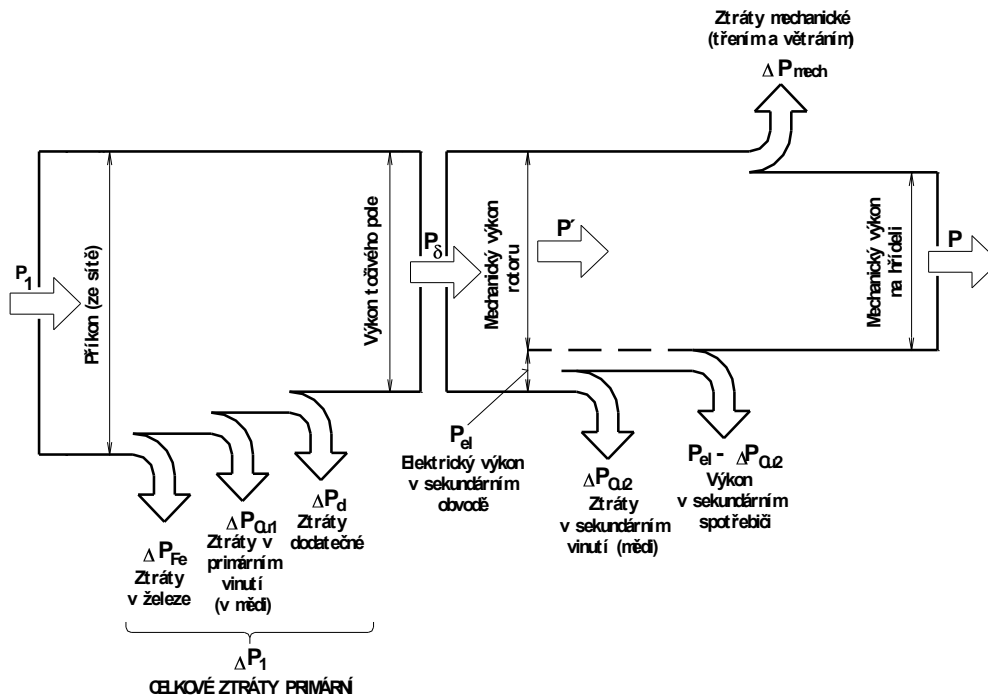
Výkonové poměry v asynchronním motoru znázorňuje obr. 5.5. Výkon ve vzduchové mezeře P_δ se dále dělí na mechanický výkon P' a elektrický výkon P_{el} . Elektrický výkon kryje ztráty ve vinutí rotoru P_{cu2} a dále i výkon předávaný spotřebiči připojenému k rotorovému vinutí, eventuálně vráceného zpět do sítě (podsynchronní kaskáda). Ztráty v železe rotoru jsou malé, a proto je obvykle zanedbáváme. U motorů nakrátko je $P_{el} = P_{cu2}$. Užitečný výkon motoru na hřídeli

$$P = P' - \Delta P_{mech}$$

kde ΔP_{mech} jsou ztráty třením, ventilací a přídavné ztráty v rotoru.

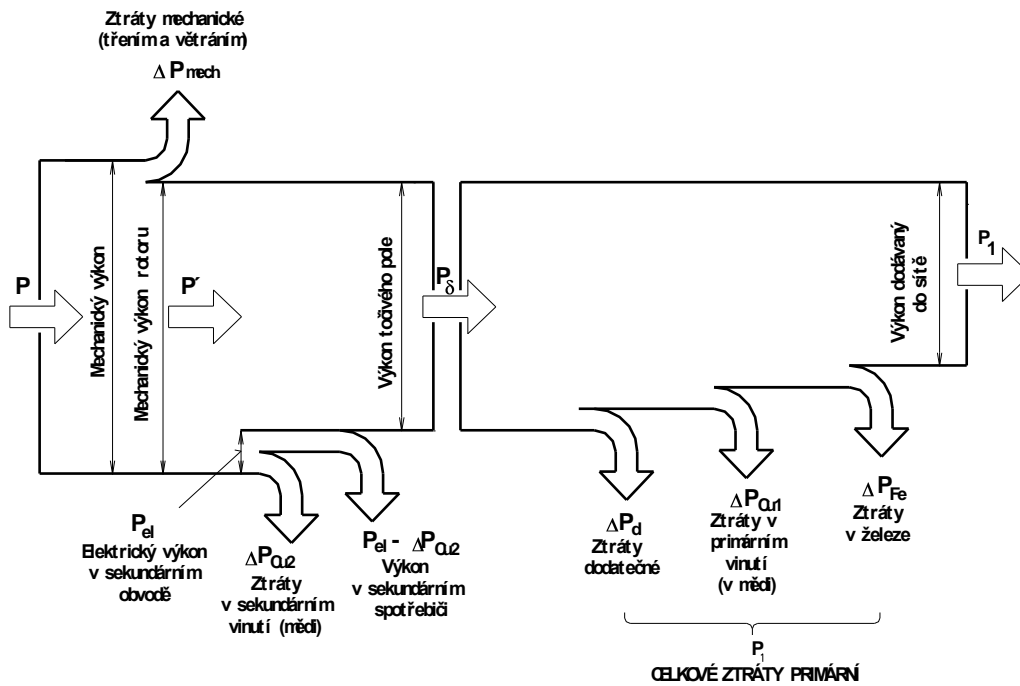
Účinnost motoru je pak

$$\eta = \frac{P}{P_1} \quad (5.22)$$



Obr. 5.5

Tok výkonu u asynchronního stroje pracujícího jako generátor je v podstatě obrácený proti motoru. Mechanický příkon dodávaný na hřídeli cizím pohonným zařízením musí hradit veškeré ztráty ve stroji i výkon dodávaný generátorem spotřebičům na něj připojeným. Znázornění je na obr. 5.6. Otáčky generátoru jsou vyšší než synchronní a účinnost je dána výrazem P_1/P .



Obr. 5.6

Jiný charakter má ovšem rozdělení výkonu v případě, kdy asynchronní stroj pracuje jako brzda. V tomto režimu se rotor otáčí proti smyslu otáčení točivého pole. Na rotor se přenáší výkon točivého pole

$$P_{\delta} = P_1 - \Delta P_1 \quad (5.23)$$

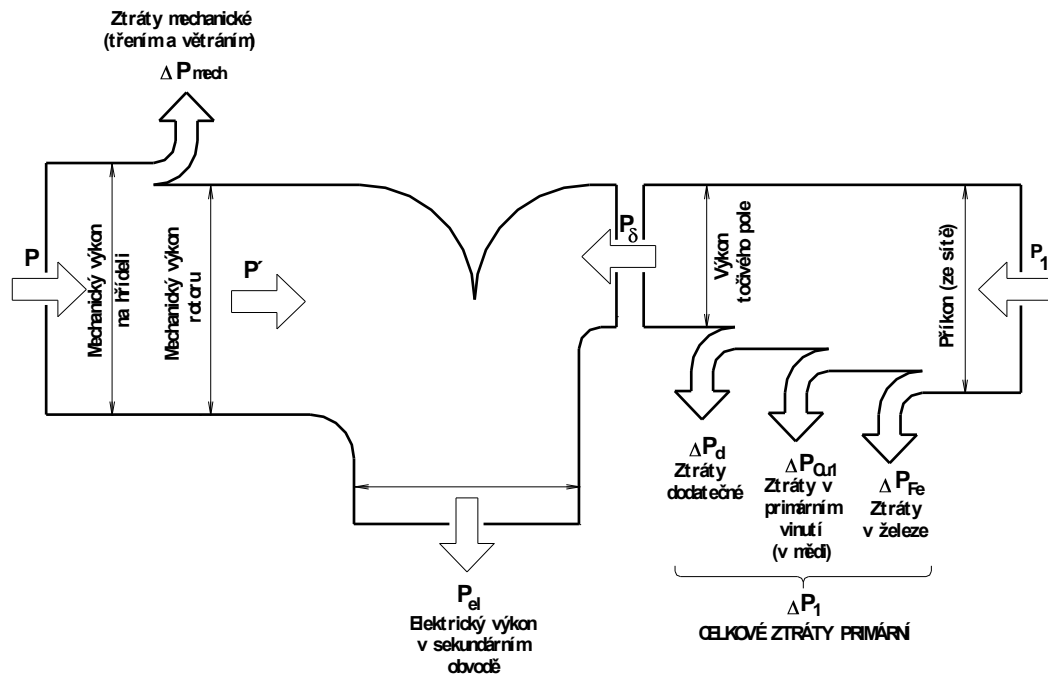
a mechanický výkon

$$P' = P - \Delta P_{mech} \quad (5.24)$$

jenž se předává rovněž brzděnému elementu přes stroj. Elektrický výkon v rotorovém obvodu je pak – viz obr. 5.7.

$$P_{el} = P_{\delta} + P' \quad (5.25)$$

Elektrický stroj je v tomto režimu velmi tepelně i mechanicky namáhán. Ztráty vznikající při tomto režimu jsou až 3x větší než při rozběhu.



Obr. 5.7

Otázky:

1. Výkon uvedený na štítku motoru je výkon nebo příkon
2. Kdo hradí ztráty při činnosti stroje v generátorickém režimu
3. Jaké ztráty vznikají ve stroji při činnosti jako brzda
4. Jak jde zhospodárnit brždění as. motorů

6. SYNCHRONNÍ STROJE

6.1 Konstrukční uspořádání synchronních strojů

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

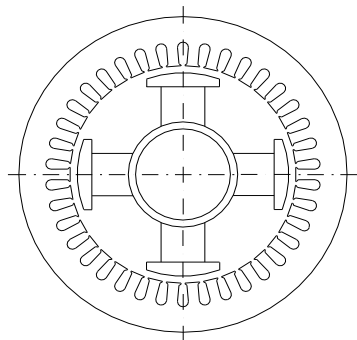
- Pojmenovat a popsat druhy synchronních strojů
- Vysvětlit princip činnosti synchronního stroje
-

Obvyklé uspořádání synchronního stroje je takové, že na statoru je střídavé vinutí stejné jako u asynchronního stroje. Magnetický obvod statoru je složen z plechů a v jeho drážkách je uloženo vinutí. Podle provedení rotoru jsou pak dva základní druhy synchronních strojů:

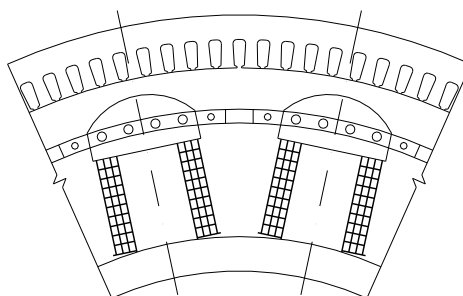
- s vyniklými póly
- s hladkým rotorem.

Schematické znázornění stroje s vyniklými póly je na obr. 6.1. Budící vinutí je tvořeno cívkami, které jsou nasunuty na jádrech pólů - obr.6.2. Póly s pólovými nastavci jsou pravidelně rozloženy po obvodu rotoru, jinak řečeno magnetového kola. Magnetové kolo je buď z oceli nebo listěné tj. složeno z ocelových plechů. Budící vinutí je napájeno stejnosměrným proudem přes dva kroužky. Zdrojem stejnosměrného proudu byla dříve dynamy (tzv. budiče), v poslední době statické, zvláště tyristorové měniče. Tyto měniče je možno umístit přímo na rotor, čímž odstraníme kluzný kontakt kartáč - kroužek, který není vždy spolehlivým prvkem stroje. V pólových nastavcích bývá umístěno klecové vinutí tlumící (někdy se mu říká amortizér), které má svým účinkem tlumit kývání synchronních strojů, případně u synchronních motorů umožňuje jejich rozběh.

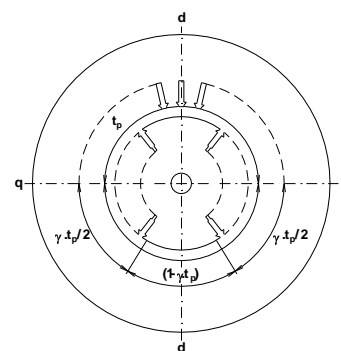
U strojů s hladkým rotorem velké rychlosti i velké rozměry těchto strojů vyžadují rotor z oceli velké pevnosti. Budící vinutí je uloženo v drážkách vyfrézovaných ve válcovém tělese rotoru. Zpravidla jsou drážky na 2/3 obvodu a 1/3 je bez drážek, ale může být drážkován i celý rotor – obr. 6.3.



Obr. 6.1



Obr. 6.2



Obr. 6.3

Synchronní stroj však může být uspořádán také obráceně tj. magnety na statoru a indukt nebo kotevní vinutí na rotoru, jako u stejnosměrných strojů. Toto se však provádí pouze u malých strojů. Protože synchronní generátory bývají zpravidla na vysoké napětí (6 až 35 kV), je výhodnější uspořádání tak jak bylo popsáno. Synchronní stroj na velké výkony

vyžaduje také pevné vývody z tohoto vinutí. Opět i volba napětí i ostatních parametrů stroje je řízena ekonomickými hledisky.

Podle způsobu chlazení můžeme synchronní stroje rozdělit na stroje chlazené vzduchem, vodíkem a vodou, případně jejich kombinacemi. Druh chlazení se volí podle velikosti stroje a velikosti ztrát. U alternátorů bývají ztráty asi 1 % jeho zdánlivého výkonu (u 100 MVA jsou asi 1 MW a u 1000 MVA asi 10 MW). Tak velké ztráty by se těžko odvedly vzduchem.

6.2 Princip působení synchronního stroje

U asynchronních strojů jsme poznali, že rotorový kmitočet $f_2 = s \cdot f_1$ je při konstantních otáčkách stálý. Jestliže tedy bude $u_2 = u_1$ a tedy $s = 0$, pak se ve vinutí rotoru neindukuje ems a rotorovým vinutím by žádný proud neprotékal. Můžeme však rotorové vinutí napájet z cizího zdroje energie a to obvykle proudem o $f_2 = 0$, tedy stejnosměrným proudem. Vinutí je pak napájeno přes kroužky a kartáče. Tento stejnosměrný příkon, dodávaný do rotorového vinutí se celý spotřebuje na ztráty v tomto vinutí, vybudí nám ale v magnetickém obvodu stroje magnetické pole.

Magnetické pole vybuzené rotorovým vinutím se při otáčení rotorem otáčí společně s rotorem stálými otáčkami

$$n_1 = n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (6.1)$$

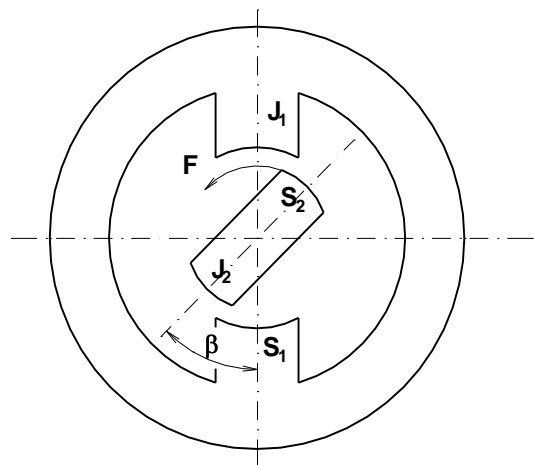
Toto pole indukuje ve vinutí statoru v jedné fázi napětí

$$U_{1f} = 4,44 \cdot \phi \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_{v1} \quad (6.2)$$

kde ϕ je magnetický tok v rozmezí jedné pólové rozteče.

Časový průběh napětí předpokládáme sinusový, což je tehdy je-li také prostorové rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře sinusové. Tento předpoklad nebývá přesně splněn, avšak vhodným tvarem pólového nástavce se blíží skutečný průběh magnetické indukce sinusovce. Volbou vhodně rozloženého vinutí do drážek, zvláště pak vinutím zlomkovým s vhodně zkráceným krokem - asi 80% pólové rozteče, dosáhneme sinusového průběhu napětí v závislosti na čase, i když není rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře přesně sinusové. Mimo to se vinutí trojfázových generátorů spojují vždy do hvězdy, neboť sdružená napětí pak neobsahují třetí harmonickou a její násobky.

V synchronním stroji působí dvě magnetická napětí. První je vybuzeno vícefázovými proudy, druhé je vybuzeno stejnosměrným proudem v rotoru. Budeme-li uvažovat, že stroj pracuje jako generátor naprázdno, magnetické pole magnetů obíhá s točícím se polem rotoru konstantní rychlostí a indukuje ve vinutí statoru napětí $u_i = b \cdot l \cdot v$, úměrné okamžité hodnotě magnetické indukce o frekvenci $f = p \cdot n / 60$. Při zatížení protékající třífázový proud vytvoří své vlastní kruhové točivé magnetické pole, jehož otáčky jsou shodné s otáčením pole magnetů tedy synchronní a odtud je i název těchto strojů. Při změně zatížení se synchronní rychlost otáčení nezmění, magnetická pole jsou však proti sobě jinak posunuta. Obě magnetická pole se přitahují



obr. 6.4

právě tak jako dva permanentní magnety. Jejich působení lze vysvětlit za pomoci obr.6.4.

Při nulovém zatížení budou osy magnetů splývat, tedy úhel $\beta = 0$. Moment vyvolaný vzájemným působením magnetů bude úměrný

$$M \cong F_{m1} \cdot F_{m2} \cdot \sin \beta \quad (6.3)$$

kde F_{m1} a F_{m2} jsou magnetická napětí magnetů
 β je úhel vzájemného posunutí polí.

Nechť nám točivé pole představuje magnet $S_1 - J_1$, pak magnet $S_2 - J_2$ bude unášen stejnou rychlostí jakou má točivé pole. Při zatížení tohoto magnetu momentem bude se dále otáčet stejnou rychlostí, ale vychýlí se z osy o úhel β - nazývaný také zátěžný úhel.

Týž stroj může pracovat jako motor, když statorové 3f vinutí budeme napájet 3f proudem, který vytvoří točivé magnetické pole. Pak roztočíme rotor na $n = n_s$, nesouhlasné polarity pólů elektromagnetu rotoru a točivého pole statoru se přitahují. Motor se tedy otáčí shodnou rychlostí.

Bude-li stroj pracovat jako generátor tzn., že rotor je poháněn, pak rotor předbíhá magnetické pole statoru o zátěžný úhel. U motoru je tomu naopak. Při překročení hranice $\beta_{max} = \pi/2$ však stroj vypadne ze synchronismu.

Otázky ke kap. 6.1 a 6.2 :

1. Jaké druhy synchronních strojů znáte
2. Jaké jsou pracovní stavy synchronních strojů
3. Definujte rozsah výkonů, napětí a počtu pólů synchronních strojů
4. Vysvětlíte princip působení synchronních strojů

6.3 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

Čas

Cíl : Po prostudování této kapitoly bude student umět

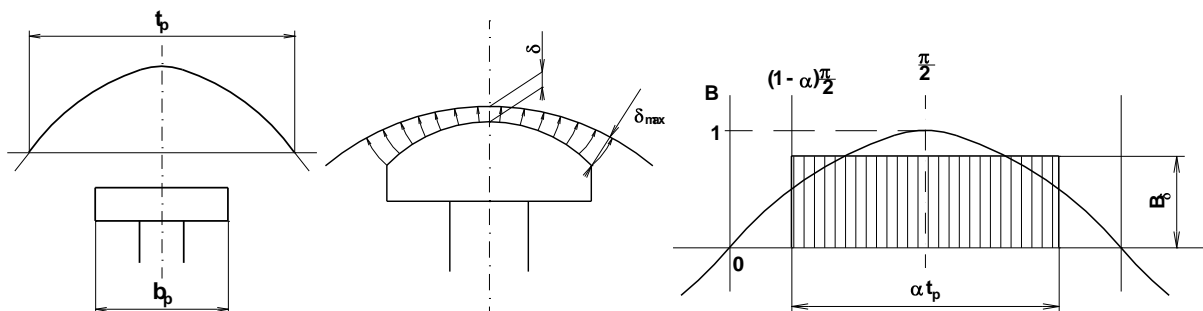
- popsat mg. obvod synchronního stroje
- vysvětlit problémy při volbě vzduchové mezery

Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře závisí na tvaru pólového nástavce a na velikosti poměrného pólového oblouku α .

U synchronních strojů s vyniklými póly se volí poměrný oblouk jak je vyznačeno na obr. 6.5.

$$\alpha = \frac{b_p}{t_p} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{4} \quad (6.4)$$

kde b_p je skutečný pólový oblouk



Kritéria pro volbu vzduchové mezery

Velikost i tvar vzduchové mezery mezi statorem a rotorem má mimořádný vliv na vlastnosti strojů. Proto mezera musí být volena tak, aby byl zajištěn spolehlivý mechanický chod stroje:

- bylo dosaženo požadovaných parametrů a charakteristik stroje (např. přetížitelnosti, ztrát, účinnosti ap.) viz dále
- náklady na výrobu a provoz stroje byly minimální.

Obecně můžeme konstatovat, že velikost vzduchové mezery je větší než u asynchronních strojů a bývá 0,5 - 5 cm.

Vzduchovou mezeru se snažíme uspořádat tak, aby byla vytvořena tzv. sinusová vzduchová mezera. Vzduchová mezera se ze středu pólu souměrně zvětšuje a to tak, že na kraji pólového nástavce bývá (obr. 6.6.):

$$\delta_{max} = 1,5 \cdot \delta$$

POZOR POZOR : Srovnej velikost vzduchové mezery asynchronního a synchronního stroje.

6.4 Reakční magnetické napětí

Reakcí kotvy se rozumí magnetomotorické napětí (mmn) vytvářené proudem ve vinutí kotvy nebo také jím vyvolaná změna magnetického toku ve vzduchové mezeře.

Protéká-li statorovým vinutím m-fázový proud, vznikne ve stroji reakční magnetické napětí, které budí v hlavním magnetickém obvodu reakční magnetický tok. Amplituda vytvořeného mmn, které rotuje, je pak pro jeden pól

$$F_{m1} = 0,45 \cdot m_1 \cdot \frac{N_1 \cdot I_1}{p} \cdot k_{v1} \quad (6.5)$$

Místo F_{m1} budeme psát F_r a zavedeme proudové zatížení na vnitřním obvodu statoru A kde

$$A = \frac{N_1 \cdot m_1 \cdot I_1 \cdot 2}{\pi \cdot D} \quad (6.6)$$

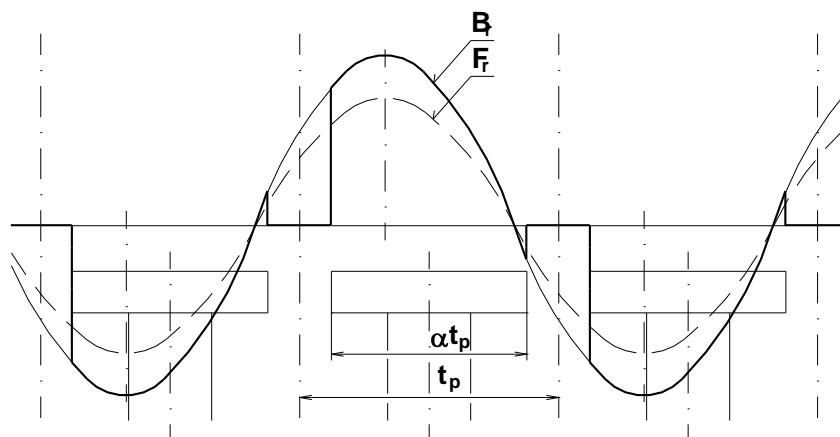
pak

$$F_r = 0,45 \cdot m_1 \cdot \frac{N_1}{p} \cdot k_{v1} \cdot \frac{A \cdot \pi \cdot D}{2N_1 \cdot m_1} = 0,45 \cdot t_p \cdot A \cdot k_{v1} \quad (6.7)$$

6.4.1 Reakce kotvy u strojů s vyniklými póly

Velikost vzduchové mezery a tedy i magnetický odpor se u strojů s vyniklými póly po obvodě značně mění. Nejmenší odpor je v ose pólu, největší v ose mezi oběma sousedními póly. Tak jak se rotor otáčí, tak se mění vzájemná poloha sinusového reakčního magnetického napětí buzeného kotvou (tedy statorem) a magnetového kola s póly.

Pro počáteční úvahy budeme předpokládat, že vzduchová mezera nad pólovým nástavcem $\alpha \cdot t_p$ je konstantní a v prostoru mimo pólový nástavec je mezera tak velká, že se v něm magnetické pole nevytvoří - obr. 6.8.



Obr.6.8

Složitost magnetického pole při vyšetřování částečně odstraňujeme tím, že reakční magnetické napětí rozložíme do dvou složek:

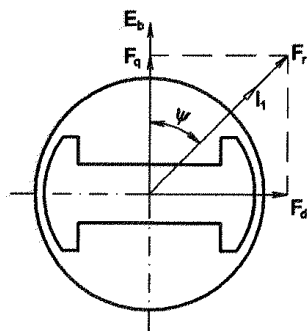
- na podélné mmn - index d
- na příčné mmn - index q .

Do těchto dvou směrů se tedy rozloží reakční magnetické napětí F_r . Amplitudy těchto složek reakčního magnetického napětí jsou - obr. 6.9.

$$F_d = F_r \cdot \sin\psi$$

$$F_q = F_r \cdot \cos\psi$$

(6.8)



Obr. 6.9

Otázky ke kap. 6.4

1. Jaká mg. pole vznikají v synchronním stroji
2. Jaký je tvar mg. polí v synchronním stroji
3. Určete velikost vzduchové mezery v synchronním stroji

6.5 Charakteristika naprázdno

Čas

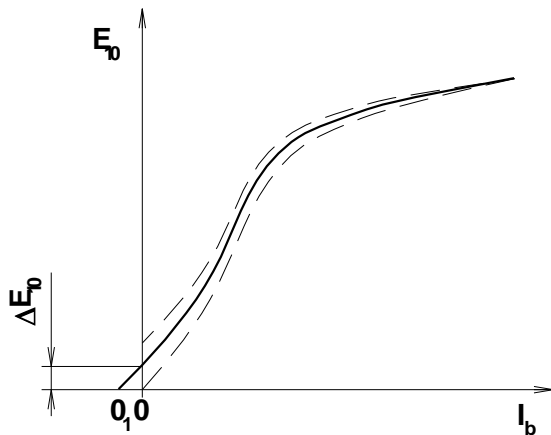
Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- definovat chod synchronního stroje nakrátko
- popsat charakteristiku naprázdno
- popsat části mg.obvodu synchronního stroje
- vysvětlit vliv jednotlivých parametrů na velikost svorkového napětí generátoru

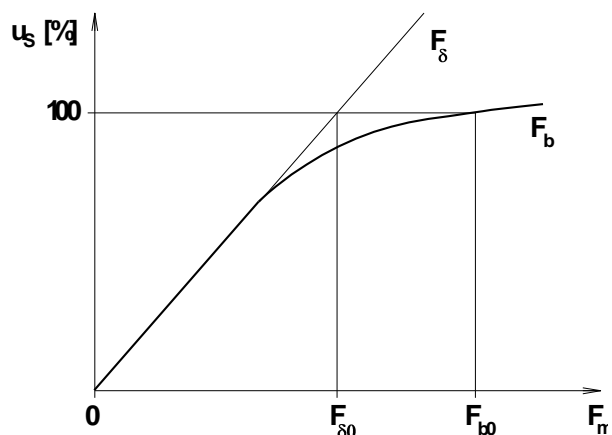
Výklad

Charakteristika naprázdno synchronního stroje je závislost svorkového napětí U_l na budícím proudu I_b nebo budícím magnetickém napětí F_m při proudu statoru $I_l = 0$ a při jmenovitých otáčkách rotoru. Tato charakteristika vyjadřuje magnetické vlastnosti stroje. Jestliže zjišťujeme tuto charakteristiku měřením, pak je to závislost statorového napětí (obvykle sdruženého) na budícím proudu. Jestliže proud buzení nejdříve zvyšujeme a pak snižujeme dostaneme hysterezní smyčku. Charakteristika naprázdno je pak střední čára obr. 6.10.

Při výpočtech se charakteristika naprázdno udává jako závislost sdruženého statorového napětí na budícím magnetickém napětí, obr. 6.11. - při zanedbání stoupající a klesající větve.



Obr. 6.10



Obr. 6.11

Charakteristika naprázdno probíhá z počátku podle přímky 1. Tato přímková část se nazývá charakteristikou vzduchové mezery nebo také charakteristikou nasyceného stroje. Je to část charakteristiky v rozsahu napětí 0 až 40 - 60% U_n . Závislost budícího magnetického napětí na skutečné magnetické indukci ve vzduchové mezeře B_δ udává vztah

$$F_\delta = \frac{l}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta' \quad (6.9)$$

a po dosazení za $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ dostaneme

$$F_\delta = 800 \cdot B_\delta \cdot \delta' \quad (6.10)$$

kde

$$\delta' = \delta \cdot k_{c1} \cdot k_{c2}$$

U strojů s vyniklými póly je $k_{c2}' = 1$ (není pól drážkován). U strojů s hladkým rotorem se Carterův činitel k_{c2}' počítá dvakrát: pro úzké zuby k_{cq} a pro široký zub k_{cd} . Jestliže chceme vypočítat sdružené statorové napětí vyjdeme ze vztahů pro indukované napětí

$$U_{lf} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_1 \cdot \phi \cdot N_l \cdot k_{vl} \quad (6.11)$$

a dále ze vztahu pro magnetický tok základní harmonické jednoho pólu

$$\phi = \frac{D \cdot l_i \cdot B_l}{p} \quad (6.12)$$

a když použijeme vztah $B_l = C_l \cdot B_\delta$, pak

$$U_s = \sqrt{3} \cdot U_{1f} = \sqrt{3} \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{D \cdot l_i \cdot B_\delta \cdot C_l}{p} \cdot f \cdot N_l \cdot k_{vl} \quad (6.13)$$

a dosazením za B_δ a μ_0

$$U_s = \sqrt{6} \cdot 4\pi^2 \cdot 10^{-7} \cdot F_\delta \cdot \frac{D \cdot l_i \cdot f_l \cdot C_l \cdot N_l \cdot k_{vl}}{p \cdot \delta'} \quad (6.14)$$

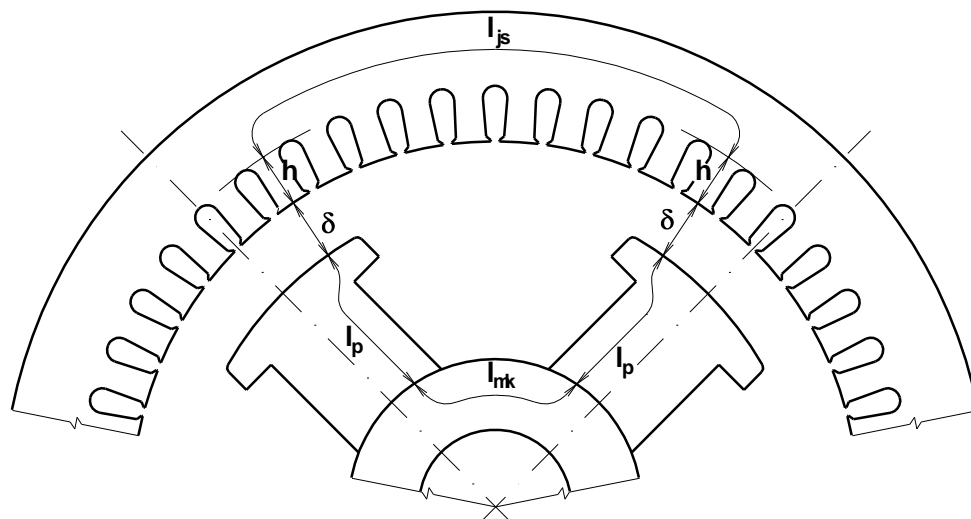
Z této rovnice plyne, že při daném svorkovém napětí U_s se změnou vzduchové mezery mění i potřebné budící magnetické napětí. Velikost a tvar vzduchové mezery má velký vliv i na dodatečné a budící ztráty stroje a proto je nutno brát ohled i na tuto skutečnost.

Zatímco z hlediska dodatečných ztrát je výhodnější větší vzduchová mezera, ale z hlediska budících ztrát je výhodnější menší vzduchová mezera (protože s větší vzduchovou mezerou roste budící proud a tím i budící ztráty). Je tedy nutno volit optimální velikost mezery i její tvar, pro kterou je při daném zatížení součet těchto ztrát minimální.

Dále je nutno si pamatovat, že satorové napětí můžeme zvýšit zvětšením rozměrů stroje tj. délky a průměru, zvýšením kmitočtu a zvětšením počtu závitů satorového vinutí.

Jak plyne z obr. 6.11. pokračuje charakteristika naprázdno od hodnoty satorového napětí asi 60% tak, že budící napětí F_b již není úměrné U_s , ale roste mnohem rychleji. Zde se překonává nejen magnetický odpor vzduchové mezery, ale i magnetický odpor satorových zubů, jha satoru a pólů včetně magnetového kola rotoru.

Magnetické napětí potřebné pro protlačení toku těmito částmi obvodu počítáme z indukci v těchto částech. K nim z magnetizačních křivek příslušného materiálu zjistíme intenzity magnetického pole a po vynásobení délkou siločáry příslušného úseku dostaneme jednotlivá magnetická napětí.



Obr. 6.12

Otázky ke kap 6.5

1. Vysvětlete co považujeme za chod synchronního stroje naprázdno
2. Uveďte postup při měření charakteristiky naprázdno
3. Pro kterou část stroje je největší mg. napětí
4. Je mg. tok ve všech částech mg. obvodu stroje stejný

6.6. Charakteristika nakrátko

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Popsat chod nakrátko synchronního stroje
- Vysvětlit průběh charakteristiky nakrátko
- Vysvětlit význam synchronní reaktance

Výklad

Charakteristika nakrátko je závislost statorového proudu I_l na budícím proudu I_b , při jmenovitých otáčkách rotoru a při spojení statorového vinutí nakrátko. Opět to může být i závislost I_l na budícím magnetickém napětí. Pokud neuvažujeme rozptyl a ohmický odpor vinutí statoru, vytvořené silné reakční pole působí proti poli magnetů. Tím je výsledné pole ve vzduchové mezeře malé, takže chod nakrátko probíhá v nesyceném stavu, a proto i průběh charakteristiky nakrátko je přímkový. Tedy základní harmonická budícího napětí $C_l \cdot F_b$ je rovna základní harmonické reakčního magnetického napětí F_r .

Pro stroje s konstantní vzduchovou mezerou platí

$$F_r = C_l \cdot F_b \quad (6.15)$$

U strojů s vyniklými póly je reakční magnetické napětí v osové poloze (v ose pólu). Kdyby se podélné pole mělo vytvořit buzením pólů, muselo by se vybudit pole B_δ , pro něž platí rovnost pro 1. harmonickou $B_\delta = B_d$

$$C_l \cdot B_\delta = C_l \cdot B_d \quad \text{a pak}$$

$$B_\delta = \frac{C_{d1} \cdot B_d}{C_l} k_d \cdot B_d \quad (6.16)$$

kde $\frac{C_{d1}}{C_l}$ je činitel deformace podélného pole.

Protože základní harmonická vybuzeného a reakčního magnetického toku jsou při zanedbání statorového rozptylu stejně velké, ale v protifázi, jsou v rovnováze i budící a reakční napětí. Pak platí

$$C_{d1} \cdot F_d = C_l \cdot F_b$$

$$F_b = \frac{C_{d1}}{C_l} \cdot F_d \quad (6.17)$$

Vyjádríme si nyní závislost proudu nakrátko na budícím magnetickém napětí početně podle dříve uvedených vztahů:

U strojů s hladkým rotorem je

$$F_r = 0,45 \cdot m_l \cdot \frac{N_l \cdot I_l}{p} \cdot k_{vl} = C_l \cdot F_b = C_l \cdot N_b \cdot I_b \quad (6.18)$$

a odtud pak

$$I_{lk} = \frac{p \cdot C_l \cdot F_b}{0,45 \cdot m_l \cdot N_l \cdot k_{vl}} \quad (6.19)$$

kde I_{lk} je tzv. ustálený zkratový proud (proud po odeznění přechodového jevu).

Podobně pro stroj s vyjádřenými póly

$$I_{lk} = \frac{p \cdot C_1 \cdot F_b}{C_{d1} \cdot 0,45 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{vl}} \quad (6.20)$$

Budeme-li nyní uvažovat rozptyl statorového vinutí, je zapotřebí ke krytí úbytku napětí na rozptylové reaktanci $X_{l\sigma}$ zvýšit magnetické reakční napětí o magnetické napětí F_s .

Indukované napětí při stavu nakrátko U_{ik} se rovná úbytku na této rozptylové reaktanci proudem nakrátko, tedy U_σ

$$U_{ik} = X_{l\sigma} \cdot I_{lk} = U_\sigma \quad (6.21)$$

a bývá 10 až 15% U_n .

Použitím rovnice (7.6) a dosazením F_s místo F_δ , za předpokladu fázového napětí, a dále pak použitím rovnice (6.6) můžeme odvodit vzorec pro F_s . Pro stav nakrátko:

$$U_{ik} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot F_s \cdot \frac{D \cdot l_i \cdot f_1 \cdot C_1 \cdot N_1 \cdot k_{vl}}{p \cdot \delta'} = X_{l\sigma} \cdot I_{lk} \quad (6.22)$$

$$X_{l\sigma} = 4 \cdot f_1 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_1^2 \cdot k_{vl}^2}{p} \cdot l_i \cdot \lambda_s \quad (6.23)$$

$$F_s = I_{lk} \cdot \frac{4}{\sqrt{2}} \cdot \frac{N_1 \cdot k_{vl}}{D \cdot C_1} \cdot \lambda_s \cdot \delta' \quad (6.24)$$

Uvažujeme-li rozptyl statorového vinutí zbude po odečtení reakčního magnetického napětí ještě magnetické napětí F_s .

Pro stroje s hladkým rotorem

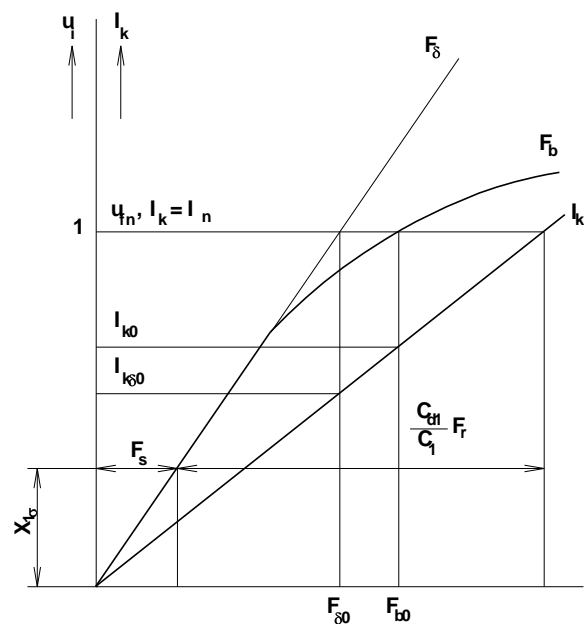
$$F_b - \frac{F_r}{C_l} = F_s \quad \Rightarrow \quad F_b = \frac{F_r}{C_l} + F_s \quad (6.25)$$

Pro stroje s vyniklými póly pak obdobně

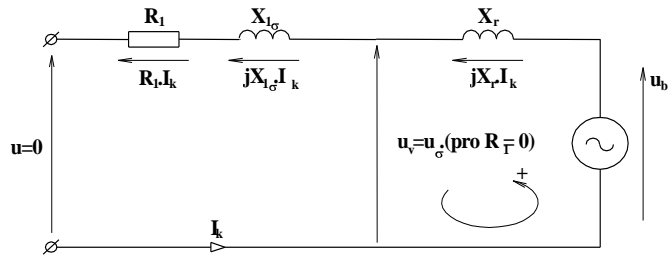
$$F_b = \frac{C_{d1}}{C_l} \cdot F_r + F_s \quad (6.26)$$

Ze všech výše uvedených úvah je patrné, že proud nakrátko je přímo úměrný magnetickému napětí F_b .

Ustálený zkratový proud $I_{k\delta\delta}$ pro buzení vzduchové mezery $F_{\delta\delta}$ při plném napětí U_{fn} nazýváme proudem nakrátko nesyčeného synchronního stroje. Proud nakrátko I_{ko} se však udává pro budící magnetické napětí F_{bo} odpovídající jmenovitému napětí syceného stroje při chodu naprázdno. Význam těchto údajů vyplyne z obr. 6.13. Tuto charakteristiku sestrojím tak, že vypočítáme F_r a dále vypočítám F_s a pro I_n dostanu bod jímž proložíme přímkou. Když zde pak zakreslíme charakteristiky naprázdno F_δ a F_b dostanu I_{ko} a $I_{k\delta\delta}$.



Obr. 6.13



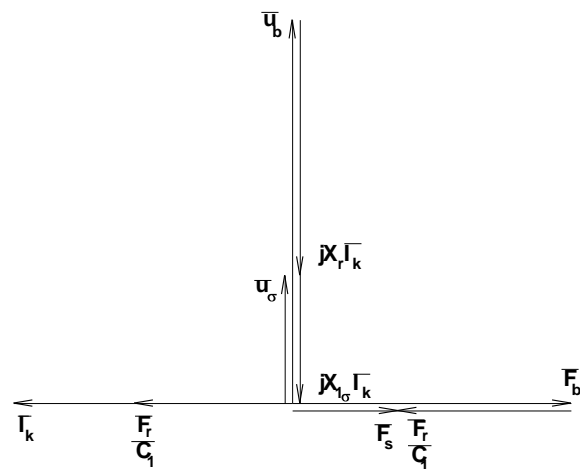
Obr 6.14

Náhradní schéma synchronního stroje s hladkým rotorem při chodu nakrátko je na obr. 6.14. Zkratový proud I_k je prakticky čistě jalový. V důsledku toho je reakce kotvy přesně v osovém směru tedy odbuzující.

$$\begin{aligned} U_{ib} - U_{\sigma} + jX_r \cdot I_k &= 0 \quad \text{pro } R_l = 0 \\ U_{\sigma} &= U_{ib} + jX_r \cdot I_k = 0 \end{aligned} \quad (6.27)$$

Když nezanedbáme rozptylovou reaktanci a nebudeme kreslit ems E_b , ale pouze indukované napětí U_{ib} dostaneme diagram podle obr. 6.15.

Při dalších úvahách zanedbáme ohmický odpor R_l . Budící magnetické napětí F_b vytváří tok ϕ_b , který indukuje v kotvě reakční magnetické napětí F_r , magnetický tok ϕ_r buzený tímto magnetickým napětím indukuje v kotvě fiktivní napětí $jX_r I_k$. Ve skutečnosti neexistují toky ϕ_r a ϕ_b , ale pouze tok rozptylový buzený zbytkovým magnetickým napětím F_s a jak jsme již uvedli je pro stroj s hladkým rotorem



Obr. 6.15

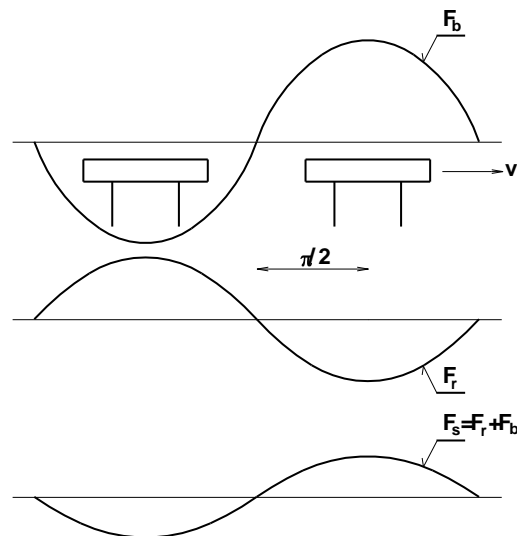
$$F_s = F_b - \frac{F_r}{C_l} \quad (6.28)$$

Rozptylové napětí si označujeme U_{σ} tedy

$$I_k = \frac{U_{\sigma}}{X_{l\sigma}}$$

Tedy skutečné hodnoty při chodu nakrátko jsou

- budící magnetické napětím F_b
- reakční magnetické napětí F_r
- rozptylový tok ϕ_{σ}
- fiktivní - magnetické toky ϕ_b a ϕ_r
- výsledné magnetické napětí F_s
- indukované vnitřní napětí U_{ib} skládající se z fiktivního napětí $jX_r I_k$ a skutečného U_{σ}



Obr. 6.16

K vektorovému diagramu stroje nakrátko nakreslíme rozvinutý prostorový diagram - obr. 6.16.

6.6.1 Synchronní reaktance

Jak je patrné z obr. 6.15 celkové fiktivní napětí při chodu nakrátko U_{ib} se spotřebuje na reaktancích X_r a $X_{l\sigma}$. Můžeme také napsat, že

$$X_r + X_{l\sigma} = X_d \quad (6.29)$$

přičemž X_d nazýváme synchronní reaktancí. Pak také platí pro stav nakrátko

$$jX_d \cdot I_k + U_{ib} = 0 \quad (6.30)$$

a odtud

$$I_k = \frac{U_{ib}}{jX_d} \quad (6.31)$$

Poměr mezi proudem nakrátko a proudem jmenovitým se nazývá zkratový poměr, tedy

$$v_k = \frac{I_{k0}}{I_n} \quad (6.32)$$

přičemž proudem nakrátko rozumíme proud pro budící magnetické napětí F_{bo} při jmenovitém napětí syceného stroje.

Stejně jako proud nakrátko se určuje pro sycený a nesycený stroj, určujeme i sycenou X_{ds} a nesycenou X_{dns} synchronní reaktanci. Podle obr. 8.1 pak stanovíme nesycenou synchronní reaktanci

$$X_{dns} = \frac{U_{1f}}{I_{k\delta_0}} \text{ je nezávislý na sycení stroje} \quad (6.33)$$

a sycenou

$$X_{ds} = \frac{U_{1f}}{I_{k_0}} \text{ (používá se málo)} \quad (6.34)$$

Je tedy patrné, že hodnoty těchto reaktancí se nejlépe určí z charakteristik naprázdno. Synchronní nesycená reaktance je nezávislá na sycení stroje, a proto se jí používá jako hodnoty porovnávací. Praktický význam sycení synchronní reaktance tkví v tom, že je zkratovým poměrem. Když si totiž vyjádříme poměrnou sycenou reaktanci jako

$$x_{ds} = X_{ds} \cdot \frac{I_n}{U_{fn}} = \frac{U_{fn}}{I_{k_0}} \cdot \frac{I_n}{U_{fn}} = \frac{I_n}{I_{k_0}} = \frac{1}{v_k} \quad (6.35)$$

Synchronní reaktance X_d je tedy součet rozptylové reaktance $X_{l\sigma}$ a reakce X_r . Tuto reaktanci jsme u asynchronních strojů nazývali magnetizační reaktancí X_m , nebo X_h (hlavní). Protože jsme uvažovali stav nakrátko, kdy proud nakrátko je čistě jalový a v důsledku toho reakce kotvy působí přesně v osovém tj. podélném směru, stanovíme tedy reaktanci reakce v tomto směru.

Obvykle se tato reaktance počítá jako poměr fázového napětí děleného proudem nakrátko. Tedy

$$X_{rd} = \frac{U_d}{I_{kd}} \quad (6.36)$$

Zkratový poměr bývá u turbostrojů 0,5 - 0,8 a u strojů s vyniklými póly 0,8 - 2 přičemž větší než 1 je u malých strojů.

Protože si zkratový poměr můžeme vyjádřit také jako poměr budícího proudu I_{bo} při proudu nakrátko I_{k_0} , odpovídajícímu jmenovitému napětí při chodu naprázdno a budícího

proudu v chodu nakrátko I_{bkn} , když statorom protéká jmenovitý proud, má zkratový poměr též význam jako poměrný magnetizační proud u transformátorů a asynchronních strojů. Tedy

$$U_k = \frac{I_{k0}}{I_n} = \frac{I_{b0}}{I_{bkn}} \quad (6.37)$$

Otázky ke kap. 6.6

1. Popište zkoušku synchronního stroje nakrátko
2. Jak se liší proud při chodu stroje nakrátko od proudu při zkratu
3. Proč má charakteristika nakrátko přímkový průběh
4. Z čeho se skládá synchronní reaktance
5. Jaký význam má synchronní reaktance

6.7 Provozní stavy synchronních strojů

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- popsat provozní stavy synchronních strojů
- rozpoznat rozdíly mezi strojem s hladkým rotorem a strojem s vyniklými póly
- nakreslit názorové diagramy strojů

Výklad

Základní provozní stavy synchronních strojů jsou chod naprázdno a při zatížení. Chod nakrátko je potřebný k určení některých charakteristik a důležitých veličin synchronního stroje.

Podle toho zda stroj do sítě dodává nebo z ní odebírá elektrickou energii je rozlišujeme na generátory a motory a pokud dodává pouze jalovou energii jedná se o synchronní kompenzátor. Generátory pak mohou pracovat buď samostatně (ostrovni provoz) nebo mohou být připojeny na tvrdou distribuční síť.

6.7.1 Synchronní stroj s konstantní vzduchovou mezerou

Za takový stroj budeme považovat stroj s hladkým rotorem. Předpokládáme, že stroj je spojen s tvrdou sítí s konstantním napětím U_{lf} . Vektor statorového proudu bude v různém kvadrantu podle toho pracuje-li synchronní stroj jako motor, generátor nebo jako kompenzátor.

Pro kreslení vektorových diagramů si musíme uvést několik zásad:

- činnou energii budeme kreslit do osy y a jalovou do osy x
- jestliže stroj do sítě energii dodává, pak bude vyznačena směrem záporných os (-) a jestliže
- energii ze sítě odebírá, pak bude kladná (+); to platí (jak pro jalovou energii tak i pro energii činnou)
- napětí je položeno do svislé reálné osy (Gausovu rovinu jsme otočili o 90°)
- o přebuzeném stroji mluvíme tehdy, když dodává jalovou energii
- podbuzený stroj odebírá ze sítě jalovou energii
- fázor proudu se kreslí o úhel φ za fázorem napětí a úhel φ považujeme za kladný.

Pro názornost si nejdříve uvedeme zjednodušené diagramy různě zatíženého synchronního generátoru a motoru, jak je znázorňuje obr. 6.17. Rozebereme si nyní jednotlivé pracovní stavy synchronních strojů. Přebuzený alternátor je stroj, který dodává do sítě činnou i jalovou energii. Jeho vektorový diagram je na obr. 10.2. Při zatížení je rotor pootočen o zátěžný úhel β před pólům kotvy (statoru), jinak řečeno o úhel β proti své poloze při chodu naprázdno. Dále platí že

$$\pi + \beta = \psi + \varphi$$

Připomeňme si :

β - zátěžný úhel - mg. osa rotoru u generátoru při zatížení předbíhá svou základní polohu o β a u motoru se za ní zpožďuje

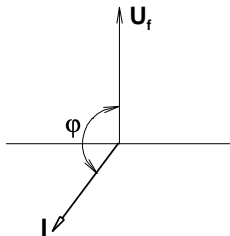
ψ - je vnitřní fázový posuv, který svírají fázory I_1 a E_b (indukované v kotvě tj. statoru)

φ - fázový posuv mezi statorovým I a U_f

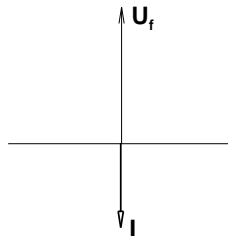
Magnetické napětí F_b je o 90° před ems. indukovanou ve statoru nebo 90° za U_b .

GENERÁTOR zatížen:

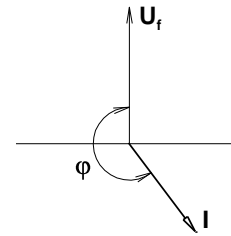
induktivně (přebuzený)



činně

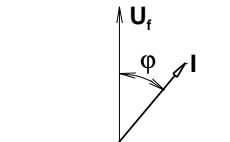


kapacitně (podbuzený)

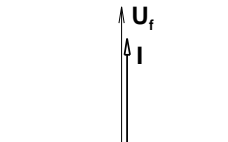


MOTOR - pro síť zátěž:

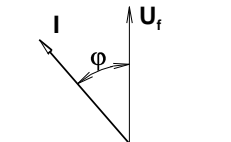
induktivní (podbuzený)



činnou

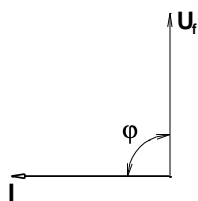


kapacitní (přebuzený)



SYNCHRONÍ KOMPENZÁTOR

$$P = 0, b = 0$$



Obr. 6.17

Reakční magnetické napětí je ve fázi s proudem I a fázově se sčítá s magnetickým napětím magnetů F_b . Tedy

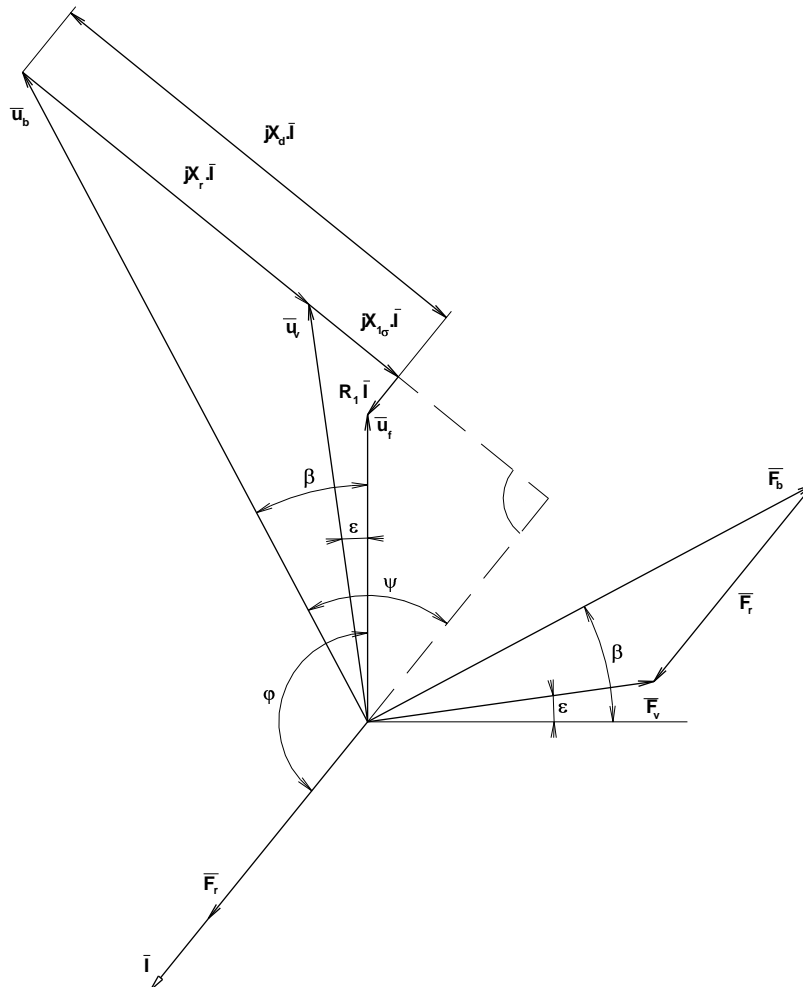
$$\overline{F}_V \equiv \overline{F}_{b0} = \overline{F}_b + \overline{F}_r \quad (6.38)$$

Magnetické napětí F_{b0} indukuje ve statoru výsledné napětí $U_v = U_f$, když jsme zanedbali úbytky na R a $X_{l\sigma}$ a je o 90° před ním tj. F_{b0} . Reakčnímu magnetickému napětí F_r odpovídá napětí $jX_r \cdot I$, které předbíhá I a tedy i F_r o 90° .

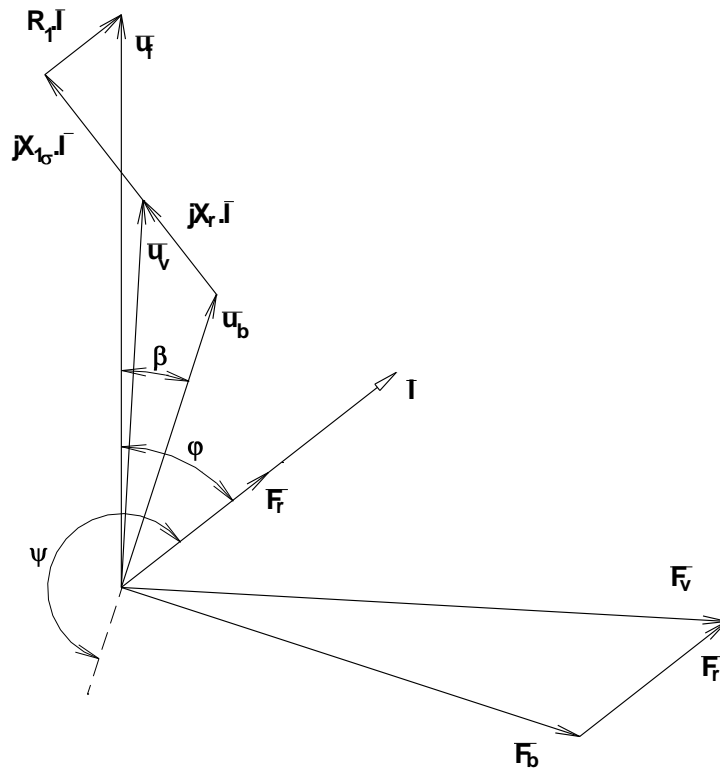
$$\overline{U}_f = \overline{U}_b + j\overline{X}_v \cdot I \quad (6.39)$$

Zde je patrné, že pole kotvy působí skutečně **reakčně** neboť F_{b0} je skutečně menší než pole magnetů F_b !

Přebuzený synchronní motor odebrává ze sítě činnou energii a do sítě dodává jalovou energii. Rotor je při zatížení zpožděn proti své poloze při chodu naprázdno o úhel β , nebo také za magnetickým polem statoru .



Obr.10.2



Obr.10.3

Podbuzený alternátor bude dodávat do sítě činný výkon a ze sítě odebírat výkon jalový. Rotor předbíhá magnetické pole statoru o β .

Synchronní motor, který je podbuzen odebírá ze sítě činný i jalový proud. Jeho rotor je za statorovým polem zpožděn o β , obr. 10.3.

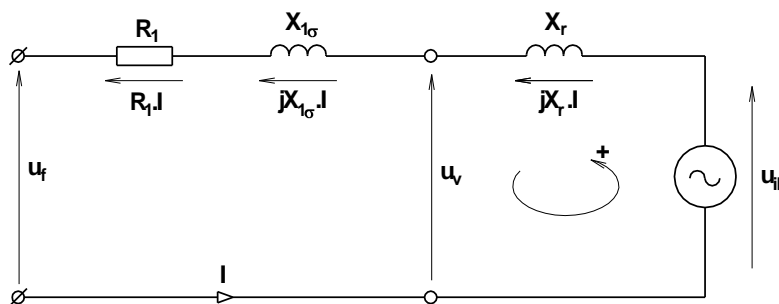
Výše uvedené fázorové diagramy respektovaly rozptylovou reaktanci a odpor statorového vinutí .

Pro tento stav platí rovnice

$$U_f = U_b + [R_l + jX_r + jX_{l\sigma}] \cdot I \quad (10.3)$$

$$U_f = U_b + [R_l + jX_d] \cdot I \quad (10.4)$$

kde X_d je synchronní reaktance. Pokud je tato konstantní můžeme užívat náhradní schéma synchronního stroje s hladkým rotorem podle obr. 10.4.



Obr. 10.4

Z uvedených diagramů je patrné že:

- u motorů se fázor vnitřního napětí U_b vždy zpožďuje za fázorem napětí U_f o úhel β
- u generátorů fázor U_b předbíhá U_f o β

6.7.2 .Synchronní stroj s vyniklými póly

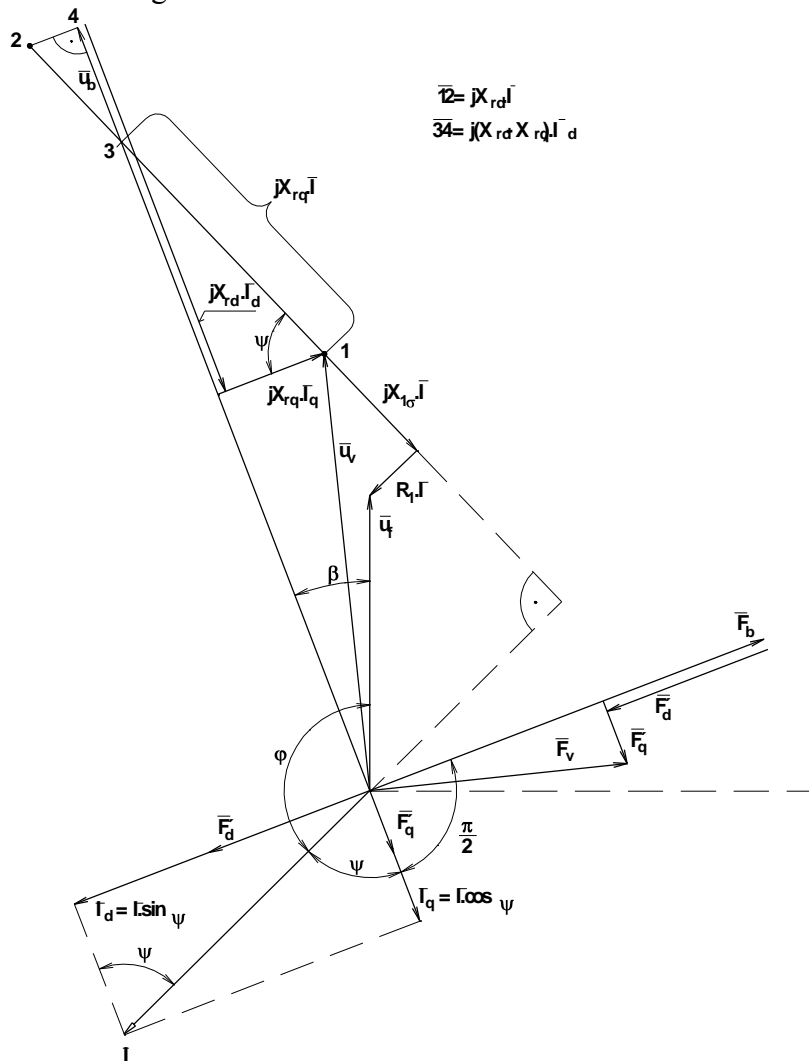
Jak jsme uvedli fázorové diagramy, které jsou uvedeny v předchozím odstavci, platí za předpokladu konstantní vzduchové mezery. To přibližně platí u strojů s hladkým rotorem, kde je rozdíl mezi podélnou a příčnou magnetickou vodivostí poměrně malý.

U strojů s vyniklými póly je značný rozdíl mezi podélnou a příčnou magnetickou vodivostí. Je proto nutno tyto stavy rozebrat samostatně. Dále je rozdíl v tom, že podélná reakce budí magnetický tok, který protéká stejnou cestou jako hlavní magnetický tok, tzn. cestou magneticky nasycenou, kdežto příčná reakce budí tok, který prochází obvodem magneticky nenasyčeným.

Pro amplitudy základních harmonických v podélném a příčném směru přepočtené na rotor platí vztahy F_d a F_q

$$\begin{aligned} F'_d &= k_d \cdot F_d & F_d &= F_r \cdot \sin\psi & F_r &= 0,45m_1 \cdot \frac{N_1 \cdot I_1}{p} \cdot k_{v1} \\ F'_q &= k_q \cdot F_q & F_q &= F_r \cdot \cos\psi \end{aligned} \quad (10.5)$$

Odečteme-li od budícího magnetického napětí F_b reakční magnetické napětí v podélném směru F'_d a příčném směru F'_q dostaneme výsledné budící napětí F_v , které vytváří skutečný magnetický tok, indukující vnitřní napětí U_v . Součet magnetického napětí se nejlépe provádí ve vektorovém diagramu obr. 10.5.



Obr. 10.5

Zde je označeno

$$\begin{aligned} U_{rq} &= jX_{rq} \cdot I && \text{napětí indukované příčným tokem} \\ U_{rd} &= jX_{rd} \cdot I && \text{napětí indukované podélným tokem} \\ X_{rq} \cdot I \cdot \cos\psi &= X_{rq} \cdot I_q && X_{rd} \cdot I \cdot \sin\psi = X_{rd} \cdot I_d \end{aligned} \quad (10.6)$$

Jak vyplyne z obr. 10.5 vypočteme fázor U_b

$$U_b = U_f + R_l \cdot I + jX_{lr} \cdot I + jX_{rq} \cdot I + j(X_{rd} - X_{rq}) \cdot I_d \quad (10.7)$$

Stejným postupem a za stejných předpokladů můžeme získat fázové diagramy pro jiné provozní stavy.

Otázky ke kap. 6.7

1. Kdy pracuje stroj jako motor a kdy jako generátor
2. Co je to přebuzený a co podbuzený stav synchronního stroje
3. K jakému účelu slouží synchronní kompenzátor
4. Nakreslete fázorový diagram přebuzeného motoru s hladkým rotorem
5. Nakreslete fázorový diagram přebuzeného generátoru s vyniklými póly

6.8 Určení budícího proudu při zatížení

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

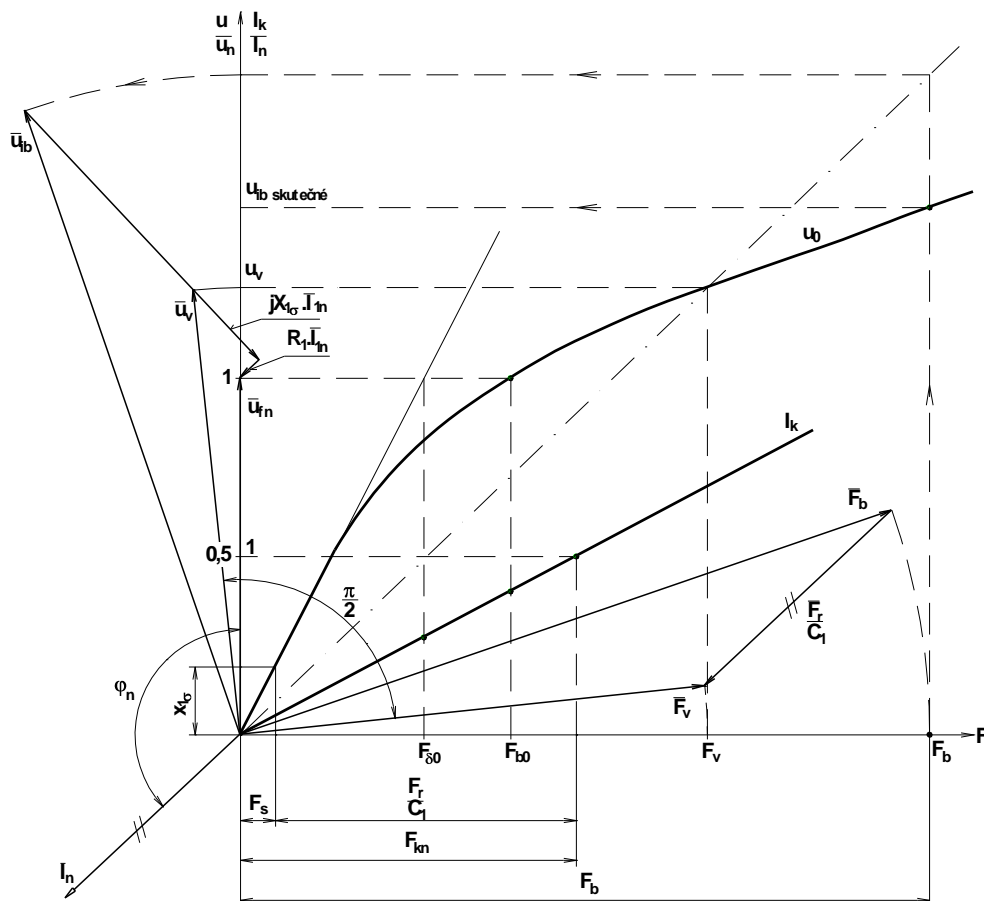
- vysvětlit jak je nutno měnit budící proud se změnami zatížení
- stanovit potřebnou velikost buzení
- určit Potierův trojúhelník
- zdůvodnit rozdíl mezi Potierovou reaktancí a rozptylovou reaktancí statorového vinutí

Výklad

V praxi obvykle potřebujeme znát budící proud stroje ještě dříve než je stroj vyroben. Protože početní řešení je obtížné, určujeme budící magnetické napětí F_b obvykle graficky z charakteristik naprázdno a nakrátko.

Zatížení synchronního stroje je dáno jmenovitým napětím U_{fn} , proudem I_n a účínkem $\cos\varphi$. Kromě velikosti účíniku je nutno znát i charakter účíniku.

Nejdříve si stanovíme F_b u strojů s **hladkým** rotorem. Budeme uvažovat přebuzený alternátor. Nakreslíme si charakteristiku naprázdno $U_o = f(F_m)$ a charakteristiku nakrátko $I_k = f(F_m)$ - obr. 11.1. Do tohoto obrázku zároveň nakreslíme vektorový diagram. K zadanému jmenovitému fázovému napětí U_{fn} připočteme úbytek napětí na odporu statorového vinutí $R_l \cdot I_n$ a na rozptylové reaktanci $jX_{l\sigma} \cdot I_n$ a dostaneme tak vnitřní napětí U_v . Pro toto napětí určíme potřebné budící mg napětí F_v a to tak, že velikost vektoru U_v přeneseme na svislou osu a z charakteristiky naprázdno odečteme na vodorovné ose velikost mg. napětí F_v . Vektor F_v je pak kolmý k vektoru U_v .



Obr. 11.1

Rovnoběžně s proudem I_n bude vektor reakčního mg. napětí F_r/C_1 . Jeho velikost určíme graficky z charakteristiky nakrátko. Od magnetického napětí F_{kn} určeného pro $I_n = 100\%$ na charakteristice nakrátko odečteme mg. napětí F_s budící rozptylový tok. Toto napětí F_s odečteme na vodorovné ose, když na svislou osu nanese poměrnou rozptylovou reaktanci $x_{l\sigma}$ a na charakteristice naprázdno provedeme odečet F_s jak ukazuje obr. 11.1. Velikost reakčního mg. napětí můžeme vypočítat podle vztahu

$$\frac{F_r}{C_1} = \frac{I}{C_1} \cdot 0,45 \cdot m_1 \cdot \frac{N_1 \cdot I_n}{p} \cdot k_{v1} \quad (11.1)$$

Výsledné budící napětí F_b pak získáme odčtením vektorů F_v a F_r/C_1 a po přenesení na vodorovnou osu odečteme jeho velikost. Je to mg. napětí potřebné ke kompenzaci reakce kotvy a k vybuzení U_v . Napětí U_{ib} skutečně odpovídající F_b je napětí, které se objeví na svorkách plně vybuzeného stroje, když se náhle odlehčí. Kdyby charakteristika nebyla křivkou ale přímkou (jak je naznačeno), bylo by toto napětí ještě větší (U_{ib}).

6.8.1 Potierova reaktance

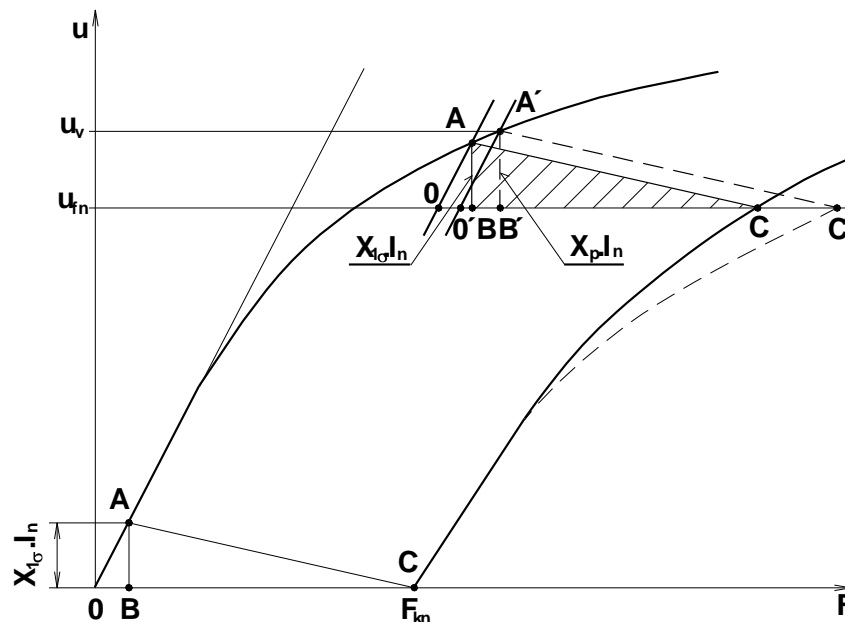
Potierova reaktance je fiktivní statorovou reaktancí a je větší než rozptylová reaktance $X_{l\sigma}$. Tento rozdíl vyplývá ze skutečnosti, že rozptylový tok, o němž se zvětšuje celkový tok rotorem, je úměrný magnetickému napětí přechodové vrstvy. Tedy skutečné buzení je větší než určené přibližnou metodou, která zvyšování rozptylu nerespektovala.

Vysvětlení rozdílu mezi Potierovou reaktancí a rozptylovou reaktancí provedeme podle obr. 12.4. Musíme tedy určit vnitřní napětí

$$U_v = U_{fn} + X_p \cdot I_n \quad (12.2)$$

Pro U_v dostaneme na charakteristice naprázdno bod A' . Tímto bodem vedeme rovnoběžku s charakteristikou vzduchové mezery a dostaneme O' . Vzdálenost $OC = O'C'$ přeneseme tak, že dostaneme bod C' , který je určující bod indukční charakteristiky. Bod C' zjistíme také tak, že změříme indukční charakteristiku a vyneseme na ni U_n jmenovité. Zvýšeným úbytkem napětí na reaktanci X_p nahrazujeme tedy neuvažovaný vzrůst buzení způsobený zvýšeným rozptylovým tokem rotoru. Potierova reaktance X_p je větší než rozptylová reaktance $X_{l\sigma}$, protože zahrnuje nejen rozptyl statorového vinutí, ale i rozptyl budícího vinutí při nasycení pólů. Sycení stroje v počáteční části charakteristiky naprázdno se podstatně liší od sycení při jmenovitém napětí. Proto je skutečná rozptylová reaktance $X_{l\sigma}$ o 20 – 30% menší než reaktance Potierova. (Pro bod C' je větší I_b , protože je větší sycení pólů, je větší i jejich magnetický odpor a větší rozptyl budícího vinutí.)

Jestliže je jalový proud kapacitního charakteru, posouvá se charakteristika naprázdno opačným směrem.



Obr. 12.4

Otázky ke kap. 6.8

1. Zdůvodněte nutnost změny buzení při zatížení stroje
2. Co je to indukční charakteristiky
3. Proč je Potierova reaktance větší než rozptylová statorového vinutí
4. Jak se stanoví rozptylový tok rotoru

6.9 Provoz synchronních generátorů

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Způsob chování synchronního stroje samostatně pracujícího při různém zatížení
- Vlastnosti stroje pracujícího paralelně se sítí

- Popsat různé charakteristiky strojů

Výklad

V současné době jsou provozovány rozsáhlé elektrické sítě s velkým počtem paralelně pracujících alternátorů. Tato rozsáhlá energetická soustava, přesahující i hranice států, se považuje za tvrdou síť, tzn. že napětí a kmitočet jsou stálé. Přesto se ještě vyskytují případy samostatně pracujících generátorů např. jako zdroje v nepřístupných místech, většinou jsou to zdroje mobilní, nebo záložní zdroje poháněné např. spalovacími motory, zdroje pro vojenské účely a také zdroje pro samostatné napájení prostředků výpočetní techniky, kde se vyžaduje neovlivňování ostatními spotřebiči.

6.9.1 Samostatně pracující generátor

Charakteristické vlastnosti samostatně pracujícího alternátoru popisují zatěžovací a regulační charakteristiky. Mezi základní **zatěžovací** charakteristiky patří závislost svorkového napětí U_f na zatěžovacím proudu (statorovém proudu) I_1 tedy $U_f = f(I_1)$ při konstantním I_b , n , f_1 a $\cos \varphi_1$. Tato charakteristika se nazývá **vnější** a charakterizuje změnu napětí na svorkách zatíženého alternátoru v závislosti na proudu dodávaného do sítě.

Charakteristika se vyjadřuje matematicky, když považujeme synchronní reaktanci za konstantní a zanedbáme-li odpor R_1 . Pak platí

$$U_f = U_b + j \cdot X_d \cdot I_1 \quad (13.1)$$

Proveďme nyní podobné úvahy pro dva krajní $\cos \varphi$:

- a) Pro $\cos \varphi = 1$ bude

$$U_f^2 + (X_d \cdot I_1)^2 = U_b^2 \quad (13.2)$$

toto je rovnice elipsy s osami $U_f = U_b$ pro $I_1 = 0$ a $I_1 = U_b / X_d$ pro $U_f = 0$.

- b) Pro $\cos \varphi = 0$ je

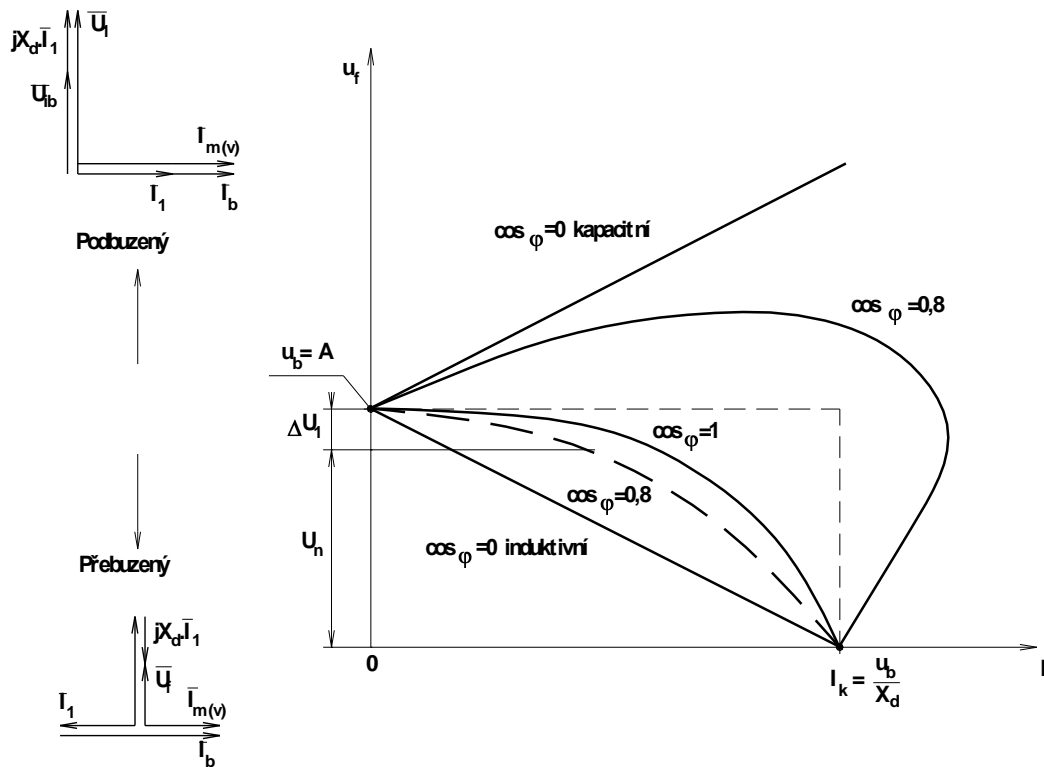
$$U_f \pm X_d I_1 = U_b$$

a to je zase rovnice přímky, která prochází bodem $U_f = U_b$ pro $I = 0$ a $I_1 = U_b / X_d$ pro $U_f = 0$ pro induktivní $\cos \varphi = 0$ respektive $I_1 = U_b / X_d$ pro $U_f = 2U_b$ pro $\cos \varphi = 0$ kapacitní.

Charakteristiky jsou nakresleny na obr. 13.1

Při libovolném účinníku vychází vnější charakteristika z bodu A, který odpovídá napětí naprázdno U_{10} při zadaném budícím proudu I_b .

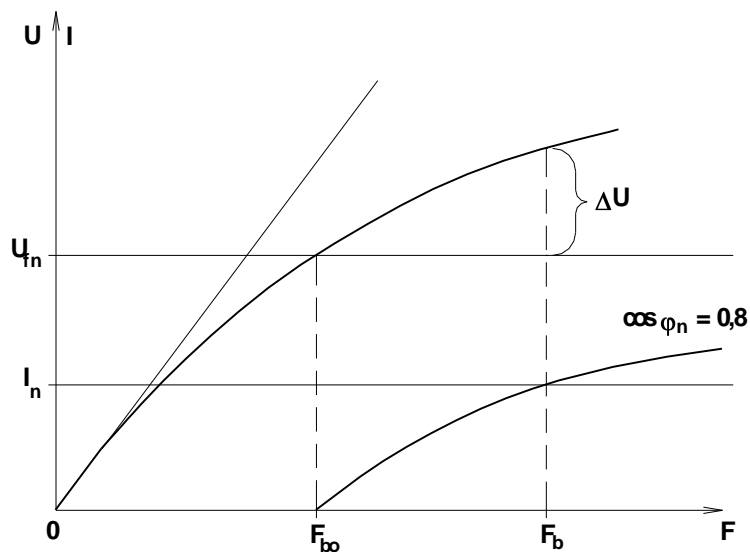
Při zatížení stroje do kapacity (podbuzený stav, chová se jako indukčnost) napětí se zatížením lineárně stoupá. Je to tzv. samobuzení generátoru a je to velmi nebezpečný stav neboť zvyšující se napětí ohrožuje izolační systém.



Obr. 13. 1

Další charakteristikou, která udává schopnost synchronního generátoru udržovat svorkové napětí při úplném odlehčení je **regulační** charakteristika. Odlehčíme-li náhle přebuzený alternátor a zůstane-li přitom jeho budicí proud konstantní, zvýší se jeho napětí o ΔU , jak je naznačeno na obr. 13.2. Poměrné zvýšení napětí se vztahuje ke jmenovitému napětí, takže

$$\Delta U = \frac{\Delta U}{U_n} \tag{13.3}$$



Obr. 13. 2

Poměrný přírůstek napětí závisí u daného stroje na jeho zatížení a účinniku. Synchronní stroje s velkou synchronní reaktancí, tedy s malým zkratovým poměrem mají ΔU větší než stroje s malou synchronní reaktancí čili stroje tvrdé.

Poměrné zvýšení napětí ΔU u velkých strojů dnes bývá až 50%, přičemž vzrůst napětí je omezován rychloregulátory, které stroj odbudí.

K provozním charakteristikám samostatně pracujících strojů patří dále budící a indukční charakteristiky o nichž již byla zmínka v předcházejících kapitolách.

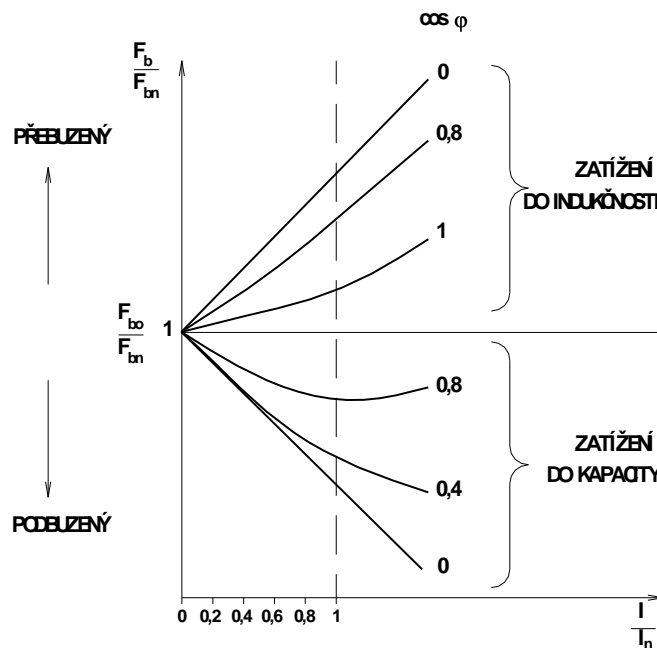
6.9.2 Paralelní chod generátoru s tvrdou sítí

Jestliže uvažujeme provoz s tvrdou sítí (výkon generátoru je proti síti nepatrný), pak změny činného a jalového výkonu nezpůsobí žádné změny svorkového napětí nebo tyto změny jsou tak malé, že je zanedbáváme.

Vraťme se znovu k regulační charakteristice, tentokrát u strojů spolupracujících s tvrdou sítí, tzn., že napětí U_1 se nemění a je konstantní. Regulační charakteristika zde udává závislost budícího proudu I_b (nebo magnetického napětí F_b) a satorového proudu I_1 . Dále jsou $\cos \varphi$ a n také konstantní. Tyto charakteristiky ukazují jak je třeba měnit při změně zátěže budící proud, aby svorkové napětí alternátoru zůstalo konstantní. Diagramy se mohou kreslit v absolutních veličinách nebo i v poměrných hodnotách. Tato charakteristika se někdy nazývá charakteristikou budící. Je uvedena na obr. 13.3.

Aby napětí U_1 zůstávalo konstantní je tedy nutno při zvětšování zatížení (proud I_1) v podbuzeném stavu budící proud zmenšovat a v přebuzeném stavu budící proud zvětšovat.

Práce synchronního stroje při napájení sítě se dá posoudit i z tzv. V- křivek. Je to závislost satorového proudu na budícím proudu nebo budícím magnetickém napětí. Opět je můžeme vynášet v absolutních nebo poměrných hodnotách. Závislost $I_1 = f(I_b)$ se vynáší při konstantním výkonu a napětí. Náznorným způsobem se dají V - křivky sestavit pro různé výkony P_1 .

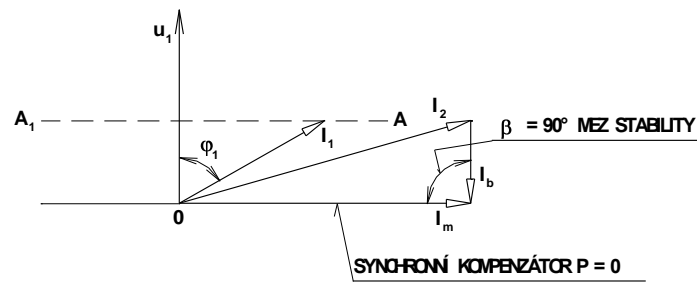


Obr. 13.3

Protože

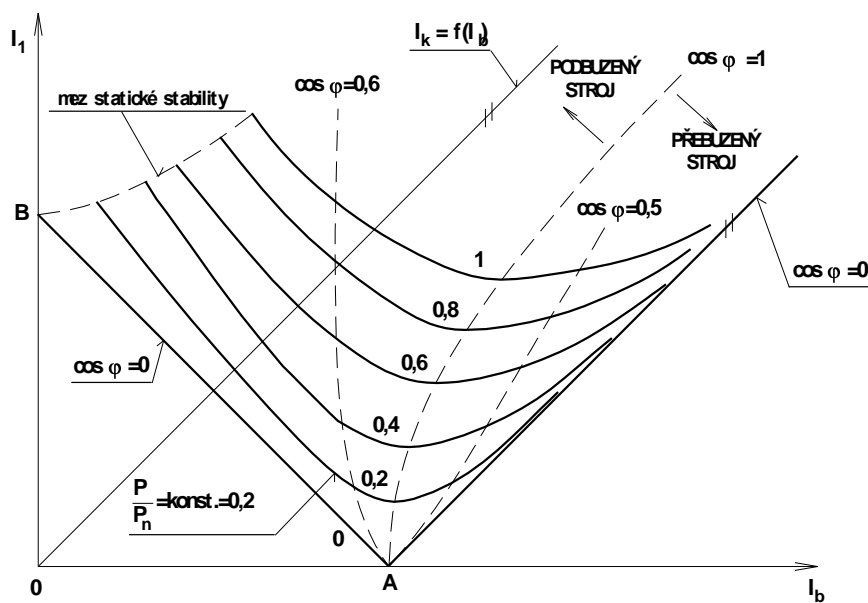
$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = konst. \quad (13.4.)$$

pak při $U_1 = konst.$ je i výraz $I_1 \cdot \cos \varphi = konst.$. To tedy znamená, že konec fázoru proudu I_1 se bude pohybovat po přímce AA_1 , kolmé k napětí, jak je znázorněno na obr. 13.4. Pro větší výkony by geometrickými místy byly rovnoběžné přímky více vzdálené od bodu 0. Pro nulový výkon (činný), což je synchronní kompenzátor je geometrickým místem proudů přímka jdoucí bodem 0. Pro přebuzený stroj budou proudy statoru předbíhat svorkové napětí U_1 o úhel φ_1 a fázory těchto proudů budou ležet ve směru bodu A_1 . Při zmenšování budícího proudu I_b bude satorový proud nejdříve klesat, dosáhne minima v bodě 0 při $\cos \varphi = 1$. Při dalším zmenšování I_b bude I_1 opět stoupat, až bychom dosáhli meze stability. Sestrojíme-li pro jistý počet hodnot proudů I_1 a účinnů fázorové diagramy, získáme odpovídající hodnoty budícího proudu I_b a tudíž i závislost $I_1 = f(I_b)$ tedy V - křivky obr. 13.5.



Obr. 13.4

Protože $UI = Uv = konst.$ musí být i ϕ a tedy $I_m = konst.$. Tedy se změnou I_1 měním pouze I_b . Pro nulový výkon přejde křivka ve dvě přímky, pravá část je v ideálním případě (bez vlivu magnetické indukce) rovnoběžná s charakteristikou nakrátko. Jinak řečeno charakteristika nakrátko je zvláštním případem V - křivky při $P = 0$ a $U_{sv} = 0$. Nejnižší body křivek odpovídají $\cos \varphi = 1$. Chceme-li při zvětšení zatížení udržet stejný $\cos \varphi = 1$ musíme zvětšit budící proud. Proto se spojnice minim. V - křivek tedy charakteristika $\cos \varphi = 1$ odklání od svislé osy. Pravé větve V - křivek platné pro přebuzený stroj se více odklání od svislé osy, protože se uplatňuje nasycení a zvětšený rozptyl pólů. Levé větve pro podbuzený stroj končí v bodech odpovídajících mezi statické stability stroje.



Obr. 13.5

V bodě *A* pracuje alternátor nezatížen ($P = 0$), v bodě *B* je budící proud roven nule a magnetické pole alternátoru je buzeno jalovým proudem statoru.

Při práci generátoru do tvrdé sítě tedy podle uvedeného rozboru platí:

1. činný výkon který generátor dodává do sítě, můžeme měnit pouze změnou točivého momentu poháněcího zařízení. Při zvětšení momentu se rotor zrychlí a úhel β se zvětší na takovou hodnotu, při které se vytvoří nová rovnováha mezi momentem pohonného zařízení a točivým momentem generátoru. Při zmenšení točivého momentu je proces opačný.
- Jestliže zůstane budící proud konstantní změna se současně s činným výkonem i výkon jalový.
2. Chceme-li při změně činného výkonu udržet konstantní hodnotu účinníku, musíme změnit budící proud I_b , a to v souladu s regulační charakteristikou.
3. Jalový výkon generátoru pracujícího paralelně se sítí lze měnit změnou budícího proudu. Při určitém činném výkonu a malém budícím proudu je alternátor **podbuzen**, odebírá ze sítě jalový výkon a je jalovým proudem přibuzován. Při totéž činném výkonu a velkém budícím proudu je generátor **přebuzen** a dodává do sítě jalový výkon a je jalovým proudem odbuzován. V prvním případě se tedy generátor chová jako tlumivka a ve druhém jako kondenzátor.
4. Síť nekonečného výkonu je schopna přijmout jakkoli velký činný nebo jalový výkon.
5. Činný a jalový výkon alternátoru lze regulovat odděleně a nezávisle na sobě.

Otázky ke kap. 6.9

1. Čím regulujeme napětí u generátoru pracujícího samostatně
2. Co se mění při změně otáček samostatně pracujícího generátoru
3. Co je to zatěžovací charakteristika
4. Jakým způsobem můžeme měnit jalový výkon u generátoru pracujícího v síti
5. Jak můžeme zvýšit činný výkon dodávaný do sítě
6. Z jakého vztahu vycházejí $V - k$ křivky
7. Kdo určuje výkon dodávaný do sítě

6.10. Fázování generátoru se sítí

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Podmínky, které musí být splněny pro připojení generátoru k síti
- Vysvětlit problémy při špatném fázování

Výklad

Jestliže chceme, aby synchronní generátor paralelně spolupracoval se sítí (nebo i pouze s jiným generátorem), musíme zajistit, aby v okamžiku připojení tohoto generátoru k síti nedošlo k proudovému rázu a také k elektromechanickému vyrovnávacímu pochodu.

Pochodu, který zajišťuje tyto podmínky říkáme fázování.

Fázování je sepnutí dvou nesynchronních dílů sítě, nebo připojení generátoru k síti případně k jinému běžícímu generátoru, a to v tom stavu a okamžiku, kdy napětí fázovaného stroje jsou stejná co do velikosti i úhlového natočení.

Spolehlivé přifázování bude zajištěno, když v okamžiku připojení generátoru k síti, budou stejné okamžité hodnoty napětí sítě U_s a generátoru U_g a tato napětí budou mít i stejný časový průběh. Musí tedy platit

$$u_s = u_g \quad (14.1)$$

kde

$$u_s = U_{smax} \cdot \sin(\omega_s \cdot t + \varphi_s) \quad u_g = U_{gmax} \cdot \sin(\omega_g \cdot t + \varphi_g) \quad (14.2.)$$

Výše uvedená podmínka je splněna když:

1. Je stejná velikost napětí stroje a sítě, tedy $U_g = U_s$. To se kontroluje pomocí voltmetrů, připojených na napětí stroje a sítě. Napětí stroje se reguluje na hodnotu napětí sítě přibuzováním či odbuzováním stroje. Stejně napětí sítě a připojovaného generátoru je při fázování nutné, neboť rozdíl mezi oběma napětími se při zapnutí projeví jako náraz jalového proudu.
2. Kmitočty stroje a sítě jsou stejné tedy $\omega_s = \omega_g$. Kontroluje se frekventoměrem. Kmitočet stroje se poháněcím zařízením nastaví na kmitočet sítě. Shodnost kmitočtu obou spínaných dílů je důležitější než shodnost napětí. Odchytky představují nárazy činného proudu. Tyto nárazy jsou vyvolány tím, že v okamžiku zapnutí se musí poměrně značná rotující hmota rotoru alternátoru urychlit, nebo zpomalit, podle toho má-li alternátor kmitočet nižší nebo vyšší než daná síť. Touto nahromaděnou kinetickou energií rotoru a její rychlou přeměnou v energii elektrickou se vysvětluje značný náraz činného proudu vznikající při fázování s rozdílem kmitočtu. Tento náraz způsobuje značné mechanické namáhání turbíny a alternátoru.
3. Fázový posun mezi napětím sítě a generátoru je minimální. Je nutná úhlová shoda fázorů napětí v okamžiku fázování jinak vzniká proudový náraz způsobený rozdílem napětí obou fázorů – obr. 14.1a. Tento rozdíl napětí způsobí vyrovnávací proud, jehož maximální hodnota stoupá prakticky s fázovým úhlem. Jestliže při fázování je diference všech tří hodnot, tj. napětí, kmitočtu i úhlu, vyvine každá tato diference vyrovnávací proud a tyto proudy se vektorově sčítají.
4. Sled fází generátoru a sítě je stejný. To se dá vyzkoušet tzv. sledovačem fází (asynchronním motorkem), který se musí při připojení na stejné fáze stroje a sítě roztočit stejným směrem.

Předpokládejme lišící se úhlové kmitočty, pak vzniká rozdíl u_s a u_g při stejném

$$U_{gmax} = U_{smax}, \varphi_s = \varphi_g$$

$$\Delta u = u_s - u_g = U_{max} \cdot (\sin \omega_s t - \sin \omega_g t)$$

což lze po úpravě vyjádřit vztahem

$$\Delta u = 2 \cdot U_{max} \cdot \cos \frac{\omega_s + \omega_g}{2} \cdot t \cdot \sin \frac{\omega_s - \omega_g}{2} \cdot t = 2 \cdot U_{max} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta t \quad (14.3)$$

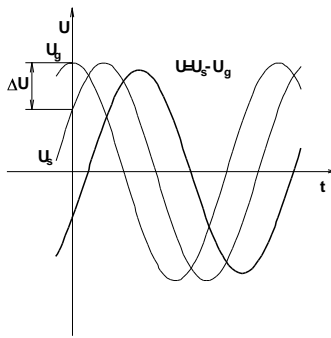
řešení vyplývá ze vztahu

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \quad (14.4)$$

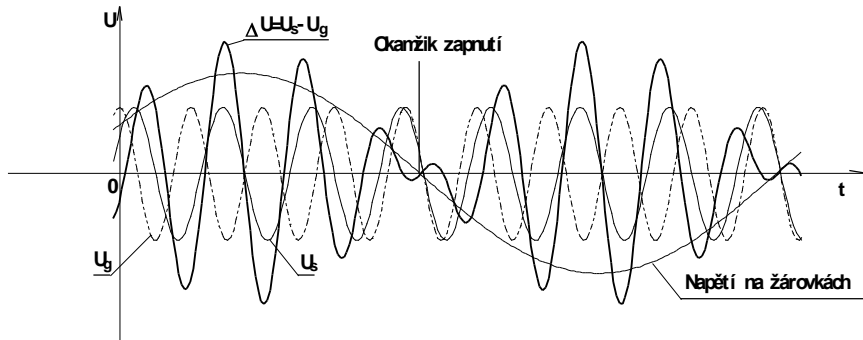
Rozdílové napětí u kmitá středním kruhovým kmitočtem

$$\alpha_s = \frac{\omega_s + \omega_g}{2} \quad (14.5)$$

s amplitudou rovnou dvojnásobku síťového napětí obr. 14.2.



Obr. 14.1



Obr. 14.2

Amplitudy mají obalovou křivku, jejíž kruhový kmitočet je

$$\beta_r = \frac{\omega_s + \omega_g}{2} \quad (14.6)$$

Pro zjištění, zda jsou splněny všechny podmínky pro fázování, byla řada metod. Velmi jednoduchou je metoda fázování pomocí tří žárovek. Fázovací žárovky se spojují buď pro fázování “na tmou, anebo pro fázování “na světlo”.

Při fázování na tmou se všechny tři žárovky zároveň rozsvěčují a zhasínají s kmitočtem β rovným dvojnásobku kmitů amplitud rozdílu napětí - dvojnásobek proti kmitočtu α . Tedy obalová křivka kmitá polovičním rozdílem obou kmitočtů. V okamžiku, kdy jsou všechny žárovky pohaslé, jsou splněny fázovací podmínky a generátor je možno připojit k síti. Pro určení správného okamžiku by stačila pouze jedna žárovka, ale nezjistil by se správný sled fází. Žárovky pro svou tepelnou setrvačnost nestačí sledovat kmitočet α a rozsvěčují se s β .

Všechny tyto způsoby fázování se dnes používají spíše pro znázornění procesu fázování nebo cvičné účely. V elektrárnách jsou dnes instalovány tzv. synchronoskopy, které umožňují automatické fázování bez zásahu obsluhy.

Otázky ke kap. 6.10

1. Co je to fázování
2. Jaké jsou podmínky pro správné fázování
3. Vysvětlíte fázování na tmou
4. Při nesouhlasném napětí generátoru a sítě nastane při připojení k síti ráz činné nebo jalové energie
5. Při různých frekvencích generátoru a sítě vznikne ráz jalové nebo činné energie.

6.11 Zkratky synchronních strojů

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Rozeznat různé druhy zkratů synchronních strojů
- Definovat provozní stavy při nichž vzniknou různé velikosti zkratových proudů
- Určit první a druhou přechodnou reaktanci
- Vysvětlit účinky zkratového proudu na stroj

Výklad

Zkrat synchronního stroje nesmíme zaměňovat se zkouškou nakrátko, při níž při zkratových zkouškách opatrně zvyšujeme buzení stroje až do hodnoty $I_k = I_l$.

V okamžiku zkratu vzniknou proudy, které mnohonásobně (i dvacetinásobek) převýší jmenovité hodnoty. Tyto proudy vznikají jak ve vinutí statoru, tak i v rotorovém, případně tlumícím vinutí. Tyto proudy vyvolávají značné ztráty oteplují stroj, ale také svými dynamickými účinky neúměrně namáhají jak vinutí, tak i jiné konstrukční části stroje.

Pro velikost zkratových proudů je rozhodující jaký druh zkratu nastane. V podstatě mohou nastat tři případy:

- souměrný trojfázový zkrat a tento zkrat je relativně příznivý, protože vytvořené reakční pole bude třífázové.
- jednofázový zkrat a dvoufázový zkrat jsou méně příznivé
- dále může být tzv. zemní zkrat, kdy je vinutí 1 fáze nebo více fází zkratováno na zem (na kostru)
- zkrat budicího vinutí na kostru
- závitový zkrat vinutí statoru nebo buzení.

Časový interval od vzniku zkratu až do okamžiku, ve kterém se dosáhne ustáleného zkratového proudu, který obvykle nepřesáhne $2 \cdot I_{In}$, je doba trvání elektromagnetického přechodného děje. Tento interval je poměrně krátký.

Odpor statorového vinutí i budicího vinutí je v porovnání s jejich reaktancí malý a proto jej v prvních úvahách zanedbáme.

Jak jsme již uvedli v kapitole o charakteristice nakrátko je při trvalém zkratovém proudu magnetický tok jen asi 8 až 18 % plného magnetického toku při zatížení se jmenovitým napětím.

Při zkratu na svorkách synchronního generátoru (stejný případ však může nastat i při zkratu na motoru či kompenzátoru neboť tyto stroje jsou pak vlastně generátory poháněné kinetickou energií v rotujících částech) se však magnetický tok nezmění skokem, neboť tomu brání časová změna, indukující ve statorovém vinutí a také v rotorovém vinutí proudy, které změně toku brání.

Jestliže okamžitá hodnota výsledného magnetického toku stroje před zkratem byla ψ , pak v okamžiku zkratu při zanedbání ohmického odporu klesá svorkové napětí na nulu a pro trojfázový zkrat platí v každé fázi

$$R \cdot i + \frac{d\psi}{dt} = 0 \quad (15.1)$$

kdy

$$\frac{d\psi}{dt} = 0 \quad \text{z čehož plyne, že } \psi = \text{konstanta.}$$

To znamená, že po zkratu zabírá se zkratovaným vinutím téměř stálý magnetický tok. Totéž platí o magnetickém toku rotoru, kde také R_b zanedbáme.

Pro velikost zkratových proudů je podstatné ve kterém okamžiku dojde ke zkratu. Budeme rozebírat souměrný trojfázový zkrat na svorkách stroje s vyniklými póly. Nechť zkrat nastane při chodu naprázdno.

6.11.1 Osa kotvy (statoru) je kolmá k ose rotoru

Tento stav je znázorněn na obr. 15.1. Rotor má v okamžiku zkratu proti ose vinutí statoru (znázorněného závitěm), kolmou polohu, takže statorovou cívkou neprotéká žádný tok.

Uvažujeme nejdříve, že na rotoru je pouze budící vinutí.

V prvním okamžiku po zkratu je reaktance satorového vinutí podstatně menší než by odpovídalo ustálenému chodu nakrátko, kdy reaktance satorového vinutí je dána podélnou synchronní reaktancí satoru X_d . To je způsobeno demagnetizujícími vlivy i_b proudů protékajících budícím vinutím (a pokud budeme uvažovat i tlumící vinutí tedy i tímto vinutím a dalšími cestami v rotoru).

Pro okamžité hodnoty i_l a i_b platí vztahy

$$i_{lmax} = -\frac{\sqrt{2} \cdot U}{X_{l\sigma} + \frac{X_{rd} \cdot X_b}{X_{rd} + X_b}} = -\frac{\sqrt{2} \cdot U}{X'_d} \quad (15.2)$$

$$i_{bmax} = -i_{lmax} \cdot \frac{X_{rd}}{X_{rd} + X_b} \quad (15.3)$$

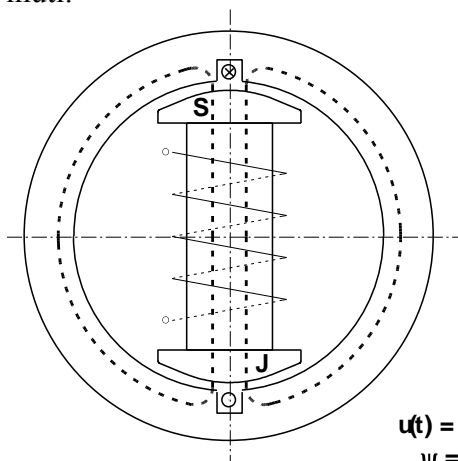
kde $\sqrt{2} \cdot U$ je amplituda indukovaného napětí magnetickým tokem $I_b \cdot L_{rd}$

X_{rd} je reaktance v osovém směru

$X_{l\sigma}$ je rozptylová reaktance satoru

X_b je rozptylová reaktance budícího vinutí

X_d nazýváme první přechodnou reaktancí což je vlastně rozptylová reaktance satoru zvětšená o paralelně spojenou reaktanci reakce s rozptylovou reaktancí budícího vinutí.



Obr. 15.1

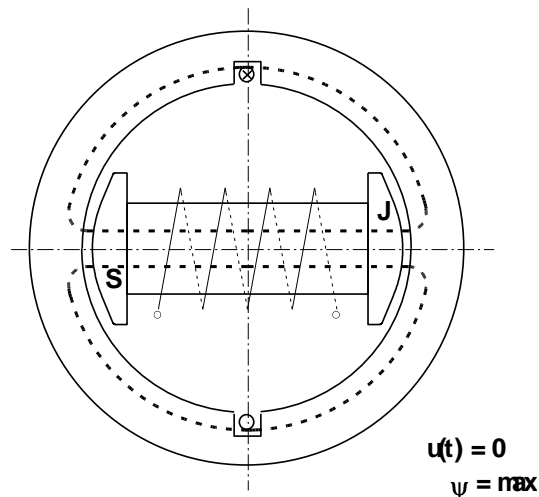


Obr 15.2

Vztahu pro přechodnou reaktanci odpovídá náhradní schéma na obr. 15.2.

6.11.2 Osa kotvy splývá s osou kotvy pole rotoru

Tento stav je naznačen na obr. 15.3. Celý magnetický tok prochází plochou cívky satoru. Rotor má magnetický tok stejný jako v prvním případě.



Obr.15.3

Okamžité hodnoty proudů

$$i_{lmax} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U}{X'_d} \quad (15.4)$$

$$i_{bmax} = i_{lmax} \cdot \frac{X_{rd}}{X_{rd} + X_b} \quad (15.5)$$

Srovnáme-li oba případy 15.1 a 15.3 dojdeme k závěru, že nejvyšších hodnot dosáhne satorový proud v okamžiku, kdy osa satoru souhlasí s osou pole rotoru. Ve srovnání s prvním případem je proud dvojnásobný. V budícím obvodu pak protéká proud

$$I_b + i_{bmax} \quad (15.6)$$

Podobně jako u transformátoru také zkratový proud generátoru je součtem složky střídavé a složky stejnosměrné.

6.11.3 První přechodný zkratový proud

Zkratový proud generátoru obsahuje střídavou složku, jejíž amplituda se s časem zmenšuje, až dosáhne hodnoty trvalého zkratového proudu. Velikost trvalého zkratového proudu je dána

$$I_{km} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{X_{dns}} \quad (15.7)$$

kde X_{dns} je nesyčená synchronní reaktance v podélném směru.

Amplituda střídavé složky zkratového proudu pro první okamžik zkratu je

$$I'_{km} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{X'_d} \quad (15.8)$$

A protože, jak jsme již uvedli, je $X'_d \leq X_{dns}$ bude $I'_{km} \geq I_{km}$. Střídavá složka je v prvním okamžiku větší proto, že se v budícím vinutí indukují přechodný proud i_b . Tento zaniká s časovou konstantou prvního přechodu

$$T'_d = \frac{X'_d}{\omega \cdot R_b} = \frac{L_d}{R_b} \quad (15.9)$$

Časový průběh amplitudy střídavé složky přechodového proudu, tedy změna z I'_{km} na I_{km} probíhá podle vztahu

$$I'_{km}(t) = I_{km} + (I'_{km} - I_{km}) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} \quad (15.10)$$

Průběh popsany touto rovnicí probíhá, když ke zkratu dojde v okamžiku podle obr.

15.1. Zkratový proud nemá stejnosměrnou složku. Jak jsem si však ukázali, zkratový proud bude mít i ss složku, když k němu dojde v kterémkoliv jiném okamžiku a hodnota ss složky je největší když zkrat nastane v okamžiku $\psi = \max, u = 0$. V tomto případě je počáteční hodnota ss složky rovna amplitudě střídavé složky I'_{km}

$$I'_{am} = I'_{km} = \frac{\sqrt{2}}{X'_d} \cdot U \quad (15.11)$$

Zkratový proud je dán součtem obou složek a je v okamžiku zkratu ve srovnání s prvním uvažovaným případem dvojnásobný. Časová konstanta statorového vinutí, s níž stejnosměrná složka zaniká, je dána konstantami tohoto vinutí tj. rozptylovou reaktancí $X_{l\sigma}$ a ohmickým odporem R_l , tedy

$$T_a = \frac{L_{l\sigma}}{R_l} \quad (15.12)$$

Pak časový průběh stejnosměrné složky

$$I'_{am} = \frac{\sqrt{2}}{X'_d} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} = I'_{km} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (15.13)$$

Průběh výsledných amplitud prvního přechodového zkratového proudu alternátoru je dán rovnicí obalové křivky amplitud

$$I'_{vm}(t) = I'_{km}(t) + I'_{am}(t) = I_{km} + (I'_{km} - I_{km}) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + I'_{km} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (15.14)$$

6.11.4 Druhý přechodný zkratový proud

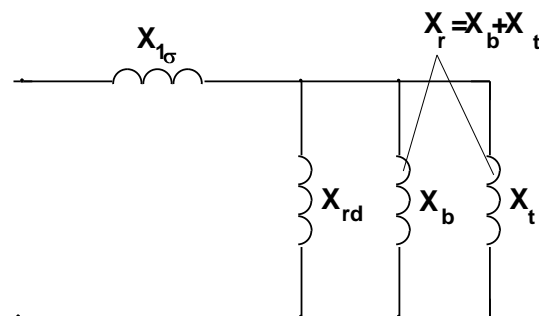
V předešlé kapitole jsme na rotoru uvažovali pouze jedno a to budící vinutí. Rotor má však většinou ještě na rotoru tlumící vinutí. Toto vinutí je jako neúplná klec umístěno v pólových nástavcích - jako tyče, které se po obou stranách spojí kruhy nakrátko. U turboalternátorů jsou tlumiče klíny, kterými jsou uzavřeny drážky budícího vinutí. Jako tlumící vinutí mohou působit i jiné rotorové konstrukce tvořící kruh nakrátko.

Připomeneme, že úkolem tlumičů je tlumit kývání synchronního stroje event. se používá k asynchronnímu rozběhu motoru.

Při zkratu vyvolává změna magnetického toku přechodný proud nejen v budícím vinutí, ale také v tlumícím vinutí či v jiných částech, které zahrneme do tlumícího vinutí. Tuto skutečnost respektujeme zavedením přechodné reaktance. Místo rozptylové reaktance budícího vinutí X_b zavedeme rozptylovou reaktanci rotoru X_r pro níž platí

$$X_r = \frac{X_b \cdot X_t}{X_b + X_t} \quad (15.15)$$

Druhá přechodná reaktance X''_d je pak rovna reaktanci rozptylové $X_{l\sigma}$ zvětšené o paralelní reaktanci X_{rd} s rozptylovou reaktancí rotoru X_r . Tomuto odpovídá náhradní schéma na obr. 15.4.



Obr. 15.4

Protože $X''_d \leq X'_d$ bude zkratový proud v prvním okamžiku vyšší a vzroste tedy z hodnoty

$$I'_{km} \text{ na } I''_{km} .$$

Amplituda druhého přechodného zkratového proudu bude

$$I''_{km} = -\frac{\sqrt{2} \cdot U}{X''_d} \quad (15.16)$$

Jak bylo uvedeno zvětšení zkratového proudu je dáno tím, že v tlumícím vinutí se indukuje další přechodný proud i_t , který zaniká s časovou konstantou T''_d . Vzhledem k tomu, že odpor tlumiče bývá větší než odpor budícího vinutí je $T''_d \ll T'_d$. To znamená, že rázová složka rychle vymizí a další průběh je již takový, jako by tlumič neexistoval. Obvykle se počítá s přibližnou hodnotou $T''_d = 1/8 T'_d$. Po doznění proudu i_t probíhá děj s časovou konstantou T'_d .

V nejnepříznivějším případě bude stejnosměrná složka I''_{am} rovna amplitudě stř. složky v prvním okamžiku zkratu I'_{km} .

$$I''_{am} = I'_{km} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{X''_d} \quad (15.17)$$

Stejnosemnná složka zaniká s časovou konstantou statorového vinutí T_a .

$$I''_{am}(t) = I''_{am} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (15.18)$$

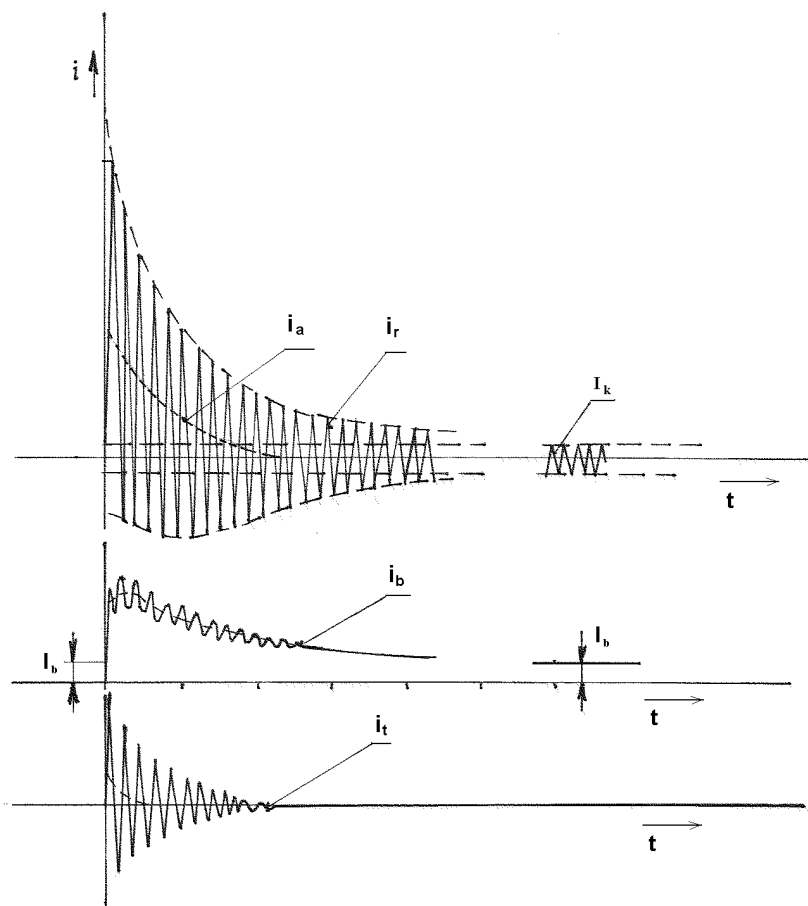
Průběh amplitud druhého přechodného zkratového proudu generátoru je pak popsán rovnicí obalové křivky amplitud:

$$I''_{vm}(t) = I''_{km}(t) + I''_{am}(t) = I_{km} + (I'_{km} - I_{km}) e^{-\frac{t}{T'_d}} + (I''_{km} - I'_{km}) e^{-\frac{t}{T''_d}} + I''_{km} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (15.19)$$

V prvém okamžiku zkratu je

$$I'_{vm} = 2 \frac{\sqrt{2} U}{X''_d} = 2 I''_{km} \quad (15.20)$$

Proud I'_{vm} je směrodatný pro dimenzování částí elektrických strojů, zvláště vinutí a to z hlediska mechanického namáhání. Ustálený zkratový proud I_k se používá při výpočtech oteplení vinutí a všech částí, jimiž protéká zkratový proud. Na obr. 15.5 je průběh zkratového proudu. Uvedený rozbor byl prováděn pro jednofázový zkrat. Průběh zkratových proudů ve všech třech fázích je různý.



Obr. 15.5

Na obr. 15.5 je rovněž průběh proudu v budícím vinutí při zkratu. Na zvětšenou stejnosměrnou složku i_{bss} se superponuje střídavá složka, jejíž amplituda se právě rovná zvětšení stejnosměrné složky

6.11.5 Nesouměrné zkraty (na souměrných strojích)

Výpočet zkratových proudů u nesouměrných zkratů je složitější než při zkratu souměrném. U dvojpólového zkratu je počáteční amplituda střídavé složky statoru $0,866 I_{kmax}$ u $3f$ zkratu, ale amplituda ustáleného proudu je $3x$ větší než I_{km} . U jednofázového zkratu je počáteční amplituda stejná jako u $3f$, ale ustálená je až $3x I_{km}$. Při stejném buzení bude tedy ustálený proud nakrátko největší při jednofázovém zkratu.

Ve skutečnosti nebudou zkratové proudy dosahovat až těchto vypočtených hodnot, ale vlivem tlumení se proudový náraz zmenší o $10 - 40\%$ u hladkého rotoru a o $40 - 50\%$ u vyniklých pólů.

Otázky ke kap. 6.11

1. Jaké druhy zkratů mohou vzniknout v synchronním stroji
2. Jaký je průběh proudu po vzniku třífázového souměrného zkratu
3. Jaké jsou rozdíly při zkratu, jedno-, dvou- a třífázovém
4. Jaké jsou účinky zkratových proudů
5. Co je to první přechodná reaktance
6. Jak vysvětlíte druhou přechodnou reaktanci

6.12 Kruhový diagram synchronního stroje

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- sestrojít kruhový diagram synchronního stroje
- vysvětlí jeho použití

Výklad

Kruhový diagram je geometrickým místem koncových bodů fázoru statorového proudu. Používá se ho nejčastěji pro stanovení přetížitelnosti synchronního stroje. Stanovení přetížitelnosti např. měřením je obvykle nemožné s ohledem na velké výkony synchronních strojů. Při měření výkonové či momentové přetížitelnosti by se muselo jít až do výpadku stroje ze synchronismu a to by s ohledem na obvykle dvojnásobnou přetížitelnost stroje nebylo prakticky možné.

Stroj s hladkým rotorem

Při konstrukci kruhového diagramu předpokládáme, že mg. odpor stroje je konstantní a stroj je připojen na tvrdou síť tzn. s konstantním napětím U a frekvencí f . Základní napěťové rovnice jsou

$$U_f = U_b + Z_d \cdot I_l = U_b + (R_l + jX_d) I_l \quad (16.1)$$

a odtud

$$I_l = \frac{U_f}{Z_d} - \frac{U_b}{Z_d} = I_m - I'_b \quad (16.2)$$

Stroj s konstantní vzduchovou mezerou má synchronní reaktance v podélné a příčné ose přibližně shodné. Vnitřní výkon trojfázového stroje je pak vyjádřen vztahem

$$P_v = 3 \cdot U_i \cdot I_l \cdot \cos \varphi$$

nebo také

$$P_v = 3 \cdot U_i \cdot I'_b \cdot \sin \beta$$

Vzájemný vztah proudů I_l a I'_b jakož i úhlů β a φ udává obr. 16.1. Z tohoto obrázku plyne

$$I'_b \cdot \sin \beta = I_l \cdot \cos \varphi \quad (16.3)$$

Tento výraz představuje činnou složku proudu statoru. Proud I'_b se při tom vyjadřuje v měřítku statorových proudů a přepočet se provádí např. pomocí charakteristiky nakrátko. Pro uvažovaný budící proud a to obvykle jmenovitý $-I_{bn}$ při jmenovitém zatížení stroje, se z charakteristiky nakrátko stanoví ekvivalentní proud v měřítku proudu statoru I'_{bn} a ten se dosadí do vzorce pro vnitřní výkon P_v .

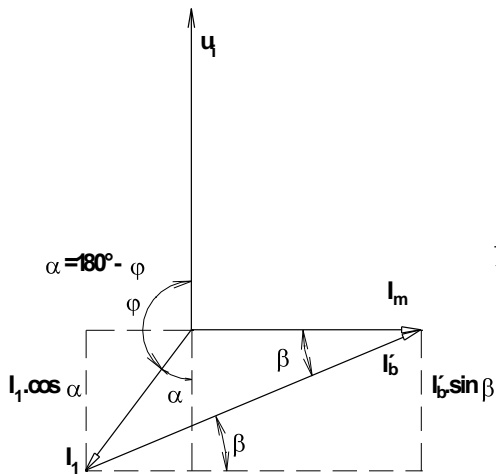
Maximální vnitřní výkon stroje je při $\sin \beta = 1$, tedy při $\beta = \pi/2$. Tedy

$$P_{vax} = 3 \cdot U_i \cdot I'_b \quad (16.4)$$

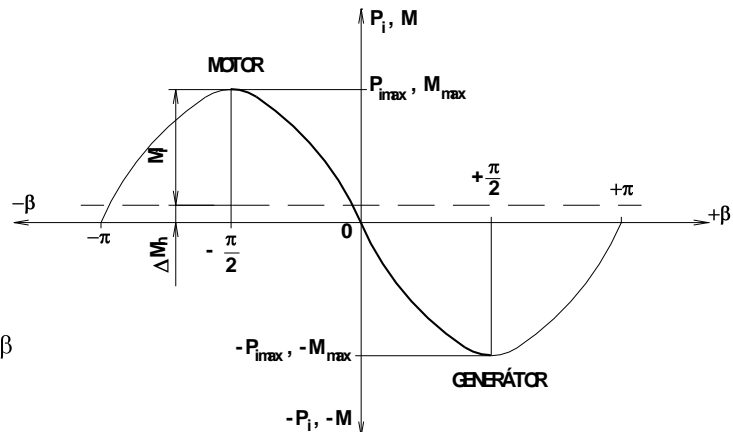
Při výpočtu přetížitelnosti se zanedbává rozdíl mezi vnitřním a svorkovým výkonem (nebo u motorů výkonem na hřídeli) a rovněž za napětí U_i se dává svorkové napětí stroje U . Průběh vnitřního výkonu synchronního turbostroje na zatěžovacím úhlu je na obr. 16.2.

Z výše uvedeného je patrné, že maximální výkon stroje a tedy i přetížitelnost závisí nejen na napětí, ale také na budícím proudu.

Chování stroje při konstantním budícím proudu a proměnném činném zatížení zjistíme podle kruhového diagramu na obr. 16.3. Na kladné reálné souřadnice vyneseme fázor statorového napětí.



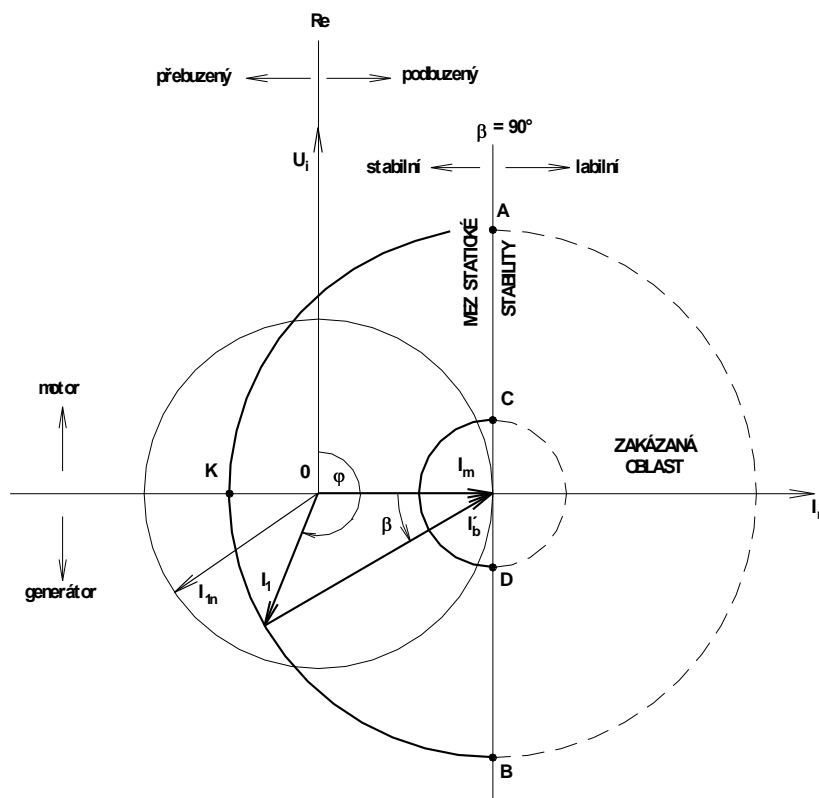
Obr. 16.1



Obr. 16.2

Na zápornou imaginární osu vyneseme fázor magnetizačního proudu I_m , který zjistíme:

- buď z charakteristiky nakrátko jako proud statoru, odpovídající budícímu proudu naprázdno pro uvažované napětí statoru,
- nebo z V-křivky pro $P = 0$ a nulové buzení, kdy stroj odebírá pouze jalový výkon.



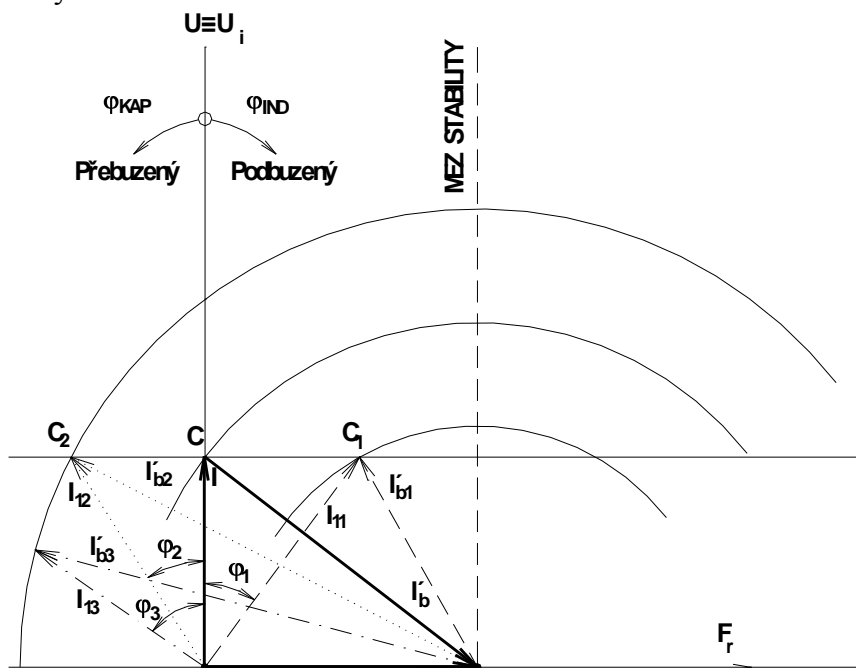
Obr. 16.3

Koncový bod fázoru I_m je středem kružnice o poloměru I'_b , tj. budícího proudu v měřítku statoru. Při změně činného zatížení se pracovní bod pohybuje po levé části kružnice mezi body A a B. Bod A je bodem maximálního výkonu motoru a bod B maximálního výkonu generátoru. Geometrickým místem proudů I_1 je tedy kružnice o poloměru I'_b opsaná z koncového bodu fázoru I_m .

Pravá, čárkovaná část kružnice nemá praktického významu a je již za mezí statické stability. Různým hodnotám budícího proudu odpovídají různé poloměry kružnice. Kružnice,

kteřá by procházela bodem O by platila pro $I'_b = I_m$. V bodě K pracuje stroj jako kompenzátor ($P = 0$). Kružnice z bodu O o poloměru I_{In} určuje oblast, v níž stroj může trvale pracovat, aniž by oteplení přesáhlo dovolenou mez. Pro jmenovitý zdánlivý výkon je možno buď stroj více zatěžovat činným výkonem jen na úkor jalového nebo naopak.

Jestliže má motor pracovat s konstantním zatížením, pak při konstantním napětí sítě je $I_1 \cos \varphi \cong konst.$ a to ve fázorovém diagramu znamená, že koncový bod fázoru satorového proudu se bude při změně buzení pohybovat po přímce "a" rovnoběžné s fázorem toku ϕ_r – obr. 16.4. Bude-li proud I_1 ve fázi s napětím U , tj. $\cos \varphi = 1$, pak budou proudové poměry vyjádřeny trojúhelníkem OO_1C . Jestliže se budící proud změní z I'_b na I'_{b1} a protože motor musí na hřídeli i nadále odevzdávat stejný mechanický výkon, musí se satorový proud odebíraný ze sítě zvětšit na hodnotu I_{11} , aby mohl být hrazen potřebný jalový proud motoru neboť fázový posun má induktivní charakter. Toto je práce podbuzeného motoru. Naopak při změně z I'_b na I'_{b2} vzroste proud na I_{12} a současně se jeho fázor pootočí do kapacitní oblasti. V tomto případě se do sítě jalový proud kapacitního charakteru dodává a ze sítě se odebírá pouze proud činný.



Obr. 16.4

Z výše uvedeného vyplývá, že při změně budícího proudu můžeme synchronnímu motoru nastavit takový účinník jaký potřebujeme. Jak již bylo uvedeno při konstantním buzení a proměnlivém zatížení se bude koncový bod satorového proudu pohybovat po kružnici opsané z bodu O_1 s poloměrem I'_b . Činná složka proudu I_1 je úměrná mechanickému výkonu a tím i točivému momentu stroje. Při stálém buzení se změnou zatížení na hřídeli mění i činná složka satorového proudu a její fázový posun.

Momentová přetížitelnost a při konstantních otáčkách i výkonová přetížitelnost je dána poměrem maximálního výkonu k jmenovitému při jistém buzení. Motor bude mít tím větší přetížitelnost čím větší bude jeho buzení. Proto přebuzený stroj je v provozu stabilnější a při nárazovém zatížení nevypadne tak snadno ze synchronismu.

Otázky ke kap. 6.12

1. Co můžeme vyčíst z kruhového diagramu synchronního stroje
2. Jaká jsou omezení pro velikost zatížení strojů

6.13 Moment synchronního stroje a stabilita

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Popsat statický a dynamický stav stroje
- Stanovit moment stroje s hladkým rotorem i s vyniklými póly
- Určit přetížitelnost synchronního stroje

Výklad

Provozní stav synchronního stroje může být :

- **ustálený** (statický) při němž nedochází ke změnám kinetické energie systému nebo přesněji při němž dochází teoreticky k nekonečně pomalým změnám této energie,
- **dynamický**, charakterizovaný periodickými změnami kinetické energie systému během poruchového děje.

Stabilitou rozumíme schopnost synchronního stroje vyvinout síly mezi rotorem a statorem, které jsou větší nebo alespoň rovné poruchovým silám, takže je schopen obnovit svůj rovnovážný stav, tj. udržet se v synchronismu s napájecí (motor) nebo napájenou (generátor) rozvodnou soustavou. Stabilita může být statická nebo dynamická.

Statická stabilita je schopnost synchronního stroje udržet se v synchronismu, pracuje-li stroj při poruše statické stability bez ohledu na to, zda spolupůsobí jakýkoliv druh automatické regulace (např. buzení) či nikoliv.

Dynamická stabilita je schopnost synchronního stroje udržet se v synchronismu, pracuje-li stroj při poruše dynamické stability bez ohledu na to, zda spolupůsobí jakýkoliv druh automatické regulace (např. rázové buzení, opětne zapínání apod.) či nikoliv.

Mez stability je maximální energetický tok, který projde svorkami synchronního stroje při poruše stability, aniž stroj vypadne z chodu. Podle druhu poruchy rozeznáváme mez statické a mez dynamické stability. Zatímco mez statické stability je jednoznačně pro daný stroj definována a nelze ji překročit, závisí mez dynamické stability na druhu, době trvání a okamžiku vzniku dynamické poruchy.

Porucha stability je jakákoliv porucha ve vnějším elektrickém či mechanickém obvodu stroje, která vede k poruše statického synchronního chodu.

Porucha statické stability je taková externí porucha statického režimu stroje, která vede k pomalému přechodu stroje do nového ustáleného stavu. Statickým (kvazistatickým) přechodem rozumíme takový relativní pohyb rotoru vůči točivému magnetickému poli statoru, který nevedl ke vzniku nezanedbatelných asynchronních momentů či výraznějších kyvů rotoru kolem jeho okamžité střední polohy, takže synchronní moment probíhá prakticky podle statické charakteristiky.

Porucha dynamické stability je vnější porucha ustáleného chodu stroje, převážně rázového charakteru, která má za následek dynamickou odezvu, tj. vznik velkých a rychlých mechanických kyvů rotoru, doprovázených značnými asynchronními a setrvačnými momenty. Dynamickou poruchou může být mimo rázové zátěže i kolísání či ztráta síťového napětí, porucha buzení, asynchronní chod a p.).

6.13.1 . Moment synchronního stroje a statická stabilita

Jak bylo uvedeno pro činný výkon synchronního stroje platí

$$P = m_1 \cdot U_f \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = P + \Delta P_{i1} \quad (17.1)$$

Jestliže zanedbáme ztráty můžeme napsat, že vnitřní výkon přenesený ze satoru na rotor nebo opačně je

$$P_i = m_1 \cdot U_f \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (17.2)$$

pro jednoduchost nebudeme dále psát satorové indexy.

Na obr. 17.1 je nakreslen fázorový diagram turbogenerátoru při zanedbání satorového odporu $R_1 = 0$. Z něj můžeme napsat

$$X_d \cdot I \cdot \cos \varphi = U_b \cdot \sin \beta \quad (17.3)$$

Dosazením do horní rovnice dostaneme

$$P_i = m \cdot U_f \cdot \frac{U_b}{X_d} \cdot \sin \beta \quad (17.4)$$

Úhlovou rychlost rotoru označme

$$\omega_m = \frac{2\pi \cdot f}{p} = 2\pi \cdot n_s$$

Elektromechanický moment

$$M_i = \frac{P_i}{\omega_m} = \frac{m \cdot p}{2\pi \cdot f} \cdot \frac{U_f \cdot U_b}{X_d} \cdot \sin \beta \quad (17.5)$$

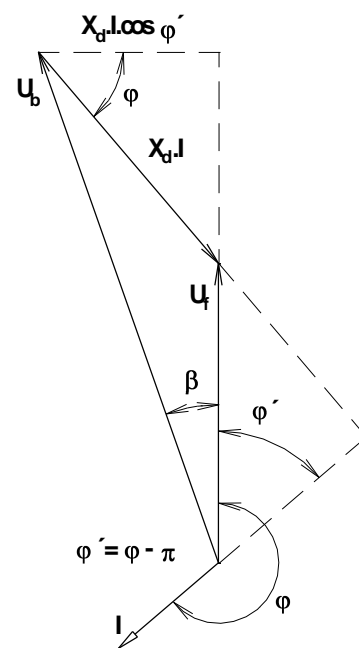
Maximální moment je pak pro $\beta = \pi/2$.

Na obr. 16.2 je vynesena průběh momentu v závislosti na zátěžném úhlu. V oblasti mezi $-\pi/2$ a $+\pi/2$ může stroj pracovat bez porušení stability.

Z uvedených vztahů vyplývá podstatný rozdíl mezi momentem synchronního a asynchronního stroje. U asynchronního stroje je moment závislý na skluzu tj. na otáčkách, zatímco u synchronního stroje je závislý na zátěžném úhlu. Amplituda momentu zde nezávisí na čtverci napětí jako u asynchronního stroje, ale na součinu fázového napětí satoru a fiktivního budícího napětí a nepřímo na synchronní reaktanci. Přibuzením se amplituda zvyšuje.

Nejzákladnější vlastností synchronního stroje při paralelní spolupráci je jeho schopnost synchronního běhu. Tato vlastnost je dána synchronizačním momentem, který vzniká jakmile vznikne přechodný děj. V ustáleném stavu je rovnováha mezi mechanickým příkonem a elektrickým výkonem generátoru (nebo mezi elektrickým příkonem a výkonem na hřídeli u motoru). Tzn., že je i rovnováha mezi mechanickým a elektromagnetickým momentem stroje.

Jestliže se moment hnacího mechanismu změní je rovnováha porušena a vznikne rozdíl momentů. Tento rozdíl způsobí, že rotor přejde do jiné polohy dané zátěžným úhlem β_2 , aby se opět dosáhlo rovnováhy. Rozdíl mezi hnacím a zatěžovacím momentem je tzv. **synchronizační moment** zajišťující obnovení rovnováhy.



Obr. 17.1

Představme si např., že generátoru se z jakýchkoliv důvodů zmenší hnací moment z M_1 na M_2 . V tom okamžiku by byl výkon předávaný do sítě větší než příkon a jejich rozdíl je na okamžik kryt setrvačnými hmotami rotoru. Rotor se tím zpomalí z β_1 na menší β_2 . Synchronizační moment, který natočí rotor do nové polohy β_2 je

$$\Delta M = M_1 - M_2 = M_{max} \cdot \sin \beta_2 + \Delta \beta \cdot M_{max} \cdot \sin \beta_2 \quad (17.6)$$

Po úpravě a dosazení vztahů pro malé úhly $\cos \Delta \beta = 1$ a $\sin \Delta \beta = \Delta \beta$

$$\Delta M = M_{max} \cdot \cos \beta_2 \cdot \Delta \beta = M_s \cdot \Delta \beta \quad (17.7)$$

kde M_s nazýváme synchronizační konstantou

$$M_s = M_{max} \cdot \cos \beta_2$$

Synchronizační konstanta se vždy vztahuje k novému úhlu β_2 . Pro různé úhly se mění podle kosinoidy. Má nulové hodnoty pro $\beta = \pm \pi/2$ a maximum pro $\beta = 0$. Tyto vztahy platí pouze pro malé odchylky $\Delta \beta$. Proto je možno takto řešit pouze statickou stabilitu a nikoliv dynamickou stabilitu, která se týká velkých změn zátěžného úhlu.

6.13.2 Statická stabilita synchronních strojů

V tomto případě se jedná o pomalé změny, které v provozu generátoru mohou být způsobeny sníženým buzením, menším poklesem napětí energetické soustavy, změnami poháněcího momentu turbíny apod. Předpokládáme, že mechanický výkon nebo moment stroje, připojeného na tvrdou síť se bude pomalu měnit a stroj je schopen tento výkon dodat a udržet rovnovážný stav, pak mluvíme o statické stabilitě stroje. Z předcházejícího výkladu již víme, že mezi statické stability je zátěžný úhel $\beta = \pm \pi/2$. Při překročení této meze vypadne stroj ze synchronismu a otáčky se u alternátoru zvýší – říkáme, že stroj proběhl, kdežto u motoru by došlo k jeho zastavení nebo se otáčky ustálí na asynchronních, daných asynchronním momentem tlumiče či jiných masivních částí.

Výpadek ze synchronismu považujeme za poruchu. Na mezi statické stability bude výkon synchronního stroje největší. Aby měl stroj v provozu určitou bezpečnou rezervu, pracuje při jmenovitém zatížení se zátěžným úhlem obvykle pouze $\beta = 30^\circ$ el. Někdy se udává činitel zálohy statické stability

$$k_p = \frac{P_{max} - P}{P} \cdot 100 [\%] \quad (17.8)$$

kde P_{max} je maximální výkon alternátoru při jistém buzení. Má být asi 20 %.

6.13.3 Přetížitelnost synchronních strojů

Přetížitelnost synchronního stroje je definována poměrem maximálního a jmenovitého momentu nebo výkonu, tedy

$$p = \frac{M_{max}}{M_n} \quad (17.9)$$

a bývá nejčastěji pro motory min. 1,5 a pro alternátory 1,25. Někdy se s ohledem na lepší využití stroje konstruuje s menší přetížitelností. Přetížitelnost stroje a tím i statická stabilita stoupá se zkratovým poměrem ν_k . Jelikož výkon motoru P se rovná součinu momentu M a mechanické úhlové rychlosti ω_m , pak za předpokladu, že zanedbáme ztráty ve statoru, můžeme momentovou přetížitelnost vyjádřit i poměrem

$$p_M = \frac{P_{max}}{P_n} \quad (17.10)$$

nebo použitím vztahů pro výkony

$$P_M = \frac{m \cdot U_f \cdot U_b}{X_d \cdot I_{ln} \cdot \cos \varphi_n} = \frac{U_b}{X_d \cdot I_{ln} \cdot \cos \varphi_n} \quad (17.11)$$

Protože indukované napětí U_b je úměrné jmenovitému budicímu proudu I_{bn} a součinu $X_d \cdot I_{ln}$ je indukované napětí při chodu nakrátko a jmenovitém proudu statoru I_{ln} a toto je úměrné I_{bk} , pak

$$P_M = \frac{I_{bn}}{I_{bk} \cdot \cos \varphi_n} \quad (17.12)$$

a jak jsme odvodili zkratový poměr

$$v = \frac{I_{k0}}{I_n} = \frac{I_{b0}}{I_{bk}} \approx \frac{I}{X_d} \quad (17.13)$$

bude

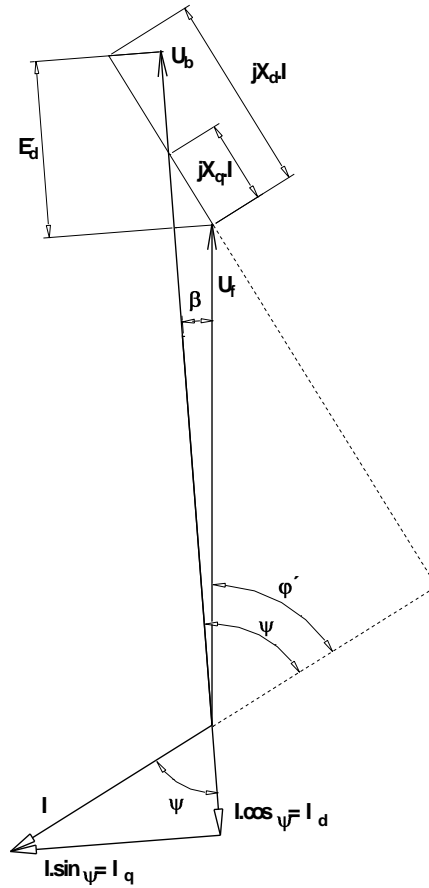
$$P_M = \frac{I}{X_d} \cdot \frac{I_{bn}}{I_{b0} \cdot \cos \varphi_n} \quad (17.14)$$

Na přetížitelnost vždy výrazně působí velikost synchronní reaktance X_d . Zkratový poměr je větší při menší X_d a tedy i přetížitelnost bude větší. Zkratový poměr je menší u lépe využitých strojů s menší vzduchovou mezerou čímž klesá přetížitelnost. Stabilita se zde pak zajišťuje rychloregulátory.

POZOR POZOR : Srovnej přetížitelnost asynchronních strojů

6.13.4 Moment stroje s vyniklými póly

U strojů s vyniklými póly je průběh momentu poněkud odlišný od průběhu u turbostrojů. Je to tím, že kromě části výkonu odpovídajícímu turbostroji má ještě druhou část a to tzv. reluktanční výkon. Odvození si provedeme podle obr.17.2



Obr.17.2

Je patrné, že

$$\begin{aligned}
 X_q &= \frac{E'_q}{I \cdot \cos \psi} & X_d &= \frac{E'_d}{I \cdot \sin \psi} \\
 \varphi &= \psi - \beta \\
 M &= \frac{m \cdot p}{2\pi \cdot f} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi
 \end{aligned} \tag{17.15}$$

Použitím vztahu pro rozdíl úhlů a dále podle obr.17.2

$$\begin{aligned}
 E'_q &= U \cdot \sin \beta = X_q \cdot I \cdot \cos \varphi \\
 E'_d &= U_b - U_f \cdot \cos \beta = X_d \cdot I \cdot \sin \varphi
 \end{aligned}$$

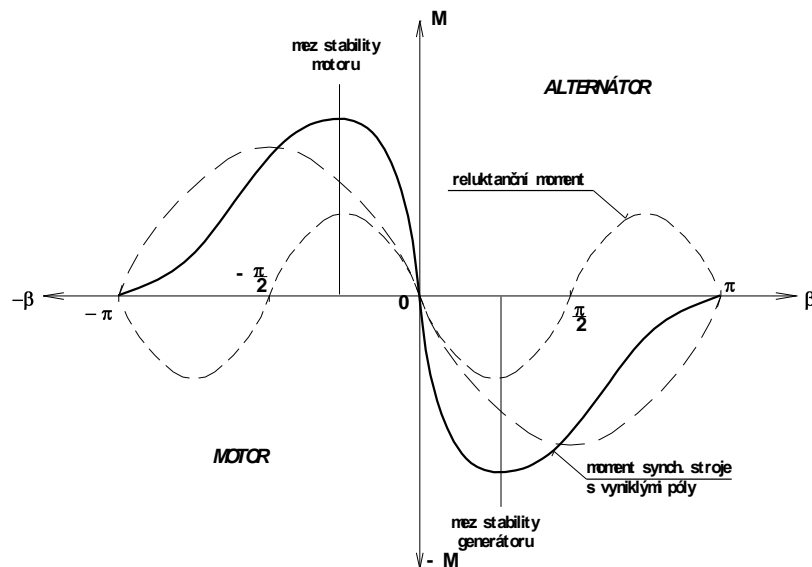
Dosazením za $\cos \psi$ a $\sin \psi$ a úpravou výrazu pro $\sin 2\beta$ dostaneme konečný výraz

$$M = \frac{m \cdot p \cdot U_f}{2\pi \cdot f \cdot X_d} \cdot \left(U_b \cdot \sin \beta + \frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_q} \cdot U_f \cdot \sin 2\beta \right) \tag{17.16}$$

Pro stroj s hladkým rotorem je $X_d = X_q$ a tedy druhý člen této rovnice je nulový. U strojů s vyniklými póly je X_q zhruba poloviční jako X_d . Tak např.

		Štěchovice	Slapy	Lipno	Dalešice
x_d	p.j.	1,05	1,26	1,23	1,025
x_q	p.j.	0,68	0,77	0,78	0,66

Vlivem reluktanční části (tj. složce závislé na $\sin 2\beta$), která je úměrná rozdílu reluktancí v podélné a příčné ose, je moment zvratu větší než u strojů s hladkým rotorem, ale mez statické stability se posune k menšímu úhlu β , tedy $\beta < \pi/2$ (obr. 17.3).



Obr. 17.3

Stroj s vyniklými póly se udrží v synchronismu i když není nabuzen, neboť může pracovat s reluktančním výkonem. Těto schopnosti se využívá u malých synchronních motorů. Jejich konstrukce se zjednoduší protože odpadá budící vinutí. Magnetizační proud odebírají ze sítě.

Otázky ke kap. 6.13

1. Definujte rozdíl mezi statickým a dynamickým stavem synchronního stroje
2. Nakreslete momentovou charakteristiku stroje s hladkým rotorem
3. Nakreslete momentovou charakteristiku stroje s vyniklými póly
4. definujte mez statické stability u stroje s vyniklými póly a hladkým rotorem
5. Jak se liší moment synchronního stroje v závislosti na svorkovém napětí od momentu asynchronního motoru
6. Co je to reluktanční moment
7. Může synchronní stroj vyvíjet moment aniž by byl buzen

6.14 Synchronní motory a kompenzátory

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Definovat vlastnosti a použití synchronních motorů
- Určit způsoby spouštění synchronních motorů
- Popsat speciální synchronní motorky
- Popsat synchronní kompenzátor a jeho použití

Výklad

Jak bylo uvedeno synchronní stroje mohou plynule přecházet z generátorického do motorického stavu a naopak. Tento plynulý přechod však platí pro synchronní chod stroje. V porovnání s asynchronními motory mají synchronní motory řadu výhod i nevýhod.

Hlavní výhodou je to, že pro svoji činnost nepotřebují odebírat ze sítě jalový příkon a naopak mohou být zdrojem tohoto výkonu. K dalším výhodám patří:

- konstantní otáčivá rychlost nezávislá na zatížení a napětí
- jeho moment klesá úměrně s napětím sítě a tím je stabilnější než asynchronní motor
- přispívá ke stabilitě napájecí sítě
- odpadají skluzové ztráty
- má vyšší účinnost
- možnost dosažení výkonu desítek MW
- jeho velká vzduchová mezera umožňuje snížit přídavné ztráty.

Nevýhody:

- komplikovaný rozběh
- potřeba budicího systému (dříve rotační v současnosti vesměs statický)
- má menší momentovou přetížitelnost
- při stejném výkonu vyšší pořizovací cena

V současné době již neplatí nemožnost jednoduché a plynulé regulace otáček. Protože synchronní motor se ve svých základních vlastnostech neliší od synchronních generátorů, platí vše co bylo uvedeno dříve. Synchronní motor pracuje se stálými otáčkami

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (18.1)$$

6.14.1 Spouštění synchronních motorů

Pro spouštění synchronních motorů platí stejné podmínky jako pro asynchronní motory. Zvláštní důraz zvláště u velkých motorů je nutno dávat na dovolený proudový náraz na napájecí síť a na vhodný záběrný moment.

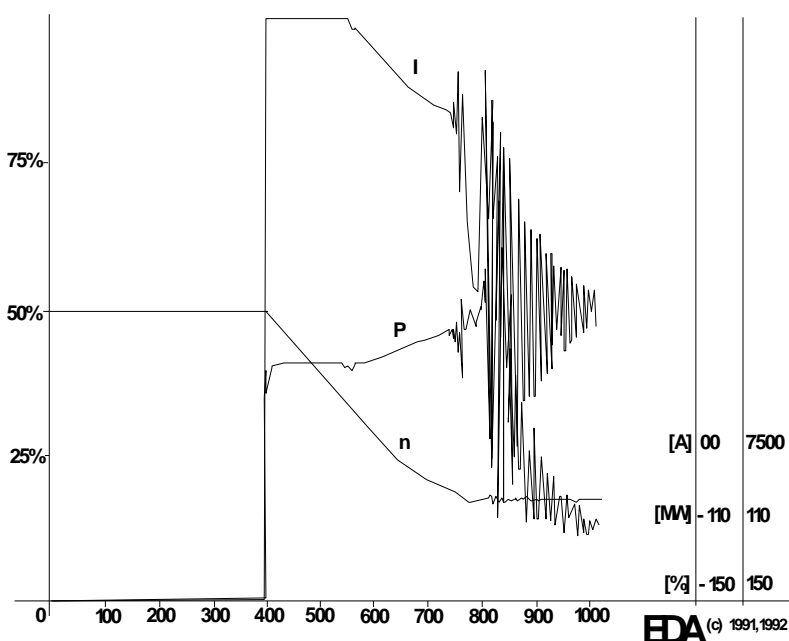
Způsoby spouštění:

1. asynchronní rozběh
 - a. přímé připojení na síť
 - b. spouštění přes reaktor
 - c. spouštění autotransformátorem
2. rozběh změnou kmitočtu napájecího napětí
3. roztočení pomocným zařízením.

Nejrozšířenější je asynchronní rozběh. Pro tento účel musí být motor opatřen rozběhovým vinutím na rotoru. Je to klec nakrátko vytvořená z měděných, mosazných nebo bronzových tyčí uložených v drážkách pólových nástavců v čelech spojených kruhy nakrátko. Tyto kruhy mívají pružné spojky pro vymezení tepelných dilatací. U starších konstrukcí plní funkci rozběhového vinutí i pólové nástavce nelistěné spojené v čelech kruhy nakrátko. U strojů s hladkým rotorem je rozběhové vinutí vytvořeno z mosazných drážkových uzávěrů budicího vinutí doplněných kruhy nakrátko. Rozběhové vinutí plní také funkci tlumiče kývání rotoru. Z konstrukce rotoru vyplývá, že rozběhová klec bude nesymetrická neboť nutně musí chybět tyče v mezipólovém prostoru. Takto vzniká brzdná složka momentu při rozběhu a zřetelně vyjádřené sedlo při polovičních otáčkách motoru (funkce skluzu $2s - I$).

Vlastní proces spouštění má několik etap:

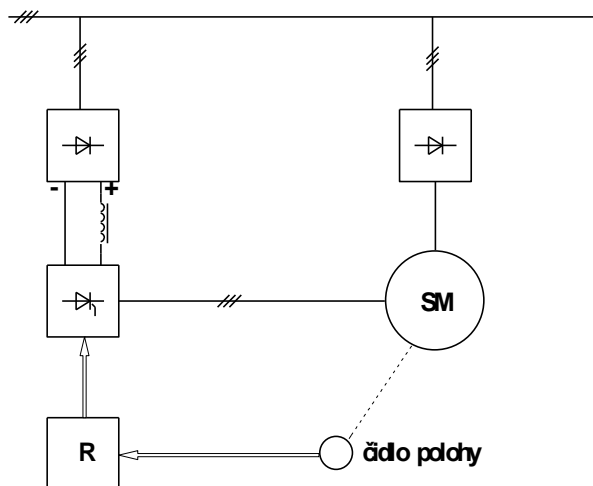
- Nejdříve nenabuzený motor připojíme k síti a rotor je urychlován asynchronním momentem, až se dosáhne cca 95% synchronních otáček. V budicím vinutí s velkým počtem závitů by se v počáteční fázi rozběhu indukovalo nebezpečně vysoké napětí ohrožující izolační systém tohoto vinutí. Proto se budicí vinutí zkratuje přes odpor jehož velikost je $(5 - 10)R_b$. Takto se rovněž omezí negativní vliv momentu budicího vinutí.
- Po dosažení otáček blízkých synchronním se stroj rychle nabudí a tak se motor vtáhne do synchronismu. Záznam rozběhu motorického rozběhu generátoru 120 MVA je na obr. 18.1.
- Od tohoto okamžiku stroj pracuje jako synchronní motor.



Obr. 18.1

Motory menších výkonů spouštěné asynchronním rozběhem se připojují na plné síťové napětí. Tam, kde je nutno omezit záběrný proud a tím i pokles napětí v síti, tam se použije předřazeného reaktoru nebo spouštěcího autotransformátoru. Reaktor se pro snížení napětíového namáhání zapojuje do uzlu statorového vinutí. Po ukončení rozběhu se tyto přídavné prvky odpojí.

U kmitočtového spouštění je mezi motor a napájecí síť zařazen frekvenční měnič, v současné době již pouze statický, vesměs s proudovým meziobvodem. Frekvenční měnič umožňuje plynulý rozběh motoru a synchronizaci bez proudových rázů. Pokud je měnič dimenzován na jmenovitý výkon motoru, tedy pro trvalou práci a nikoliv pouze pro rozběh, mluvíme o ventilovém pohonu či ventilovém motoru – obr. 18.2.



Obr. 18.2

POZOR.POZOR: Srovnej závislost motoru asynchronního a synchronního na napájecím napětí!

6.14.2 Speciální synchronní motorky

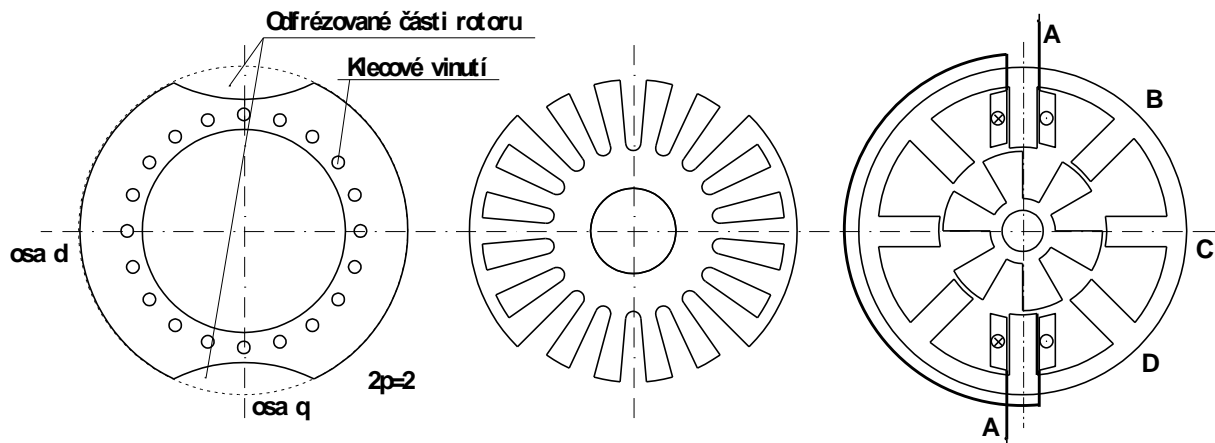
V automatizovaných soustavách i jinde jsou rozšířeny synchronní motorky a to od výkonu několika setin wattu až do několika kilowattů. Nejčastěji se užívají tam, kde je nutno udržovat konstantní otáčky. Podle konstrukce se dělí na:

- motory reluktanční
- motory s permanentními magnety
- hysterezní motorky.

Podle druhu pohybu to mohou být motorky točivé nebo krokové.

Reluktanční (reakční) motorky

Jsou to motory s vyjádřenými póly na rotoru bez budícího vinutí. Stator má normální jedno nebo několika fázové vinutí. Točivý reluktanční moment je tvořen jako důsledek různé magnetické vodivosti v podélné a příčné ose stroje, jak bylo uvedeno v kap. 17. Příklady konstrukce rotorů jsou na obr. 18.3. Hlavním smyslem těchto konstrukcí je dosažení co největšího rozdílu mezi reaktancí v podélném a příčném směru. Mimo to je vhodné dosáhnout malé hmotnosti rotoru. Při připojení statorových fází na napětí se vyjádřené rotorové póly orientují tak, aby magnetický odpor byl minimální, tedy rotor zaujme polohu odpovídající minimální reluktanci. V důsledku toho vznikají tangenciální síly, které vytvoří točivý moment a rotor se otáčí tímž směrem a stejnými otáčkami jako točivé pole statoru. Točivé pole statoru může být vytvořeno také postupným přiváděním budících proudových impulsů do vinutí jednotlivých fází statoru. V tomto případě je počet pólových dvojic rotoru menší jako počet pólových dvojic statoru.



Obr. 18.3

Motory s permanentními magnety

Na rotoru těchto motorů jsou permanentní magnety. Rozběh je buď klecí nakrátko na rotoru nebo u jednofázových pak pomocnou kondenzátorovou fází.

Hybridní motory jsou takové u nichž výrazná reluktanční funkce je spojena s přidáním buzení permanentními magnety. Účelem magnetů je vnutit pólům rotoru a hlavně jejich hranám příslušnou magnetickou polaritu, což velmi zlepšuje synchronizační vlastnosti a zesiluje užitečný magnetický tok.

Hysterezní motory

Tyto motorky využívají pro svoji činnost točivý hysterezní moment. Zbytkové hysterézní pole přenesené do rotoru spolu s točivým magnetickým polem vytvářejí točivý moment. Točivý hysterezní moment působí vždy ve směru otáčení pole. Bez vlivu hystereze se póly rotoru nacházejí přesně proti pohybujícím se pólům statoru. A mezi nimi působí pouze radiální síly. Tyto síly póly vzájemně přitahují, ale nevytvářejí točivý moment. Vlivem hystereze jsou póly rotoru poněkud posunuty proti pólům statoru, vznikají tangenciální síly ve směru relativního pohybu pólů statoru a vytvářejí točivý moment. Čím větší je mechanické zatížení, tím větší je úhel β , o který jsou posunuty osy pólů točivého pole a rotoru. Přibližně je velikost hysterezního momentu

$$M_{h\beta} = M_h \cdot \sin\left(\frac{\beta_h}{\beta_{hmax}} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (18.2)$$

Když úhel β_h dosáhne β_{hmax} ztratí rotor schopnost synchronizace a začne se otáčet asynchronně. Hysterézní moment však působí dále. Hysterézní motory mohou tedy pracovat jak v synchronním tak i v asynchronním režimu. Práce v asynchronním režimu je však ztrátová.

Konstrukčně je stator podobný jako u běžných synchronních motorů, jedno nebo třífázových. Rotor je ocelový válec častěji složený z plechů a je z magneticky tvrdého materiálu, tj. mající širokou hysterezní smyčku. Rotor nemá vinutí.

Specialitou jsou synchronní reakčně hysterézní motorky. Užívají se pro elektrické hodiny. Rotor je z magneticky tvrdého materiálu s rozdílnou magnetickou vodivostí v podélné a příčné ose. Točivý moment má složku reakční, závislou na rozdílu magnetických vodivostí v podélném a příčném směru a složku hysterézní závislou na koercitivě materiálu rotoru.

6.14.3 Synchronní kompenzátor

Synchronní stroj může pracovat jako kompenzátor, když se z něj na hřídeli neodebírá výkon jako u motoru, tedy není poháněn jako generátor. Stroj bere ze sítě jen činný výkon na krytí ztrát a do sítě dodává výkon jalový. Jde tedy o přebuzený motor při chodu naprázdno. Tyto stroje se spouštějí stejným způsobem jako synchronní motory. Protože ke kompenzátoru se nepřipojuje žádná mechanická zátěž bývají tyto stroje bez vyvedeného konce hřídele a jejich rozběh je lehký s krátkou dobou trvání.

Synchronní kompenzátory slouží ke zlepšování účinníku a ke zvýšení stability sítě. Přebuzené působí jako kondenzátor a podbuzené jako tlumivka. Bývají umístěny v rozvodnách přenosových sítí nebo velkých průmyslových podniků. Pro rychlou reakci jsou vybaveny rychlorekulátory buzení.

Otázky ke kap. 6.14

1. Určete výhody a nevýhody synchronních motorů
2. Srovnejte vlastnosti synchronního a asynchronního motoru
3. Jaké jsou způsoby spouštění synchronního motoru
4. Popište průběh spouštění asynchronním rozběhem
5. Jaké druhy synchronních motorků znáte a kde se používají
6. Popište spínaný reluktanční motor
7. Vysvětlete účel a použití kompenzátorů
8. Může synchronní stroj pracovat jako krokový motor

6.15 . Kývání synchronních strojů

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

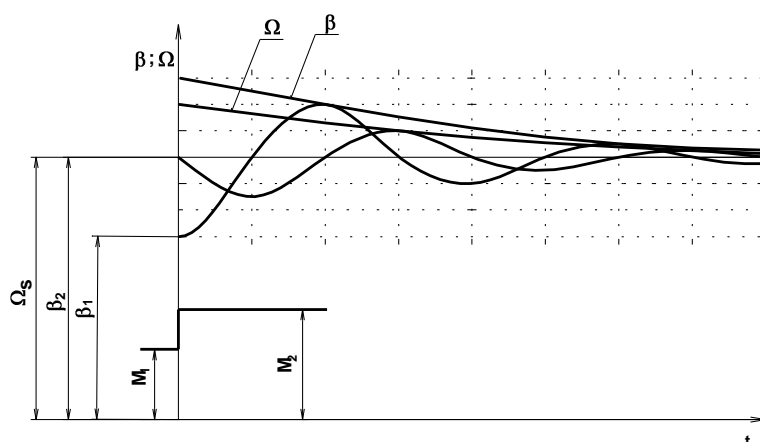
- vysvětlit příčiny kývání synchronních strojů
- určit mez dynamické stability
- popsat kritérium pro dynamickou stabilitu

Výklad

Při každé změně zatížení synchronního stroje se mění zátěžný úhel β , tj. úhel mezi fázory napětí U_1 a fiktivním indikovaným napětím U_{ib} . Tento úhel závisí na poloze osy pólů stroje vůči ose výsledného magnetického pole. Každému zatížení v oblasti stabilního chodu přísluší určitá poloha, daná zátěžným úhlem β . Změní-li se zatížení, změní se i tento úhel. Proti vychýlení rotoru z rovnovážné polohy působí synchronizační moment. Rovnovážná poloha je dána rovností hnacího a zatěžovacího momentu (u generátoru).

Změna z polohy dané úhlem β_1 na β_2 vyvolá kývání stroje. Kývání představuje periodický pohyb rotoru, vůči své poloze při rotaci stálou synchronní rychlostí. Zvýšíme-li zatížení stroje, musí se rotor postupně zpomalit, aby se ustálil na větší hodnotě zátěžného úhlu. Tak bude obnovena rovnováha momentů. Vlivem setrvačnosti se však rotor pohybuje přes rovnovážnou polohu a zátěžný úhel vzroste ne na β_2 , ale na β_3 . Tím je narušena rovnováha a synchronizační moment začne rotor urychlovat zpět na úhel β_2 . Rotor však opět překývne na úhel β_1 a opět musí zapůsobit synchronizační moment, aby se rotor dostal do polohy odpovídající úhlu β_2 . Pokud by tento pochod nebyl tlumen, kývání by pokračovalo. Ve skutečnosti je pohyb rotoru tlumen třením rotujících částí, ale zvláště tlumičem na rotoru.

Pohybem rotoru, tedy jeho relativní změnou vůči magnetickému poli, se v tlumiči i v masivních částech rotoru indukují proudy, které společně s magnetickým polem vytvářejí momenty tlumící toto kývání. Proto kývání synchronního stroje probíhá vždy jako tlumené – obr. 20.1.



Obr. 20.1

Konstanty kývání

Průběh kývání určují parametry, které závisí na elektromagnetických konstantách synchronního stroje a na jeho provedení. Rovnice momentů, odpovídající kývání rotoru pak lze napsat

$$M_k = M_d + M_t + M_{i\beta} + \Delta M + M_0 \quad (20.1)$$

kde M_k je moment kývání
 M_d dynamický moment
 M_t tlumící moment
 $M_{i\beta}$ vnitřní elektromagnetický moment
 ΔM synchronizační moment
 M_0 zátěžný moment.

$$M_k = M_d + M_t + \frac{m \cdot p}{2\pi \cdot f} \cdot \left(\frac{U_f \cdot U_b}{X'_d} \cdot \sin\beta + U_f^2 \cdot \left(\frac{X'_d - X_q}{2X'_d \cdot X_q} \right) \cdot \sin 2\beta \right) + \Delta M + M_0 \quad (20.2)$$

Protože

$$M_{i\beta} + M_0 = 0$$

Bude

$$M_k = M_d + M_t + \Delta M \quad (20.3)$$

Dříve jsme si odvodili

$$\Delta M = M_s \cdot \Delta\beta \quad (20.4)$$

Dynamický moment je úměrný součinu momentu setrvačnosti rotujících hmot soustrojí J a časové změně úhlové rychlosti

$$M_d = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{J}{p} \cdot \frac{d^2\beta}{dt^2} \quad (20.5)$$

Tlumící moment je způsoben časovou změnou polohy rotoru proti ustálenému stavu a je dán opět úhlem β a tlumící konstantou B

$$M_t = \frac{d\beta}{dt} \cdot B \quad (20.6)$$

Pak tedy

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d^2\beta}{dt^2} + \frac{d\beta}{dt} \cdot B + M_s \cdot \Delta\beta = M_k \quad (20.7)$$

Pokud se M_k má rovnat 0 pak rovnice přejde na tvar

$$\frac{J}{p} \cdot \lambda^2 + B \cdot \lambda + M_s = 0 \quad (20.8)$$

a řešením

$$\lambda_{1,2} = \frac{B \cdot p}{2 \cdot J} \pm \sqrt{\frac{p^2 \cdot B^2}{4 \cdot J^2} - \frac{R_s \cdot p}{J}} \quad (20.9)$$

první člen pravé strany rovnice představuje činitele útlumu a části pod odmocninou vlastní kmitočet tlumeného kývání.

Dynamická stabilita

Synchronní stroj je dynamicky stabilní, zůstane-li v synchronismu se sítí i při velkých výchylkách rotoru, které následují po náhlé skokové změně zatížení. Dynamická stabilita je větší než statická a to z těchto důvodů:

- maximální dynamický moment je roven až čtyřnásobku maximálního statického momentu tedy cca šestinásobku jmenovitého momentu,
- dynamický moment dosahuje maxima při $\beta > \pi/2$
- mezní dynamický úhel bývá téměř π , kdežto pro statickou stabilitu je mezní úhel $\pi/2$
- kývání stroje po skoku zátěže je bržděno tlumícím momentem, zatímco při statické stabilitě se tlumič neuplatní.

Rozebereme případ kývání turbogenerátoru po náhlém skoku zatížení. Vektorový diagram turbogenerátoru, platící pro přechodný stav, je na obr. 21.1. Při tomto přechodném stavu počítáme s mg. tokem, který odpovídá napětí za přechodnou reaktancí X'_d . Průmět tohoto napětí do podélné osy je U'_b . Protože průmět mg. toku do podélné osy d zůstává konstantní, považujeme také napětí U'_b za konstantní. Podle vektorového diagramu můžeme psát

$$I \cdot \cos\varphi' = I_d \cdot \sin\beta + I_q \cdot \cos\beta = -I \cdot \cos\varphi \quad (21.1)$$

$$I_d = \frac{U'_b - U_f \cdot \cos\beta}{X'_d} \quad I_q = \frac{U_f \cdot \sin\beta}{X_q}$$

Jak již bylo uvedeno vnitřní výkon při zanedbání ztrát ve statoru

$$P_i = m \cdot U_f \cdot I_l \cdot \cos\varphi$$

Dosazením do (21.1) je

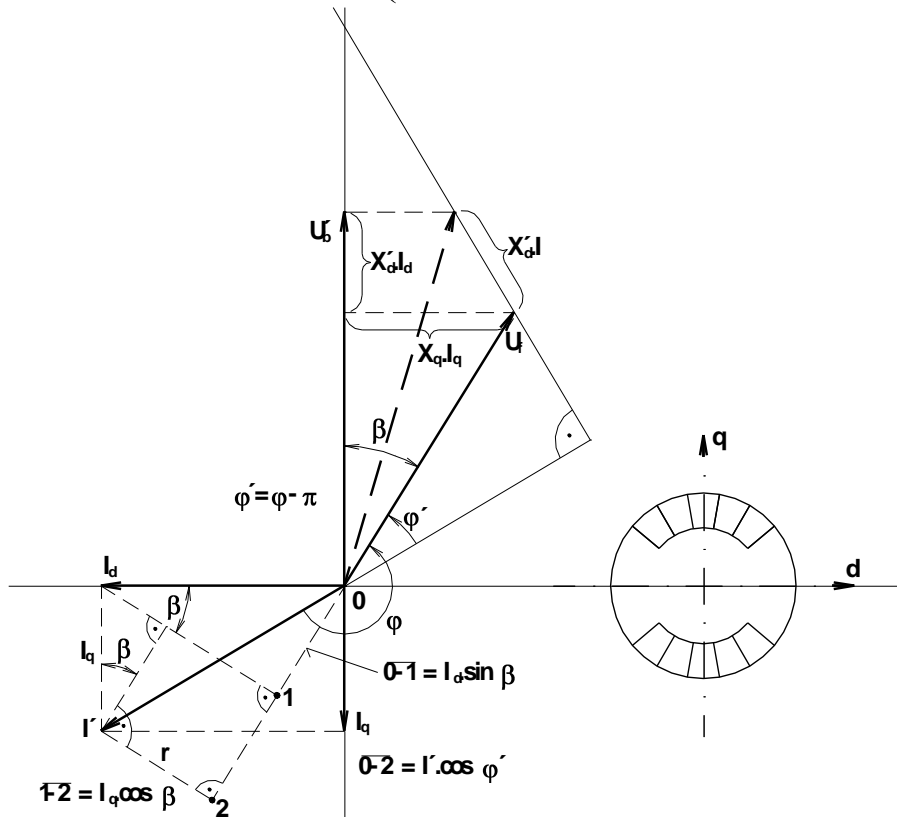
$$P_i = -m \cdot U_f \cdot \left(I_d \cdot \sin\beta + I_q \cdot \cos\beta \right)$$

a při použití výše uvedených výrazů

$$P_i = -m \cdot \left(\frac{U_f \cdot U'_b}{X'_d} \cdot \sin\beta + U^2 \cdot f \cdot \frac{X'_d - X_q}{2X'_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\beta \right) \quad (21.2)$$

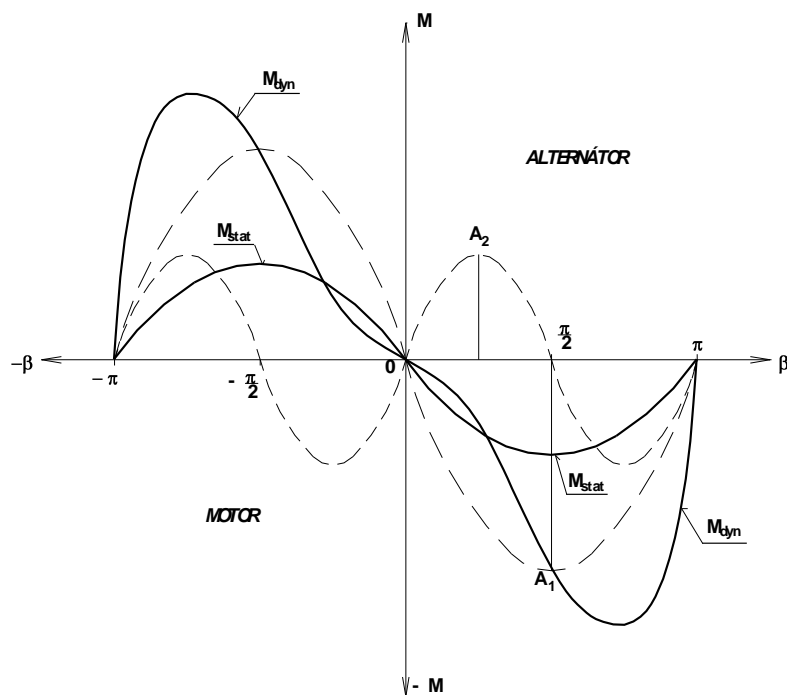
Přechodný moment je pak

$$M_{dyn} = \frac{P_i}{\omega} = \frac{P_i \cdot p}{2\pi \cdot f} = \frac{m \cdot p}{2\pi \cdot f} \cdot \left(\frac{U_f \cdot U'_b}{X'_d} \cdot \sin \beta + U^2 \cdot f \cdot \frac{X'_d - X_q}{2 \cdot X'_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\beta \right) \quad (21.3)$$



Obr. 21.1

Vlivem druhé harmonické se posunuje maximální hodnota přechodného momentu k úhlům $\beta > \pi/2$ (viz. obr. 21.2). U běžných strojů je $X_q > X'_d$ a proto druhý člen rovnice (21.3) má pak záporné znaménko. Dynamická výkonová a tedy i momentová rovnice se liší od rovnice pro ustálené stavy rozdílným znaménkem u členu s 2β a skutečností, že $X_q > X'_d$.



Obr. 21.2

Příklad:

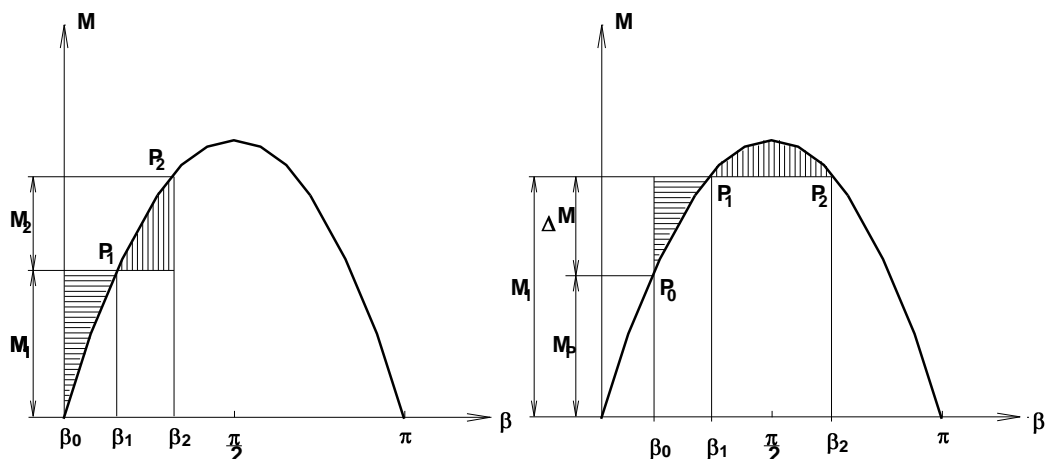
Elektrárna	Štěchovice	Slapy	Lipno	Prunéřov	Mělník
X_q	0,68	0,77	0,78	2,06	2,41
X'_d	0,31	0,292	0,22	0,21	0,3

Současná energetika je schopna provozovat alternátory, vybavené moderními regulačními obvody, jako jsou tyristorové buzení a regulátory se stabilizačními zpětnými vazbami, při ustáleném provozu daleko za mez teoretické statické stability. Mez teoretické statické stability je pak možno posunout až do oblasti tzv. umělé stability dané celkovým zátěžným úhlem 120 až 130° . Ještě markantněji je možno posunout překývnutí zátěžného úhlu v přechodných stavech, kdy tento úhel může přechodně dosáhnout 150 až 170° .

Dynamická přetížitelnost.

Každá náhlá změna zatížení synchronního stroje je spojena s jeho kýváním. Toto kývání může být jen tak velké, aby se stroj nedostal do labilního stavu a nevypadl ze synchronismu. Mějme např. synchronní motor při chodu naprázdno, který je náhle zatížen.

Nechť se zátěžný moment změní z M_0 na M_1 , kterému bude odpovídat úhel β_1 . V důsledku setrvačnosti rotoru a částí na něj připojených, nepřejde rotor na tento úhel okamžitě, ale postupně, až po několika kyvech okolo této hodnoty. Na obr. 21.3 je celá situace naznačena.



Obr.21.3

Při prvním výkyvu z β_0 na β_1 se pro urychlení rotoru vynaloží energie

$$W_1 = \int_{\beta_0}^{\beta_1} (M_1 - M_0) d\beta \quad (21.4)$$

Tato energie je na obr. 21.3 zobrazena vodorovným šrafováním. Tím se v rotoru nahromadí energie, která rotor urychluje. Od bodu P_1 by tato energie byla přebytečnou a tedy se vrací do sítě. Pochopitelně toto kývání bude tlumené. Pokud však první ráz je příliš velký může dojít i k vypadnutí stroje z chodu. Dá se dokázat, že provoz bude stabilní pokud bod P_2 bude ležet nad přímkou $M_1 = konst$. Přebytek momentu $M_2 - M_1$ je dostatečný na vrácení rotoru do polohy β_1 .

Jestliže však bod P_2 leží pod přímkou M_1 přebytek momentu $M_2 - M_1$ pohání rotor dále, až stroj vypadne ze synchronismu. Mez stability je určena rovností ploch, tedy energiemi W_1 a W_2 .

$$W_1 = W_2 = \int_{\beta_0}^{\beta_1} (M_1 - M_0) d\beta = \int_{\beta_1}^{\beta_2} (M_2 - M_1) d\beta \quad (21.5)$$

Toto kritérium nazýváme kritérium stejných ploch.

Jestliže byl motor před rázem již zatížen, momentový ráz pak musí být pro udržení stabilního chodu menší. Podmínkou zastavení nárůstu úhlu β na maximální hodnotu je platnost rovnice

$$\Delta W_1 = \Delta W_2 = 0$$

Tedy přírůstek energie, kterou byl rotor urychlován se musí rovnat zvětšení energie odevzdané strojem do sítě při brždění rotoru.

Otázky ke kap 6.15

1. Jak se mění zátěžný úhel stroje při změnách zatížení
2. Co je příčinou kývání synchronních strojů
3. Jaká je mez dynamické stability strojů

6.16 Budicí systémy synchronních strojů

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- vyjmenovat klasické a současné budicí systémy synchronních strojů
- zdůvodnit použití statických měničů v budících systémech

Výklad

Budicí systém je zařízení dodávající budící proud stroje, zahrnující všechny regulační a řídicí prvky, včetně zařízení pro odbuzení nebo potlačení buzení, včetně ochran.

Budicí vinutí bývá zpravidla umístěno na rotoru, musí být napájeno stejnosměrným proudem z řízeného zdroje tohoto proudu. Budicí soustavy mohou být nezávislé a závislé. O nezávislé budicí soustavě hovoříme tehdy, jestliže zdroj budicí energii není bezprostředně závislý na stavu sítě, ke které je připojen buzený synchronní stroj. Zdrojem je zde stejnosměrné dynamo - budič, umístěný obvykle na hřídeli buzeného stroje.

Závislá je budicí soustava tehdy, jestliže zdroj budicí energie je střídavá síť, ke které je buzený synchronní stroj připojen, případně i jiná síť a buzení je tedy závislé na stavu těchto sítí - za pochopitelného předpokladu usměrnění přiváděného proudu.

Podstatné je rozdělení na klasické a současné budicí systémy. Rychlá budicí soustava je taková jejíž odezva napětí $T_o < 0,1s$. Klasická má $1,5s$.

Budicí soustava synchronního stroje je tedy nejenom zdrojem budicího proudu v synchronním chodu, ale plní ještě další funkce, které jsou nutné pro správnou činnost stroje.

Budicí soustavy se liší

- typem zdroje budicího proudu
- způsobem přenosu budicího výkonu od zdroje k budicímu vinutí
- způsobem řízení velikosti budicího proudu

Kategorie budičů

Točivý budič je točivý stroj, který odebírá mechanickou energii z hřídele. Tento hřídel může být poháněn synchronním strojem nebo jiným strojem.

Stejnoseměrný budič je točivý budič používající pro dodávání stejnosměrného proudu komutátor a kartáče .

Střídavý budič je točivý budič používající pro dodávání stejnosměrného proudu usměrňovače. Usměrňovače mohou být řízené nebo neřízené.

Střídavý budič se statickými usměrňovači je střídavý budič s usměrňovači, jejichž výstup je připojen na kartáče sběracích kroužků budicího vinutí synchronního stroje.

Střídavý budič s rotačními usměrňovači (bezkartáčový budič) je střídavý budič s usměrňovacím můstkem, který se otáčí na společné hřídeli budiče a synchronního stroje, jehož výstup je připojen bez sběracích kroužků nebo kartáčů přímo na budící vinutí synchronního stroje (bezkartáčové buzení).

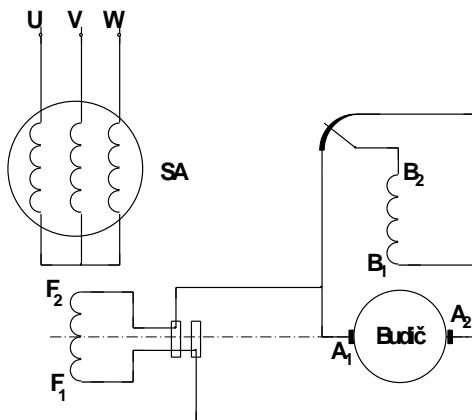
Statický budič je budič, který odebírá energii z jednoho nebo více statických zdrojů, používající pro dodávání stejnosměrného proudu statické usměrňovače (stroj je vybaven kroužky a sběrným ústrojím).

Klasické systémy

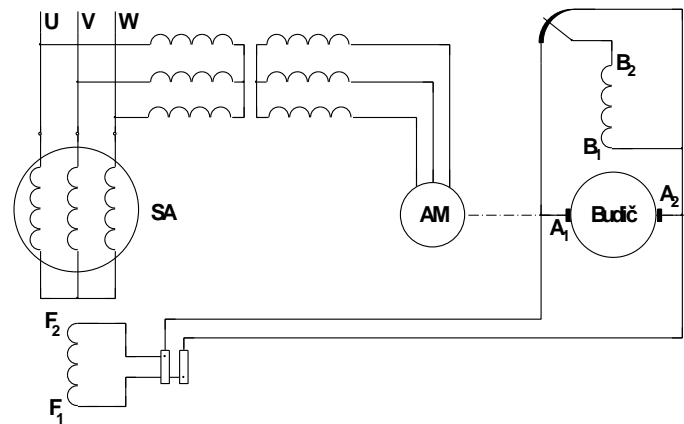
Do nedávné doby se pro buzení synchronních strojů používaly pouze stejnosměrné točivé budiče umístěné buď na hřídeli synchronního stroje, anebo byly součástí budicího soustrojí, střídavý motor - budič. Schéma zapojení budiče spojeného s hřídelí synchronního stroje je na obr. 22.1.

Výhodou tohoto způsobu je přívod mechanické energie přímo z rotoru buzeného stroje. Roztočením generátoru turbínou se budič i generátor postupně samy nabudí. Tím je

nezávislý na střídavé síti. Budič musí zajistit velký regulační rozsah budicího proudu synchronního stroje. Regulace musí být zajištěna až do 125% jmenovitého napětí plně zatíženého stroje. Dle ČSN 35 0200 musí budicí zdroj zajistit trvalou dodávku $1,1 U_{bn}$ - maximální napětí $1,5 U_{bn}$.



Obr. 22.1



Obr. 22.2

U pomaluběžných strojů vychází budič robustní a jeho výroba je neekonomická. Takovýto budič má také velké časové konstanty a tudíž pomalou odezvu, což je poměr velikosti budicího napětí za dobu 0,5s k budicímu napětí synchronního stroje při jeho jmenovitém zatížení.

Z uvedených důvodů je výhodnější rychloběžný budič poháněný asynchronním motorem. Asynchronní motor může být připojen ke stejné třífázové síti, do níž pracuje synchronní generátor. Příklad je na obr. 22.2.

Současné budicí systémy

Jestliže vlastní synchronní stroj doznal v průběhu let poměrně málo zásadních změn, prošly budicí soustavy rozsáhlým vývojem. K příčinám patří:

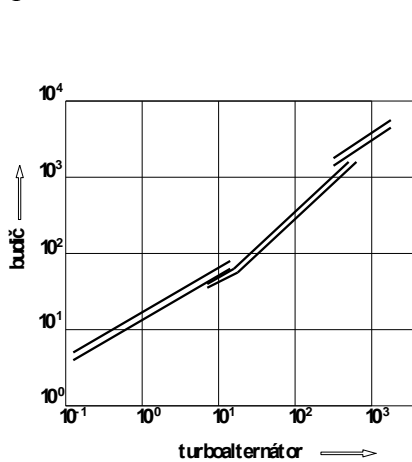
- rozvoj silové elektroniky a její aplikace v budicích soustavách
- rozvoj regulační techniky
- stroje s komutátorem se snažíme nepoužívat.
- zvětšování výkonů energetických sítí a tím zvýšení výkonu jednotek; v těchto případech již budicí příkon synchronního stroje (i přes 500 kW při 3000 ot/min) přesahuje mezní výkony stejnosměrných budičů. Výkony budičů v závislosti na výkonu turboalternátorů znázorňuje obr. 22.3.

Vývoj nových budicích systémů se ubírá několika směry:

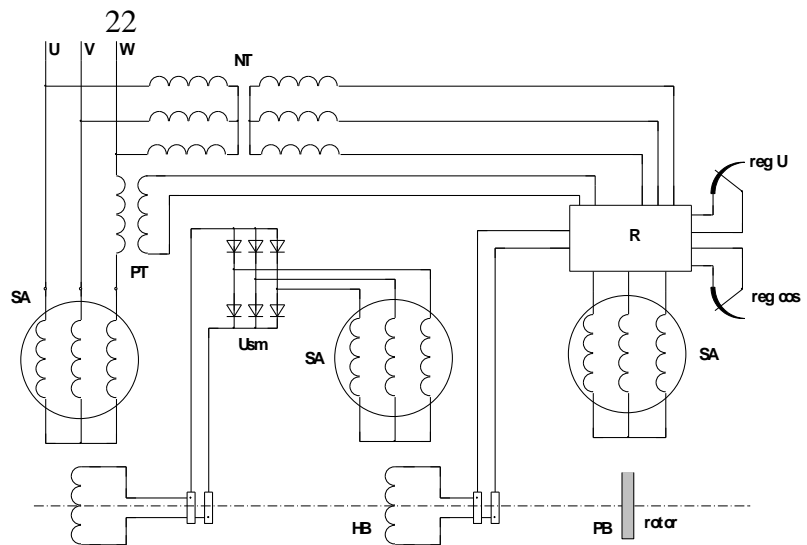
- budicí soustavy se statickými usměrňovači
- budicí soustavy s rotujícími usměrňovači
- buzení permanentními magnety.

V prvních dvou případech pak může jít buď o neřízený diodový nebo řízený tyristorový usměrňovač. Na obr. 22.4 je schéma buzení synchronního alternátoru SA s diodovým usměrňovačem U, s hlavním budičem HB, což je synchronní generátor a dále pomocným malým synchronním generátorem, jako pomocným budičem PB, který má buzení permanentními magnety na rotoru. U těchto soustav je možno také použít automatickou regulaci napětí či účinniku. V našem obrázku je naznačen regulátor R. Do tohoto regulátoru

vstupují informace o napětí generátoru z měniče *NT* a proudu generátoru *PT*. Tyto skutečné hodnoty se pak srovnávají s hodnotami žádanými - U a $\cos\varphi$ a regulační odchylka pak způsobí přibuzení či odbuzení hlavního budiče *HB*.

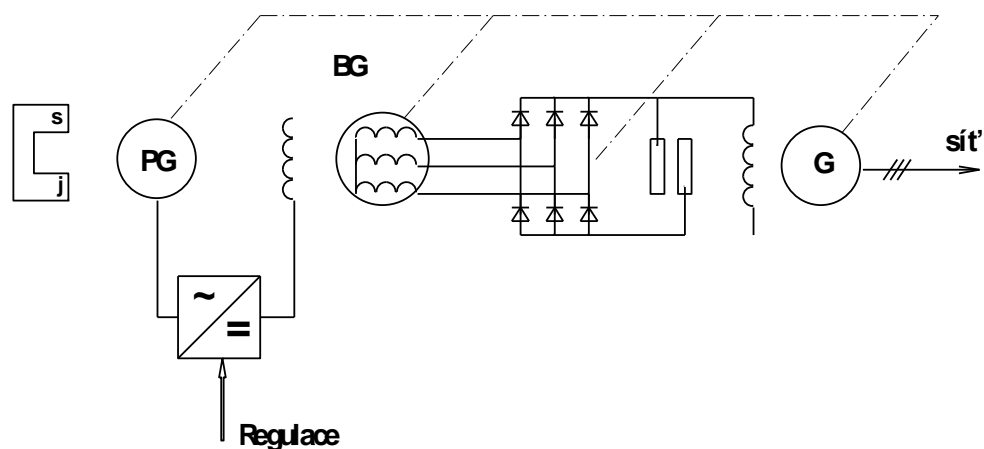


Obr. 22.3



Obr. 22.4

Budící systémy odebírající energii ze střídavé sítě je možno podstatně zdokonalit použitím řízených tyristorových usměrňovačů. Schematicky je to znázorněno na obr. 22.6. Budící proud je řízen tyristorovým měničem napájeným z transformátoru.



Obr. 22.5

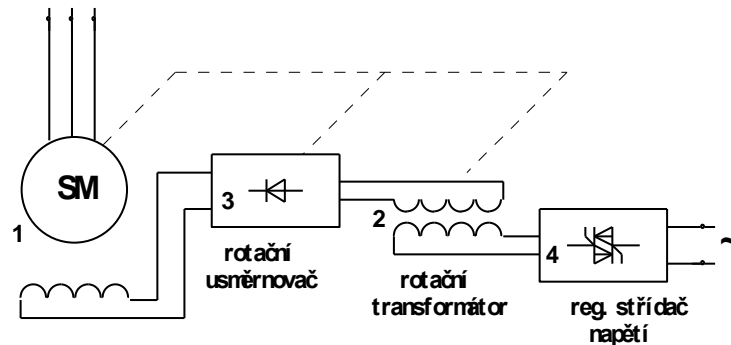
Na obr. 22.5 je znázorněn budící systém generátoru s pomocným (PG) a hlavním budičem (BG). Statorové vinutí je připojeno k diodovému usměrňovači, z něhož je napájeno budící vinutí přes kroužky. Oba budiče i diodový usměrňovač jsou na společné hřídeli s generátorem. Konstrukce rotoru je náročná na mechanické provedení s ohledem na vysoké namáhání odstředivými silami.

U výše popsaných systémů se budící proud převádí do budícího vinutí přes kartáče a kroužky. Aby se odstranil tento kluzný kontakt, použijí se budící soustavy, které mají usměrňovač umístěný přímo na rotoru.

Na obr. 22.6 střídavý synchronní stroj 1 pohání střídavý budič 2, který je v tomto případě rotační transformátor. Střídavý budící proud je usměrňován v neřízeném usměrňovači

3, který je umístěn na hřídeli střídavého budiče. Změna budičeho proudu synchronního stroje se děje řízením tyristorového měniče 4.

Snaha po zlepšení energetické účinnosti, zvláště u velkých generátorů nutí výrobce těchto strojů k dalšímu vývoji nových budičích systémů. Z tohoto pohledu je největší naděje vkládána do použití vysokoteplotních supravodičů pro budičí vinutí synchronních generátorů. Takový generátor by měl o 0,5 - 1,5 % vyšší účinnost, menší rozměry při stejném výkonu, až pětkrát menší reaktanci, atd.



Obr.22.6

Koncepce nového budičeho vinutí předpokládá, že toto vinutí z vysokoteplotního supravodivého materiálu (vysokoteplotní znamená, že nové supravodivé materiály jsou supravodivými při teplotách vyšších než 77K) bude schopno vytvořit mg. pole asi $2T$. Proudová hustota supravodivého drátu by měla dosahovat hodnot 10^5 A.cm^{-1} .

Synchronní motory pro regulační pohony do výkonu 50 - 100 kW se s výhodou navrhují se stálým buzením permanentními magnety zabudovanými v rotoru. Rotor prakticky nemá v ustáleném stavu ztráty, nevyžaduje chlazení, atd.

Otázky ke kap. 6. 16

1. Vysvětlete závislý a nezávislý budičí systém
2. Jaké jsou důvody použití statických měničů v budičích systémech
3. Jaký je výkon budičí soustavy ve srovnání s výkonem stroje

7. STEJNOSMĚRNÉ STROJE

7.1 Použití a popis

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Vysvětlit použití a vlastnosti stejnosměrných strojů
- Vyjmenovat základní části stejnosměrných strojů

Výklad

S rozvojem a modernizací výroby a vývojem nové techniky pohonů i elektrické trakce, vzrostl význam stejnosměrných strojů. To se týká zvláště stejnosměrných motorů, jelikož v posledních desetiletích jsou stejnosměrné generátory tj. dynamy zatlačována modernějšími zdroji stejnosměrného proudu jako jsou statické měniče. Stejnosměrné stroje jsou historicky nejstaršími elektrickými stroji.

Elektrický pohon se stejnosměrným motorem je zvláště rozšířen v dopravě a to jak v železniční tak i městské, dále pak u pohonů zařízení válcoven, dolů, v papírnách, u obráběcích strojů apod.

Důležité vlastnosti stejnosměrných strojů jsou: jednoduchá otáčková regulace (napětím kotvy a budícím proudem), velký krouticí moment při malých otáčkách a snadná přizpůsobivost zatěžovacích charakteristik poháněnému zařízení, poměrně velká výkonová i momentová přetížitelnost, atd.

Z výše uvedeného oboru použití stejnosměrných motorů vyplývá, že ve většině provozních použití se bude jednat o přerušovaný chod stroje, časté reverzace, velké proudové i napěťové změny, tedy o velmi náročné provozní podmínky. Návrh i konstrukce stejnosměrného stroje musí pak být pro tyto náročné podmínky přizpůsoben.

Mnoho stejnosměrných strojů malých výkonů se používá v regulační technice. Jsou to zvláště tachodynamy u nichž se vyžaduje malé zvlnění napětí a také ještě různé rotační zesilovače. Mnoho malých stejnosměrných strojů se rovněž používá v automobilech, domácích spotřebičích, hračkách apod.

Stejnosměrné stroje se vyrábějí ve výkonových řadách od několika wattů asi do 7 MW, při napětí maximálně 1200 V. Těchto výkonů je však možno dosáhnout pouze při nízkých otáčkách 100-180 min⁻¹.

K základním částem stejnosměrného stroje patří:

- pevná část stroje tj. stator
- otáčivá část – rotor
- kostra a štíty a ostatní pasivní části mající pouze mechanický a konstrukční účel.

Důležité jsou aktivní části stroje mezi něž patří jho, hlavní a pomocné póly s vinutími, kotva s vinutím, komutátor a sběrací ústrojí s kartáči. K elektricky vodivým částem stroje patří všechna vinutí, komutátor, sběrací ústrojí s kartáči, svorkovnice a přívody. Za přední část stroje se považuje strana s komutátorem a zadní strana je na straně pohonu. U strojů se dvěma konci hřídelí to může být i jinak.

Jho stroje je ta část, kterou se uzavírá magnetický tok, jinak jej také nazýváme magnetický obvod stroje. Jho bývá u starších strojů z lité oceli u novějších pak složeno z dynamových plechů, tedy lištěné.

Hlavní póly jsou umístěny na statoru a vedou magnetický tok. U vzduchové mezery jsou rozšířeny pólovými nástavci. Jsou lištěné a na jádru pólů jsou nasazeny cívky budícího vinutí. V pólových nástavcích bývá umístěno kompenzační vinutí. Hlavní póly umístěné po obvodu stroje mají střídavou polaritu. Jejich počet je pochopitelně vždy sudý. Vzdálenost dvou sousedních pólů, měřena po obvodě kotvy je pólová rozteč t_p . Buzení stroje může být i permanentními magnety.

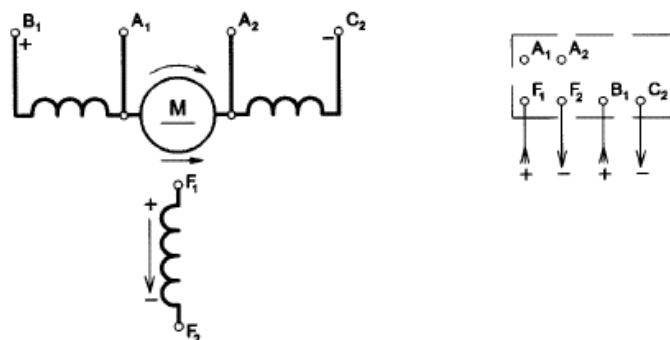
Pomocné póly jsou opět umístěny na statoru vždy mezi hlavními póly a slouží ke zlepšení komutace. Proto se jim také někdy říká komutační póly. Je na nich nasazeno vinutí, kterým protéká proud kotvy.

Kotva je otáčející se drážkovaná část stroje složená z elektrotechnických dynamoplechů. V drážkách je uloženo stejnosměrné vinutí, které je připojeno ke komutátoru. Ke kotvě patří rovněž vyrovnávací (ekvipotenciální) spojky.

Komutátor je těleso složené z měděných lamel, vzájemně izolovaných většinou mikanitem. Je mechanicky upevněn na hřídeli.

Sběrné ústrojí se skládá z kartáčů, držáků kartáčů, roubíků a svěrek. Kartáče jsou v současné době většinou elektrografitové, pouze ve speciálních případech grafitové, kovografitové apod. Společně s povrchem komutátoru vytvářejí kluzný kontakt. Kartáče jsou umístěny v držácích kartáčů, které je jednak mechanicky vedou a vytvářejí přitlačnou sílu na kartáč. Svěrky a roubíky pak slouží k upevnění držáků a zajišťují rovněž převod proudu od kartáčů k vývodům z vinutí kotvy. Roubíky jsou izolovaně uloženy v tzv. brýlích, které jsou otočně uloženy v předním štítu, aby bylo možno posunovat svěrným ústrojím při nastavování kartáčů do neutrální polohy. Zajištění ve správné poloze je pak pomocí šroubů. Po obvodu stroje se střídají kladné a záporné řady kartáčů. Všechny kladné řady jsou propojeny a vyvedeny na kladnou svorku na svorkovnici a podobně všechny záporné řady kartáčů.

Tímto jsme se dostali k další části stroje a to je svorkovnice – obr. 7.1.



Obr. 7.1

Otázky ke kap. 7. 1

1. Proč byly stejnosměrné stroje v minulosti hojně rozšířeny
2. Vyjmenujte základní části stejnosměrných strojů
3. Mezní výkony a napětí stejnosměrných strojů

7.2 Princip činnosti stejnosměrného stroje

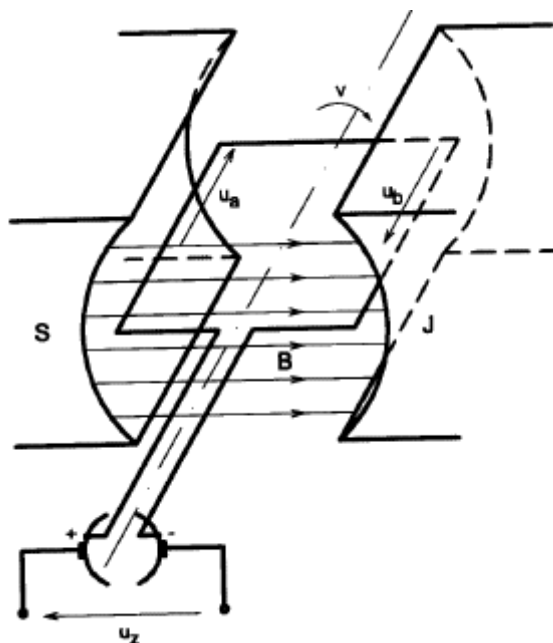
Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Popsat princip činnosti stejnosměrného stroje
- Vysvětlit rozdíl mezi dynamem a motorem

Výklad

U motoru je působení stroje založeno na elektrodynamickém účinku mezi proudy ve vodičích kotvy a magnetickým polem hlavních pólů, u dynama na elektromagnetické indukci. Týž stroj může pracovat jako motor nebo jako dynamo. Působení si znázorníme na generátoru, u něhož pro jednoduchost uvažujeme, že má pouze jeden závit. Magnetické pole s indukcí B – obr. 7.2 , se vytvoří buď permanentními magnety nebo budícím vinutím hlavních pólů.



Obr. 7.2

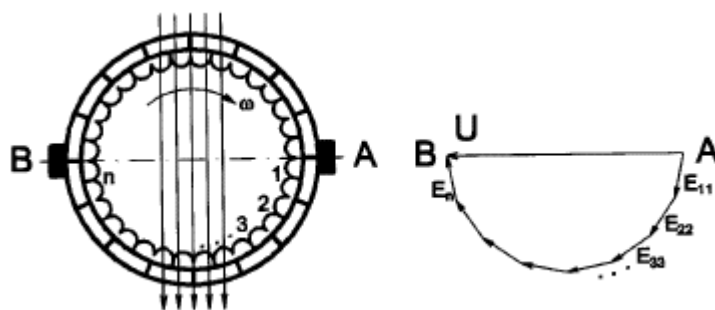
Otáčí-li se závit umístěný na rotoru rovnoměrnou rychlostí mezi dvěma póly, indukují se v něm střídavé elektromotorické napětí. Připojíme-li konce závitu ke dvěma lamelám – v našem případě ke dvěma půlkruhům, na něž jsou přiloženy nepohyblivé kartáče, pak na

jeden kartáč je trvale připojován vodič nacházející se pod severním pólem a na druhý vodič z pod jižního pólu.

V každém vodiči (a i b) uvažovaného závitu se indukuje napětí opačné polarity u_a, u_b . Protože jsou oba vodiče spojeny do série, je výsledné indukované napětí jednoho závitu u_z dáno aritmetickým součtem obou napětí. Ve vinutí kotvy se tedy indukuje střídavý proud a komutátor jej usměrňuje. Na kartáčích bude tedy stejnosměrné pulzující napětí. Jestliže se vinutí kotvy bude skládat z mnoha cívek zapojených v sérii – připojených na stejný počet lamel kolik je cívek, dostáváme napětí prakticky nezvlněné. Časový průběh indukovaného napětí v cívce je, jak jsme uvedli, sinusový při rovnoměrném otáčení. Je-li cívka v poloze kolmé na směr indukčních čar, je magnetický tok $\frac{d\phi}{dt} = 0$ a $u_i = 0$. Zároveň dochází ke komutaci tj. cívka se zařadí do obvodu s opačnou polaritou. V poloze rovnoběžné s indukčními čarami je u_i maximální.

U motoru je činnost poněkud odlišná, neboť k jeho svorkám přivádíme stejnosměrný proud. Proud prochází vodiči kotvy, které jsou v magnetickém poli a působením elektrodynamického účinku se motor otáčí. Směr otáčení se určí pravidlem levé ruky. Aby se však kotva mohla plynule otáčet původním směrem, musí se měnit smysl proudu ve vodičích po přechodu od jednoho pólu k druhému. Tuto změnu proudu ve vodičích rotorového vinutí obstarává komutátor. Při jednom závitu by tažná síla pulzovala a proto je nutný velký počet závitů. Navíc zjednodušení stejnosměrného motoru na 1 závit usnadňuje sice výklad, ale vylučuje se jeho použití neboť moment motoru v době komutace je 0 a napájecí zdroj by byl zkratován. Uvedený nedostatek se odstraní tím, že je na rotoru více cívek a komutuje jen malý počet cívek a “v záběru” je větší počet cívek.

Uvedli jsme, že komutátor pracuje jako mechanický měnič kmitočtu. Komutátor umístěný v obvodu rotoru mění při otáčení kmitočet napájecího proudu (třeba $f = 0$) automaticky tj. bez dalších řídicích členů. Každá lamela komutátoru je připojena k jednomu závitu nebo cívce vícefázového kotevního vinutí, spojeného do mnohoúhelníku viz obr. 7.3.



Obr 7.3

Na komutátor dosedají kartáče, které zprostředkovávají spojení vinutí s vnějším obvodem.

Jestliže magnetické pole statoru stojí, v závitech rotorového vinutí se indukuje střídavé napětí o

$$f_2 = \frac{p \cdot n_2}{60} \quad (7.1)$$

Mezi kartáči A a B je napětí rovno součtu okamžitých hodnot $E_1, E_2 \dots E_n$, neboť všechny závity jsou spojeny v sérii. Tento součet se v čase nemění. Při otáčení rotoru se napětí závitů $E_1, E_2 \dots$ o f_2 mění na napětí U o $f_2 = 0$. Toto napětí je mezi kartáči, které stojí.

Otázky ke kap. 7.2

1. Jak funguje komutátor u dynama
2. Jakou funkci plní komutátor u motoru
3. K čemu slouží kartáče
4. Jaké napětí se indukuje v rotoru

7.3 Indukované napětí a moment stejnosměrného stroje

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Napsat vztah pro indukované napětí stejnosměrného stroje
- Uvést velikost svorkového napětí u dynama a u motoru
- Stanovit moment stejnosměrného motoru

Výklad

V aktivních vodičích kotevního vinutí je indukováno napětí, jehož okamžitá hodnota je dána vztahem

$$u = B_\delta \cdot l_z \cdot v \quad (7.2)$$

kde B_δ je magnetická indukce ve vzduchové mezeře
 v je rychlost otáčení vodiče
 l_z aktivní délka vodiče rovná délce aktivního železa.

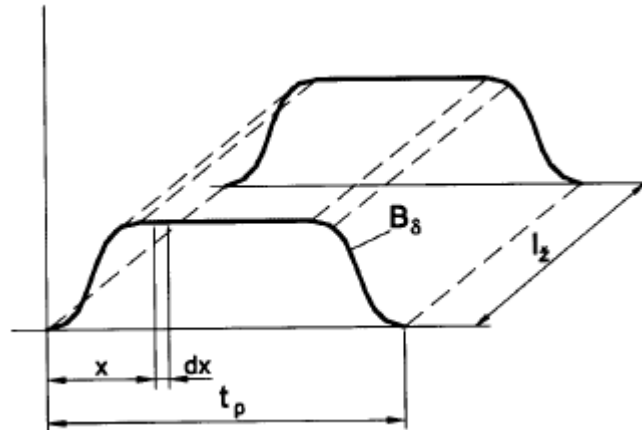
Celkový počet vodičů kotevního vinutí je N_v a ty jsou rovnoměrně rozděleny do $2a$ paralelních větví. Polovina vodičů každé paralelní větve jsou přední a druhá polovina zadní cívkové strany. V jedné paralelní větvi je tedy $N/4a$ předních cívkových stran a stejný počet zadních cívkových stran. Má-li vinutí plný cívkový krok, je výsledné napětí dáno součtem napětí indukujícího se v přední a zadní cívkové straně.

Předpokládejme, že je vinutí kotvy plynule rozloženo po obvodě kotvy (jak bude ukázáno později, protože jsou vodiče uloženy v drážkách a musíme uvažovat také pólové krytí, je tento předpoklad pouze teoretický). Je-li t_p délka jedné pólové rozteče, pak počet všech vodičů

připadajících na jednotku délky bude $N_v/2at_p$. Střední hodnota indukovaného napětí v kotvě pak bude

$$U_{stř} = \frac{N_v}{2at_p} \int_{x=0}^{t_p} u dx = \frac{N_v}{2at_p} v \int_0^{t_p} B_{\delta} l_z dx \quad (7.3)$$

viz obr. 7.4.



Obr. 7.4

Označme si magnetický tok jednoho pólu vstupujícího do kotvy $\phi_o = \int_0^{t_p} B_{\delta} \cdot l_z \cdot dx$.

Za obvodovou rychlost můžeme dosadit $v = 2pt_p n$ kde n jsou otáčky [s^{-1}].

Pak

$$U_i = \frac{N_v}{2at_p} 2pt_p n \phi_o = N_v n \frac{p}{a} \phi_o \quad (7.4)$$

Jiné vyjádření

$\phi_o = \int_0^{t_p} B_{\delta} \cdot l_z \cdot dx$ můžeme převést na obdélníkový $\phi_o = B_{\delta} \cdot l_z \cdot t_p$ a $B_{\delta} = \frac{\phi_o}{l_z t_p} = \frac{\phi_o 2p}{l_z \pi D}$ a

dosadíme $v = \omega_m \frac{D}{2}$ pak

$$U_i = \frac{\phi_o 2p}{l_z \pi D} \cdot l_z \cdot \omega_m \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{N_v}{2a} = \frac{p N_v}{2a \pi} \cdot \phi_o \cdot \omega_m = k \cdot \phi_o \cdot \omega_m \quad (7.5)$$

$$k = \frac{p N_v}{2a \pi} \quad (7.6)$$

Jak jsme uvedli nejsou vodiče po povrchu kotvy rozloženy spojitě, ale jsou uloženy v drážkách. Při otáčení kotvy se mění poloha drážek vzhledem k magnetickému poli ve vzduchové mezeře a tím se mění i velikost indukovaného elektromotorického napětí. Perioda součtového elektromotorického napětí je dána drážkovou roztečí. Jestliže se kotva pootočí o jednu drážkovou rozteč, „u“ cívkových stran vystoupí z uvažované paralelní větve, ale na druhé straně do ní jiných „u“ stran vstoupí, takže situace se nezmění, indukované napětí však má určité zvlnění .

Napěťové rovnice jsou:

$$\text{pro dynamo } U_i = U + RI_a \quad (7.7)$$

$$\text{pro motor } U = U_i + RI_a \quad (7.8)$$

kde U je svorkové napětí stroje
 R je odpor celého kotevního obvodu
 I_a proud kotvy.

Střídavé napětí indukované v cívce má dobu kmitu T . U dvoupólového stroje odpovídá úhlu 360° tj. jedné otáčky rotoru a je rovna převrácené hodnotě otáček za sekundu $1/n$. U strojů s p pólovými dvojicemi dojde během 1 otáčky k „ p “ kmitům střídavého napětí. Jde vlastně o frekvenci $f = \frac{1}{T} = p \cdot n$.

$$(7.9)$$

Stejnosemné stroje se obvykle vyrábějí jako vícepólové, alespoň $2p = 4$. Tyto stroje jsou lépe využity.

Tažná síla a točivý moment stejnosměrného stroje

Vyjděme z obecného vztahu pro sílu F působící na vodič, jímž protéká proud i , v homogenním magnetickém poli s magnetickou indukcí B jež je kolmá na směr vodiče. Velikost této síly je

$$F = B \cdot l \cdot i \quad (7.10)$$

kde l je délka vodiče rovna délce aktivní strany cívky.

Kartáče přiložené na komutátor dělí trvale vinutí stejnosměrného stroje na $2a$ paralelních větví. Každým vodičem tedy protéká proud

$$i = \frac{I}{2a} \quad (7.11)$$

a celkový počet vodičů je N_v .

Střední hodnotu magnetické indukce vypočítáme ze vztahu

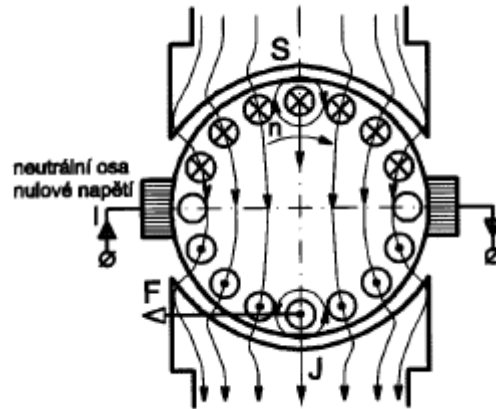
$$B_{stř} = \frac{\phi_0}{l_e \cdot t_p} \quad (7.12)$$

Pro působíště síly je důležitý vnější obvod kotvy, tedy tato síla působí na poloměru $D/2$ – obr. 7.5. Pólovou rozteč t_p si vyjádříme pomocí tohoto průměru, tedy

$$t_p = \frac{\pi D}{2p}$$

Točivý moment pak bude

$$M = F \cdot \frac{D}{2} \cdot N_v = \frac{\phi_0 \cdot 2p}{l_e \cdot \pi \cdot D} \cdot l_e \cdot \frac{I}{2a} \cdot N_v \cdot \frac{D}{2} = \frac{1}{2\pi} \cdot N_v \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi_0 \cdot I = k \cdot \phi \cdot I \quad (7.13)$$



Obr. 7.5

Otázky ke kap. 7.3

1. Z jakého vztahu vycházíme při odvození indukovaného napětí stejnosměrného stroje
2. Kterými parametry můžeme měnit napětí u dynama
3. Na čem je závislé svorkové napětí u motoru
4. Uveďte vztah pro moment stejnosměrného motoru

7.4 Magnetický obvod stejnosměrného stroje

Čas

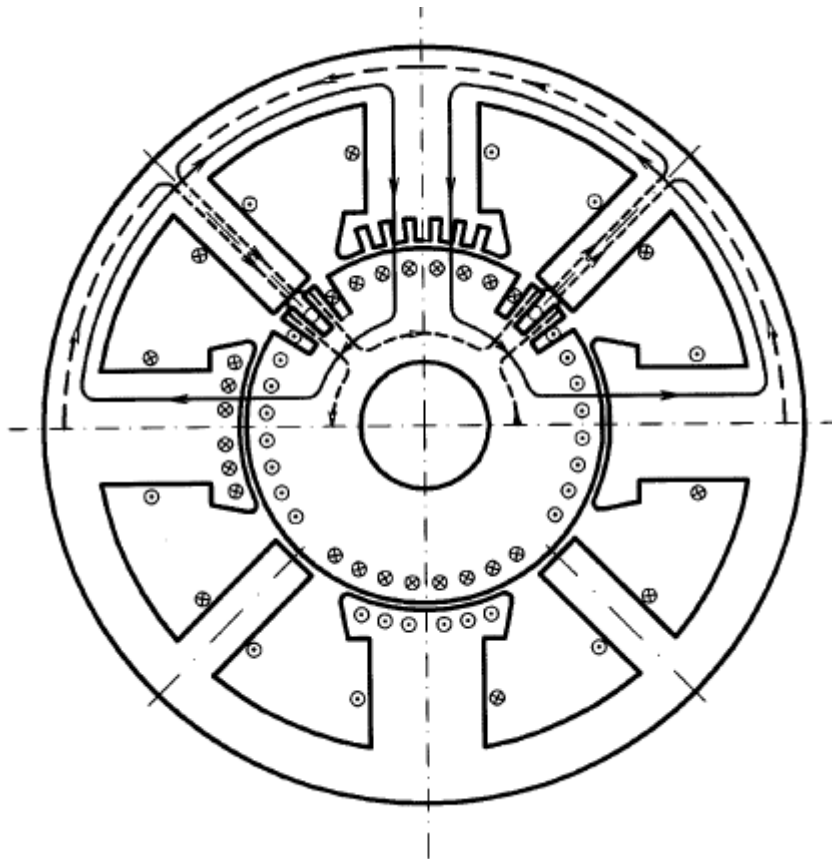
Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Popsat mg. obvod stejnosměrného stroje
- Určit charakteristiku naprázdno

Výklad

Magnetický obvod stejnosměrného stroje má tytéž části jako magnetický obvod synchronního stroje. Rozdíl je pouze v tom, že u stejnosměrných strojů je kotva na rotoru a magnety na statoru. Magnetomotorické napětí se určí stejně jako u ostatních druhů strojů ze součtu magnetických napětí potřebných k protlačení magnetického toku přes jednotlivé úseky obvodu jedné pólové dvojice. Průběh střední indukční čáry je na obr. 7.6.. Z něj je rovněž patrné rozdělení na uvedené úseky. Jsou to:

- hlavní pól
- vzduchová mezera
- zuby kotvy
- jho kotvy
- drážkovaná část hlavního pólu (pólového nástavce)
- statorové jho.



Obr. 7.6

Hlavní magnetický tok ϕ_0 je aktivní tok, který prochází celým uvedeným magnetickým obvodem. Rozptylový tok ϕ_τ nevstupuje vůbec do kotvy a tedy neindukuje ve vinutí kotvy žádné napětí.

Výsledný tok je součtem obou toků tedy ϕ_0 a ϕ_τ a jde jen jhem statoru a částečně také hlavním pólem i jeho drážkovanou částí. Vzduchovou mezerou, přes zuby kotvy a jhem kotvy prochází pouze hlavní tok.

Rozptylový tok je buzený vinutím hlavního pólu. Vychází z boků hlavních pólů a pólových nástavců a uzavírá se jak přes pomocné póly, tak přes kostru. Stroje s pomocnými póly mají relativně větší rozptyl.

Pro magnetický obvod se počítá a sestavuje magnetizační charakteristika. Magnetický tok ϕ_0 je určen dříve uvedenou rovnicí pro indukované napětí. Postupujeme tak, že vypočítáme několik bodů – zpravidla 3 až 4 pro 0,75; 1; 1,2 a 1,3 U_i . K výpočtu již potřebujeme veškeré další údaje o stroji.

Princip výpočtu magnetického obvodu vychází z první Maxwellovy rovnice

$$\oint H dl = N \cdot I_b = \int_a^b H_\delta dl + \int_b^c H_{pn} dl + \int_c^d H_{zk} dl + \int_d^e H_{jk} dl + \int_e^f H_{hp} dl + \int_f^g H_{js} dl \quad (7.14)$$

kde N je počet závitů v budící cívce magnetického pole
 I_b je budící proud.

Jak jsme uvedli celý magnetický obvod jsme si rozdělili na 6 úseků, v nichž lze velikost intenzity magnetického pole považovat za konstantní. Tím se uvedený integrál změní na

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^n F_k = N \cdot I_b \quad (7.15)$$

kde H_k je velikost intenzity pole k-tého úseku
 F_k magnetické napětí potřebné pro tento k-tý úsek
 l_k délka indukční čáry k-tého úseku – bere se střední délka.

Z obr. 7.6 je patrné, že v ose hlavních pólů působí pouze magnetické napětí budícího vinutí, kdežto magnetické napětí všech ostatních vinutí tj. kotvy, pomocných pólů a kompenzace mohou působit jen v příčné ose, tj. v ose pomocných pólů. Při chodu naprázdno je však jejich magnetické napětí nulové.

Pokládáme-li magnetickou indukci B_k v každém úseku za konstantní pak při konstantním průřezu S_k bude i tok ϕ_{ok} konstantní a lze psát

$$\phi_{ok} = B_k \cdot S_k \quad (7.16)$$

u průřezu magnetického obvodu je nutno respektovat činitel plnění železa.

Charakteristika naprázdno

Chodem naprázdno rozumíme, stejně jako u jiných strojů, chod bez zatížení tj. kotevní proud by měl být nulový. V chodu naprázdno tedy nejsou činné ani jiné úbytky napětí a svorkové napětí stroje tj. napětí naprázdno považujeme za rovné indukovanému napětí.

$$U_0 = U_i = N_v n \frac{P}{a} \phi_0 \quad (7.17)$$

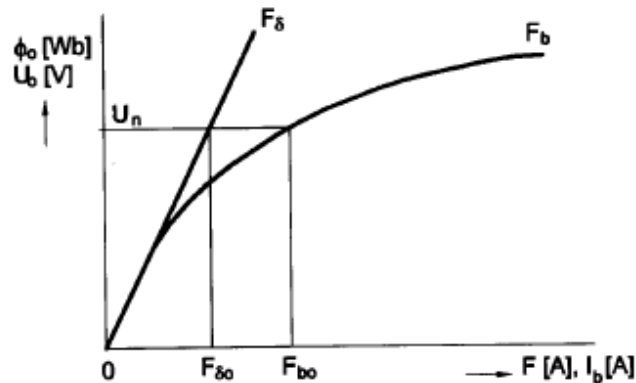
Při konstantních otáčkách n bude napětí stroje závislé pouze na magnetickém toku, protože ostatní veličiny jsou pro daný stroj konstanty.

Jak jsme si uvedli závisí magnetický tok ϕ_0 na magnetickém napětí hlavního pólu F_h . Tuto závislost $\phi = f(F_b)$ nazýváme magnetizační charakteristikou. Protože

$$F_b = I_b N_b \quad (7.18)$$

a také proto, že počet závitů budících cívek je pro daný stroj konstantní, můžeme vynést stejnou závislost mezi napětím naprázdno a budícím proudem tedy $U_0 = f(F_b)$ a tuto závislost nazýváme charakteristikou naprázdno při konstantních otáčkách stroje.

Jestliže magnetizační charakteristiku získáme výpočtem uvedeným v předcházející kapitole pro několik bodů (4 ÷ 5), pak charakteristiku naprázdno a její průběh snadno změříme. Charakteristika naprázdno a tedy i magnetizační je nakreslena na obr. 7.7.

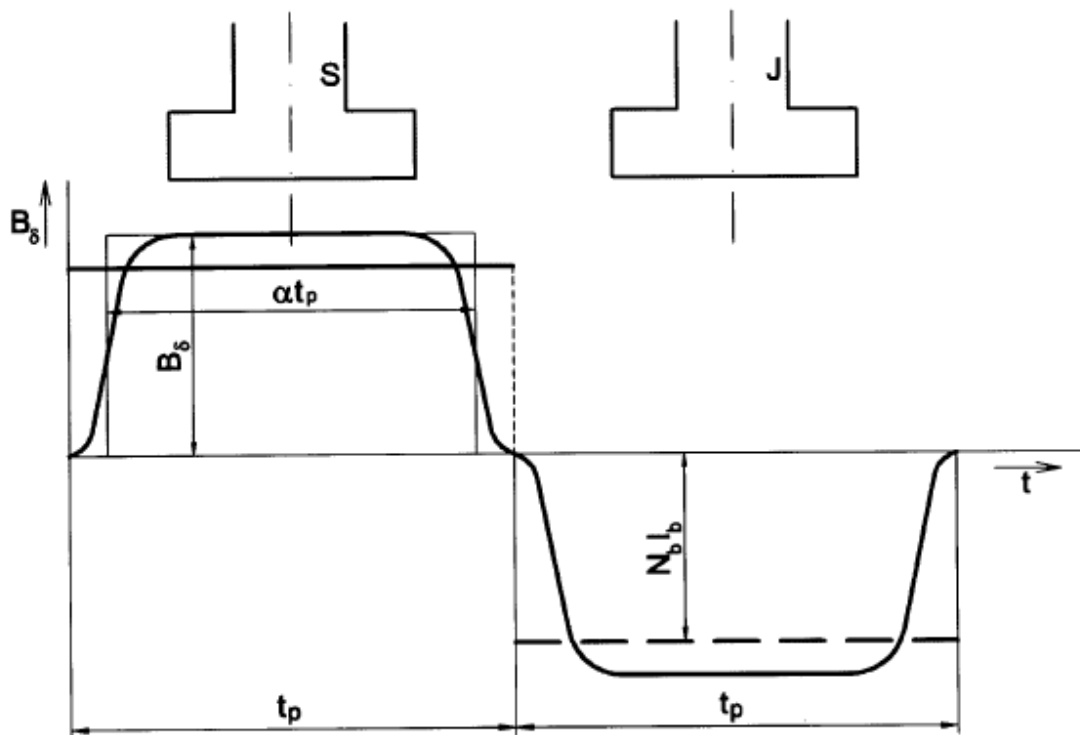


Obr. 7.7

Na obr. 7.8 je nakresleno prostorové rozložení magnetického pole hlavních pólů ve vzduchové mezeře při chodu naprázdno. Průběh je zhruba lichoběžníkový se zaoblenými konci. Plocha je úměrná magnetickému toku jednoho hlavního pólu jdoucího z tohoto pólu přes vzduchovou mezeru do kotvy. Tento průběh B_δ vyplývá ze vztahu

$$N_b \cdot I_b = H_\delta \cdot \delta \cdot k_c = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta \cdot k_c \quad (7.19)$$

$$B_\delta = \frac{N_b \cdot I_b \cdot \mu_0}{\delta \cdot k_c} \quad (7.20)$$



Obr. 7.8

Otázky ke kap. 7.4

1. Vyjmenujte části mg. obvodu stejnosměrného stroje
2. Jak změříte charakteristiku naprázdno
3. Napište vztah pro budící mg. napětí

7.5 Reakce kotvy

Čas

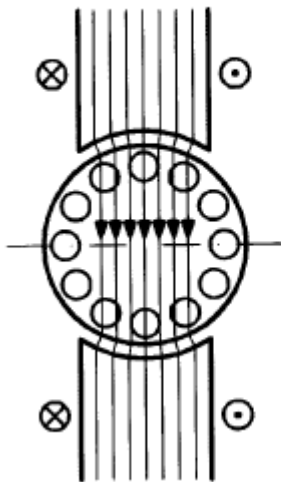
Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- popsat stejnosměrný stroj při zatížení
- určit negativní důsledky reakce kotvy na činnost stroje
- vysvětlit účel kompenzačního vinutí

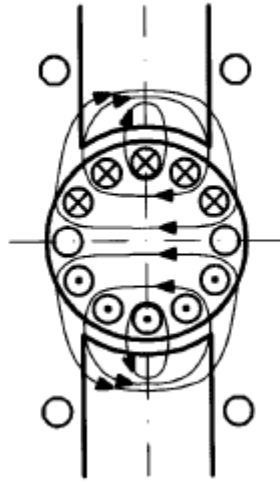
Výklad

Při zatížení protéká vinutím kotvy proud, který vytváří vlastní magnetické pole. Toto pole se nazývá polem reakce kotvy. Magnetické poměry ve stroji si znázorníme na jednoduchém dvoupólovém stroji. Na obr. 7.9 je stroj při chodu naprázdno, kdy má jen magnetické pole buzené proudem hlavních pólů. Pole hlavních pólů má směr svislý, shora dolů. Na obr. 7.10 je znázorněno pole reakce kotvy, tj. za předpokladu, že kotvou protéká proud a hlavní póly nejsou buzeny. Pole reakce kotvy je kolmé na osu hlavních pólů, má směr

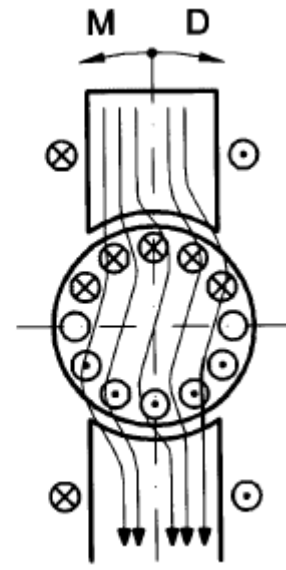
vodorovný a při naznačené polaritě proudu v kotvě probíhá zprava nalevo. Jeho osa je v ose kotvy. Indukční čáry reakčního pole probíhají napříč kotvou a uzavírají se přes vzduchovou mezeru a pólové nástavce, případně přes pomocné póly. Ve skutečnosti existuje ve stroji pouze jediné pole složené z obou polí obr. 711.



Obr. 7.9



Obr. 7.10



Obr. 7.11

Výsledné pole je deformováno a to u dynamu ve směru otáčení kotvy a u motoru proti směru otáčení (to vyplývá z obr. 7.11 uvědomíme-li si, že mg. pole je ve stavu mechanického napětí a snaží se zkrátit délku indukčních čar). Uvedený výklad je pochopitelně zjednodušený.

Kompenzační vinutí

Reakci kotvy se snažíme vykompenzovat kompenzačním vinutím. Protože toto vinutí má kompenzovat pole reakce kotvy musí jím procházet proud opačným směrem než v kotvě. Aby bylo dosaženo dokonalé kompenzace musí být magnetické napětí vinutí kotvy kompenzačního vinutí vzájemně sladěno. Při dokonalém sladění pole kompenzačního vinutí působí proti poli reakce kotvy a toto pole vyruší.

Kompenzační vinutí je omezeno pouze na pólové nástavce hlavních pólů. Tedy pouze v tomto prostoru je kompenzována reakce kotvy. Magnetické napětí reakce kotvy však existuje i v prostoru mezi hlavními póly. Tuto nevykompenzovanou část magnetického napětí kotvy nazýváme zbytkem reakce kotvy.

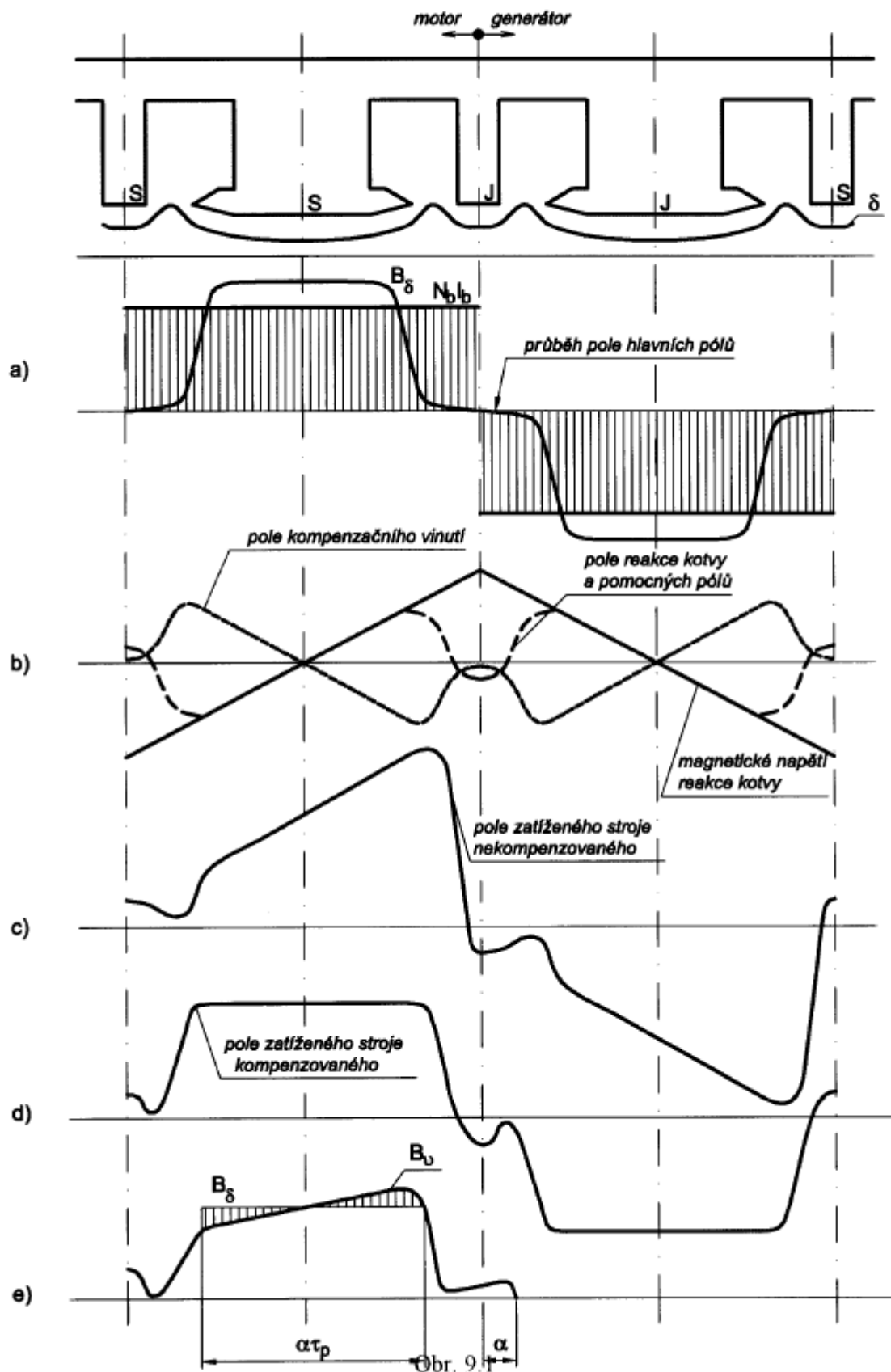
Tvar reakčního a výsledného magnetického pole s dostatečně dobrou přesností je zřejmý z obr. 7.12. Průběh je nakreslen jakoby v rozvinuté poloze stroje. Na obr. 7.12a je průběh pouze hlavního pole a indukce ve vzduchové mezeře B_δ . Na obr. 7.12b je plnou čarou vyznačen průběh reakce kotvy včetně pomocných pólů a čárkovaně průběh pole kompenzačního vinutí. Tečkovaný je průběh pole u stroje bez pomocných pólů. Na obr. 7.12c je pak výsledný průběh zatíženého nekompenzovaného stroje a průběh kompenzovaného pole je na obr. 7.12d.

Jak jsme uvedli kompenzační vinutí kompenzuje pole reakce kotvy, což obrazně řečeno znamená, že na obr. b plná a čárkovaná křivka musí mít, s výjimkou oblasti pod pomocnými póly, stejně velké pořadnice opačného znaménka. V tomto případě mluvíme o 100% kompenzaci. Není-li toto splněno může dojít k podkompenzování či překompenzování stroje.

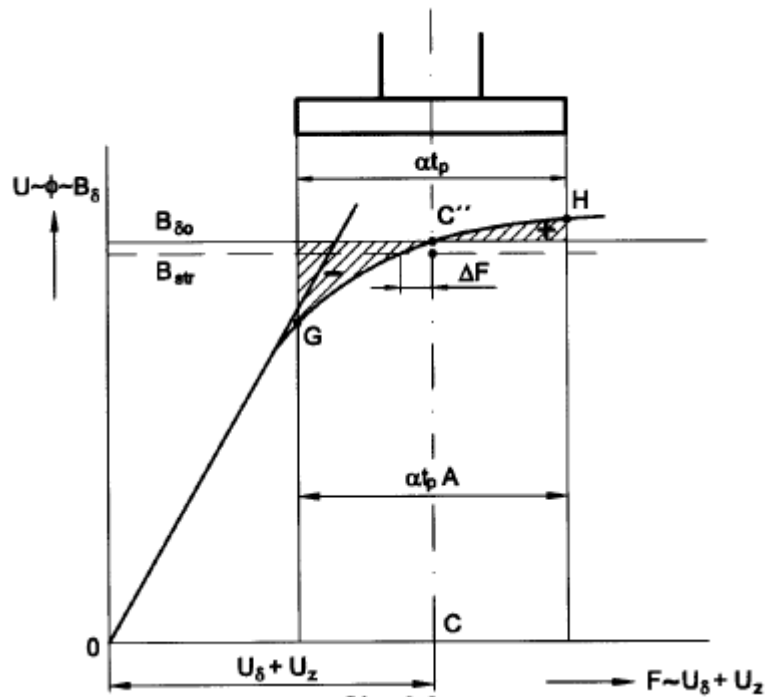
Vzniklé magnetické napětí protlačuje nastavci hlavních pólů a obvodem pomocných pólů tok reakce kotvy, který se v jedné polovině hlavního pólu sčítá s tokem hlavního pólu a v druhé polovině odečítá. V důsledku nelineární magnetizační charakteristiky železa zubů rotoru je přírůstek toku + (obr. 7.12e) menší než úbytek. Při zatížení dojde vlivem reakce ke zmenšení toku. Pokles toku vyvolá zmenšení momentu, nárůst otáček, což vše vede k nestabilitě motoru a u dynama ke snížení svorkového napětí.

Názornější představu si ještě učiníme z obr. 7.13. Zde je patrné, že demagnetizační účinek reakce kotvy se může vyrovnat zesílením buzení. Grafické určení velikosti přibuzení ΔF je patrné z obrázku.

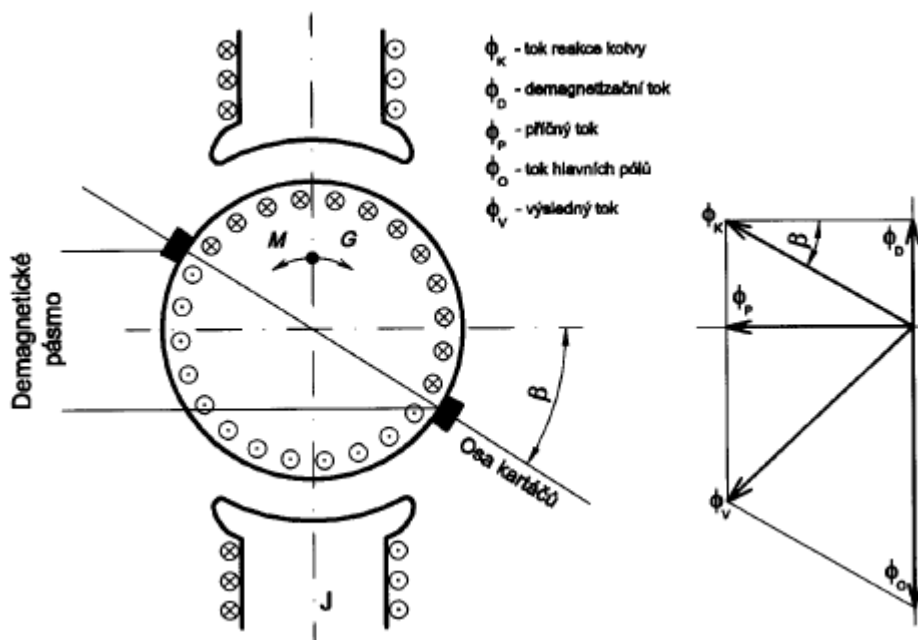
Na obr. 7.14 jsou nakresleny poměry jestliže kartáče nejsou v neutrální poloze a jsou vysunuty o úhel β . Podle směru natočení a podle toho zda jde o dynamo či motor pak odchází buď k zeslabení pole hlavních pólů – demagnetizaci, nebo k posílení pole hlavních pólů.



Obr. 7.12



Obr. 7.13



Obr. 7.14

Otázky ke kap. 7.5

1. Vysvětlete reakci kotvy

2. Zdůvodněte negativní působení reakce kotvy
3. Vysvětlete funkci kompenzačního vinutí

7.6 Podstata komutace

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

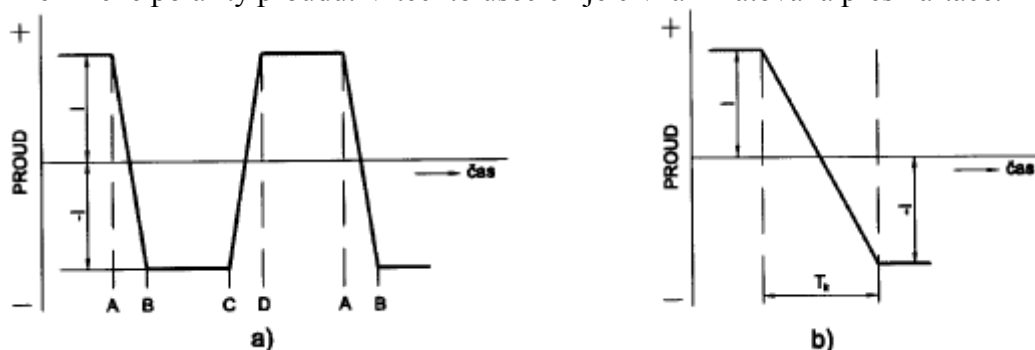
- vysvětlit podstatu komutace
- definovat reaktanční napětí
- vysvětlit pojmy a definice

Výklad

Jak bylo uvedeno kotevní vinutí stejnosměrného stroje je obvodově uzavřené a kartáče, umístěné na obvodu komutátoru v řadách s pravidelnou roztečí, danou počtem pólů, dělí toto uzavřené vinutí kotvy na paralelní větve. Jednotlivé cívky vinutí jsou připojeny k lamelám komutátoru. Při otáčení komutátoru přecházejí cívky z jedné paralelní větve do druhé. Tento přechod se děje v tzv. neutrálním pásmu tj. pásmo v magnetickém poli v němž se nemá indukovat žádné napětí. U nezatíženého stroje je neutrální pásmo uprostřed mezi hlavními póly. Při zatížení se vlivem reakce kotvy může toto pásmo posunout a to u dynama ve směru otáčení a u motoru proti směru otáčení.

Cívky vinutí kovy musí v neutrálním pásmu změnit smysl zapojení, aby při dalším pohybu z neutrálního pásma dodávaly do vnějšího obvodu napětí téhož směru jako před vstupem do neutrálního pásma. Kartáči na komutátoru jsou cívky při tomto procesu, tzn. v době komutace, spojovány nakrátko a směr proudu, procházejícího cívkami se mění na opačný. Působení komutátoru jsme si již vysvětlili.

Obr. 7.15a znázorňuje závislost proudu jedné cívky na čase. V úsecích AB a CD dochází ke změně polarity proudu. V těchto úsecích je cívka zkratována přes kartáče.



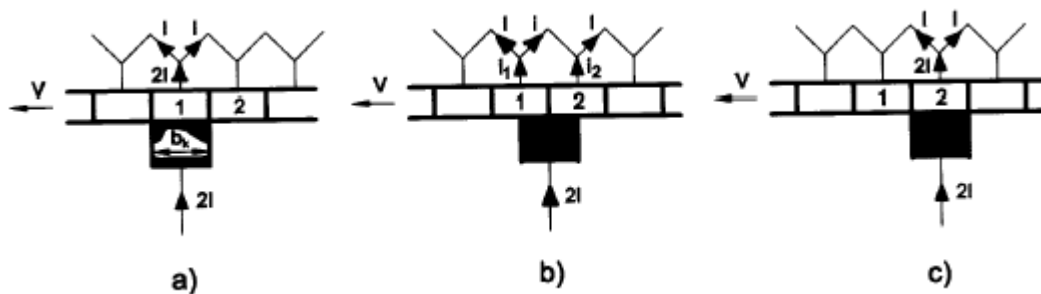
Obr. 7.15

Komutační pochod si rozebereme za pomoci obr. 7.16. Zjednodušeně předpokládáme, že šířka kartáče se rovná šířce lamely i když u skutečných strojů je šířka kartáče vždy větší než šířka lamely. V okamžiku znázorněném na obr. 7.16a probíhá proud cívkou jedním směrem. Na tomto obrázku je proud protékající spojkami vinutí s lamelami přímo úměrný dotykové ploše kartáče s lamelou tedy $2l$. Když se kotva pootočí o jednu lamelovou rozteč a kartáč dosedne na lamelu 2, u téže cívky pak protéká proud opačným směrem, což znázorňuje obr.

7.16c. Tato změna proudu proběhne za určitý čas, který nazýváme dobou komutace T_k . Necht' podle obr. 7.16b je 1/3 kartáče spojena s lamelou 2 a 2/3 s lamelou 1 pak proud ve spojkách cívek je rozdělen ve stejném poměru tj. $i_1 = \frac{2}{3} 2I$ a $i_2 = \frac{1}{3} 2I$. Je to čas během něhož je cívka spojena kartáčem nakrátko. Je-li izolace mezi lamelami zanedbatelně tenká, pak je doba komutace (viz obr. 7.15b)

$$T_k = \frac{b_k}{v_k} \quad (7.21)$$

kde b_k je šířka kartáče a v obvodová rychlost komutátoru.



Obr. 7.16

Při velmi malé rychlosti otáčení můžeme zanedbat vliv indukčnosti neboť indukované napětí bude malé ve srovnání s úbytky napětí na činných odporech komutačního obvodu. Pro komutující cívku bude platit podle obr. 7.16b

$$iR_c - i_2R_s - i_2R_p \frac{b_k}{v_k t} + i_1R_p \frac{b_k}{b_k - v_k t} + i_1R_s = 0 \quad (7.22)$$

kde R_c je odpor cívky
 R_s odpor spojek a praporků
 R_p celkový přechodový odpor mezi kartáčem a komutátorem
 $i_1 = I + i$ okamžitá hodnota proudu v lamelle 1 podle obr. b
 $i_2 = I - i$ okamžitá hodnota proudu v lamelle 2 podle obr. b
 I je časově neproměnný proud ve větvi
 i je okamžitá hodnota proudu v cívce spojené nakrátko.

Odpor cívky a praporků je obvykle velmi malý proti přechodovému odporu R_p a proto jej můžeme zanedbat. Tak dostaneme pro okamžitou hodnotu proudu v cívce vztah

$$i = I \left| 1 - \frac{2t}{T_k} \right| \quad (7.23)$$

Pokud odpor praporků a cívky nezanedbáme dostaneme rovnici

$$i = \frac{1 - 2 \frac{t}{T_k}}{1 + \frac{R_c + 2R_s}{R_p} \cdot \frac{t}{T_k} \left(1 - \frac{t}{T_k} \right)} \cdot I \quad (7.24)$$

Proudová hustota v náběhové části kartáče tj. pod lamelou 2, bude určena

$$\sigma = \frac{I-i}{S_2} \quad (7.25)$$

kde S_2 je styková plocha lamely 2 s kartáčem.

Podobně proudová hustota v odběhové části kartáče

$$\sigma = \frac{I+i}{S_1} \quad (7.26)$$

kde S_1 je styková plocha lamely 1 s kartáčem.

O přechodových odporech náběhové a odběhové části kartáče platí následující pravidla:

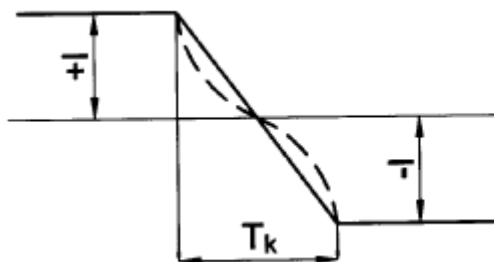
- přechodový odpor náběhové části kartáče má být nízký, aby měl kartáč dobrou zapínací schopnost
- přechodový odpor odběhové části kartáče má být naopak vysoký, aby kartáč měl dobrou vypínací schopnost.

Z rovnice 7.23 je patrné, že proud v komutující cívce se bude měnit lineárně s časem. Je to tzv. přímková komutace a její průběh je znázorněn na obr. 7.17. Ideální přímkovou komutací dostaneme za těchto zjednodušujících předpokladů:

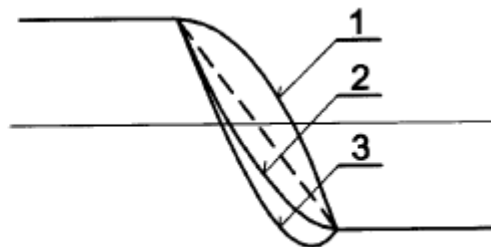
- rozdělení proudů ve spojkách cívek je dán přechodovým odporem R_p
- indukčnosti cívek kotvy zanedbáváme
- při komutaci je cívka v nulovém magnetickém poli.

Nezanedbáme-li odpory vinutí a spojek, pak nebude změna proudu lineární, nýbrž bude mít průběh naznačený na obr. 7.17 čárkovaně. Tomuto průběhu říkáme odporová komutace. Hustota proudu nebude v tomto případě konstantní v celé kluzné ploše kartáče, což znamená, že $\sigma_1 \neq \sigma_2$.

U skutečných strojů není rychlost pohybu kotvy zanedbatelná a v komutující cívce se indukuje rozptylovým polem reaktanční napětí u_r . V praxi toto napětí svou velikostí převyšuje nad úbytky napětí na činných odporech. Reaktanční napětí se podle Lencova pravidla snaží zabránit změně proudu v komutující cívce. Komutace však musí proběhnout za dobu T_k . Komutace v tomto případě bude probíhat zpočátku pomaleji a ke konci rychleji – obr. 7.18, křivka 1. Takovýto průběh komutace je nepříznivý tím, že rychlá změna proudu na konci komutace indukuje velké reaktanční napětí a to právě v okamžiku, kdy lamela ztrácí kontakt s kartáčem, což vede ke vzniku jiskrových nebo obloukových výbojů mezi kartáčem a komutátorem a ke vzniku přídavného příčného proudu v komutujícím obvodu. Při tomto průběhu proudu hovoříme o podkomutovaném stroji.



Obr. 7.17



Obr. 7.18

Aby se zamezilo škodlivému působení reaktančního napětí je nutno, aby se pro komutující cívku vytvořilo magnetické pole, které by indukovalo napětí, jenž by napomáhalo

komutačnímu procesu. Takovéto pole se nazývá komutační a jeho působením vzniká komutační napětí u_k .

U strojů bez pomocných pólů se toto pole získá natočením kartáčů z neutrální polohy a to u dynam ve směru otáčení a u motorů proti směru otáčení kotvy.

Komutační napětí musí být úměrná zatěžovacímu proudu kotvy a proto u větších strojů zhotovíme pomocné póly, které vytvoří komutační pole a také ruší reakci kotvy v komutačním pásmu. Obvykle se nepodaří provést pomocné póly tak dokonale, aby jejich pole zcela vykompenzovalo rozptylová pole v komutující cívice. Je-li pole pomocných pólů slabší pak bude stroj podkomutován. O tomto stavu jsme již pojednali.

Jestliže magnetické pole pomocných pólů bude příliš silné, převýší komutační napětí nad napětím reaktančním a komutační děj bude zpočátku probíhat rychleji, než by odpovídalo přímkové komutaci – obr. 7.18, křivka 2. Je-li překomutování příliš velké dochází k průběhu podle křivky 3. Takovýto průběh komutujícího proudu může pak mít za následek škodlivé jiskření kartáčů.

Jak bylo uvedeno při jiném průběhu proudu při komutaci než je přímková komutace nastává rovněž nerovnoměrné rozdělení proudu pod kartáčem. Tak podkomutovaný stroj má maximální hustotu proudu na odbíhající hraně kartáče a překomutovaný stroj má maximum hustoty proudu na nabíhající hraně kartáče.

U podkomutovaného stroje tedy příznivě působí nízký přechodový odpor náběhové části kartáče, poněvadž zmírňuje nepříznivý účinek indukčnosti komutující cívky. Naopak vyšší přechodový odpor odběhové části kartáče brání přílišnému přetížení odběhové hrany kartáče, a tím přispívá k rovnoměrnému rozdělení proudu po kluzné ploše kartáče.

Určení reaktančního napětí

V komutující cívice s indukčností L_c se při změně proudu indukuje reaktanční napětí (bez ohledu na znaménko).

$$u_r = L_c \frac{di}{dt} \quad (7.27)$$

V L_c je zahrnuta jak vlastní indukčnost komutující cívky tak i vzájemná indukčnost cívek současně komutujících – je to jakási střední indukčnost.

Jestliže uvažujeme, že se proud změní za dobu komutace T_k z hodnoty $+I$ na $-I$ pak můžeme také napsat za předpokladu přímkové komutace

$$U_r = L_c \frac{2I}{T_k} \quad (7.28)$$

Označíme-li u_r okamžitou hodnotu reaktančního napětí, které se indukuje v komutující cívice změnou magnetického pole zabírajícího s cívkou, pak časová střední hodnota tohoto napětí U_r je dána výrazem

$$U_r = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} u_r dt \quad (7.29)$$

Část magnetického pole reakce kotvy, které zabírá se všemi vodiči v drážce, jejíž vodiče přicházejí do komutace, budeme považovat za pole rozptylové. Je to ekvivalentní rozptylové pole s tokem ϕ_σ a nahrazujeme jím skutečné pole, které zabírá s těmito vodiči jen částečně. Uvažované pole mění během komutace svoji hodnotu z $+\phi_\sigma$ na $-\phi_\sigma$.

Podle indukčního zákona okamžitá hodnota indukovaného napětí v komutující cívice s N_c závitů je dána vztahem

$$u_r = -N_c \frac{d\phi_\sigma}{dt} \quad (7.30)$$

Dosazením do výše uvedeného vztahu dostaneme

$$U_r = -\frac{N_c}{T_k} \int_0^{T_k} \frac{d\phi_\sigma}{dt} dt = -\frac{N_c}{T_k} \int_{-\phi_\sigma}^{+\phi_\sigma} d\phi_\sigma = \frac{2N_c\phi_\sigma}{T_k} \quad (7.31)$$

Porovnáním vztahu (7.31) a (7.28) dostaneme $L_c = \frac{N_c\phi_\sigma}{I}$ ale také $L_c = N_c^2\lambda$

Podstata problému spočívá ve stanovení velikosti rozptylového toku. Jak jsme uvedli, skutečný rozptylový tok zabírá s vodiči drážky pouze částečně. Tento tok vzniká jednak v drážce, jednak v čele vinutí. Vzniká nejen působením komutující cívky, nýbrž i vzájemnou indukci ostatních současně komutujících cívek. Jednotlivé vodiče podle svého umístění v cívice různým způsobem zabírají s výsledným polem komutujících cívek.

O našem ekvivalentním toku budeme pro zjednodušení předpokládat, že existuje pouze v prostoru drážek a jak jsme uvedli zabírá se všemi vodiči drážek. Dále si definujeme λ_1 jako náhradní magnetickou vodivost, vztaženou na 1 m vodiče v drážce λ_2 jako maximální vodivost prostoru čel.

Obě tyto veličiny jsou velikosti toků vztažené na proud drážky 1A a délku vodiče 1m.

Rozptylový tok si pak můžeme vyjádřit vztahem

$$\phi_\sigma = 2l_e |\lambda_1 + \lambda_2| A t_d \quad (7.32)$$

kde A je lineární proudová hustota na jednotku obvodu kotvy
 l_e délka aktivního železa
 t_d drážková rozteč

V uvedeném vztahu číslem 2 respektujeme rozptyl předních a zadních cívkových stran.

Teď si můžeme výraz pro rozptylový tok dosadit do vztahu pro střední hodnotu reaktančního napětí. Dále použijeme vztah pro relativní ideální šířku kartáče $\beta_i = \frac{b_i}{t_k}$ (t_k rozteč lamel, b_i ideální šířka kartáče).

Vztah pro dobu komutace upravíme

$$T_k = \frac{b_i}{v_k} = \frac{b_i}{v_k} \cdot \frac{ut_k}{ut_k} = \frac{l}{u} \cdot \beta_i \cdot \frac{ut_k}{v_k} \quad (7.33)$$

Místo rychlosti na komutátoru zavedeme rychlost na obvodu kotvy a místo rozteče na komutátoru t_k drážkovou rozteč t_d , jež je u násobkem lamelové rozteče t_k . Platí tedy úměra

$$\frac{v_k}{v} = \frac{ut_k}{t_d} \quad (7.34)$$

Takže dosazením do předcházejícího vztahu

$$T_k = \frac{l}{u} \cdot \beta_1 \cdot \frac{t_d}{v} \quad (7.35)$$

Konečně tedy

$$U_r = 2N_c \cdot 2l_e |\lambda_1 + \lambda_2| A t_d \frac{u}{\beta_i} \cdot \frac{v}{t_d} = 2v A l_e N_c \cdot 2 \frac{u}{\beta_i} |\lambda_1 + \lambda_2| \quad (7.36)$$

Výraz

$$\lambda = 2 \frac{u}{\beta_i} |\lambda_1 + \lambda_2| \quad (7.37)$$

je tzv. Hobartovo číslo. Pak výraz pro U_r dostane obvyklý tvar, který se nazývá Pichelmayerova rovnice

$$U_r = 2v A l_e N_c \lambda \quad (7.38)$$

Hodnota Hobartova čísla bývá v mezí $(4 \text{ až } 8)10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$ a mění se podle velikosti stroje, přičemž menší hodnoty patří k větším strojům a větší menším strojům.

Některé používané názvy

Komutace je přechodový jev při postupném přepínání cívek vinutí kotvy z jedné paralelní větve do druhé při otáčející se kotvě. Tento jev podléhá zákonům elektrodynamiky a je řešen vždy za určitých předpokladů. Popsaný přechodový jev je ovládán kluzným kontaktem kartáč-komutátor. A zde je druhá část problému. Kluzný kontakt není pouze problém elektrický, ale i mechanický (tření), elektrochemie (patina) a atomové fyziky (vzájemné působení částic). Tak třeba tření je podstatně ovlivňováno proudovou hustotou, tím je ovlivněn i přechodový odpor a vše se pak komplikuje.

Neutrální pásmo je pásmo kotvy, uprostřed mezi dvěma sousedními póly, s prakticky nulovým tokem, nebo v širším slova smyslu pásmo komutátoru, kde je napětí mezi sousedními lamelami při chodu stroje naprázdno prakticky nulové.

Pásmo temné komutace je oblast s proměnnou intenzitou komutačního pole, v němž je komutace pro stanovený rozsah zatížení a také otáček s pevným nastavením kartáčů prakticky bezjiskrková.

Roubík je konstrukce na níž jsou namontovány kartáčové držáky, a která zajišťuje jejich vzájemnou polohu.

Nosný kruh je podpěrná konstrukce kartáčových držáků uspořádána tak, že se celá konstrukce může pohybovat po obvodu. Dovoluje regulovat neutrální pásmo a případně přístup k dolním kartáčům.

Komutátor je sestava vodivých částí izolovaných vzájemně a od svých podpěr, na niž jsou přiloženy kartáče, umožňující prostřednictvím kluzného kontaktu protékání proudu mezi otáčejícím se vinutím a obvykle stojící částí obvodu a dále umožňující komutaci proudu mezi jednotlivými cívkami otáčejícího se vinutí.

Komutátorová manžeta izolace mezi stahovacím kruhem a lamelami komutátoru.

Praporek vodivá část pro připojení lamely komutátoru ke společnému konci za sebou jdoucích sekcí vinutí.

Jádro jsou části magnetického obvodu stroje, s výjimkou vzduchové mezery, které jsou určeny k vedení magnetického toku.

Svazek je jádro složené z plechů.

Jho je část jádra ve tvaru prstence nebo mnohoúhelníku. Může být plné nebo složené z plechů.

Vzduchová mezera je mezera ve feromagnetické části magnetického obvodu.

Otázky ke kap. 7. 6

1. Co je to komutace
2. Vysvětlete dobu komutace cívky
3. Kde se musí nacházet cívka v době komutace
4. Proč vzniká reaktanční napětí
5. Jaké mohou být průběhy proudu v době komutace cívky a proč
6. Maximální velikost reaktančního napětí

7.7 Natočení kartáčů a pomocné (komutační) póly

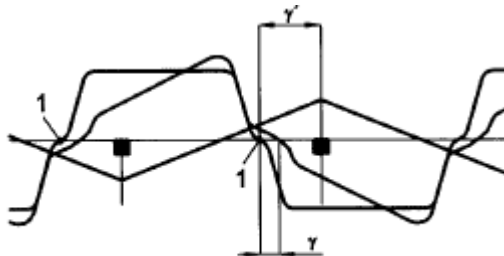
Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- vyjmenovat možnosti omezení reaktančního napětí
- vysvětlit funkci pomocných pólů

Výklad

Jak jsme již uvedli reaktanční napětí je nutno vykompenzovat stejně velkým napětím komutačním. Dále však musíme uvažovat, že reakce kotvy posouvá magneticky neutrální pásmo, v němž má proběhnout komutace cívky pokud možno bez přítomnosti jakéhokoliv magnetického pole, a to u dynama ve směru a u motorů proti směru otáčení, jak již bylo uvedeno. Vysvětlení je patrné z obr. 7.19.



Obr. 7.19

Jestliže by kartáče zůstaly v geometrické neutrále – body 1 na obr. 7.19, ocitly by se v magnetickém poli o indukci B_q , které bude do komutujících cívek indukovat napětí.

$$u_q = B_q \cdot l \cdot v \quad (7.39)$$

Toto napětí se pak sčítá s reaktančním napětím a nepříznivě ovlivňuje komutaci.

Z tohoto důvodu se u strojů malých, bez pomocných pólů natáčejí kartáče o úhel γ' (u dynama ve směru a u motoru proti směru otáčení). Úhel $\gamma' > \gamma$ protože kartáče se musí dostat nejen do neutrálního pásma, což by odpovídalo úhlu γ , ale musí se dostat do oblasti kde výsledné pole má souhlasný směr s následujícím polem ve směru točení, aby se do komutující cívky indukovalo opačné napětí než u_r , tedy u_k .

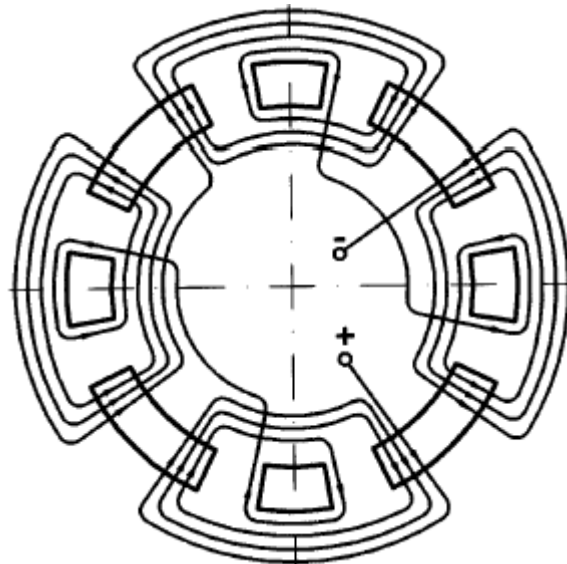
U větších strojů nenatáčíme kartáče, nýbrž konstruujeme pomocné póly (nebo také komutační póly). Magnetické pole těchto pólů působí v geometrické neutrále a ruší příčnou

reakci kotvy v tomto prostoru a mimo to musí vytvořit pole o indukci B_k , které zruší reaktanční napětí.

Magnetické pole ve vzduchové mezeře pod pomocným pólem je výsledným polem několika různých polí a to: pole reakce kotvy, pole pomocných pólů a u kompenzovaných strojů ještě pole kompenzačního vinutí. Magnetické odpory jsou zde vzduchové mezery a to pod pomocným pólem a mnohdy ještě vzduchová mezera mezi pomocným pólem a jhem statoru. Tato bývá tvořena vsunutím nemagnetické vložky.

Vzduchová mezera pod pomocným pólem se volí větší než pod hlavními póly a to proto, aby nedošlo k přesycení a také proto, aby magnetický tok v pomocných pólech nepulsoval, zejména při otevřených drážkách kotvy. K přesycení pomocných pólů nesmí docházet ani při maximálních kotevních proudech, kdy by porušení kompenzace reaktančního napětí bylo zvláště nepříznivé.

Konstrukčně jsou pomocné póly umístěny mezi hlavními póly na statoru. Jsou tvořeny úzkými magnetickými jádry, na nichž je připevněno vinutí. Protože reaktanční napětí je úměrné proudu kotvy, musí být i vinutí kotvy, které má vytvořit komutační napětí, zapojeno do série s vinutím kotvy. To tedy znamená, že tímto vinutím budou protékat značné proudy a proto bývá obvykle tvořeno pouze několika závity z tlustých vodičů – obr. 7.20.



Obr. 7.20

Polarita pomocných pólů se určí např. podle následující úvahy obr. 7.21.

Poznámky ke komutaci a návrhu pomocných pólů

Má-li stroj kompenzační vinutí je magnetické napětí reakce kotvy v okolí pólového nástavce ($\alpha \cdot t_p$) kompenzována kompenzačním vinutím.

$$F_{kv} = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot A \cdot t_p \quad (7.40)$$

Zbylá část magnetického napětí reakce kotvy F_{prk} v oblasti mezi póly o délce $(1-\alpha) \cdot t_p$ musí být kompenzována pomocným pólem

$$F_{prk} = \frac{1}{2} \cdot (1-\alpha) \cdot A \cdot t_p \quad (7.41)$$

Jeden pomocný pól pak musí vytvořit magnetické napětí kompenzující jak reaktanční napětí dané rozptylovým tokem přes drážku a čela, tak i napětí, které by indukovalo pole reakce kotvy v prostoru $(1-\alpha)\cdot t_p$.

Při návrhu vinutí pomocných pólů pak obvykle můžeme postupovat tak, že magnetické napětí pomocných pólů stanovíme

$$F_{pp} = F_r + F_{\phi_p} + \Delta F - F_{kv} \quad (7.42)$$

kde

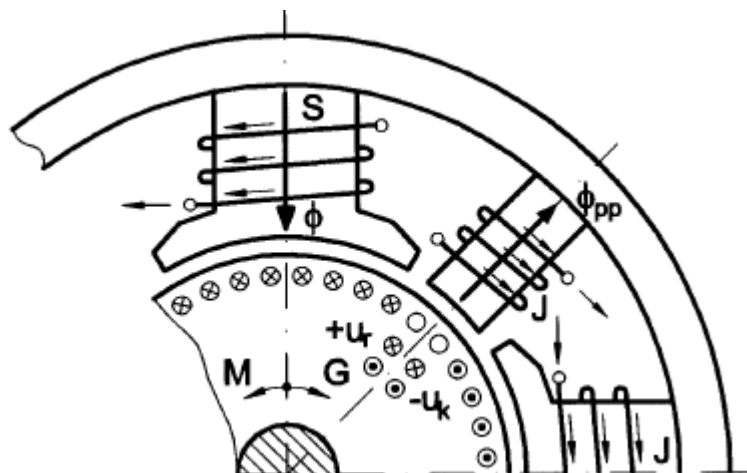
$$F_r = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \left(t_p - \frac{b_{kp}}{2} \right) \quad (7.43)$$

b_{kp} - šířka komutačního pásma – tedy jako by se v tomto pásmu reakce neuplatňovala (jinak by bylo 0,5 $A \cdot t_p$)

$$F_{\phi_p} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot B_k \cdot \delta_{pp} \cdot k_{cpp} \quad (7.44)$$

B_k - indukce pod pomocnými póly

ΔF někdy se též přidává pro dosažení částečného překomutování.



Obr. 7.21

Pod nakresleným komutačním pólem se mění smysl proudu z kladné hodnoty na zápornou, tedy proud zaniká. Reaktanční napětí u_r má tedy takový smysl, aby trvání proudu prodlužovalo – křížky u $+u_r$ pod pomocným pólem. Komutační napětí u_k musí mít opačný smysl – vyznačeno tečkami. Pro vyznačené směry otáčení se může, podle pravidla pravé ruky, takto orientované napětí indukovat pouze pod jižním pólem. Z tohoto plyne:

- u dynama následuje ve směru točení kotvy za severním hlavním pólem jižní pól pomocný,
- u motoru následuje za severním hlavním opět severní pól pomocný.

Otázky ke kap. 7.7

1. Jakými způsoby se omezuje reaktanční napětí
2. Jaké jsou maximální přípustné hodnoty reaktančního napětí
3. Co je důležité při konstrukci pomocných pólů
4. Jakou mají polaritu pomocné póly vzhledem k pólům hlavním

7.8 Vliv změn kotevního proudu a konstrukce stroje na komutaci

Čas

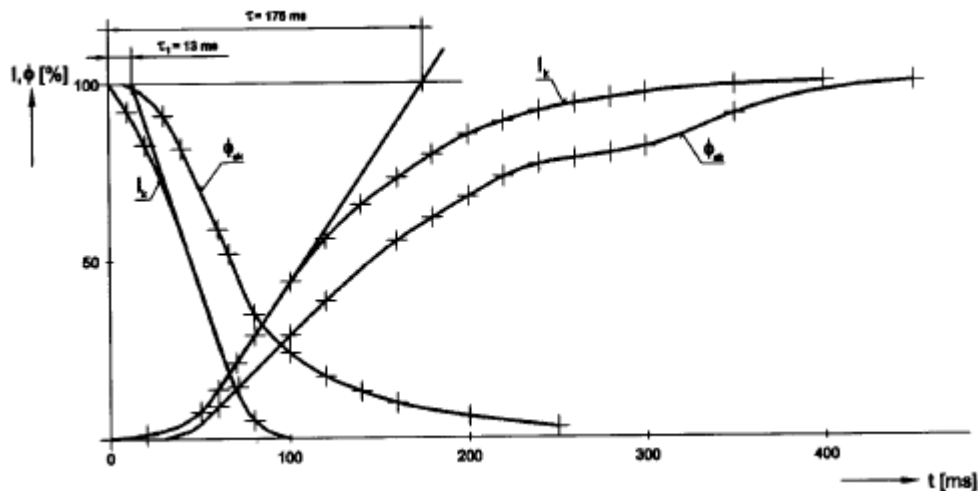
Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- popsat působení rychlých proudových změn na činnost stejnosměrného motoru

Výklad

U velkých elektrických strojů starších konstrukcí, které mají magnetický obvod nebo pouze jeho část masivní tj. nelištěný, může docházet při rychlých proudových změnách ($50 - 100 \text{ kAs}^{-1}$), vlivem vířivých proudů ke zpoždování pole pomocných proudů za proudem kotvy.

Na obr. 7.22 je průběh kotvy a magnetického toku p.p. při rozběhu na n_{jm} a při zastavení stroje.

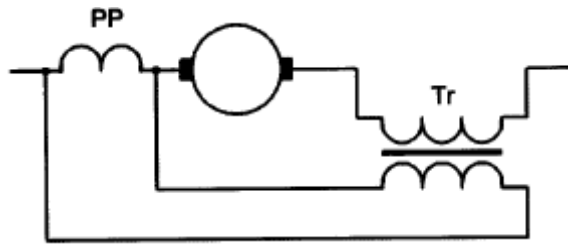


Obr. 7.22

U stejnosměrných strojů, které jsou určeny pro pohony s rychlými přechodnými ději, je nutno jejich kostry i póly skládat z izolovaných plechů. Všechny stahovací svorníky lištěných částí, které jsou v cestě magnetického toku pomocných pólů musí být izolovány a nesmí tvořit závity nakrátko. Časová konstanta magnetického obvodu bývá dále snížena poměrně velkými vzduchovými mezerami pod pomocnými póly. Všechna tato opatření pak umožní proudové strmosti až $300 I_n \cdot \text{s}^{-1}$.

Jestliže se nyní vrátíme k důsledkům zpoždování magnetického toku pomocných pólů za proudem kotvy na komutaci, pak je nutno si uvědomit, že vlastně dochází při přechodném ději buď k nevykompenzování reaktančního napětí nebo naopak k překomutování. K nevykompenzování tedy k podkomutování dochází při nárůstu proudu kotvy, kdy vlivem zpoždění je magnetický tok pomocných pólů menší než by odpovídalo příslušné okamžité hodnotě proudu kotvy. K překomutování pak dochází při poklesu proudu, kdy magnetický tok je vyšší než by odpovídalo okamžité hodnotě kotevního proudu jak ukazuje obr. 7.22.

U strojů starších konstrukcí s masivními částmi magnetického obvodu mohou dobře posloužit pro zlepšení komutace v přechodných stavech tzv. kotevní transformátory. Jsou zapojeny podle obr. 7.23. Primární vinutí tohoto transformátoru je zapojeno v sérii kotevním obvodem a sekundární vinutí je pak připojeno paralelně k vinutí pomocných pólů. Při proudových změnách pak sekundární vinutí pomocné póly buď přibuzuje nebo odbuzuje.



Obr. 7.23

V současných pohonech se v napájecím proudu stejnosměrného motoru, u něhož je zdrojem tohoto proudu statický usměrňovač, mohou vedle základní složky proudu s nulovou frekvencí vyskytovat ještě další střídavé složky o různých frekvencích. Časové změny stejnosměrného proudu jsou v podstatě způsobeny dvěma příčinami:

- nedokonalým usměrněním
- značnou přizpůsobivostí regulačního systému tzn. regulačními pochody.

Z hlediska komutace je nutné, aby velikost střídavých složek nepřevýšila určitou mez, která závisí na konstrukci stroje, zvláště jeho magnetického obvodu, a také na frekvenci těchto složek. Hodnotu zvlnění předepisují výrobci strojů podle vlastních zkušeností. Podobně jako jsme v kapitole 3 udávali velikosti zvlnění napětí, můžeme těchto vztahů použít i pro hodnocení zvlnění proudu. Připomeňme si tedy pro střední zvlnění proudu

$$\varepsilon = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \cdot 100 \quad (7.45)$$

Někdy se velikost zvlnění počítá ve vztahu ke jmenovité hodnotě proudu

$$\varepsilon = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2I_n} \cdot 100 \quad (7.46)$$

Velmi často se uvádí efektivní zvlnění

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{stef}}}{I_s} \cdot 100 \quad (7.47)$$

kde I_{stef} je efektivní hodnota střídavé složky, kterou stanovíme

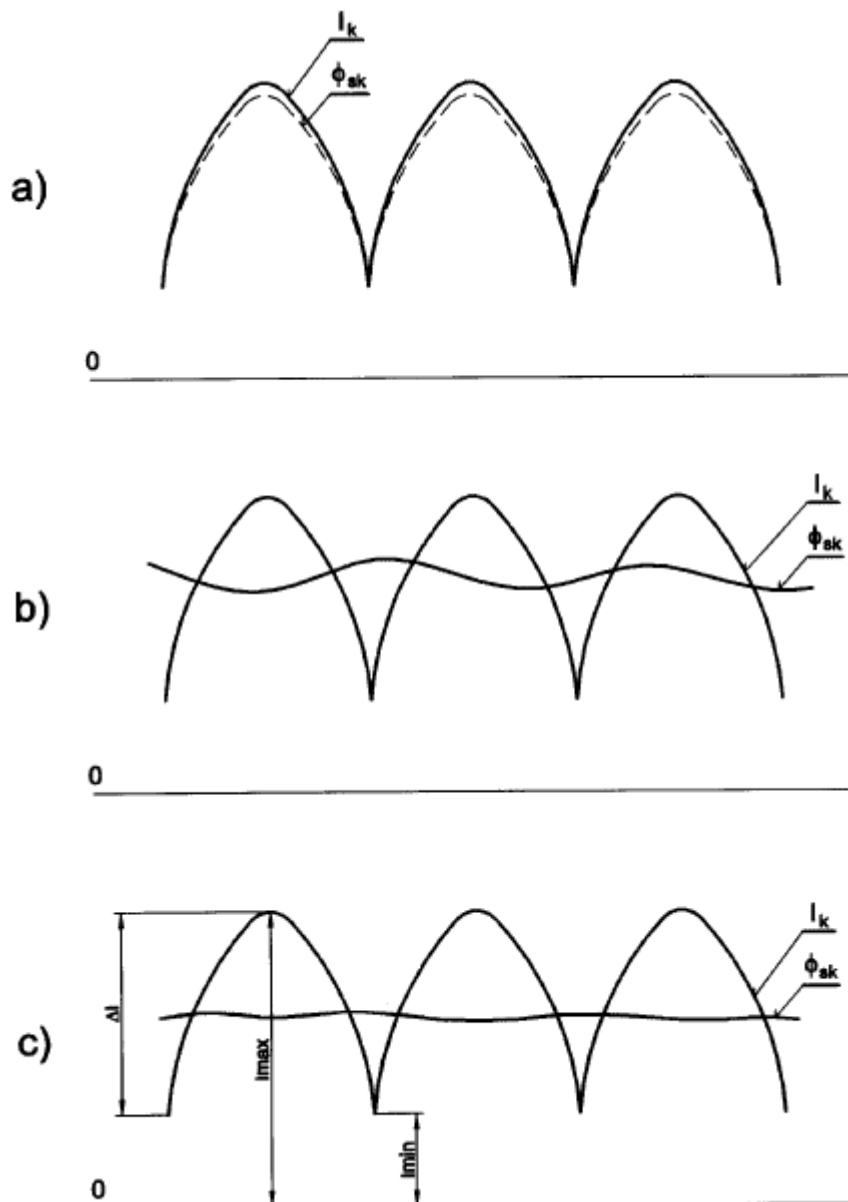
$$I_{\text{stef}} = \sqrt{\sum I_k^2} = \sqrt{I^2 - I_s^2} \quad (7.48)$$

I_k je efektivní hodnota k-té harmonické, $k=1,2,3,\dots$

I je efektivní hodnota celkového průběhu proudu

$$I_s = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \text{ je střední hodnota proudu}$$

Jak bylo uvedeno, výrobci strojů předepisují u svých strojů různé zvlnění. Většinou to bývá 4-10%, ale také až 30%. Pouhý údaj velikosti zvlnění proudu není vystihující není-li doplněn buď frekvencí proudových změn, anebo případnou strmostí změn. Frekvenční závislost je obtížně zjištělná a navíc se dá předpokládat, že velikost zvlnění s růstem frekvence musí nejdříve klesat a od určité hranice - asi 100 Hz, může opět růst, neboť magnetický obvod již na tyto frekvence není schopen reagovat, jak to dokazuje i obr. 7.24. Z tohoto důvodu se většinou u strojů udává přípustná strmost proudových změn a to obvykle $100 - 300 I_{n \cdot s^{-1}}$.



Obr. 7.24

Pro ideální bezjiskrnou komutaci je naprosto nutná prostorová i časová úměrnost reaktančního napětí u_r a komutačního napětí u_k . Obě tato napětí jsou vytvářena proudem kotvy I_k . V ideálním případě musí platit

$$u_r + u_k = 0 \quad (7.49)$$

Jestliže

$$u_r = L \cdot \frac{di}{dt} > u_k \text{ pak bude stroj podkomutován}$$

a když

$$u_r = L \cdot \frac{di}{dt} < u_k \text{ bude stroj překomutován.}$$

Na skutečných strojích však nelze zcela a v každém okamžiku reaktanční napětí vykompenzovat napětím komutačním, neboť pole pomocných pólů nemůže být prostorově i časově shodné s rozptylovým tokem indukujícím u_r . Výše uvedená rovnice se změnila na tvar

$$u_r + u_k = u_{zb} \quad (7.50)$$

kde u_{zb} je zbytkové napětí, které může být buď charakteru reaktančního napětí v případě podkomutování nebo komutačního napětí v případě překomutování.

Uvedené zbytkové napětí musí zvládnout kartáče, tzn. že ani toto zbytkové napětí se nesmí projevit jiskřením kartáčů. Za dobrých mechanických podmínek kluzného kontaktu jsou dobré elektrografitové kartáče schopny zvládnout napětí 1 - 2,5 V. Toto napětí si označme u_{kk} a nezmenejme jej komutační schopností kartáčů. Pro případ bezjiskrné komutace musí platit

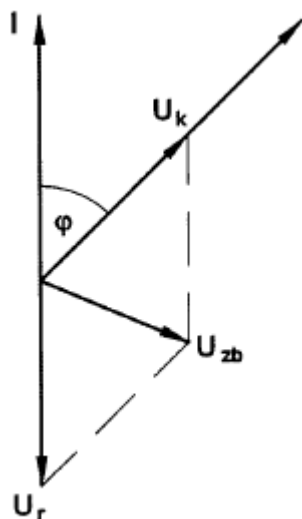
$$u_{kk} \geq u_{zb} \quad (7.51)$$

Jestliže v kterémkoliv okamžiku v průběhu komutace nastane takový stav, že

$$u_r + u_k + u_{kk} \neq 0$$

pak nahromaděná energie v komutující cívice se projeví jiskrovým nebo obloukovým výbojem mezi kartáčem a komutátorem.

Podstatně složitější podmínky nastanou při práci stroje v přechodných stavech nebo jak jsme uvedli i při napájení kotvy zvlněným proudem. Reaktanční napětí bude i při rychlých změnách prakticky úměrné procházejícímu proudu. Napětí, indukované v komutující cívice polem pomocných pólů, je však úměrné velikosti magnetického toku pod pomocným polem a je vždy s tímto tokem ve fázi. Při změnách proudu dochází vlivem vířivých proudů v magnetickém obvodu k nesynchronismu mezi magnetickým tokem pomocných pólů a proudem kotvy. Uvedené poměry jsou znázorněny na obr. 7.25. Na tomto obrázku jsou zobrazeny vektory proudů I a toku ϕ vzájemně posunuty o úhel φ . Ve fázi s tokem musí být U_k . Proud I odpovídá v opozici U_r . Je patrné, že velikost zbytkového napětí U_{zb} závisí i na velikosti úhlu φ , a tedy na velikosti zpoždění toku za proudem. Odtud pak vyplývá závislost na strmosti proudových změn a na konstrukci magnetického obvodu stroje. Graficky je to znázorněno na obr. 10.12. Průběhy b, c byly překresleny z výsledků měření na stejnosměrném motoru 840 kW.

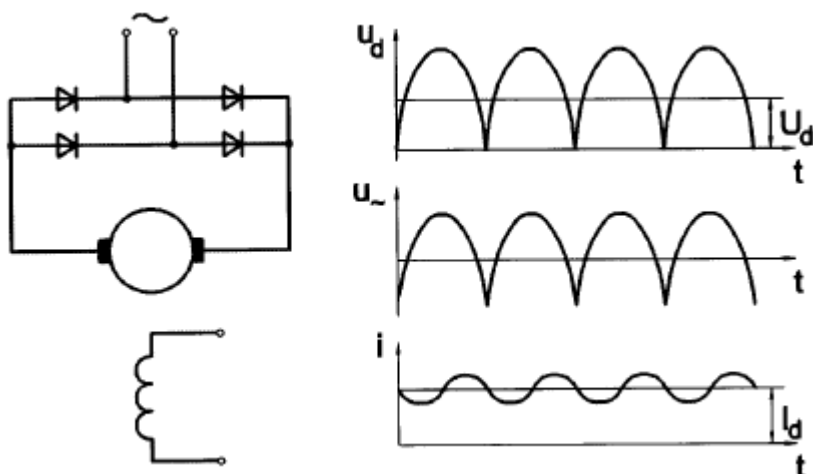


Obr.7.25

Činnost stejnosměrného stroje při pulzujícím nebo zvlněném proudu

Současné ss. motory jsou již většinou napájeny ze statických usměrňovačů nebo pulsních měničů. V těchto případech však kotevní napětí motoru obsahuje střídavou složku, která vyvolává rovněž vznik střídavé složky kotevního proudu, případně u řízených usměrňovačů je tento proud pulzující.

Mějme jako příklad můstkové zapojení usměrňovače, který napájí stejnosměrný motor viz. obr. 7.26.



Obr. 7.26

Zde je frekvence střídavé složky usměrňovaného napětí 2x vyšší než frekvence střídavé složky sítě. Střídavá složka je sice nesinusová, ale obvykle ji pokládáme za sinusovou. Tedy

$$u_{\sim} = U_{m_{\sim}} \cdot \sin \omega \cdot t \quad (7.52)$$

kde ω je úhlová rychlost jejíž hodnota závisí na způsobu zapojení měniče.

Pro hodnocení kvality usměrňování pak počítáme zvlnění o němž jsme se již zmiňovali.

Zvlněný proud způsobí:

- zhoršení komutace
- zvýšení ztrát a tím i oteplení stroje
- zvýšení lamelového napětí
- vysokofrekvenční ložiskové proudy
- kolísání momentu.

Komutace při pulzujícím proudu kotvy

Motor napájený z usměrňovačů má zvlněný nebo pulzující proud v kotvě, pomocných pólech a kompenzačním vinutí, ale magnetický tok nesleduje tento proud přesně a někdy jej považujeme za konstantní.

Při pulzujícím toku vzniká v komutující cívkce transformační napětí

$$u_{tr} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_c \cdot \phi_m \quad (7.53)$$

Při pulzujícím proudu však komutace proudu cívkce probíhá v každém okamžiku různě. Doba komutace T_k je stále stejná a obvykle menší než perioda pulzací proudu (asi 10^{-3} sec). Během této doby komutace probíhá s proudem o různé velikosti, což má za následek nesterjnou strmou změnu proudu a také další střídavou složku reaktančního napětí.

Je-li také buzení stroje napájeno zvlněným proud, indukuje se vlivem dobré magnetické vazby mezi komutující cívkou a budícím vinutím střídavé napětí do komutující cívky. Pro motory s cizím buzením v důsledku velké indukčnosti budícího vinutí je toto napětí malé (do 0,5 V) a není nebezpečné. Naopak pro motory sériové může jeho velikost dosáhnout velkých hodnot.

Zvýšení oteplení

Zvlněný proud způsobuje přídavné ztráty ve vinutí, magnetického obvodu i konstrukčních částech. Podstatnější jsou pouze přídavné ztráty ve vinutí. Zvýší se jednak Jouleovy ztráty ve vinutí a dále zvětšuje vytláčování proudu do povrchů vodiče (Skin-efekt) tzn., že se zvětšuje efektivní odpor vinutí. To se projevuje zvláště u vysokých a masivních vodičů tj. u vinutí pomocných pólů a kompenzace. Pak podle známého vztahu je

$$R_c = k_r \cdot R_{ss}$$

kde k_r je známý koeficient již ze střídavých strojů.

Jestliže zařadíme do kotevního obvodu vyhlazovací tlumivky pak zvýšení oteplení není podstatné.

Zvýšené Jouleovy ztráty jsou způsobeny rozdělením mezi střední a efektivní hodnotou zvlněného proudu a respektujeme ji koeficientem k_c^2 .

Zvýšení lamelového napětí

Mějme tyristorový měnič, který napájí stejnosměrný motor zvlněným napětím. Střídavá složka napětí se rozloží na jednotlivá vinutí motoru v poměru jejich impedancí a zvyšuje maximální hodnotu lamelového napětí. Proto musíme u strojů napájených z usměrňovačů volit střední lamelové napětí asi o 10 – 15% větší než při napájení hladkým proudem.

Ložiskové proudy

Velké motory mají již velkou kapacitu kotevního vinutí proti zemi. Při napájení zvlněným napětím se strmou náběhovou hranou dochází ke vzniku vysokofrekvenčních zemních proudů, které se uzavírají přes hřídel a ložiska a tato narušují. Proto se hřídele opatřují sběracími kartáči, které se uzemní a svedou proud mimo ložisko. Navíc se ložiskové stojany odizolují od základu.

Kolísání momentu

U velkých strojů je tento vliv zanedbatelný.

Otázky ke kap. 7.8

1. Co je příčinou rychlých proudových změn při činnosti motoru
2. Jaké konstrukční provedení musí mít motor, který je určen pro napájení zvlněným proudem
3. Co se indukuje v komutující cívce při napájení zvlněným proudem
4. Co způsobuje zpoždění toku pomocných pólů za proudem kotvy
5. Jaké negativní důsledky má zvlněný proud na činnost stejnosměrného motoru

7.9 Šířka kartáče větší než jedna lamela $\beta > 1$

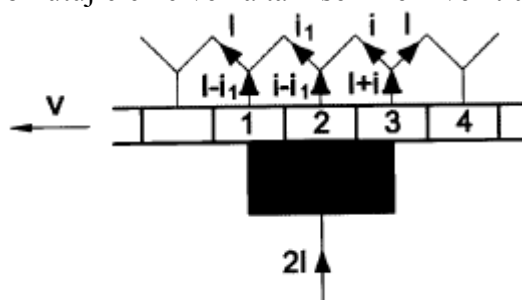
Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- vysvětlit proč se používá kartáč širší než jedna lamela
- určit dobu komutace cívky
- stanovit podmínky dobré komutace

Výklad

Na skutečných strojích bývá šířka kartáče vždy větší než šířka jedné lamely. Kartáč zpravidla překrývá 2 – 3 lamely obr. 7.27. Tím dosáhneme jednak zmenšení proudového zatížení kartáče, prodloužení doby komutace, snížení reaktančního napětí a hlavně se příznivě uplatní tlumící vliv sousedních, rovněž komutujících cívek. Jakmile totiž kartáč opouští lamelu, pak celá nevykompenzovaná energie cívky končící komutaci, by se vybila jiskrovým nebo obloukovým výbojem mezi kartáčem a lamelou. Větší šířka kartáče má ten příznivý vliv, že kartáčem je překlenuta nejen cívka končící komutaci, ale i cívky, které dosud komutují a tyto cívky pak působí tlumícím účinkem. Při přerušení spojení mezi lamelou a kartáčem se nemusí celá magnetická energie vybit jiskrou, nýbrž část této energie se přenesou vzájemnou indukcí do sousedních ještě komutujících cívek a tam se změní ve ztráty.



Obr. 7.27

Na to, zda se uplatní vzájemná indukčnost cívek má vliv poloha, kterou cívka zaujímá v drážce. Podle způsobu, jakým cívky končí komutaci, rozlišujeme cívky končící komutaci nesamostatně a samostatně.

Nesamostatně komutující cívka se vyznačuje tím, že obě její strany mají v době, kdy cívka končí komutaci, vedle sebe v týchž drážkách vždy alespoň jednu, rovněž komutující cívku. Takováto cívka je pak značně tlumena.

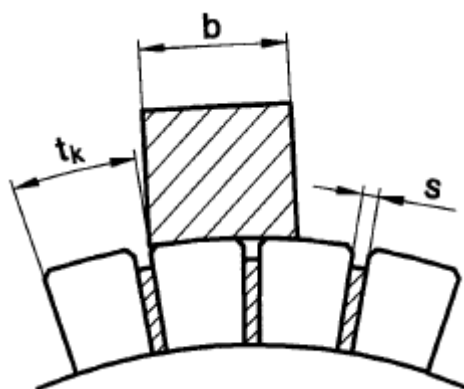
Samostatně komutující cívka nemá vedle sebe v drážkách žádnou jinou rovněž komutující cívku. Není tlumena a proto také nejdříve jiskří a její lamela se opaluje. V tomto případě mohou být opáleny lamely v pravidelných vzdálenostech, odpovídajících počtu lamel na drážku. Tak např. má-li vinutí tři vodiče vedle sebe v drážce $u = 3$, bývá opálena každá třetí lamela.

Velké lamelové krytí má však i nevýhody a to, že může již zasáhnout do pole hlavních pólů a zvláště z mechanických důvodů je široký kartáč nevýhodný. Tyto mechanické nevýhody částečně odstraní kartáče dělený.

Doba komutace cívky a ideální šířka kartáče

Doba komutace cívky je doba, během níž jsou lamely, na kterých cívka začíná a končí, spojeny jedním nebo dvěma kartáči nakrátko nebo lépe jednou nebo dvěma řadami (vlnové vinutí) kartáčů.

Ideální šířka kartáče je dráha, na níž cívka komutuje. Ideální šířku kartáče lze měřit v délkových jednotkách přímo na povrchu komutátoru a pak ji značíme b_i , nebo šířku redukovanou na průměr kotvy, anebo ji můžeme vyjádřit i úhlově. Lamelová rozteč se skládá ze šířky lamely a šířky izolace, jak je naznačeno na obr. 7.28.



Obr. 7.28

Jak jsme již uvedli zavádíme pojem relativní ideální šířky kartáče u jednoduchého smyčkového vinutí s nezkráceným krokem a se zanedbatelnou šířkou mezilamelové izolace je šířka kartáče b rovna dráze na níž cívka komutuje. Prakticky je však dráha na níž cívka komutuje různá od šířky kartáče. β_i , jinak řečeno krytí lamel je rovno

$$\beta_i = \frac{b_i}{t_k} \quad (7.27)$$

Dobu komutace pak určujeme ze vztahu

$$T_k = \frac{b_i}{v_k} \quad (7.28)$$

Podmínky dobré komutace

U stejnosměrných strojů hovoříme o dobré komutaci stroje v tom případě, jestliže komutace probíhá bez jiskrových nebo obloukových výbojů pod kartáči. U reálného stroje ovlivňují komutační procesy zejména:

- elektrické vlastnosti stroje tj. zejména velikost lamelového a reaktančního napětí, druh vinutí kotvy apod.
- magnetické vlastnosti stroje, čímž rozumíme provedení vlastního magnetického obvodu, vzduchovou mezeru pod pomocnými póly, tvar nástavce pomocného pólu, atd.
- mechanický stav komutátoru a celého stroje
- kvalita použitých kartáčů
- kvalita filmu (patiny) na komutátoru
- obvodová rychlost komutátoru
- okolní prostředí v němž stroj pracuje
- způsob zatěžování stroje
- a jiné.

Lamelovým napětím se rozumí napětí mezi dvěma sousedními lamelami. Střední hodnota lamelového napětí se určí ze vztahu

$$U_L = \frac{U}{K} \cdot 2p \quad (7.29)$$

U je napětí stroje.

U nekompenzovaných strojů nemá střední hodnota lamelového napětí překročit 15 V, u kompenzovaných 20V. Někdy se uvádí také maximální okamžitá hodnota, která by krátkodobě mohla dosáhnout hodnot 30 – 50V. Uvedené maximální hodnoty se mohou krátkodobě vyskytnout při provozu stroje. Při jejich překročení však již může dojít k tzv.

přejiskření na komutátoru a vytvoření kruhového ohně, což je vlastně zkrat mezi řadami kartáčů různých polarit.

Velmi důležitou roli hraje rovněž mezilamelová izolace, která má být odolná proti působení oblouku, tzn., že by při styku s jiskrovými či obloukovými výboji mezi kartáčem a komutátorem, kterým se i u dobrého stroje za provozu nevyhneme, neměla uhelnatět. Téměř výhradního použití pro tyto vlastnosti zde našel mikanit.

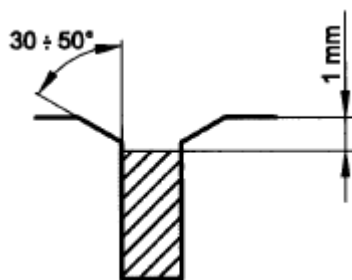
U malých strojů bez pomocných pólů by reaktanční napětí nemělo překročit 2 – 3 V. U velkých strojů s pomocnými póly 11 – 17 V podle druhu napájecího proudu. Při napájení hladkým proudem to mohou být hodnoty vyšší, pro napájení zvlněným proudem hodnoty nižší.

Pro dobrou komutaci je nutné použít u vinutí s větším počtem paralelních větví než 1 vyrovnávacích spojek. Vinutí pomocných pólů zapojujeme pokud možno do jedné větve. Tam, kde to z hlediska zvláště velikých kotevních proudů není možno použijeme 2 výjimečně i více paralelních větví. Pak ale póly jedné polaritby by měly tvořit jednu větev a póly druhé polaritby druhou větev. Při tomto uspořádání se částečně kompenzuje eventuální nerovnoměrné rozdělení proudu do větví. Totéž by mělo platit i u kompenzačního vinutí.

Výroba musí zajistit pečlivé provedení stroje, souměrnost všech jeho částí, zvláště kotvy a komutátoru. Vzduchové mezery by se od předepsané mezery pod hlavními či pomocnými póly neměly lišit o více než 10%. Velikost vzduchové mezery pod pomocnými póly a eventuálně i tvar pólového nástavce pomocného pólu by se měly doladit až při komutačních zkouškách na zkušebně. Rotor stroje musí být staticky i dynamicky vyvážen. Stroj by měl pracovat bez mechanických rázů a vibrací.

Komutátor musí být naprosto kompaktní těleso. Musí být dokonale okrouhlý. Neokrouhlost je přípustná v závislosti na obvodové rychlosti komutátoru a nazýváme ji většinou ovalitou komutátoru. Je definována jako rozdíl mezi největším a nejmenším poloměrem komutátoru, měřeným na jeho povrchu.

Izolace mezi lamelami musí být odstraněna do hloubky cca 0,8 mm. Hrany lamel musí být spojeny jak ukazuje obr. 7.29.



Obr. 7.29

Velmi důležitý je vzájemný rozdíl dvou sousedních lamel. Zde se obvykle požaduje, aby rozdíl výšek dvou sousedních lamel nebyl větší než několik tisícín mm. Komutátor nesmí za provozu již jakýmkoliv způsobem měnit svůj tvar. Tzn. že musí být již od výrobce dokonale „vyzrálý“ a dotažený.

Jak jsme již uvedli významnou roli v procesu komutace hraje kartáč. Tento tedy nejen převádí proud ze stojící do rotující části nebo naopak, ale zkratuje lamely cívek při komutaci a zvláště pak může vyrovnávat rozdíly mezi reaktančním a komutačním napětím. Dobrý kartáč by měl bez škodlivého jiskření zvládnout zbytkové napětí 1,0 až 2,5 V. Pro práci na stejnosměrném stroji se výhradně používají kartáče elektrografitové. Zvláště dobré komutační vlastnosti mají kartáče s větším měrným odporem – okolo $50 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Kartáče se musí v krabici držáku snadno pohybovat zvláště ve směru kolmém na komutátor. Vůle v krabici však nesmí být příliš velká. Důležitá je rovněž síla s níž je kartáč přitlačován ke komutátoru. Přítlačné zařízení je na držáku a musí zajistit konstantní tlak na kartáč během jeho opotřebení. Dále musí zajistit působení přítlačné síly v ose kartáče, nesmí způsobovat klopné momenty na kartáči atd. Tlak na kartáč má být okolo 20 kPa, u trakčních strojů větší a až dvojnásobný.

Zvlášť důležitou roli v práci kluzného kontaktu kartáč komutátor hraje patina na povrchu komutátoru. Patinou nebo také filmem nazýváme povrchovou vrstvičku, která se tvoří na komutátorech a která určuje vzhled povrchové kovové plochy komutátoru, po níž běží kartáče. Patina se skládá ze dvou hlavních složek:

- vrstvičky kysličníků kovů, která je těsně spojena s příslušným kovovým podkladem
- z nánosu velmi jemných částic uhlíku, které lpí různou silou na kluzné ploše komutátoru.

Patina na povrchu komutátoru se tvoří za provozu stroje a to několik dnů. Její složení a tloušťka kolísají ve velmi širokých mezích a závisí především na proudovém zatížení kartáčů a způsobu zatěžování stroje. Její vlastnosti podstatně ovlivňuje i okolní atmosféra. Zvláště nepříznivě působí na patinu olejové výpary, malá absolutní vlhkost vzduchu – pod 2 g/m^3 , prach a jiní činitelé. Barva, tloušťka ani složení patiny nejsou pro komutační proces podstatné. Rozhodující jsou ty vlastnosti patiny, které se uplatňují při průchodu proudu přes patinu a při klouzání kartáče po komutátoru. Jde tedy především o vodivost patiny a ovlivňování koeficientu tření mezi mědí a grafitem. Patina má mnohem lepší kluzné vlastnosti než čistá měď a snižuje tím hodnotu koeficientu tření

Jestliže jsme uvedli, že komutaci ovlivňuje rovněž způsob zatěžování stroje, pak je to jednak z důvodů vlivu na tvorbu patiny a vlivu na vlastní komutaci. U strojů s dlouhými dobami chodu naprázdno, tj. bez proudového zatížení se tvoří buď špatná nebo vůbec žádná patina, dochází k suchému tření mezi kartáčem a komutátorem, což vede ke vzniku vibrací a hluku kartáčů. Působením vibrací se narušuje jak kluzná plocha kartáče, tak i lanka, armování apod. U stejnosměrných strojů má zatěžování velmi často takový průběh, že dochází ke krátkodobému přetěžování stroje $2 - 3 I_n$ s rychlými proudovými změnami. Pokud efektivní proud při tomto způsobu zatěžování nepřesáhne proud jmenovitý, je takovéto zatěžování přípustné. Podstatné je to, aby rychlé proudové změny nezpůsobovaly již uvedené zpoždění toku pomocných pólů za proudem kotvy a dále aby nedocházelo k nerovnoměrnému rozdělování proudu u paralelně spolupracujících kartáčů. V přechodných stavech se totiž může snadno stát, že některý z kartáčů, který má okamžité nejvýhodnější podmínky ve své proudovodné cestě přebere zatížení, které přesahuje několikrát jeho jmenovité hodnoty a tento kartáč může pak značně jiskřit.

Velké obvodové rychlosti komutátoru zapříčiňují jednak vyšší reaktanční napětí a dále pak vyžadují mnohem pečlivější mechanické provedení jak komutátoru, sběrného ústrojí, kartáčů tak i celého stroje.

Otázky ke kap. 7.9

1. Proč se používá větší šířka kartáče
2. Co je to doba komutace cívk
3. Proč musí být komutátor v dobrém stavu
4. Určete velikost lamelového napětí
5. Co je to patina
6. Jaké funkce plní kartáč ve stejnosměrném stroji

7. 10 Kontrola komutačních vlastností stroje

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- změřit temné pásmo stroje
- posoudit komutační vlastnosti motoru
- nastavit kartáče do neutrální polohy

Výklad

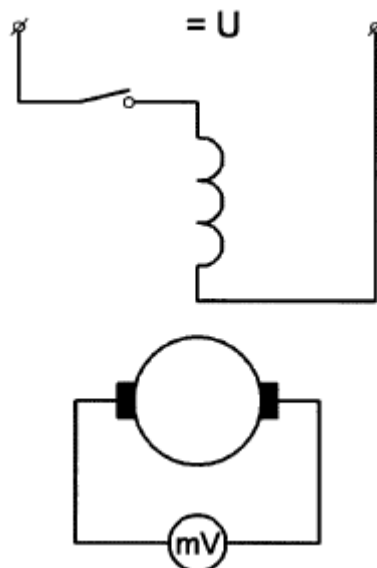
Nastavení kartáčů do neutrální polohy

Nejuspokojivější komutace bude dosaženo, budou-li kartáče v tzv. neutrální poloze tj. je-li vinutí kotvy symetrické k ose hlavních pólů. Neutrální osa je kolmá k ose magnetického pole hlavních pólů.

Princip nastavení spočívá v tom, že pohybem kartáčů po obvodu komutátoru nastavíme minimální transformační napětí indukované v rotoru.

Postup:

- budící vinutí připojíme ke zdroji ss. napětí (desítky voltů) – obr. 7.30
- ke dvěma různým řadám kartáčů (+ a -) připojíme milivoltmetr s nulou uprostřed
- při zapínání a vypínání budícího vinutí se v kotvě indukuje napětí, jehož velikost závisí na vychýlení kartáčů z neutrální polohy. Kartáči budeme pohybovat oběma směry po obvodu komutátoru tak dlouho, až vychylka milivoltmetru bude minimální. V této poloze je osa vinutí kotvy kolmá k ose budícího vinutí.



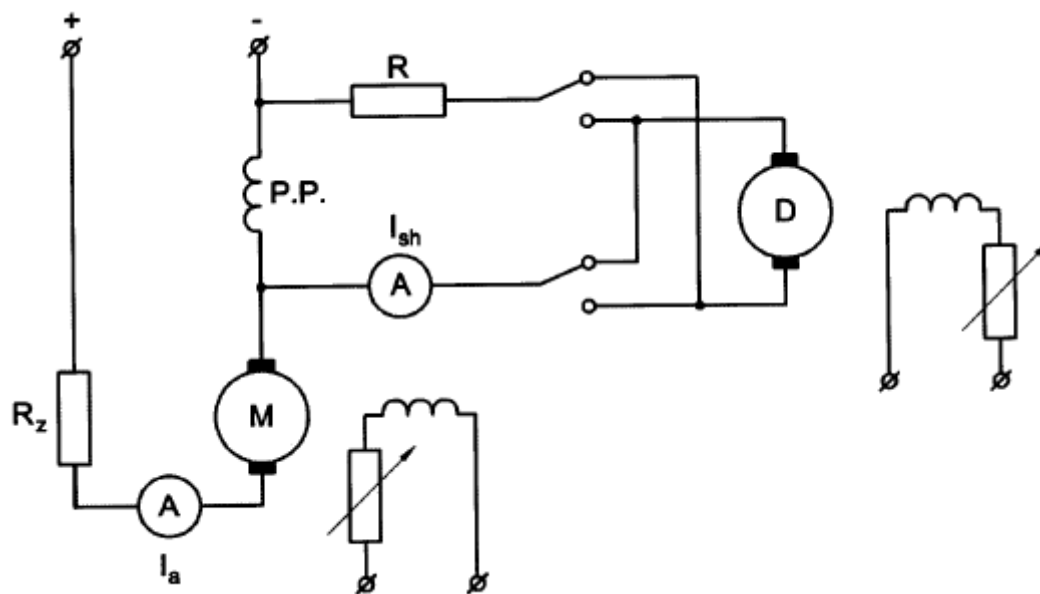
Obr. 7.30

Pásmo temné komutace

U stejnosměrných strojů hovoříme o dobré komutaci v tom případě, když komutace probíhá bez jiskrových nebo obloukových výbojů pod kartáči. U reálného stroje musí být bezjiskrné komutace (v poslední době se připouští také mírné jiskření, které však nesmí narušovat komutátor ani kartáče) ve velkém rozsahu kotevních proudů a otáček stroje. Vžitým

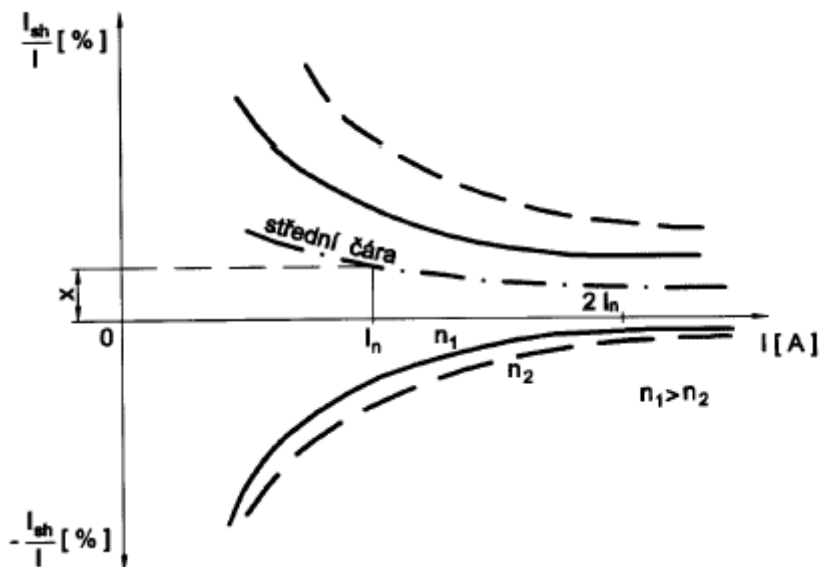
způsobem určování kvality komutace je šířka tzv. temného pásma. Toto pásmo temné komutace je ohraničeno dvěma komutačními křivkami.

Komutační křivky získáme tím způsobem, že u měřeného stroje při zkoušce udržujeme konstantní otáčky a paralelně k vinutí pomocných pólů připojíme regulovatelný zdroj stejnosměrného proudu, který vinutím pomocných pólů protlačuje proud I_{sh} a to buď ve směru nebo proti směru proudu kotvy zkoušeného stroje. Tímto způsobem zesilujeme nebo zeslabujeme magnetický tok pomocných pólů a stroj pak bude překomutován nebo podkomutován. Objektivními nebo subjektivními metodami pak vyhodnocujeme začátek jiskření kartáčů. Zapojení stroje při měření ukazuje obr. 7.31.



Obr. 7.31

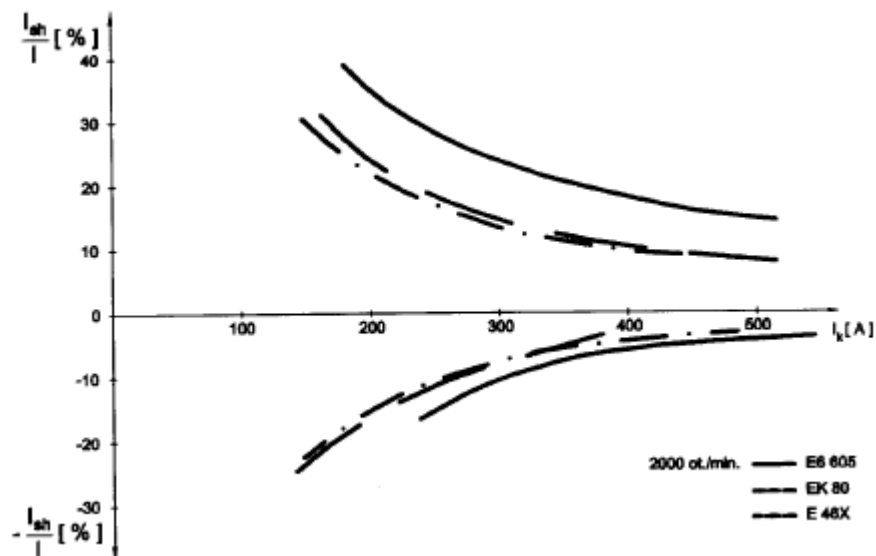
Při měření odečítáme I_{sh} , při kterém se za určitého proudu kotvy objeví jiskření a to v obou směrech proudu I_{sh} , tzn. když odbuzujeme nebo přibuzujeme pomocné póly. Komutační křivky pak sestrojíme tak, že na osu x vynášíme kotevní proud zkoušeného stroje I_k a na osu y poměrné procentní hodnoty proudů I_{sh}/I_k , obr. 7.32. Stroj zatěžujeme minimálně do $2I_n$. Pomocný stroj bývá obvykle dynamo s nízkým napětím schopné dodávat alespoň 20% proudu kotvy zkoušeného stroje. Plocha mezi oběma křivkami je oblast temné komutace. Střední čára nám udává o kolik procent je nutno pomocné póly zesílit nebo zeslabit, aby bylo dosaženo dobré komutace, při níž je poloha pásma symetrická k ose x. V nakreslené poloze je nutno pomocné póly zesílit o hodnotou „x“. Na obrázku 7.32 jsou nakresleny dvě pásma pro tentýž stroj, ale pro různé otáčky. Je pochopitelné, že pro menší otáčky n_2 bude pásmo širší než pro větší otáčky n_1 .



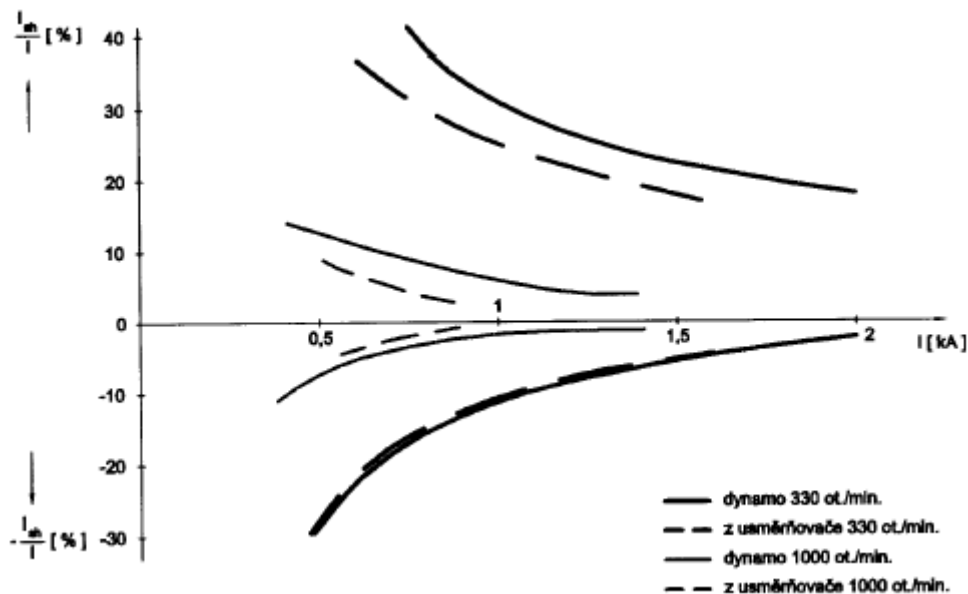
Obr. 7.32

Šířka pásma může být rovněž rozdílná při různých směrech otáčení stroje. U reverzačních strojů je proto nutno naladit zhruba stejné podmínky pro oba směry otáčení. U stroje s jedním směrem točení je, při vyznačení tohoto směru na stroji, přípustné mít v opačném směru otáčení pásmo užší.

Vliv různé kvality kartáčů na šířku temného pásma u téhož stroje ukazuje obr. 7.33. Obr. 7.34 ukazuje temné pásmo stroje napájeného z dynama nezvlněným proudem z usměrňovačů. Je patrné, že vlivem zvlněného proudu se u stroje s masivní kostrou temné pásmo zúží. Další vliv na zúžení pásma je ta skutečnost, že v komutující cívice se musí změnit maximální a ne střední hodnota proudu. Tento vliv se potlačuje vyhlazovacími tlumivkami v obvodu rotoru. Vliv vířivých proudů, již zmíněným lištěním magnetického obvodu, případně vhodným vinutím a v neposlední řadě vhodnými kartáči s vyšším odporem.



Obr. 7.33



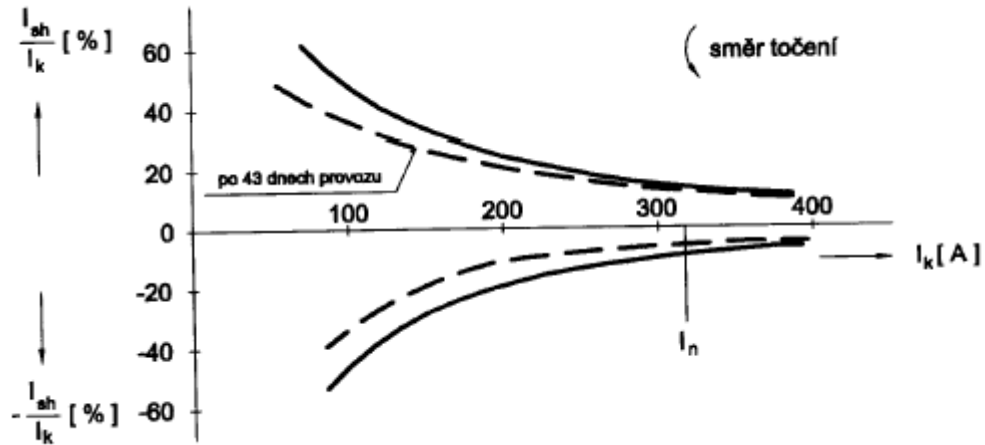
Obr. 7.34

Jak jsme uvedli, na komutaci má značný vliv kvalita patiny, která se vytvoří na povrchu komutátoru. Než se budeme věnovat tomuto problému musíme ještě zdůraznit, že pro správné zjištění temného pásma je nutné, aby se měření na stroji provádělo při zaběhaných kartáčích a pokud možno s již vytvořenou patinou. To si vyžádá asi 50 – 70 hodin zabíhání stroje. Pokud to není možné je nutno pamatovat na to, že pásmo temné komutace bude nejširší na čistém komutátoru bez patiny tzn. budeme-li měřit např. po obroušení nebo osoustružení komutátoru. Na rozšíření pásma v počátečním stádiu bude mít vliv větší počet uhlíkových zrn, které jsou k dispozici na nevyhlazené, nelesklé kluzné ploše kartáčů.

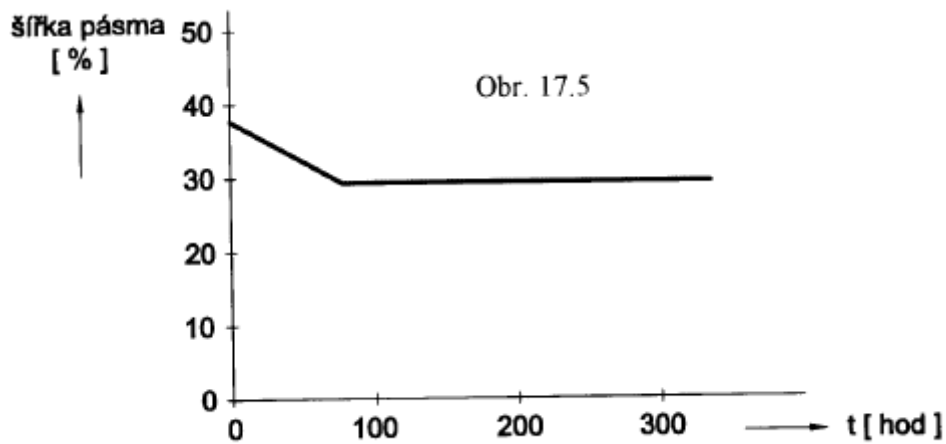
Po zaběhnutí kartáčů má jeho kluzná plocha větší rádius než je rádius povrchu komutátoru, takže vznikne pod okraj kartáče vzduchový klín. Tím se zkrátí doba komutace, což může vést k naindukování většího u_r , dále se sníží počet kontaktních bodů a rovněž vlivem ionizace vzduchového klínu pod oběhovou hranou snadněji vzniká jiskření. To vše vede ke zúžení temného pásma.

Musíme však rozlišovat nezaběhané kartáče, které znamená menší krytí lamel, od nezaběhání znamenající pouze nelesklou kluznou plochu kartáče, ale dokonalé krytí lamel. Pásmo temné komutace stroje bez patiny a po 43 dnech provozu, kdy došlo již ke stabilizaci patiny je na obr. 7.35.

Když bychom vynášeli závislost šířky temného pásma na čase, pak obdržíme průběh znázorněný na obr. 7.36.



Obr. 7.35



Obr. 7.36

Otázky ke kap. 7. 10

1. Proč musí být kartáče v neutrální poloze
2. Jak se nastavení do neutrální polohy provádí
3. Jak se měří temné pásmo motoru
4. Jaká je obvyklá šířka temného pásma
5. Co má vliv na šířku temného pásma

7.11 Rozdělení strojů podle způsobu buzení

Čas

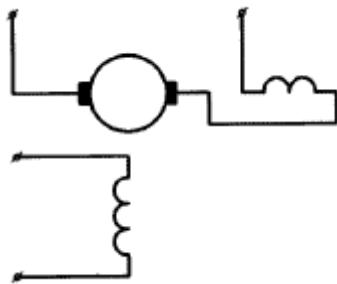
Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- rozdělit stejnosměrné stroje podle uspořádání budícího vinutí
- popsat vlastnosti strojů s různým buzením

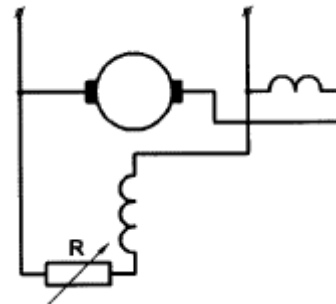
Výklad

Jak jsme uvedli každý stejnosměrný stroj může pracovat buď jako dynamo nebo jako motor. Podle způsobu zapojení budicího vinutí vzhledem ke kotvě, které je umístěno na hlavních pólech, rozlišujeme čtyři základní druhy buzení:

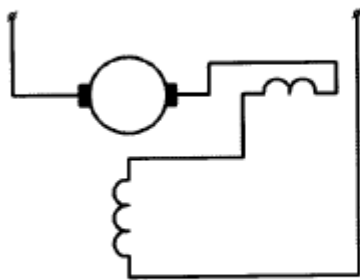
- cizí buzení, kdy na hlavních pólech je umístěno vinutí, které je napájeno z cizího zdroje, nezávislého na napětí kotvy, obr. 7.37
- buzení derivační je uspořádáno takovým způsobem, že vinutí budící je připojeno paralelně k vinutí kotvy, obr. 7.38
- u sériového buzení je budící vinutí stroje připojeno do série s kotevním vinutím, obr. 7.39
- smíšené buzení, na hlavních pólech jsou umístěny minimálně dvě vinutí, napájené různým způsobem, obvykle jedno je derivační a druhé sériové, obr. 7.40. U tohoto vinutí jsou dva základní druhy a to:
 - kompaundní buzení, kdy obě buzení vytvářejí magnetické napětí ve stejném smyslu
 - protikompaundní buzení, kdy buzení umístěné na hlavních pólech vytvářejí magnetické napětí opačného smyslu.
- u menších strojů se dále pro buzení používají permanentní magnety, což je vlastně vzhledem ke kotvě jistý druh cizího buzení, u něhož se ovšem nedá toto buzení regulovat.



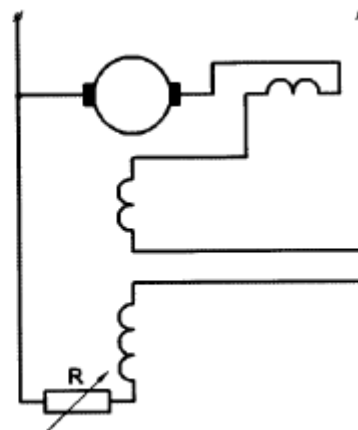
Obr. 7.37



Obr. 7.38



Obr. 7.39



Obr. 7.40

Význam dynam v současné době poklesl, protože byly nahrazeny statickými usměrňovači. Můžeme se s nimi setkat ještě u rotačních zdrojů stejnosměrného proudu a to v hutních podnicích, papírnách a u starších obráběcích strojů, svařovacích agregátů, budičů synchronních strojů apod. Stejnosměrných motorů se stále používá v regulačních pohonech pro jejich snadnou otáčkovou regulovatelnost. Dnes jsou již většinou napájeny ze statických měničů.

Použití rotačních soustrojí pro získávání stejnosměrného proudu má značné oprávnění u pohonů velkých agregátů (několik MW), kdy velká Leonardova soustrojí, tvořena pohonným střídavým synchronním nebo asynchronním motorem pohánějí jedno nebo několik dynam, neovlivňují negativně napájecí síť. Vhodnou kombinací např. se statickým buzením dynam, pohonného střídavého motoru i stejnosměrných motorů, můžeme dosáhnout i uspokojivou účinnost přeměny střídavého proudu energie na stejnosměrnou. Tam, kde jde o krátkodobá rázová zatížení se pak použije Ilgnerovo soustrojí s pohonným kroužkovým asynchronním motorem, které je schopno tlumit i rázy činné a jalové energie na napájecí síť. Navíc použitím kaskádního zapojení se statickými měniči, lze skluzovou energii vracet zpět do sítě, čímž se zlepšuje účinnost.

Otázka ke kap. 7. 11

1. Jaké druhy strojů podle způsobu buzení rozeznáváte
2. Kde se jednotlivé druhy strojů používají
3. Jaké může mít stejnosměrný stroj buzení

7. 12 Vlastnosti a použitelnost motorů

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- definovat vlastnosti a použitelnost jednotlivých druhů stejnosměrných motorů
- vysvětlit princip spouštění stejnosměrných motorů
- vysvětlit princip regulace otáček motorů

Výklad

Stejnoseměrné motory jsou nejstarší a v regulovaných pohonech stále nejrozšířenějším druhem pohonu. V této úvodní části si rozebereme vztahy, které jsou platné pro všechny druhy stejnosměrných motorů.

Každý stejnosměrný motor má tři obvody a každý z nich má svou vlastní energii:

- budící obvod, ve kterém je budící magnetická energie
- obvod kotvy, s magnetickou energií tvořenou kotevním proudem
- mechanickou část či mechanický obvod s kinetickou energií rotujících hmot.

Tyto obvody se někdy zahrnují společně s obvody zařízení navazující na motor tj. napájecí zdroj, poháněné zařízení apod. Tak např. se bere společně kinetická energie motoru a poháněného stroje apod.

Výstupními veličinami motoru jsou parametry pohybu tj. točivý moment a úhlová rychlost nebo otáčky. Elektromagnetický moment stroje je úměrný součinu magnetického toku a proudu kotvy, tedy

$$M = c \cdot \phi \cdot I \quad (7.57)$$

Mezi svorkovým napětím a napětím indukovaným platí vztah

$$U_i = U - RI - \Delta U_k \quad (7.58)$$

Mechanický moment na hřídeli je také určen

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (7.59)$$

kde P je mechanický výkon stroje $P = P_1 - \Delta P = U_i \cdot I = c \cdot \phi \cdot \omega \cdot I$ (7.60)

Příkon motoru je
 $P_1 = U \cdot I$

Regulace otáček

Abychom si uvědomili na čem závisí otáčky stejnosměrného stroje připomeneme si rovnici

$$U_i = N_v n \cdot \frac{P}{a} \cdot \phi_0 \quad (7.61)$$

a odtud

$$n = \frac{U_i}{N_v \cdot \frac{P}{a} \cdot \phi_0} \quad (7.62)$$

Pokud chceme navrhovat stroj na jisté otáčky, pak můžeme uvažovat jak s počtem vodičů N_v , tak počtem pólů a počtem paralelních větví.

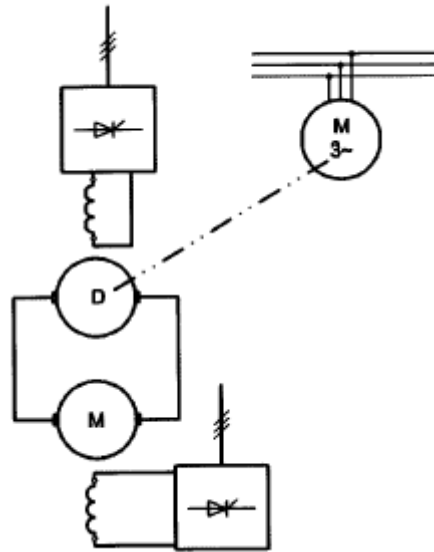
Na hotovém stroji však lze měnit otáčky pouze změnou svorkového napětí stroje nebo změnou buzení. Obvykle proto uvádíme zjednodušeně

$$n \sim \frac{U}{\phi} \quad (7.63)$$

Svorkové napětí na kotvě motoru lze v současné době hospodárně měnit pouze změnou napětí napájecího zdroje. Regulace napětí změnou předřadného odporu v kotevním obvodu, která se dříve u malých pohonů používala, dnes již nepřichází, pro velké ztráty energie, v úvahu.

Zdrojem regulovatelného napětí u nových pohonů bývají dnes již výhradně statické polovodičové usměrňovače. Protože však je v našem průmyslu ještě značné množství stejnosměrných regulovaných pohonů napájených z rotačních zdrojů, uvedeme ještě i tyto možnosti.

Rotační usměrňovače mění střídavý proud na stejnosměrný za použití rotačních strojů. Zdrojem stejnosměrného proudu je dynamo, které je poháněno střídavým asynchronním nebo synchronním motorem. Takovéto soustrojí se nazývá Leonardovo soustrojí a je nakresleno na obr. 7.41.



Obr. 7.41

Buzení dynamu i poháněného stejnosměrného motoru je v dnešní době již téměř výhradně z polovodičového měniče. Tím se nejen uspoří energie, ale dosáhne se i odstranění časových konstant v řídicích obvodech dynamu a motorů. Totéž platí i o buzení synchronních motorů, pokud jsou zde použity.

Jak jsme již uvedli v současné době jsou zdroje napětí pro stejnosměrné motory statické usměrňovače. Usměrňovače rtuťové jsou dnes již téměř raritou, používají se většinou usměrňovače polovodičové. Tam, kde není nutno plynule regulovat napětí se používají neřízené, ovšem pro regulované pohony mají význam pouze usměrňovače řízené. Napětí, získávané z těchto zdrojů je zvlněné. Protože indukčnost kotvy motoru je malá, je zvlněný i kotevní proud. Střídavá složka tohoto proudu způsobuje zvýšení přídatných ztrát ve vinutí a jak již bylo uvedeno zhoršuje komutaci. Pro snížení zvlnění se proto do kotevního obvodu zařazuje vyhlazovací tlumivka.

Regulaci otáček stejnosměrného motoru kotevním napětím můžeme použít od nulových do jmenovitých otáček stroje daných jmenovitým napětím a maximálním nabuzením motoru. Motor je schopen vyvíjet při všech rychlostech až do jmenovitých hodnot konstantní jmenovitý moment, takže výkon motoru roste lineárně s rychlostí od nuly až na jmenovitou hodnotu.

V elektrické trakci, kde se u pohonných jednotek používá několik stejných motorů (2 - 4), je možná skoková regulace napětím tak, že pro nejmenší rychlost jsou všechny motory zapojeny do série, pro větší rychlost sérioparalelně (dva v sérii a dva paralelně) a nakonec pro největší rychlost jsou spojeny všechny paralelně.

Jestliže chceme u stejnosměrných motorů dosáhnout vyšších otáček než odpovídá jejich jmenovitému napětí, musíme použít regulaci změnou velikosti magnetického toku to je odbuzování. Znamená to tedy, že změnou buzení lze otáčky pouze zvyšovat, neboť stroje jsou obvykle využity, takže zvyšováním magnetického toku otáčky téměř neklesají. Rozsah regulace otáček odbuzováním bývá až 1:3 nebo minimálně 1:2. Pokud však nejsou stroje dokonale vykompenzovány může již při maximálních odbuzeních docházet k nestabilnímu chodu. Navíc při maximálních otáčkách se zvyšuje i reaktanční napětí, takže může dojít ke komutačním potížím a k jiskření kartáčů. Proto se při odbuzení nedovoluje maximální přetížení stroje, ale jeho kotevní proud musí být omezen.

Při řízení otáček odbuzováním je dále nutno pamatovat na to, že zároveň se snižováním buzení klesá i moment motoru, který je závislý na toku.

V průmyslu se často používají mnohamotorové pohony napájené ze společného zdroje stejnosměrného proudu a to buď rotačního nebo statického. V tomto případě tímto společným zdrojem roztočíme všechny motory na základní - jmenovité otáčky, které nemusí být u všech motorů stejné a potřebné provozní otáčky pak nastavíme pomocí buzení každého motoru, které je v tomto případě napájené ze samostatných řízených budících zdrojů.

Dále je nutno pamatovat na to, že stejnosměrné motory, stejně jako motory střídavé, nelze spouštět přímým připojením k napájecí síti. Přímým připojením lze spouštět pouze malé motory u nichž vzniklý spouštěcí proud není vzhledem k síti veliký. Moderní pohony jednomotorové se spouštějí postupným zvyšováním kotevního napětí. Starší pohony, které nemají regulovatelný zdroj napětí, případně i motory trakční, používají spouštěcích odporů.

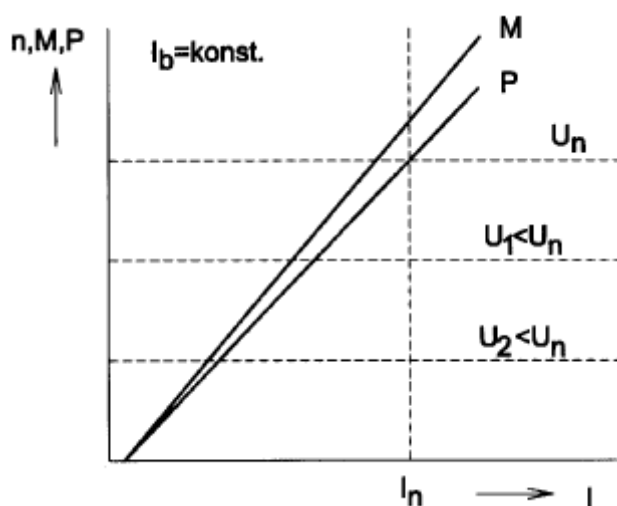
Při zapínání motorů s cizím buzením, derivačních i kompaundních je nutno pamatovat na to, že před sepnutím kotevního obvodu nebo lépe před připojením kotevního napětí je nutno nejdříve motor nabudit nejlépe na jmenovitou hodnotu budícího proudu.

Zvláštní pozornost je také nutno věnovat vypínání budících obvodů zvláště u motorů s cizím buzením. Při prostém odepnutí tohoto vinutí od sítě magnetická energie nahromaděná v tomto vinutí by se při rozpojení budícího obvodu nemohla uvolnit a vzniklo by velké přepětí v budícím obvodu, které by mohlo poškodit nejen budící vinutí, ale zvláště napájecí zdroj. Proto je nutno buď k tomuto vinutí paralelně připojit vybíjecí odpor, (eventuálně přes diodu či u reverzačního buzení přes tyristory), nebo je nutno způsobit vypínací pochod motoru tak, že vypneme kotvu, odbudíme motor a pak teprve odepneme budící vinutí.

Motor s cizím a derivačním buzením

Otáčková charakteristika tedy udává závislost otáček na zatěžovacím proudu nebo i momentu, při stálém budícím proudu a svorkovém napětí. Otáčky motoru se v provozu obvykle nejprve řídí při konstantním buzení svorkovým napětím a pro dosažení jmenovité hodnoty odbuzováním. Proto se i otáčkové charakteristiky udávají v těchto režimech.

Otáčkové charakteristiky při stálém buzení mají téměř stejný sklon, jsou tvrdé, jak ukazuje obr. 7.42.



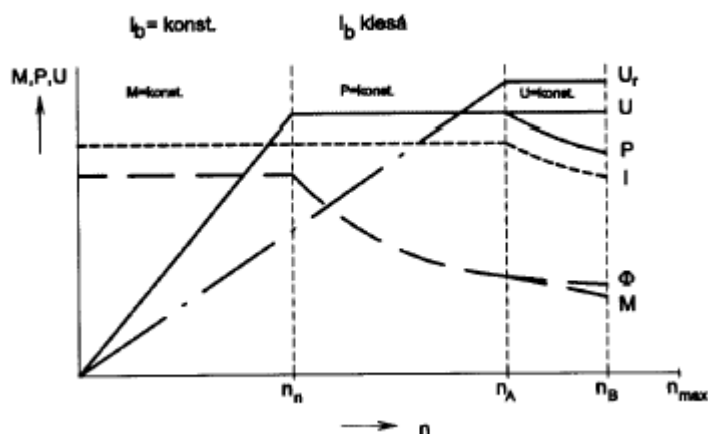
Obr. 7.42

V tomtéž obrázku je nakreslen průběh výkonu motoru a kroutícího momentu na hřídeli. Obě přímky se rozcházejí vlivem poklesu otáček.

Při zvyšování otáček odbuzováním, pak proud v kotvě necháváme konstantní, točivý moment se zmenšuje nepřímo úměrně otáčkám - úměrně zeslabování magnetického toku buzení. Když se kotevní proud nemění, nemění se ani reakce kotvy, takže pole hlavních pólů

se vzhledem k poli reakce kotvy zeslabuje. Proto se při odbuzeném stavu zvětšuje u nekompensovaných nebo nedokonale vykompenzovaných strojů nebezpečí labilního chodu. Diagram otáček a některých dalších veličin cizě buzeného motoru v celém regulačním rozsahu udává obr. 7.43.

U tohoto obrázku si podrobněji rozebereme regulaci otáček. Regulace otáček od nuly do jmenovitých, se děje zvyšováním kotevního napětí od nuly na jmenovitou hodnotu. Moment a tok je konstantní. Výkon roste lineárně s napětím za předpokladu konstantního proudu kotvy.



Obr. 7.43

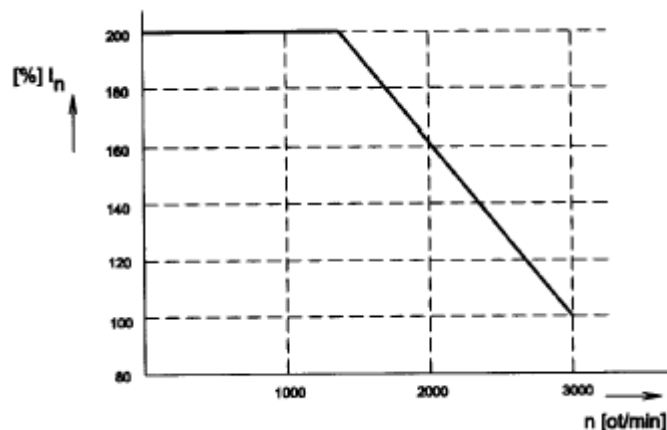
Další zvyšování otáček je možné odbuzováním, při konstantním kotevním napětí a výkonu a to až do otáček n_A . S hyperbolicky klesajícím tokem, klesá stejně i moment. Lineárně narůstající hodnota středního reaktančního napětí dosáhne v bodě A své maximální hodnoty, při níž je komutace stroje ještě vyhovující. Zvyšování otáček nad hodnotu n_A je možné pouze za předpokladu nepřekročení velikosti této hodnoty reaktančního napětí. Protože $U_r \sim nI$, je při zvyšování otáček nutno snižovat kotevní proud. Tím klesá výkon i moment motoru. Stroj se stává labilnější postupně se překomutovává a může začít jiskřit. Proto jsou pracovní dosažitelné otáčky omezeny na n_B – obvykle max. $3,5 - 4n_n$.

Regulační rozsah je jednoznačně omezen dosažením n_{max} , které jsou určeny mechanickou pevností rotujících částí, zvláště pak komutátoru, bandáže apod. Ochrana proti nadotáčkám – obvykle elektronická se nastavuje na $1,05 n_{max}$ a odstředivý vypínač na $1,1 n_{max}$. Motor musí být dimenzován na zkušební otáčky $1,2 n_{max}$.

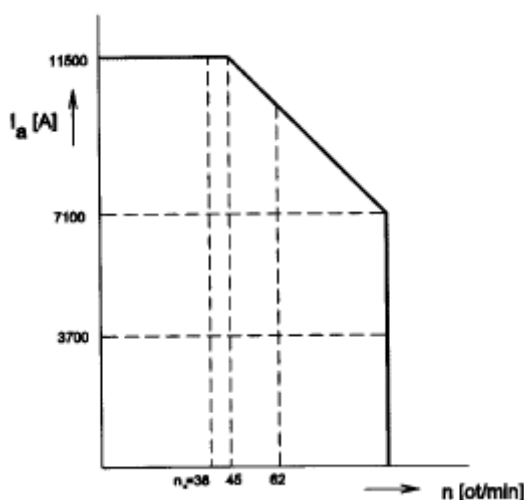
V našich úvahách jsme se záměrně dopustili jisté nepřesnosti v tom, že uspokojivá komutace tzn. případný vznik jiskření kartáčů není závislý na velikosti reaktančního, ale na velikosti zbytkového napětí v komutující cívice, tzn. na rozdílu mezi reaktančním a komutačním napětím a také na komutační schopnosti kartáčů.

Jak jsme již uvedli s ohledem na reaktanční napětí, které závisí na součinu proudu a otáček, můžeme u stejnosměrných motorů zvyšovat provozní otáčky nad otáčky jmenovité pouze za cenu menšího zatěžovacího proudu. Na tuto skutečnost je nutno pamatovat při regulaci otáček. Proto se u motorů uvádí proudová i momentová přetížitelnost v závislosti na otáčkách. Tak např. při jmenovitých otáčkách je přetížitelnost 2,5 až 3 násobná, ale při maximálních otáčkách již pouze 1 – 1,8 násobná. Přípustné proudové přetížení pro motory menších výkonů - okolo 100 kW je na obr. 7.44 a pro velký motor – 4100 kW na obr. 7.45. Jeho napětí je 1200 V a jmenovité otáčky 38 min^{-1} . Přetížitelnost je pochopitelně časově omezená. Obvykle je $2I_n$ dovoluje 15 – 20 s do n_n a 10 s nad n_n .

Změnu směru otáčení motoru s cizím buzením provedeme buď změnou polarity buzení nebo změnou polarity kotvy.



Obr. 7.44



Obr. 7.45

Sériové motory

Známe již, že $U \sim n\phi$ a $M \sim \phi I$. Při konstantním napětí U pak

$$\phi \sim \frac{1}{n} \quad (7.64)$$

Pak také můžeme napsat, že $n \sim \frac{1}{I}$ (7.65)

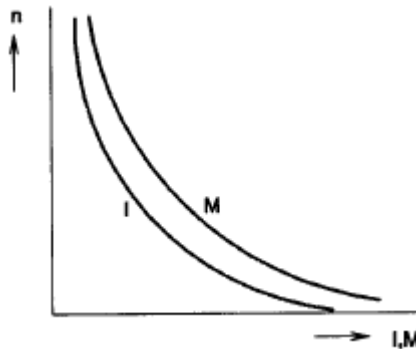
a také $M \sim I^2$ a $M \sim \frac{1}{n^2}$ (7.66)

Výkon motoru je $P = UI \sim \frac{1}{n}$ (7.67)

Je tedy patrné, že magnetický tok ϕ , zatěžovací proud I , výkon P musí mít v závislosti na otáčkách hyperbolický průběh. Točivý moment motoru je nepřímo úměrný druhé mocnině otáček. Při nulovém zatížení jdou otáčky k nekonečnu. Naopak pro nulové otáčky vychází nekonečně velký proud i záběrový moment. Přesto by při chodu bez zatížení mohly otáčky dosáhnout hodnot, při nichž by se stroj mechanicky poškodil. Proto sériový motor nesmí být

provozován naprázdno – bez zatížení. S ohledem na velký proudový i momentový ráz při spouštění musí být spouštění tohoto motoru vždy řízené.

Závislost momentu a proudu na otáčkách sériového motoru je na obr. 7.46.



Obr. 7.46

Sériový motor se užívá pro ty pohony, které vyžadují velký záběrový moment a u nichž není na závalu změna otáček se zatížením. Při větším zatěžovacím proudu se motor přibudí, tím se sníží jeho otáčky. Otáčky sériového motoru se přizpůsobují jeho zatížení. Jejich použití je zvláště v trakci. Částečná regulace otáček je také možná šuntováním budícího vinutí, čímž se motor odbudí. Jak jsme již uvedli sériový motor není při brždění schopen rekuperace a musí se brzdit do odporu, což je značná ztráta energie.

Otázky ke kap. 7. 12

1. Kde se používají sériové motory
2. Jakou mají sériové motory zatěžovací charakteristiku
3. Výhody a nevýhody použití motorů s cizím buzením
4. Jak rozběhnete motor s cizím buzením napájeným z usměrňovače na jmenovité otáčky
5. Co jsou motory kompaundní a protikompaundní

7.13 Stejnosměrný bezkartáčový motor (elektronicky komutovaný motor)

Čas

Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět

- Vysvětlit proč se používají bezkartáčové motory

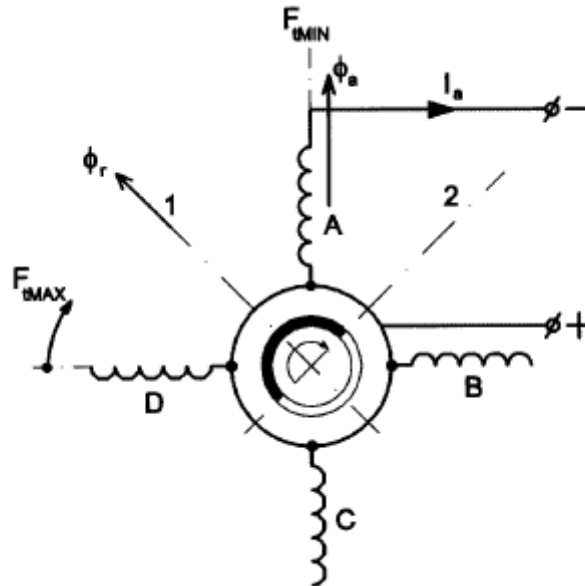
Výklad

Princip činnosti stejnosměrných strojů spočívá na udržování vzájemné kolmosti (90^0) dvou magnetických polí pomocí mechanického komutátoru. První pole tj. statorové pole, je vytvořeno budícím vinutím a druhé – rotorové pole je vybuzené zatěžovacím proudem. Základem tohoto systému je přivádění stejnosměrného proudu do otáčejícího se rotoru přes sběrné ústrojí a komutátor. Moment je úměrný proudu a toku.

Protože má takto vzniklý kluzný kontakt kartáč – komutátor řadu problémů (opotřebení, otáčkové omezení apod.) hledala se možnost odstranění tohoto kluzného kontaktu.

Nabízela se možnost tzv. převrácené konstrukce tzn. že magnety (nejlépe permanentní) jsou umístěny na rotoru a kotevní vinutí bylo na statoru. U normálního stejnosměrného stroje se však značný počet rotorových cívek postupně připojuje k napájecímu stejnosměrnému zdroji prostřednictvím komutátoru, který mění stejnosměrné napětí na střídavé. Jestliže

bychom tedy provedli prostou záměnu statorového vinutí s rotorovým, byl by na statoru velký počet cívek, z nichž každá by měla dva spínací prvky (tyristory, tranzistory). To by vedlo ke značné složitosti a velké ceně takového stroje. Proto se pak statorové cívky „převráceného“ stroje spojují do 3 ÷ 4 větších skupin, které jsou tvarem i provedením podobné vinutí jednotlivých fází střídavých strojů – obr. 7.47.



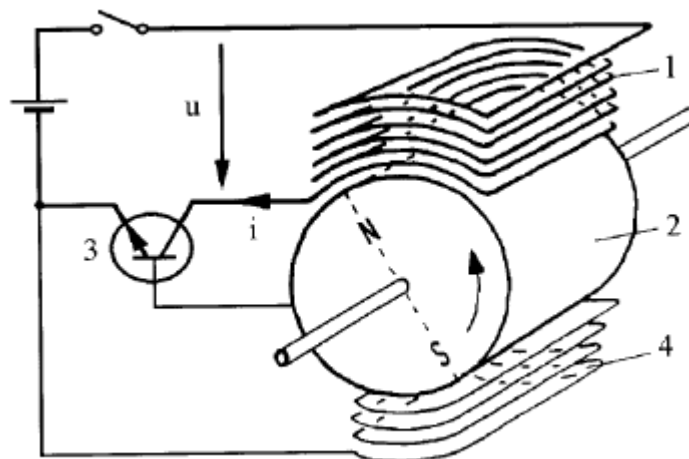
Obr. 7.47

Připojením např. fáze A na stejnosměrný zdroj vznikne ve statoru magnetického pole ϕ_A , do něhož je vtahován rotor s permanentními magnety. V poloze, kdy magnetické pole $\phi_r \perp \phi_A$ je tečná tažná síla F_{tMAX} největší, když osy obou polí splynou je F_{tMIN} nulová.

Přerušíme-li v poloze 1 napájecí proud I_A a současně zapneme proud I_B do fáze B pootočí se rotor do polohy 2, zde se vypne fáze B a sepne fáze C atd. Rychlostí spínání jednotlivých tyristorů se dá měnit rychlost otáčení rotoru.

Ke stanovení správného okamžiku pro spínání a rozepínání jednotlivých fází musí mít motor snímač, který vyhodnocuje vzájemnou polohu rotoru a statoru (opticky či magneticky).

Jednoduché provedení bezkartáčového motoru je na obr. 7.48. rotující magnet „2“ indukuje v řídicí cívce „1“ střídavé napětí, které je v jedné půlvlně spíná tranzistor „3“. Tím prochází statorovým vinutím „4“ proud a spolu s magnetickým polem rotoru vytváří pulsující moment.



Obr. 7.48

Dalším vývojem se zjistilo, že statorové vinutí musí mít minimálně tři sekce rozložené po obvodu. Z praktických důvodů jich není více jak 6.

Otázky ke kap. 7.13

- 1.Co je to bezkartáčový stejnosměrný motor
- 2..Na jakém principu pracuje

Literatura

- /1/ Cigánek, L.: Elektrické stroje, Naše vojsko Praha, 1951
- /2/ Cigánek, L. – Bauer, M.: Elektrické stroje a přístroje, SNTL Praha, 1955
- /3/ Kučera, J. – Hapl, J.: Vinutí elektrických strojů točivých, ČSAV Praha, 1959
- /4/ Bašta, J.: Teorie elektrických strojů, ČSAV Praha, 1957
- /5/ Poliak, F.: Elektrické pohony I, Slovenské vyd. Technické literatury Bratislava, 1957
- /6/ Bašta, J. – Chládek, J.: Teorie elektrických strojů, SNTL/ALFA Praha, 1968
- /7/ Petrov, G. N.: Elektrické stroje 2. ACADEMIC Praha, 1982
- /8/ Měřička, J. – Zoubek, Z.: Obecná teorie elektrického stroje, SNTL Praha, 1973
- /9/ Kolař, V. – Jurišica, L. – Žalman, M.: Technická kybernetika elektrických pohonov, Alfa Bratislava, 1978
- /10/ Hora, O. – Navrátil, J.: Regulace elektrických strojů, SNTL Praha, 1976
- /11/ Kopylov, L. P.: Stavba elektrických strojů, SNTL Praha 1988
- /12/ Chmelík K. – Asynchronní a synchronní elektrické stroje , Skriptum VŠB –TU, Ostrava 2002
- /13/ Chmelík K. – Stejnosměrné a komutátorové stroje, obecný stroj. Skriptum VŠB-TU,Ostrava 2001