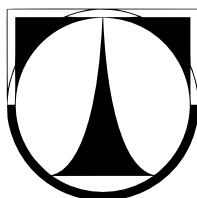


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



**ANALÝZA ZKRATOVÉHO PROUDU A JEHO
TEPELNÉHO ÚČINKU V MALÝCH
ASYNCHRONNÍCH MOTORECH**

2007

LEOŠ BERAN

Analýza zkratového proudu a jeho tepelného účinku v malých asynchronních motorech

Autoreferát dizertační práce

Ing. Leoš Beran

Studijní program: 2612V Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Pracoviště: Katedra elektrotechniky

Fakulta mechatroniky a mezioborových
inženýrských studií

Technická univerzita v Liberci

Hálkova 6, Liberec, 461 17

Školitel: Prof. Ing. Aleš Richter, CSc.

Dizertační práce je k nahlédnutí na děkanátu FM, TU v Liberci
Čížkova ulice č.3, budova B, tel.: +420 485 353 110

Autoreferát dizertační práce
Analýza zkratového proudu a jeho tepelného účinku
v malých asynchronních motorech

© Ing. Leoš Beran, 2007
ISBN 978-80-7372-200-5

Obsah

Obsah	III
Seznam použitých symbolů, zkratek a značek	IV
1 Úvod	5
2 Cíle dizertační práce	7
3 Současný stav problematiky	8
4 Způsob řešení	11
4.1 Analýza zkratového proudu ve statorovém vinutí	11
4.2 Rozbor momentu vadného motoru	16
4.3 Pracoviště pro experimentální diagnostiku	21
4.4 Měření teplotního pole	22
5 Přínosy dizertační práce	25
6 Pokračování práce v daném tématu a oboru	27
7 Literatura	28
Seznam publikovaných prací	30
Annotation	31
Annotation	32

Seznam použitých symbolů, zkratek a značek

B	T	magnetická indukce
I	A	efektivní hodnota proudu
I_{vc}	A	fázový proud při zkratu na vinutí
I_{2c}	A	rozdílový proud zkratované části vinutí
I_{3c}	A	proud protékající vlastním zkratem
i_1, i_2	A	smyčkový proud parciálního řešení
L_u, L_v, L_w	H	indukčnost statorového vinutí fáze u, v, w
M	Nm	mechanický moment
N_z		počet zkratovaných závitů
P	W	činný výkon
P_N	W	jmenovitý výkon EM
P_1	W	činný výkon na odporu R_{zb}
P_2	W	činný výkon na odporu R_{zn}
P_3	W	činný výkon na odporu R_{zk}
P_z	W	celkový ztrátový výkon
R	Ω	odpor
$\tan \delta$		ztrátový činitel dielektrika
U	V	napětí
U_{gnd}	V	napětí středu vinutí vůči kostře motoru
U_v	V	fázové napětí
U_{inz}	V	indukované napětí na zkratované části vinutí
U_{r1}	V	zpětné indukované napětí na nezkratované části vinutí od rotoru
U_{r2}	V	zpětné indukované napětí na zkratované části vinutí od rotoru

Seznam zkratek a značek

AM	asynchronní motor
FM	frekvenční měnič
ČV	částečné výboje
EM	motor pro experimentální diagnostiku
VN	vysoké napětí

1 Úvod

V dnešní době nikdo nepochybuje o nutnosti diagnostiky pracovních strojů. Každou technologickou linku je možné rozčlenit na několik funkčních pracovních celků. Můžeme je rozdělit na klíčové a pomocné. Klíčové pracovní stroje jsou takové, bez kterých je zařízení nepoužitelné a nefunkční. Pomocné pracovní stroje nejsou využívány po celou dobu běhu zařízení, a proto je možné je vyměňovat i během provozu.

Takovým klíčovým celkem může být i elektrický motor. V praxi existuje celá řada výrobních linek, která využívá k pohonu jednotlivých částí elektrický motor. Z hlediska jednoduchosti a ceny se používají asynchronní motory (dále jen AM). Dříve byly napájeny pouze harmonickým napětím. S rozvojem elektroniky se pro napájení a řízení AM používají frekvenční měniče (dále jen FM), které umožnily aplikovat AM motory v technické kybernetice.

V závislosti na zvoleném napájení AM, vystavujeme motor a jeho izolační systém různému zatížení. Při harmonickém napájení není přepětí tak časté. Přepětí vzniká většinou při přechodových stavech zapnutí/vypnutí. To znamená, že přepětí při harmonickém napájení je spíše náhodné a není tak vysoké jako při napájení z FM. U harmonického namáhání izolace lze sledovat degradaci izolačního materiálu hlavně z hlediska jeho struktury (pojiva).

Při napájení motoru z FM dochází k naprosto odlišnému namáhání izolace vlivem strmého nárůstu a poklesu napětí, které jde ruku v ruce se stálým zlepšováním polovodičových spínacích součástek. Následkem změny způsobu napájení AM dochází ke zrychlené degradaci izolačních materiálů v motoru. Také rostou dielektrické ztráty, které ohřívají celý systém a představují další faktor, který urychluje stárnutí izolačních materiálů. Pulzní namáhání způsobuje degradaci materiálu. To znamená, že se vytváří plynové prostory, které jsou hlavní příčinou částečných výbojů (dále jen ČV).

Vzhledem k závěrům učiněným v práci [9] je zřejmé, že přepětí překračuje zapalovací napětí i u nízkonapěťových pohonů. Proto je nutné se tímto problémem zabývat. V práci [8] je provedeno originální srovnání působení harmonického a pulzního namáhání na izolační systém. Doba životnosti zkoumaného materiálu Porofol firmy Isovolta s lakem H 62C se zkrátila dvacetkrát při zvýšení provozního napětí nad hranici zapalovacího napětí částečných výbojů.

Zničení izolačního materiálu ve většině případů způsobí zkrat ve statorovém vinutí. Mohou vzniknout různé varianty zkratů (mezizávitové, mezifázové, na kostru). Takto vzniklým zkratem teče zkratový proud,

který dále vyhřívá svými tepelnými účinky své okolí uvnitř motoru. Tím dochází k dalšímu poškození izolačního materiálu vlivem tepla. Pokud bychom byli schopni na základě tepelných účinků rozeznat zkratové proudy, můžeme předpovědět úplné zničení statorového vinutí motoru.

Protože není problematika tepelných účinků zkratového proudu pro malé AM rozpracována, rozhodl jsem se ji řešit ve své dizertační práci. Nejdříve jsem se začal zabývat otázkou, proč v dostupné literatuře nejsou popsána teoretická ani praktická řešení problému. Odpovědí mi byla otázka. Z jakého důvodu diagnostikovat malý AM? Jeho cena je zpravidla zanedbatelná vůči zařízení, které pohání. Nevyplatí se vynakládat úsilí a zjišťovat jeho aktuální technický stav. To je pravděpodobně odpověď na mnou položenou otázku ohledně „diagnostiky“ pro AM napájené FM.

To je však jen jeden pohled na předkládanou problematiku, který zvažuje pouze vlastní cenu AM a nebere v úvahu jeho technologickou důležitost jako klíčového funkčního celku. V případě výpadku klíčového funkčního celku obecné technologické linky (v našem případě AM+FM), může dojít k podstatně větším ekonomickým ztrátám. Tyto ztráty mohou být v porovnání s cenou motoru mnohonásobné. Takovým procesem může být např. dopravník taveniny ve sklárnách, dopravníky v automobilovém průmyslu, ovládací prvky spaloven aj. V těchto konkrétních případech má význam se diagnostikou malých asynchronních motorů zabývat.

Na začátku mých úvah jsem se snažil nalézt současné možnosti a metody diagnostiky el. strojů. Ve většině publikací jsem se setkal převážně s metodami (vibračními, akustickými, částečnými výboji, analýza proudových spekter - Parkovými vektory zejména u VN motorů), které lze (vzhledem k jejich ceně) použít pouze u velkých motorů [1], [5], [10]. U těchto motorů se většinou vyplatí vyvinout diagnostický systém, který zjišťuje technický stav online nebo offline. Došel jsem proto k závěru, že je nutné navrhnout metodu, která nebude finančně náročná a bude možné ji pro diagnostiku malých AM napájených z FM použít.

Čím více jsem tuto problematiku rozkrýval, tím více mne motivovala. Nechal jsem si udělat patentovou rešerši, která potvrdila mé předpoklady. Od roku 1976 nebyly nalezeny žádné patenty popisující metody diagnostikování malých AM napájených z FM nebo bez něho. To byl pro mne rozhodující impuls k řešení tohoto problému.

AM motor je sestaven z mnoha částí. Ve svých publikacích [15], [16] jsem označil jako klíčový celek statorové vinutí a jeho izolační systém. Tento předpoklad je potvrzen i z údajů firmy SIEMENS ELEKTRO-

MOTORY, spol. s r. o., se kterou jsem navázal úzkou spoluprací.

Po získání relevantních podkladů přímo z výroby, které potvrdily moje předpoklady, jsem se rozhodl, že správným směrem diagnostiky bude právě statorové vinutí a jeho izolační soustava. Tento závěr lze podepřít teorií Paretovy analýzy vad. Tato analýza je použita v práci [11] a říká, že při odstranění 20 % příčin dosáhneme snížení chybovosti o 80 %. To je statisticky velmi významné číslo s ohledem na fakta získaná od výrobce.

Z toho plyne, že sledováním technického stavu statorového vinutí (20 % příčin) je možné odstranit 80 % funkčně důležitých problémů, kvůli kterým dochází k poruchám malých AM.

2 Cíle dizertační práce

Předkládaná dizertační práce vychází z konkrétních požadavků technické praxe. Jedná se o problémy spojené s provozem a spolehlivostí asynchronního motoru napájeného z FM. Tyto pohony se v dnešní době prosazují ve všech průmyslových oborech. S rozvojem automatizace výroby v minulých letech nacházejí uplatnění v mnoha aplikacích. AM ve spojení s FM nahradily pohony se stejnosměrnými motory a neřízené pohony s AM.

Dizertační práce se zaměřuje hlavně na statorové vady, které jsou z hlediska životnosti motoru považovány za kritické. Zkrat ve statorovém vinutí je jednou z nejčastějších závad u malých AM, proto je nutné podrobit jeho účinky na celý systém podrobné analýze. Je třeba určit jak vzniká, jaké parametry jej ovlivňují a jak jej spolehlivě detekovat.

Matematické modelování reálných systémů urychluje analýzu řešených problémů a hledání správného praktického řešení. Bude sestaven matematický model jako nástroj pro analýzu zkratového proudu, který bude přizpůsoben k řešení zkoumané problematiky. Dále bude proveden návrh experimentálního motoru, na kterém bude možné simulovat různé statorové zkraty. K motoru se realizuje měřicí soustava, která bude sbírat a vyhodnocovat měřená data.

Získané výsledky budou porovnány s experimentálním měřením. Z výsledků by měl vzejít návrh nové metody pro diagnostiku malých AM, který by měl vyplnit dosud neprozkoumanou mezeru vědecké veřejnosti v oblasti technické diagnostiky pohonů.

3 Současný stav problematiky

Problematika diagnostiky malých asynchronních motorů je v dostupné literatuře nedostatečně rozpracována. Z patentové rešerše vyplynulo, že neexistuje žádné praktické řešení. Pro rešerši byly použity databáze ESPACE EP, ESPACE WO a ESPACE ACCESS, které evidují všechny patenty od roku 1976. V současné době se vědecká veřejnost věnuje převážně diagnostice velkých el. strojů. Publikace v tomto oboru jsou velmi podrobné a popisují i konkrétní technická řešení. Pro přesné zmapování současného stavu byly prostudovány odborné publikace z článků periodik, odborných konferencí a úzce zaměřených monografií.

Jednou z možností jak diagnostikovat vady AM je měření proudových spekter. V poslední době se tato metoda rozšířila do celého světa. Hardwarové a softwarové prostředky jsou neodmyslitelnou součástí špičkových analyzátorů. Analýzou proudových spekter je možné odhalit zlomené nebo přerušené rotorové tyče, statickou a dynamickou excentricitu, poruchy v magnetických obvodech, zkratované plechy statorového svazku, zkratované statorové vinutí aj. Ucelený přehled možností analýzy proudových spekter malých AM je rozpracován v [2]. Tato monografie se věnuje diagnostice malých AM napájených z distribuční el. sítě (harmonickým napětím). Poměrně přesně a výstižně popisuje, jak se jednotlivé vady (rotorové i statorové) projevují ve frekvenčním spektru napájecích proudů. Tato práce ověřila, že je možné aplikovat stejné algoritmy a teorie pro diagnostiku malých i velkých AM. Bohužel není zohledněno samotné technické řešení, které by umožnilo přímé nasazení v průmyslu (ekonomické i technické důvody). Dále neřeší problém současných pohonů s AM, které jsou ve většině případů napájeny z FM. Metodou analýzy frekvenčních spekter se zabývá mnoho dalších autorů např. práce [4], [6], [1] a [3].

Další velice rozšířenou metodou je měření částečných výbojů (ČV). Již od roku 1951 je možné on-line měření ČV pro zjišťování izolačních vad statorového vinutí v generátorech a turbogenerátorech [7]. Tato metodika prošla od svého vzniku velkým vývojem díky rozvoji výpočetní techniky, databázových systémů, aplikací neuronových sítí aj. V monografii [10] jsou přehledně zpracovány současné možnosti metodiky částečných výbojů, které se s velkou spolehlivostí využívají pro zjišťování stavu izolačního systému statorového vinutí. Výsledky měření jsou ve většině případů zpracovávány expertními systémy, které s velkou pravděpodobností určí mezi jakými částmi stroje dochází k výbojové činnosti. Základní sestava komerčních měřičů ČV stojí cca 1-1,5 mil. Kč. Výrobci těchto expertních systémů jsou Bidle, Tettex aj. Ve spojení s akustickou

sondou je možné poškozená místa izolačního systému přesně lokalizovat. Tato metoda se používá zejména u strojů na VN (např. 6,3 kV). Vzhledem k moderním napájecím jednotkám jako jsou FM se mohou objevovat ČV i v motorech napájených napětím, jejichž efektivní hodnota odpovídá napětí v rozvodné síti (230 V). Časy spínacích prvků se zkracují a dochází k rychlým změnám směru proudu v cívkách. Tím se indukují na statorových cívkách velká napětí. Tuto problematiku popisuje práce [9]. Při vhodné konstrukci FM, volbě připojovacího kabelu a předřazení filtru lze tyto napěťové špičky snížit na bezpečnou mez.

Vibrace a hluk (akustické pole) představují další zdroj informací o stavu sledovaného systému (v tomto případě AM). Hluk a vibrace spolu úzce souvisí, proto jsou zde uvedeny jako společná metoda, kterou je možné použít převážně u velkých elektrických strojů.

Pro zjišťování vad u malých AM není ale tato metoda vhodná. Důvodem je malý odstup okolního průmyslového hluku (vibrací), od hluku (vibrací) malého stroje, při zkratu několika málo závitů. Pokud dojde ke zkratu velkého počtu závitů ($N_z > \frac{1}{6} \cdot n$) tak, aby byly projevy vibrací měřitelné, je statorové vinutí vystaveno velkému zkratovému proudu. Tento proud svými tepelnými účinky zničí izolační materiál. Je to jeden z mnoha případů zkratu, který způsobí velmi rychlou tepelnou destrukci statorového vinutí. Zároveň je nutné si uvědomit, že nelze jednoduše měřit mechanické projevy pouze jedné části stroje. Hluk a vibrace jsou projevem více funkčních celků dohromady (převodovka, rám aj.).

Pokud chceme měřit vibrace přímo na motoru, musíme použít velice přesná čidla zrychlení. Jejich cena se pohybuje řádově okolo 40 000 Kč. Cena jednotky pro vyhodnocení vibračních spekter je cca 1 mil. Kč. Z těchto důvodů je tato metoda pro malé motory nepoužitelná.

Velká pozornost je věnována stárnutí používaných izolačních materiálů při výrobě statorového vinutí. První snahy o jednoduché modely započal Montsinger (r. 1930). Systematicky vyšetřoval dobu života papírové izolace vodiče v olejových transformátorech. Byl to konkrétně zaměřený model, který nebylo možné zobecnit. Pozdější práce jiných autorů vedly k obecnějšímu popisu stárnutí izolačních materiálů [12].

Existuje mnoho laboratorních metod jak určit elektrické vlastnosti izolačních materiálů (odpor, průrazné napětí, ztrátový činitel $tg\delta$, permitivita aj.) Tyto metody jsou vhodné zejména pro vytvoření modelu samotného materiálu. Vlastnosti izolačních materiálů závisí na mnoha faktorech (teplo, vlhkost, ionizační záření, pulzní namáhání, mechanické namáhání aj.). Z toho vyplývá, že vytvoření komplexního modelu není jednoduché.

Vždy se musí zvolit jeden ze sledovaných faktorů, který je pro dané

použití nejdůležitější. Např. v běžně používaných motorech je to teplota, která způsobuje nevratné změny a zhoršuje elektrické parametry izolačních materiálů. U motorů napájených FM je nutné sledovat i pulzní namáhání, které se významnou měrou podílí na stárnutí materiálu. Problematika pulzního namáhání je dobře popsána a zdokumentována s praktickými výsledky v [8].

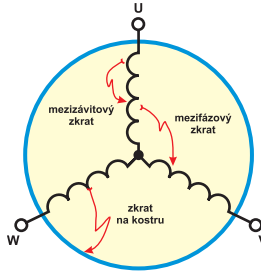
Tímto byl uveden přehled nejznámějších přístupů technické diagnostiky v oblasti el. pohonů. Existují i další specializované metody pro jiné části AM (diagnostika ložisek, nevyvážené rotory, unikající proudy aj.), které zde vzhledem k rozsahu této dizertační práce nebudou popisovány.

4 Způsob řešení

Celá práce je rozdělena do dvou základních částí. Teoretická část se věnuje analýze zkratového proudu ve statorovém vinutí AM a rozboru momentu vadného motoru. Praktická část se věnuje ověření teoretických výsledků vytvořených modelů a hlavně měření teplotního pole motoru v závislosti na vzniklém zkratu.

4.1 Analýza zkratového proudu ve statorovém vinutí

Analýza zkratového proudu ve statorovém vinutí je důležitá s ohledem na ztrátový výkon, který při zkratu vzniká. Vznik zkratového proudu může mít různé příčiny. Z hlediska obvodové konfigurace v motoru lze zkratové proudy rozdělit na mezizávitové v jedné fázi, mezifázové a zkratové proudy procházející závitem libovolné fáze přes šasi motoru do země. Jednotlivé typy zkratů znázorňuje obrázek 4.1. Všechny typy zkratových proudů představují nebezpečí pro funkci (spolehlivost) motoru. Záleží zejména na vzniklé obvodové konfiguraci. S ní je úzce spojeno výkonové působení a tepelné účinky na celý motor. Také dochází ke změně velikosti momentu na hřídeli motoru v rámci jedné otáčky.



Obrázek 4.1: Možné zkratové konfigurace ve statorovém vinutí AM

Pro zjištění vad ve statorovém vinutí je nejdůležitější činný výkon, který se mění v Lenz-Joulovo teplo. V případě, že vznikne zkrat ve statorovém vinutí, dojde ve většině případů pouze k lokálnímu tepelnému přetížení. Proto je poměrně snadné po demontáži AM určit, ke kterému typu zkratu došlo.

Okamžitá hodnota činného výkonu střídavého proudu je dána součinem okamžitých hodnot napětí a proudů podle rovnice 4.1.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (4.1)$$

Jsou-li průběhy proudu a napětí periodické, potom je výkon dán střední hodnotou okamžitého výkonu za periodu T . Tento výkon je možné chápat jako průměrný výkon za jednu periodu.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad P = \frac{1}{T} \int_0^T R \cdot i^2(t) dt \quad (4.2)$$

Činný výkon při pulzním namáhání z FM mohou vytvářet jen harmonické složky napětí a proudu téhož řádu. Tato problematika je vzhledem k našemu předpokladu harmonických průběhů nepodstatná. Výpočet činných výkonů pro neharmonické průběhy je podrobně popsán v [13].

Pro výpočet činného výkonu v případě zkratu ve statorovém vinutí, při znalosti protékajícího proudu a činného odporu vinutí, je vhodnější použít rovnici 4.2 s vyjádřením odporu vinutí.

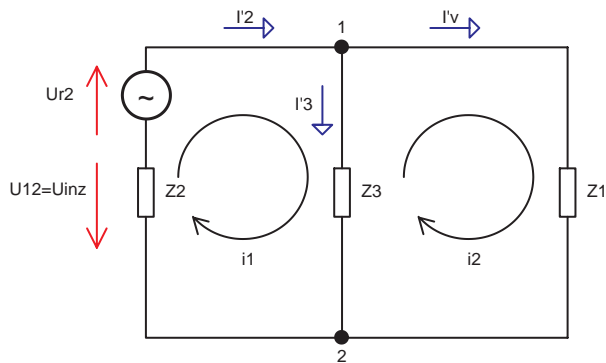
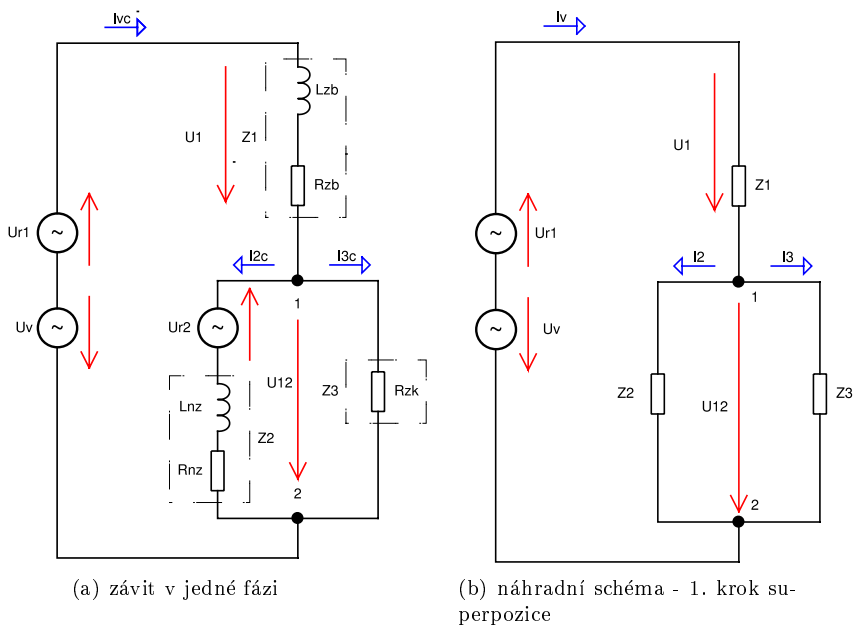
Kombinace zkratů, které mohou vznikat v motoru, záleží na konstrukci motoru, na rozložení a typu statorového vinutí. Celá analýza teplotního působení musí být založena na znalosti konfigurace statorového vinutí (počet drážek, počet pólů, počet závitů v jednom prameni aj.). U každého typu vinutí je možné sledovat různé nebezpečné zkraty.

Analýza činného výkonu může být provedena pouze za předpokladu znalostí proudových poměrů ve statorovém vinutí. Proto byl sestaven jednoduchý model, který umožňuje výpočet proudů v jednotlivých částech zkratovaného vinutí. Pro řešení byl zvolen model obvodový. Jedná se o model jednofázový v ustáleném stavu. Muselo být přijato několik zjednodušujících předpokladů, aby bylo možné provést řešení analyticky.

Sestavený model je uvedený na obrázku 4.2. Jedná se o sériově zapojenou ideální indukčnost a odpor, které jsou připojeny na zdroj harmonického napětí. Vzhledem k tomu, že se jedná o motor, bylo nutné zavést zpětnou reakci od magnetického toku rotoru. Toto bylo nahrazeno virtuálním zdrojem U_r , který působí proti původnímu zdroji, jenž napájí statorové vinutí. Zároveň je zpětné indukované napětí závislé na skluzu motoru tak, aby bylo možné analyzovat zkratový proud pro různé pracovní stavy motoru.

Další část modelu tvoří samotný mezizávitový zkrat. Ten je v modelu nahrazen odporem, který překlene určitou část vinutí. Zpětné indukované napětí se rozdělí v poměru zkratovaných U_{r2} a nezkratovaných U_{r1} závitů. Model nezahrnuje prostorovou dislokaci vinutí ve statoru.

Náhradní obvod zkratu na obrázku 4.2 je možné řešit pomocí superpozice. Obrázek 4.2(b) ukazuje první superpoziční krok, kde je zkratované napětí indukované U_{inz} ve zkratované části vinutí a část zpětného



Obrázek 4.2: Náhradní obvod zkratu a jeho superpozičních kroků

napětí indukovaného z rotoru U_{r2} . Obrázek 4.2(c) ukazuje druhý krok superpozice, kde je zkratované napájecí napětí U_v a část zpětného indukovaného napětí z rotoru U_{r1} .

Aby bylo možné vypočítat výsledné proudy, musí se nejprve vyřešit oba kroky superpozice. Rovnice 4.3 a 4.4 jsou sestaveny podle obvodu na obrázku 4.2(b).

$$\hat{U}_{12}(s) = \hat{U}_v - \hat{U}_{r1}(s) - \hat{Z}_1 \hat{I}_v \quad (4.3)$$

$$\hat{I}_v = \frac{\hat{U}_v - \hat{U}_{r1}(s)}{\hat{Z}} = \frac{(\hat{U}_v - \hat{U}_{r1}(s))(\hat{Z}_2 + \hat{Z}_3)}{\hat{Z}_1(\hat{Z}_2 + \hat{Z}_3) + \hat{Z}_2 \hat{Z}_3} \quad (4.4)$$

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{U}_{12}(s)}{\hat{Z}_2} \quad \hat{I}_3 = \frac{\hat{U}_{12}(s)}{\hat{Z}_3}$$

Řešení druhého kroku superpozice je provedeno podle obvodu na obrázku 2(c). Dílčím řešením jsou smyčkové proudy i_1 a i_2 , které jsou vyjádřeny pomocí rovnic 4.5.

$$\hat{i}_2 \hat{Z}_1 + (\hat{i}_2 - \hat{i}_1) \hat{Z}_3 = 0 \quad \hat{i}_2 = \frac{(\hat{U}_{inz} - \hat{U}_{r2}(s)) \hat{Z}_3}{\hat{Z}_2 \hat{Z}_3 + \hat{Z}_1(\hat{Z}_2 + \hat{Z}_3)} \quad (4.5)$$

Výsledné proudy se vypočítají podle rovnic 4.6.

$$\hat{I}'_v = \hat{i}_2 \quad \hat{I}'_2 = \hat{i}_1 \quad \hat{I}'_3 = \hat{i}_1 - \hat{i}_2 \quad (4.6)$$

Pro výpočet výsledných proudů v každé větvi náhradního schématu zkratu použijeme rovnice 4.7.

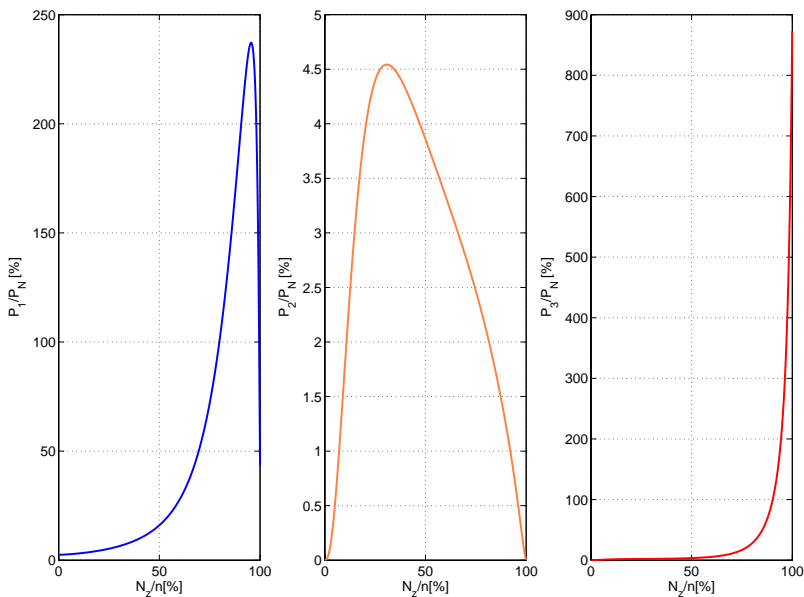
$$\hat{I}_{vc} = \hat{I}_v - \hat{I}'_v \quad \hat{I}_{2c} = \hat{I}_2 - \hat{I}'_2 \quad \hat{I}_{3c} = \hat{I}_3 + \hat{I}'_3 \quad (4.7)$$

Z výše uvedených rovnic je možné určit napětí na všech prvcích a proudy ve všech větvích náhradního obvodu.

Z výše definovaného výkonu a ze znalosti všech obvodových veličin můžeme vypočítat činné a jalové výkony na všech prvcích obvodu podle rovnic 4.8. Výpočet je provedený podle rovnice 4.2.

$$P_1 = R_{zb} |\hat{I}_{vc}|^2 \quad P_2 = R_{nz} |\hat{I}_{2c}|^2 \quad P_3 = R_{zk} |\hat{I}_{3c}|^2 \quad (4.8)$$

Graf 4.3 ukazuje závislost poměrného činného výkonu, který se přemění na teplo, v závislosti na počtu zkratovaných závitů. Graf je rozdělen do tří částí, které představují činné výkony v jednotlivých větvích



Obrázek 4.3: Celkové činné výkony statorového vinutí v poměru ke jmenovitému výkonu motoru $P_N = 1,1$ kW pro $s = 0, 2$

náhradního obvodu. Výsledné grafy jsou vyneseny pro $s = 0, 2$, což odpovídá jmenovitému zatížení motoru $M = 4,8$ Nm.

Vezmeme-li v úvahu zkrat pro 30 % procent závitů statorového vinutí, můžeme z grafů odečíst parciální činné výkony, které se podílejí na zahřívání statorového vinutí.

$$P_z = P_1 + P_2 + P_3 \quad (4.9)$$

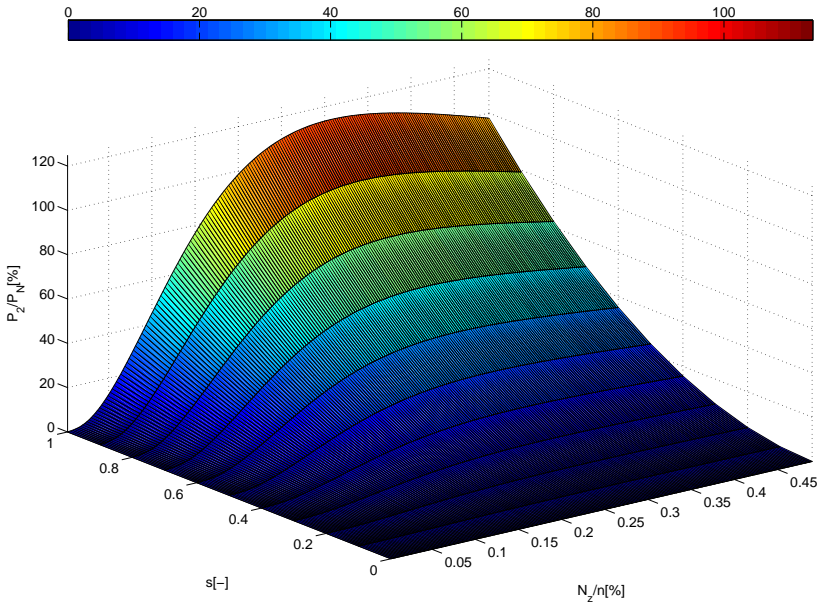
$$\frac{P_1}{P_N} = 6,2 \% \quad \frac{P_2}{P_N} = 4,55 \% \quad \frac{P_3}{P_N} = 2,25 \% \quad \frac{P_z}{P_N} = 13 \% \quad (4.10)$$

Tyto výkony sečteme a získáme celkový ztrátový výkon podle rovnice 4.9, který je způsobený zkratovým proudem. Z výpočtu vyplývá, že 13 % celkového jmenovitého výkonu motoru se přemění v teplo. Z toho 6,8 % v malém prostoru statorové drážky, resp. dvou drážek.

To je hlavní důvod lokálního tepelného přetížení izolačních materiálů. Protože je teplo přivedeno do jednoho místa v motoru, není možné jej

rychle odvést ani při aktivním chlazení pomocí ventilátoru.

S měnícím se zatížením se mění i ztrátový výkon, který je tvořen zkratovým proudem. Se změnou zatížení se mění i skluz motoru. Graf 4.4 ukazuje, jak se vyvíjí ztrátový výkon uvnitř statorového vinutí v závislosti na počtu zkratovaných závitů a na skluzu motoru.



Obrázek 4.4: Celkový činný výkon statorového vinutí P_2 v poměru ke jmenovitému výkonu motoru $P_N = 1,1$ kW

4.2 Rozbor momentu vadného motoru

Při zkratu ztratí statorové vinutí část aktivních závitů, které se podílejí na celkovém magnetickém toku, resp. na celkové indukci stroje. Tím dojde ke snížení točivého momentu, který je úměrný indukci $M \sim B$. Toto snížení se projeví pouze v určité části jedné otáčky. Záleží na tom, ve které fázi zkrat vznikl. Pokud bychom vyšetřili orbit koncového bodu fázoru momentu, resp. fázoru indukce v čase, získali bychom zkreslenou kružnici. Deformace se projeví ve směru fáze, ve které vznikl zkrat. Tento orbit je možné sestavit z měření fázových proudů. Dále převést pomocí

Parkovy transformace do α, β souřadnic.

Teoreticky lze tento problém popsat několika rovnicemi, ve kterých je vyjádřen proud statorového vinutí. V případě, že je vinutí motoru bez vady, je počet závitů jednotlivých fází shodný. To znamená, že všechny fázové indukčnosti se rovnají $L_u = L_v = L_w$ stejně tak jako impedance fázových vinutí. Pak jsou proudy popsány rovnicemi 4.11 s tím, že $I_u = I_v = I_w$.

$$\begin{aligned} i_u &= I_u \cdot \sin \omega t \\ i_v &= I_v \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2}{3}\pi \right) \\ i_w &= I_w \cdot \sin \left(\omega t + \frac{4}{3}\pi \right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Obecně lze indukci vypočítat podle vztahu 4.12. Konstanta k_m je zavedena z důvodu zjednodušení zápisu. Poslední část vztahu je goniometrický vztah pro vyjádření funkce $\sin \omega t$ tak, aby bylo možné vypočítat celkový vektorový součet všech složek indukce. Jde o matematický zápis Leblancova teorému, který říká, že je možné každé stojící střídavé pole rozložit na dvě točivá pole s poloviční amplitudou, která se otáčejí stejnou rychlostí proti sobě.

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{nI}{l} \quad k_m = \frac{\mu_0 \mu_r}{l} \quad \sin \omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} \quad (4.12)$$

Sečteme-li všechny složky magnetické indukce, dostaneme se k odvození uvedené v rovnici 4.13. Nejdříve zapíšeme všechny tři složky magnetické indukce podle Leblancova teorému a k nim přiřadíme prostorové pootočení každé fáze. Dále provedeme roznásobení a součet. Poslední člen $e^{j\omega t} + e^{j(\omega t + \frac{4}{3}\pi)} + e^{j(\omega t + \frac{8}{3}\pi)}$ je roven nule. Výsledkem odvození je rovnice 4.14.

$$\begin{aligned}
\hat{B} &= \hat{B}_u + \hat{B}_v + \hat{B}_w = \\
&= \frac{k_m n I}{2j} \left\{ (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) + \left(e^{j(\omega t + \frac{2}{3}\pi)} - e^{-j(\omega t + \frac{2}{3}\pi)} \right) e^{j\frac{2}{3}\pi} + \right. \\
&\quad \left. + \left(e^{j(\omega t + \frac{4}{3}\pi)} - e^{-j(\omega t + \frac{4}{3}\pi)} \right) e^{j\frac{4}{3}\pi} \right\} = \\
&= \frac{k_m n I}{2j} \left(e^{j\omega t} - e^{-j\omega t} + e^{j\omega t} e^{j\frac{4}{3}\pi} - e^{-j\omega t} + e^{j\omega t} e^{j\frac{8}{3}\pi} - e^{-j\omega t} \right) = \\
&= \frac{k_m n I}{2j} \left[-3 e^{-j\omega t} + \underbrace{e^{j\omega t} + e^{j(\omega t + \frac{4}{3}\pi)} + e^{j(\omega t + \frac{8}{3}\pi)}}_0 \right]
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Z výsledku je patrné, že výsledný vektor indukce rotuje úhlovou rychlostí ω . Jeho amplituda je rovna dvěma třetinám indukce fázové a nemění se v čase.

$$\hat{B} = \frac{-3k_m n I}{2j} e^{-j\omega t} \tag{4.14}$$

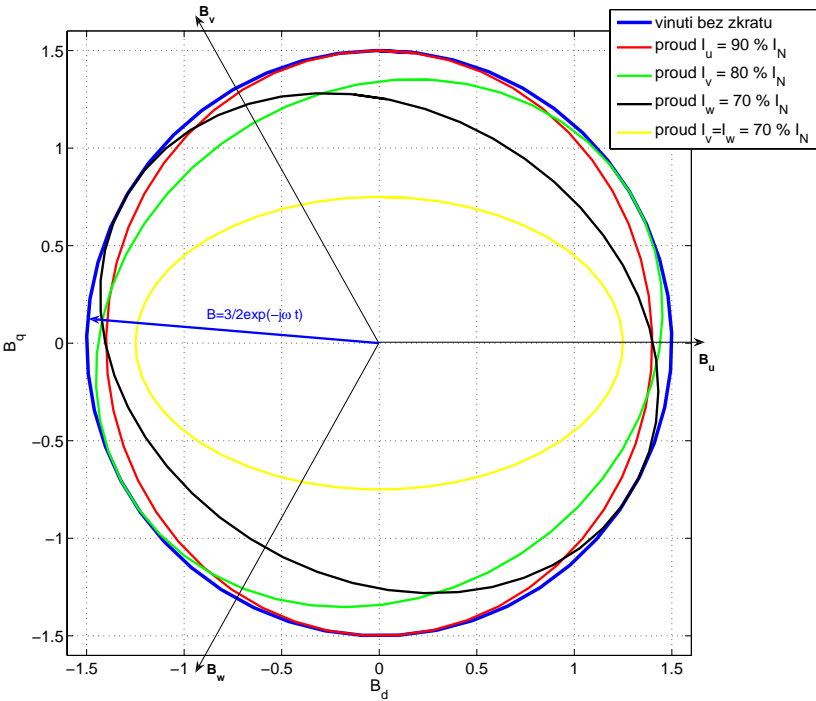
V případě, že ve statorovém vinutí vznikne zkrat, dojde ke změně indukčnosti jedné fáze, resp. více fází, záleží na konfiguraci zkratu. To znamená, že $L_u \neq L_v \neq L_w \Rightarrow I_u \neq I_v \neq I_w$. Dosadíme-li rovnici 4.12 do rovnice pro vektorový součet jednotlivých složek výsledné indukce 4.13, dostaneme komplikovaný výraz 4.15, který je analyticky těžko řešitelný. Výsledný výraz není možné upravit tak jako v předchozím případě, protože počty závitů jednotlivých fázových vinutí jsou rozdílné.

Sečteme-li graficky všechny složky magnetické indukce v rovnici 4.15, dostaneme orbit amplitudy vektoru indukce ve vzduchové mezeře. Výsledek grafického součtu ukazuje graf 4.5.

Pro simulaci byla použita jedna perioda napájecího napětí. Koncový bod fázoru indukce vytvoří jeden orbit. Z toho vyplývá, že výsledný vektor indukce rotuje úhlovou rychlostí ω stejně jako v případě motoru bez zkratu ve statorovém vinutí. Jeho amplituda je v čase proměnná, narozdíl od motoru bez vady. To je možné sledovat při měření momentové charakteristiky nerovnoměrností otáčení motoru. Tím dojde ke snížení momentu na hřídeli.

$$\begin{aligned}
\hat{B} = \frac{k_m}{2j} & \left\{ n_u I_u (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) \right. \\
& + n_v I_v \left(e^{j(\omega t + \frac{2}{3}\pi)} - e^{-j(\omega t + \frac{2}{3}\pi)} \right) e^{j\frac{2}{3}\pi} \\
& \left. + n_w I_w \left(e^{j(\omega t + \frac{4}{3}\pi)} - e^{-j(\omega t + \frac{4}{3}\pi)} \right) e^{j\frac{4}{3}\pi} \right\} \quad (4.15)
\end{aligned}$$

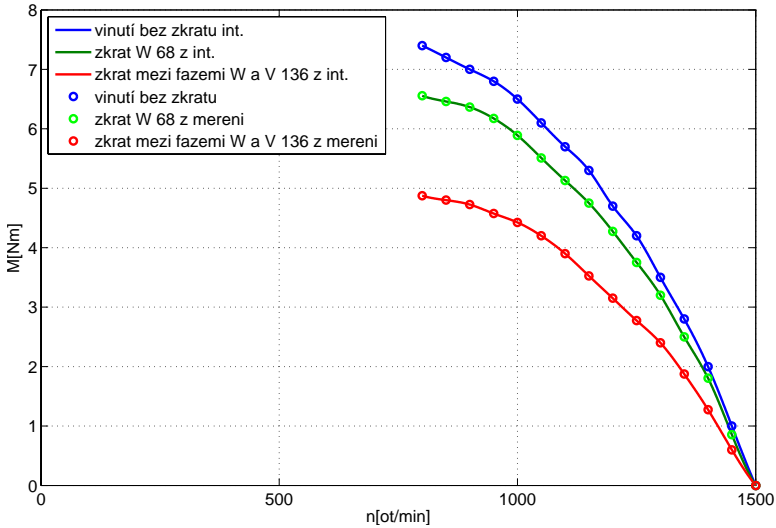
Pokud se moment motoru sníží, musí se snížit i jmenovitý výkon motoru. Část výkonu, která konala práci na hřídeli, se při zkratu ve statorovém vinutí přemění na teplo. Množství tepla záleží na počtu zkratovaných závitů. Výkonovou bilanci ilustruje obrázek 4.7.



Obrázek 4.5: Orbita koncového bodu fázoru výsledného vektoru indukce pro různé zkraty ve statorovém vinutí

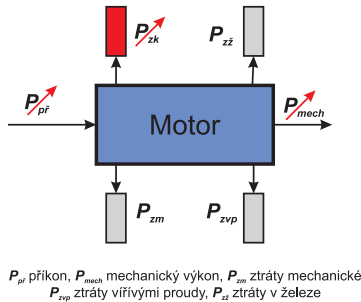
Pro ověření rovnice 4.15 bylo provedeno měření. Výsledek měření ukazuje graf 4.6. Pro různé konfigurace zkratu byly změřeny momentové

charakteristiky motoru. Z výsledků je vidět, že efektivní hodnota momentu klesá v závislosti na počtu zkratovaných závitů. Body v grafu 4.6 značí změřené hodnoty a plné čáry interpolovaný průběh.



Obrázek 4.6: Závislost efektivní hodnoty momentu na počtu zkratovaných závitů ve statorovém vinutí EM

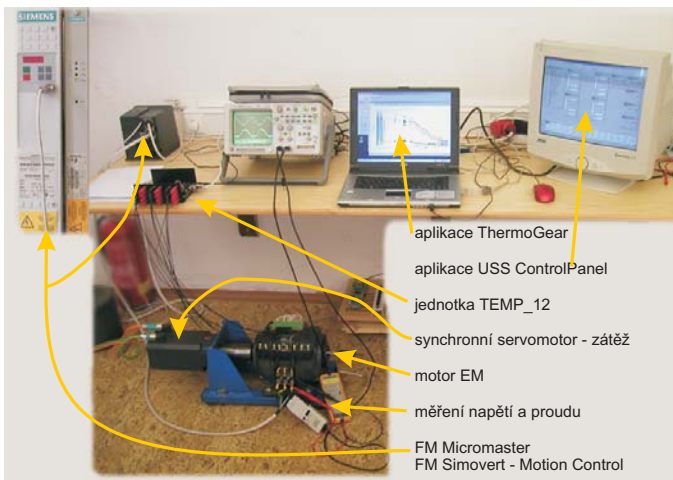
Tento graf potvrzuje odvození v předchozích odstavcích, že se zvětšujícím se zkratem ve statorovém vinutí, klesá moment na hřídeli motoru.



Obrázek 4.7: Výkonový diagram AM se zkratem ve statorovém vinutí

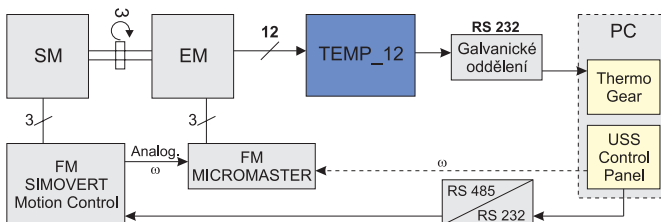
4.3 Pracoviště pro experimentální diagnostiku

Ke studiu a analýze zkratových proudů a jejich tepelných účinků bylo vytvořeno pracoviště, na kterém bylo možné simulovat různé konfigurace zkratů. Toto pracoviště (obrázek 4.8) se skládá ze tří hlavních částí: z motoru pro experimentální diagnostiku (EM), měřicí jednotky TEMP_12 a zatěžovacího synchronního motoru SIEMENS.



Obrázek 4.8: Pracoviště pro experimentální diagnostiku

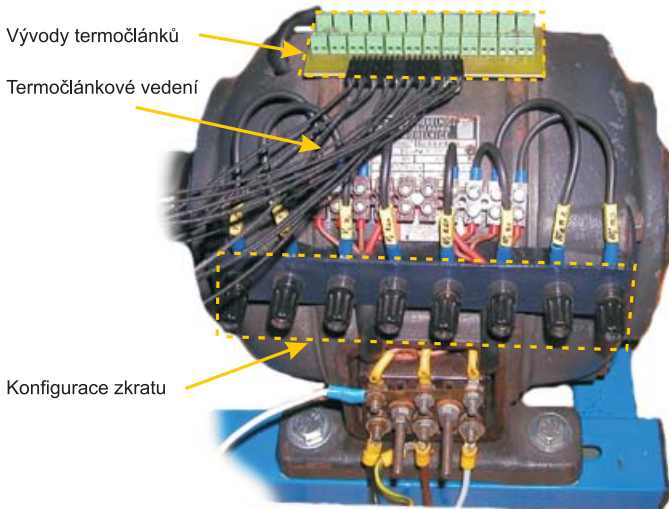
Všechny části jsou sestaveny do komplexního experimentálního pracoviště, které umožňuje podrobně analyzovat zkoumaný motor. Blokové schéma pracoviště je na obrázku 4.9. Synchronní motor je spojen hřídeľovou spojkou a pracuje na jedné hřídeľi s motorem EM.



Obrázek 4.9: Blokové schéma laboratorního pracoviště

Z AM jsou sbírána data pomocí jednotky TEMP_12 vlastní konstrukce, která posílá naměřená data dále do PC. Pro monitorování teplot v jednotlivých místech motoru byl vytvořen program ThermoGear, který zpracovává, vizualizuje a ukládá data pro další analýzu.

Hlavní část celého pracoviště tvoří EM. Motor pro experimentální diagnostiku je speciální AM. Pro potřeby pracoviště bylo nutné takový motor navrhnout a vyrobit. V rámci této práce bylo navrženo statorové vinutí AM a vyroben vlastní EM, který je na obrázku 4.10.



Obrázek 4.10: Motor pro experimentální diagnostiku

Celé pracoviště je koncipováno tak, aby bylo možné simulovat různé zatížení EM. Jednotka TEMP_12 slouží k měření teplotního pole motoru.

4.4 Měření teplotního pole

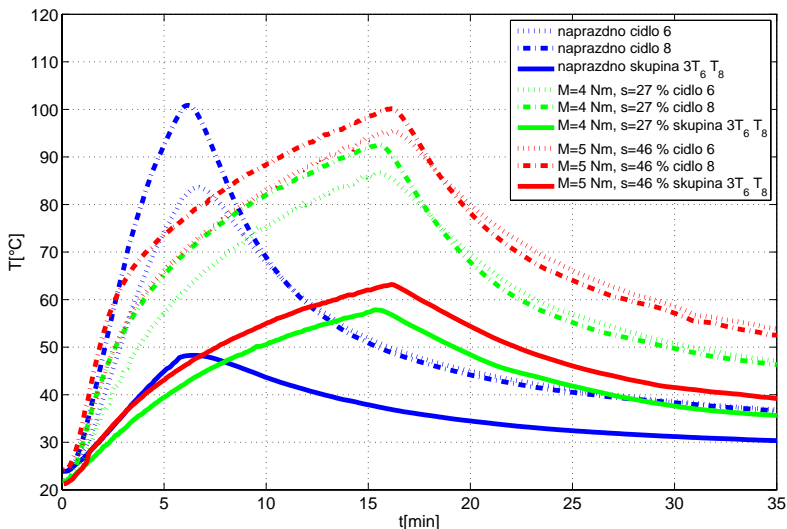
Během měření se ukázalo, že není třeba vyhodnocovat všechna čidla zvlášť, a proto jsou čidla rozdělena do několika skupin. Tyto skupiny zohledňují teplotní rozložení při dané konfiguraci statorového vinutí. Tímto krokem se výrazně zvýší čitelnost grafů a jejich vyhodnocení. K měření byl použit vlastní program ThermoGear a pro vlastní vyhodnocení naměřených výsledků program MATLAB.

skupina č. 1	1	4	5	6	7	8	9	12
skupina č. 2	2	3	10	11	-	-	-	-
skupina č. $3T_x$	1-12	všechna čidla bez čidla T_x						

Tabulka 4.1: Rozdělení termočlánků do skupin

Jedno z mnoha měření, které proběhlo v rámci této dizertační práce, bylo při zkratu 68 závitů ve fázi V a blíže neurčeného zkratu ve fázi W. Bylo provedeno měření naprázdno a při zatížení 4 Nm a 5 Nm při napájecí frekvenci 25 Hz.

Z měření vyplynuly zajímavé výsledky, které detekují další uměle vytvořený zkrat ve fázi V. V grafu 4.11 je vidět, že teplota roste jak v místě fáze W (čidlo č. 8), tak v místě fáze V (čidlo č. 6). Teplota čidla č. 6 je asi o 5 °C nižší vůči fázi W. To napovídá tomu, že ve fázi W vznikl o málo větší zkrat než 68 závitů.



Obrázek 4.11: Měření teplotního pole motoru EM zkrat 68 závitů ve fázi V – frekvence napětí 25 Hz, naprázdno, 4 Nm, 5 Nm

Při porovnání různých zatížení je vidět, že teplota všech míst se zatížením roste. Je zajímavé sledovat tvar křivky nárůstu teploty. Není to typická exponenciální funkce, kterou se tepelné jevy popisují nejčastěji.

Po 3 min provozu dojde k malé změně, kterou způsobuje FM.

Překvapivý je průběh teploty při chodu naprázdno. Teplota strmě roste, i když je motor nezatížený. To lze vysvětlit řízením FM, který při zatížení chrání sám sebe. Při chodu naprázdno se motor frekvenčnímu měničci jeví jako zátěž, kterou dokáže bez problému napájet, a proto nemění režim řízení. Na druhou stranu při zatížení dojde k podstatně většímu rozdílu proudu v jednotlivých fázích a FM na to reaguje snížením proudu dodávaného motoru. To také vysvětluje malý zlom charakteristiky při ohřevu motoru.

5 Přínosy dizertační práce

V průběhu řešení této dizertační práce, byl sestaven model pro řešení zkratového proudu ve statorovém vinutí. Z něho je možné při zkratu určit proudové poměry v jednotlivých částech statorového vinutí. Znalost zkratového proudu je důležitá k určení tepla, které vzniká při zkratu ve statorovém vinutí.

Pro ověření teoretických výsledků bylo sestaveno experimentální pracoviště, které umožňuje monitorování teplotního pole motoru. Dále byl navržen a zkonstruován EM pro simulaci zkratů ve statorovém vinutí.

Na pracovišti bylo provedeno velké množství experimentů, které potvrdily teoretické úvahy. Nejdůležitějším výsledkem těchto experimentů je fakt, že lokálně zvýšená teplota je sigifikantním ukazatelem poruchy ve statorovém vinutí AM a že nezáleží na druhu napájení a řízení vlastního motoru.

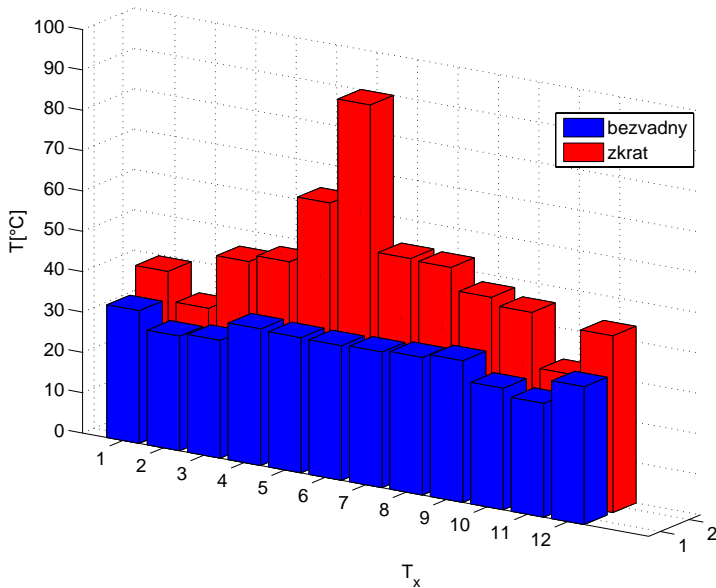
Vyneseme-li teploty všech monitorovaných bodů v libovolném okamžiku měření, dostaneme teplotní rozložení po obvodu motoru. Vhodnou grafickou interpretaci představují sloupcové grafy pro dva stavy. Pro stav bez vady v motoru a pro stav se zkratem v některé z fází statorového vinutí. Porovnání ilustruje graf 5.1.

První řada znázorňuje teplotní pole motoru při chodu naprázdno bez zkratu ve statorovém vinutí. Z grafu 5.1 je možné identifikovat patky motoru díky menšímu tepelnému odporu a rychlejšímu odvodu tepla. Jsou to čidla č. 2, 3, 10 a 11.

Ve druhé řadě je vyneseno teplotní pole motoru při chodu naprázdno s uměle vytvořeným zkratem ve fázi V. Čidlo č. 6 zaznamenalo velký rozdíl oproti ostatním bodům v motoru. Při podrobnějším pohledu je možné vysledovat rozložení teploty směrem od zkratu na obě strany po obvodu statorového vinutí.

V této práci je také proveden rozbor mechanického momentu motoru bez vady a motoru se zkratem ve statorovém vinutí. Teoretické závěry, které byly odvozeny, ukazují, že se velikost momentu motoru při zkratu v rámci jedné otáčky mění. To způsobuje při konstantní zátěži změnu rychlosti otáčení celého pohonu. Tyto změny momentu na hřídeli motoru jsou příčinou vibrací. Do budoucna by stálo za úvahy, zda není možné použít monitorování rychlosti otáčení hřídele sledovaného motoru k identifikaci zkratu ve statorovém vinutí.

Byly porovnány různé druhy řízení FM při zkratu ve statorovém vinutí, které většina dnešních FM nabízí. Jedná se o skalární a vektorové řízení. Skalární řízení je velmi jednoduché a funguje bez zpětné vazby. V případě, že vznikne statorový zkrat, FM nezaregistruje žádnou změnu ze zpětnovazebných čidel a řídí motor stejným způsobem ($U/f=\text{konst}$).



Obrázek 5.1: Teplotní pole EM v režimu bez zkratu a se zkratem ve fázi V – označení T_x představuje čísla termočláneků

U vektorového řízení je situace poněkud odlišná. Řízení využívá zpětnou vazbu, kterou představují v daném čase výstupní proudy a napětí FM. Pomocí těchto hodnot vypočítá další regulační zásah tak, aby byly splněny požadavky žádané hodnoty. Díky tomu, že FM dostává chybné informace ze zpětné vazby do modelu, který je vyhodnocuje, jeho regulace selhává. Jako vnější projev této situace je výrazná změna rychlosti a momentu během jedné otáčky a to i bez zatížení. To způsobuje mechanické vibrace celého motoru i poháněné soustavy. Proto by bylo vhodné u FM používat měření všech tří proudů, které by tento nedostatek odstranilo.

Dalším výsledkem jsou poměrně dlouhé časy nárůstu teploty na hodnotu, která je pro izolační systém nebezpečná (přehřátí). Čas, za který se motor přehřeje, se pohybuje řádově v několika minutách až desítkách minut. Díky tomu, že se teplo v motoru šíří malou rychlostí, je možné identifikovat nesymetrické teplotní pole, které ukazuje na vadu ve statotorovém vinutí. Čas do přehřátí je možné do budoucna využít k identifikaci vady a k varování uživatele.

6 Pokračování práce v daném tématu a oboru

Pro další výzkum a analýzu tepelného účinku zkratového proudu ve statorovém vinutí je navržen nový motor pro další experimenty. Tento motor bude vyroben přímo u výrobce SIEMENS ELEKTRO-MOTORY, spol. s r. o. Díky tomu bude k dispozici kompletní dokumentace, která je nutná k hlubší analýze celého systému. Jeho konstrukce umožňuje studovat i tepelné účinky menšího počtu zkratovaných závitů ve statorovém vinutí, které jsou v praxi pravděpodobné a zároveň umožní i další měření. Nový experimentální motor konstrukčně vychází ze získaných poznatků a zkušeností autora a eliminuje nevhodný návrh odboček u původního EM.

Pro sestavení přesnějšího modelu bude třeba pokračovat a zohlednit reálné konstrukční uspořádání statorového vinutí a přesycení jádra v jednotlivých místech statoru.

Poměrně jednoznačné závěry teplotní závislosti statorových vad tohoto výzkumu dávají velkou šanci dovést metodu sledování teplotního pole k využití v průmyslové praxi. Následující výzkum, až k praktickému využití, si do budoucna vyžádá mnoho dalších výpočtů, měření a experimentů.

Je nutné zdůraznit, že se tato práce věnovala ověření teoretických předpokladů, nikoliv vytvoření nové metody, která by mohla v budoucnu na základě těchto a dalších měření vzniknout. Bylo by to z technologického hlediska výroby motorů příliš složité. Proto je nutné dále pracovat na jiném řešení, které vychází ze znalosti výsledků těchto experimentů.

Dalším krokem k obecnější formulaci projevů teplotního pole motoru při zkratu je sledování teploty na povrchu motoru. Tím by bylo možné získat metodu, která nebude nijak zasahovat do samotné konstrukce motoru. To je ve své podstatě jednou z nejdůležitějších vlastností, které jsou kladeny na diagnostické metody.

7 Literatura

- [1] BILOŠ, Jan. *Diagnostika asynchronních el.-motorů - výzkumná zpráva*. Ostrava: Moravskoslezské teplárny a.s. . 1996. 21 s.
- [2] JAKSCH, Ivan at al. *Diagnostics for Electrical Machines*. Liberec: Ediční středisko TUL. 2003. 124 p. ISBN 80-214-2540-7.
- [3] RANGAARAJAN, M. at al. A survey of methods for detection of stator related faults in induction machines. *Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*. Viena, Austria. 2005. p. 35 – 46. ISBN 0-7803-9123-X.
- [4] SCHNIEDER, Jiří. *Využití obálkové metody při analýze spekter napájecího proudu AS. EL. motorů*. Ostrava: Moravskoslezské teplárny a.s. s.339 - 343. ISBN nenalezeno.
- [5] SOKANSKÝ, Karel - CHMELÍK, Karel. *Projevy mechanických závad v proudových spektrech asynchronních motorů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita. Fakulta elektrotechniky. Katedra elektroenergetiky. s. 84 – 88. ISBN nenalezeno.
- [6] SOKANSKÝ, Karel - NOVÁK, Tomáš. *Diagnostika závad v proudových spektrech pomocí analyzátoru microlog*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita. Fakulta elektrotechniky. Katedra elektroenergetiky. s. 348 – 355. ISBN nenalezeno.
- [7] STONE, G.C. - WARREN, V. *Effect of manufacturer, winding age and insulatin type on stator winding partial discharge levels - DIEA Fature article*. Toronto: Iris power Engineering. 2004. Vol.20, No. 5. p. 13 – 17. ISBN nenalezeno.
- [8] TRNKA, Pavel. *Dizertační práce: Interakce izolantů s pulzním namáháním*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. Fakultla elektrotechnická. Katedra Elektrotechnologie. 2005. 87 s., 68 s. příloh. Vedoucí dizertační práce Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.
- [9] PEROUTKA, Zdeněk. *Dizertační práce: Přechodná přepětí ve střídavých regulovaných pohonech a jejich vliv na izolaci motoru*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. Fakultla elektrotechnická. Katedra Elektroniky. 2004. 109 s., 1 s. příloh. Vedoucí dizertační práce Doc. Ing. Václav Kůs, CSc.
- [10] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Praha: ACADEMIA. 2005. 131 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [11] MORRISON, Radim. *Diplomová práce: Vytvoření katalogu vad elektromotorů SIEMENS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakultla strojního inženýrství. Ústav metrologie a zkušebnictví. 2004. 109 s., 1 s. příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Koška, Ph.D.

- [12] [online]. cit[2004-06-05]. *Ageing of polymeric insulating materials and insulation system design*, URL:
<<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/101019717/PDFSTART>>
<http://www.easa.com/indus/stators.html>
- [13] RICHTER, Aleš - KONEČNÁ, Eva - RYDLO, Pavel. *Harmonické zkreslení napájecí sítě, jeho definice, měření a praxe*. 1. vydání. Liberec: Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů, 2000.
- [14] RYBIČKA, Jiří. *L^AT_EXpro začátečníky*. 2. vydání. Brno: Konvoj spol. s r.o., 1999. 191p. ISBN 80-85615-74-6.

Seznam publikovaných prací

- [15] BERAN, Leoš – VÁCLAVÍK, Jan. Diagnostic of induction motors. In *Sborník konference ECMS 2003*. Liberec: Technical University of Liberec. Fakulta Mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, 2003. 5 p. ISBN 80-7083-708-X.
- [16] BERAN, Leoš. Návrh motoru pro experimentální diagnostiku. In *EPVE 2003 ELEKTRICKÉ POHONY A VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2003. 4 p. ISBN 80-214-2497-4.
- [17] BERAN, Leoš – MARTINEZ, Juan – RICHTER, Aleš. Behaviour PET Polymers in Dependence its Ageing due to High Voltage. In *ECMS 2005 Electronics, Control, Modelling, Measurement and Signals - de l'Ecole Doctorale SYSTEMES*. Toulouse: UNIVERSITE PAUL SABATIER, 2005. 5p. Sborník na CD.
- [18] BERAN, Leoš – DIBLÍK, Martin - PŘÍVRATSKÝ, Petr. Analýza možností diagnostiky motorů napájených z frekvenčních měničů SIEMENS. V *K⁷ vědecko populární časopis Fakulty mechatroniky TU v Liberci*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií. 2005. 6 p. ISSN 1214 - 7370.
- [19] BERAN, Leoš – DIBLÍK, Martin. Calculation of short out current of stator winding in induction motor. In *ISEM 2006, XIV. International Symposium on Electric Machinery*. Prague: Czech Technical University in Prague. Faculty of electrical engineering. 2006. 7p. ISBN: 80-01-03548-4.
- [20] BERAN, Leoš. Modernizace měřicího pracoviště pro měření asynchronního motoru. V *EPVE 2006, Elektrické pohony a výkonová elektronika – Sborník příspěvků z celostátní konference*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2006. 3s. ISBN: 80-214-3286-1.
- [21] BERAN, Leoš. *Výzkum a vývoj mechatronických systémů pro spřádací stroje: APLIKACE LINEÁRNÍHO POHONU [Výzkumná zpráva]*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií. Katedra elektrotechniky. 2006. 42–45 s. ISRN TUL-KEL-TZ/PZ-06/05/CZ. Projekt č. FT-TA3/017.

Annotation

The analyse of short-circuit current and it's thermal incidence in low power induction motors

Leoš Beran, MSc.

The thesis deals with the analyse of short-circuit current in stator winding of low power induction motors. The occurrence of short-circuit arises when some parts of the insulation system of stator winding fail. The failure can be caused by material defects, wrong design of drive, climatic or operating conditions (short-term or long-term overvoltage, non-harmonic processes of supply voltage). Stator winding loses a part of active coils and its inductivity decreases. The short circuit current warms up the surrounding winding with its heat effect at point of the short-circuit.

The introduction of the thesis deals with the analyse of all available methods published in specialized literature and also with the background research of analyse methods in small IM in patent database. This analyse proves that there is not any method capable of identifying reliably the short-circuit in stator winding of IM. Methods used for big induction motors diagnose are reviewed and their convenience in little induction motors are considered.

Two models simulating different short-circuits that can occur in stator winding have been designed. It is a single-phase linear model and numerical model in SymPowerSystems software.

The main benefit of this doctoral thesis is the analyse of short-circuit. Second chapter analyses thermal activity on separate parts of the insulation system. Thermal effects were verified on a set up model which consists of a specially designed motor with the temperature monitoring in slots of the stator. The results of my thesis will be used for a new diagnostic method project in little induction motors.

Key Words: diagnostic, induction motor, thermal load, short circuit current, short circuit model

Annotation

L'analyse d'un courant en court-circuit et de son effet thermique dans les petites moteurs tournantes à induction

Leoš Beran, MSc.

Cette thèse concerne l'analyse des courant en court-circuits dans les stators des moteurs tournantes à induction. Le court-circuit survient quand des parties du système d'isolation du stator défont. Les défontances peuvent être causées par des défauts de matériel, de mauvaise design de la force-motrice, par les conditions climatiques ou par les conditions de disfonctionnement (courte ou longue surtension, instabilité du processus de distribution de la tension). Pendant court-circuits, le stator perd une partie de la bobinage active et sa induction diminue. Le courant en court-circuit chauffe la bobine autour du lieu de court-circuit et la dégradation de la isolation continue rapidement.

L'introduction de cette thèse présente l'analyse de toutes les méthodes disponibles publiées dans les magazines spécialisées, mais aussi dans les travaux de la recherche (ou bases de données des brevets) déjà réalisées, en utilisant des méthodes d'analyse des petites moteurs à induction. Cette analyse prouve qu'il n'y a pas de la méthode permettant d'identifier de manière fiable les courant en court-circuit dans les stator du petit moteur à induction. Les méthodes utilisées pour diagnostiquer des grands moteurs à induction ont été revisitées pour les considérer avec les petits moteurs à l'induction.

Deux modèles de la simulation des différents court-circuits, qui peuvent se produire dans le stator, ont été assemblés. Il s'agit d'un modèle linéaire monophasé et d'un modèle numérique, en utilisant logiciel SymPowerSystems

Le thème principal de cette thèse de doctorat est l'analyse du court-circuit. Donc le second chapitre analyse l'activité thermique et sa influence aux parties séparées du système d'isolation. Les effets thermiques sont vérifiés par un modèle physique, qui consiste d'un design spécial du moteur et du système de moniteur de la température contrôlée en stator encoché. Les résultats de la thèse seront utilisés pour un projet concernant nouvelle méthode de la diagnostique des petits moteur tournantes à induction.

Mots clef: diagnostique, moteur à induction, charge thermique, courant en court-circuit, modèle de court-circuit

Název: Analýza zkratového proudu a jeho tepelného účinku v malých asynchronních motorech

Autor: Ing. Leoš Beran

Vydavatel: Technická univerzita v Liberci

Povoleno: Rektoriátem TUL dne 25.4.2007 čj. RE 61/07

Tiskárna: TU v Liberci

Vyšlo: květen 2007

Vydání: první

Rozsah: 32 stran, 15 obrázků, 1 tabulka

Číslo publikace: 55-042-07

ISBN 978-80-7372-200-5