7. STEJNOSMĚRNÉ STROJE

7.1 Použití a popis

Čas: 30 min

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. dynama 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 budicím proudem), velký kroutící moment při malých otáčkách, snadná přizpůsobivost zatěžovacích charakteristik poháněnému zařízení, poměrně velká výkonová i momentová přetížitelnost, atd.

Z výše uvedeného přehledu 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 přizpůsobeny.

Mnoho stejnosměrných strojů malých výkonů se používá v regulační technice. Jsou to zvláště tachodynama, 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}.

Základní části stejnosměrných strojů

K základním částem stejnosměrného stroje patří:

- pevná část stroje tj. stator,
- otáčivá část – rotor,
- kostra, 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.

Obrázky na CD

Otázky ke kap. 7.1

- Proč byly stejnosměrné stroje v minulosti hojně rozšířeny?
- Vyjmenujte základní části stejnosměrných strojů.
- Jaké jsou mezní výkony a napětí stejnosměrných strojů.

7.2 Princip činnosti stejnosměrného stroje

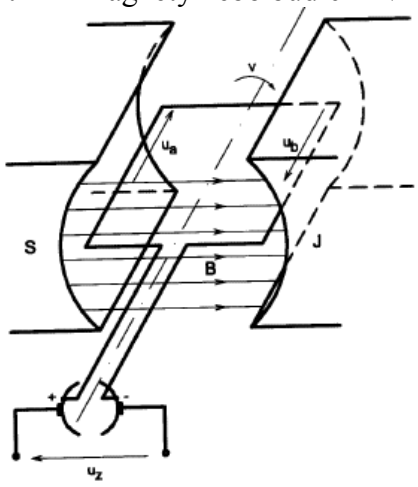
Čas: 1 hod

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. 7.1, se vytvoří buď permanentními magnety nebo budicím vinutím hlavních pólů.



Obr. 7.1

Otáčí-li se závit umístěný na rotoru rovnoměrnou rychlostí mezi dvěma póly, indukuje 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 kartáč vodič pod jižním pólem.
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

$$\frac{d\phi}{dt} = 0$$

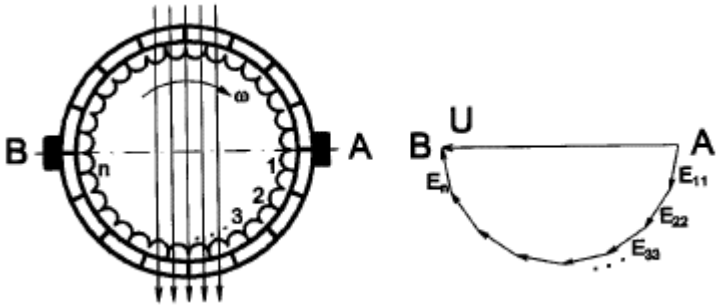
a $u_i = 0$. Zároveň dochází ke komutaci tj. cívka se zařadí do obvodu s opačnou polaritou. V poloze rovnoběžné s indukčními čarami je u_i maximální.

Stejnosměrný motor

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.

Funkce komutátoru

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 řídících členů. Každá lamela komutátoru je připojena k jednomu závitu nebo cívce vícefázového kotevního vinutí, spojeného do mnohoúhelníku viz obr. 7.2.



Obr 7.2

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

$$f_2 = \frac{p \cdot n_2}{60} \qquad (7.1)$$

Mezi kartáči A a B je napětí rovno součtu okamžitých hodnot E_1, E_2 … 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 … o f_2 mění na napětí U o $f_2 = 0$. Toto napětí je mezi kartáči, které stojí.

Otázky ke kap. 7.2

- Jak funguje komutátor u dynama?
- Jakou funkci plní komutátor u motoru ?
- K čemu slouží kartáče ?
- Jaké napětí se indukuje v rotoru ?

7.3 Indukované napětí a moment stejnosměrného stroje

Čas: 2 hod

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

$$u = B_\delta \cdot l_ž \cdot v \qquad (7.2)$$

kde B_δ je magnetická indukce ve vzduchové mezeře,
v je rychlost otáčení vodiče,
$l_ž$ 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 $N_v/2a \cdot t_p$. Střední hodnota indukovaného napětí v kotvě pak bude (viz obr. 7.3):

$$U_{stř} = \frac{N_v}{2a \cdot t_p} \int_{x=0}^{t_p} u \, dx = \frac{N_v}{2at_p} v \int_0^{t_p} B_\delta \cdot l_ž \, dx \qquad (7.3)$$

Označme si magnetický tok jednoho pólu vstupujícího do kotvy:

$$\phi_o = \int_0^{t_p} B_\delta \cdot l_ž \cdot dx$$

Za obvodovou rychlost můžeme dosadit

$$v = 2p \cdot t_p \cdot n$$

kde n jsou otáčky [s^{-1}]

Pak

$$U_i = \frac{N_v}{2at_p} 2p \cdot t_p \cdot n \cdot \phi_0 = N_v \cdot n \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi_0 \qquad (7.4)$$

Jiné vyjádření

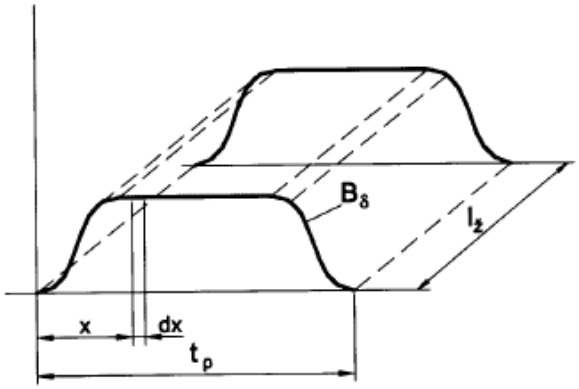
$$\phi_0 = \int_0^{t_p} B_{\delta stř} \cdot l_ž \, dx$$

můžeme převést na obdélníkový

$$\phi_0 = B_{\delta stř} \cdot l_ž \cdot t_p$$

a

$$B_{\delta stř} = \frac{\phi_0}{l_ž \cdot t_p} = \frac{\phi_0 \cdot 2p}{\pi \cdot D \cdot l_ž}$$



Obr. 7.3

a dosadíme

$$v = \omega_m \frac{D}{2}$$

pak

$$U_i = \frac{\phi_0 \cdot 2p}{\pi \cdot D \cdot l_ž} \cdot l_ž \cdot \omega_m \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{N_v}{2a} = \frac{p \cdot N_v}{2a \cdot \pi} \cdot \phi_0 \cdot \omega_m = k \cdot \phi_0 \cdot \omega_m \qquad (7.5)$$

kde $k = \frac{p \cdot N_v}{2a \cdot \pi}$ (7.6)

Zvlnění napětí

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:

pro dynamo

$$U_i = U + R \cdot I_a \qquad (7.7)$$

pro motor

$$U = U_i + R \cdot I_a \qquad (7.8)$$

kde U je svorkové napětí stroje,
R je odpor celého kotevního obvodu,
I_a proud kotvy.

Frekvence napětí kotvy

Střídavé napětí indukované v cívce má dobu kmitu T. U dvoupólového stroje odpovídá úhlu 360° tj. jedné otáčce 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

$$f = \frac{1}{T} = p \cdot n \qquad (7.9)$$

Stejnosměrné stroje se obvykle vyrábějí jako více-pólové, 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

$$F = B \cdot l \cdot i \qquad (7.10)$$

kde l je délka vodiče rovna délce aktivní strany cívky.

Kartáče přiložené na komutátor trvale dělí vinutí stejnosměrného stroje na 2a paralelních větví. Každým vodičem tedy protéká proud

$$i = \frac{I}{2a} \qquad (7.11)$$

kde a je celkový počet je N_V.

Střední hodnotu magnetické indukce vypočítáme ze vztahu:

$$B_{stř} = \frac{\phi_0}{l_e \cdot t_p} \qquad (7.12)$$

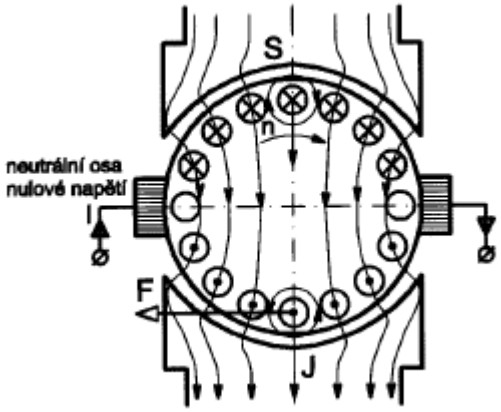
Pro působiště síly je důležitý vnější obvod kotvy, tedy tato síla působí na poloměru D/2 – obr. 7.4. Pólovou rozteč t_p si vyjádříme pomocí tohoto průměru, tedy

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2p}$$

Točivý moment pak bude

$$M = F \cdot \frac{D}{2} \cdot N_v = \frac{\phi_0 \cdot 2p}{l_e \cdot \pi \cdot D} \cdot l_e \cdot \frac{I}{2a} \cdot N_v \cdot \frac{D}{2} = \frac{1}{2\pi} \cdot N_v \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi_0 \cdot I = k \cdot \phi \cdot I \qquad (7.13)$$

kde k viz rce (7.6)



Obr. 7.4

Otázky ke kap. 7.3

- Z jakého vztahu vycházíme při odvození indukovaného napětí stejn směrného stroje?
- Kterými parametry můžeme měnit napětí u dynama?
- Na čem je závislé svorkové napětí u motoru?
- Uveďte vztah pro moment stejnosměrného motoru.

7.4 Magnetický obvod stejnosměrného stroje

Čas: 45 min

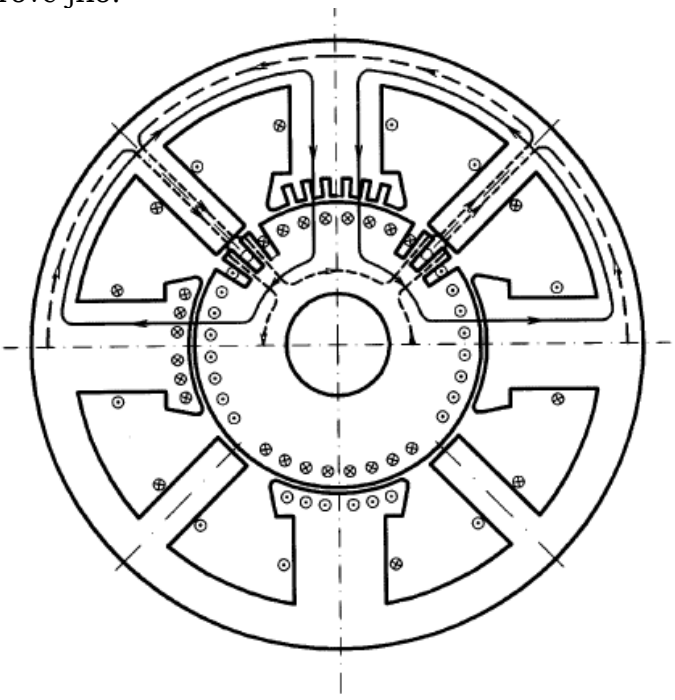
Po prostudování této kapitoly budete umět

- 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. 7.5. Z něj je rovněž patrno rozdělení na uvedené úseky. Jsou to:

- hlavní pól,
- vzduchová mezera,
- zuby kotvy,
- jho kotvy,
- drážkovaná část hlavního pólu (pólového nástavce),
- statorové jho.



Obr. 7.5

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.

$$U_0 = U_i = N_v \cdot n \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi_0 \qquad (7.14)$$

Při konstantních otáčkách n bude napětí stroje závislé pouze na magnetickém toku, protože ostatní veličiny jsou pro daný stroj konstanty.

Protože magnetický tok závisí na magnetickém napětí hlavního pólu F_h, ale také

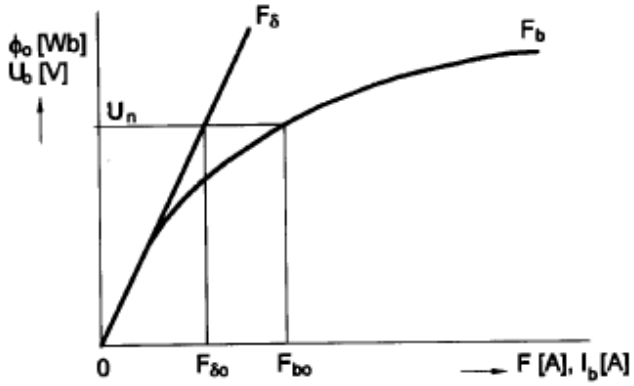
$$F_b = I_b \cdot N_b \qquad (7.15)$$

a také proto, že počet závitů budicích cívek je pro daný stroj konstantní, můžeme vynést stejnou závislost mezi napětím naprázdno a budicím proudem tedy

$$U_0 = f(I_b)$$

a tuto závislost nazýváme charakteristikou naprázdno při konstantních otáčkách stroje.

Charakteristiku naprázdno a její průběh snadno změříme. Charakteristika naprázdno je nakreslena na obr. 7.6.



Obr. 7.6

Otázky ke kap. 7.4

- Vyjmenujte části mg. obvodu stejnosměrného stroje.
- Jak změříte charakteristiku naprázdno?
- Napište vztah pro budicí mg. napětí.

7.5 Reakce kotvy

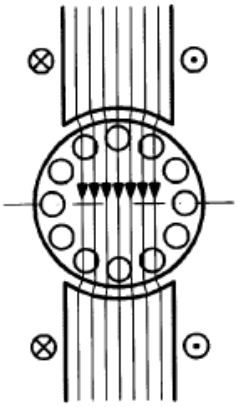
Čas: 1 hod

Po prostudování této kapitoly budete umět

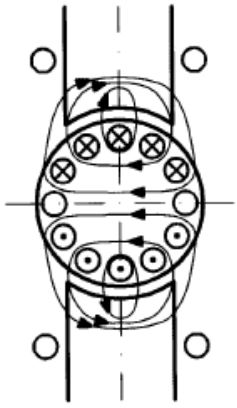
- Popsat stejnosměrný stroj při zatížení.
- Určit negativní důsledky reakce kotvy na činnost stroje.
- Vysvětlit účel kompenzačního vinutí.

Výklad

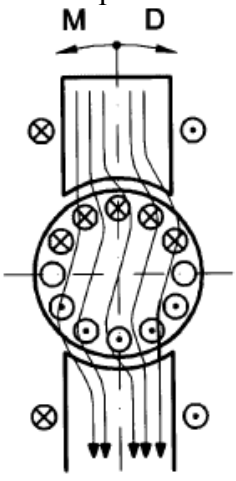
Při zatížení protéká vinutím kotvy proud, který vytváří vlastní magnetické pole. Toto pole se nazývá polem reakce kotvy. Magnetické poměry ve stroji si znázorníme na jednoduchém dvoupólovém stroji. Na obr. 7.7 je stroj při chodu naprázdno, kdy má jen magnetické pole buzené proudem hlavních pólů. Pole hlavních pólů má směr svislý, shora dolů. Na obr. 7.8 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 doleva. 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. 7.9.



Obr. 7.7



Obr. 7.8



Obr.7.9

Výsledné pole je deformováno a to u dynama ve směru otáčení kotvy a u motoru proti směru otáčení (to vyplývá z obr. 7.9 uvědomíme-li si, že mg. pole je ve stavu mechanického napětí a snaží se zkrátit délku indukčních čar). Uvedený výklad je pochopitelně zjednodušený.

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 a kompenzačního vinutí vzájemně sladěno.
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.

Otázky ke kap. 7.5

- Vysvětlete reakci kotvy.
- Zdůvodněte negativní působení reakce kotvy.
- Vysvětlete funkci kompenzačního vinutí.

7.6 Podstata komutace

Čas: 2 hod

Po prostudování této kapitoly budete umět

- Vysvětlit podstatu komutace.
- Definovat reaktanční napětí.
- Vysvětlit pojmy a definice.

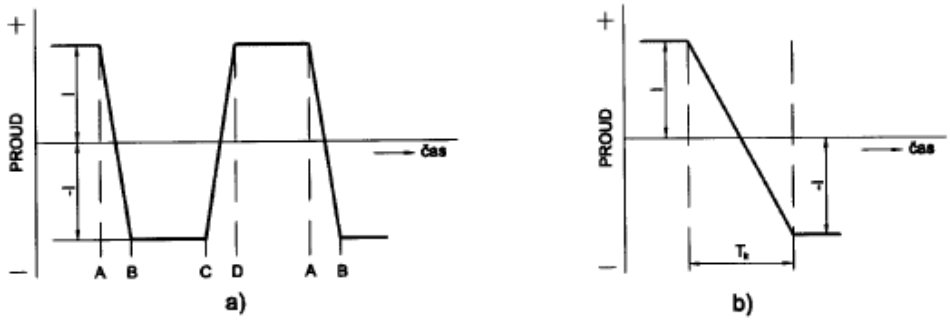
Výklad

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.

Proud v cívce kotvy při komutaci

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. 7.10a 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. 7.10

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 (tvorba patiny) 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.

Průběh komutace proudu v cívce

Komutační pochod si rozebereme za pomocí obr.7.11. 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. 7.11a probíhá proud cívkou jedním směrem. Na tomto obrázku je proud protékající spojkami vinutí s lamelami přímo úměrný dotykové ploše kartáče s lamelou tedy 2I. 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. 7.11c. Tato změna proudu proběhne za určitý čas, který nazýváme dobou komutace T_k. Nechť podle obr. 7.11b 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.

$$i_1 = \frac{2}{3} 2 \cdot I$$

a

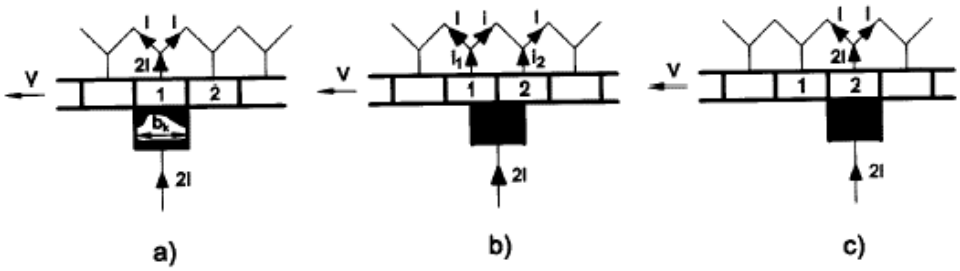
$$i_2 = \frac{1}{3} 2 \cdot I$$

Je to čas během něhož je cívka spojena kartáčem nakrátko. Je-li izolace mezi lamelami zanedbatelně tenká, pak je **doba komutace** (viz obr. 7.10b)

$$T_k = \frac{b_k}{v_k} \qquad (7.16)$$

kde b_k je šířka kartáče

v_k obvodová rychlost komutátoru.



Obr. 7.11

Zjednodušení

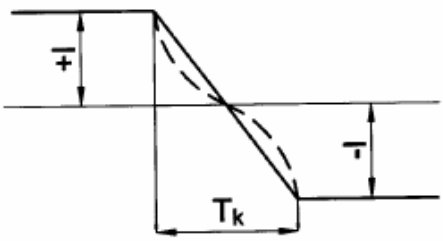
Při velmi malé rychlosti otáčení můžeme zanedbat vliv indukčnosti cívky a pak průběh proudu během komutace bude přímkový. Průběh je znázorněn na obr. 7.12. Ideální přímkovou komutaci dostaneme za těchto zjednodušujících předpokladů:

- rozdělení proudů ve spojkách cívek je dáno přechodovým odporem R_p,
- indukčnosti cívek kotvy zanedbáváme,
- při komutaci je cívka v nulovém magnetickém poli.

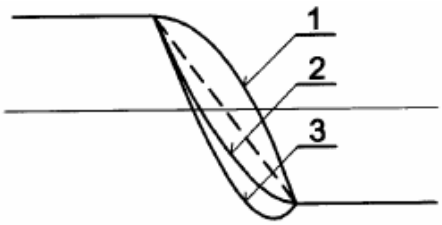
Skutečný stav

Nezanedbáme-li odpory vinutí a spojek, pak nebude změna proudu lineární, nýbrž bude mít průběh naznačený na obr. 7.13 čárkovaně. Tomuto průběhu říkáme odporová komutace. Hustota proudu nebude v tomto případě konstantní v celé kluzné ploše kartáče.

U skutečných strojů není rychlost pohybu kotvy zanedbatelná a v komutující cívce se indukuje rozptylovým polem reaktanční napětí u_r. V praxi je toto napětí větší než úbytek 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. 7.13, 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. 7.12



Obr. 7.13

Komutační napětí

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. U dynam je to 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 cívce. 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. 7.13, 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.

Určení reaktančního napětí

V komutující cívce s indukčností L_c se při změně proudu indukuje reaktanční napětí (bez ohledu na znaménko).

$$u_r = L_c \cdot \frac{di}{dt} \qquad (7.17)$$

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

$$U_r = L_c \frac{2I}{T_k} \qquad (7.18)$$

Velikost reaktančního napětí nemá překročit cca 3 V u strojů bez pomocných pólů a cca 17 V u strojů s pomocnými póly.

Otázky ke kap. 7.6

- Co je to komutace?
- Vysvětlete dobu komutace cívky.
- Kde se musí nacházet cívka v době komutace?
- Proč vzniká reaktanční napětí?
- Jaké mohou být průběhy proudu v době komutace cívky a proč?
- Maximální velikost reaktančního napětí.

7.7 Natočení kartáčů a pomocné (komutační) póly

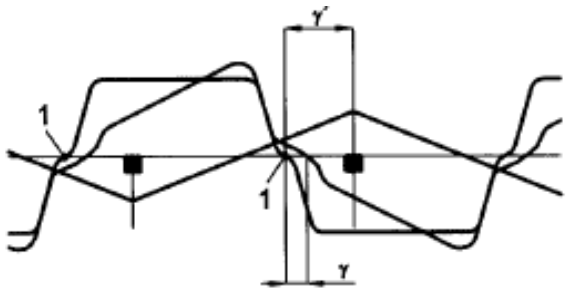
Čas: 45 min

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 smyslu a u motorů proti smyslu otáčení, jak již bylo uvedeno. Vysvětlení je patrné z obr. 7.14.



Obr. 7.14

Jestliže by kartáče zůstaly v geometrické neutrále – body 1 na obr. 7.14, ocitly by se v magnetickém poli, které bude do komutujících cívek indukovat napětí. 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 pólem ve směru točení, aby se do komutující cívky indukovalo opačné napětí než u_r, tedy u_k.

Pomocné póly

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.

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 zvlášť 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.
Polarita pomocných pólů:

- 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

- Jakými způsoby se omezuje reaktanční napětí?
- Co je důležité při konstrukci pomocných pólů?
- Jakou mají polaritu pomocné póly vzhledem k pólům hlavním?

7.8 Vliv změn kotevního proudu a konstrukce stroje na komutaci

Čas: 1,5 hod

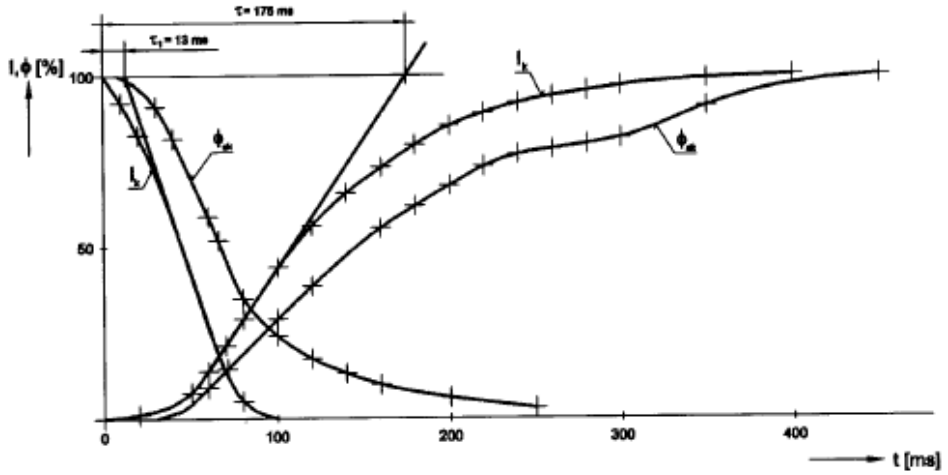
Po prostudování této kapitoly budete umět

- 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 kA/s), vlivem vířivých proudů ke zpožďování pole pomocných pólů za proudem kotvy.

Na obr. 7.15 je průběh kotvy a magnetického toku p.p. při rozběhu na n_{jm} a při zastavení stroje.



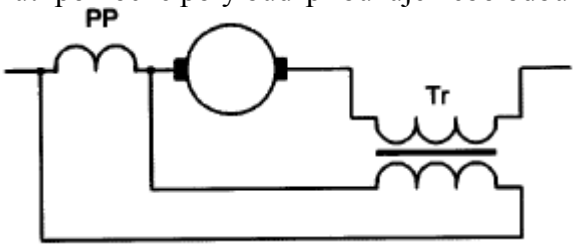
Obr. 7.15

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 $300 \cdot I_n.s^{-1}$.

Vliv zvlnění proudu na komutační proces

Jestliže se nyní vrátíme k důsledkům zpožďování 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. 7.15.

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. 7.16. 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.



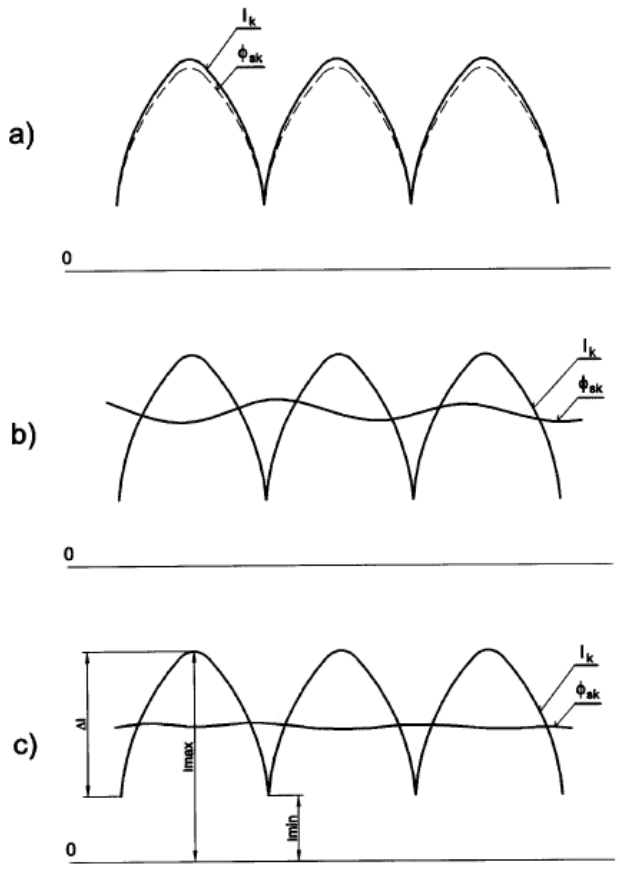
Obr. 7.16

Napájení motorů ze statických měničů

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:

- nedokonalým usměrněním
- a 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. 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 zjistitelná 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. 7.17. Z tohoto důvodu se většinou u strojů udává přípustná strmost proudových změn a to obvykle $(100 – 300)\cdot I_n.s^{-1}$.



Obr. 7.17

Komutace bez jiskření kartáčů

Pro ideální bezjiskrovou 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

$$u_r + u_k = 0 \qquad (7.19)$$

Jestliže

$$u_r = L \cdot \frac{di}{dt} > u_k \qquad (7.20)$$

pak bude stroj podkomutován a když

$$u_r = L \cdot \frac{di}{dt} < u_k \qquad (7.21)$$

pak 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 změní na tvar

$$u_r + u_k = u_{zb} \qquad (7.22)$$

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 nazveme jej komutační schopností kartáčů. Pro případ bezjiskrové komutace musí platit

$$u_{kk} \geq u_{zb} \qquad (7.23)$$

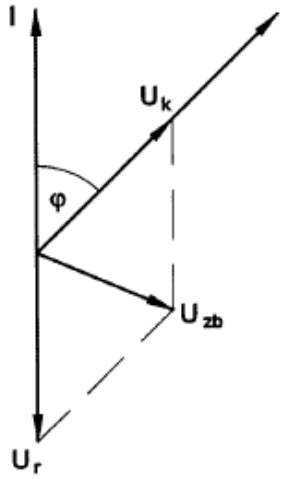
Jestliže v kterémkoliv okamžiku v průběhu komutace nastane takový stav, že

$$u_r + u_k + u_{kk} \neq 0 \qquad (7.24)$$

pak nahromaděná energie v komutující cívce se projeví jiskrovým nebo obloukovým výbojem mezi kartáčem a komutátorem.

Komutace při přechodných stavech stroje

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 cívce polem pomocných pólů, je však úměrné velikosti magnetického toku pod pomocným pólem 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. 7.18. Na tomto obrázku jsou zobrazeny vektory proudů I a toku ϕ vzájemně posunuty o úhel φ. Ve fázi s tokem musí být U_k. Proudu I odpovídá v opozici Ur. 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. 7.17. Průběhy b, c byly překresleny z výsledků měření na stejnosměrném motoru 840 kW.



Obr.7.18

Negativní vlivy zvlněného 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.

Zvlněný proud způsobí:

- zhoršení komutace,
- zvýšení ztrát a tím i oteplení stroje,
- zvýšení lamelového napětí,
- vysokofrekvenční ložiskové proudy,
- kolísání momentu.

Komutace při zvlněném 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 cívce transformační napětí

$$u_{tr} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_c \cdot \phi_m \qquad (7.25)$$

Při pulzujícím proudu však komutace proudu cívky probíhá v každém okamžiku různě. Doba komutace T_k je stále stejná a obvykle menší než perioda pulzací proudu (asi 10^{-3}s). Během této doby komutace probíhá s proudem o různé velikosti, což má za následek nestejnou strmost změny proudu, a také další střídavou složku reaktančního napětí.

Je-li také buzení stroje napájeno zvlněným proudem, indukuje se vlivem dobré magnetické vazby mezi komutující cívkou a budicím vinutím střídavé napětí do komutující cívky. Pro motory s cizím buzením v důsledku velké indukčnosti budicího 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 také se zvětšuje vytlačování 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

$$R_{ST} = k_r \cdot R_{SS} \qquad (7.26)$$

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_{c2}.

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 izolují od základu.

Kolísání momentu

U velkých strojů je tento vliv zanedbatelný.

Otázky ke kap. 7.8

- Co je příčinou rychlých proudových změn při činnosti motoru?
- Jaké konstrukční provedení musí mít motor, který je určen pro napájení zvlněným proudem?
- Co se indukuje v komutující cívce při napájení zvlněným proudem?
- Co způsobuje zpoždění toku pomocných pólů za proudem kotvy?
- Jaké negativní důsledky má zvlněný proud na činnost stejn směrného motoru?

7.9 Rozdělení strojů podle způsobu buzení

Čas: 30 min

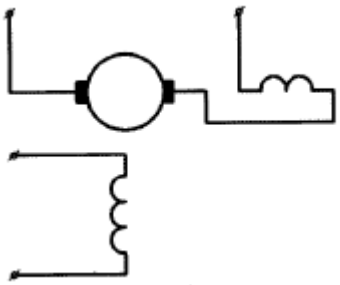
Po prostudování této kapitoly budete umět

- Rozdělit stejnosměrné stroje podle uspořádání budicího vinutí.
- Popsat vlastnosti strojů s různým buzením.

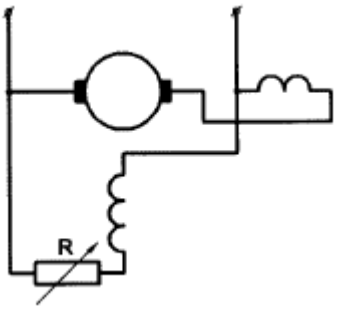
Výklad

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:

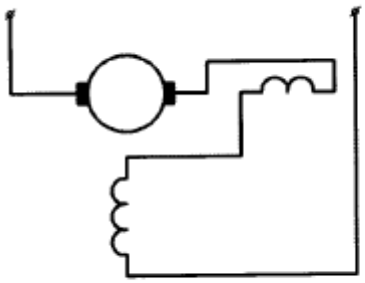
- cizí buzení, kdy na hlavních pólech je umístěno vinutí, které je napájeno z cizího zdroje, nezávislého na napětí kotvy, obr. 7.19
- buzení derivační je uspořádáno takovým způsobem, že vinutí budicí je připojeno paralelně k vinutí kotvy, obr. 7.20
- u sériového buzení je budicí vinutí stroje připojeno do série s kotevním vinutím, obr. 7.21
- smíšené buzení - na hlavních pólech jsou umístěna minimálně dvě vinutí, napájena různým způsobem, obvykle jedno je derivační a druhé sériové, obr. 7.22. U tohoto vinutí jsou dva základní druhy a to:
    - kompaudní buzení - kdy obě buzení vytvářejí magnetické napětí ve stejném smyslu,
    - protikompaudní 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.



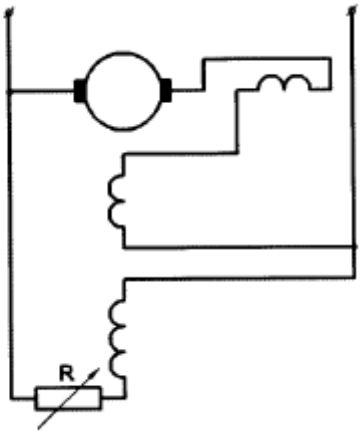
Obr. 7.19



Obr. 7.20



Obr. 7.21



Obr. 7.22

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.

Otázky ke kap. 7.9

- Jaké druhy strojů podle způsobu buzení rozeznáváte?
- Kde se jednotlivé druhy strojů používají?
- Jaké může mít stejnosměrný stroj buzení?

7.10 Vlastnosti a použitelnost motorů

Čas: 1,5 hod

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

Stejnosměrné motory jsou nejstarším 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:

- budicí obvod, ve kterém je budicí 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. 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

$$M = c \cdot \phi \cdot I \qquad (7.27)$$

Mezi svorkovým napětím a napětím indukovaným platí vztah

$$U_i = U - R \cdot I - \Delta U_k \qquad (7.28)$$

Mechanický moment na hřídeli je také určen

$$M = \frac{P}{\omega} \qquad (7.29)$$

kde P je mechanický výkon stroje

$$P = P_1 - \Delta P = U_i \cdot I = c \cdot \phi \cdot \omega \cdot I \qquad (7.30)$$

Příkon motoru je

$$P_1 = U \cdot I$$

Regulace otáček

Abychom si uvědomili na čem závisí otáčky stejnosměrného stroje, připomeneme si rovnici

$$U_i = N_v \cdot n \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi_0 \qquad (7.31)$$

a odtud

$$n = \frac{U_i}{N_v \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi_0} \qquad (7.32)$$

Pokud chceme navrhovat stroj na určité 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

$$n \sim \frac{U}{\phi} \qquad (7.33)$$

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 v úvahu, pro velké ztráty energie.

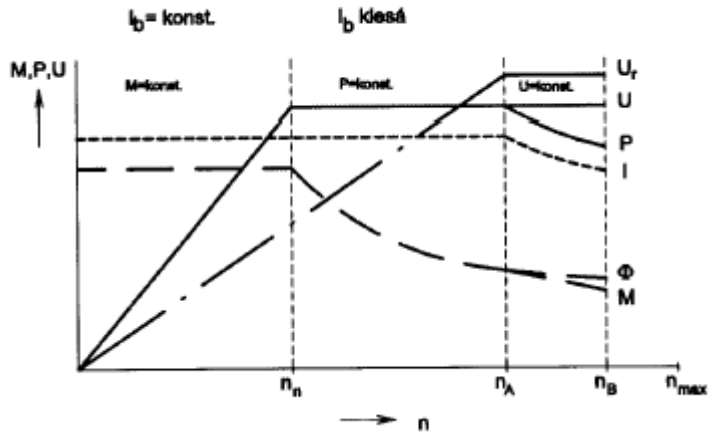
Zdrojem regulovatelného napětí u nových pohonů bývají dnes již výhradně statické polovodičové usměrňovače.

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.

Při zvyšování otáček odbuzováním (proud v kotvě necháváme konstantní) točivý moment se zmenšuje nepřímo úměrně otáčkám a 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 nekompenzovaných nebo nedokonale vykompenzovaných strojů nebezpečí labilního chodu. Diagram otáček a některých dalších veličin cize buzeného motoru v celém regulačním rozsahu udává obr. 7.23.

U tohoto obrázku si podrobněji rozebereme regulaci otáček. Regulace otáček od nuly do jmenovitých hodnot, 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. 7.23

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 $U_r \sim n \cdot I$, 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 pracovně dosažitelné otáčky omezeny na n_B – obvykle max. $(3{,}5 - 4)n_n$.

Regulační rozsah

Jestliže chceme u stejnosměrných motorů dosáhnout vyšších otáček než odpovídá jejich jmenovitému napětí, musíme použít regulaci změnou velikosti magnetického toku, tzv. 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.

Mnohomotorové pohony

V průmyslu se často používají mnohomotorové pohony napájené ze společného zdroje stejnosměrného proudu a to buď rotačního nebo statického. V tomto případě 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 napájeno ze samostatných řízených budicích zdrojů.

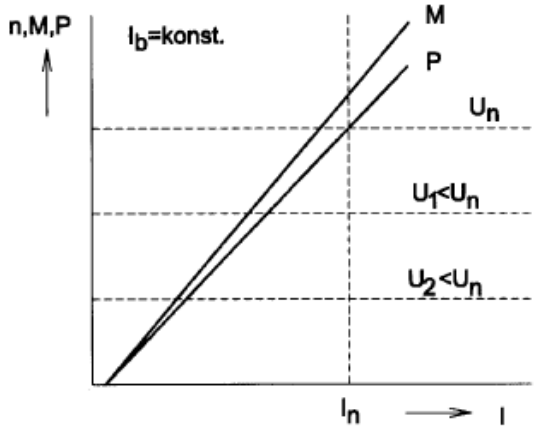
Buzení motorů

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 budicího proudu.

Zvláštní pozornost je také nutno věnovat vypínání budicích obvodů zvláště u motorů s cizím buzením. Při odepnutí tohoto vinutí od sítě, magnetická energie nahromaděná v tomto vinutí by se při rozpojení budicího obvodu nemohla uvolnit a vzniklo by velké přepětí v budicím obvodu, které by mohlo poškodit nejen budicí 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 uzpůsobit postup vypínání motoru tak, že vypneme kotvu, odbudíme motor a pak teprve odepneme budicí vinutí.

Motor s cizím a derivačním buzením

Otáčková charakteristika tedy udává závislost otáček na zatěžovacím proudu nebo i momentu, při stálém budicím proudu a svorkovém napětí. Otáčky motoru se v provozu obvykle nejprve řídí, při konstantním buzení, svorkovým napětím a po dosažení jmenovité hodnoty odbuzováním. Proto se i otáčkové charakteristiky udávají v těchto režimech.



Obr. 7.24

Otáčkové charakteristiky při stálém buzení mají téměř stejný sklon, jsou tvrdé, jak ukazuje obr. 7.24.

V tomtéž obrázku je nakreslen průběh výkonu motoru a kroutícího momentu na hřídeli. Obě přímky se rozcházejí vlivem poklesu otáček.

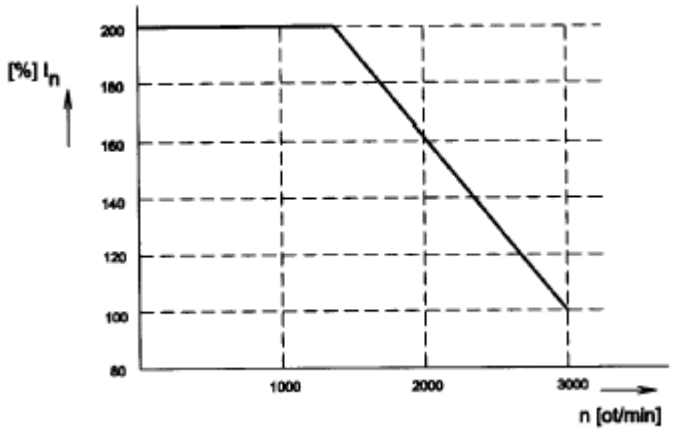
Omezení regulačního rozsahu

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 $1{,}05 \cdot n_{max}$ a odstředivý vypínač na $1{,}1 \cdot n_{max}$. Motor musí být dimenzován na zkušební otáčky $1{,}2 \cdot n_{max}$.

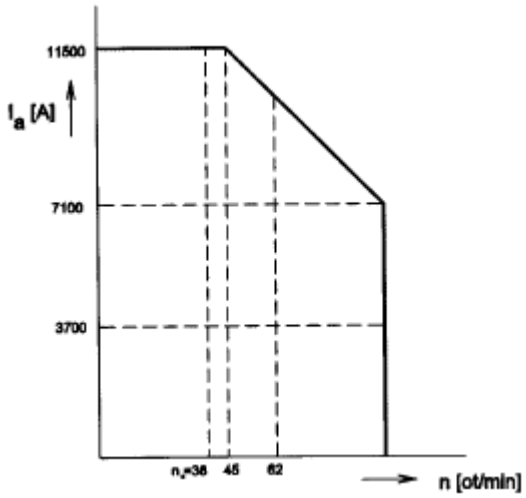
V našich úvahách jsme se záměrně dopustili jisté nepřesnosti v tom, že uspokojivá komutace, tzn. že případný vznik jiskření kartáčů není závislý na velikosti reaktančního, ale na velikosti zbytkového napětí v komutující cívce, tzn. na rozdílu mezi reaktančním a komutačním napětí a také na komutační schopnosti 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. 7.25 a pro velký motor – 4,1 GW na obr. 7.26. Jeho napětí je 1200 V a jmenovité otáčky 38 min^{-1}. Přetížitelnost je pochopitelně časově omezená. Obvykle je $2 \cdot I_n$ dovoluje 15–20s 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. 7.25



Obr. 7.26

Sériové motory

Známe již, že U ~ n·ϕ a M ~ ϕ·I. Při konstantním napětí U pak

$$\phi \sim \frac{1}{n} \tag{7.34}$$

Pak také můžeme napsat, že

$$n \sim \frac{1}{I} \tag{7.35}$$

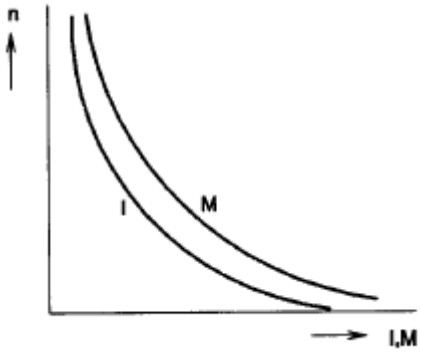
a také M ~ I_2 a

$$M \sim \frac{1}{n^2} \tag{7.36}$$

Výkon motoru je

$$P = U \cdot I \sim \frac{1}{n} \tag{7.37}$$

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. 7.27.



Obr. 7.27

Sériový motor se užívá pro ty pohony, které vyžadují velký záběrový moment a u nichž není na závadu 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 budicího 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. 7.10

- Kde se používají sériové motory?
- Jakou zatěžovací charakteristiku mají sériové motory?
- Jaké jsou výhody a nevýhody použití motorů s cizím buzením?
- Jak rozběhnete motor s cizím buzením napájeným z usměrňovače na jmenovité otáčky ?
- Co jsou motory kompaudní a protikompaudní?

7.11 Stejnosměrný bezkartáčový motor (elektronicky komutovaný motor)

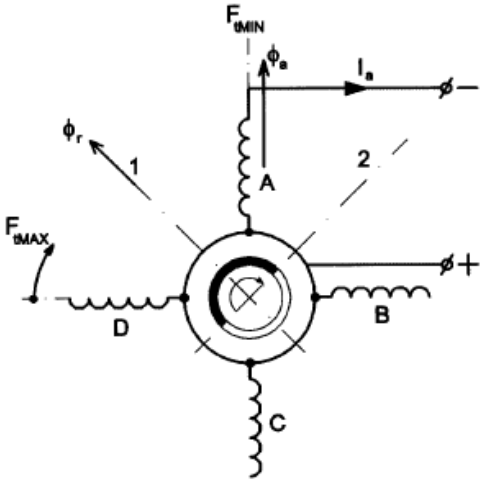
Čas: 20 min

Po prostudování této kapitoly budete umět

- Vysvětlit proč se používají bezkartáčové motory.

Výklad

Princip činnosti stejnosměrných strojů spočívá na udržování vzájemné kolmosti (90°) dvou magnetických polí pomocí mechanického komutátoru. První pole tj. statorové pole, je vytvořeno budicím vinutím a druhé – rotorové pole je vybuzeno 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 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).



Obr. 7.28

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. 7.28.

Princip činnosti

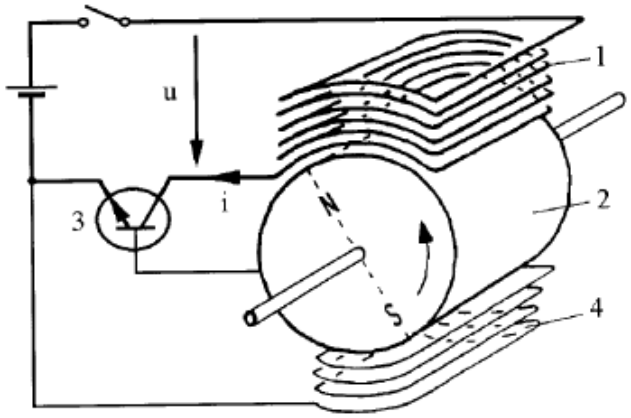
Připojením např. fáze A na stejnosměrný zdroj vznikne ve statoru magnetické pole ϕ_A, do něhož je vtahován rotor s permanentními magnety. V poloze, kdy magnetická pole ϕ_r a ϕ_A jsou na sebe kolmé, je tečná tažná síla F_t největší, když osy obou polí splynou je F_t nulová.

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).

Příklad provedení

Jednoduché provedení bezkartáčového motorku je na obr. 7.29. Rotující magnet „2“ indukuje v řídící 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. 7.29

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. 7.11

- Co je to bezkartáčový motor?
- Jaké jsou výhody bezkartáčového motoru?

8. 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. – Hampl, 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. ACADEMIA 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

Odpovědi na otázky v textu kapitol:

1. Proč byly stejnosměrné stroje v minulosti hojně rozšířeny?
Pro své výhodné regulační vlastnosti

2. Vyjmenujte základní části stejnosměrných strojů.
Základní části stejnosměrných strojů jsou : kotva (rotor) s vinutím uloženém v drážkách, stator s hlavními póly (na kterých je umístěno budicí vinutí a vinutí kompenzační), pomocnými póly s vinutím. Další základní části jsou komutátor, kostra, hřídel, ložiska, sběrné ústrojí.

3. Jaké jsou mezní výkony a napětí stejnosměrných strojů.
Maximální výkony stejnosměrných strojů jsou okolo 5 MW, při max. otáčkách okolo 100 min^{-1}. Velikost součinu výkonu a otáček je omezena elektromagnetickými parametry (reaktanční napětí, lamelové napětí apod.), dále dopravními možnostmi apod. Nejvyšší napětí u stejnosměrných strojů je 1200 V.

4. Jak funguje komutátor u dynama?
U dynama má komutátor funkci usměrňovače

5. Jakou funkci plní komutátor u motoru?
Mění stejnosměrný proud na střídavý.

6. K čemu slouží kartáče?
Převádějí proud ze stojící na rotující část (nebo opačně), zkratují cívky v době komutace a vyrovnávají rozdíly mezi reaktančním a komutačním napětím.

7. Jaké napětí se indukuje v rotoru ss stroje?
Střídavé dle f = n.p

8. Z jakého vztahu vycházíme při odvození indukovaného napětí stejnosměrného stroje?
Základním vztahem je pohybová rovnice $u = B \cdot l \cdot v$

9. Kterými parametry můžeme měnit napětí u dynama?
Velikost napětí je dána $U = k \cdot \Phi \cdot n$, tedy budicím proudem a otáčkami.

10. Na čem je závislé svorkové napětí u motoru?
Velikost svorkového napětí u motoru je dána napětím napájející sítě nebo jiného zdroje (usměrňovače).

11. Uveďte vztah pro moment stejnosměrného motoru.
Moment stejnosměrného motoru je $M = c \cdot \Phi \cdot I$

12. Vyjmenujte části mg. obvodu stejnosměrného stroje.
Magnetický tok se ve stejnosměrném stroji uzavírá obvodem, který je tvořen vzduchovou mezerou, zuby rotoru, jhem rotoru, jhem statoru a hlavním pólem.

13. Jak změříte charakteristiku naprázdno?
Charakteristika naprázdno ss stroje se měří při jmenovitých otáčkách, bez zatížení. Je to závislost svorkového napětí na budicím proudu.

14. Napište vztah pro budicí mg. napětí.
$F_b = I_b . N_b$

15. Vysvětlete reakci kotvy.
Při zatížení stroje protéká vinutím kotvy proud, který vytvoří vlastní magnetické pole. Toto pole se nazýváme polem reakce kotvy. Pole reakce kotvy je kolmé na osu hlavních pólů.

16. Zdůvodněte negativní působení reakce kotvy.
Mg. pole hlavních pólů se skládá s polem reakce kotvy v jediné pole ve stroji. Toto výsledné pole je však reakčním polem deformováno, což přináší např. posunutí neutrální osy, má demagnetizační účinek.

17. Vysvětlete funkci kompenzačního vinutí.
Kompenzační vinutí kompenzuje vliv reakce kotvy a tím zrovnoměrňuje mg. pole ve vzduchové mezeře.

18. Co je to komutace.
Komutace je přechodový jev při postupném přepínání cívek vinutí kotvy z jedné paralelní větve do druhé při otáčející se kotvě.

19. Vysvětlete dobu komutace cívky.
Doba komutace cívky je doba, během níž jsou lamely, na kterých cívka začíná a končí, spojeny jedním nebo dvěma kartáči nakrátko.

20. Kde se musí nacházet cívka v době komutace?
Při komutaci se musí cívka nacházet v místě, kde není (teoreticky) žádné mg. pole tj. v prostoru mezi kraji nástavců dvou sousedních hlavních pólů.

21. Proč vzniká reaktanční napětí?
Vznik reaktančního napětí je zapříčiněn rozptylovým mg. polem, které prochází cívkou v době komutace.

22. Jaké mohou být průběhy proudu v době komutace cívky a proč?
Při neuvažování indukčnosti cívky mluvíme o lineární komutaci. Ve skutečnosti indukčnost cívky brání změně proudu a to je tzv. zpožděná komutace. Při velmi silných pomocných pólem nebo velkému vytočení kartáčů z neutrální polohy můžeme získat i zrychlený průběh komutace neboli tzv. překomutování.

23. Maximální velikost reaktančního napětí.
U strojů bez pomocných pólů může být max. velikost reaktančního napětí 2 -3 V a u strojů s pomocnými póly 17-20V.

24. Jakými způsoby se omezuje reaktanční napětí?
Reaktanční napětí lze omezit pomocnými (komutačními) póly nebo vytočením kartáčů z neutrální polohy (u strojů malých výkonů).

25. Co je důležité při konstrukci pomocných pólů?
Pro dobrou komutaci je nutné, aby nedocházelo k přesycování pomocných pólů. Vzduchová mezera pod pomocným pólem je vždy větší než pod hlavním pólem.

26. Jakou polaritu mají pomocné póly vzhledem k pólům hlavním?
U motoru ve směru točení za pólem hlavním následuje pomocný pól stejné polarity (za severním severní). U dynama za hlavním jedné polarity pomocný jiné polarity –ve směru točení (za severním hlavním pomocný jižní).

27. Co je příčinou rychlých proudových změn při činnosti motoru?
Rychlé proudové změny jsou vyvolány buď požadavky regulačních pochodů elektrických pohonů nebo zvlněným proudem při napájení motorů ze statických měničů.

28. Jaké konstrukční provedení musí mít motor, který je určen pro napájení zvlněným proudem?
Magnetický obvod takového motoru musí být složen z elektrotechnických plechů a v konstrukci stroje nesmí být žádná část, která by tvořila závit nakrátko.

29. Co se indukuje v komutující cívce při napájení zvlněným proudem?
Při napájení zvlněným proudem se v komutující cívce indukuje kromě reaktančního také transformační napětí.

30. Co způsobuje zpoždění toku pomocných pólů za proudem kotvy?
Zpoždění toku pomocných pólů za proudem kotvy je způsobeno vířivými proudy v masivních částech mg. obvodu stroje.

31. Jaké negativní důsledky má zvlněný proud na činnost stejnosměrného motoru?
Zvlněný proud zhoršuje komutaci, zvyšuje oteplení stroje, zvyšuje lamelové napětí, zvyšuje nebezpečí vzniku ložiskových proudů a kolísání momentu.

32. Jaké druhy strojů podle způsobu buzení rozeznáváte?
Podle způsobu buzení jsou stroje sériové, derivační, kompaudní, protikompaudní, stroje s cizím buzením. Buzení může být také permanentními magnety

33. Kde se jednotlivé druhy strojů používají?

Sériové motory se užívají v trakci. V regulačních pohonech se nejčastěji užívají stroje s cizím buzením.

34. Jaké může mít stejnosměrný stroj buzení?
Stejnosměrný stroj může mít buď budicí vinutí anebo permanentní magnety.

35. Kde se používají sériové motory?
Tyto motory se zvláště uplatňují v trakčních pohonech.

36. Jakou mají sériové motory zatěžovací charakteristiku?
Zatěžovací charakteristika sériového motoru je velmi „měkká“ tzn., že otáčky se značně mění se zatížením.

37. Jaké jsou výhody a nevýhody použití motorů s cizím buzením?
K výhodám motoru s cizím buzením patří zvláště výhodné regulační vlastnosti a malá závislost otáček na zatížení. Nevýhodou je nutnost samostatného napájecího zdroje pro buzení.

38. Jak rozběhnete motor s cizím buzením napájeným z usměrňovače na jmenovité otáčky ?
Nabudíme motor na jmenovitý budicí proud a postupně zvyšujeme napětí kotvy až do jeho jmenovité hodnoty.

39. Co jsou motory kompaudní a protikompaudní?
Tyto stroje mají část vinutí na hlavních pólech zapojenou do série s kotvou. U kompaudního stroje pak obě části vinutí vytvářejí mg. napětí stejného smyslu u protikompaudního opačného smyslu.

40. Co je to bezkartáčový motor?
Je to elektronicky komutovaný motor buzený permanentními magnety na rotoru.

41. Jaké jsou výhody bezkartáčového motoru?
Neobsahuje kluzný kontakt s rotujícím komutátorem.

Součást učebního textu „Elektrické stroje v energetice“

© Karel Chmelík, Jiří Pospišilík, 2003

Regionální centrum celoživotního vzdělávání
VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 80-248-0314-3