ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jednostranný magnetický tah a excentricita v elektrických strojích

Martin Pavec **2014-06-05**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2013/2014**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Martin PAVEC**
Osobní číslo:	**E13B0102K**
Studijní program:	**B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor:	**Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu:	**Jednostranný magnetický tah a excentricita v elektrických strojích**
Zadávající katedra:	**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor příčin vzniku jednostranného magnetického tahu.
2. Rozeberte možnosti analytického a numerického výpočtu jednostranného magnetického tahu.
3. Uveďte způsoby detekce excentricity v synchronních a asynchronních strojích.

Rozsah grafických prací:	**podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy:	**20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce:	**tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:	

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:	**Ing. Jan Šobra** Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Datum zadání bakalářské práce:	**14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**9. června 2014**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na rozbor příčin jednostranného magnetického tahu. Dále se zabývá možnostmi analytického a numerického výpočtu jednostranného magnetického tahu a způsoby detekce excentricity v elektrických strojích.

Klíčová slova

Jednostranný magnetický tah, excentricita, analytický výpočet excentricity, metoda konečných prvků.

Abstract

The bachelor thesis deals with causes of unbalanced magnetic pull origin. Analyse possibilities of analytical and numerical calculation of unbalanced magnetic pull and presents the review of eccentricity diagnostic methods in electrical machines.

Key words

Unbalanced magnetic pull, eccentricity, analytical eccentricity calculation, finite element method.

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2014 Martin Pavec

Poděkování

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

Obsah

OBSAH **8**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **9**

ÚVOD **10**

1 JEDNOSTRANNÝ MAGNETICKÝ TAH **11**

1.1 EXCENTRICITA V ELEKTRICKÉM STROJI 12
1.1.1 Statická excentricita *14*
1.1.2 Dynamická excentricita *14*
1.1.3 Smíšená excentricita *14*
1.1.4 Excentricita u dvoupólového stroje *15*
1.2 MECHANICKÉ SÍLY 16
1.2.1 Radiální síly *16*
1.2.2 Tečná síla *17*

2 ANALYTICKÝ A NUMERICKÝ VÝPOČET **18**

2.1 ANALYTICKÁ METODA 19
2.2 NUMERICKÁ METODA 23
2.2.1 Metoda konečných prvků MKP *24*

3 ZPŮSOBY DETEKCE EXCENTRICITY **31**

3.1 ONLINE METODY 31
3.2 OFFLINE METODY 32

ZÁVĚR **40**

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ **42**

Seznam symbolů a zkratek

JMT ..... Jednostranný magnetický tah

MKP ..... Metoda konečných prvků

Ft .....Tečná síla

Fm.....Síla vytvářející jednostranný magnetický tah

$MSCA$.....Motor current signature analysis

DE .....Dynamická excentricita

SE.....Statická excentricita

MKP.....Metoda konečných prvků

MTP .....Maxwellův tenzor pnutí

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na princip vzniku jednostranného magnetického tahu a excentricity v elektrických strojích. Tematicky je rozdělena do tří částí.

V první části je rozebírán vznik magnetického toku v různých elektrických strojích. Tento magnetický tok vyvolá různé síly, které působí na rotor a stator stroje. Jmenovitě jsou to síly radiální, tečné a axiální. Dále se tato část zabývá excentricitou v elektrických strojích. Příčinami vzniku, důsledky jejich vzniku a druhy excentricity. V neposlední řadě je zde popsána problematika jednostranného magnetického tahu.

Druhá část je zaměřena na analýzu jednostranného magnetického tahu pomocí výpočtů. Pomocí analytické metody výpočtu a používaných numerických metod, zejména metodu konečných prvků. U metody konečných prvků je představeno několik metod využívající principy MKP, jako například 2D modelování konečných prvků, sledování drah otáčení rotoru nebo výpočty pomocí Maxwellova tenzoru pnutí. Větší důraz je zde kladen na analytický výpočet.

Poslední, třetí část je zaměřena na způsoby jakými lze v dnešní době detekovat a měřit excentricitu v elektrických strojích. Tyto způsoby lze rozdělit na offline a online metody. Větší část textu je zaměřena na metodu detekce pomocí rozdílových indukcí v motoru v ideálním symetrickém stavu a ve stavu kdy je motor v excentricitě.

1 Jednostranný magnetický tah

V elektrických strojích dochází k vytvoření tečné síly, která zapříčiní točivý moment. Tato síla vzniká díky vzájemnému působení magnetických polí statoru a rotoru. To vzniká u všech typů elektrických strojů, ale u každého jiným způsobem.

U asynchronních strojů v motorickém režimu se točivé magnetické pole vytvoří průchodem střídavého proudu vinutím statoru. To naindukuje do rotorového vinutí napětí a následně vzniklý proud vytvoří ve statoru točivé elektromagnetické pole. Účinky tohoto pole dojde ke vzniku indukovaného napětí na rotoru a to vyvolá ve vinutí rotoru proud. Vzájemným působením elektromagnetický polí statoru a rotoru vznikne moment, který vytvoří otáčivý pohyb. Díky indukování napětí se asynchronním motorům také někdy říká indukční motory.

Statorové vinutí synchronního stroje je obdobné vinutí asynchronního stroje. Rotorové vinutí je napájeno stejnosměrným proudem. Rotor může být tvořen stejnosměrným vinutím nebo permanentními magnety, případně elektromagnety. Při režimu generátoru, kdy nabuzeným rotorem otáčí vnější síla (například turbína) se do cívek statoru indukují střídavá sinusová napětí fázově pootočená o 120°. Při připojení zátěže dojde k průchodu střídavého proudu. V motorickém režimu statorové vinutí vytváří točivé magnetické pole otáčející se synchronní rychlostí. Rotor vytvářející magnetický tok je poté vtažen do synchronismu a otáčí se stejnými otáčkami jako pole statoru.

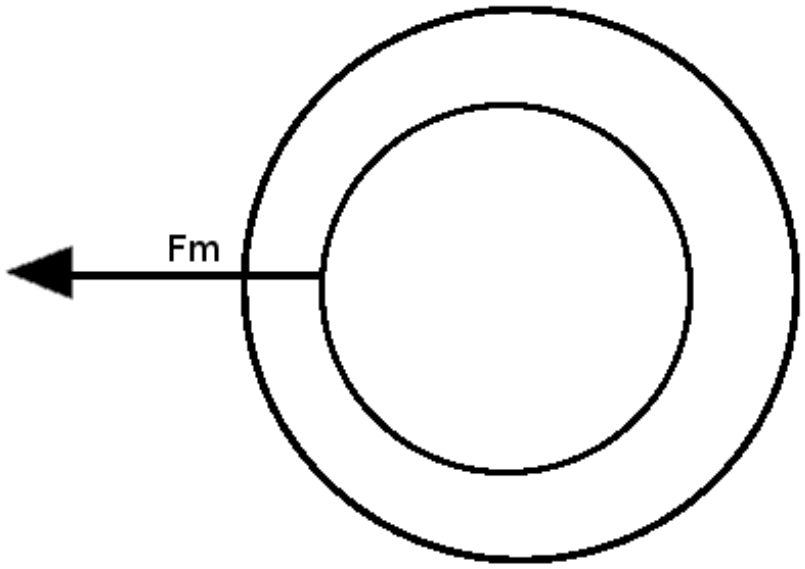
Stator stejnosměrných strojů je tvořen budícím vinutím nebo permanentními magnety. Do rotoru se v režimu generátoru indukují proudy. V režimu motoru je přiváděno do rotoru napájení přes komutátor.

Hlavní příčinou JMT je excentricita v elektrickém stroji. Ta zapříčiní vznik nerovnoměrně rozložené vzduchové mezery.

Mezi hlavní příčiny vzniku nerovnoměrně rozložené vzduchové mezery patří nepřesné uložení rotoru, špatně vyvážená nebo prohnutá hřídel, další častou příčinou

jsou opotřebovaná ložiska. Následkem vytvoření této mezery dojde ke vzniku mechanických sil, díky kterým začne působit nežádoucí tah v jednom směru.

Radiální síly jsou generovány ve stejnou dobu jako tečná síla, ale za předpokladu, že stator a rotor jsou vzájemné soustřednosti a mají tedy symetrickou vzduchovou mezeru, se radiální síly vyrovnají. Při speciálních okolnostech se může vyskytnout i síla axiální.



Obrázek 1 - jednostranný magnetický tah

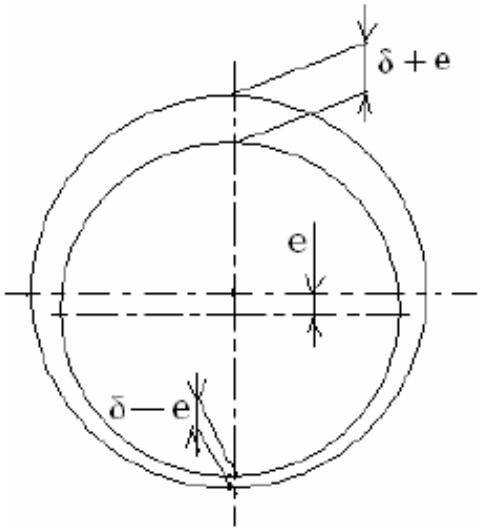
kde F_m je velikost jednostranného magnetického tahu

1.1 Excentricita v elektrickém stroji

V případě, kdy je rotor uložen excentricky, vznikne nesymetrická vzduchová mezera, magnetická indukce se rozloží nerovnoměrně a vzniknou radiální síly, které se vzájemně nevyruší. Ve spojení s okolním mechanickým systémem mohou vytvořit nežádoucí a škodlivé vibrace, hluk, opotřebení ložisek nebo průhyb rotoru. Tím se zvyšuje riziko tření rotoru o stator, které může způsobit vážné poškození statoru, rotoru, vodičů nebo poškození izolace stroje.

Obecný případ excentricity zahrnuje dynamickou excentricitu, kdy střed rotoru následuje nahodilou trajektorii, která se neshoduje s geometrickým středem statoru. Dalším případem je stav kdy se stator nebo rotor mohou odchýlit od ideálního stavu, například ohnutím hřídele. V obou případech vznikne asymetrická vzduchová mezera a JMT.

Ačkoliv je žádoucí, aby nebyla excentricita v elektrickém stroji žádná, což by zvyšovalo spolehlivost a zaručovalo vysoký výkon stoje, bohužel nedokážeme vyrobit naprosto dokonalé stroje a proto je zhruba 10% z celkové velikosti excentricity vytvořena již ve výrobním procesu, potažmo při montážním postupu.

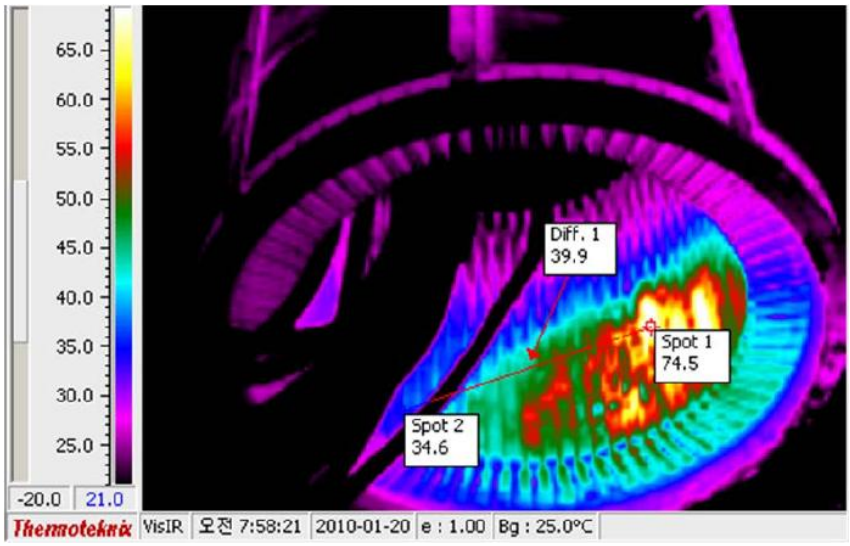


Obrázek 2 - excentricky uložený rotor [2]

kde:

δ je velikost vzduchové mezery, e je velikost excentricity

Na *Obrázku 3* je vidět 110kW asynchronní motor s poškozením izolace statorového vinutí v důsledku excentricity, která způsobila tření rotoru o stator. Tento motor byl instalován v Korejské elektrárně. [5] Pomocí infračerveného termálního obrazu jádra statoru je vidět, že díky excentricitě je teplota jádra o 40°C vyšší než je teplota okolní, což vede ke zhoršení vlastností a následnému poškození izolace.



Obrázek 3- ukázka poškození statorového vinutí [5]

1.1.1 Statická excentricita

Statická excentricita je stav, kdy pozice minimální vzduchové mezery se nemění a je způsobena oválným tvarem jádra statoru, nebo nesprávným uložením statorového jádra a ložiska. Velikost statické excentricity se obvykle v průběhu provozu stoje nemění.

1.1.2 Dynamická excentricita

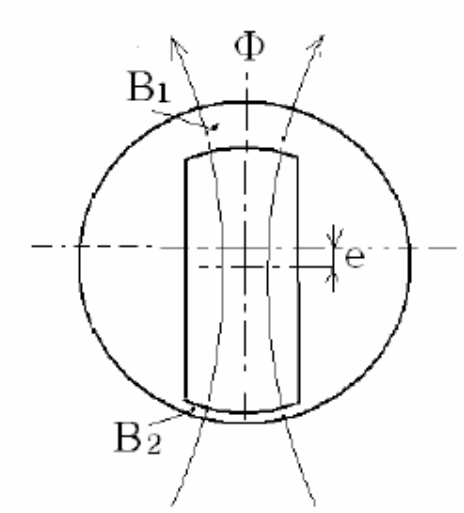
Vzniká, když střed rotoru není ve středu otáčení a tudíž se během otáčení rotoru mění pozice minimální vzduchové mezery. Její velikost se tedy při běhu stroje mění v závislosti na poloze a v závislosti na čase se úroveň excentricity obvykle zvyšuje. Příčinou nevyváženosti může být prohnutá hřídel rotoru, opotřebená ložiska nebo již dost vysoká úroveň statické excentricity.

1.1.3 Smíšená excentricita

Je stav, kdy existuje jak statická tak dynamická excentricita.

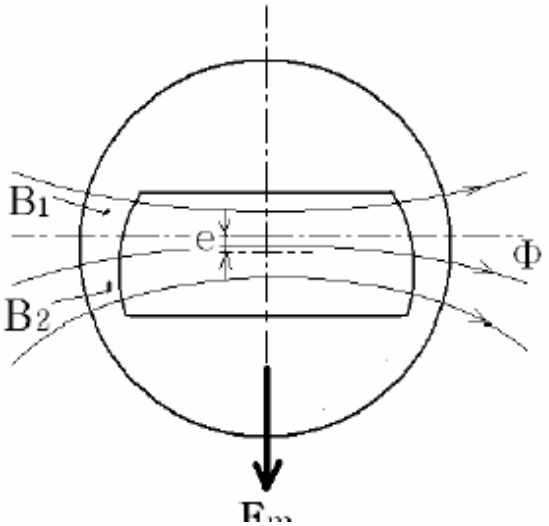
1.1.4 Excentricita u dvoupólového stroje

U dvoupólového stroje je problém excentricity poněkud složitější než u více pólových strojů. Pokud bude směr, ve kterém působí excentricita shodná s osou pólů viz *Obrázek 4,* nedojde ke vzniku jednostranného magnetického tahu, jelikož se pod jedním pólem vzduchová mezera zmenší, ale pod druhý zvětší stejným poměrem, výsledná vzduchová mezera zůstane stejná. Díky tomu zůstane stejná velikost magnetického odporu, toku i indukce.



Obrázek 4 - shodná osa pólů a excentricity [2]

Ovšem v případě, kdy je směr excentricity kolmý na osu pólů viz *Obrázek 5,* dojde ke snížení velikosti vzduchové mezery ve směru excentricity, poté platí B2>B1 a vznikne v tomto směru jednostranný magnetický tah.



Obrázek 5 - směr excentricity kolmý na osu pólů [2]

U těchto strojů se zpravidla uvažuje přibližně poloviční hodnota jednostranného magnetického tahu, než i více pólových strojů.

1.2 Mechanické síly

Tyto síly vznikají díky magnetickému poli ve vzduchové mezeře, které vzniká mezi rotorem a statorem. Tyto síly působí v radiálním, tangenciálním a někdy i axiálním směru, jak bude níže dále rozvedeno. Velikost těchto sil je odvozena ze specifické magnetické síly. Ta je dána vztahem:

$$p = \frac{BH}{2}[MPa] \quad (1)$$

1.2.1 Radiální síly

Jak již bylo výše napsáno, radiální síly se vyrovnají v případě symetrie mezi rotorem a statorem a vzduchovém mezery mezi nimi. V případě, kdy není vzduchová mezera v symetrii, začnou radiální síly působit silněji v místě nejmenší vzduchové mezery. V tomto místě je menší magnetický odpor a tedy větší magnetická indukce.

Dojde zde ke vzniku jednostranného magnetického tahu působícího ve stejném směru jako dominantní radiální síly, který svými účinky namáhá hřídel a ložiska.

Při návrhu elektrického stroje je nutno počítat s těmito nežádoucími silami a vhodně naddimenzovat všechny části stoje, u kterých dochází k tomuto nežádoucímu namáhání.

1.2.2 Tečná síla

Tečná síla působí se směru otáčení rotoru. Velikost tečné síly lze jednoduše vypočítat z mechanického momentu a průměr induktu viz. (3).

Výpočet mechanického momentu:

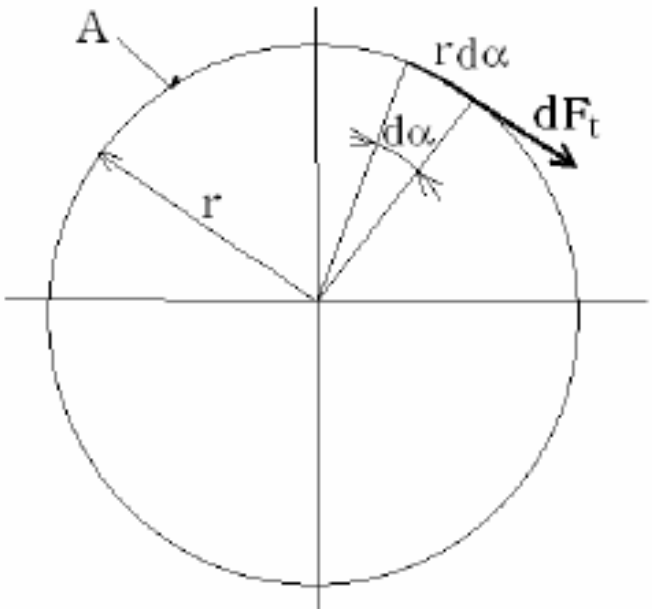
$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{30}{\pi}\frac{P_W}{n} = 0.955\frac{P_W}{n} = 955\frac{P_{kW}}{n} \tag{2}$$

kde:

M	je mechanický moment [Nm]
P_W	výkon [W]
P_{kW}	výkon [kW]
n	otáčivá rychlost [ot/min]

Velikost tečné síly:

$$F_t = \frac{M}{D_1/2} = \frac{2M}{D_1} \tag{3}$$



Obrázek 6 - tečná síla [2]

2 Analytický a numerický výpočet

Výpočet jednostranného magnetického tahu je nezbytný pro analyzování vibrací a také k vyhodnocení mechanického namáhání vznikající v různých částech elektrického stroje. Dva běžné postupy pro výpočet JMT jsou analytická metoda a numerická – přesněji metoda konečných prvků. Obě dvě metody mají své výhody i nevýhody ve studiu elektrických strojů.

Výhodou analytických metod je okamžité získání výsledků v podobě, se kterou dále dokážeme snadno pracovat. Prakticky je to závislost vstupních a výstupních veličin v neomezeném počtu bodů. V těchto metodách se k řešení využívá integrální a diferenciální počet. Problém nastává, když je třeba přesně vyhodnotit účinky magnetického nasycení, protékajících proudů, statorového a rotorového drážkování.

Naopak numerické metody mají vysokou přesnost v případě řešení nasycení a dalších nelineárních jevů vyskytujících se v elektrických strojích. Řešením zde již není spojitý systém s nekonečně mnoha řešeními jako u analytického řešení, zde se spojité problémy převádějí na konečný počet řešení. Tato aplikace se nazývá diskretizace. Nevýhodou numerických metod je, že jsou značně výpočetně a časově náročné.

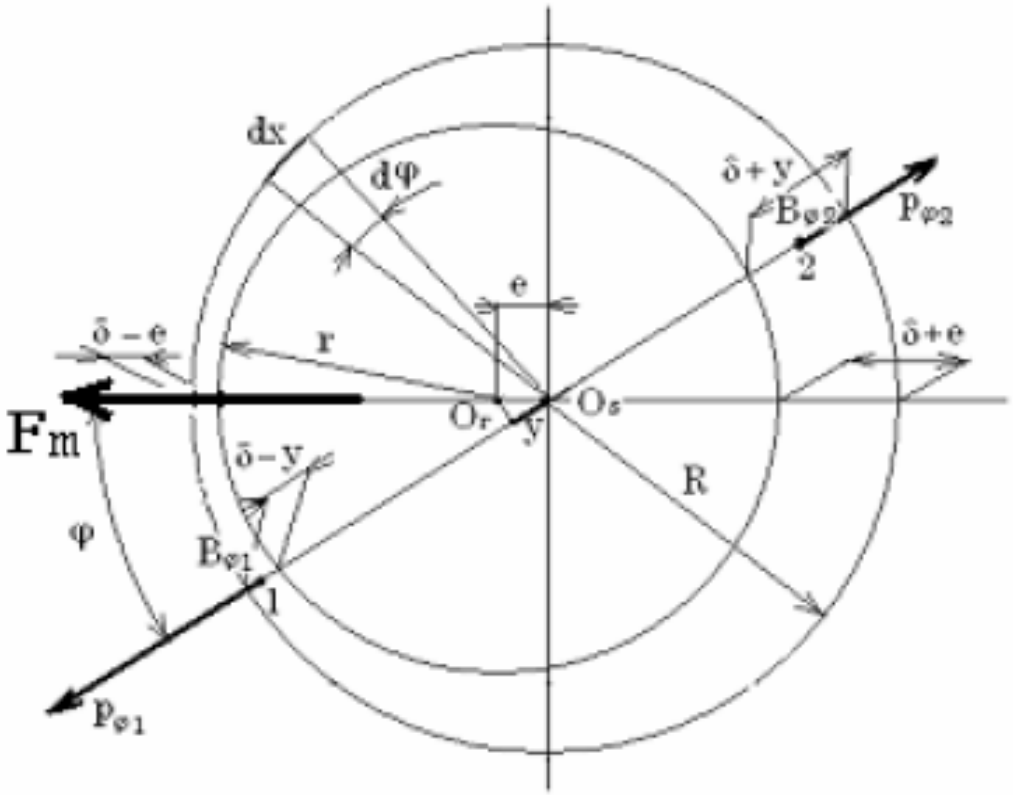
Kombinací obou metod lze dosáhnout dobrých výsledků, při použití silných stránek každé metody a omezeních jejich slabých stránek.

2.1 Analytická metoda

Při sestrojování analytického modelu se vychází z charakteristiky naprázdno. K odvození využijeme *Obrázek 7*. Zde zobrazen excentricky uložený rotor ve vodorovné ose. Z obrázku je patrné, že ve směru excentrického uložení se vzduchová mezera δ zmenší díky excentricitě e, na druhé straně je efekt opačný, a tedy vzduchová mezera δ o velikost e zvětší. Odvození lze provést pro jakoukoliv polohu, zde je uvedeno pro úhel φ od přímkové osy. V bodě 1 označeném na obrázku tedy vznikne vzduchová mezera δ – y, v bodě 2 δ + y.

Pro další postup bude nutné určit velikosti následujících veličin: $y = e.\cos\varphi$, $\delta = R - r$, $dx = r.d\varphi$, v bodě 1 je pak indukce $B_{\varphi 1}$, velikost specifického magnetického tahu v bodě 1 (obdobně pro bod 2) je:

$$p_{\varphi 1} = \frac{B_{\varphi 1}^2}{2\mu_0} \tag{4}$$



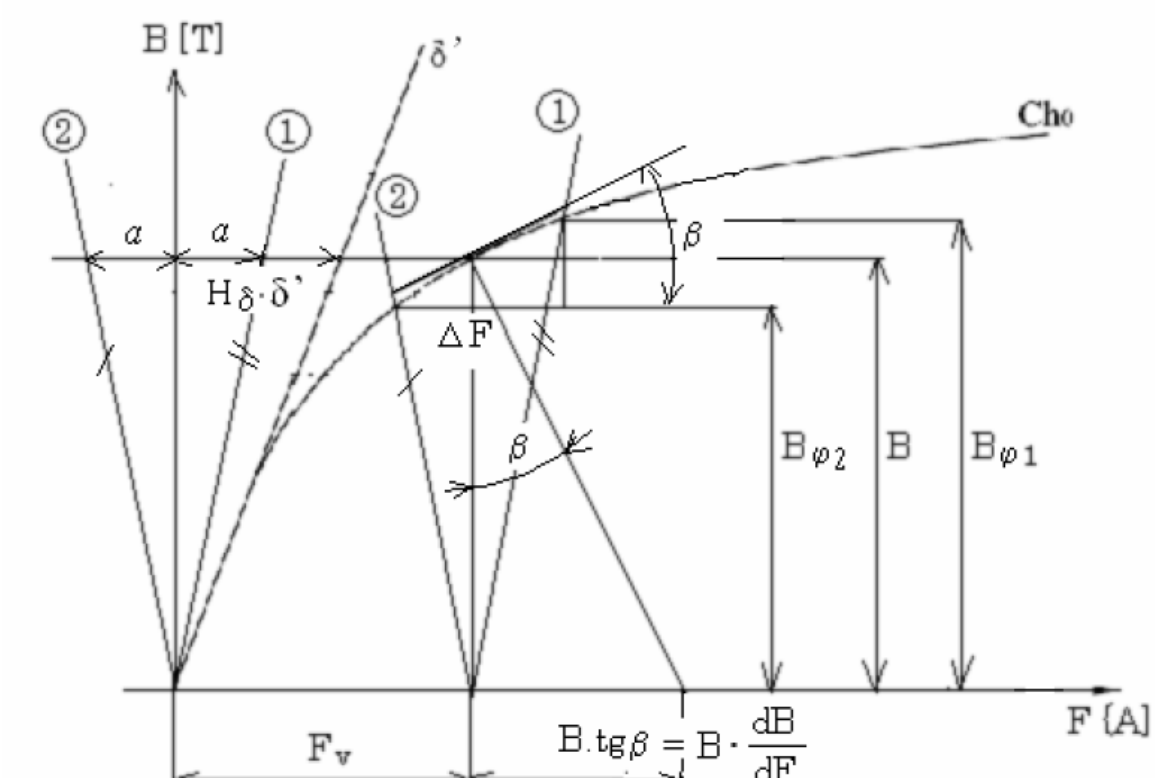
Obrázek 7– excentricky uložený rotor pro analytický výpočet JMT [2]

Aby bylo možné aplikovat tuto metodu, musí být splněno několik podmínek:

- maximální excentricita bude $e_{max} = 0.1.\delta$
- magnetické napětí F_v bude konstantní
- při symetricky uloženém rotoru bude ve vzduchové mezeře δ magnetická indukce B
- vícepólový stroj s minimálně 2p = 4

Jelikož v bodě 1 je menší vzduchová mezera, potažmo menší magnetický odpor, magnetická indukce bude v tomto bodě větší. Z toho plyne i větší specifický magnetický tah. Výsledný specifický magnetický tah tedy bude rozdílem tahů v bodě 1 a v bodě 2.

$$\Delta p_\varphi = p_{\varphi 1} - p_{\varphi 2} = \frac{B_{\varphi 1}^2 - B_{\varphi 2}^2}{2\mu_0} = \frac{(B_{\varphi 1} + B_{\varphi 2})(B_{\varphi 1} - B_{\varphi 2})}{2\mu_0} \quad (5)$$



Obrázek 8 - charakteristika na prázdno pro určení JMT [2]

Jestliže je splněna podmínka pro excentricitu $e \leq$ δ, pak je na této excentricitě magnetické napětí natolik malé, že lze vytknutý úsek na charaktetistice na prázdno přímkami 1a 2 považovat za úsečku a pracuje se s ním jako s pravoúhlým trojúhelníkem s odvěsnami ΔF a ΔB, kde $\Delta F = 2a = 2F_\delta = 2H_\delta y$.

Poté se zavede:

$$B_{\varphi 1} + B_{\varphi 2} = 2B$$

$tg\beta = \frac{\Delta B}{\Delta F}$ a z toho $B_{\varphi 1} - B_{\varphi 2} = \Delta B = \Delta F . tg\beta = 2H_\delta y . tg\beta$ (6)

po dosazení do (5) a úpravě:

$$\Delta p_\varphi = \frac{2B.2H_\delta y.tg\beta}{2\mu_0} = \frac{2B^2}{\mu_0^2} y . tg\beta = \frac{2B^2}{\mu_0^2} e \frac{dB}{dF} \cos\varphi \quad (7)$$

Když:

$H_\delta = \frac{B}{\mu_0}$, $tg\beta = \frac{dB}{dF}$ a $y = e.cos\varphi$

Magnetický tah působící na elementu dx:

$$dF_m = \Delta p_\varphi . dx . l_i \quad (8)$$

Výsledný magnetický tah na celém obvodu se dostane integrací (8) od φ = 0 do φ = π. Nelze integrovat do φ = 2π, poté by totiž byla síla $F_m = 0$. A to díky tomu, že Δp_φ je dán rozdílem specifických tahů v navzájem opačných směrech.

Jak je vidět na *Obrázku 7* výsledný magnetický tah bude působit ve směru excentricity a získá se součtem průmětů Δp_φ do tohoto směru:

$$F_m = \int_{\varphi=0}^{\pi} \bar{\alpha} . dF_m cos\varphi = \int_{\varphi=0}^{\pi} \bar{\alpha}\, l_i \Delta p_\varphi r cos\varphi . d\varphi =$$

$$= l_i \bar{\alpha} r \frac{2B^2}{\mu_0^2} e \frac{dB}{dF} \int_{\varphi=0}^{\pi} cos^2\varphi . d\varphi = \frac{\bar{\alpha}\, \pi D_1 l_i e}{2\mu_0^2} B^2 \frac{dB}{dF} \quad (9)$$

kde:

r je poloměr induktu ve vzduchové mezeře

$\bar{\alpha}$ je činitel pólového krytí

$D_1 = 2r$

a hodnota integrálu $\int_{\varphi=0}^{\pi} cos^2\varphi . d\varphi = \frac{\pi}{2}$

Z výše uvedeného vztahu:

$$F_m = \frac{\bar{\alpha}\,\pi D_1 l_i e}{2\mu_0^2} B^2 \frac{dB}{dF} \tag{10}$$

vyplývá, že velikost jednostranného magnetického tahu při existující excentricitě je závislý na součinu $B^2 \frac{dB}{dF}$, tedy na velikosti magnetické indukce a na nasycení magnetického obvodu, jemuž odpovídá velikost $\frac{dB}{dF}$. (Červený, 28-31)

2.2 Numerická metoda

Numerické metoda mají oproti analytickým metodám možnost řešení problémů složitých těles a různých složitých fyzikálních polí, u kterých se při aplikování analytických metod musí zavést značné zjednodušení, aby bylo pole vůbec možné řešit. Zjednodušení, ale vede ke snížení přesnosti výsledků získaných pomocí daných metod. Analytické metody dávají jako výsledek závislost vstupních a vstupních veličin v neomezeném počtu bodů. Numerické metody, ale zpravidla dávají konečný počet výsledků.

Základ numerických metod je ve vytvoření fyzikálního modelu daného problému pomocí výpočetního programu. V tomto programu následně probíhá analýza modelu a jeho vyhodnocení. Programy pro tyto numerické výpočty jsou v naprosté většině komerčními produkty. Mezi nejznámější programy patří například ABAQUS, Cosmos, NASTRAN (vyvinutý v NASA) nebo ANSYS. V současné době je trend spojování návrhových CAD programů s programy pro analýzu fyzikálních polí na základě numerických metod.

V případě kvalitního numerického zpracování se získají rozměrové, materiálové nebo jiné technologické vlastnosti zkoumaného stroje. K ověření správných výpočtů, pak v praxi postačí vyrobit jen malé množství prototypů výrobku.

V poslední době se rozvinula celá řada numerických metod, jako například spektrální metoda, metody konečných rozdílů nebo metoda okrajových podmínek, nicméně metoda konečných prvků je stala tou nejpoužívanější.

- **Program ANSYS**

Je program pro řešení fyzikálních problémů od termodynamiky, přes akustiku po elektrostatické a elektromagnetické pole. Pro řešení využívá ANSYS metodu konečných prvků. V tuto chvíli má dominantní postavení na trhu. O čemž svědčí i skutečnosti, že společnost Autodesk začlenila do svého produktu modul od této společnosti.

V elektrotechnice se ANSYS využívá k výpočtům elektromagnetického pole. Výsledkem je rozložení elektromagnetického pole na celém modelu. Analýzu lze rozdělit na tři základní kroky. PreProcessing – v této části se vytváří model a definují se jeho parametry. Solution – zde se vybírá typ analýzy, která se následně použije. PostProcessing – v posledním kroku dochází k vyhodnocení analýzy.

2.2.1 Metoda konečných prvků MKP

Základní myšlenka metody konečných prvků se objevila zhruba v polovině minulého století. Původně byla metoda navržena pro konstrukční účely, použita byla například při výpočtech leteckých konstrukcí firmy Boeing nebo v kosmickém programu Apollo. Později se došlo k dalšímu vývoji MKP a vznikly různé variace této metody, čímž se schopnosti metody rozšířily i na další technická odvětví, jako jsou například proudění kapalin a plynů, termální analýzy, strukturální analýzy, akustiky, piezoelektrických dějů nebo elektromagnetismu.

MKP zvládá velmi dobře formulovat komplexní geometrii a měnící se okrajové podmínky. Pomocí MKP snadné vytvořit obecný kód zvládající různé druhy problémů.

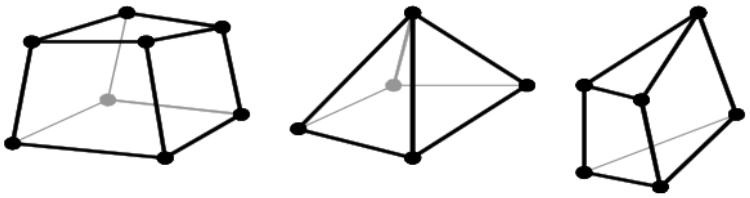
V dnešní době existuje již velké množství testovaných a účinných kódů, které lze snadno aplikovat.

MKP je obecná a dobře použitelná metoda pro nalezení přibližného řešení parciálních diferenciálních rovnic a je také velmi dobře použitelná pro řešení integrálních rovnic.

Jak se již z názvu metody patrné, princip metody konečných prvků je v rozdělení spojitého problému na k prvků s konečným počtem. Tomuto rozdělení se říká diskretizace. Takto rozdělený spojitý problém na konečné prvky jde na počítači řešit pomocí algebraických rovnic. Příklad diskretizace je vidět na *Obrázku 11* kde je provedena pro potřeby výpočtu jednostranného magnetického tahu.

Obecný princip MKP je ve vytvoření virtuálního počítačového modelu zkoumané oblasti. Na modelu se musí vytvořit síť konečných prvků. Konečné prvky mají z pravidla tvar trojúhelníku nebo čtyřúhelníku, nicméně to není podmínkou a mohou mít prakticky jakýkoliv tvar. Příklady možných tvarů jsou znázorněny na *Obrázku 9*. Jednotlivé prvky jsou charakterizovány dimenzí, ve které se v modelu nachází, ale také počtem a polohou uzlů spojujících jednotlivé prvky. Touto sítí lze namodelovat i složité objekty a je možné síť v některých místech vytvořit hustěji a tím přispět k lepším výsledků v dané oblasti. Čím hustější je síť, tím jsou výsledky přesnější, na druhou stranu to navyšuje nároky na výpočetní výkon.

Z matematického hlediska se u MKP využívá variační přístup. Hlavní myšlenkou variačního přístupu je jednoduše řečeno, že jablko vždy spadne na zem a neletí nahoru, tedy, že se daný děj odehraje s minimální energií. Princip variačního přístupu spočívá v hledání funkcí, ve kterých jsou hodnoty funkcionálu (přiřazení číselné hodnoty funkci) stacionární.



Obrázek 9- různé tvary konečných prvků MKP

Širší rozšíření MKP je v podstatě dáno rozvojem výpočetní techniky za poslední čtvrtstoletí. Ačkoliv jsou dnešní počítače velmi výkonné, řešení problémů ve 3D pohledu je i tak značně výpočetně náročné, v některých rozsáhlých problémech takřka nemožné. Proto se běžně využívá jen 2D pohledu. Aplikace, ve kterých je nezbytné 3D, se rozdělí na dvě oddělené 2D aplikace.

Omezujícím prvkem MKP je jeho unikátní řešení vztahující se k přesně definovaným podmínkám na začátku. V případě, kdy se po vyhodnocení dospěje k úpravě některých parametrů například úpravě rozměrů, musí se celý výpočet opakovat znovu. Ten je většinou náročný a plyne z něj další omezení a to nároky na kvalitní výpočetní vybavení a čas nutný ke zpracování výpočtu.

- **2D model konečných prvků**

V oblasti elektromagnetismu se dnes často využívá 3D modelů. Pro samotné výpočty elektromagnetismu se, ale stále využívají 2D modely a to z důvodu, že díky jednoduššímu provedení testů ve 2D běží rychleji než ve 3D.

Ke konstrukci modelu konečných prvků jakéhokoliv elektrického zařízení je zapotřebí znát detailně geometrické údaje oblasti, která má být zkoumána. Následně se volí materiálové vlastnosti a generují uzlové sítě. Této fázi se říká PreProcessing.

Další fází je Solution, zde dochází k výběru typu aplikované analýzy. Tato fáze je zpravidla automatická a děje se na pozadí programu.

PostProcessing je finální část celé analýzy. Zde se provádí vyhodnocení.

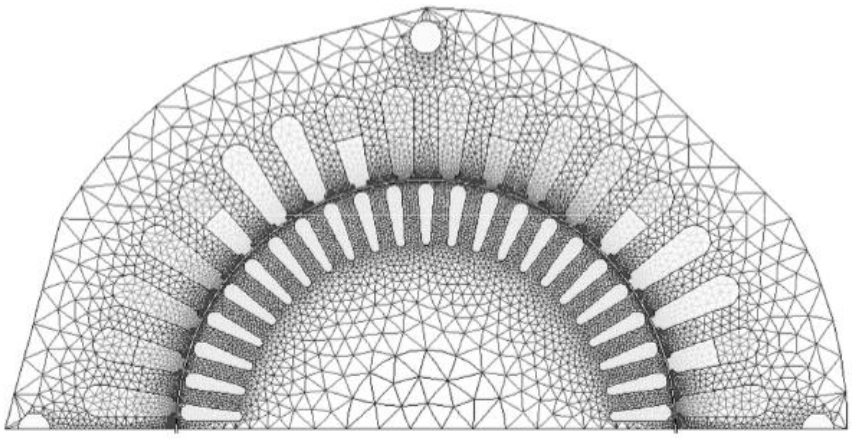
Při konstruování modelu jevu, který má 3 dimenze a jeho transformaci do 2D podoby, se musí některé jevy přesahující rozsah 2D začlenit do tohoto modelu. Jako například jev vznikající na konci statorového vinutí, který je běžně ve 3D se musí začlenit jako prvek obvodu do 2D modelu. Podobně je to s indukcí a odporem v rotorové kleci, ty musejí být považovány za externí prvky. Řídicí rovnice bez vnějších prvků jsou dány vektorem magnetického potenciálu.

$$\nabla.(v\nabla A) = -J_0 + j\omega\sigma A \qquad (11)$$

kde v je magnetický odpor, σ elektrická vodivost, ω úhlová rychlost, J_0 značí proudovou hustotu a A je vektor magnetického potenciálu.

Jelikož většina elektrických motorů není napájena proudově, ale napěťově, musí se počítat s napájecí sítí, do které je motor připojen. Do výsledného vzorce se mimo napěťových zdrojů promítnou také vnější odpory a indukce.

Na *Obrázku 10* je vytvořená síť konečných prvků v indukčním motoru.



Obrázek 10- síť konečných prvků v indukčním motoru [10]

- **Metoda sledování drah otáčení hřídele**

Cílem metody konečných prvků je napodobit excentrický pohyb hřídele a vypočítat výsledný magnetický tah. Pro potřeby MKP se vypočítávají průměrné dráhy otáčení hřídele. Dráhy otáčení hřídele mohou být vytvořeny pomocí následujícího vzorce:

$$\overline{K} = \overline{s_s} + U_x \cos(\lambda t + \varphi U_x) + jU_y \sin(\lambda t + \varphi U_y) + \sum_{n=2}^{k}[a_{xn} \cos(n\lambda t + \varphi a_{xn}) + ja_{yn} \sin(n\lambda t + \varphi a_{yn})] \quad (12)$$

kde:

s_s	komplexní statická výchylka
$U_{x,y}$	rozsah fázoru
λ	úhlová rychlost
$\varphi U_{x,y}$	fázový posun vektoru
a_{xn}, a_{yn}	amplituda n-té harmonické složky z dráhy hřídele

Excentrický pohyb jednoho otočení rotoru může být modelováno například programem Infolytica MagNet, který souběžně kombinuje pohyb rotoru kolem své osy a pohyb osy rotoru vzhledem ke středu statoru. Čas, který potřebuje rotorová osa, aby prošla jednu celou excentrickou dráhu, je stejný jako čas, za který se rotor jednou otočí. Časové vyjádření se používá pro převod pohybu rotoru. Vzduchová mezera je rozdělena do dvou vrstev podél centrální linie. Vrstva kolem statoru je nehybná, zatímco druhá vrstva je připojena k rotoru a posouvá podél té první nehybné podle toho, jak se pohybuje rotor. V každém časovém vzorku se vzduchová mezera rozprostřená podél rozhraní dvou vrstev mění tak, že uzly podél hranice jsou společné pro obě dvě vrstvy.

Souběžné otáčení a lineární pohyb rotoru je povolen. Vinutí cívek statoru a jejich vzájemné propojení se modelují jako elektrický obvod, který se řeší současně se zbytkem modelu. Indukované napětí vzniklé důsledkem rotačních a lineárních pohybů se vypočte pomocí MKP. Externí proudové a napěťové zdroje, rezistory, kondenzátory, cívky a další prvky, mohou být do tohoto modelu také zahrnuty.

Při těchto simulacích se předpokládá, že osa rotoru je vždy symetrická k ose statoru. Ve skutečnosti, ale není materiál, ze kterého je hřídel rotoru není nekonečně tuhý a tudíž vždy dojde ke stavu, kdy má prohnutý tvar. Díky tomuto prohnutí se budou měřené dráhy v ložiskách lišit od drah měřených v jiných místech na hřídeli. Skutečný tvar drah podél hřídele ovlivní jednostranný magnetický tah a naopak.

- **Maxwellův tenzor pnutí**

Maxwellův tenzor pnutí je použit pro výpočet elektromagnetických sil na základě 2D modelu konečných prvků. MTP poskytuje detailní obraz rozložení indukce na povrchu rotoru a na povrchu zubů statoru. Při použití MTP lze magnetickou sílu na povrchu rotoru vyjádřit jako:

$$F = \oint_s \frac{1}{2\mu_0}(B_n^2 - B_t^2)ds.\vec{n} + \oint_s \frac{1}{\mu_0} B_n B_t ds.\vec{t} \qquad (13)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua, B_n a B_t jsou normálová a tečná složka indukce a $\vec{n}$ a $\vec{t}$ jsou vektory směru normály a tečny integrační plochy s. Tečné síly vytvářejí točivý moment rotoru, zatímco samotné radiální síly vytvářejí tah na rotor.

Pro výpočet JMT se uvažuje pouze normálová složka magnetické síly. V případě integrace na obvodu kruhu, se radiální síly F_r získají dle následujícího vzorce:

$$F_r = \frac{r l_{eff}}{2\mu_0} \oint_c (B_r^2 - B_t^2)\, dt \qquad (14)$$

kde l_{eff} je efektivní délka rotoru, c označuje integrální oblast, B_r a B_t jsou radiální a tečné složky indukce.

- **Diskretizovaný vzorec pro výpočet JMT**

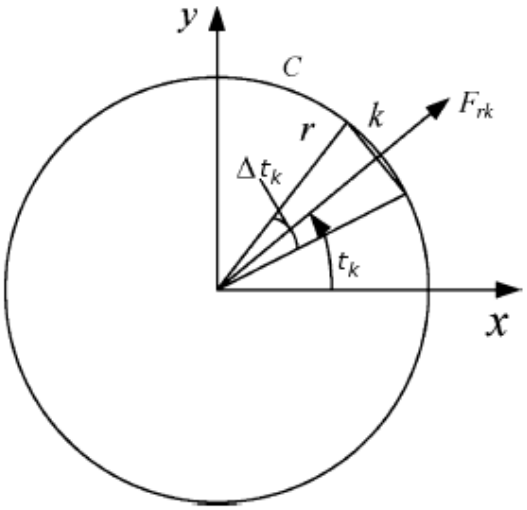
Při výpočtech konečných prvků se vzduchová mezera rozdělí do několika vrstev a integrační oblast c je v polovině prostřední vrstvy jak je vidět na *Obrázku 11* F_{rk} znázorňuje normálovou sílu na k-tém výseku a lze jej popsat jako:

$$F_{rk} = \frac{rl_{eff}}{2\mu_0}(B_{rk}^2 - B_{tk}^2)\Delta t_k \tag{15}$$

kde B_{rk} a B_{tk} jsou radiální a tečné složky k-tého výseku indukce. Vzorec pro výpočet JMT F_{JMT} se získá z výpočtu v osách x a y.

$$F_{JMT} = \sqrt{F_{rx}^2 - F_{ry}^2} \tag{16}$$

kde $F_{rx} = \sum_{k=1}^{N} F_{rk} cost_k$, $F_{ry} = \sum_{k=1}^{N} F_{rk} sint_k$



Obrázek 11- normálová síla na k-tém výseku

3 Způsoby detekce excentricity

Metody pro detekci excentricity lze rozdělit na offline a online. U offline metod se testování provádí bez připojení zátěže a v některých případech je dokonce nutné demontovat motor. Online metody provádí detekci s připojenou zátěží za běžného provozu motoru.

Níže jsou uvedeny základní principy offline i online metod a podrobněji rozebrána metoda, ve které se vznik excentricity monitoruje pomocí změny indukčnosti rotoru.

3.1 Online metody

Vliv excentricity můžeme nepřímo pozorovat pomocí analýzy spektra statorového proudu, vibrací, měřením toku nebo pozorováním vnějšího magnetického pole.

Jednou metodou využívanou pro detekci excentricity je MCSA (Motor current signature analysis), jelikož podává vzdálené, spojité a on-line sledování za použití stávajících senzorů již instalovaných v motoru. S MCSA může být excentricita detekována pomocí sledování rychlosti otáček rotoru f_r.

Princip MSCA je v získávání tvaru průběhu proudu pomocí indukční sondy umístěné na přívodních kabelech motoru. Signál z této sondy je převáděn grafickou kartou do počítače. V počítače se signál zpracuje pomocí rychlé Fourieovy transformace. Postranní pásma f_s jsou definována jako:

$$f_s = (1 \pm 2s)f \tag{17}$$

kde s je skluz, f je základní frekvence

V případě vzniku excentricity přestane být magnetické pole mezi rotorem a statorem konstantní a vytvoří odchylky od základního pole. Tyto odchylky indukují proud v rotoru a statoru s frekvencí mírně vybočující z postranního pásma.

Nevýhoda použití MCSA je náročnost na výpočetní výkon požadavek na rychlost rotoru. MCSA je neefektivní pro aplikace kde se neustále mění zatížení, protože se také mění skluz.

Detekce excentricity pomocí MCSA je velmi složitá pro stroje napájené z měniče se zpětnou vazbou jako jsou elektromobily nebo v aplikacích s trakčním pohonem v důsledku kolísání provozní frekvence a zatížení, maskovacího efektu regulátoru proudu a zvýšení šumu přepínáním PWM.

Další principiální metodou pro detekci excentricity je sledování vnějšího magnetického pole. Na motor se umístí prostorový senzor detekující magnetické pole. Když nastane DE, dojde ke změně magnetického pole s odlišnou frekvencí a tu zaznamená senzor.

3.2 Offline metody

Nejběžnějším způsobem offline diagnostiky dynamické excentricity je odečítání výchylky z ciferníku testovacího ukazatele nebo z čidla přiblížení, které ukazují kdy je rotor vychýlen z ideálního stavu.

Tato metoda je velmi účinná pro přímé měření dynamické excentricity, ale má tu nevýhodu, že se pro testování musí motor demontovat.

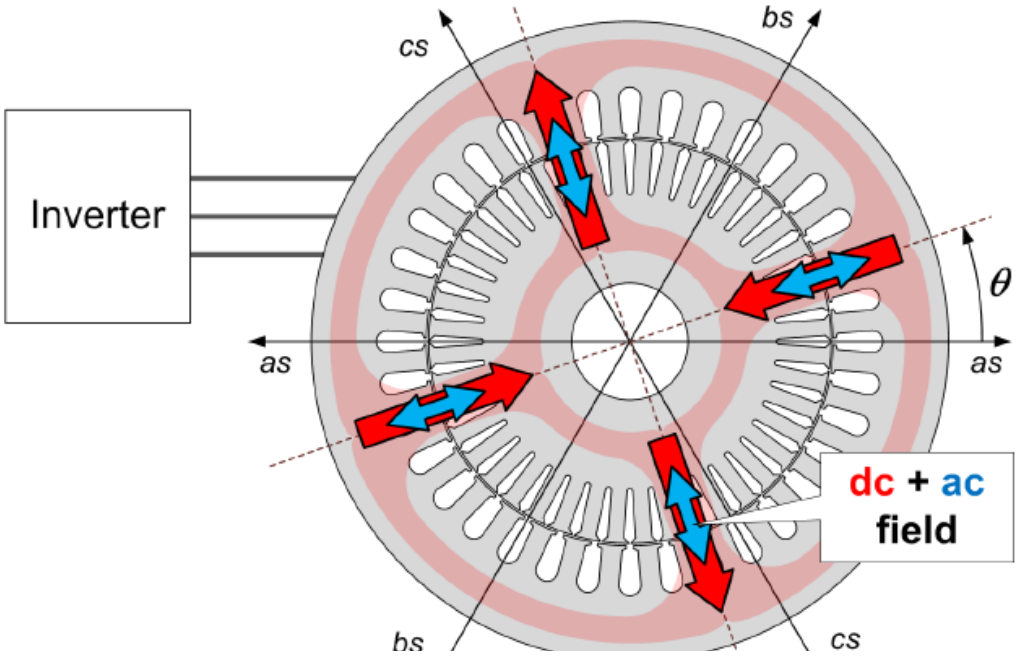
Další elektrické testy jsou založeny na pozorování změn v chování průběhů indukce otáčejícího se rotoru. Odchylky v chování indukce v místě přechodu z jedné do druhé fáze, při nízko napěťovém a vysokofrekvenčním buzení, lze využít jako funkci pro sledování polohy rotoru.

Dalším způsobem je měření rozdílů impedancí v motoru při stejnosměrném impulsním buzení. Jedná se o metodu, kdy je excentricita sledována nepřímo. Ukázalo se, že měření chování indukce při jednofázovém rotačním testu je efektivní offline test, který dokáže určit poškození hřídele. Tato metoda může být také použita pro měření statické, dynamické a smíšené excentricity. Nesporná výhoda těchto testů je v tom, že se pro měření nemusí motor demontovat. Nicméně jedna nevýhoda zde je, a to sice, že při měření musí být odpojena zátěž a to může být u velkých strojů velmi obtížené na splnění. Tato podmínka je velmi omezující a ve většině případů naprosto nesplnitelná pro pravidelné testování, tak aby byl zajištěn spolehlivý provoz stroje.

- **Detekce pomocí změny indukcí v rotoru**

Princip této metody je provedení testu excentricity pomocí měniče, kdykoliv je motor v klidu. Měnič lze naprogramovat, tak aby v momentě, kdy se motor zastaví, vyslal automaticky signál do motoru pro získání informací o excentricitě.

Motor je buzen malým střídavým polem, které se překrývá se stejnosměrným polem jak je vidět na *Obrázku 12*. Měří se ekvivalentní diferenciální induktance Ľ, v závislosti na stejnosměrném poli. Změna struktury Ľ v závislosti na DC poli, může být použita jako indikátor pro detekci zvýšené excentricity. V indukčním motoru stejnosměrné pole a malé střídavé pole nevyvolá točivý moment, a proto test může být prováděn automaticky neinvazivním způsobem v klidovém stavu.



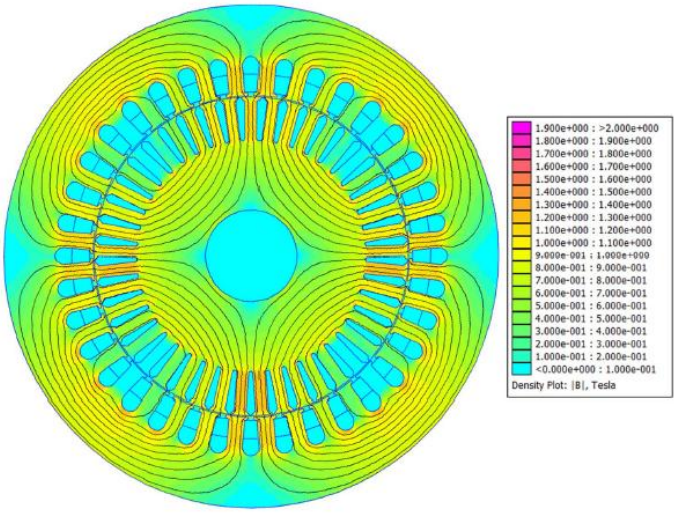
Obrázek 12 - překrývání AC a DC pole [5]

Na *Obrázku 13* je vidět, jak magnetický tok prochází všemi póly a proniká hluboko do jádra rotoru bez vytvoření vířivých proudů.

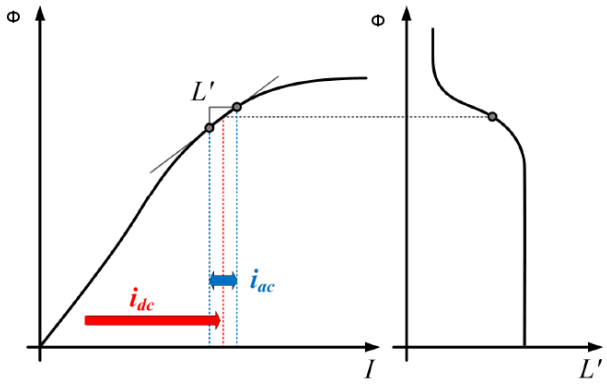
Závislosti magnetického toku Φ a proudu i, při stejnosměrném buzení je vidět na *Obrázku 14*. Tentýž obrázek znázorňuje diferenciální indukci Ľ, jež je zobrazena jako tečna k průběhu na grafu Φ-i. Matematicky jej lze popsat dle následujících rovnic:

$$L = \frac{\Phi}{i} \tag{18}$$

$$Ľ = \frac{d\Phi}{di} \tag{19}$$



Obrázek 13 - rozložení toku pro symetricky uložený rotor [5]



Obrázek 14 - závislost toku Φ a i, a toku na Ľ [5]

V této metodě se pro detekci excentricity využívá analýzy chování Ľ v závislosti na DC poli. Motor je zde nabuzen malým pulsujícím střídavým polem, jež je překryto DC polem. Hodnota Ľ odpovídající úrovni stejnosměrného pole, může být získána z AC napětí a proudu, Jak je vidět na *Obrázku 12*, pulsující střídavé pole musí mít souhlasný směr, daný úhlem θ, se stejnosměrným polem. Hodnoty Ľ pro vynesení na křivku Φ-i, mohou být naměřeny tak, že se navýší DC pole v několika krocích. Testovací střídavý signál s DC offsetem ve směru úhlu θ, lze vytvořit pomocí obdélníko-trojúhleníkovou modulace šířky pulsu, zadáním hodnot napětí fází nastavených jako:

$$\dot{v_{as}}(\theta, \omega t) = V_{dc}\cos(\theta) + V_{ac}\cos(\theta)\, sgn(\sin(\omega t)) \qquad (20)$$

$$\dot{v_{bs}}(\theta, \omega t) = V_{dc} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + V_{ac} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) sgn(\sin(\omega t)) \quad (21)$$

$$\dot{v_{cs}}(\theta, \omega t) = V_{dc} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + V_{ac} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) sgn(\sin(\omega t)) \quad (22)$$

kde V_{dc} a V_{ac} jsou rozsahy DC a AC složek napětí, ω je budící frekvence a sgn() znázorňuje funkci signum. Vektory použitého napětí a měřeného proudu ve směru θ, se mohou zpočítat použitím Parkovy transformace:

$$\dot{v_s}(\omega t) = \left(\frac{2}{3}\right) \left[\cos(\theta) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \dot{v_{abcs}} \quad (23)$$

$$i_s(\omega t) = \left(\frac{2}{3}\right) \left[\cos(\theta) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)s\right] i_{abcs} \quad (24)$$

- **Parkova transformace**

Parkova transformace se provádí pro transformaci ze statorového souřadného systému do rotorového souřadného systému, kde jedna souřadnice je spjata s osou rotoru a druhá je na ní kolmá. Úhel mezi rotorovým a statorovým vinutím je označen θ. Základní tvar transformace lze vidět na následujících vzorcích:

$$x_d = x_\alpha \cos(\theta) + x_\beta \sin(\theta) \quad (25)$$

$$x_q = x_\beta \cos(\theta) - x_\alpha \sin(\theta) \quad (26)$$

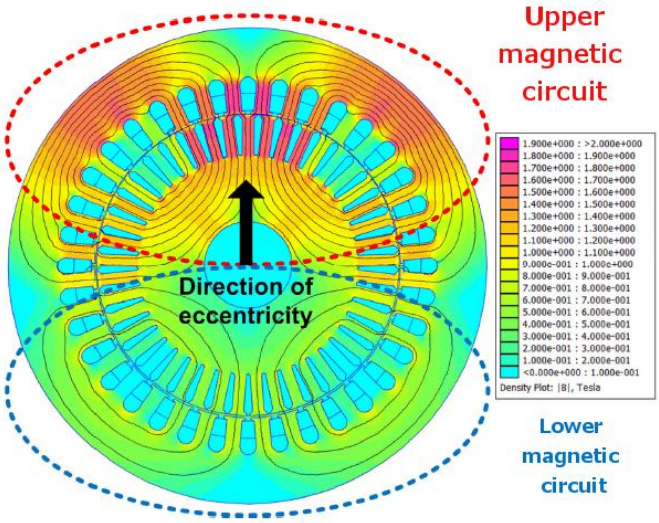
Použitím Parkovy transformace můžeme přejít z tří fázového systému do dvou fázového systému spjatého s rotorem. [6]

kde $\dot{v_{abcs}}$ a $\dot{i_{abcs}}$ znázorňují statorové napětí a měřený proud. Hodnota Ľ může být vypočítaná ze základních složek AC fázoru napětí $\dot{V_s}$ a vektoru měřeného proudu I_s jako:

$$Z_{eq} = \frac{\dot{V_s}}{I_s} = R + j\omega Ľ \quad (27)$$

Na *Obrázku 15* lze vidět, případ stejného motoru, se stejným DC buzením, ale s excentricitou ve směru k horní (upper) části stroje. Je zde také vidět, že se indukce v horní části stroje se významně zvýší zmenšením vzduchové mezery, potažmo magnetickým odporem, oproti stavu kdy stroj nebyl v excentricitě. V opačném případě, kdy se vzduchová mezera zvětší, se hodnota indukce sníží. Pro lepší orientaci při popisu změn v Ľ při excentricitě se zavede označení horní poloviny stoje UMC (upper magnetic circuit) a pro dolní část LMC (lower magnetic circuit). Toto označení se použije v následujících obrázcích.

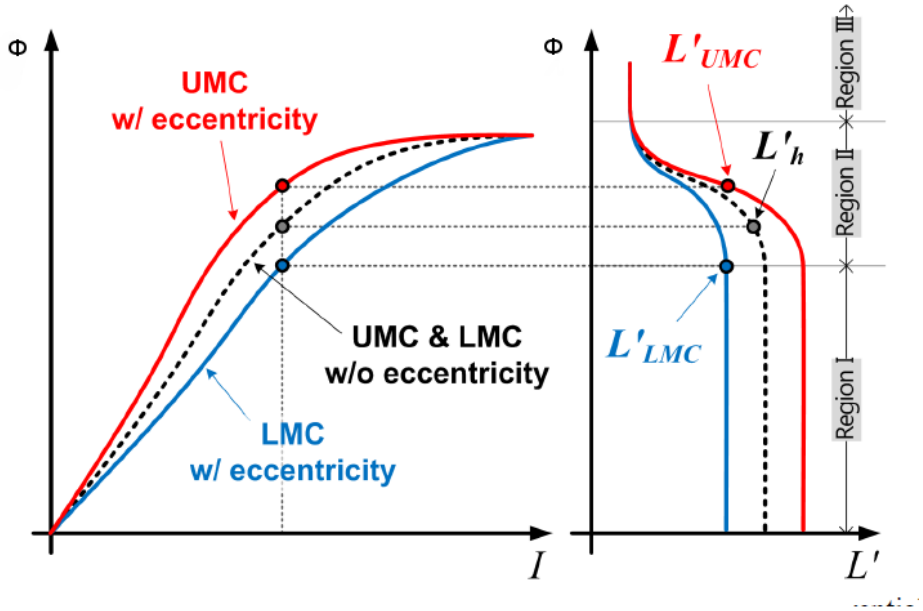
Ve vícepólovém motoru s excentricitou je rozložení indukce po všechny póly odlišné, oproti stavu, kdy nebyl rotor excentricky uložený. Mají tedy rozdílné magnetizační charakteristiky, jak je vidět na *Obrázku 16*.



Obrázek 15 - rozložení toku pro excentricky uložený rotor [5]

Na *Obrázku 16* je vidět, že průběh Φ-i křivky s excentricitou v UMC, kde je snížená vzduchová mezera, naroste proti stavu, kdy není rotor excentrický. Jádro se totiž pomocí malého DC pole snadněji nasytí. Na druhou stranu ve spodní části LMC, kde je zvětšená vzduchová mezera, je průběh menší, oproti ideálnímu stavu. Výsledné hodnoty Ľ jsou kombinací hodnot vytvořených dvěma magnetickými poli. Při malém

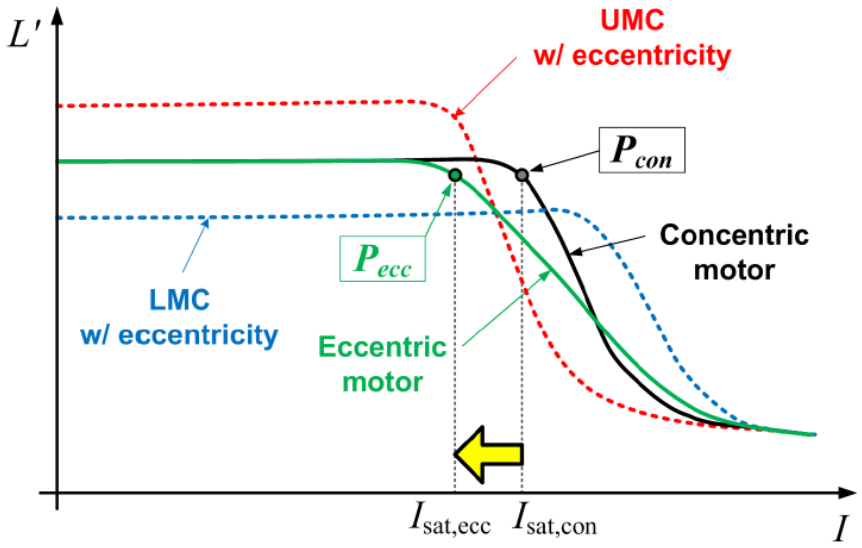
DC poli se pracovní bod pohybuje podél lineární části v Region I viz *Obrázek 16*. V této oblasti průběh magnetizační křivky Φ-i tj. L'$_{UMC}$ narůstá a průběh L'$_{LMC}$ klesá. Hodnoty L'$_{UMC}$ a L'$_{LMC}$ se zde vzájemně vyruší. V této oblasti, tedy nemá smysl měřit, neboť by získané hodnoty neměly žádnou vypovídající hodnotu. Na hodnoty L' se v oblasti nasycení (Region III na *Obrázku 16*) již nemá excentricita vliv, neboť jak UMC tak LMC jsou v saturaci a hodnoty indukcí L'$_{UMC}$ a L'$_{LMC}$ jsou zde totožné. Pro vlastní měření je důležitá oblast „kolene" křivky (Region II). V této oblasti se snižuje hodnota L'$_{LMC}$ kvůli zvýšení magnetického odporu. I hodnota L'$_{UMC}$ se snižuje a to z důvodu sycení jádra. Díky této reakci je měřená hodnota L' menší při excentricitě, oproti stavu kdy je rotor a stator v symetrickém stavu, při stále stejných budících podmínkách.



Obrázek 16 - závislost toku Φ na i, a Φ na L', pro excentrický rotor [5]

Na *Obrázku 17* je graf průběhů L'-I, kde I je hodnota dodávaného DC proudu. Hodnota L' pro stav symetrie statoru a rotoru, tj. koncentrický stav, označená jako L'$_{con}$ začne výrazně klesat v bodě P$_{con}$ z důvodu nasycení magnetického obvodu. Znázorněné grafy pro L'$_{UMC}$ a L'$_{LMC}$ jsou individuální a liší se případ od případu. Hodnota L'$_{LMC}$ je nižší než hodnota L'$_{con}$ v počátku průběhu díky vyššímu magnetickému odporu. Hodnota L'$_{UMC}$ je v téže oblasti vyšší než hodnota L'$_{con}$ a to díky nižšímu magnetickému odporu, ale předpokládá se skoková změna v oblasti nasycení, jak je znázorněno na *Obrázku 17*. Průběh indukce L'$_{ecc}$ při excentricitě je opět výsledkem působení průběhů L'$_{UMC}$ a L'$_{LMC}$.

Pracovní bod P_{con}, odpovídající pracovnímu bodu pro koncentrický rotor, získaný vynesením saturačního proudu $I_{sat,con}$, leží v místě kde „koleno“ průběhu začíná klesat. Pracovní bod v případě excentricity se přesune z bodu P_{con} do bodu P_{ecc}, kde působí saturační proud $I_{sat,ecc}$. Díky tomuto přechodu z jednoho stavu do druhého, lze měřením proudu sledovat změnu excentricity.



Obrázek 17 – graf průběhů diferenciální indukce pro detekci excentricity [5]

Princip této metody je tedy ve sledování změny průběhů indukčností. Sledované indukčnosti se mění díky snadnějšímu nasycení materiálu v případě vyskytující se excentricity. Podmínkou pro správné vyhodnocení je, aby bylo AC pole překryto DC polem. Pro citlivé měření je důležité, aby byla frekvence AC pole co nejnižší. Příliš nízká hodnota frekvence, ale prodlužuje dobu trvání testů a zvyšuje nároky na výpočetní výkon.

Motor se nabudí pomocí V_{dc}, V_{ac}, ty musí být posunuty o úhel θ. Tyto budící hodnoty jsou závislé na typu měřeného stroje a vlastnostech měniče a tudíž se budou pro jednotlivé stroje měnit. Rozsah V_{dc} se bude zvyšovat až do hodnoty, kterou chceme měřit, tedy oblast kdy dojde k nasycení. Velikost V_{ac} je ideální nastavit velmi malé, ale stále dostatečně veliké, aby bylo možné změřit dostatečně velký proud.

Závěr

Základním prvkem provázející celou tuto bakalářskou práci byl jednostranný magnetický tah. Jeho hlavní příčinou je nerovnoměrné rozložení elektromagnetických sil ve vzduchové mezeře mezi rotorem a statorem. To způsobuje excentricita v motoru. To je stav kdy střed statoru není v symetrii se středem rotoru. Excentricitu lze rozdělit podle způsobu, jakým vzniká. A to na statickou a dynamickou excentricitu. Statická excentricita je zpravidla přítomna v motoru již od jeho výroby a je způsobena například oválným tvarem statoru nebo nesprávným uložením statorového jádra a ložiska. Velikost statické excentricity je konstantní a během provozu motoru se nemění. Dynamická excentricita vzniká, když se střed otáčení rotoru posune. Tím dojde ke změně polohy minimální vzduchové mezery. Hodnota dynamické excentricity se v průběhu provozu motoru mění a je způsobena například prohnutím hřídele, opotřebení ložisek nebo příliš velikou hodnotou statické excentricity. V místě vzniku menší vzduchové mezery dojde ke snížení hodnoty magnetického odporu a zvýšení magnetického toku. Tím dojde zvýšení sil působících na rotor v tomto místě a tedy vzniku jednostranného magnetického tahu. Ve spojení s okolní mechanickým systémem může dojít ke vzniku nežádoucích vibrací, hluku, oteplování vodičů, opotřebení ložisek nebo prohnutí rotoru. Zvyšuje se tím také riziko tření rotoru o stator a následné poškození jak rotoru, tak statoru. Je proto velmi důležité počítat při návrhu motoru se vznikem excentricity a v průběhu provozu ji kontrolovat.

Při výpočtech jednostranného magnetického tahu lze využít analytických metod nebo metod numerických. U analytických metod vede řešení k použití integrálních a diferenciálních rovnic. Výsledkem jsou závislosti vstupních a výstupních veličin v neomezeném počtu. Problém nastává při potřebě přesného vyhodnocení účinků magnetického nasycení, protékajících proudů nebo statorového a rotorového zdrážkování. Numerické metody v těchto případech mají velmi vysokou přesnost výpočtů. Výsledkem již není spojitý systém s nekonečně mnoha řešeními jako u metod analytických, nýbrž se zde spojité problémy převádějí na konečný počet řešení. Provádí se tedy diskretizace. Nevýhodou numerických metod je jejich značná výpočetní náročnost a časová náročnost výpočtu. V dnešní době existuje již několik numerických metod, ovšem nejpoužívanější se stala metoda konečných prvků. Na základě metody

konečných prvků se vytvářejí modely sledovaných objektů. Kvůli menším výpočetním nárokům převládají modely 2D oproti modelům ve 3D.

Metody, pomocí kterých lze detekovat již existující nebo zvyšující se excentricitu, se dají rozdělit na dva směry. Prvním směrem jsou online metody. U těchto metod se vliv excentricity monitoruje za plného provozu se zátěží. To je samozřejmě vhodné tam, kde je zapotřebí stálého chodu motorů. Excentricita se zde monitoruje nepřímo zpravidla pomocí vnějších senzorů. To dává online metodám další výhodu, a to sice že měřený motor může být umístěn na svém místě a vyhodnocovací zařízení, zpravidla počítač, může být někde úplně jinde, například v přilehlé budově. Odpadá zde tedy nepříjemné rušení při měření způsobené chodem motoru. Výhodou počítačového zpracování je, že naměřené hodnoty jsou v digitální podobě a v té se nechají archivovat. S tím, ale souvisí i jeho nevýhoda. Počítačové online zpracování je velmi výpočetně náročné a je nutné mít velice kvalitní vybavení, které je ovšem finančně dost nákladné. Další výhodou je získávání hodnot velikosti excentricity v reálném čase. Druhým směrem jsou offline metody. Ty jsou levnější řešením detekce excentricity. Pro měření zpravidla stačí jen pár měřících přístrojů a testování probíhá v blízkosti motoru. Výsledky těchto měření jsou velmi přesné a nejsou ovlivněny zátěží, neboť ta je odpojena. Zde se naráží na hlavní nevýhodu offline metod – nutnost odpojení zátěže. To lze provést jen tam, kde není zapotřebí stálého chodu motoru. Samozřejmě v případě oprav, kdy se motor demontuje je možné offline metody aplikovat i v těchto provozech. Ve většině provozů, je možná dočasně odstavit zátěž, a proto jsou offline metody používanější než online. A to z jednoduchého důvodu – je to ekonomicky méně náročné. Provádění testů na bázi offline metod by mělo být s určitou pravidelností, tak aby bylo možné objektivně posoudit skutečný stav excentricity v měřeném motoru.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] Zarko, D.; Ban, D.; Vazdar, I.; Jaric, V., "Calculation of unbalanced magnetic pull in a salient-pole synchronous generator," Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International , vol., no., pp.T4-116,T4-122, 6-8 Sept. 2010

[2] ČERVENÝ, Josef: Stavba elektrických strojů 1 a 2. Plzeň, Přednáškové texty FEL ZČU, 2010/2011

[3] Andrej Burakov; "MODELLING THE UNBALANCED MAGNETIC PULL IN ECCENTRIC-ROTOR ELECTRICAL MACHINES WITH PARALLEL WINDINGS," Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, October 2007

[4] Ebrahimi, B.M.; Faiz, J., "Diagnosis and performance analysis of threephase permanent magnet synchronous motors with static, dynamic and mixed eccentricity," *Electric Power Applications, IET* , vol.4, no.1, pp.53,66, January 2010

[5] Jongman Hong; Doosoo Hyun; Sang Bin Lee; Kral, C., "Monitoring of airgap eccentricity for inverter-fed induction motors based on the differential inductance," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE* , vol., no., pp.3000,3007, 15-20 Sept. 2012

[6] Brabec, Václav: Integrace a modelování systému distribuovaného řízení polohy a průmyslového robota. Praha, Diplomová práce, 2012

[7] Zarko, D.; Ban, D.; Vazdar, I.; Jaric, V., "Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in a Salient-Pole Synchronous Generator Using Finite-Element Method and Measured Shaft Orbit," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.59, no.6, pp.2536,2549, June 2012

[8] Lin Wang; Cheung, R.W.; Zhiyun Ma; Jiangjun Ruan; Ying Peng, "Finite-Element Analysis of Unbalanced Magnetic Pull in a Large Hydro-Generator Under Practical Operations," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.44, no.6, pp.1558,1561, June 2008

[9] Produkty firmy ANSYS Inc., 2014 [online]. Dostupné z:http://www.svsfem.cz

[10] Arjona, M.A.; Castaneda, A.; Sellschopp, F. S.; Hernandez, C.; Vargas, R.; Zamarron, A., "An experimental approach to determine end-parameters for a 2D-FE induction motor model," Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on , vol., no., pp.1,5, 6-9 Sept. 2008