



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

SKALÁRNÍ VERSUS VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ SYNCHRONNÍCH MOTORŮ

SCALAR VERSUS VECTOR CONTROL OF SYNCHRONOUS MOTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN HOŘAVA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR HUBÍK

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Hořava Jan

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Skalární versus vektorové řízení synchronních motorů

v anglickém jazyce:

Scalar versus vector control of synchronous motors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě doporučené literatury vypracujte úvod do problematiky skalárního a vektorového řízení synchronních motorů. Seznamte se s vlastnostmi a principem obou metod. Uveďte výhody a nevýhody jednotlivých způsobů řízení synchronního motoru, navzájem je porovnejte. Diskutujte možnost využití vektorového řízení u asynchronního motoru a uveďte jeho výhody. Zmapujte používané trendy řízení synchronních motorů v průmyslových aplikacích a uveďte nejpoužívanější metody. V závěru uveďte vhodnost a efektivitu těchto metod z pohledu kvality řízení motoru a cenové náročnosti u konkrétních aplikací v průmyslu a letectví.

Cíle bakalářské práce:

1. Rekapitulace obecných fyzikálních vlastností elektrických motorů, zvláště synchronních.
2. Popis základních principů řízení synchronního motoru – skalárního a vektorového.
3. Porovnání těchto metod a stanovení vhodnosti jejich použití v průmyslových a leteckých aplikacích.
4. Vypracování přehledu nejpoužívanějších metod řízení synchronních motorů v průmyslu.

Seznam odborné literatury:

- [1] Skalický, J.: Elektrické servopohony. Skripta VUT v Brně, FEKT, 2001.
- [2] Pavelka, J.: Elektrické pohony. Skripta ČVUT, Praha 1996.
- [3] Compter, J. C.: Electrical drives for precision engineering designs. specAmotor, <http://www.specamotor.com>, Eindhoven, 2007.
- [4] Leonhart, W.: Control of Electrical Drives. Third Edition. Springer, Berlin 2001
- [5] Microchip Technology Inc.: <http://www.microchip.com/>, Motor Control

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vladimír Hubík

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 28.11.2008



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ANOTACE

Práce se zabývá základní teorií problematiky skalárního a vektorového řízení synchronních motorů a následným srovnáním obou metod. V úvodních kapitolách je popsána základní teorie synchronních strojů týkající se jejich konstrukce a jsou zde uvedeny některé vybrané charakteristiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

synchronní motor, skalární řízení, vektorové řízení, PMSM,
Clarkova transformace, Parkova transformace

ANNOTATION

This work deals with the basic theory of the problem of scalar and vector control of synchronous motors and sequentially comparing both methods. The basic theory of synchronous machines concerning their construction is described in the opening chapters and some selected characteristics are mentioned.

KEYWORDS

synchronous motors, scalar control, vector control, PMSM,
Clark transform, Park transformace

BIBLIOGRAFICKÉ CITACE MÉ PRÁCE

HOŘAVA, J. Skalární versus vektorové řízení synchronních motorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 42 s.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Hubík.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Vladimírovi Hubíkovi za jeho cenné rady a připomínky při psaní práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně na základě rad a pokynů vedoucího práce, a že jsem veškeré literární zdroje uvedl v seznamu použité literatury.

V Brně dne:

.....

Jan Hořava

1. ÚVOD	11
2. ZÁKLADNÍ POPIS SYNCHRONNÍHO MOTORU	12
2.1. Rozdělení motorů	12
2.2. Konstrukce synchronního motoru.....	12
2.2.1. Stator synchronního motoru	12
2.2.2. Rotor synchronního motoru.....	13
2.2.3. Permanentní magnety používané v synchronních motorech PMSM	15
2.3. Popis principu činnosti synchronního motoru	17
2.3.1. Rozběh synchronního motoru	18
2.3.1.1. Asynchronní rozběh	18
2.3.1.2. Spouštění pomocí reaktoru.....	19
2.3.1.3. Spouštění pomocí autotransformátoru.....	19
2.3.1.4. Spouštění rozběhovým motorem.....	19
2.3.1.5. Spouštění pomocí frekvenčního měniče.....	20
2.4. Základní charakteristiky synchronního stroje.....	21
2.4.1. „V – křivky“ synchronního stroje (generátoru).....	21
2.4.2. Grafická závislost momentu stroje na zátěžném úhlu	22
2.4.3. Grafická závislost otáček na momentu.....	23
3. SKALÁRNÍ ŘÍZENÍ	24
3.1. Oblast konstantního momentu.....	24
3.2. Oblast konstantního výkonu	25
4. TRANSFORMACE SOUŘADNIC	27
4.1. Clarkova transformace.....	27
4.1.1. Inverzní Clarkova transformace	28
4.2. Parkova transformace	28
4.2.1. Inverzní Parkova transformace.....	29
5. VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ	30
5.1. Aplikace vektorového řízení na PMSM	31

6. POROVNÁNÍ OBOU METOD ŘÍZENÍ A DISKUZE PRO MOŽNOSTI ŘÍZENÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ (AM)	35
6.1. Srovnání dynamické odezvy PMSM.....	36
7. PRŮMYSLOVÉ TRENDY V ŘÍZENÍ.....	37
7.1. Řídící moduly.....	38
7.1.1. SIEMENS.....	38
7.1.2. EMERSON.....	38
7.1.3. OMRON.....	39
8. ZÁVĚR	40
9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	41

1. ÚVOD

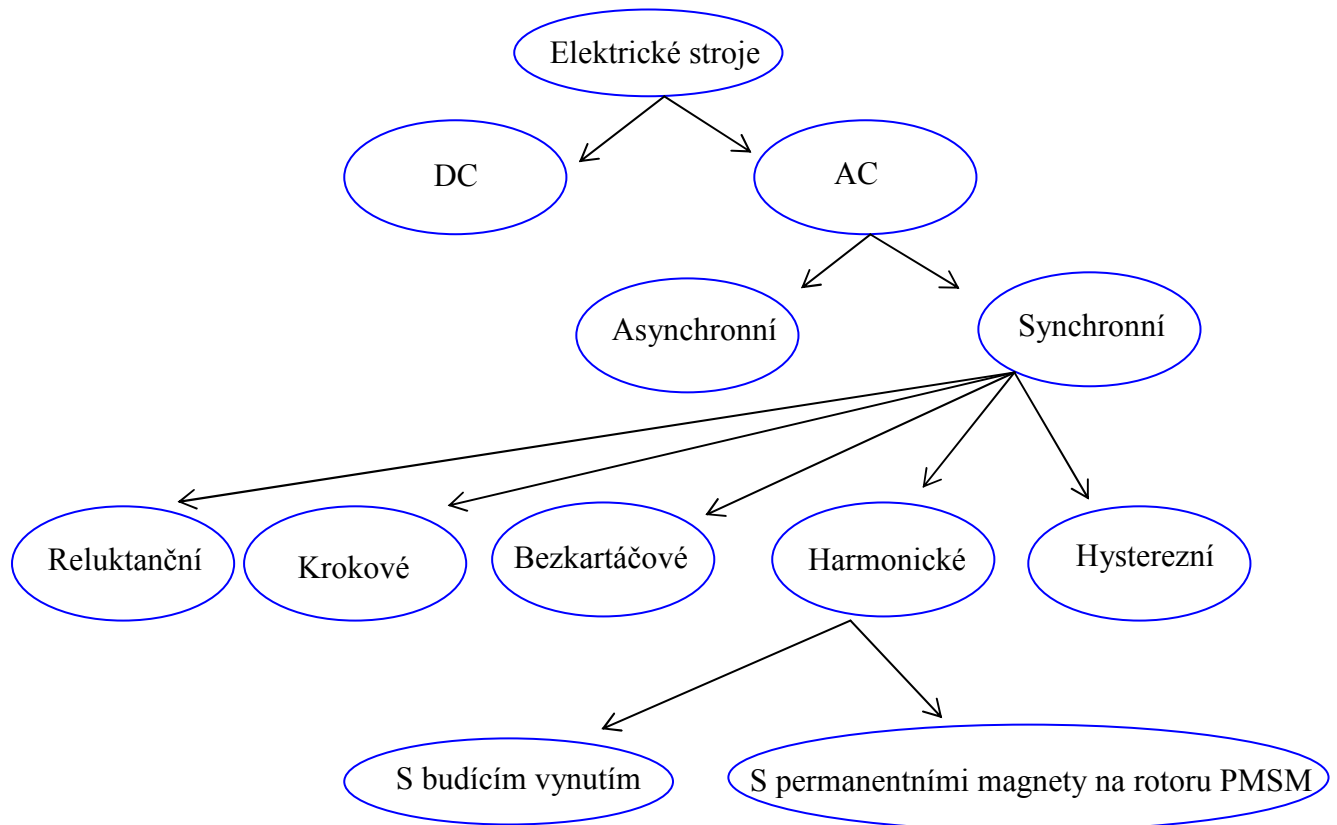
Rozvoj moderní civilizace je spjat s potřebou nahradit fyzickou práci člověka při výkonu jeho činnosti technickými prostředky, které buď zcela nebo z části nahradí lidskou sílu. Jedním z těchto technických prostředků jsou elektrické stroje. Jedná se o velkou skupinu zařízení, která přeměňují elektrickou energii na mechanickou, v některých případech i naopak (např. alternátory). Tato práce je primárně zaměřena na synchronní motory. Z pohledu historie byly synchronní motory nejprve využívány jako generátory pro výrobu střídavé elektrické energie. Postupem času začal synchronní motor pronikat do oblasti průmyslového využití. Ukázalo se, že pro některé strojní zařízení je řešení pohonu přes synchronní motor jediným správným technickým řešením. Žádný jiný elektromotor není možné konstruovat v tak širokém rozsahu výkonů jako synchronní motor tj. od hodnot mW při použití v hodinovém strojku až do hodnot desítek MW v aplikacích, jako je pohon turbokompresorů, odstředivých čerpadel a lodních šroubů. [6].

Cílem práce je seznámení se s synchronním motorem, základní popis řízení synchronního motoru tj. skalární řízení a vektorové řízení. Řízení synchronního motoru vede k větší efektivnosti pracovního procesu, ekonomičnosti dané aplikace, v případech použití synchronního motoru jako pohonu v různých odvětvích průmyslu a pohonů soustav. Další část by byla věnována trendům a použitím v průmyslových aplikacích.

2. ZÁKLADNÍ POPIS SYNCHRONNÍHO MOTORU

2.1. Rozdělení motorů

Zjednodušené schéma dělení elektrických motorů. [5]



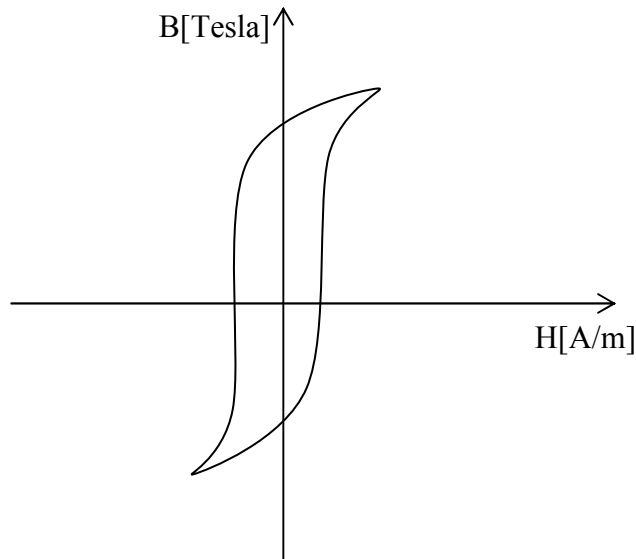
2.2. Konstrukce synchronního motoru

Synchronní motor se skládá ze dvou základních částí, těmi jsou stator a rotor.

2.2.1. Stator synchronního motoru

Stator synchronního motoru je konstrukčně velmi blízký statoru asynchronního motoru. Vlastní stator je složen z elektrotechnických plechů z magneticky měkkého materiálu (materiály s úzkou hysterezní křivkou viz. Obr. č. 1) do tvaru dutého válce s podélnými drážkami. Jednotlivé transformátorové plechy jsou od sebe navzájem odizolované např. lakováním, oxidováním. Do drážek je vloženo trojfázové vinutí spojené

nejčastěji do hvězdy.[4] Konce jednotlivých vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici sloužící k napájení motoru. Stator motoru je obvykle napájen 3 fázovou střídavou harmonickou sítí 3×400 V o frekvenci 50 Hz.



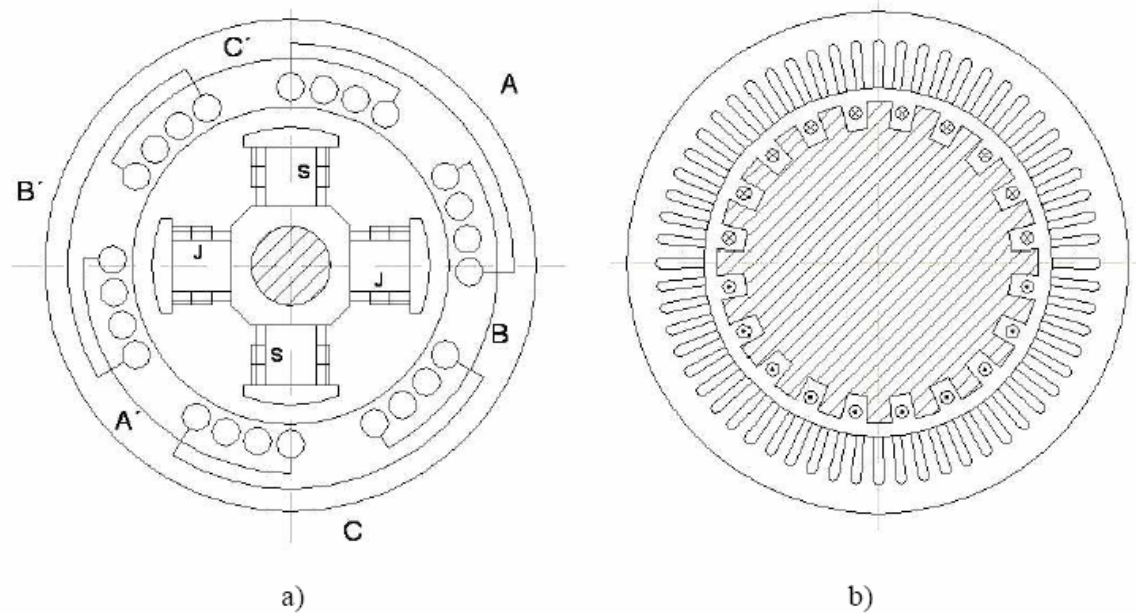
1 Hysterezní křivka magneticky měkkého materiálu

2.2.2. Rotor synchronního motoru

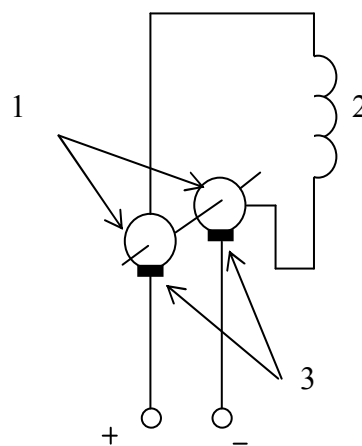
Rotor s budícím vinutím je konstruován v dvojím provedení. Jako hladký rotor a rotor s vyniklými póly. Pro stroje s hladkým rotorem se používá také výraz turbostroje, pro stroje s vyniklými póly – hydrostroje. Oba výrazy jsou dány použitím synchronního stroje jako generátoru elektrické energie. V prvním případě se bude jednat nejčastěji o tepelnou elektrárnu, kde k pohonu rotoru bude sloužit parní turbína. Druhý případ zastupuje formu výroby elektrické energie ve vodních elektrárnách.

Hladký rotor (Obr. č. 2b) je konstrukčně proveden jako válec s osově rovnoběžnými podélnými drážkami, ve kterých je uloženo vinutí, napájené stejnosměrným proudem přes kluzné kontakty - kroužky s kartáči (Obr. č. 3) nebo bezkontaktně rotačním transformátorem a následným usměrněním diodami na rotoru. [9]

Rotor s vyniklými póly (Obr. č. 2a) je tvořen rotorovým kolem a pólovými nástavci, na kterých jsou umístěny cívky budícího vinutí napájené opět stejnosměrným napětím.



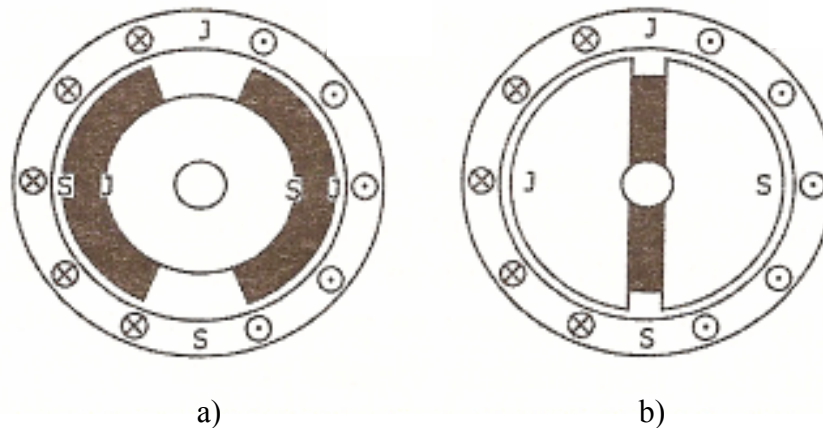
2 Náčrt motoru s budícím vinutím a) rotor s vyniklými póly b) hladký rotor (převzato z [5])



3 Schématické znázornění napájení budícího vinutí ze zdroje ss. napětí 1-kroužky, 2-budící vinutí, 3-uhlíkové kartáče

Třetím případem konstrukce rotoru synchronního motoru je tzv. PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motors) motor. Motor má opět na statoru trojfázové vinutí napájené trojfázovým harmonickým napětím. Budící magnetický tok rotoru je vytvořen permanentními magnety, tím je zajištěna absence zdroje stejnosměrného proudu sloužícího k napájení budícího vinutí a zároveň i uhlíkových kartáčů a kroužků. Tento typ motoru se uplatňuje v servopohonech, kde se vyžaduje vysoká dynamika a přesnost. Používá se pro pohony nízkých a středních výkonů tj. přibližně do 50 kW. [8] Konstrukční uspořádání magnetů na rotoru PMSM motoru může být realizováno jako zapuštěné (Obr. 4. b), v tomto uspořádání je méně potlačen vliv tzv. reakce statorového vinutí na tvar pole ve

vzduchové mezeře, nebo na povrchu rotoru (Obr. 4. a), což představuje umístění ve vzduchové mezeře. Výhodou je omezení vlivu reakce statorového vinutí vlivem velké vzduchové mezery, jelikož permanentní magnety mají prakticky shodnou permeabilitu s permeabilitou vzduchu. [9]



- 4 Konstrukce rotorů a) synchronní motor s permanentními mag. na povrchu b) synchronní motor s permanentními mag. uvnitř rotoru (převzato z [8])

2.2.3. Permanentní magnety používané v synchronních motorech PMSM

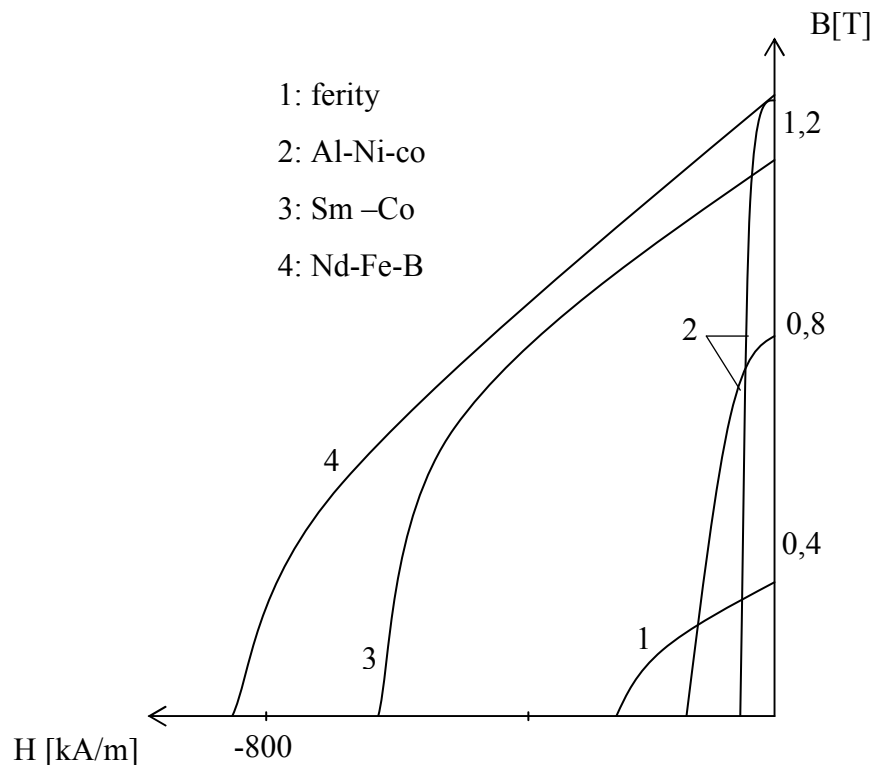
Permanentní magnety jsou vyráběny z chemických sloučenin kovů s výraznými magnetickými vlastnostmi. Tyto sloučeniny jsou magneticky tvrdé (široká hysterezní smyčka) feromagnetické materiály. V minulosti (rok 1900) se pro výrobu permanentních magnetů využívaly legované oceli, kde přidávané legury byly nejčastěji Co –Cobalt a Cr –chrom. Takto vyráběné magnety se vyznačují malou hodnotou remanence B_r a malou koercitivitou H_c . Nespornou výhodou takto vyrobených magnetů je možnost jejich třískového obrábění, jelikož magnety nejsou křehké a nemusí se tudíž nákladně brousit. V současnosti se na výrobu permanentních magnetů používají tvrdé ferity. Ferity (kolem roku 1950, $B_r = 0,34-0,44$ T) jsou metalurgicky spékané kysličníky kovů (Baryum, Stroncium) spolu s železem. Základní suroviny jsou rozemlety na jemný prášek, smíchány dohromady, poté slisovány do požadovaného tvaru a spékány v metalurgické peci za přítupu vzduchu při teplotě okolo 1300 °C. Výsledný permanentní magnet je narozdíl od magnetu z legované oceli křehký a jedinou cestou pro jeho obrobení je broušení. Další skupinou magnetů jsou magnety lité, vyráběné slévárenskou technologií. Jedná se o slitiny železa s Al – Ni , Al – Ni – Co ($B_r = 1,2$ T). K výhodám patří nízká cena, odolnost proti korozi, malá závislost magnetických vlastností na teplotě. Opracovávají se broušením.

Výroba permanentních magnetů s výrazně lepšími vlastnostmi jak předešlé skupiny je založena na spékání práškových směsí s obsahem vzácných zemin (Samarium, Neodym, Samarium - Cobalt, $B_r = 1-1,2$ T), v současné době mají největší uloženou mag. energii vzhledem k objemu permanentního magnetu. Velkou nevýhodou je extrémní cena a opět křehkost magnetů. V důsledku výborných magnetických parametrů tohoto typu per. mag. se hledají cesty výroby permanentních magnetů se stejnými nebo lepšími vlastnostmi než magnetu typu Sa-Nd, Sa-Co za přijatelnější cenu.



5 Tvarová různorodost vyráběných magnetů typu Sa-Co (převzato z [15])

Jedním takovým zástupcem jsou magnety na bázi Nd – Fe –B (Neodym, Železo, Bór, $B_r = 1,2$ T). Výroba je procesem práškové metalurgie s následným spékáním v metalurgické peci v prostředí inertního plynu (narozdíl od feritů, kde je umožněn přístup vzduchu). K nevýhodám těchto magnetů patří křehkost, značná tvrdost, náchylnost ke korozi, povrch je nutno chránit patřičným antikoročním nátěrem a také značná teplotní závislost jejich parametrů, proto se obecně nedoporučují aplikace těchto magnetů v teplotách přesahujících 100°C . Magnety z výše uvedené skupiny se uplatňují pro pohony se synchronními motory s vysokými požadavky na rozměry, hmotnost a dynamiku. V méně náročných aplikacích se upřednostňují ferity. [8] Závislost zbytkové (remanentní) indukce na koercitivní síle pro vybrané materiály je znázorněna na Obr. č. 6.



6 Demagnetizační křivky pro jednotlivé typy magnetických materiálů [8]

2.3. Popis principu činnosti synchronního motoru

Synchronní motor slouží ke změně elektrické energie, přiváděné přes svorkovnici do statorového vinutí, na energii mechanickou, kterou odebíráme na hřídeli rotoru. Trojfázové statorové vinutí je napájeno harmonickým střídavým napětím ze sítě, případně z frekvenčního měniče. Proud procházející jednotlivými vinutími statoru vytvoří točivé magnetické pole. Rychlost otáčení magnetického pole je dána frekvencí napájení a počtem pólů motoru. Popisuje ji vztah (2.1) a mluvíme o synchronní rychlosti,

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

kde f je frekvence napájecího napětí a p počet pólových párů motoru. Budící vinutí na rotoru je napájeno stejnosměrným napětím přes uhlíkové kartáče dosedající na kroužky. (Obr. č.3.) Procházející proud budícím vinutím vybudí stacionární magnetické pole. Vzájemným působením magnetického pole statoru a rotoru dochází k silovému působení na stator. Orientace této síly nemá stále stejný smysl, ale je proměnná s rychlostí točivého pole statoru. V důsledku toho je rotor vystaven působení střídavé tažné síly v opačných směrech a tím se nemůže sám rozběhnout. Tímto se dostáváme k jedné ze

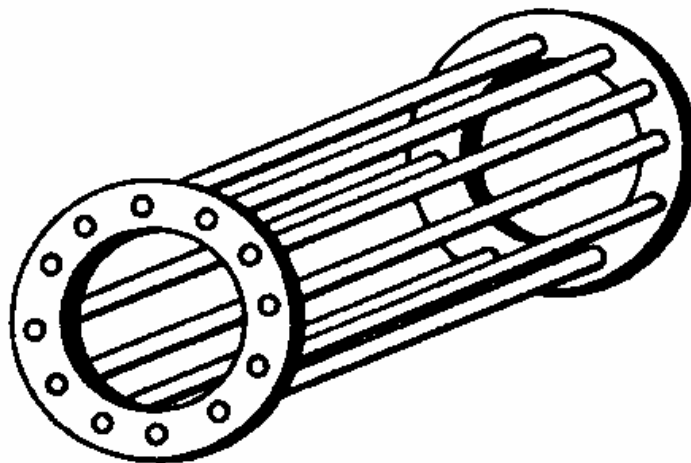
značných nevýhod synchronního motoru, tj. motor po připojení k síti se není schopen sám rozběhnout.

2.3.1. Rozběh synchronního motoru

Z důvodu, že synchronní motor vyvíjí trvalý točivý moment pouze v chodu, kdy je jeho rychlost otáčení synchronní, musí být vybaven rozběhovým zařízením, které tuto rychlost (případně její blízké okolí) umí dosáhnout. Uvedu přehled nejčastějších způsobů rozběhu synchronních motorů.

2.3.1.1. Asynchronní rozběh

Asynchronní rozběh je nejrozšířenější způsob rozběhu synchronních motorů. Pro tuhle metodu spouštění musí být motor vybaven v rotoru rozběhovým vinutím. Jedná se o klec nakrátko tvořenou měděnými, mosaznými nebo bronzovými tyčemi uloženými v drážkách pólových nástavců. Čela tyčí jsou spojena kruhy nakrátko. (viz. Obr. č. 7)



7 Rotorová klec motoru nakrátko

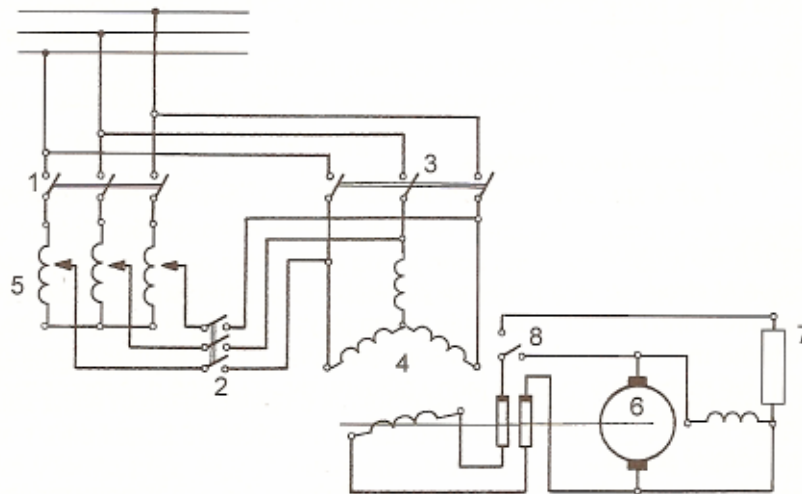
U strojů starší konstrukce plní funkci rozběhové klece nelistěné pólové nástavce, opět spojené kruhy nakrátko. Rozběhové vinutí zastává další důležitou funkci v provozu synchronních motorů - uplatňuje se jako tlumič kývání rotoru při změně zatížení hřídele motoru. Asynchronní rozběh lze tedy uskutečnit u malých motorů přímým připojením k napájecí síti. Zde je ovšem důležité, zda napájecí síť je dostatečně dimenzována na proudový náraz, který může dosahovat až 5-ti násobku proudu jmenovitého.

2.3.1.2. Spouštění pomocí reaktoru

Motory větších výkonů je možno spouštět za předpokladu zvýšení odporu statorového vinutí – na svorky jednotlivých fází se k tomuto účelu připojí reaktor. Po skončení rozběhu se reaktor spojí nakrátko a tím se vyřadí z provozu.[7]

2.3.1.3. Spouštění pomocí autotransfornátoru

Spouštění s rozběhovým autotransfornátorem, jehož zdánlivý výkon bývá asi 20% zdánlivého výkonu motoru. Proces spouštění popíšu na základě Obr. č. 8.



8 Schéma spouštění synch. motoru pomocí autotransf. (převzato z [11])

Budící vinutí motoru 4 se přepínačem 8 přemostí rozběhovým ochranným rezistorem 7, zapne se přepínač 1, potom 2 a motor 4 se začne rozbíhat při zmenšeném statorovém napětí z autotransfornátoru 5, vypnutím spínačů 1, 2 a zapnutím spínače 3 dostane motor plné síťové napětí. Přejde na ustálenou rychlost otáčení s malým skluzem a po přepnutí spínače 8 se nabudí z budiče 6 a rotor je vtažen do synchronismu. Pro ilustraci: při zmenšení statorového napětí na 70% jmenovitého, poklesne proudový náraz přibližně na 180 až 250% jmenovitého proudu při záběrovém momentu okolo 50% jmenovitého. Další variantou používanou v praxi je kombinace reaktoru s autotransfornátorem nazývané též Korndorferova metoda. [7]

2.3.1.4. Spouštění rozběhovým motorem

Spouštění rozběhovým motorem se aplikuje u synchronních strojů velkého výkonu. Postačující výkon rozběhového motoru je okolo 15 až 20% jmenovitého výkonu spouštěného stroje. Pro spolehlivé dosažení synchronní rychlosti mívá rozběhový motor o jednu pólovou dvojici méně než rozbíhaný synchronní motor. Motor se spouští nabuzený.

2.3.1.5. Spouštění pomocí frekvenčního měniče

Kmitočtový rozběh synchronního motoru je realizován napájením statorového vinutí spouštěného nabuzeného motoru buď synchronním generátorem, rozbíhaným jiným motorem, nebo statickým měničem kmitočtu. [7] Příkladem takového moderního měniče může být např. frekvenční měnič VARISPEED - 616G5 od firmy YASKAWA (Obr. č. 9), který může pracovat ve 4 programově volitelných způsobech řízení:

- skalární řízení U/f
- skalární řízení U/f se zpětnou otáčkovou vazbou
- vektorové řízení bez zpětné otáčkové vazby
- vektorové řízení se zpětnou otáčkovou vazbou

Vybrané funkce měniče:

- rozsah regulace otáček až 1000:1 při použití vektorového řízení s IRC čidlem (Inkrementální Rotační Čidlo), např. motor dosahu jmenovitého výkonu při 3000 ot/min, aplikací tohoto řízení je možno odebírat jmenovitý moment již při 3 ot/min
- 150% momentu při nulových otáčkách (opět za předpokladu vektorového řízení s IRC), využití např. u jeřábových zdvihů
- momentová regulace, moment je nastavitelný od 5 do 100% při různých otáčkách, využití např. navíjení drátů
- rozsah výstupní frekvence 0,1 až 400 Hz
- rozhraní RS 422/485, MENOBUS, umožňující přenos dat, dálkové ovládání měniče, komunikace více měničů mezi sebou
- maticový 2 – řádkový 16 – ti místný LCD display

Cena měniče se odvíjí od toho, na jaký výkon motoru je určen, a pohybuje se v řádu desítek tisíc korun.([16],[17])

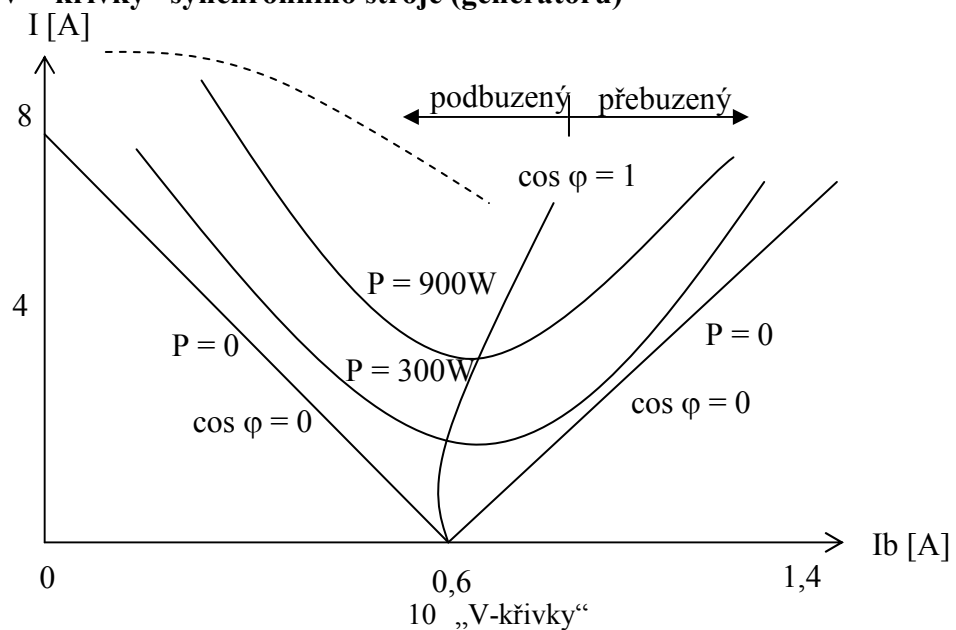


9 Frekvenční měnič YASKAWA VS-616G5 (převzato [16])

2.4. Základní charakteristiky synchronního stroje

Zde uvedu vybrané charakteristiky synchronního motoru, obecně synchronního stroje.

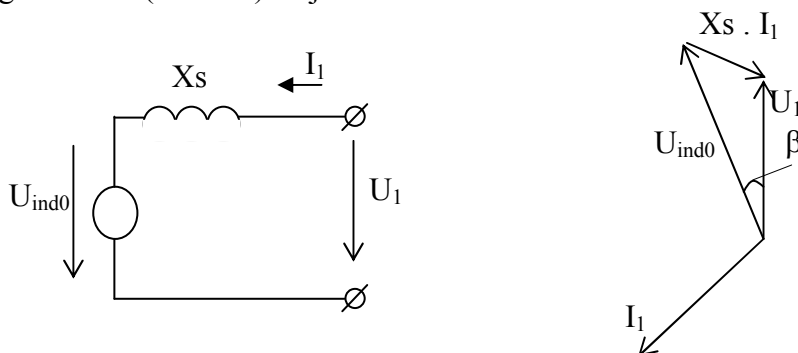
2.4.1. „V – křivky“ synchronního stroje (generátoru)



Obrázek č. 10 zobrazuje „V-křivky“ synchronního stroje (název „V-křivky“ je odvozen od jejich tvaru). Charakteristika vyjadřuje závislost $I = f(I_b)$, kde I je satorový proud, I_b je proud tekoucí budícím vinutím rotoru, při konstantním výkonu. Znázornění přebuzeného a podbuzeného rotoru vymezuje křivka $\cos \varphi = 1$, která též stanovuje budící proud, kdy generátor dodává do sítě čistě činný výkon. Vlevo od této křivky se nachází generátor v podbuzeném stavu. Stroj má charakter indukčnosti a odebírá ze sítě jalový výkon. Vpravo od této křivky je generátor přebuzen, má kapacitní charakter a dodává do sítě jalový výkon. Přebuzený generátor se používá jako kompenzátor účinníku. Čárkovaná čára znázorňuje mez statické stability, kdy již další odbuzování rotoru vede k vypnutí stroje z chodu.

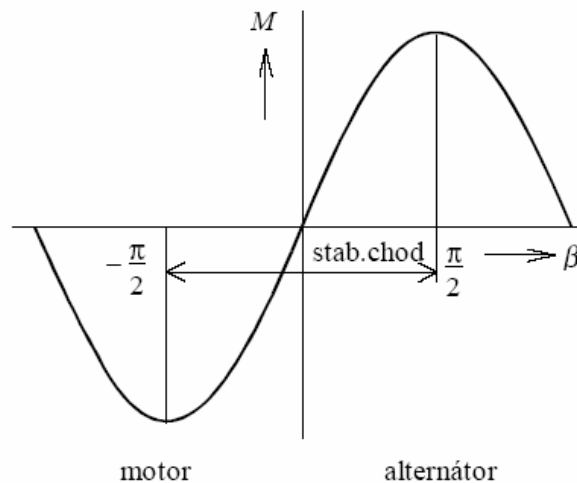
2.4.2. Grafická závislost momentu stroje na zátěžném úhlu

Úhel β (Obr. č. 11) je úhel mezi fázorem indukovaného napětí naprázdno U_{ind0} a svorkovým napětím stroje U_1 , jedná se o tzv. zátěžný úhel. Jeho velikost je spjata s velikostí zatížení synchronního stroje (elektrického u generátoru a mechanického u synchronního motoru). Pro nezatížený synchronní stroj platí, že $\beta = 0^\circ$. Při $\beta = 90^\circ$ (-90°) je výkon generátoru (motoru) největší.



11 Zjednodušené náhradní schéma a fázorový diagram alternátoru s hladkým rotorem (převzato [2])

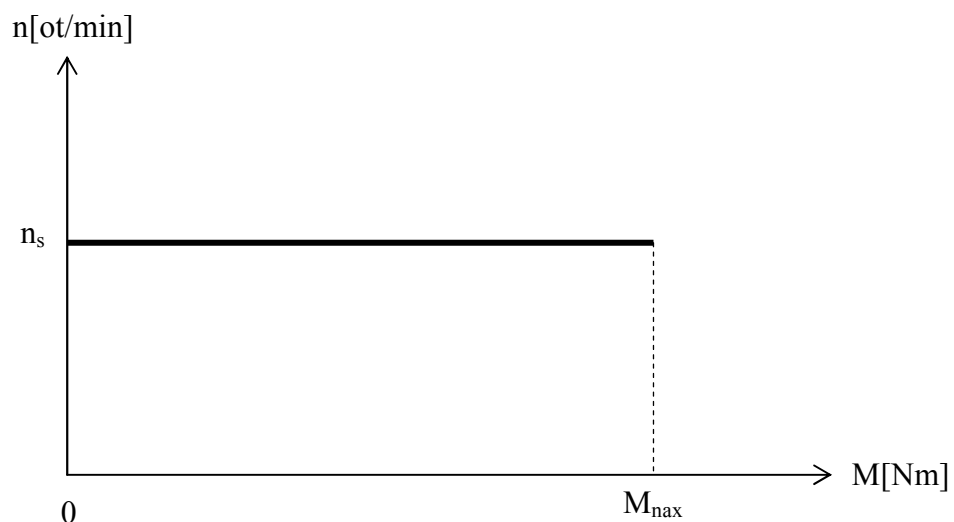
Z charakteristiky $M = f(\beta)$ (Obr. č. 12) je zřejmé, že synchronní stroj bude pracovat ve stabilním chodu v intervalu zátěžného úhlu $\beta \in (-\pi/2; \pi/2)$. Hraniční body, tj. $-\pi/2$; $\pi/2$, se nazývají mezí statické stability a při jejím překročení vypadá stroj ze synchronismu a dojde k jeho zastavení. Uvedená charakteristika platí pro stroj s hladkým rotorem, u strojů s vyniklými póly je interval stability chodu užší. Mez statické stability je tedy menší (větší) než $\pi/2$ ($-\pi/2$).



12 Grafická závislost momentu stroje na zátěžném úhlu (převzato [2])

2.4.3. Grafická závislost otáček na momentu

Z předešlého textu a charakteristiky (Obr. č. 13) je patrné, že synchronní motor pracuje při synchronních otáčkách a tyto otáčky se prakticky se vzrůstajícím zátěžným momentem nemění (mění se zátěžný úhel β viz. kapitola 2.4.2). Tento stav trvá ovšem jen do bodu označeného M_{\max} . Další nárůst momentu vede k tomu, že již magnetické síly působící mezi státorem a rotorem nejsou schopny udržet otáčky rotoru na synchronní hodnotě a motor tzv. vypadne ze synchronismu. Jedná se samozřejmě o nežádáný poruchový stav, mající za následek proudové nárazy v síti a mechanické rázy na hřídeli stroje.



13 Grafická závislost otáček na momentu pro synchronní motor

3. SKALÁRNÍ ŘÍZENÍ

Hlavní myšlenka při skalárním řízení synchronních motorů je, že změnou úhlové frekvence napájecího napětí statoru lze nastavit požadovanou synchronní rychlost. (viz. rovnice (2.1)) Podmínkou ovšem musí být, že se změnou frekvence se musí měnit také velikost přiváděného napájecího napětí a to v určitém konstantním poměru, tedy $U/f = \text{konst.}$ Tahle podmínka zaručí, že motor bude ve stavu, kdy magnetický tok reprezentuje ideální nominální hodnotu a nenastává přebuzení nebo podbuzení.

Přebuzení nastane pokud hodnota napětí bude udržována konstantní a sníží se pouze jeho frekvence. Magnetický tok bude vyšší, než jeho ideální nominální hodnota. Podbuzení naopak nastane při zvýšení frekvence napájecího napětí, které je opět konstantní. Největší výhodou této jednoduché metody je možnost provozu s absencí čidel, protože algoritmus řízení nevyžaduje informace o úhlové rychlosti nebo aktuální pozici rotoru.

Skalární řízení lze obecně definovat těmito vlastnostmi:

- umožňuje jednoduchým způsobem řídit otáčky střídavých strojů
- zajišťuje chod pohonu v optimálních podmínkách pouze v ustáleném stavu
- neumožňuje dosažení špičkových dynamických parametrů takto řízeného pohonu [8]

Rozlišujeme dva nejčastější způsoby řízení:

- řízení při konstantním statorovém toku ψ_1 (oblast konstantního momentu)
- řízení při konstantním statorovém napětí U_1 (oblast konstantního výkonu) [8]

3.1. Oblast konstantního momentu

Pro tuto oblast platí: $0 < f < f_0$; $\psi_1 = \text{konst.}$; $I_1 = \text{konst.}$ (f_0 je frekvence, pro kterou je motor navržen). Řízení synchronních otáček motoru je v této oblasti realizováno za výše uvedených podmínek. Musíme tedy určit závislost statorového napětí U_1 na frekvenci a poté lze pro obvod statoru psát následující rovnice.

$$\bar{U}_1 = R_1 \cdot \bar{I}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} \quad (3.1)$$

Po derivaci dostaneme:

$$\bar{U}_1 = R_1 \cdot \bar{I}_1 + k \cdot f_1 \cdot \bar{\Psi}_1 \quad (3.2)$$

Zanedbáme odpor statoru ($R_1 = 0$) a dostaneme hledanou závislost $U_1 = f(f_1)$ při konstantním magnetickém toku ve tvaru:

$$U_1 = k \cdot f_1 \cdot \Psi_1 \rightarrow \Psi_1 \approx \frac{U_1}{f_1} = konst. \quad (3.3)$$

V této oblasti upravují řídicí obvody napětí U_1 , dle požadovaného kmitočtu f_1 tak, aby buzení motoru bylo konstantní. Mluvíme o frekvenčně napěťovém řízení „U/ f“ (Obr. č.14). Při výpočtech se uvažuje jen první harmonická složka statorového napětí. Důvodem je, že pouze první harmonická složka magnetizačního proudu I_M vytváří užitečnou složku magnetizačního toku a také to, že vyšší harmonické složky napájecího napětí neovlivní užitečný moment motoru, pouze negativně ovlivňují ztráty v motoru. Činnost v oblasti konstantního momentu odpovídá stejnosměrnému stroji s konstantním buzením, který je řízen napětím kotvy. [8]

3.2. Oblast konstantního výkonu

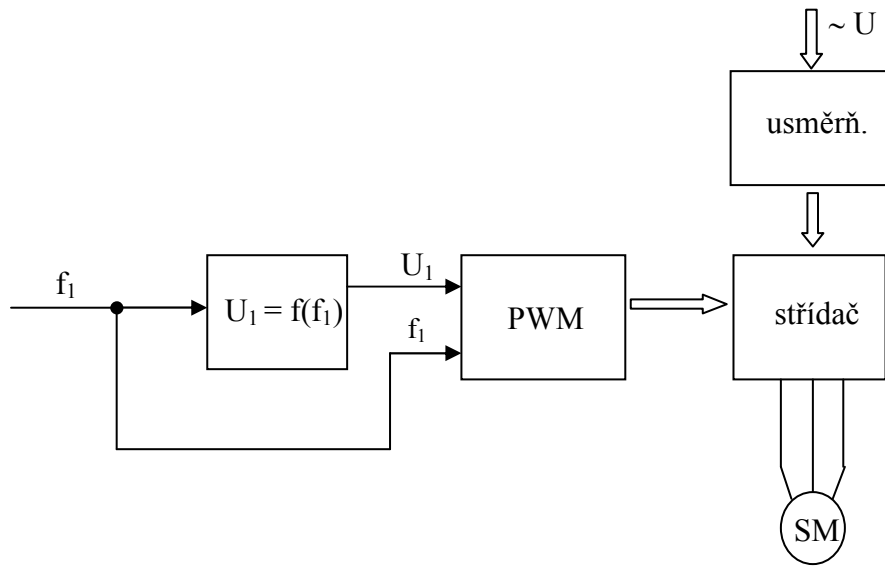
Pro tuto oblast řízení platí: $f_1 > f_0$; $I_1 = konst$; $U_i = U_1 = konst$. Závislosti uvedené pro oblast konstantního momentu platí až do frekvence f_0 . Napětí motoru je možno zvyšovat jen do určité míry, potom již musí být $U_1 = konst$. Protože se zvyšující se frekvencí f_1 je požadavek, aby indukované napětí U_i bylo konstantní, musí se zákonitě snížit velikost magnetického toku ψ_1 . V této oblasti řízení nejsou tedy magnetický tok, ani moment konstantní. Konstantní je pouze výkon. Lze definovat rovnice:

$$U_i = U_1 = k \cdot \Psi_1 \cdot f_1 \rightarrow \Psi_1 \approx \frac{1}{f_1} \quad (3.4)$$

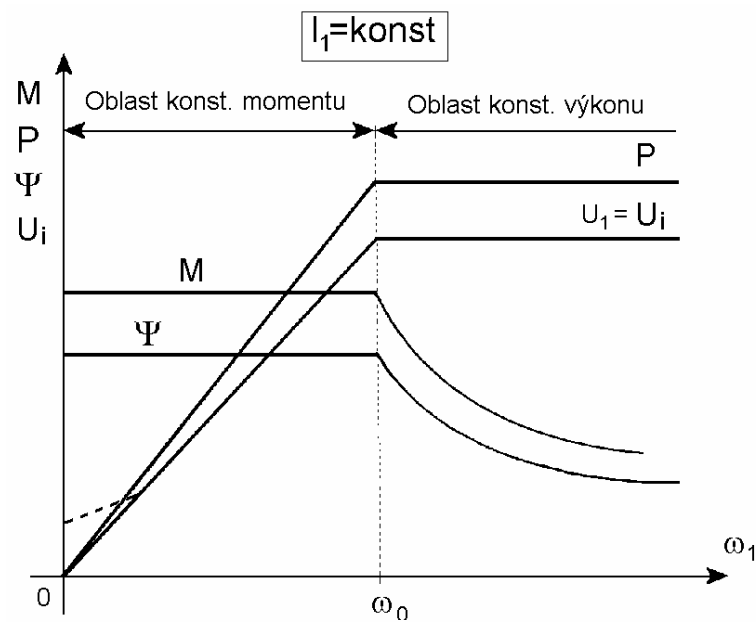
$$M \approx \Psi_1 \cdot I_1 \rightarrow M \approx \frac{1}{f_1} \quad (3.5)$$

$$P = U_1 \cdot I_1 = konst. \quad (3.6)$$

Tato oblast je adekvátní stejnosměrnému motoru s konstantním napětím na kotvě, který je řízen budícím magnetickým polem (motor je v tomto případě odbuzován). [8] Průběhy veličin znázorňuje obrázek č. 15.



14 Frekvenčně napět'ové řízení s otevřenou smyčkou [8]



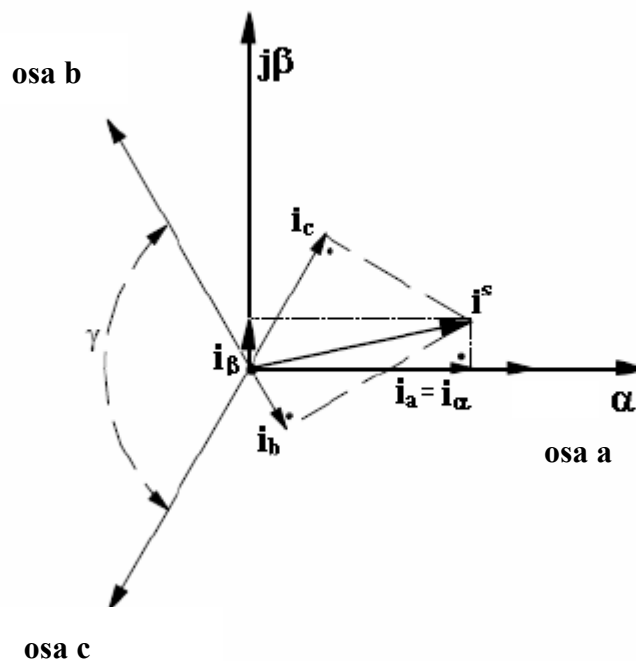
15 Závislost charakteristických veličin na uhlové rychlosti (převzato [8])

4. TRANSFORMACE SOUŘADNIC

Obecně lze říci, že transformace, které budou předmětem dalšího popisu v následujících podkapitolách, slouží k zjednodušení a zpřehlednění operací při popisu a řešení matematických modelů motorů. V jednotlivých podkapitolách uvedu nejčastěji zmiňované transformace vyskytující se v literárních zdrojích, tj. Clarkova transformace, Parkova transformace a jejich inverze.

4.1. Clarkova transformace

Jedná se o transformaci umožňující přenést tři osy (a, b, c) souřadného systému statoru do dvou navzájem kolmých os (α , β).



16 Princip Clarkovy transformace [5]

Převážná většina 3 f motorů má statorové vinutí zapojené do hvězdy, proto vyhovuje předpokladům, na základě kterých je odvozena Clarkova transformace,

$$\begin{aligned}
 i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) &= 0 \\
 u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) &= 0 \\
 \psi_a(t) + \psi_b(t) + \psi_c(t) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

kde i (a, b, c) reprezentují statorové proudy v jednotlivých vinutích, u (a, b, c) jednotlivá napětí a ψ (a, b, c) spřažený magnetický tok. Transformace je popsána následující maticovou rovnicí, kde γ reprezentuje úhel mezi fázemi. (120°) Rovnice (4.2) platí rovněž pro napětí i magnetický tok.

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \cos \gamma & \cos(2\gamma) \\ 0 & \sin \gamma & \sin(2\gamma) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}
 \tag{4.2}$$

rovnici (4.2) lze přepsat do tvaru:

$$\begin{aligned}
 i_\alpha(t) &= i_a(t) \\
 i_\beta(t) &= \frac{1}{\sqrt{3}} i_a(t) + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b(t)
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

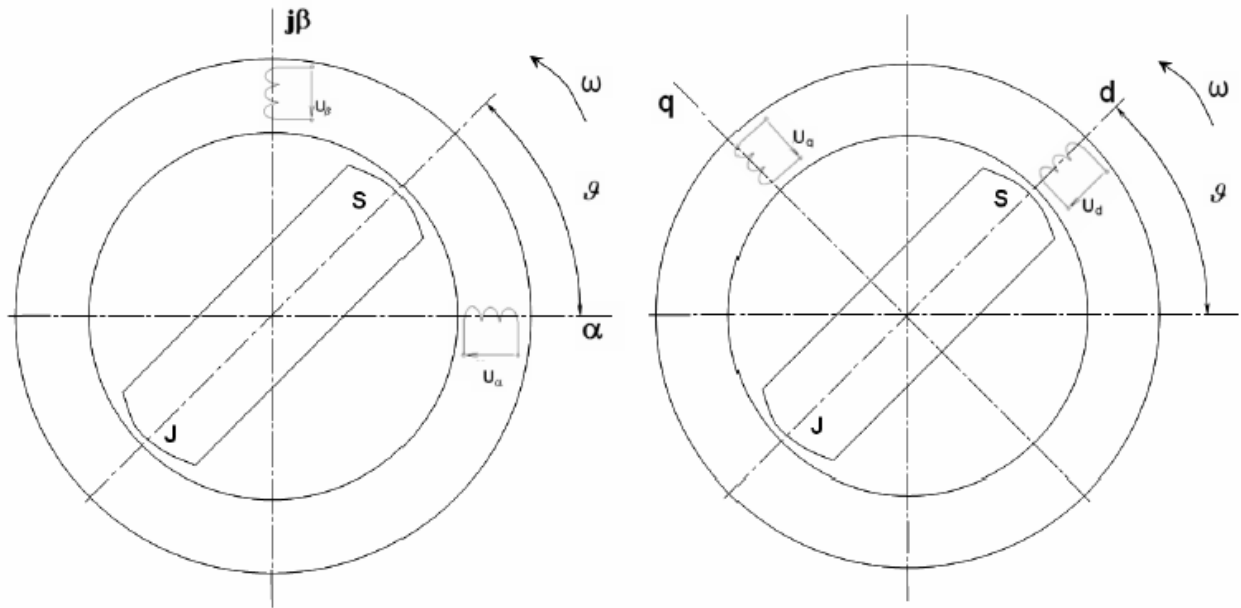
4.1.1. Inverzní Clarkova transformace

Při zpětné transformaci z dvouosého systému α, β do systému tří os a, b, c platí maticová rovnice (4.4)

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos \gamma & \sin \gamma \\ \cos(2\gamma) & \sin(2\gamma) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix}
 \tag{4.4}$$

4.2. Parkova transformace

Představuje nástroj pro transformaci souřadnic statoru do souřadnic rotoru. Je nutné brát v úvahu, že při otáčení rotoru se mění magnetická vazba mezi statorovým a rotorovým vinutím. Tento problém se odstraní vytvořením fiktivních statorových vinutí d, q , jejichž souřadná soustava je totožná se souřadnou soustavou rotoru. Vytvořené fiktivní vinutí se tedy pohybuje shodně s rotorem. Tímto je zajištěna stalá magnetická vazba mezi vinutím statoru a rotoru. V ustáleném stavu jsou napětí a proudy fiktivního vinutí konstanty a lze je považovat za stejnosměrné. To vede na možnost vyjádření proměnných střídavých veličin stejnosměrnými veličinami.



17 Schématicky znázorněná Parkova transformace (převzato [5])

Matematicky lze Parkovu transformaci zapsat v maticové rovnici (4.5), kde ϑ reprezentuje vzájemný úhel natočení mezi osou statoru a osou rotoru.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

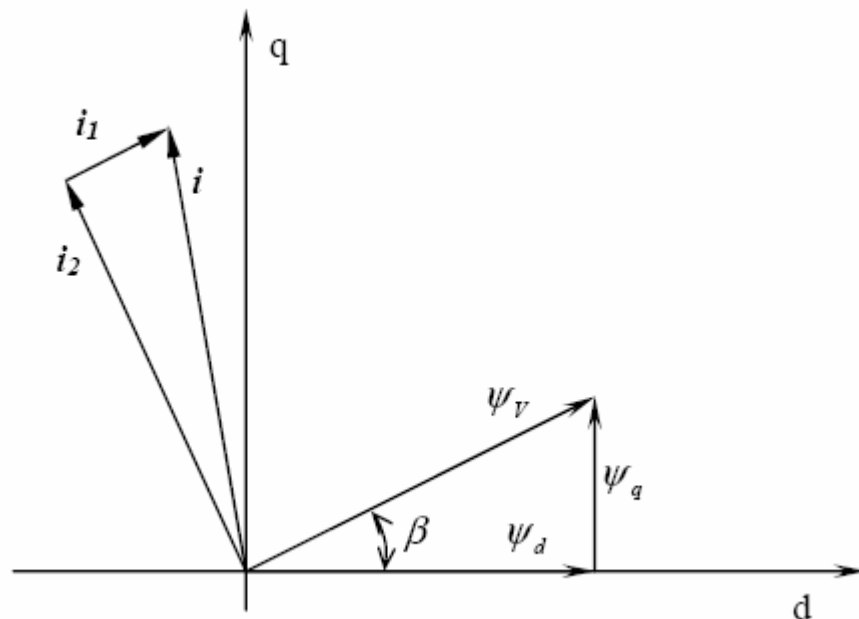
4.2.1. Inverzní Parkova transformace

Zpětná transformace ze souřadnic rotoru d, q do souřadnic statoru α, β je matematicky zapsána maticovou rovnicí (4.6)

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

5. VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ

Využití vektorového řízení spadá do oblasti aplikací s dynamicky náročnými pohony. Zde si popíšeme základní teorii. Rotující vektor proudu (komplexor) se rozloží do dvou složek. Jedna složka proudu i_1 je ve fázi s vektorem výsledného magnetického toku ψ_v a druhá složka i_2 je k němu kolmá. Složka proudu i_1 ovlivňuje magnetizaci a jalový výkon. Absolutní hodnota výsledného magnetického toku ψ_v spolu se složkou i_2 vytvářejí moment a činný výkon motoru. Protože jednotlivé složky se navzájem neovlivňují, je možné nezávisle řídit moment a magnetický tok. [5]



18 Fázorový diagram pro vektorové řízení (převzato [5])

Jednotlivé hodnoty složek i_1 a i_2 je nutné vypočítat pro každý pracovní bod a z nich následně určit řídicí veličiny pro nastavení jednotlivých fázových napětí statoru. Složky se vypočítávají v souřadnicích rotoru d, q . V počátcích aplikací vektorového řízení mohl tento výpočetní proces činit problémy. V dnešní době vzhledem k výpočetním prostředkům (hlavně jejich rychlosti) je problematika daleko lépe zvládnutelná.

5.1. Aplikace vektorového řízení na PMSM

Při aplikaci vektorového řízení na PMSM lze dosáhnout u tohoto motoru podobné struktury řízení jako u cize buzeného stejnosměrného stroje. [14] Při odvození základních rovnic matematického modelu PMSM se uvažují tyto zjednodušení:

- Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře (i průběh indukovaného napětí) je harmonický. Při výpočtech je potřeba zohlednit skutečnost, že motory s vyniklými póly na rotoru mají různou magnetickou vodivost v podélném a příčném směru. (osy d , q)
 - Parametry stroje (odpor R , indukčnost L) jsou konstantní a stejné ve všech třech fázích.
 - Ztráty v železe jsou zanedbány.
 - Nulový vodič není připojen.
 - Magnetizační charakteristika je lineární.
- (převzato z [8])

Pak lze psát rovnice (5.1) a (5.2) ve složkovém tvaru v souřadnicích d , q rotujících rychlostí ω (představuje elektrickou úhlovou rychlost rotoru a rovněž souřadného systému).

$$U_d = R_1 \cdot I_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \cdot \psi_q = R_1 \cdot I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega \cdot L_q \cdot I_q \quad (5.1)$$

$$U_q = R_1 \cdot I_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega \cdot \psi_d = R_1 \cdot I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega \cdot (L_d \cdot I_d + \Psi_{PM})$$

$$\psi_d = L_d \cdot I_d + \Psi_{PM}$$

$$\psi_q = L_q \cdot I_q \quad (5.2)$$

$$\Psi_{PM} = konst.(\text{magnetický_tok_vyvolaný_perm._magnety})$$

Pro moment motoru platí rovnice (5.3)

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot [\Psi_{PM} \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q] \quad (5.3)$$

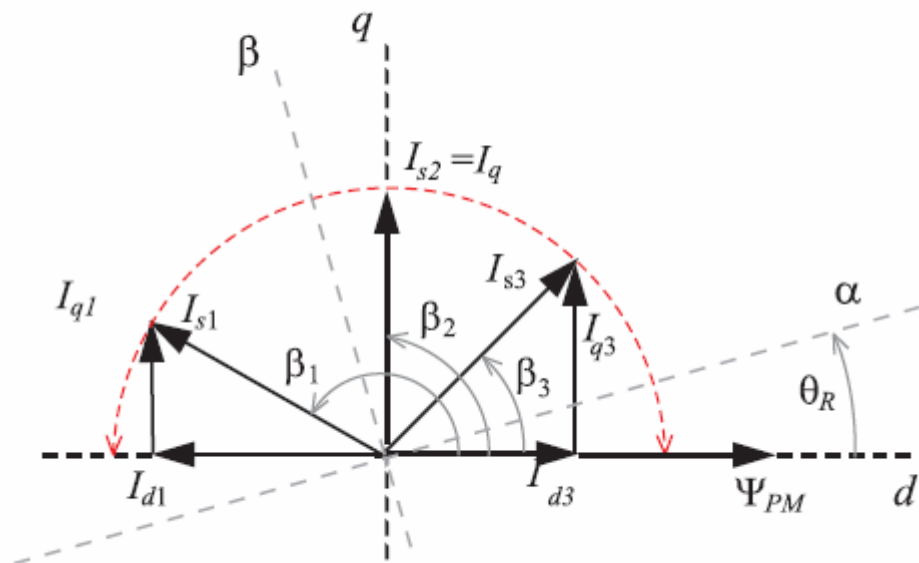
První součin v hranaté závorce představuje hlavní složku momentu. Druhý součin reprezentuje tzv. reluktanční moment a vyskytuje se pouze tehdy, má-li stroj vyniklé póly

na rotoru. Pak $L_d \neq L_q$ (L_d a L_q představují indukčnosti statorového vinutí v osách d , q). Při zavedení předpokladu, že řešený PMSM má hladký rotor tj. $L_d = L_q$, člen reprezentující reluktanční moment vypadne a rovnici (5.3) lze zapsat ve tvaru (5.4).

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \Psi_{PM} \cdot I_q \quad (5.4)$$

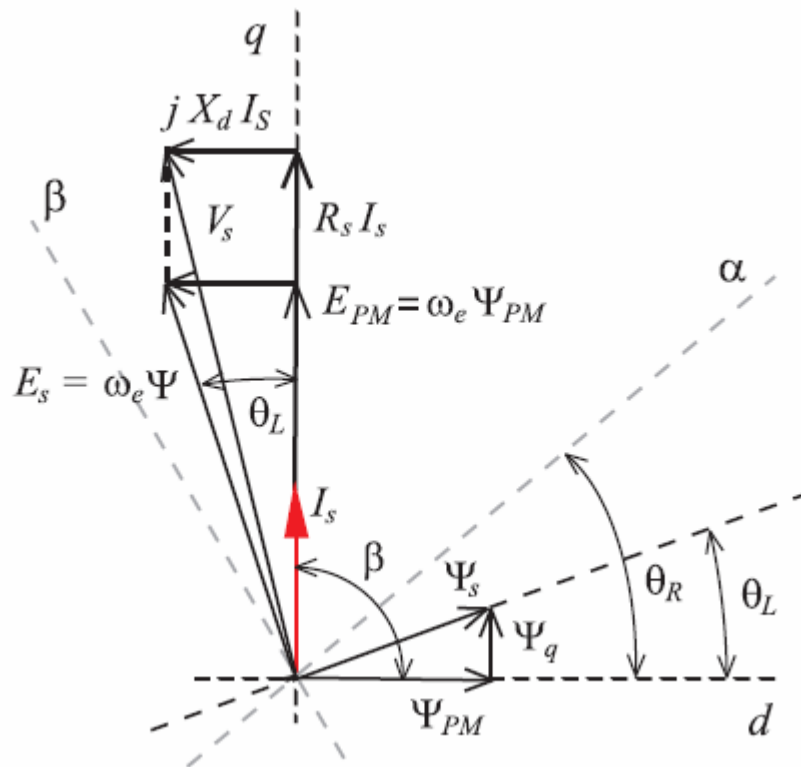
Při pohledu na obrázek č. 19 lze rovnici (5.4) obecně zapsat jako (5.5), úhel β představuje úhel točivého momentu. [14]

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \Psi_{PM} \cdot |I_S| \cdot \sin \beta \quad (5.5)$$



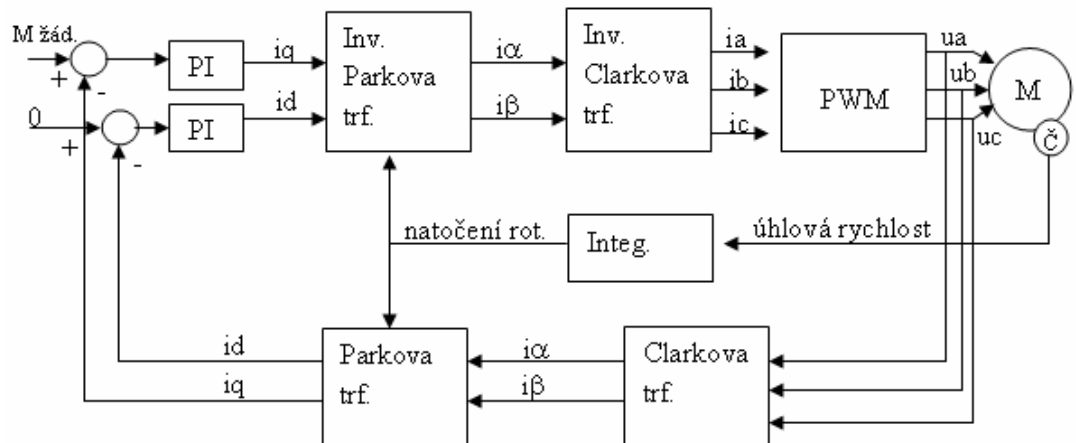
19 Znárodnění rozdílne polohy vektoru statorového proudu a jeho vlivu na složky I_d a I_q (převzato [14])

Pak pro danou hodnotu proudu statoru I_s je největšího točivého momentu dosaženo při $\beta = 90^\circ$. Za této podmínky jsou elektrické proměnné zobrazeny ve vektorovém diagramu obr. č. 20. Tento způsob řízení poskytuje největší točivý moment na jednotku protékajícího proudu statoru. Z toho plynoucí vysokou účinností a efektivitu. [14]



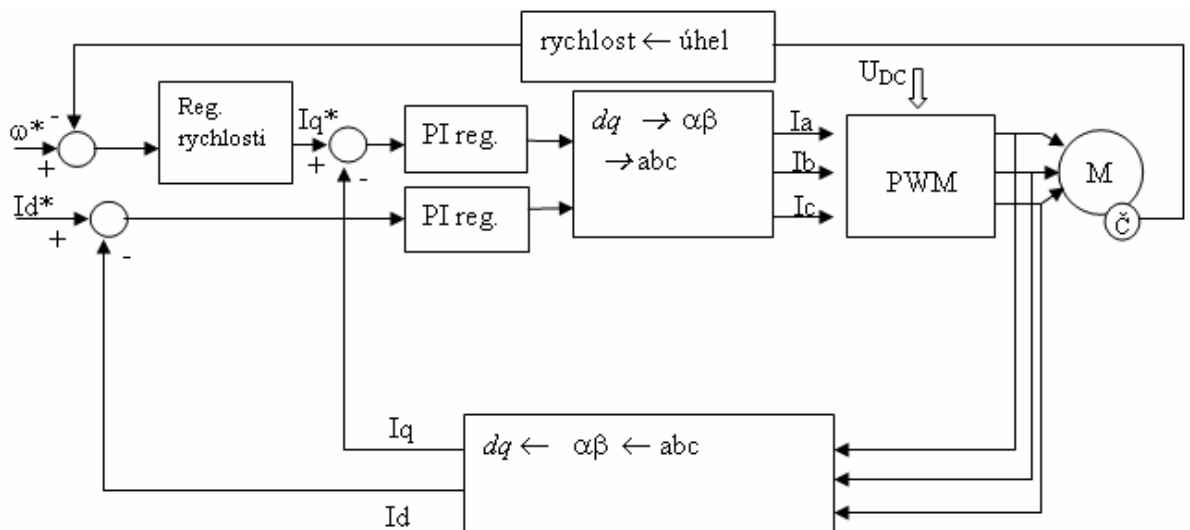
20 Fázorový diagram vektorového řízení PMSM na „maximální moment“ (převzato [14])

Blokové schéma vektorového řízení PMSM je na obrázku č. 21. Hodnota složky proudu I_d je zde udržována na nulové hodnotě, tj. proud I_s představuje maximální hodnotu I_q a při pohledu na rovnice (5.4 a 5.5) je zřejmé, že moment dosáhne své maximální žádané hodnoty.



21 Blokové schéma vektorového řízení PMSM [10]

Variantu řízení rychlosti můžeme dosáhnout u pohonu PMSM přidáním zpětné vazby z výstupu čidla otáček. Požadavek točivého momentu (tedy složky I_q) je pak generován z bločku „Regulátor rychlosti“. Udržováním proudu I_d na nulové hodnotě tj. fázor statorového proudu bude umístěn v ose q viz. obr. č. 20., dosáhneme maximálního momentu při daných (žádaných) otáčkách. Blokové schéma znázorňuje obrázek č. 22.



ω^* ...požadovaná rychlost

*...požadované veličiny

22 Blokové schéma vekt. řízení s regulací rychlosti [14]

6. POROVNÁNÍ OBOU METOD ŘÍZENÍ A DISKUZE PRO MOŽNOSTI ŘÍZENÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ (AM)

Skalární řízení:

výhody

- umožňuje jednoduchým způsobem řídit otáčky el. pohonu se SM a AM
- realizace provozu v otevřené smyčce (při požadavku vyšší přesnosti řízení možnost aplikace uzavřené smyčky)
- cena
- menší technická náročnost

nevýhody

- optimální chod pohonu je zajištěn pouze v ustáleném stavu
- menší dynamika pohonu

Vektorové řízení:

výhody

- vysoká dynamika pohonu
- přesné řízení a regulace
- umožňuje optimální provoz v ustálených podmínkách i během přechodových dějů (rozběh, brzdění)
- nedochází k přesycování magnetického obvodu a tím pádem ke zvyšování ztrát mající za následek sníženou účinnost a zvýšení teploty motoru

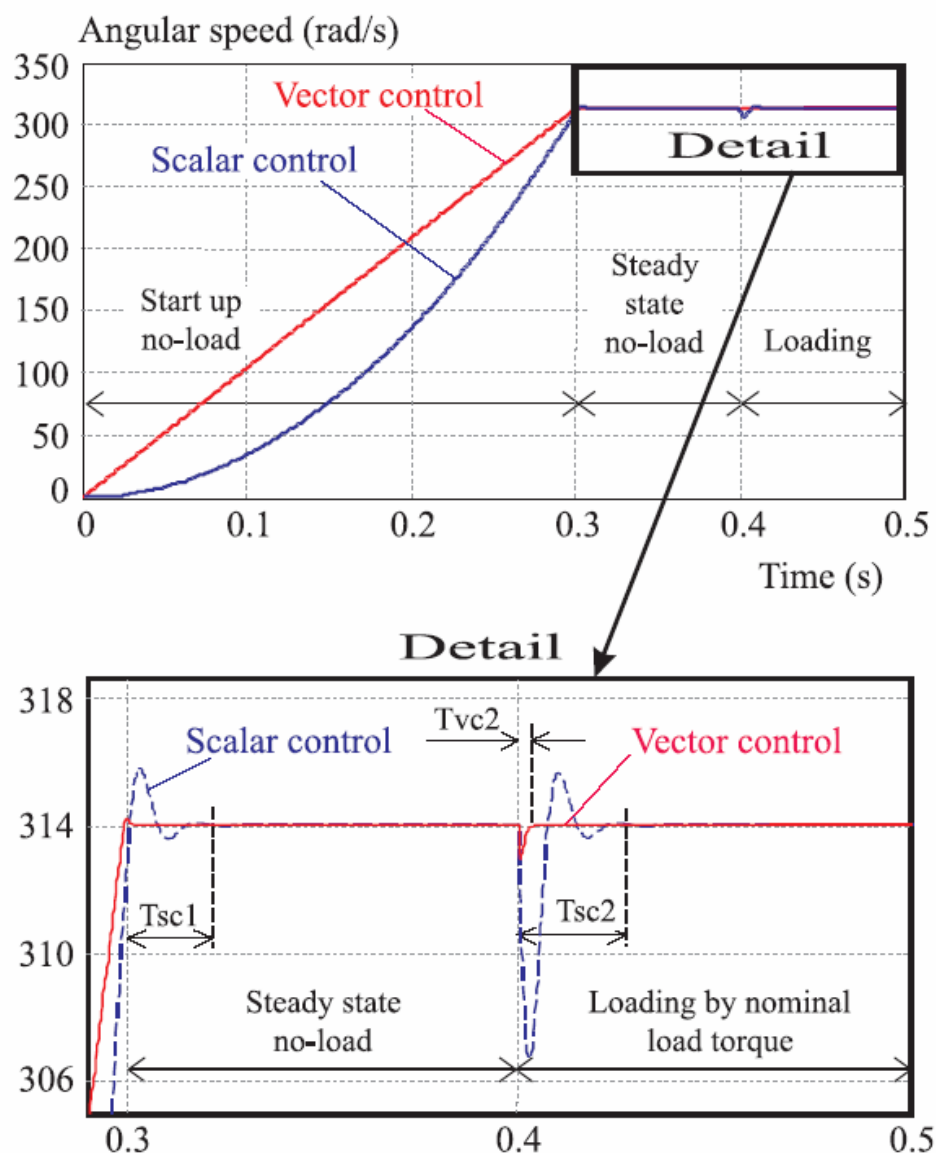
nevýhody

- cena (drahé signálové procesory)

Oba výše popsané způsoby řízení (s drobnými modifikacemi) jsou vhodné pro AM. Volba použitého způsobu řízení (skalární / vektorové) bude vždy otázkou požadovaných vlastností pohonu a jejich kompromisem vzhledem k ceně a technické realizaci u konkrétní aplikace. Problematika řízení AM je podrobně popsána v literatuře [8].

6.1. Srovnání dynamické odezvy PMSM

Na obrázku č. 23 je zaznamenána dynamická odezva pohonu s PMSM při skalárním a vektorovém řízení. Motor se rozbíhal bez zatížení na hodnotu žádaných otáček. U skalárního řízení vidíme překmit rychlosti nad požadovanou hranici. V případě vektorového řízení je překmit takřka zanedbatelný. V čase $t = 0,4$ s je motor zatížen nominálním momentem. V případě skalárního řízení je opět vidět jasný zákmit hodnoty úhlové rychlosti, u vektorového řízení je patrný jen minimální pokles a následné téměř okamžité ustálení úhlové rychlosti na žádané hodnotě.



23 Dynamické srovnání skalárního / vektorové řízení PMSM (převzato [14])

Zde ukázané srovnání jasně dokazuje lepší dynamické vlastnosti vektorového řízení oproti skalárnímu. [14] Použití vektorového či skalárního řízení opět závisí na konkrétních požadavcích aplikace. Zaměříme-li se na letecké aplikace je nutné zvláštní přihlídnutí k bezpečnosti, tedy k celkové spolehlivosti systému takto řízeného pohonu. Neméně důležitou položkou jsou i fyzické rozměry pohonu, především hmotnost. [11]

Parametry testovaného motoru: (bohužel daný literární pramen neuvádí výrobce ani přesný typ motoru)

- jmenovité napětí 15 V
- jmenovitý proud 8 A
- jmenovitý moment 0,38 Nm
- jmenovitá frekvence 150 Hz
- mag. tok PM 0,0096 W
- počet pólů 3
- moment setrvačnosti rotoru 0,08 kg.cm²

7. PRŮMYSLOVÉ TRENDY V ŘÍZENÍ

Dle literatury [8] má v současné době dominantní postavení v oblasti průmyslových pohonů skalárně (frekvenčně) řízený asynchronní motor. Dále AM řízené metodou „přímého řízení momentu“ (tahle aplikace se dále rozvíjí). V praktickém použití převažují aplikace s vektorovým řízením. Stále větší uplatnění nacházejí servopohony s PMSM díky vývoji výkonných signálových procesorů umožňujících implementaci složitějších algoritmů řízení.

Výhled:

- spínací frekvence větší než 20 kHz
- použití kompatibilních usměrňovačů
- použití maticových měničů
- zvyšování inteligence pohonu
- vysoký výpočetní výkon signálových procesorů umožní aplikovat nové algoritmy řízení
- nárůst používání pohonu se synchronními motory s permanentními magnety PMSM
- nárůst používání pohonů s lineárními motory
(Rydlo 2007 [11])

7.1. Řídicí moduly

Nabídka na trhu je nepřehledná, uvedu zde pár příkladů technických zařízení k řízení motorů.

7.1.1. SIEMENS

řada MICROMASTER 440

- výkon motoru 0,12 kW až 250 kW
- napětí 1 f, 3 f, v rozsahu 200 V až 600 V AC
- skalární řízení
- vektorové řízení
- FCC řízení (flux current control)
- PID regulátor
- autotuning (automatické nastavení vnitřních parametrů měniče, po zadání štítkových hodnot motoru)



24 Měnič firmy SIEMENS řady MICROMASTER 440 [18]

7.1.2. EMERSON

řada SP PANEL MOUNTING

- výkon motoru 0,37 kW až 132 kW
- napětí 1f, 3f pro 200, 400, 570, 640 V AC
- řízení v otevřené skalární smyčce
- vektorové řízení (otevřená / uzavřená) smyčka

- vektorové řízení PMSM s možností elektrického odbuzování pro větší otáčky



25 Měnič firmy EMERSON [18]

7.1.3. OMRON

řada CIMR F 7

- výkon motoru 0,4 kW až 300 kW
- skalární řízení
- vektorové řízení (otevřená / uzavřená smyčka)
- rychlostní řízení se zpětnou vazbou
- PID regulátor



26 Měnič firmy OMRON [18]

8. ZÁVĚR

Cílem práce bylo popsat základy skalárního a vektorového řízení pro synchronní motory a srovnání obou metod. V první části projektu jsou prezentovány základy vlastní konstrukce synchronního motoru, princip jeho činnosti, možnosti spouštění a vybrané mechanické a elektrické charakteristiky. Celá kapitola je věnována materiálům a postupům při výrobě permanentních magnetů do motorů typu PMSM. Nové technologie a materiály při výrobě permanentních magnetů budou mít zásadní vliv na stále větší nasazení PMSM do aplikací robotiky, automatizace a pohonářských aplikací. Je snaha o minimalizaci rozměrů, potažmo hmotnosti, při zachování vysokého výkonu motoru, z toho vyplývající požadavek na silný magnetický tok při minimálních rozměrech magnetu. Dalším nezanedbatelným přínosem je snížení momentu setrvačnosti rotoru a tím zvýšení rychlosti reakce na řídicí zásahy.

V části věnované hlavnímu cíli této práce jsem se snažil vytvořit základní náhled na problematiku skalárního a vektorového řízení. Při aplikaci skalárního řízení je silnou stránkou jeho jednoduchost, možnost absence zpětné vazby a cena. Tato metoda nachází největší uplatnění v průmyslu např. textilním, papírenském, hutním atd. K nevýhodám patří nízká dynamika a zajištění optimálního chodu pohonu jen v ustáleném stavu. Pokrytí těchto nedostatků nabízí vektorové řízení, které zajistí vysokou dynamiku a přesnost pohonu. Umožňuje řízení motoru i v průběhu přechodových dějů. Za nevýhodu této aplikace lze považovat finanční stránku věci, zapříčiněnou z velké části cenou signálových procesorů. Velkým příslibem do budoucnosti je vývoj signálových procesorů s vysokým výpočetním výkonem umožňující aplikaci složitých algoritmů, vedoucích k ještě větší kvalitě řízení.

Pro ucelení a lepší pochopení dané problematiky je v práci uveden popis dvou nejčastěji aplikovaných transformací souřadnic, tj. Clarkova, Parkova transformace a jejich inverze. Na závěr je uveden příklad tří výrobců na poli s řídicí technikou dostupnou na našem trhu.

9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Tištěné zdroje:

- [1] CHMELÍK, K., : *Asynchronní a synchronní stroje*, VŠB-TU OSTRAVA, 2002.135 s
ISBN 80-248-0025-X

- [2] KOČMAN, S., : *Synchronní stroje*, Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB-TU
OSTRAVA, 2000. 10 s.

- [3] PAVELKA, Jiří.: *Elektrické pohony*, vyd. ČVUT PRAHA, 2007. 222 s. , ISBN 978-
80- 01-03588-7,

- [4] PETROV, G, N, .: *Elektrické stroje 2., asynchronní a synchronní stroje*. 1. vydání,
Praha: Academica, 1982. 732 s.

- [5] PETRUŠKA, L'.*Model synchronného motoru*. Brno: Vysoké učení technické
v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 60 s. , 1 příloha.
Vedoucí práce Ing. Libor Veselý

- [6] POLIAK, F. , FEDÁK, V. ,ZBORAY, L., : *Elektrické pohony*, Alfa Bratislava, 1987.
606 s.

- [7] ROUBÍČEK, O., : *Elektrické motory a pohony*, BEN-technická literatura, Praha
2004. 191 s., ISBN 80-7300-092-X

- [8] RYDLO, P.: *Řízení elektrických střídavých pohonů*, vyd. Technické univerzita v
Liberci, 2007. 129 s. , ISBN 978-80-7372-223-4,

- [9] SKALICKÝ, Jiří.: *Elektrické servopohony*, vyd. VUT BRNO, 2001. 84 s. ,
ISBN 80 214-1978-4,

Internetové stránky a online dokumenty:

- [10] *An Introduction to Vector Control of AC Motors Using the V850*, November 2002, Vol.12, No. U16483EE1V0AN00
http://www.eu.necel.com/_pdf/U16483EE1V0AN00.PDF [online]
- [11] HUBÍK, V. , SZABÓ, I. , ŠVEJDA, M. : *Analýza bezsenzorového řízení BLDC motorů v leteckých aplikacích*, UNIS spol. s.r.o, Mechatronické systémy. 6 s.
http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB07/prispevky/hubik_sveda/hubik_sveda.pdf [online]
- [12] RYDLO, P. , *Moderní regulované elektrické pohony a servopohony*,. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií.,
http://www.mti.tul.cz/files/svm/VUTS_SVM.ppt [online]
- [13] *Synchronní stroje (motory)*
<http://fei1.vsb.cz/kat448/old/Studium/Materialy/VS/kap24.pdf> [online]
- [14] ŠTULRAJTER, M., HRABCOVÁ , V., FRANKO, M.: *Permanents Magnets Synchronous Motor Control Theory*. Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol.58, No. 2, 2007, 79-84
http://iris.elf.stuba.sk/JEEEC/data/pdf/2_107-3.pdf
- [15] <http://www.supplierlist.com/b2b/products/pcmagnet/p-0/showroom.htm> [online]
- [16] <http://212.71.149.246/elektrika/Prezentace/Měnič%20kmitočtu%20YASKAWA%20Gorg.ppt> [online]
- [17] http://www.into.cz/yaskawa/vs-616_g5/vs616g5.htm [online]
- [18] tištěné prospekty a katalogy firem SIEMENS, OMROM, EMERSON a jejich internetové stránky