

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vícefázová vinutí elektrických strojů točivých

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá možnostmi nasazení vícefázového vinutí v elektrických točivých strojích. Práce obsahuje rozbor standardních třífázových vinutí a matematický popis vzniku třífázového točivého magnetického pole. Dále je zde uvedena rešerše použití vícefázových vinutí v praxi. Na závěr práce jsou uvedeny výhody a nevýhody nasazení vinutí s větším počtem fází.

Klíčová slova

Točivé magnetické pole, třífázové stroje, vícefázové stroje, asynchronní motor, synchronní motor, PMSM, BLDC, odolnost proti chybám, výkonová hustota

Abstract

The bachelor thesis deals with the possibility of using multiphase windings in electric rotating machines. The thesis contains an analysis of standard three-phase windings and a mathematical description of three-phase rotating magnetic field. In addition, there is a reference to the use of multiphase windings in practice. At the end of the thesis are presented the advantages and disadvantages of the application of windings with a higher number of phases.

Keywords

Rotating magnetic field, three-phase machines, multiphase machines, induction motor, synchronous motor, PMSM, BLDC, fault tolerance, power density

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

.

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2018

Jan Nešpor

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Laksarovi za cenné a profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	8
STANDARDNÍ TŘÍFÁZOVÉ VINUTÍ	10
1.1 TOČIVÉ MAGNETICKÉ POLE	12
1.1.1 Třífázové točivé magnetické pole.....	12
1.1.2 Matematický popis vzniku třífázového točivého pole.....	13
1.2 ASYNCHRONNÍ MOTOR	16
1.2.1 Princip.....	17
1.3 SYNCHRONNÍ MOTOR	18
1.3.1 Nebuzené motory	19
1.3.2 Motory buzené stejnosměrným proudem	22
1.4 BLDC MOTOR (BRUSHLESS DC ELECTRIC MOTOR).....	22
1.4.1 Rozdíl mezi BLDC a PMSM	23
1.4.2 Použití.....	23
2 VÍCEFÁZOVÉ TOČIVÉ STROJE	24
2.1 VÍCEFÁZOVÉ ASYNCHRONNÍ STROJE	25
2.1.1 5 fázový.....	26
2.1.2 6 a 9 fázový.....	29
2.1.3 15 fázový.....	30
2.2 VÍCEFÁZOVÉ SYNCHRONNÍ STROJE.....	32
2.2.1 Vícefázový synchronní reluktanční motor.....	32
2.2.2 Vícefázový PMSM.....	33
2.3 VÍCEFÁZOVÝ BLDC MOTOR	37
2.3.1 5 fázový BLDC motor pro letecké aplikace	38
2.4 ZHODNOCENÍ POUŽITÍ VÍCEFÁZOVÉHO VINUTÍ	39
2.4.1 Výhody vícefázového vinutí.....	39
2.4.2 Nevýhody vícefázového vinutí.....	41
ZÁVĚR.....	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	43

Úvod

Předkládaná bakalářská práce se zabývá použitím vícefázového vinutí v elektrických točivých strojích.

Práce je rozdělena na dvě hlavní části, z nichž se první zabývá rozborem standardně používaného třífázového vinutí. Dále se v této kapitole nachází část, která se věnuje vzniku točivého magnetického pole a jeho matematické definici. V poslední části první kapitoly se práce zabývá aplikací třífázového vinutí na různé typy točivých elektrických strojů.

Druhá kapitola je již věnována vícefázovým vinutím, jejich vlastnostem a možnému použití v elektrických točivých strojích. Je zde uvedeno také několik příkladů vícefázových motorů.

V závěrečná část, se věnuje shrnutí výhod a nevýhod použití vícefázových vinutí v elektrických točivých strojích.

Seznam symbolů a zkratk

i'_{aa}	okamžitá hodnota proudu
I_M	maximální hodnota proudu
H'_{aa}	okamžitá hodnota intenzity magnetické pole
H_M	maximální hodnota intenzity magnetického pole
B'_{aa}	okamžitá hodnota magnetické indukce
B_M	maximální hodnota magnetické indukce
μ	Permeabilita
s	skluz
ASM	asynchronní motor
SM	synchronní motor
SRM	spínaný reluktanční motor
PMSM	synchronní motor s permanentními magnety
BLDC	bezkartáčový stejnosměrný motor
SynRM	synchronní reluktanční motor
PWM	pulzně šířková modulace

Standardní třífázové vinutí

Vinutí je ta část stroje, kterou protéká elektrický proud. V točivých elektrických strojích plní vinutí dvě základní funkce:

- Vytváří magnetické pole, které je zapotřebí pro přeměnu energie
- Vytváří sílu, kterou motor potřebuje pro svou práci

Vinutí se rozděluje na mnoho skupin, přičemž jedním z hlavních způsobů dělení vinutí je na jádrové či rozložené. Protože u induktu střídavých strojů je převážně použito vinutí rozložené, bude práce dále zaměřena na tento typ a jeho další způsoby dělení.

Rozložené vinutí

Rozložené vinutí je uloženo v drážkách, a to v jedné nebo nejčastěji ve dvou vrstvách (dvouvrstvé vinutí). Dvouvrstvé vinutí je z konstrukčního hlediska nejjednodušší, proto je v praxi aplikováno velmi často. Drážky, ve kterých je vinutí uloženo, jsou vytvořeny na povrchu válcové plochy statoru/rotoru. Tyto drážky jsou rovnoběžné s osou válce. Díky této skutečnosti je aktivní část závitu uložena v drážkách a neaktivní jsou zde pouze čela cívek. Čely se nazývají části cívky, které spojují obě aktivní strany. Tím se výrazně zvyšuje využití cívky. Rozložení vinutí dále dělíme na **koncentrické** nebo **postupné**[1].

Koncentrické vinutí

Koncentrické vinutí má tu nevýhodu, že se skládá z mnoha cívek o různých délkách, to má za následek složitější výrobní proces. Používá se u stejnosměrných strojů jako kompenzační vinutí a také jako budící vinutí u turboalternátorů. Příklad koncentrického vinutí je na obrázku 1.1 [1].



Obr. 1.1 Koncentrické vinutí – převzato z [1]

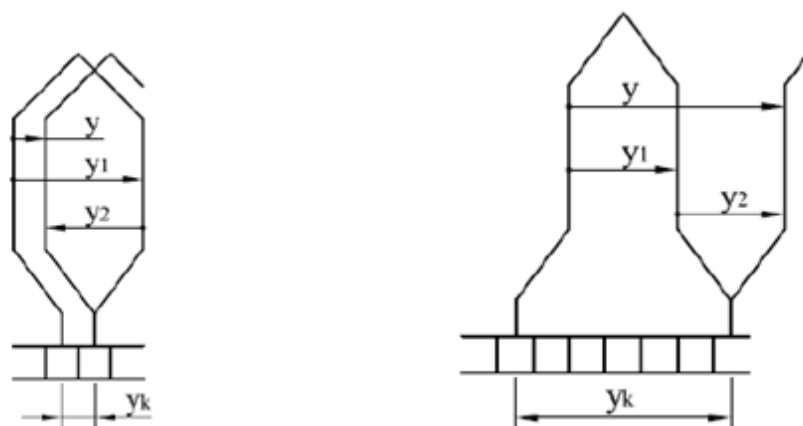
Postupné vinutí

U postupného vinutí odpadá nevýhoda, kterou má koncentrické vinutí. Všechny cívky mají stejnou velikost a tvar. Příklad uspořádání postupného vinutí je na obrázku 1.2 [1].

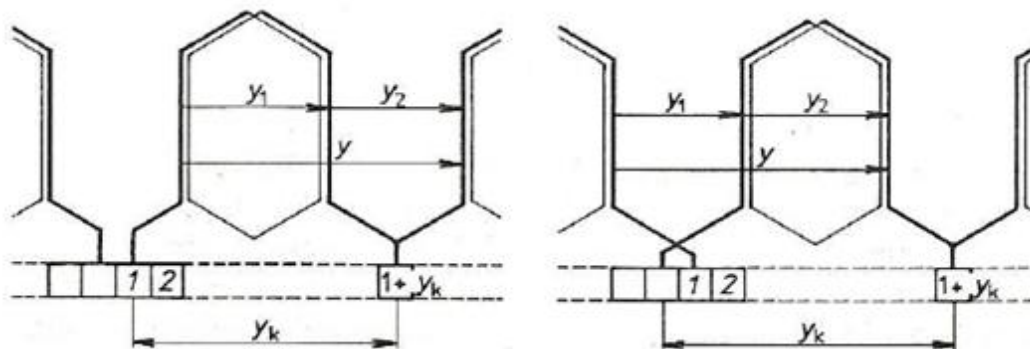


Obr. 1.2 Postupné vinutí – převzato z [1]

Podle tvaru jednotlivých cívek se vinutí dělí na smyčkové nebo vlnové, na křížené nebo nekřížené. Příklady těchto rozdělení jsou uvedeny na obrázcích 1.3 a 1.4 [1].



Obr. 1.3 Smyčkové a vlnové vinutí – převzato z [1]



Obr. 1.4 Nekřížení a křížené vlnové vinutí – převzato z [1]

1.1 Točivé magnetické pole

Točivé magnetické pole je základem všech elektrických motorů a generátorů. Nejjednodušší způsob vzniku točivého magnetického pole je mechanické otáčení permanentního magnetu.

Pokud chceme vytvořit točivé magnetické pole za pomoci elektrického proudu, stačí otáčet vodičem (cívku), kterým protéká stejnosměrný proud.

Toto řešení je ovšem v praxi konstrukčně náročné, proto volíme opačný postup. Vodič (cívku) pevně uchytkáme a pohybovat se bude proud, respektive jeho amplituda. Stejnosměrný proud nahradíme střídavým proudem. Avšak budeme-li mít pouze jednu cívku, získáme pouze pulzující a nikoli točivé magnetické pole. Pro vznik točivého magnetického pole musíme použít soustavu minimálně dvou cívek. Všechny použité cívky musejí být navzájem shodně otočeny. Vzájemné otočení cívek můžeme jednoduše vyvodit pomocí vztahu:

$$\alpha = \frac{360}{n} \quad (1.1)$$

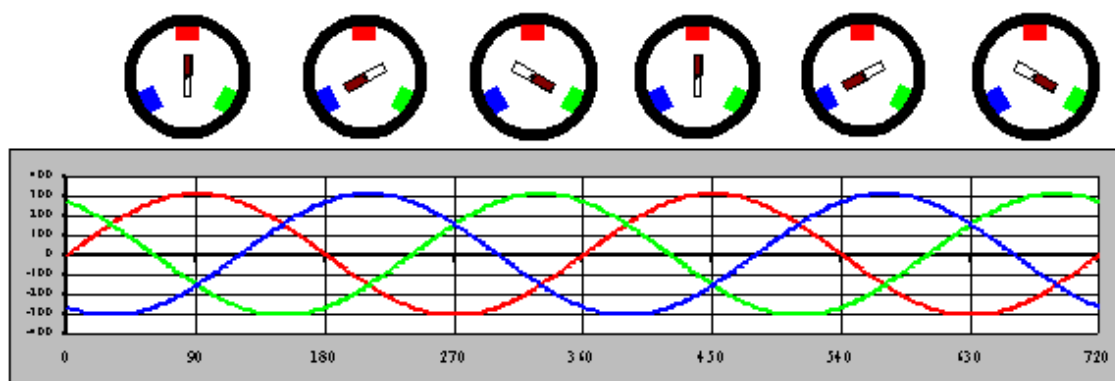
Kde α je potřebný geometrický úhel natočení cívek a n je počet cívek v soustavě.

1.1.1 Třífázové točivé magnetické pole

Soustava tří cívek se používá velmi často, protože je kompatibilní s tří fázovou soustavou střídavého napětí. Tyto tři cívky jsou napájeny napětím, kde je každá fáze posunuta o 120° od té další. Výsledkem tohoto je rotující vektor magnetického pole, jehož velikost zůstává stále stejná. Budeme-li uvažovat, že rotor vytváří stálé magnetické pole,

bude se jeho pól S pohybovat směrem k pólu J, který je vytvářen magnetickým polem statoru. Tato magneto-mechanická přitažlivost vytváří sílu, která způsobí, že se bude rotor otáčet ve směru točivého magnetického pole.

V tomto poli se bude permanentní magnet otáčet stejně jako vnější pole. Tento efekt byl využíván u raných elektrických motorů. Třífázový systém se používá tam, kde se jako zdroj elektrické energie používá systém, který dodává tři proudy, o stejné velikosti a které mají mezi sebou 120° fázový rozdíl. Příklad vzniku takového točivého magnetického pole je uveden na obrázku 1.5.



Obr. 1.5 3f točivá soustava – převzato z [2]

Tři cívky, rozestavené tak, aby měly mezi sebou 120° geometrický úhel vytvoří točivé magnetické pole. Schopnost třífázového systému, vytvořit točivé magnetické pole je jeden z hlavních důvodů, proč třífázový systém je nejpoužívanější napájecí systém na světě.

1.1.2 Matematický popis vzniku třífázového točivého pole

V tomto odstavci budeme uvažovat aplikaci třífázového napájecího systému na stator na obr. 1.6. Předpokládejme, že proudy, které protékají cívkami jsou:

$$i'_{aa}(t) = I_M \cdot \sin(\omega t) \text{ (A)} \quad (1.2)$$

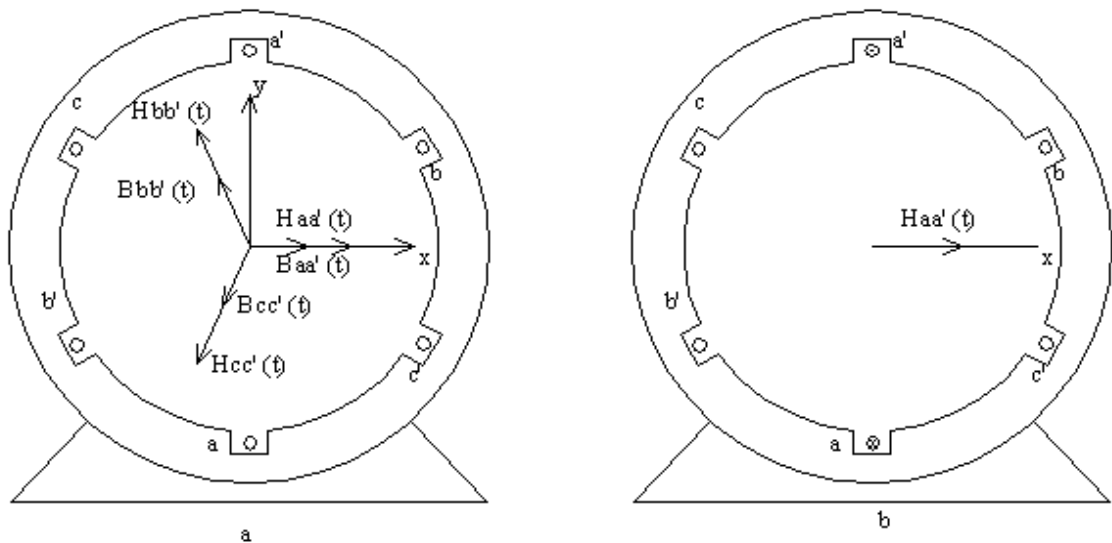
$$i'_{bb}(t) = I_M \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ (A)} \quad (1.3)$$

$$i'_{cc}(t) = I_M \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \text{ (A)} \quad (1.4)$$

Proud, který prochází cívkou aa' , vtéká do této cívky koncem a a vytéká z ní koncem a' . Tím produkuje magnetické pole o intenzitě:

$$H'_{aa}(t, \xi) = H_M \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\xi) \text{ (A/m)} \quad (1.5)$$

Kde 0° je prostorový úhel vektoru intenzity magnetického pole. Směr vektoru intenzity magnetického pole je dán pravidlem pravé ruky: Pokud jsou prsty pravé ruky stočeny směrem, jakým teče proud cívkou, potom výsledné magnetické pole působí směrem, kam ukazuje palec. Za povšimnutí stojí, že velikost vektoru intenzity magnetického pole $H_{aa'}$ se mění sinusově v čase, ale směr $H_{aa'}$ je vždy stejný. Stejně je tomu u vektorů $H_{bb'}$ a $H_{cc'}$. Ty jsou vyjádřeny níže:



Obr.1.6 (a) Vektory magnetických intenzit a indukcí vznikajících ve statoru, (b) vektor intenzity magnetického pole vyprodukovaný proudem tečícím cívkou aa' – převzato z [2]

$$H'_{bb}(t, \xi) = H_M \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \sin(\xi - 120^\circ) \text{ (A/m)} \quad (1.6)$$

$$H'_{cc}(t, \xi) = H_M \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \cdot \sin(\xi - 240^\circ) \text{ (A/m)} \quad (1.7)$$

Magnetické indukce vycházející z těchto intenzit magnetického pole jsou dány vztahem:

$$B = \mu \cdot H \quad (1.8)$$

$$B'_{aa}(t, \xi) = B_M \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\xi) \quad (T) \quad (1.9)$$

$$B'_{bb}(t, \xi) = B_M \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \sin(\xi - 120^\circ) \quad (T) \quad (1.10)$$

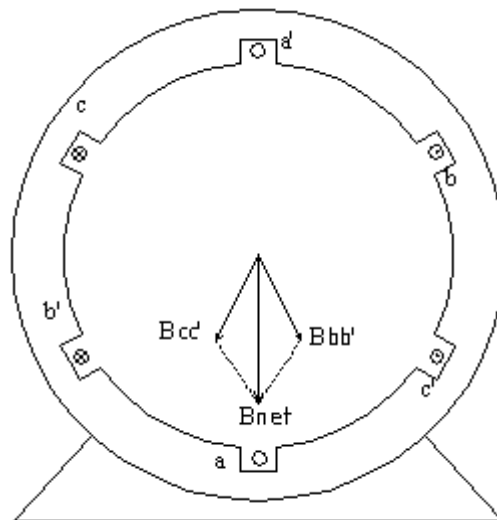
$$B'_{cc}(t, \xi) = B_M \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \cdot \sin(\xi - 240^\circ) \quad (T) \quad (1.11)$$

Kde $B_M = \mu \cdot H_M$. Pro zobrazení výsledného magnetického pole si zvolíme specifický čas, kdy bude platit $\omega t = 0$. V tomto čase budou magnetická pole pro jednotlivé cívky následující:

$$B'_{aa}(\xi) = 0 \quad (T) \quad (1.12)$$

$$B'_{bb}(\xi) = B_M \cdot \sin(-120^\circ) \cdot \sin(\xi - 120^\circ) \quad (T) \quad (1.13)$$

$$B'_{cc}(\xi) = B_M \cdot \sin(-240^\circ) \cdot \sin(\xi - 240^\circ) \quad (T) \quad (1.14)$$



Obr. 1.7 Vektor magnetického pole ve statoru v čase $\omega t = 0$ - převzato z [2]

Výsledné magnetické pole z těchto tří cívek bude:

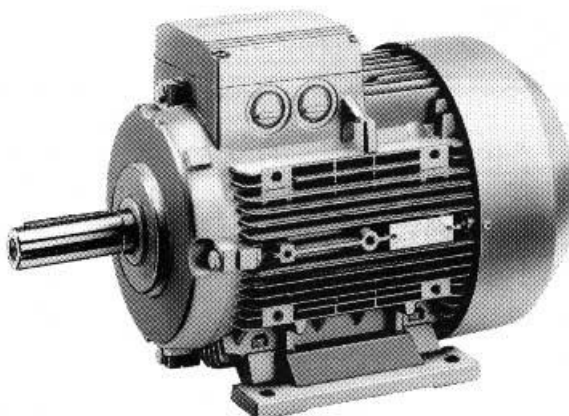
$$B_{net}(\xi) = B'_{aa}(\xi) + B'_{bb}(\xi) + B'_{cc}(\xi) = 0 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}B_M\right) \cdot \sin(\xi - 120^\circ) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_M\right) \cdot \sin(\xi - 240^\circ) = \frac{3}{2}B_M \cdot \sin(\xi - 90^\circ) \quad (1.15)$$

Vektor \mathbf{B}_{net} bude mít konstantní velikost a bude opisovat kružnici. Výsledkem čehož je vznik točivého magnetického pole [2].

1.2 Asynchronní motor

Asynchronní motory patří mezi nejpoužívanější elektrické pohony. Jejich výhodami jsou především jednoduchost konstrukce, spolehlivost, minimální údržba a nízké náklady na výrobu [3][4].

Asynchronní motory však mají jisté nevýhody, které komplikují jejich provoz. Jednou z hlavních je obtížné řízení rychlosti, pokud neuvažujeme soustavu s měničem. Z toho důvodu se asynchronní motory využívají především v místech, kde není nutná regulace otáček. Příkladem tohoto využití jsou ventilátory, dopravníky, čerpadla, sekačky, kompresory atd. Další nevýhodou je velký záběrný proud při rozběhu přímým připojením na síť. Tento proud je omezen pouze impedancí nakrátko a u strojů s klecovou kotvou může dosáhnout 4 až 7 násobku jmenovitého proudu [4].



Obr. 1.8 Asynchronní motor – převzato z [4]

Tyto nedostatky však můžeme poměrně snadno eliminovat použitím polovodičové výkonové elektroniky. V tomto případě tvoří soustavu motor, polovodičový měnič a řídicí

část. Asynchronní motor lze takto snadno přizpůsobit danému účelu a stává se široce univerzálním motorem. Takovéto uspořádání lze použít i jako trakční pohon, což by jinak bez použití měničů nebylo možné [3].

1.2.1 Princip

Asynchronní motor pracuje na principu vzájemného elektromagnetického působení dvou složek. Točivého elektromagnetického pole statoru a proudů, které se indukují ve vinutí rotoru, popřípadě v tyčích klece. Asynchronní stroj tedy pracuje na základě indukce napětí, proto se také v anglické literatuře nazývá induction motor.

Průchodem střídavého proudu o frekvenci f_s statorovým vedením vzniká ve vzduchové mezeře točivé magnetické pole. Pro úhlovou rychlost tohoto točivého pole platí vztah:

$$\omega_s = \frac{2\pi f_s}{p_p} \quad (1.16)$$

Kde p_p je počet pólových dvojic.

Napětí a proudy ve vedení rotoru se mohou indukovat pomocí tohoto točivého magnetického pole jen tehdy, pokud je rychlost otáčení rotoru odlišná od synchronní rychlosti točivého magnetického pole. Tedy pouze při rychlosti asynchronní. Proto se u asynchronního stroje zavádí tzv. skluz, který jak moc se otáčivá rychlost rotoru opožďuje za synchronní rychlostí statoru [3]. Pro skluz platí následující vztah:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (1.17)$$

Kde ω je úhlová rychlost rotoru. Podle hodnoty skluzu lze určit, v jakém provozním stavu pracuje. Platí pro:

$s = (-\infty, 0)$ - stroj pracuje v režimu generátorickém

$s = (0, 1)$ - stroj pracuje v motorickém režimu

$s = (1, \infty)$ - stroj pracuje jako brzda

V případě, že by rychlost rotoru se rovnala synchronní rychlosti točivého magnetického pole, neindukovalo by se ve vedení rotoru žádné napětí, netekl by žádný

proud a nevznikal by tak žádný moment. Skluz by byl nula. Takovému stavu říkáme stav naprázdno. Ovšem tohoto stavu nelze prakticky dosáhnout, protože stroj bude na hřídeli zatížen nenulovým momentem, který je tvořen mechanickými ztrátami, např. v ložiscích, odporem větráku atd.

Pokud je stroj zabrzděn, skluz se rovná 1. Takovému stavu říkáme stav nakrátko. Tento stav je avšak velmi nebezpečný, protože při jmenovitém napětí mohou proudy ve stroji dosahovat velmi vysokých hodnot. Hodnot tak vysokých, že stroj může být těmito proudy nenávratně poškozen.

1.3 Synchronní motor

Jedná se o motor, který je napájen střídavým proudem. Pokud se synchronní motor nachází v ustáleném stavu, otáčení hřídele je synchronizováno s frekvencí proudu, kterým je motor napájen. Počet otáček hřídele je přímo úměrný celkovému počtu střídavých cyklů. Synchronní motor je na statoru tvořen vícefázovým vinutím, které vytváří točivé magnetické pole. Toto pole se otáčí v čase podle oscilací proudu, kterým je vinutí statoru napájeno. Na rotoru jsou umístěny permanentní magnety, popřípadě elektromagnety. Kolem magnetů na rotoru vzniká magnetické pole, které reaguje s točivým magnetickým polem statoru. Opačné póly rotorového a statorového magnetického pole se přitáhnou a uzamknou v jedné pozici, to má za následek otáčení rotoru synchronní rychlostí statorového magnetického pole. Vztah pro synchronní rychlost je uveden zde [5]:

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (1.18)$$

Kde p je počet pólů.

Synchronní motory se vyrábějí ve velké škále velikostí. Od malých motorků o výkonech jednotky watt až po průmyslové motory o výkonu několik megawatt. Synchronní motory o malých výkonech se používají především v oblastech, kde vyžadujeme velmi přesnou rychlost otáčení. Příkladem jsou analogové elektronické hodiny, časovače a jiná zařízení, kde se vyžaduje správný čas. Synchronní motory s vysokým výkonem mají dvě hlavní funkce. První je využití motoru jako pohonu pro přeměnu elektrické energie na mechanickou. Tyto motory dosahují velké účinnosti. Moderní synchronní motory pracují

dokonce s účinností blížící se 99 % [6]. Druhá je využití motoru jako kompenzátoru. Takto využívaný motor nemá vyvedenou hřídel a slouží k výrobě jalové energie. Synchronní motory se dělí na dva hlavní typy podle způsobu, jak je rotor magnetován. Motor může být nebuzený, nebo buzený stejnosměrným proudem.

1.3.1 Nebuzené motory

U nebuzených motorů je rotor vytvořen z ocele s vysokou remanencí, např. kobaltová ocel. V synchronní rychlosti se rotor otáčí ve fázi s točivým magnetickým polem statoru, takže magnetické pole, které na něj působí je téměř konstantní. Vnější statorové pole magnetizuje rotor, včetně magnetických pólů, které jsou třeba k jeho otáčení. Mezi nebuzené motory se řadí:

- Reluktanční motory
- Hysterezní motory
- PMSM

1.3.1.1 Reluktanční motor

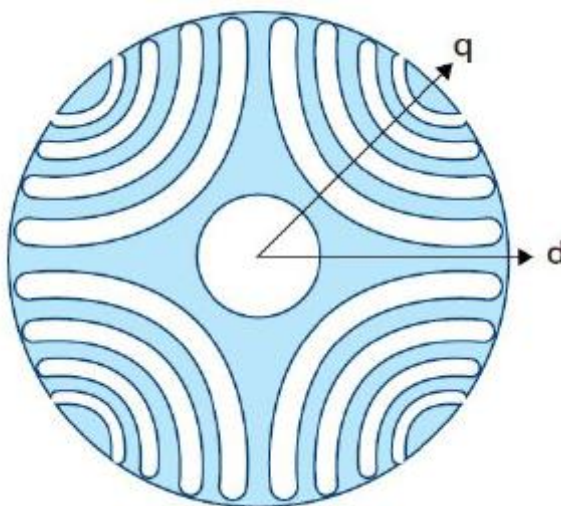
Reluktanční motor pracuje na principu reluktance. Při tomto stavu se bude magnetický tok uzavírat cestou nejmenšího magnetického odporu. Magnetický tok statoru se uzavírá přes rotor, a to zejména přes části, které jsou odděleny malou vzduchovou mezerou (malý magnetický odpor) a nikoliv přes části s velkou vzduchovou mezerou, a tedy s vysokým magnetickým odporem. Reluktanční motory se rozbíhají jako motory s kotvou nakrátko a po rozběhu jsou vtaženy do synchronismu. V místech rotorových drážek jsou velké vzduchové mezery. To vede k velkému rozptylovému magnetickému toku. Proto mají reluktanční motory menší účinník a vyšší odběr proudu než asynchronní motory s odpovídajícími parametry [7].

- Reluktanční motory se dělí na:
- Synchronní

- Spínané

1.3.1.1.1 Synchronní reluktanční motor

Synchronní reluktanční motor má stejný počet pólů na statoru jako na rotoru. Stator synchronního reluktančního motoru se nijak neliší od statoru asynchronního motoru. Také je tvořen plechy s drážkami, ve kterých je uloženo vinutí. Rotor je však rozdílný. Je tvořen lisovanými plechy, které jsou naskládány tak aby měli rozdílný magnetický odpor ve dvou na sebe kolmých osách. Pokud budeme uvažovat jako příklad čtyřpólový motor, tak tento motor se bude skládat ze čtyř pólů s nejmenším možným magnetickým odporem a čtyř pólů s velkým magnetickým odporem. Řez tímto typem rotoru se nachází na přiloženém obrázku 1.9. Osa d symbolizuje směr s malým magnetickým odporem a osa q s velkým magnetickým odporem [8].



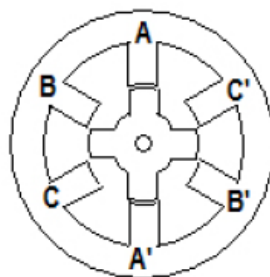
Obr. 1.9 Řez rotorem synchronního reluktančního motoru– převzato z [8]

Synchronní reluktanční motor se dnes používá především v oblasti čerpadel a větráku, kde jím můžeme nahradit standardní asynchronní motor. Oproti asynchronnímu motoru s kotvou nakrátko má synchronní reluktanční motor, pracující v synchronních otáčkách, jen minimální ztráty v rotoru. Díky tomu se prodlužuje životnost izolace, ložisek a prodlužují se mazací intervaly [8].

1.3.1.1.2 Spínaný reluktanční motor (Switched reluctance motor-SRM)

Spínané reluktanční motory, nebo také motory s variabilní reluktancí jsou také používány jako úsporná alternativa k asynchronním motorům. Stator a rotor SRM mají

vystouplé póly. Počet pólů na statoru je závislý na počtu fází motoru. Obvykle se volí, aby dva statorové póly na opačných koncích tvořily jednu fázi. V tomto případě bude mít 3-fázový SRM 6statorových pólů. Počet pólů rotoru se na rozdíl od synchronního reluktančního motoru liší od počtu pólů statoru. Pokud uvažujeme 6 pólů na statoru, rotorové póly budou 4. Tento typ motoru se také nazývá 6/4 3-fázový SR motor. Mechanická konstrukce tohoto motoru je naznačena na obrázku 1.10 [9].



Obr. 1.10 6/4 3-F SRM – převzato z [9]

1.3.1.2 Hysterezní motor

Rotor těchto motorů je čistě válcového tvaru. Je vytvořen z magneticky tvrdé kobaltové oceli. Tento materiál je použit, protože se vyznačuje velice širokou hysterezní smyčkou. Jak je tento materiál zmagnetován v jednom směru, je zapotřebí velikého magnetického pole k jeho přemagnetování. Točivé magnetické pole statoru způsobí, že každý malý kousek objemu rotoru vytvoří reverzní magnetické pole. Kvůli hysterezi bude fáze magnetizace zaostávat za fází aplikovaného točivého pole statoru. Následkem toho, bude osa magnetického pole vyvolaného v rotoru ležet za osou magnetického pole statoru. Rotor se bude snažit „dohnat“ statorové magnetické pole a to má za následek vznik momentu. Jakmile se rychlost rotoru přiblíží k synchronním otáčkám, magnetizační a statorové pole se vyrovná. Rotor se uzamkne k točivému magnetickému poli a bude se točit synchronními otáčkami [5].

Hlavní výhodou hysterezního motoru je jeho schopnost samostatného rozběhu. V některých případech se do rotoru zapouští klecové vinutí nakrátko pro zvýšení počátečního momentu [5].

Hysterezní motory se používají především jako servomotory, ovšem jsou dražší než servomotory na reluktančním principu.

1.3.1.3 PMSM (Permanent magnet synchronous motor)

PMSM, jak již název napovídá, využívají pro vznik magnetického pole na rotoru permanentní magnety. Tyto permanentní magnety jsou do ocelového rotoru zapuštěny. Stator je napájen střídavým proudem a produkuje tak točivé magnetické pole. Pokud se bude rotor otáčet rychlosti blízké synchronní rychlosti, jeho magnetické póly se společně s točivým magnetickým polem uzamknou a motor tak bude vtažen do synchronismu. PMSM jsou principem podobné BLDC motorům [5].

PMSM nelze rozběhnout takzvaným asynchronním způsobem, kdy je pro start použito indukční vinutí na rotoru. Tuto metodu nelze využít kvůli konstantnímu magnetickému poli, které se na rotoru nachází. PMSM potřebuje pro svůj start zdroj s proměnou frekvencí [5].

PMSM jsou dnes jedny z nejvíce využívaných pohonů na světě. Pole působnosti je velice široké. Motory o malých výkonech se používají v hodinkách, s vyšším výkonem se používají jako pohon pro různé nástroje a nářadí. Motory o nejvyšších výkonech se používají jako pohony lodí. Ve všech těchto oblastech se využívá především jejich přesně nastavitelná rychlost [10].

1.3.2 Motory buzené stejnosměrným proudem

Většinou se vyrábějí pro vyšší výkony (nad 1 kW). Tyto motory potřebují pro buzení rotoru stejnosměrný proud. Ten je nejčastěji na rotor přenášen pomocí kroužků, ovšem lze použít i bezkartáčové řešení tohoto přenosu proudu pomocí indukce a následného usměrnění. Stejnosměrný proud může být do rotoru dodáván z přičleněného zdroje nebo ze stejnosměrného generátoru, který je s hřídelí motoru přímo spojený.

1.4 BLDC motor (Brushless DC electric motor)

Bezkartáčový DC motor, známý také pod názvem Elektronicky komutovaný motor (ECM), je synchronní motor napájený stejnosměrným proudem. Tento stejnosměrný proud je ve střídači přeměněn na střídavý proud, který poté přes kontrolér napájí každou fázi motoru. Kontrolér poskytuje motoru proudové pulzy, kterými se řídí rychlost a moment motoru. Konstrukcí je bezkartáčový motor velmi podobný PMSM [11].

Bezkartáčový motor má oproti kartáčovému hned několik výhod. Jedná se především o vyšší účinnost. Dále se jedná o snížení hlučnosti a zvýšení životnosti motoru. Také zde odpadá problém se vznikem jisker od komutátoru. S absencí komutátoru se také snižuje elektromagnetické rušení [11].

Protože se na rotoru nenachází žádné vinutí, není vinutí motoru vystaveno žádným odstředivým silám. Vinutí je umístěno v drážkách, ovšem těchto drážek je malé množství. Tyto drážky jsou široké a vypadají tak jako vyniklé póly. Tyto drážky jsou přímo spojeny s pláštěm motoru. Vinutí tak může být chlazeno pouze vedením tepla skrz kovové části. Odpadá tak nutnost jakéhokoliv vzdušného toku uvnitř motoru. Motor tak může být zcela uzavřený. Takto uzavřený motor bude chráněn od prachu a jiného materiálu, který ho může zašpinit.

1.4.1 Rozdíl mezi BLDC a PMSM

Jak jsem již nastínil výše, BLDC a PMSM jsou velmi podobná zařízení, nabízí se tedy otázka, jaké jsou vlastně mezi nimi rozdíly. Jedním z rozdílů je vinutí, u BLDC motorů je satorové vinutí koncentrované a u PMSM je satorové vinutí rozložené. Odlišná vinutí jsou použita kvůli rozdílnému způsobu vzniku točivého magnetického pole. U BLDC motorů vzniká točivé magnetické pole postupným spínáním jednotlivých satorových pólů a u PMSM je točivé magnetické pole vytvořeno napájením satorového vinutí sinusovým průběhem. Proto je také dalším rozdílem mezi oběma motory tvar průběhu napájecího napětí. PMSM jsou napájeny napětím se sinusovým průběhem, kdežto BLDC motory jsou napájeny proudem lichoběžníkového tvaru [12].

1.4.2 Použití

Bezkartáčové DC motory plní mnoho funkcí, které původně vykonávaly kartáčové DC motory. Kartáčové motory však nelze bezkartáčovými úplně nahradit, z důvodů vyšší ceny a obtížnějšího řízení. Přesto se bezkartáčové motory staly dominantní v mnoha aplikacích, zejména v zařízeních jako pevné disky počítačů a CD/DVD přehrávače. Můžeme je také nalézt v bezdrátovém nářadí, kde vyšší efektivita motoru zvyšuje dobu, kdy není potřeba dobít baterii. Příkladem tohoto použití jsou některé křovinořezy, fukary na listí a některé aku vrtačky. Dále se používají například v dopravě jako pohony pro elektrická vozidla, hybridní auta nebo osobní přepravní zařízení. Používají se jako servomotory,

lineární motory, akční členy nebo jako motorky do leteckých modelů nebo do dálkově ovládaných autíček. Využití je opět velice široké.

2 Vícefázové točivé stroje

Už na začátku dvacátého století byly vícefázové stroje používány v různých průmyslových aplikacích, kde se využívala možnost rozdělení napájecího proudu do více fází. Jako příklad lze zmínit použití šestifázového elektrického generátoru z dvacátých let 20. století, z důvodu, aby nebyla překročena mezní hodnota proudu jističů z té doby [13].

V praxi se využívá velké množství vícefázových motorů, které se rozdělují jednak podle principu, tedy ASM, SM, PMSM, a dále podle počtu použitých fází. Tato práce je zaměřena na:

- Asynchronní vícefázové motory
- Synchronní vícefázové motory
- BLDC vícefázové motory

Nejpoužívanějším typem je zřejmě šestifázový asynchronní motor. Dále se používají například dvanácti a patnáctifázové asynchronní motory. Ty jsou v praxi použity jako lodní pohony. Příkladem použití vícefázového motoru s permanentním magnetem může být například čtyřfázový vysokorychlostní motor pro palivovou pumpu v letadlech [13].

Ve všech těchto případech je kladen velký důraz na bezpečnost a spolehlivost. Vícefázové motory pracují s velkou spolehlivostí, která je dána, právě větším počtem fází. I v případě poruchy v některé části vinutí zvládne motor stále pracovat, pokud zůstane počet zdravých fází alespoň $n-3$.

2.1 Vícefázové asynchronní stroje

Počátky vzniku vícefázových motorů se datují na konec šedesátých let dvacátého století. Pro řízení třífázových motorů se tehdy využívaly především šestipulzní frekvenční měniče. Tyto měniče však měly v té době vážný problém, a to značnou pulzaci momentu. Nejlepším řešením tohoto problému se stalo zvýšení počtu fází motoru. V dnešní době, kdy měniče využívají především pulzně-šířkovou modulaci (PWM), není pulzace momentu už tak výrazná a z tohoto hlediska již není nutné využívat vícefázové motory. U vícefázových motorů však byly objeveny i jiné výhody, díky kterým jsou používány i dnes. Jde např. o možnost rozdělení napájecího proudu do vyššího počtu fází, jak jsem již popsal výše. Díky tomu, se vícefázové motory hojně používají v aplikacích o vysokých výkonech [14][15].

Další výhodou vícefázových motorů je charakter magnetického napětí, které vzniká ve vzduchové mezeře stroje. Toto napětí má menší podíl vyšších harmonických složek, než je tomu u třífázových motorů. Díky tomuto menšímu podílu, máme u vícefázových motorů větší podíl základní harmonické složky, což má za následek vyšší účinnost a zároveň snížení hlučnosti [15].

Pokud byly doposud zmiňovány pouze výhody vícefázových motorů, je třeba zmínit také jejich nevýhody. Zřejmě tou největší je způsob napájení těchto speciálních strojů. Vícefázové motory, jejichž počet fází je násobkem tří, lze napájet pomocí třífázového rozvodu, který však musíme vhodně upravit. Jednotlivé skupiny třífázového vinutí potřebují napájecí proud, který bude mít fázový posun, odpovídající natočení jednotlivých skupin vinutí. Například pro napájení šestifázového motoru potřebujeme dvě standardní třífázová napájení, ale vzájemně musejí být otočeny o 30° . Toho se dosahuje pomocí střídačů, které vytvoří třífázové napětí o požadovaném fázovém posunu. Právě střídače jsou používány pro získání požadovaného proudu pro vícefázové motory. V některých případech (např. pětifázový motor) je třífázový napájecí proud nejprve usměrněn a poté pomocí střídačů rozdělen na jednotlivé fáze.

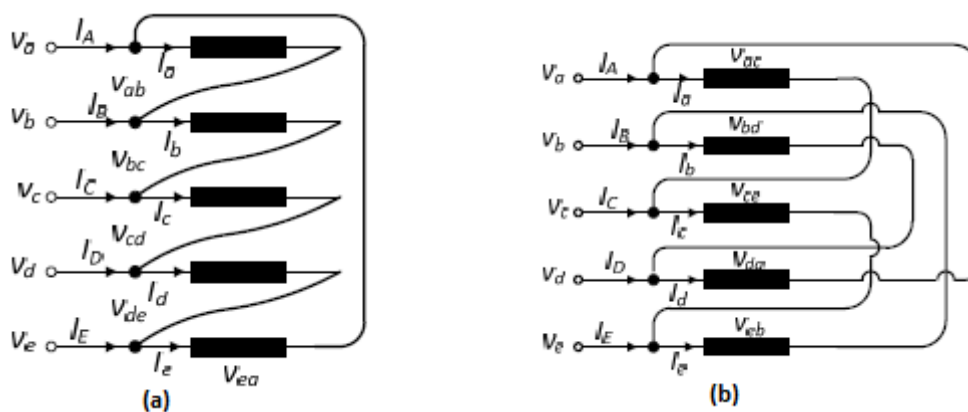
Z pohledu počtu fází, je vícefázových asynchronních strojů velké množství. Ve své práci se zaměřím na vícefázové asynchronní motory o následujícím počtu fází:

- 5 fázové
- 6 fázové
- 9 fázové
- 15 fázové

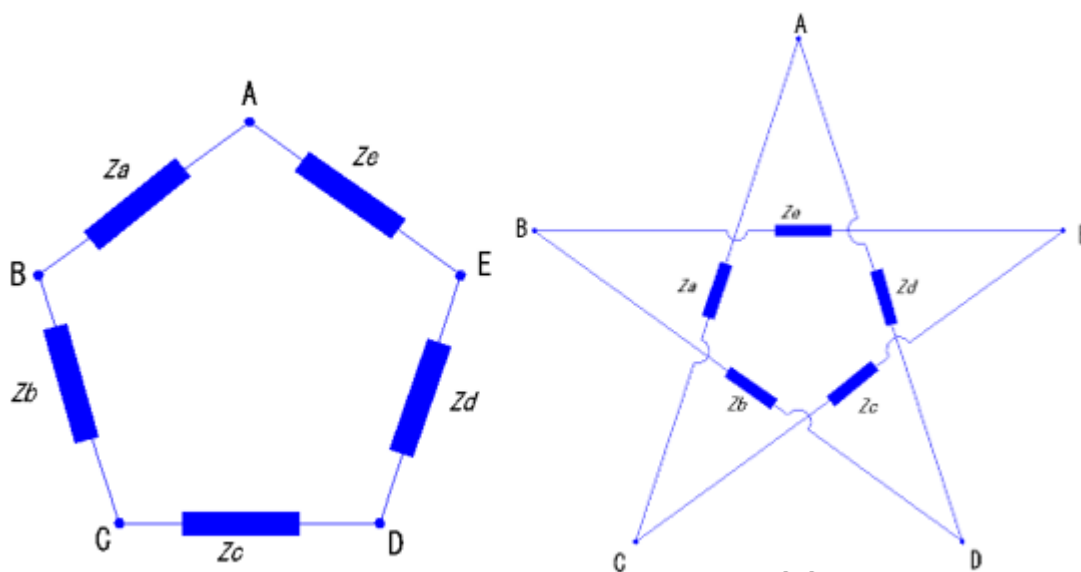
2.1.1 5 fázový

Jeden z nejvíce používaných vícefázových strojů je symetrický pětifázový stroj. Po konstrukční stránce se pětifázový motor příliš neliší od třífázového motoru s klecovou kotvou. Rozdíl je v tom, že pětifázový motor vyžaduje speciální napájecí zdroj a stator o pěti skupinách vinutí. Těchto pět skupin vinutí je rozděleno po 72° . Tato nižší hodnota rozdílu mezi jednotlivými fázemi má za příčinu vyšší měrný výkon stroje [16].

V pětifázovém stroji lze použít tři typy zapojení statorového vinutí, a to spojení do hvězdy, pentagonu nebo pentagramu. Spojení vinutí do pentagonu a do pentagramu je představeno na obrázku 2.2. Spojení vinutí do hvězdy v pětifázovém motoru se nijak neliší od třífázového motoru. Pouze v počtu fází [17]. Na obrázku 2.3 jsou předvedena prostorová rozložení vinutí spojeného do pentagonu a do pentagramu.



Obr. 2.2 (a) Pětifázové vinutí spojení do pentagonu, (b) spojení do pentagramu – převzato z [17]



Obr. 2.3 Prostorové rozložení do (a) pentagonu a do (b) pentagramu

Z těchto tří typů se nejvíce studií zabývá hvězdou, ovšem i u ostatních zapojení se očekává budoucí zájem. Pokud změní zapojení vinutí stroje z hvězdy na pentagon nebo pentagram, zvýšíme tím fázové napětí. Z toho vyplývá vyšší výkon stroje, v porovnání se spojením do hvězdy. Pokud je stroj navržen pro chod ve všech třech typech spojení, musí být brán tento velký nárůst mezi spojením hvězda a pentagram v potaz. Naopak při úvaze poruchy bude nejlepší výkon a nejhladší průběh momentu poskytovat spojení do pentagonu [17].

Návrh konstrukce

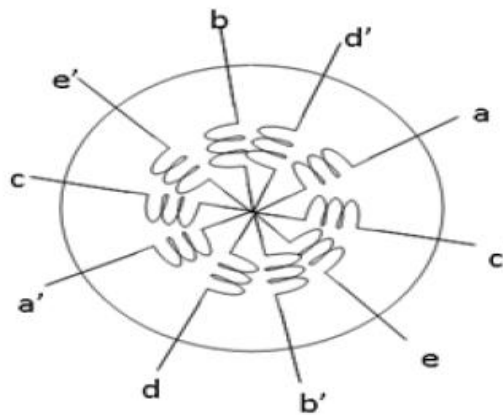
V literatuře se objevují dva rozdílné konstrukční typy. První typ používá rozložené vinutí, které vytváří téměř sinusové magnetické napětí, uvnitř vzduchové mezery. Tento motor vyžaduje pouze sinusový průběh napájecího napětí, takže harmonické nízkých řádů jsou zde nežádoucí. Druhý typ je navrhován s koncentrovaným vinutím na statoru, které vytváří magnetické napětí s harmonickými nízkých řádů. V tomto případě může být produkce momentu podpořena vstřikem proudu o nízkých harmonických. Jedná se zejména o třetí harmonickou, která je v třífázových motor netočivou složkou [18].

Stator a rotor

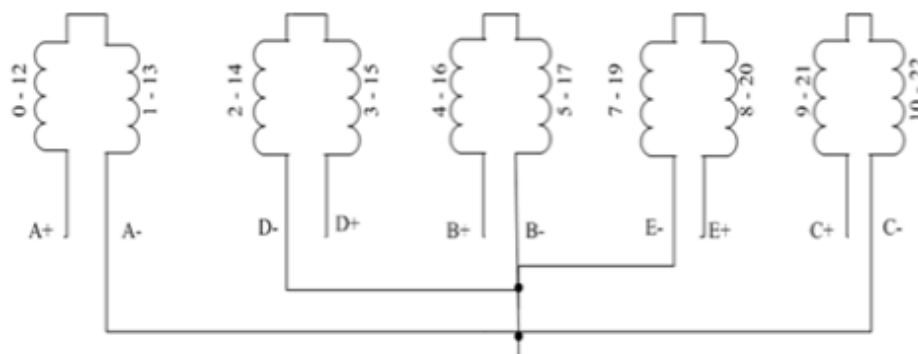
Pro konstrukci pětifázového asynchronního motoru, lze použít stejný stator a rotor, jako u standardního třífázového asynchronního motoru. Ovšem pouze části, které jsou odlity, nelze využít vinutí. To se musí nahradit pětifázovým. [18].

Návrh vinutí

V případě návrhu pětifázového motoru, musíme velmi dbát na správný počet drážek na pól a na správné cívkové rozpětí, abychom tak dosáhli vybalancované radiální síly. Na obrázku číslo 2.4 je zobrazen sled fází motoru a na obrázku číslo 2.5 je zobrazeno rozložení vinutí, aby bylo možné vložit vinutí do požadovaných drážek [18].



Obr. 2.4 Sled fází navrhovaného motoru – převzato z [18]



Obr. 2.5 Prostorové zobrazení vinutí navrhovaného motoru – převzato z [18]

Počet závitů vinutí na drážku je zvolen podle výsledku rovnice:

$$N = \frac{U_f}{4,44 \cdot K_w \cdot f \cdot n_s} \quad (2.1)$$

Kde N je počet závitů vinutí, U_f je fázové napětí, k_v je činitel vinutí, f je frekvence a n_s je zde synchronní rychlost.

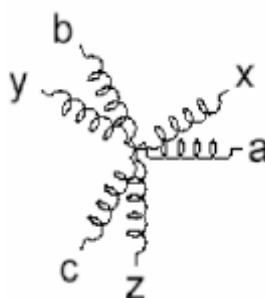
Porovnání s třífázovým motorem

Pokud mezi sebou porovnáme třífázový a pětifázový asynchronní motor o stejných fyzických rozměrech a objemu, zjistíme, že pětifázový motor produkuje významně vyšší výkon než třífázový motor. Pětifázový motor má také vyšší záběrný moment, což vyžaduje nižší počáteční napětí. Počáteční napětí uvažovaného pětifázového motoru je zde zhruba 30 V, počáteční napětí ekvivalentního třífázového motoru je téměř 50 V. Také provozní moment je vyšší. Po těchto zjištěních lze soudit, že pětifázový motor má vyšší momentovou hustotu než třífázový motor o stejné velikosti [18].

2.1.2 6 a 9 fázový

Tyto dva typy vícefázových asynchronních motorů jsou spojeny do jedné kapitoly, protože jsou konstrukčně řešeny podobně. Vinutí statoru šestifázového motoru se nazývá dvojitá hvězda, protože se jedná o dvě třífázová vinutí. U devítifázového motoru se jedná o tři třífázová vinutí, nazývá se trojitá hvězda.

V šestifázovém motoru jsou použita dvě třífázová vinutí. Pokud bychom uvažovali symetrické rozložení, byla by jednotlivá třífázová vinutí vzájemně posunuta o 60° . V praxi se, ale spíše realizuje asymetrické rozložení, ve kterém jsou dvě třífázová vinutí posunuta o 30° . Důvodem použití spíše asymetrického rozložení je jeho schopnost potlačit harmonické nižšího řádu jako pátou, sedmou, sedmnáctou a devatenáctou. Odstraněním těchto harmonických lze získat nižší pulzace momentu. Příklad vinutí asymetrického rozložení je na obrázku 2.6 [19].



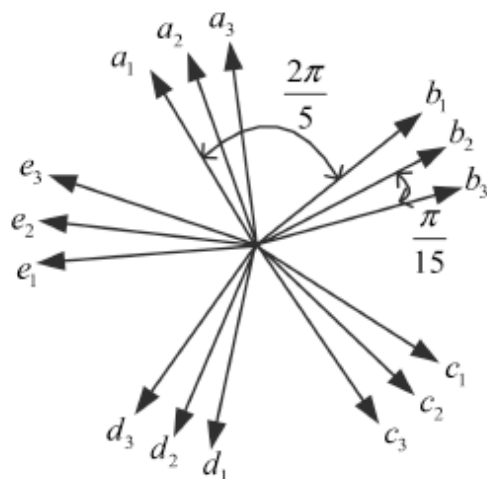
Obr. 2.6 Asymetricky rozložené šestifázové vinutí – převzato z [19]

Jedna z největších výhod použití šestifázových a devítifázových asynchronních motorů, je jejich vysoká spolehlivost. V případě poruchy jedné z fází, může zbytek vinutí pracovat nezávisle. Pokud je v šestifázovém motoru porušena jedna z fází, ať už zkratem nebo rozpojením, motor dále pracuje stejně jako pětifázový. U devítifázového, lze poruchu jedné fáze vyřešit odpojením celé jedné skupiny třífázového vinutí. Motor dále pracuje, ovšem s nižší výkonností. Další výhodou těchto motorů, stejně tak jako ostatních vícefázových motorů, je jejich vysoká účinnost. Ta je způsobena proudem, který je vytvářen statorovým vinutím. Tento proud, díky více fázím, obsahuje méně harmonických nižších řádů a je tedy více tvořen první harmonickou [20].

Šesti a devítifázové motory jsou v praxi jedny z nejvíce používaných vícefázových motorů a to především díky své snadné konstrukci, která se příliš neliší od třífázových. Použití je opět velice široké a zahrnuje obory, kde je kladen velký důraz na spolehlivost. Příkladem může být už výše zmíněné použití jako pohon pro elektrická či hybridní vozidla, pohonná zařízení v letadlech a také ve vojenské technice.

2.1.3 15 fázový

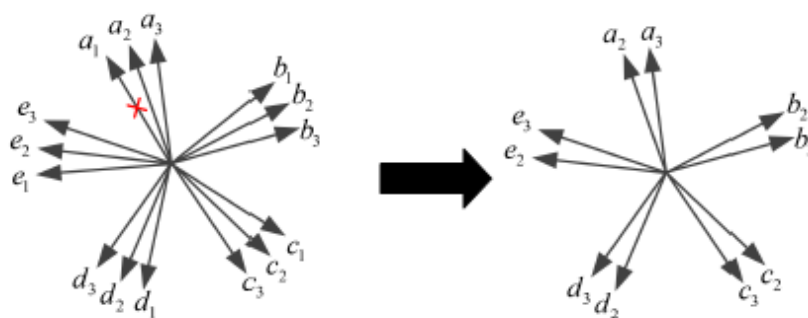
Statorové vinutí patnáctifázového motoru může být tvořeno třemi skupinami pětifázového vinutí, přičemž nulové body jednotlivých skupin jsou odděleny. Příklad uspořádání statorového vinutí patnáctifázového motoru je na obrázku 2.7 [21].



Obr. 2.7 Uspořádání patnáctifázového vinutí – převzato z [21]

V každé pětifázové skupině jsou statorová vinutí symetricky rozdělena o 72° . Ovšem tři pětifázové skupiny jsou uspořádány asymetricky o 12° .

Pokud budeme uvažovat poškození jedné z fází např. \mathbf{a}_1 motor bude schopen dále pokračovat v činnosti. Nicméně nesymetrie mezi zdravými fázemi má za následek vytváření magnetického napětí pohybujícího se opačným směrem. To může vést k oscilacím momentu. Tomu se samozřejmě snažíme zabránit, proto aplikujeme některou strategii pro řízení systému při těchto chybách. Dnes velmi pokročilou strategií jak vytvářet hladký průběh magnetické napětí uvnitř vzduchové mezery, je regulace proudu ve zbývajících nepoškozených fázích. Tato regulace asymetrických proudů je většinou realizována pomocí regulátorů (PR, PI). Ale zřejmě nejjednodušší strategií pro vícefázový motor o n skupinách symetrického m -fázového vinutí, je odpojení celé skupiny m -fázového vinutí, která obsahuje poškozenou fázi. Tato strategie je naznačena na obrázku 2.8 [21].



Obr. 2.8 Odpojení celé skupiny pětifázového vinutí při poruše fáze \mathbf{a}_1 – převzato z [21]

Po této rekonfiguraci statorového vinutí, bude motor pracovat jako nepoškozený vícefázový motor o $(n-1)$ skupinách m -fázového vinutí.

2.1.3.1 Použití

V posledních několika letech lze pozorovat nárůst popularity použití elektrického pohonu jako pohonného uspořádání pro lodě, plavidla a trajekty. A to zejména díky zvýšené flexibilitě, snížené ceně, zvýšené spolehlivosti a redukci vibrací a hluku. Například námořnictvo spojených států vytvořilo v roce 2016 torpédoborec nové třídy, Zumwalt. Tento torpédoborec má mít celkový výkon 78 MW a má dosahovat rychlosti až 55 km/h. Pohon tohoto plavidla má být zcela elektrický. Dalším příkladem může být vytvoření elektrické letadlové lodi třídy Královna Alžběta, kterou vlastní britské námořnictvo. Tato letadlová loď je poháněna čtyřmi 20 MW motory, které jsou napájeny z plynových turbín. Letadlová loď s jejich pomocí dosahuje rychlosti až 50 km/h při výtlačku 65000 tun. Právě použití patnáctifázového motoru jako pohonu pro lodě je jeho hlavním využitím v praxi [21].

2.2 Vícefázové synchronní stroje

2.2.1 Vícefázový synchronní reluktanční motor

Vývoji vícefázových synchronních reluktančních motorů (SynRM) byla v posledních letech věnována velká pozornost. A to především díky mnoha kladným vlastnostem, které tyto systémy mají. I přes relativně konstrukčně jednoduchý, levný a robustní rotor dosahují skvělých výkonů. Je s nimi možné dosáhnout vysoké účinnosti i při různém stupni zatížení a díky absenci permanentních magnetů, či jiných zdrojů excitace na rotoru, ještě stoupá celková robustnost stroje. Tím se velmi snižují servisní náklady. Ovšem absence permanentních magnetů není pravidlo [22].

Běžně jsou statory SynRM konstruovány s rozloženým vinutím. To má za následek vyšší výrobní náklady, způsobené komplexností rozloženého vinutí. Je také zřejmé, že rozložené vinutí, kvůli svým překrývajícím se cívkám, může mít vliv na celkovou odolnost proti poruchám. Další komplikací, je skutečnost, že je těžké udržet čela vinutí krátké. Speciálně pokud je aktivní část motoru navržena s krátkou axiální délkou. To bývá případ elektrických nebo hybridních vozidel. Kvůli těmto problémům, které rozložené vinutí

přináší, se zde konstruktéři soustředí na vinutí koncentrované a alternativní kompaktní řešení [22].

2.2.2 Vícefázový PMSM

PMSM jsou stále více a více používány v mnoha oblastech, jako například v průmyslových aplikacích, obranných systémech a v letectví. Ovšem pro aplikace, jako jsou vojenská zařízení, elektrická vozidla a letadla, vyžadujeme extrémní spolehlivost. Zde už nejsou schopnosti třífázových PMSM dostačující a byly tedy vytvořeny vícefázové PMSM motory, které mají daleko vyšší spolehlivost. Protože pokud dojde u třífázového PMSM ke zkratu jedné fáze, nebo k jejímu jinému závažnému poškození, moment motoru začne velmi dramaticky klesat. Což je absolutně neakceptovatelné pro elektrická vozidla, především potom pro vozidla, kde elektromotor pohání přímo kolo vozidla (in-wheel motor vehicles). Proto je ve výše zmíněných případech použit PMSM vícefázový, ten je schopen při správném řízení napájecích proudů tyto poruchové stavy přežít a dále fungovat [23].

Pokud bude porovnán třífázový PMSM s vícefázovým, nalezneme u vícefázového PMSM jisté odlišnosti. Motor je například kompletně elektricky izolován. Dále motor obsahuje efektivní magnetickou izolaci, izolaci mezi jednotlivými póly a také tepelnou izolaci. Vícefázový PMSM má také schopnost omezovat zkratový proud mezi fázemi [23].

2.2.2.1 Použití

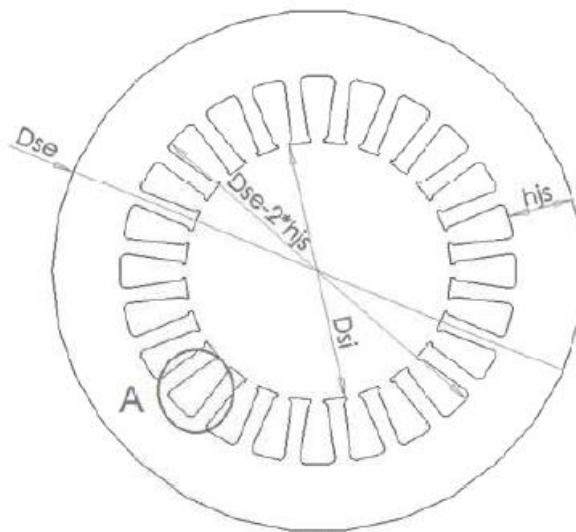
Vícefázové PMSM jsou, stejně jako standardní třífázové PMSM, velmi hojně využívány v praxi jako pohony pro nejrůznější aplikace. Například v letadlech jsou vícefázové PMSM často nejpoužívanějšími motory. Pětifázový PMSM se používá v letadlech jako pohon pro přední kolo. Šestifázové PMSM se zase často používají jako pohon pro škrťací klapky letadlových motorů. Důvody pro jejich použití v letadlech jsou opět jejich vysoká spolehlivost a vyšší hodnoty momentu. Další výhodou vícefázových PMSM je možnost navrhnout stroj s velkým počtem pólpárů. Takový motor se použije v aplikacích, kde je zapotřebí vysoký moment a nízké otáčky [24].

2.2.2.2 Příklad návrhu vícefázového PMSM

Součástí návrhu motoru je mimo jiné výpočet rozměrů, ztrát, účinnosti a mnoha dalších parametrů. V tomto oddíle bude představen pouze postup při návrhu vinutí vícefázového PMSM a jeho rotoru. Bude se jednat o šestifázový dvoupólový PMSM, dále jen PMSM6, pro aplikaci v elektronickém posilovači řízení. Hlavním úkolem při návrhu PMSM je stanovení uspořádání statorového vinutí a topologie navrhovaného rotoru.

Stator

Stator bude tvořen elektroplechy, které budou naskládány na sebe a následně svařeny. Na každém statorovém plechu bude podle návrhu vyraženo 24 drážek, do kterých bude vloženo statorové vinutí. Statorový plech je zobrazen na obrázku 2.9, kde D_{se} označuje vnější průměr statoru, D_{si} značí vnitřní průměr statoru a h_{js} je výška statorového jha. Drážky zde blíže uváděny nebudou [25].

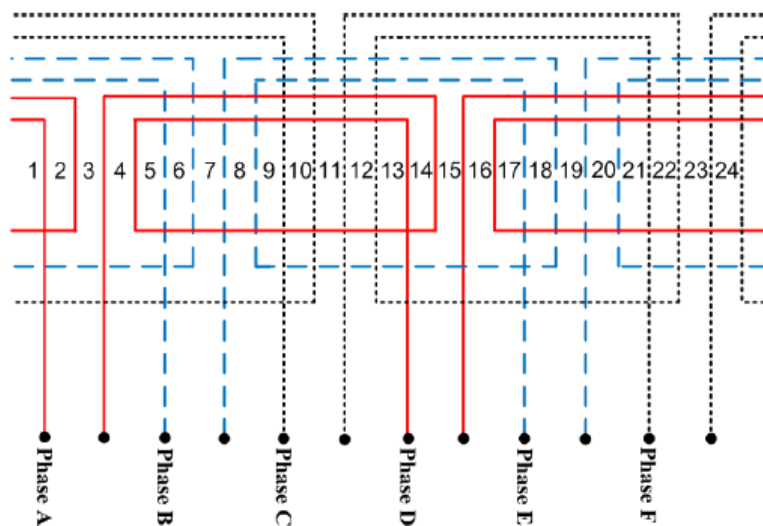


Obr. 2.9 Ukázka statorového plechu pro vícefázový PMSM – převzato z [25]

Vinutí

Obvykle platí, že počet fází stroje je stejný jako počet statorových svorek. Nicméně udávaný počet fází není vždy dostačujícím údajem. Toto je ten případ, protože pro daný počet fází, existují hned dvě varianty hodnot možného fázového úhlu pásu [25].

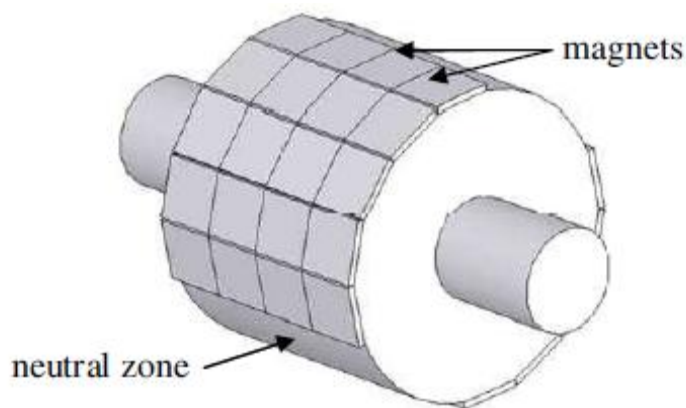
Šest fází je vzájemně posunuto o 60° a fázový posun mezi fázovými osami je také 60° . Pokud uvažujeme 24 statorových drážek, použijeme 12 cívek pro kompletaci vinutí. Vinutí fáze A začíná procházet drážkou 1 a pokračuje do drážky číslo 17, poté do drážky číslo 2 a 16. Schéma vinutí je zobrazeno na obrázku 2.10. Fáze B, C, D, E a F jsou umístěny do drážek s posunutím o $4/3$ pólu (4 drážky). Všechny cívky/fáze jsou spojeny do série, aby se vytvořila jedna proudová cesta [25].



Obr. 2.10 Schéma vinutí šestifázového PMSM – převzato z [25]

Rotor

Hlavním cílem při návrhu rotoru PMSM6 je zmenšení velikosti permanentních magnetů, a tím i výsledné ceny motoru. Typů rotorů je několik, liší se zejména rozvrstvením permanentních magnetů. Některé rotory je mají umístěny na povrchu, jiné je mají pro lepší koncentraci toku umístěny uvnitř, nebo mohou být poskládány na sobě v jedné či více vrstvách. Pokud budeme po motoru požadovat, aby pracoval ve velkém rozsahu otáček, nebude varianta s permanentními magnety na povrchu příliš vhodná, protože na permanentní magnety bude působit velká odstředivá síla a časem by mohlo dojít k problému s jejich uchycením. Vhodnější variantou bude v tomto případě rotor s permanentními magnety zapuštěnými, nebo umístěnými přímo uvnitř. V tomto příkladu požadujeme po motoru vysokou výkonovou hustotu, proto volíme možnost s permanentními magnety na povrchu rotoru. Příklad rotoru s permanentními magnety na povrchu je na obrázku 2.11 [25].



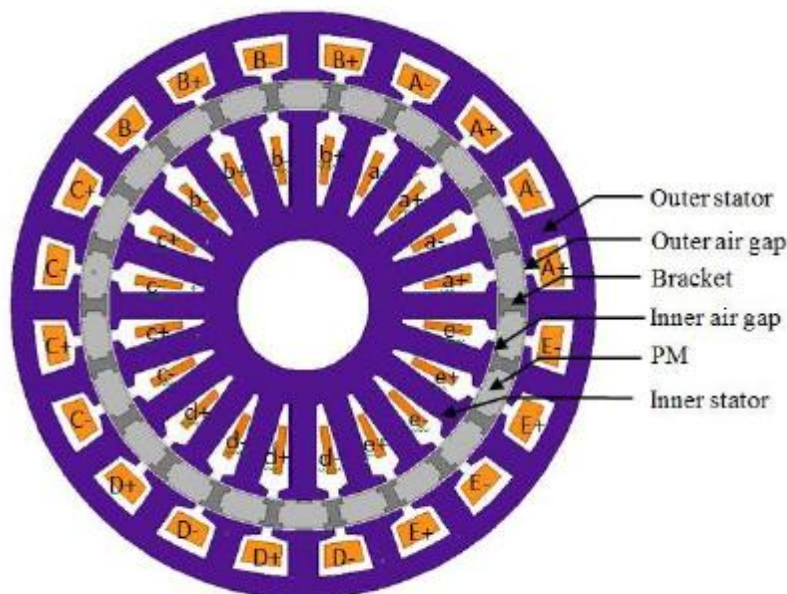
Obr. 2.11 Rotor navrhovaného šestifázového PMSM – převzato z [25]

V tomto případě byly použité permanentní magnety příliš malé, proto byl magnetický pól vytvořen spojením mnoha menších, stejně orientovaných, permanentních magnetů, připevněných na povrch rotoru [25].

2.2.2.3 5 fázový PMSM s dvojitým statorem

V průmyslu zabývající se výrobou elektrických vozidel, je kladen velký důraz na hustotu momentu a na odolnost proti chybám. Vyšší momentová hustota může mít za následek nižší hmotnost motoru a odolnost proti chybám je samozřejmě důležitá pro bezpečnost pasažérů. Požadavek na vysokou hustotu momentu splňují například PMSM motory s dvojitým statorem. Ovšem jejich třífázové provedení není příliš odolný proti chybám. A na druhou stranu motory, které jsou odolné proti chybám, jsou většinou vyráběny jen s jedním statorem a tak je jejich výkonová hustota omezena. Pro využití výhod obou těchto motorů byl vytvořen pětifázový PMSM s dvojitým statorem.

Protože má PMSM s dvojitým statorem dvoje vinutí, může být řízen ve dvou režimech, paralelním nebo sériovém. Pokud je motor řízen v paralelním režimu, jsou však zapotřebí dva řídicí okruhy. Na obrázku 2.12 je uvedena struktura toho motoru. Zde uvedený motor má na každém statoru 20 drážek, ve kterých je uloženo koncentrované vinutí. Mezi statory je uložen rotor s 22 póly, které nejen že zkracují konce vinutí a tím snižují ztráty v mědi, ale také způsobují téměř nulovou vzájemnou indukčnost mezi vinutími a tím zvyšují celkovou odolnost motoru proti poruchám. Vinutí obou statorů, vnitřního i vnějšího, jsou uspořádány tak, aby byly proti sobě stejné fáze. Takové uspořádání má výhodu v syntetizované elektromotorické síle, která tím dosahuje své maximální hodnoty. To má za následek zvýšení elektromagnetického momentu [26].



Obr. 2.12 Řez pětifázovým PMSM s dvojitým statorem – převzato z [26]

Celkový elektromagnetický moment motoru je dán součtem momentů, které produkuje vnitřní a vnější vzduchová mezera. Pokud zůstane vnější poloměr vnějšího statoru nezměněn a změní se jeho vnitřní poloměr a vnější poloměr vnitřního statoru, povede to ke změně distribuce momentu. A pokud bude držena skutečnost, že je požadována co největší momentová hustota motoru, je třeba, aby poměr mezi vnějším poloměrem vnitřního statoru a vnitřním poloměrem vnějšího statoru, který se nazývá poměr rozdělení, byl shodný [26].

PMSM s dvojitým statorem tedy nabízí mnoho výhod, mezi které patří možnost pracovat i s poškozenou fází a dobrá momentová hustota. Díky těmto vlastnostem se jedná o dobrou volbu, coby pohonu pro hybridní či elektrická vozidla.

2.3 Vícefázový BLDC motor

Vícefázové BLDC motory mají oproti třífázovým mnoho výhod. Patří mezi ně například lepší dynamické vlastnosti a také samozřejmě vyšší spolehlivost, která je opět způsobena vyšším počtem fází. Vícefázové BLDC motory se však nijak zásadně od třífázových motorů neliší. Protože nemají vinutí v klasickém slova smyslu, není jejich konstrukce nijak složitá. Pokud chceme vytvořit vícefázový BLDC motor stačí vytvořit stator s požadovaným počtem zubů, na které bude navinuto vinutí [27].

Jejich využití je opět velmi široké a to především díky jejich malé hmotnosti, velké spolehlivosti a vysoké hustotě výkonu. Právě díky těmto vlastnostem jsou velmi často využívány v leteckých zařízeních, kterou jsou stále více elektrizována. Proto i jako příklad vícefázového BLDC motoru uvádím motor, který se používá letectví.

2.3.1 5 fázový BLDC motor pro letecké aplikace

Díky vývoji nových kompozitních materiálů, lze používat v letadlové technice tenčí křídla. Tato skutečnost však ztěžuje instalaci některých pohonných zařízení. Ta musí být dostatečně malá, aby vyhověla novým prostorovým požadavkům. Pro své malé rozměry a spolehlivost jsou v těchto aplikacích velmi využívány elektrické motory. V případě leteckých aplikací se nejčastěji používají PMSM a BLDC motory. BLDC motor má však oproti PMSM několik výhod. Jedná se především o snazší řízení motoru. PMSM vyžaduje pro svou činnost komplexní mikroprocesor, což je součást, která by mohla potenciálně selhat. BLDC motory jsou zde zařazovány i díky skutečnosti, že mají vyšší výkonovou hustotu než kterýkoliv jiný motor. To je způsobeno lichoběžníkovým napájecím proudem a také zpětnou elektromotorickou silou. To s sebou ovšem přináší i jisté nevýhody, a to vysoký obsah vyšších harmonických ve vstupním proudu [28].

V leteckých aplikacích jsou na motor kladeny specifické požadavky, které musí bezpodmínečně splňovat. První je celková odolnost proti chybám a vysoká spolehlivost. Jedná se o nejdůležitější požadavek. Druhým je vysoká výkonová hustota, tedy poměr mezi výkonem a hmotností motoru. Všechna letadla mají váhové limity, a pokud se ušetří váha ve výbavě letadla, znamená to přepravu většího množství nákladu. Dalším předpokladem je provoz ve vlhkém provozu, protože pro zajištění vyšší životnosti jsou všechny posuvné povrchy v pohonu olejovány. Jedním z dalších požadavků je provoz v extrémních teplotách, pohybujících se od -50°C do 120°C . Motor musí mít také velmi rychlou reakci na změnu stavu. Většinu času je pohon v požadované pozici a v nízkých otáčkách (zhruba 2000 ot/min), ovšem pokud přijde podmět pro změnu pozice je třeba velmi rychlé odezvy, motor tedy zvýší své otáčky (až na 12000 ot/min) [28].

Volba pěti fází je v tomto případě kompromisem mezi odolností proti chybám, hmotností a objemem. Například motor s šestifázovým uspořádáním produkuje vyšší moment (zhruba o 3 %), ovšem je u něj nutné použít více výkonových součástí (o 20 % více než u pětifázového). Dalším důležitým parametrem motoru je počet pólů. Protože čím bude

počet pólů vyšší, tím může být vnější průměr statoru menší k danému průměru rotoru. Navíc pokud zvyšujeme počet pólů, jsou tím redukovány celkové ztráty v mědi, protože se zkracují čela vinutí [28]. Ovšem zvyšující se počet pólů má i své nevýhody. Jde například o zvyšující se základní spínací frekvenci, a to vede k větším ztrátám v železe. Motor, který je zde uveden jako příklad, má čtyři póly.

Zde uvažovaný pětifázový BLDC motor má maximální výkon 12 kW, ztráty při 2000 ot/min se rovnají zhruba 24 W, ale při 12000 ot/min jsou již celkové ztráty přes 1400 W. Takto velké ztráty v plném zatížení lze tolerovat, protože ve specifikaci motoru je uvedeno, že v plném zatížení se bude motor nacházet méně než minutu, tedy nepůjde o stálý provoz. Tento pětifázový BLDC motor je použit jako pohon pro elektrohydraulický systém v křídlech letadla pro ovládání naklápění vztlakových klapek [28].

2.4 Zhodnocení použití vícefázového vinutí

V této kapitole jsou celkově zhodnoceny výhody a nevýhody, které přináší aplikace vícefázového vinutí. Mezi výhody, které bych rád zmínil, patří:

- Odolnost proti chybám
- Snazší integrace
- Vyšší výkonová hustota
- Menší momentová pulzace

Za nevýhody vícefázového vinutí pak lze označit jejich složitější řízení a také pořizovací cena, která je vyšší než u třífázových variant.

2.4.1 Výhody vícefázového vinutí

Odolnost proti chybám

Jde o tu největší výhodu, kterou vícefázová vinutí poskytují. Schopnost provozu i přes poruchu některé z fází, je velmi ceněná. Díky této skutečnosti jsou vícefázové stroje

používány v oblastech, kde nám záleží především na spolehlivosti pohonného systému. Příkladem tohoto použití jsou vícefázové stroje pro námořní účely, pro aplikaci v letectví, používají se také v různých elektrických nebo hybridních vozidlech.

Snazší integrace

Použitím většího počtu fází je možné rozdělit napájecí proud na více částí a tím snížit proud, který protéká každou fází. To má za následek možnost použití vodičů o menším průřezu, se kterými se lépe manipuluje. Tento fakt se v praxi používá například v letadlech, kde se musí dbát na to, aby zařízení zabírala co nejmenší prostor a aby letadlo nepřesáhlo určitou váhu.

Vyšší výkonová hustota

Pojem výkonová hustota udává poměr mezi výkonem, který stroj produkuje a objemem stroje. Jinými slovy jde o efektivnější využití stroje. Tohoto vyššího výkonu dosahujeme pomocí sdruženého napětí, které je u vícefázového stroje vyšší. Například u třífázového vinutí je sdružené napětí 1,732 krát vyšší než fázové. U pětifázového vinutí je napětí mezi dvěma sousedícími fázemi 1,175 krát vyšší než fázové. Ovšem pokud přeskočíme jednu fázi, bude sdružené napětí již 1,902 krát vyšší než fázové. Díky této skutečnosti získáme ze stroje vyšší výkon při stejném dodávaném proudu.

Menší momentová pulzace

Při pokusech snížit pulzaci momentu elektrických strojů, bylo nalezeno řešení v použití vícefázového vinutí. Pokud je totiž použito vícefázové vinutí, je výsledný průběh proudu, a tedy i momentu, složen z více složek a je tedy více rovnoměrný. Ovšem jak je již uvedeno v kapitole 2.1, pulzace momentu již není tak výrazná, a to díky použití PWM modulace. Jedná se však o původní výhodu oproti třífázovým motorům, díky které se začala vědecká veřejnost více zabývat problematikou vícefázového vinutí a později byly objeveny i ostatní výhody použití tohoto systému.

2.4.2 Nevýhody vícefázového vinutí

Jak již bylo naznačeno výše, jednou z nevýhod vícefázového vinutí může být pořizovací cena. Ta je dána faktem, že výroba vícefázových strojů není tak rozšířena jako výroba třífázových strojů, které se produkují v ohromném množství. Do pořizovací ceny se však musí zahrnout také speciální napájecí zdroj, který vícefázový stroj vyžaduje. Tento speciální napájecí zdroj je tak další nevýhodou vícefázových motorů, není totiž možné tento motor napájet pouze připojením na síť. U napájecího zdroje je také problém v podobě měničů, ty totiž vyžadují speciální kondenzátory, aby se zamezilo jejich negativním vlivům na okolní síť.

Závěr

Úkolem této práce bylo seznámení se s problematikou nasazení vícefázového vinutí v elektrických točivých strojích. Protože téma vícefázové stroje je velmi obsáhlé, pokusil jsem se zde vytvořit malý přehled nejpoužívanějších typů těchto strojů. U těchto jednotlivých typů jsem také představil některé příklady točivých strojů. V práci jsem mimo popsání principů jednotlivých strojů a jejich použití v praxi také uvedl způsoby návrhu některých těchto strojů.

V závěrečné části práce jsem představil hlavní výhody vícefázových strojů. Tou nejdůležitější výhodou je jistě jejich schopnost fungovat i při poškození některé z fází. Vícefázové motory jsou proto použity v oblastech, kde požadujeme po pohonném systému skvělou spolehlivost, příkladem může být použití v elektrických autech, lodích, letadlech a mnoha jiných odvětvích.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ŘEZÁČEK, P. *Přednášky z předmětu KEV/PEZ*, FEL ZČU v Plzni 2017
- [2] *Rotating magnetic field behaviour in free coils* [online]. IIT Guwahati: ©2018 [cit. 20.4.2018]. Dostupné z: <http://iitg.vlab.co.in/?sub=61&brch=168&sim=1054&cnt=1>
- [3] MĚŘIČKA, J., HAMATA, V. a VOŽENÍLEK, P. *Elektrické stroje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [4] PAVELKA, J. a KOBRLÉ, P. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2016.
- [5] *Synchronous motor* [online]. Wikipedia, The free encyclopedia. Poslední změna 5.5.2018 16:27 [cit. 22.4.2018]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_motor
- [6] ROSBERG, Johanna. *ABB reaches 99.05% efficiency, the highest ever recorded for a synchronous motor* [online]. ABB, 12. July 2017 [cit. 22.4.2018]. Dostupné z: https://www.abb-conversations.com/2017/07/abb-motor-sets-world-record-in-energy-efficiency/?_ga=2.256660299.1314686808.1522257785-1584480338.1521668858#
- [7] *Reluctance motor* [online]. Wikipedia, The free encyclopedia. Poslední změna 14.4.2018 12:22 [cit. 22.4.2018]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Reluctance_motor
- [8] MATYSKA, Pavel. *Synchronní reluktanční motory v regulovaných pohonech* [online] ABB, 13. June 2013 [cit. 22.4.2018]. Dostupné z: <https://www.abb-conversations.com/cs/files/2013/06/Synchronn%C3%AD-reluktan%C4%8Dn%C3%AD-motory.pdf>
- [9] *Spínaný motor s variabilní reluktancí* [online]. Pohonnatechnika.cz: ©2018 [cit. 22.4.2018]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/reluktancni-motor/sr-motor>
- [10] *What are the best applications of permanent magnet motors* [online]. Quora: ©2018 [cit. 22.4.2018]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-are-the-best-applications-of-permanent-magnet-motors>
- [11] *Brushless DC electric motor* [online]. Wikipedia, The free encyclopedia. Poslední změna 23.3.2018 09:01 [cit. 22.4.2018]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor
- [12] *What is difference between BLDC and PMSM motors* [online]. ResearchGate: ©2018 [cit. 22.4.2018]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/post/What_is_the_difference_between_BLDC_and_PMSM_motors

- [13] P. Cordovil and I. E. Chabu, "Analytical calculation of slot leakage inductance in multiphase electrical machines," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, 2016, pp. 1352-1358.
- [14] E. Levi, "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 5, pp. 1893-1909, May 2008
- [15] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat and S. Williamson, "Multiphase induction motor drives - a technology status review," in *IET Electric Power Applications*, vol. 1, no. 4, pp. 489-516, July 2007
- [16] J. A. Riveros, F. Barrero, E. Levi, M. J. Durán, S. Toral and M. Jones, "Variable-Speed Five-Phase Induction Motor Drive Based on Predictive Torque Control," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 8, pp. 2957-2968, Aug. 2013
- [17] M. I. Masoud, "Five phase induction motor: Phase transposition effect with different stator winding connections," *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, 2016, pp. 1648-1655
- [18] K. A. Karim, N. A. M. Yusoff, A. Jidin, F. Patkar, R. N. Firdaus and M. L. Mohd Jamil, "Analysis of five-phase induction motor with dynamic load," in *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 20, pp. 9830-9834, November 2015
- [19] A. Nanoty, A. R. Chudasama, "Control of designed developed six phase induction motor," in *International Journal of Electromagnetics and Applications*, vol. 2, no. 5, pp. 77-84, 2012
- [20] M. Ajaz, A. B. Anwar, A. K. Tanwar and B. Vashisht, "Simulation and mathematical modeling of nine-Phase Induction Motor Drive," *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, New Delhi, 2015, pp. 1-6
- [21] Z. Liu, J. Wu and L. Hao, "Coordinated and fault-tolerant control of tandem 15-phase induction motors in ship propulsion system," in *IET Electric Power Applications*, vol. 12, no. 1, pp. 91-97, 1 2018
- [22] V. Bilyi, D. Bilyi, O. Moros, G. Dajaku and D. Gerling, "Synchronous reluctance machine with multiphase stator cage winding," *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, NSW, 2017, pp. 1-6
- [23] P. Zheng, Y. Sui, J. Zhao, C. Tong, T. A. Lipo and A. Wang, "Investigation of a Novel Five-Phase Modular Permanent-Magnet In-Wheel Motor," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 4084-4087, Oct. 2011
- [24] L. P. Di Noia and R. Rizzo, "Design of a five-phase permanent-magnet motor for the electric steering of an aircraft nose landing gear," in *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 7, no. 4, pp. 327-333, 12 2017

- [25] A. R. Matyas, K. A. Biro and D. Fodorean, "Multi-phase synchronous motor solution for steering applications," in *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 131, pp. 63-80, 2012
- [26] J. Zhao, J. Li and Z. Chen, "Design and analysis of a five-phase double-stator permanent magnet synchronous motor," *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Hangzhou, 2014, pp. 967-973
- [27] Hao Xiong, Qiang Wu, Yuqi Rang, Guangwei Meng, Huaishu Li and Libing Zhou, "Analysis and simulation of high power multi-phase BLDC motor," *2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, Deng Leng, 2011, pp. 3751-3754
- [28] X. Huang, A. Goodman, C. Gerada, Y. Fang and Q. Lu, "Design of a Five-Phase Brushless DC Motor for a Safety Critical Aerospace Application," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 9, pp. 3532-3541, Sept. 2012

