



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ELEKTROMAGNETICKÁ ANALÝZA PARAMETRŮ VÍCEFÁZOVÉHO ELEKTRICKÉHO STROJE

ANALYSIS OF MULTIPHASE ELECTRICAL MACHINE PERFORMANCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Antonín Kříž

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Bárta, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Antonín Kříž

ID: 230391

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Elektromagnetická analýza parametrů vícefázového elektrického stroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte literární rešerši na téma současného stavu poznání vícefázových elektrických strojů
2. Vytvořte elektromagnetický model zadaného vícefázového elektrického stroje.
3. Na elektromagnetickém modelu vícefázového elektrického stroje studujte provozní vlastnosti během bezporuchového stavu.
3. Na elektromagnetickém modelu vícefázového elektrického stroje studujte provozní vlastnosti v zadaných poruchových stavech.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PYRHONEN, J.; JOKINEN t.; HRABOVCOVÁ V. Design of rotating electrical machines. John Wiley and Sons, 2007. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [2] Juha Pyrhonen , Valeria Hrabovcova , R. Scott Semken: Electrical Machine Drives Control : An Introduction, ISBN: 9781119260455 (EN)
- [3] A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley, S. Umans "Electric Machinery", McGraw-Hill Companies Inc., 2003. 688 s. ISBN 0-07-112193-5

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 29.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Bárta, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V této bakalářské práci byla provedena rešerše na téma historie a oblasti použití vícefázových strojů v transportu. Následně byla provedena rešerše na téma aspektů spojených s vícefázovými asynchronními stroji. V závěru práce byl zkoumán elektromagnetický model 6-fázového asynchronního stroje v bezporuchovém stavu a s poruchou 1 fáze. Pro oba stavy byly porovnány změny v parametrech a chodu stroje.

Klíčová slova

Vícefázové elektrické stroje, vícefázový asynchronní stroj, elektromagnetický model, 6-fázový asynchronní stroj, Ansys Maxwell 2D

Abstract

In this thesis, a research on the history and current applications in transport of multiphase motors was conducted. Subsequently, a research on the aspects related to multiphase induction machines was carried out. Finally, the electromagnetic model of six phase induction machine was investigated in the in healthy condition and one faulty phase. The changes of parameters and motion of the motor were compared for both conditions.

Key words

Multiphase electrical machines, multiphase induction machine, electromagnetic model, six phase induction machine , Ansys Maxwell 2D

Bibliografické citace:

KŘÍŽ, Antonín. *Elektromagnetická analýza parametrů vícefázového elektrického stroje*. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151550>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jan Bárta.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Elektromagnetická analýza parametrů vícefázového elektrického stroje“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 29. května 2023

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Janu Bártovi, Ph.D. za jeho pomoc, odborné rady a motivaci při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a kamarádům za podporu při studiu.

Obsah

Seznam obrázků	1
Seznam tabulek	3
Seznam symbolů a zkratk	3
1 Úvod	6
2 Současný stav poznání vícefázových motorů	7
2.1 Historie použití vícefázových strojů.....	7
2.2 Synchronní stroje	7
2.3 Asynchronní stroje	9
3 Aspekty spojené s vícefázovými asynchronními stroji, jejich přednosti a nevýhody	11
3.1 Vliv uspořádání a zapojení vinutí	11
3.2 Vliv vyššího počtu fází na ztráty stroje	15
3.3 Motor v poruchovém stavu	17
3.4 Vliv vyššího počtu fází na cenu motoru a měniče	21
3.5 Vliv vyšších harmonických.....	24
3.6 Výhody vícefázových asynchronních strojů.....	25
3.7 Nevýhody vícefázových asynchronních strojů.....	26
4 Elektromagnetický model vícefázového stroje	27
4.1 Provozní vlastnosti 6-fázového motoru v bezporuchovém stavu	29
4.2 Provozní vlastnosti 6-fázového motoru při poruše 1 fáze.....	34
4.3 Porovnání provozních vlastností.....	40
Závěr	45
Literatura	45

Seznam obrázků

2.1	Rozdělení synchronních strojů	7
2.2	Obrázek motoru TM SUMO HD	8
2.3	Obrázek motoru od GE power conversion	10
3.1	Konfigurace vinutí: (a) dvojitě třífázové vinutí, (b) symetrické vinutí, (c) asymetrické vinutí	11
3.2	Konfigurace vinutí: (a) hvězda, (b) pentagon, (c) pentakl	12
3.3	Uložení vinutí v drážkách: (a) pětifázové vinutí, (b) sedmifázové vinutí	13
3.4	Zapojení vinutí hvězda/pentagon	14
3.5	Zapojení vinutí: (a) dvojitě třífázové vinutí, (b) symetrické vinutí, (c) asymetrické vinutí	14
3.6	Tok výkonu v asynchronním motoru.	15
3.7	Poruchy na výkonové části měniče a statoru motoru	18
3.8	Schéma 3-fázového tříúrovňového měniče	23
3.9	Schéma 9-fázového dvouúrovňového měniče.	24
4.1	Model 3-fázového asynchronního motoru	27
4.2	Model 6-fázového asynchronního motoru	28
4.3	Rozložení vinutí 6-fázového motoru	29
4.4	Sycení 6-fázového motoru při jmenovitém zatížení	30
4.5	Průběhy fázových proudů	31
4.6	Harmonické spektrum fáze B	32
4.7	Momentová charakteristika	33
4.8	Zatěžovací charakteristika	33
4.9	Momentová pulzace	34
4.10	Sycení 6-fázového motoru při poruše	35
4.11	Průběhy proudů při poruše 1 fáze	36
4.12	Harmonické spektrum fáze B při poruše 1 fáze	37
4.13	Momentová charakteristika při poruše 1 fáze	37
4.14	Sycení motoru nakrátko při poruše 1 fáze	38
4.15	Zatěžovací charakteristika při poruše 1 fáze	39
4.16	Momentová pulzace při poruše 1 fáze	39
4.17	Porovnání sycení motoru při jmenovitém zatížení	41

4.18	Porovnání momentových charakteristik	42
4.19	Porovnání sycení motoru při chodu nakrátko	42
4.20	Porovnání proudových charakteristik	43
4.21	Porovnání charakteristik účinníku	43
4.22	Porovnání charakteristik účinnosti	44
4.23	Porovnání momentové pulzace	44

Seznam tabulek

3.1	Procentuální snížení Jouelových ztrát ve statoru se zvyšujícím se počtem fází	16
3.2	Podíl částí motoru na poruše	17
3.3	Podíl částí měniče na poruše	17
3.4	Změna momentu a ztrát motoru při výpadku jedné fáze v závislosti na metodě řízení a počtu fází	19
3.5	Parametry motorů	21
3.6	Ceny součástek 3-fázového frekvenčního měniče	23
3.7	Ceny součástek 9-fázového frekvenčního měniče	24
4.1	Tabulka rozměrových parametrů modelu motoru	28
4.2	Tabulka jmenovitých hodnot modelu motoru	31
4.3	Tabulka THD_i pro jednotlivé fáze	32
4.4	Tabulka pro porovnání jmenovitých hodnot modelu motoru	36
4.5	Tabulka THD_i pro jednotlivé fáze při poruše	36
4.6	Tabulka pro porovnání efektivních hodnot proudů ve fázích	40
4.7	Tabulka pro porovnání THD_i fázových proudů	40
4.8	Tabulka pro porovnání ztrát ve stroji	41

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Veličina	Jednotka
I	Proud	[A]
I_{m1}	Proud pro m_1 fází	[A]
I_{m2}	Proud pro m_2 fází	[A]
k_{d1}^{m1}	Činitel rozlohy vinutí pro m_1 fází	[A]
k_{d2}^{m2}	Činitel rozlohy vinutí pro m_2 fází	[A]
L_m	Magnetizační indukce	[H]
m	Počet fází	[-]
M	Moment	[Nm]
M_{pulse}	Pulzní moment	[Nm]
I_m	Jmenovitý proud ve stavu bez poruchy	[A]
I_2	Proud 2. fáze	[A]
I_3	Proud 3. fáze	[A]
I_4	Proud 4. fáze	[A]
I_5	Proud 5. fáze	[A]
I_6	Proud 6. fáze	[A]
Q_m	Minimální počet drážek statoru	[-]
N	Počet závitů	[-]
N_1	Označení primárního vinutí	[-]
N_2	Označení sekundárního vinutí	[-]
p	Počet pólových dvojic	[-]
P_{SCu}^{m1}	Výkon ve statoru pro m_1 fází	[W]
P_{SCu}^{m2}	Výkon ve statoru pro m_2 fází	[W]
q	Počet drážek na pól a fázi	[-]
Q	Počet drážek statoru	[-]
R	Odpor	[Ω]
s	Skruz	[-]
U_3	Napětí odpovídající 3-f	[V]
U_9	Napětí odpovídající 9-f	[V]
U_{DC}	Napětí stejnosměrného obvodu	[V]
U_f	Fázové napětí	[V]
v	Označení prostorových harmonických	[-]

Značka	Veličina	Jednotka
δ	Označení vzduchové mezery	[-]
μ	Označení prostorových harmonických	[-]
ω	Elektrická úhlová rychlost	[rad · s ⁻¹]
t	Čas	[s]
U_A	Fázové napětí fáze A	[V]
U_B	Fázové napětí fáze B	[V]
U_C	Fázové napětí fáze C	[V]
U_D	Fázové napětí fáze D	[V]
U_E	Fázové napětí fáze E	[V]
U_F	Fázové napětí fáze F	[V]
THD_i	Celkové harmonické zkreslení proudu	[%]
I_{h2}	2. harmonická	[A]
I_{h3}	3. harmonická	[A]
I_{h4}	4. harmonická	[A]
I_{hn}	Harmonická n-tého řádu	[A]

1 Úvod

Se současným vývojem elektromobility, elektrifikace transportu a požadavky na náhradu většiny mechanických systémů za elektrické bude při určitých aplikacích kladen důraz na spolehlivost a efektivitu strojů. V tom případě jsou řešením vícefázové stroje. V dnešní době jsou již používány vícefázové synchronní stroje s permanentními magnety, ale s rostoucí cenou vzácných zemin na výrobu permanentních magnetů a jejich špatnou dostupností je opět proječován zájem o asynchronní stroje, které jsou levnější, jednoduché a bezúdržbové.

Tato bakalářská práce čerpá z [1] a navazuje na téma vícefázových asynchronních strojů, změně jejich parametrů a charakteristik při poruše 1 fáze. V první části bakalářské práce je provedena rešerše na pole působnosti a využití vícefázových strojů.

Druhá část práce je věnována aspektům spojeným s vícefázovými indukčními stroji. Jsou probrány možnosti a způsoby zapojení vinutí pro nejvíce používané 5-fázové a 6-fázové indukční stroje. Dále je probrán vliv vyššího počtu fází na jednotlivé ztráty stroje. Je probráno chování motoru v poruchovém stavu. Také je probrán vliv vyššího počtu fází na cenu motoru a frekvenčního měniče. Jako poslední jsou zmíněny vyšší harmonické, které se v motoru objevují, je popsán jejich negativní vliv, ale i jejich možné využití. Na konci této kapitoly jsou sepsány zjištěné výhody a nevýhody použití vícefázových indukčních motorů.

V poslední kapitole jsou prováděny analýzy na modelu 6-fázového stroje bez poruchy a s poruchou 1 fáze. Pro vykonání analýz byl použit program Ansys Maxwell na školním Pc. Jsou provedeny simulace pro zhotovení charakteristik asynchronního stroje a následně jejich analyzování. Výsledky analýz jsou poté porovnány pro oba stavy a popsány jejich změny.

2 Současný stav poznání vícefázových motorů

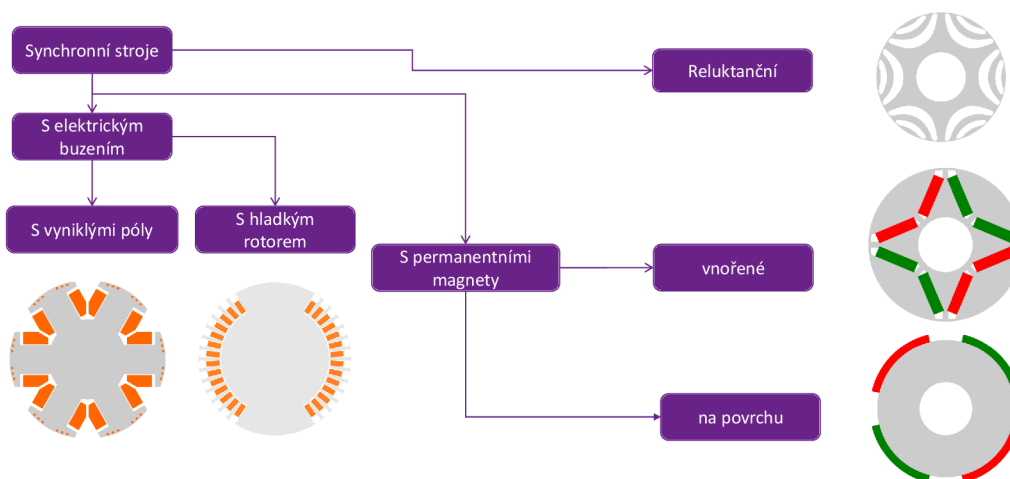
2.1 Historie použití vícefázových strojů

Jak je popsáno v [2], vícefázové stroje jsou nám známé již od 20. let minulého století. V té době byly třífázové generátory výkonově omezeny z důvodu proudového limitu vypínačů. Řešením tohoto problému byl šestifázový generátor. Zvýšením počtu fází na dvojnásobek se proud každou fází zmenšil na polovinu. Nicméně vývoj vícefázových strojů se s lepšími vypínači výrazně snížil. V 60. letech opět upoutaly pozornost díky masivnímu rozvoji ve výkonové elektronice. Avšak až do 90. let bylo jejich uplatnění spíše raritou, kdy se využívaly jen ve vyjimečných aplikacích. Se začátkem 21. století získaly díky svým vlastnostem velké uplatnění v ložní dopravě.

V posledních letech se k vícefázovým strojům zpracovává spousta studií ohledně jejich oblasti využití, výhod, řízení a chování stroje při poruše a předpokládá se v mnoha aplikacích přechod z třífázových strojů na již zmíněné vícefázové.

2.2 Synchronní stroje

Synchronní stroje jsou obecným názvem elektrických strojů na střídavé napětí, jejich otáčky odpovídají otáčkám vytvořeného magnetického pole statoru. Synchronní stroje se dělí podle typu buzení, konstrukce a principu činnosti. Základní rozdělení je znázorněno na obr. 2.1. Synchronní stroje je také možné rozdělit podle počtu fází na 3-fázové a vícefázové.

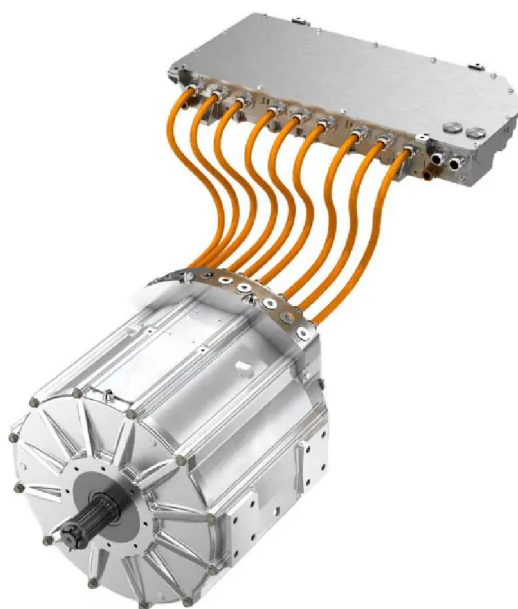


Obr. 2.1: Rozdělení synchronních strojů, převzato z [3].

Synchronní stroje s permanentními magnety (PMSM)

Jejich buzení je tvořeno permanentními magnety ze vzácných zemin. Magnety jsou uloženy v rotorových drážkách, a nebo uloženy na povrchu rotoru. Ze všech typů synchronních strojů i obecně elektrických strojů dosahují nejlepších parametrů, které jsou ovšem podmíněny vysokou cenou stroje. Obecně o nich platí, že mají vysokou účinnost, velký měrný výkon, a dobrý účinník. Jejich řízení je poměrně jednoduché, a proto jsou i velice rozšířené.

Příkladem vícefázových synchronních strojů s permanentními magnety a hladkým rotorem je TM SUMO HD od společnosti jménem Dana TM4 [4]. Je to devíti-fázový motor, který umí pracovat ve všech čtyřech kvadrantech a je určen pro komerční aplikace v automobilové nákladní dopravě.



Obr. 2.2: Obrázek motoru TM SUMO HD ze stránek [4].

Dalším vyráběným motorem je HVSM285 od společnosti Aselsan [5]. Je to devíti-fázový motor, taktéž schopný pracovat ve čtyřech kvadrantech, určený pro použití v hybridních automobilech.

V posledních letech bylo zveřejněno mnoho studií na vícefázové synchronní stroje pro různá použití. Jedna ze studií [6] se zabývala 5-fázovým motorem s různými konfiguracemi vinutí. Motor by sloužil jako hlavní pohon pro plně elektrická a hybridní vozidla. Jeho výhodou by bylo široké rozmezí otáček bez velkého odbuzení při vysokých otáčkách.

Vícefázové motory by mohly najít uplatnění i ve spalovacích vozidlech jako startéry

a alternátory. Například v [7] ve spolupráci s firmou Valeo vyvíjí motor na 12V pro spalovací motory, který by při startu spalovacího motoru fungoval jako startér a poté jako alternátor. Tento motor má 7 fází, přičemž jsou požadavky na velký moment v motorickém stavu a na velikost výstupního napětí v generátorickém stavu.

Jednou z dalších oblastí využití je letecká doprava, kde jsou kladeny velké požadavky na spolehlivost, odolnost a velký měrný výkon motoru. Použity by mohly být jako hlavní pohon letadla při pohybu na letišti, díky čemuž by se pro pohyb na ranveji nepoužívaly auta nebo vlastní spalovací motory letadla. To by snížilo spotřebu paliva a opotřebení brzd. Dle [8] by motory byly vestavěné v kole a měly 2x3 fáze zapojené do hvězdy. Pro tento účel musí být mechanicky velice odolné, kvůli velkým silám působícím při přistávání letadla. Musí též odolat velkým výkyvům teplot a pracovat s mnohonásobně vyššími otáčkami, než jsou jmenovité, jelikož při přistání jsou kola roztočena dosednutím letadla na přistávací plochu.

Jak bylo již zmíněno, své využití mají i v lodní dopravě, kde mohou být využity jako hlavní lodní pohon, nebo jako generátor pro zajištění elektrické energie na lodi [9].

Další využití by tyto stroje mohly najít i v energetice. Z důvodu špatné servisovatelnosti větrných elektráren by bylo výhodné použít vícefázový generátor. Tyto generátory jsou schopny generovat elektrickou energii i při poruše či výpadku jedné a více fází. Tímto tématem se zabývá studie [10], která navrhovala 9-fázový generátor s přímým pohonem, tz. bez převodovky a požadovaným výkonem 5MW. Vinutí generátoru by bylo koncentrované kvůli snížení výrobní ceny. Tento typ vinutí by u 3-fázového generátoru nebyl možný z důvodu indukce vyšších harmonických.

Reluktanční stroje

Reluktanční stroje jsou zajímavé tím, že jako jediné nemají buzený rotor. Základním principem reluktančního stroje je silové působení magnetického pole dosažené změnou magnetického odporu (reluktance) stroje. Jsou jednoduché na výrobu, spolehlivé a levné. Mají dobrou účinnost, dobrou tepelnou odolnost a velký záběrný moment.

Tyto vlastnosti jsou dobře použitelné v letecké dopravě, kde se veškeré mechanické a hydraulické pohony mění za elektrické. V [11] se porovnávaly čtyř, pěti a šesti-fázové reluktanční motory pro pohon palivové pumpy. Z navržených motorů byl vybrán čtyř-fázový i přesto, že šesti-fázový motor je spolehlivější. Naopak čtyřfázový motor měl vyšší účinnost a menší velikost, která byla zásadním faktorem při rozhodování.

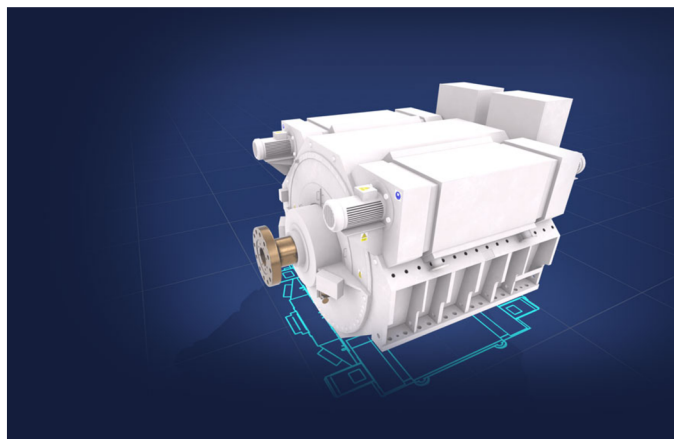
2.3 Asynchronní stroje

Asynchronní stroje fungují na principu elektromagnetické indukce, kdy mění se magnetické pole vytvořené statorem naindukuje v rotoru napětí. Vytvořený proud následně interaguje s magnetickým polem a vytvoří moment. Aby se v rotoru indukovalo napětí

a motor mohl fungovat, musí být otáčky rotoru a magnetického pole statoru rozdílné. Toto zpoždění rotoru popisuje skluz s . Z tohoto důvodu se nazývají asynchronní stroje. Obecně je lze rozdělit podle konstrukce rotoru na stroje s vinutým rotorem a klecí nakrátko. Dále je lze rozdělit podle počtu fází na 1-fázové, 3-fázové a vícefázové. Jsou všeobecně známé pro svoji jednoduchost, bezúdržbovost a spolehlivost, ovšem nevýhodou bývá oproti synchronním strojům horší účinnost a účinník. Jsou využívány hlavně v průmyslu, ale i v malých spotřebičích.

V posledních letech se s rostoucí cenou vzácných zemin používaných k výrobě magnetů (např. neodym) a následným zvýšením ceny PMSM spekuluje o jejich nahrazení asynchronními stroji. Především se o tom mluví v e-mobilitě, kde se používají hlavně PMSM, ale se zvětšujícím se přechodem ze spalovacích automobilů na elektromobily je pro zlepšení jejich dostupnosti nutnost snížit jejich cenu. Ta je závislá především na bateriích, motoru a s ním spojenými komponenty.

Vícefázové asynchronní stroje, jak již bylo zmíněno výše, mají své uplatnění v lodní dopravě. Příkladem jsou motory vyráběné značkou GE power conversion. Ty vyrábí motory o výkonech od 5MW do 40MW s možným výkonovým přetížením až na 80MW a s otáčkovým rozmezím od 0 až 200 otáček za minutu.



Obr. 2.3: Obrázek motoru od GE power conversion, převzato ze stránek [12].

Podle [13] by se mohly asynchronní vícefázové stroje uplatnit i v mild-hybridních automobilech. Tyto automobily mají jako hlavní pohon spalovací motor a asynchronní stroj by sloužil jako malý generátor při brždění k rekuperaci do malé 0,5 až 1kWh baterie. Při potřebě rychlé akcelerace by sloužil naopak jako pomocný motor. Motor by měl jmenovitý výkon mezi 10 až 15kW a jmenovité napětí 48V místo tradičně používaných 12V. Důvodem je snížení velikosti proudu a tloušťky kabelů. Celkově se tak sníží spotřeba paliva a zvýší účinnost provozu automobilu.

3 Aspekty spojené s vícefázovými asynchronními stroji, jejich přednosti a nevýhody

3.1 Vliv uspořádání a zapojení vinutí

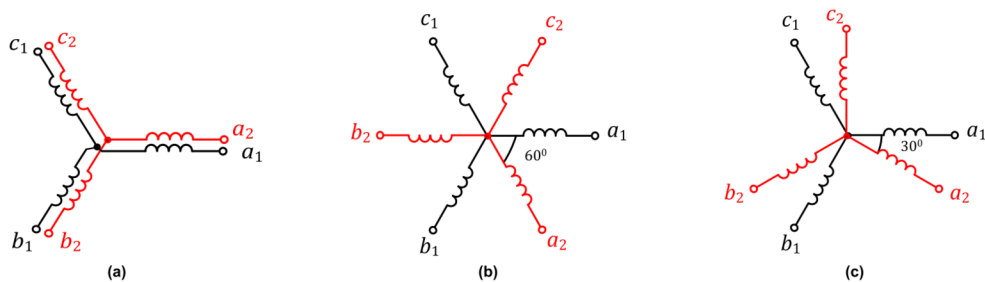
Jak zmiňuje [14], návrh vícefázového vinutí zahrnuje přiřazení cívek ve statorových drážkách k jednotlivým fázím, návrh připojení cívky na fázi a mezi fázemi, výpočet počtu závitů cívek a tloušťky vodiče. Konfigurace vícefázového vinutí se dělí na jednovrstvé a dvouvrstvé vinutí s podrobnějším rozdělením podle prostorového úhlu mezi fázemi. Rozdělení je znázorněno na obr. 3.1, kde je jako příklad vinutí 6-fázového motoru. S vyšším počtem fází získáváme i více možností, jak vinutí zapojit. U strojů s lichým počtem fází lze podle [15] celkový počet možných kombinací vinutí vypočítat jako

$$\frac{m + 1}{2}, \quad (3.1)$$

kde m je počet fází, a u strojů se sudým počtem fází lze celkový počet možných kombinací vinutí vypočítat jako

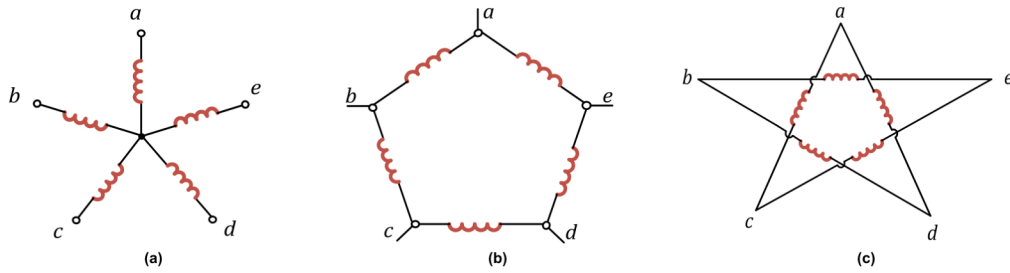
$$\frac{m}{2}. \quad (3.2)$$

Základní kombinace jsou na obr. 3.2, kde je jako příklad znázorněno vinutí 5-fázového motoru. Různými kombinacemi vinutí získává motor jiné vlastnosti. Způsoby zapojení vinutí mají vliv na chování motoru v poruchovém stavu (výpadek, zkrat jedné a více fází), rozložení magnetického toku a velikost vyšších harmonických, které mají za následek hluk, momentové kmity a zvýšení ztrát.



Obr. 3.1: Konfigurace vinutí: (a) dvojitě třífázové vinutí, (b) symetrické vinutí, (c) asymetrické vinutí, převzato z [14].

Obecně platí, že motory s prvočíselným počtem fází se vinou jednovrstvě, mají lepší poměr momentu/proudu a dobrou schopnost odolat poruchám. Motory s mnohonásobným třífázovým vinutím se většinou vinou dvouvrstvě. Mají výhodu v podobě možnosti využívání 3-fázových měničů a přechod na jejich výrobu je jednoduchý,



Obr. 3.2: Konfigurace vinutí: (a) hvězda, (b) pentagon, (c) pentakl, převzato z [14].

jelikož se na jejich konstrukci kromě vinutí od 3-fázových motorů nic nemění.

Jednovrstvé vinutí s prvočíselným počtem fází

Při návrhu konfigurací jednovrstvého vinutí vícefázového indukčního motoru s prvočíselným počtem fází je obtížné stanovit počet drážek na pól a fázi, který se spočítá podle vzorce:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m}, \quad (3.3)$$

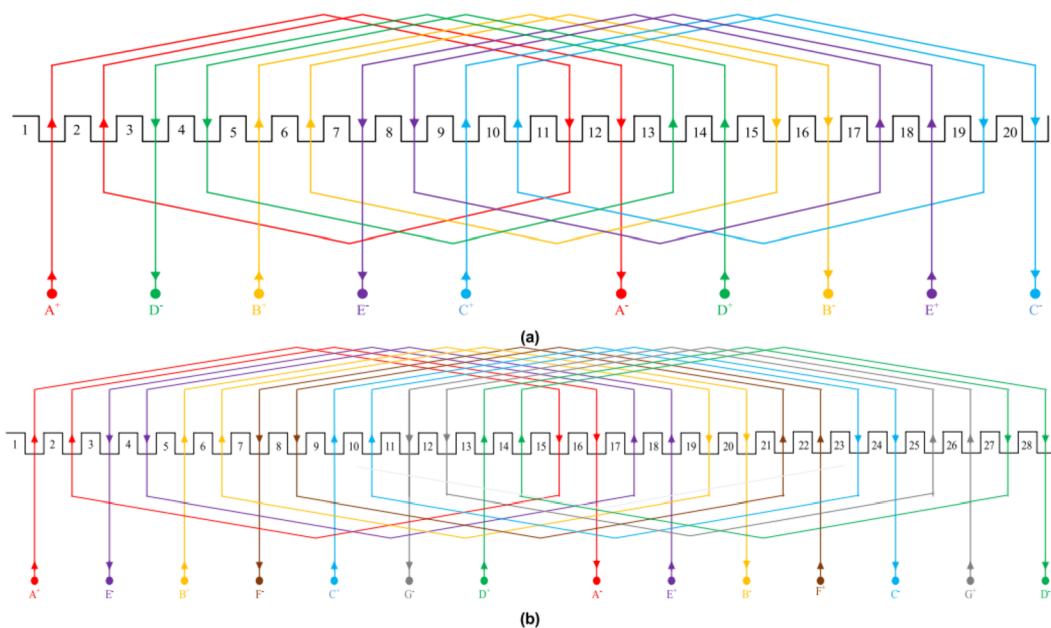
kde Q je počet drážek statoru, p je počet pólových dvojic a m počet fází.

Optimálním počtem drážek na pól a fázi pro 5-ti a 7-fázové indukční motory je $q=2$. Nicméně pro jedenáctifázové motory je preferovanější $q=1$. Těmto hodnotám odpovídá pro čtyřpólový pětifázový motor počet drážek roven 20 a sedmifázovému motoru 28. Ukázka uložení vinutí v drážkách statoru motoru je znázorněna na obr. 3.3.

Injektáží vyšších harmonických se dá zlepšit tvorba momentu a účinnost stroje. Například injektáží 3. harmonické u 5-fázového asynchronního motoru, 3. a 5. u sedmifázového asynchronního motoru. Tímto tématem se budeme zabývat v další kapitole.

Pětifázové vinutí

Jak již bylo zmíněno výše, u 5-fázového stroje se naskytují tři možnosti zapojení vinutí, které jsou ukázány na obr. 3.2. Tato zapojení se nazývají hvězda, pentagon a pentakl. Podle [16] je v bezporuchovém stavu lepší zapojení do hvězdy, jelikož zapojení do pentagonu má větší ztráty v mědi a celkově horší vlastnosti. Při poruše jedné z fází a řízením otevřenou smyčkou dochází u zapojení do hvězdy k větším rozdílům proudů v jednotlivých fázích než u pentagonu. Navíc jsou při stejném zatěžovacím momentu amplitudy proudů větší, což vede k větším ztrátám a menší účinnosti. Výhodou pentagonu je, že má větší maximální moment. Při řízení optimální regulací proudu je výkonnost zapojení do hvězdy lepší než u pentagonu, co se týče průměrného momentu a rozdílů proudů, ovšem za cenu nižší účinnosti.



Obr. 3.3: Uložení vinutí v drážkách: (a) pětifázové vinutí, (b) sedmifázové vinutí, převzato z [14].

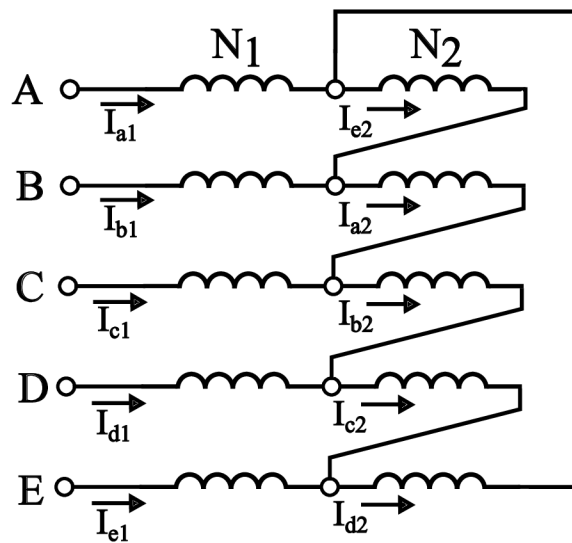
Dále je možné tato vinutí kombinovat tak, že se jednotlivá vinutí rozdělí na dvě, podobně jako u transformátorů. Lze takto sestavit například motor s vinutím hvězda/pentagon, který byl zkoumán v [15] a jeho zapojení lze vidět na obr. 3.4. Výhodou tohoto zapojení je získání stejného rozložení magnetomotorické síly jako 2x5-fázového motoru, který by měl jedno vinutí do hvězdy a druhé do pentagonu za použití pouze jednoho měniče. Ovšem za podmínky, kterou musí splňovat vinutí

$$N_2 = 1,1756 \cdot N_1, \quad (3.4)$$

kde N_2 je vinutí zapojené do pentagonu a N_1 zapojené do hvězdy. Tím se získá stejný objem mědi jako u běžného 5-fázového motoru.

Dvouvrstvé vinutí s mnohonásobným třífázovým vinutím

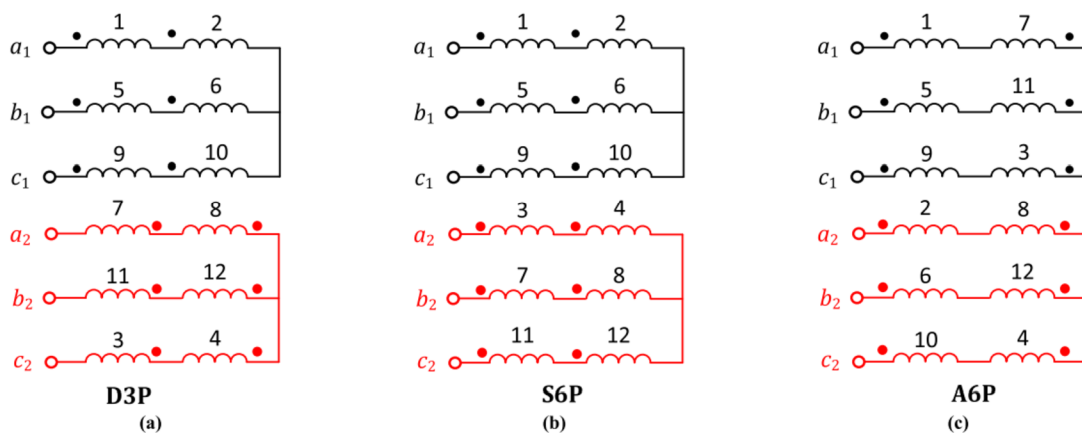
Vícefázové asynchronní motory s mnohonásobným třífázovým vinutím jsou již v literatuře hojně zmiňovány pro různé aplikace. Dvouvrstvé vinutí se používá hlavně pro šesti a dvanácti fázové motory, výjimkou jsou devítifázové motory, které se mohou vinout jako dvouvrstvé, ale spíše se preferují jednovrstvé. Velkou výhodou použití motorů s počtem fází, které jsou násobkem tří, je možnost využití 3-fázových měničů frekvence. Také se tím zjednodušuje výroba těchto strojů, jelikož je možné použít konstrukci 3-fázového motoru. Uvedené faktory zlevňují výrobu a zjednodušují použití, proto jsou tyto motory preferovanější před 5-fázovými.



Obr. 3.4: Zapojení vinutí hvězda/pentagon z [15].

Šestifázové vinutí

V [17] byly zkoumány vlastnosti zapojení dvojitě 3-fázové hvězdy, symetrické hvězdy a asymetrické hvězdy, které lze vidět na obr. 3.1. Výzkum byl prováděn na 12-fázovém motoru, který měl začátky a konce vinutí vyvedeny na svorkovnici. Díky tomu bylo možné vinutí zapojit tak, aby bylo získáno vinutí 6-fázového motoru, které lze vidět na obr. 3.7. Motor má dvojitě vinutí a dvanáct drážek na pólovou dvojici. Z provedených měření vyplývá, že zapojení do dvojitě hvězdy dosahuje nejvyšší účinnosti. Naopak motor se zapojením do asymetrické hvězdy má nejmenší momentovou pulzaci. Oproti



Obr. 3.5: Zapojení vinutí: (a) dvojitě třífázové vinutí, (b) symetrické vinutí, (c) asymetrické vinutí, převzato z [17].

tomu v [18] byly porovnávány motory s dvouvrstevným vinutím do hvězdy s rozdílným krokem. První motor měl cívky vinuté s plným krokem a druhý se zkráceným krokem.

Motor se zkráceným krokem vinutí měl o 22 % vyšší podíl 1. harmonické. To má za následek vyšší účinnost stroje.

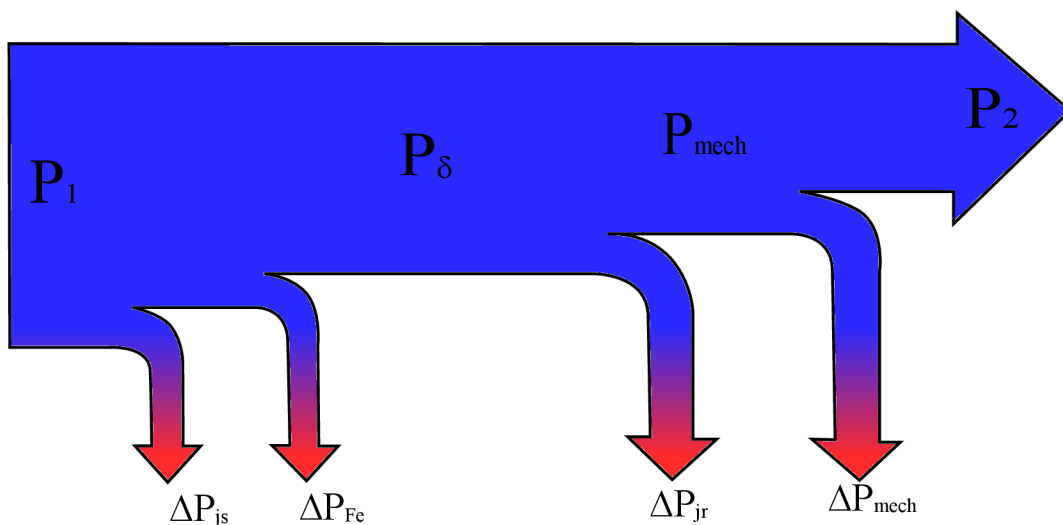
3.2 Vliv vyššího počtu fází na ztráty stroje

Téměř v každé části stroje dochází ke ztrátám. Ty hlavní vznikají ve vinutí, tzv. Jouleovy ztráty, ztráty v železe a mechanické ztráty. Zjednodušené schéma toku výkonu lze vidět na Obr. 3.6. Jouleovy ztráty dále dělíme na ztráty v rotoru ΔP_{jr} a ztráty ve statoru ΔP_{js} . Jouleovy ztráty představují množství elektrické energie, která se promění na teplo. Jejich obecný výpočet je jednoduchý

$$\Delta P = m \cdot I^2 \cdot R, \quad (3.5)$$

kde m je počet fází, I je proud procházející vodičem a R je odpor vodiče.

Ztráty v železe ΔP_{Fe} jsou způsobeny hysterezními ztrátami a ztrátami způsobenými vířivými proudy. Jejich výpočet je poměrně komplikovaný, ale je snadné je určit z měření naprázdno. Mechanické ztráty ΔP_{mech} jsou způsobeny třením a malým úbytkem výkonu pro pohon chladicího ventilátoru.



Obr. 3.6: Tok výkonu v asynchronním motoru.

Jouleovy ztráty ve statorovém vinutí

Podle [19] při úvaze dvou totožných motorů s rozdílným způsobem zapojení cívek pro získání různého počtu fází, ale se stejným momentem a rychlostí. Tak mají stejně velké Jouleovy ztráty v rotoru stejnou velikost magnetického pole ve vzduchové mezeře a stejně velkou složku proudového zatížení statoru, což znamená, že mají stejně velkou

proudovou hustotu J , z čehož vychází následující rovnice

$$I_{m1} \cdot k_{d1}^{m1} = I_{m2} \cdot k_{d1}^{m2}, \quad (3.6)$$

kde I_{m1} je proud statoru, k_{d1}^{m1} je činitel rozlohy vinutí pro m_1 počet fází a I_{m2} je proud statoru, k_{d1}^{m2} je činitel rozlohy vinutí pro m_2 počet fází. Tomu odpovídají statorové Jouleovy ztráty

$$\frac{P_{SCu}^{m1}}{P_{SCu}^{m2}} = \left[\frac{I_{m1}}{I_{m2}} \right]^2 = \left[\frac{k_{d1}^{m1}}{k_{d1}^{m2}} \right]^2, \quad (3.7)$$

kde P_{SCu}^{m1} je výkon ve statoru pro m_1 počet fází a P_{SCu}^{m2} je výkon ve statoru pro m_2 počet fází. Z této rovnice lze následně určit procentuální pokles Jouleových ztrát ve statoru se zvyšujícím se počtem fází, počínaje třemi fázemi. Z tab 3.1 lze vidět, že ztráty s rostoucím počtem fází mírně klesají.

Tab. 3.1: Procentuální snížení Jouleových ztrát ve statoru se zvyšujícím se počtem fází z [20]

Počet fází n	5	6	9	12	15	∞
Procentuální snížení ztrát	5,6 %	6,7 %	7,9 %	8,3 %	8,5 %	8,8 %

Jouleovy ztráty v rotorovém vinutí

Při pokračování v úvaze pro statorové ztráty považujeme konstrukci rotoru za nezávislou na počtu fází. Za nezávislou bude také považována velikost magnetického pole ve vzduchové mezeře, chceme-li plně využít magnetický obvod tvořený železem. Z těchto podmínek vyplývá, že i dominantní část Jouleových ztrát tvořených v rotoru bude nezávislá na počtu fází. Dodatečné Jouleovy ztráty v rotoru vznikají z proudů naindukovaných vlivem vyšších harmonických, které obsahuje magnetické pole ve vzduchové mezeře. Impedance, kterou představuje rotor pro elektromagnetomotorickou sílu, je závislá na skluzu a počtu pólů. Není proto snadné udělat obecné kvantitativní srovnání Jouleových ztrát v rotoru vícefázového a 3-fázového stroje. Je však užitečné vzít v potaz tuto dodatečnou ztrátu způsobenou dvěma zdroji. První je způsobena statorovým buzením a jeho obsahem vyšších harmonických. U 3-fázových strojů se počítají mezi ztrátové toky, které jsou velmi malé. S použitím více fází se velikost těchto polí bude snižovat a zvyšovat jejich počet pólů. Následkem toho je rozumné očekávat snížení těchto již malých ztrát. Druhým zdrojem ztrát je obsah vyšších harmonických v elektromagnetickém poli ze spínání měniče. Tyto ztráty jsou závislé na způsobu řízení stroje a vyšší počet fází by naopak v určitých chvílích mohl tyto ztráty mírně zvýšit.

Ztráty v železe

Ztráty v železe se projevují především ve statoru, který je tvořen vzájemně izolovanými tenkými elektrotechnickými plechy. Při vzniku proměnného magnetického pole ve

statoru začínají v železe vznikat ztráty, které se dělí na hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. Velikost ztrát je závislá na magnetickém zatížení a na frekvenci spínání frekvenčního měniče. Žádný z těchto zdrojů ztrát neovlivní vyšší počet fází.

3.3 Motor v poruchovém stavu

Poruchou, či poruchovým stavem, budeme v této kapitole uvažovat stav, kdy dojde k výpadku, či zkratu fáze. K tomu může dojít v samotném motoru, nebo ve výkonové elektronice, tj. ve frekvenčním měniči. Z praxe je známo, že ve většině případů dojde k poruše na frekvenčním měniči než na motoru. Dle [21] jsou nejčastějším důvodem k servisu asynchronního stroje ložiska, ta ovšem nepředstavují typ poruchy, kterou v této kapitole řešíme. U ostatních částí motoru může dojít již k vážnějším poruchám, které mohou motor vážně poškodit. Takovou nejporuchovější částí motoru je stator, kde může dojít ke zkratu mezi jednotlivými závity vinutí, které tvoří okolo 80% všech statorových poruch. Ty jsou způsobeny slabou izolací, nebo jejím narušením při navíjení stroje. Zbytek poruch je způsoben zkratem mezi konci vinutí jedné fáze, a nebo zkratem mezi dvěma odlišnými fázemi. Všechny popsané možnosti poruch jsou naznačeny na obr. 3.7. Ostatními částmi motoru a jejich poruchami se nebudeme zabývat, jelikož pro nás nemají význam.

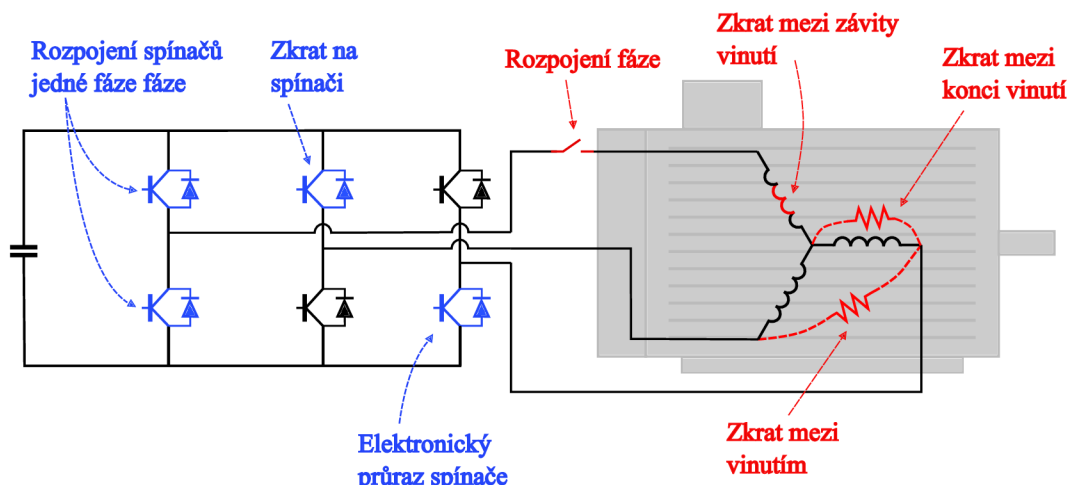
Tab. 3.2: Podíl částí motoru na poruše, převzato z [21]

Stator	Rotor	Ložiska	Ostatní
38 %	10 %	40 %	12 %

Frekvenční měnič se skládá z velkého množství elektronických součástek, které jsou náchylné na poruchy. Dle [22] jsou nejporuchovějšími součástkami kondenzátory, poté polovodičové součástky, pájené spoje a PBC. K poškození dochází z velké většiny působením teplotního namáhání, dále vibracemi a mnohdy i prašností, či vysokou vlhkostí. V této kapitole budeme uvažovat především o poruchách způsobených na polovodičových součástkách ve výkonové části měniče, které jsou na obr. 3.7.

Tab. 3.3: Podíl částí měniče na poruše, převzato z [22]

Kondenzátory	PBC	Polovodičové součástky	Pájené spoje	Ostatní	Konektory
30 %	26 %	23 %	11 %	7 %	3 %



Obr. 3.7: Poruchy na výkonové části měniče a statoru motoru, převzato z [23].

Ztráty motoru při poruše jedné fáze

Při ztrátě jedné fáze dochází v motoru k narušení symetrie magnetického pole a následně ke zvýšení ztrát v motoru. V [20] použili pro řízení motoru při poruše 3 metody řízení a sledovali, jak se mění statorové a rotorové ztráty.

1. Metoda řízení ponechává v neporušených fázích stejnou velikost proudu jako před poruchou, čímž dojde ke zvětšení skluzu pro vyrovnání momentů. Při této metodě se statorové ztráty zmenší o

$$\frac{m-1}{m}, \quad (3.8)$$

kde m je počet fází.

2. Metoda řízení spočívá ve zvětšení proudu o

$$\sqrt{\frac{m}{m-1}}. \quad (3.9)$$

To zapříčiní, že statorové ztráty zůstanou stejné jako před poruchou.

3. Metoda řízení zvětší proud o

$$\frac{m}{m-1}, \quad (3.10)$$

aby vyrovnala moment a rotorové ztráty na stejnou hodnotu jako před poruchou. Při této metodě se o stejnou hodnotu zvětší i statorové ztráty. Vliv těchto metod závisí na provozním bodu a charakteristice zátěže. Hodnoty v tab 3.4 jsou počítány pro ventilátor, kde je moment úměrný kvadrátu rychlosti.

Při výpočtu nebyly zahrnuty přídatné ztráty v rotoru, které jsou způsobeny vyššími harmonickými vytvořenými nesymetrií magnetického pole statoru. Nicméně tabulka potvrzuje, že s vyšším počtem fází se vliv poruchy fáze zmenšuje.

Tab. 3.4: Změna momentu a ztrát motoru při výpadku jedné fáze v závislosti na metodě řízení a počtu fází, převzato z [20]

Počet fází	Metoda řízení	Skuz s	Moment M	ΔP_{js}	ΔP_{jr}
6	1	0,01427	-1,29%	-16,7%	42,7%
6	2	0,01195	-0,59%	0,0%	19,5%
6	3	0,01000	0,00%	20%	0,0%
9	1	0,01259	-0,78%	-11,1%	25,9%
9	2	0,01122	-0,37%	0,0%	12,2%
9	3	0,01000	-0,00%	15,5%	0,0%
12	1	0,01186	-0,56%	-8,3%	18,6%
12	2	0,01089	-0,27%	0,0%	8,9%
12	3	0,01000	0,00%	9,1%	0,0%
15	1	0,01145	-0,44%	-6,7%	14,5%
15	2	0,01070	-0,21%	0,0%	7,0%
15	3	0,01000	0,00%	7,1%	0,0%

Momentová pulzace

U asynchronních strojů je dle [24] a [25] momentová pulzace závislá na prostorových a časových harmonických složkách. Prostorové harmonické složky jsou závislé na konstrukci stroje, jako jsou otvory drážek, geometrie drážek a konstrukce vinutí. Časová harmonická složka je závislá na kvalitě napájecího napětí, přesněji na kvalitě jeho průběhu. Vyšší harmonické složky nám ve stroji tvoří parazitní moment, kvůli kterému dochází ke zvlnění výsledného momentu stroje.

Při poruše jedné fáze se vlivem nesymetrie magnetického pole momentová pulzace zvětší. Její velikost lze podle [26] vypočítat následovně.

$$M_{puls} = \frac{M}{m \cdot \cos \varphi}, \quad (3.11)$$

kde M je moment, m je počet fází a $\cos \varphi$ je účinník. Při ztrátě dvou a více fází také záleží na relativní prostorové poloze ztracených fází. Kompenzací momentové pulzace při ztrátě jedné fáze se zabývala studie [27], kde se zkoumaly možnosti řízení vícefázových strojů zapojených do hvězdy s vyvedenou nulou, a nebo bez. Obecně platí, že pokud chceme řídit asynchronní motor, tak se napájí z napěťového zdroje, ovšem při kompenzaci momentové pulzace bez jedné fáze se přechází na proudový zdroj, tj. frekvenční měnič, který dává takové napětí, aby dosáhl co nejpřesnějšího požadovaného průběhu proudu. Při takovémto řízení se dá i snadněji zmenšit velikost Joulových ztrát, které při poruše vzrostly. Na zvoleném způsobu závisí velikost proudu zbylými fázemi, účinnost kompenzace a i výše zmíněné ztráty. Například pro 5-fázový stroj byly zjištěny dva způsoby kompenzace momentové charakteristiky, kdy první způsob napájí motor níže

uvedenými proudy, kdy

$$I_2 = 1.176 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - 7\pi/10), \quad (3.12)$$

$$I_3 = 1.902 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - 9\pi/10), \quad (3.13)$$

$$I_4 = 1.902 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 9\pi/10), \quad (3.14)$$

$$I_5 = 1.176 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 7\pi/10). \quad (3.15)$$

Problémem toho způsobu řízení je zvětšení napájecího proudu dvou fází o 1,9 násobku nominální hodnoty, tudíž při tomto řízení se nijak nezmenší Joulovy ztráty. Druhý způsob řízení spočívá ve zvětšení amplitudy napájecích proudů o 1,38 násobku jmenovité hodnoty. Dále dojde k rovnoměrnějšímu rozložení magnetického pole. Napájecí proudy jsou následující,

$$I_2 = 1.38 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - \pi/5), \quad (3.16)$$

$$I_3 = 1.38 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - 4\pi/5), \quad (3.17)$$

$$I_4 = 1.38 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 4\pi/5), \quad (3.18)$$

$$I_5 = 1.38 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \pi/5). \quad (3.19)$$

Dále se studie zabývala 7-fázovými stroji, 4-fázovými stroji a také 6-fázovými stroji se symetrickým rozložením fází a výše zmíněnou dvojitou hvězdou. U 6-fázového motoru se symetrickou hvězdou jsou 2 možnosti řízení. První možnost využívá vyvedené nuly a napájí jednotlivá vinutí 1,268 násobkem jmenovitého proudu. Nevýhodou ovšem je proud tekoucí nulou o velikosti 2,2 násobku jmenovité hodnoty. Druhá možnost řízení funguje bez vyvedené nuly a napájí jednotlivá vinutí 1,297 násobkem jmenovité hodnoty. Novější studie [28] se také zabývala možnostmi kompenzace momentové pulzace u 6-fázových motorů se symetrickým vinutím. Ta zmiňuje 3 metody řízení i s procentuálním poklesem momentové pulzace. První 2 metody spočívají ve změně fázového posuvu a amplitudy napájecích proudů. Třetí metoda spočívá ve vektorovém řízení v podmnožině $\alpha\beta$.

Při použití první metody se změni fázový posuv dvou fází, zbylé zůstanou zachovány. Pro dosažení stejného momentu se také zvýší jejich amplituda o 1,27 násobek I_m . Napájecí proudy mají fázový posuv následující, kdy

$$I_2 = 1.27 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - \pi/3), \quad (3.20)$$

$$I_3 = 1.27 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - 5\pi/6), \quad (3.21)$$

$$I_4 = 1.27 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - \pi), \quad (3.22)$$

$$I_5 = 1.27 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 5\pi/6), \quad (3.23)$$

$$I_6 = 1.27 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \pi/3). \quad (3.24)$$

Druhá metoda spočívá ve změně pouze jedné fáze. Ta je posunuta o 180° . Amplitudy všech fází jsou beze změny. Rovnice napájecích proudů jsou následující:

$$I_2 = I_m \cdot \sin(\omega t - \pi/3), \quad (3.25)$$

$$I_3 = -I_m \cdot \sin(\omega t), \quad (3.26)$$

$$I_4 = I_m \cdot \sin(\omega t - \pi), \quad (3.27)$$

$$I_5 = I_m \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3), \quad (3.28)$$

$$I_6 = I_m \cdot \sin(\omega t + \pi/3). \quad (3.29)$$

Při využití první zmíněné metody se momentová pulzace sníží o 80%. Druhá metoda momentovou pulzaci sníží o 70% a třetí metoda je nejučinnější, ta sníží momentovou pulzaci o 90%.

3.4 Vliv vyššího počtu fází na cenu motoru a měniče

V [29] je toto téma probráno v souvislosti s přechodem z 3-fázového pohonu na 9-fázový v továrně na výrobu ocelových tyčí. Důvodem je, že při poruše a nutném odstavení výrobní linky továrna ztrácí 1,7 miliónů dolarů za den. Z toho důvodu je zvolen přechod na vícefázový pohon, který může zajistit neustálý chod výrobní linky a případnou opravu dopředu naplánovat.

Cena motoru

Byl zvolen motor s vyšším počtem fází, díky čemuž se 3x snížilo napájecí napětí při zachování stejného výkonu a proudu fází.

Tab. 3.5: Parametry motorů, převzato z [29]

	3-fázový motor	9-fázový motor
Výkon	4,9 MW	4,9 MW
Jmenovité napětí	3000 V	1000 V
Jmenovitý proud	1175 A	1175 A
Jmenovité otáčky	1080 ot/min	1080 ot/min
Počet pólů	6	6
Napájecí frekvence	60 Hz	60 Hz

Se sníženým napájecím napětím je možné ušetřit na izolaci vodičů ve vinutí a dosáhnout i lepšího plnění drážek ve statoru. Pro výpočet potřebného množství drátu na vinutí a

následného stanovení jeho vlivu na cenu je potřeba dopočítat další aspekty. Při zachování počtu pólů a pravidelného vinutí vypočítáme minimální počet drážek pro 3-fázový motor

$$Q_m = m \cdot p = 3 \cdot 6 = 18. \quad (3.30)$$

Pro 9-fázový motor vychází počet drážek následovně:

$$Q_m = m \cdot p = 9 \cdot 6 = 54, \quad (3.31)$$

kde Q_m je počet drážek, m je počet fází a p je počet pólových dvojic. U motoru se předpokládá použití rozloženého vinutí pro potlačení vyšších harmonických. Množství drátu si můžeme nepřímo odvodit z proudu tekoucího jednou fází, z počtu závitů vinutí, počtu fází a počtu pólů. Jelikož je proud fází u obou motorů stejný a počet závitů u každé fáze konstantní, drátu by bylo potřeba 3x větší množství. Nicméně snížení napětí a zvýšený počet fází nám dovolí zmenšit počet závitů. Se zvýšeným počtem fází je pro dosažení stejné magnetizační indukčnosti potřeba menší počet závitů podle rovnice

$$L_m \propto m \cdot N^2, \quad (3.32)$$

kde L_m je magnetizační indukčnost, m je počet fází a N je počet závitů. Výsledkem je snížení počtu závitů o $\sqrt{3}$. Při úvaze poměru v následující rovnici

$$\frac{U_3}{m_3^2} = \frac{U_9}{m_9^2}, \quad (3.33)$$

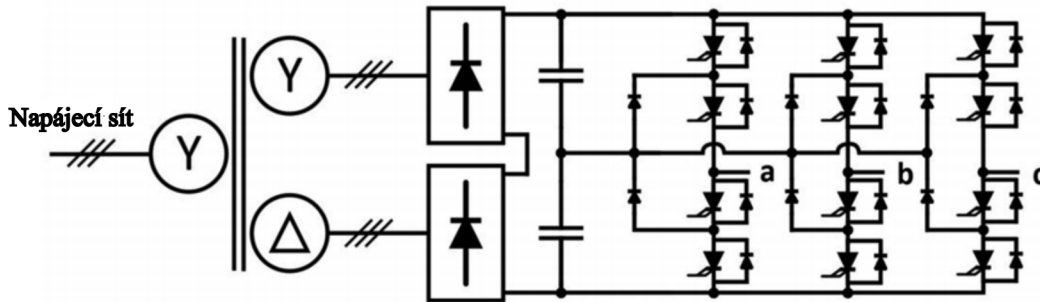
kde U je napětí, m je počet fází, se počet závitů opět sníží o $\sqrt{3}$. Výsledkem je, že se celkový počet závitů sníží o 3. Z těchto úvah v závěru vyplývá, že celkový počet závitů je u obou motorů stejný. Celkové množství drátu potřebného pro vinutí motoru bude také stejné. Jediným aspektem, který by se mohl projevit na zvýšení ceny motoru, je vyšší počet drážek a doba potřebná pro navinutí motoru.

Cena frekvenčního měniče

Cena měniče je závislá na použitých polovodičových součástkách, jako jsou diody a tranzistory, ale také na kondenzátorech a cívkách. Cena těchto součástek exponenciálně roste v závislosti na jejich výkonu a jmenovitém napětí, tj. tranzistor s jmenovitým napětím 1200V může dosáhnout až desetinásobku ceny tranzistoru s jmenovitým napětím 600V. To stejné platí i u diod, kondenzátorů a cívek. Cena se také odvíjí podle typu střídače. Například jestli použijeme dvouúrovňový, tříúrovňový, nebo pětiúrovňový měnič frekvence, který je výhodné používat pro velké výkony. Výhodou těchto měničů je zmenšení jmenovitého napětí na součástkách podle počtu úrovní. Také se dosáhne lepšího průběhu a omezení vyšších harmonických. Nevýhodou je použití většího počtu součástek, například pro dvouúrovňový měnič je potřeba dvakrát více

tranzistorů, diod a kondenzátorů než pro jednoúrovňový měnič. Jejich rozdělení a aplikace jsou popsány v [30].

Pro lepší přiblížení dané problematiky navážeme na téma ceny motoru z [29]. Příklad je uveden na výpočtu rozdílu ceny 3-fázového a 9-fázového měniče. Původní 3-fázový měnič, který je zobrazen na obr. 3.8, měl jmenovité napětí 3300V s výkonem 7MV A. Byl



Obr. 3.8: Schéma 3-fázového tříúrovňového měniče, převzato z [29].

tvořen 12-ti pulzním usměrňovačem, který se skládá ze dvou 3-fázových šestipulzních usměrňovačů a výše zmíněným tříúrovňovým střídačem, který se skládá z dvanácti IGCT tyristorů a šesti upínacích diod. Jmenovité napětí jednoho tyristoru je 3300V a maximální hodnota proudu je 2030A. Upínací diody mají jmenovité napětí 2900V s průměrným proudem 1970A. Ceny součástí jsou uvedeny v tab. 3.6. Použitím 9-

Tab. 3.6: Ceny součástí 3-fázového frekvenčního měniče, převzato z [29]

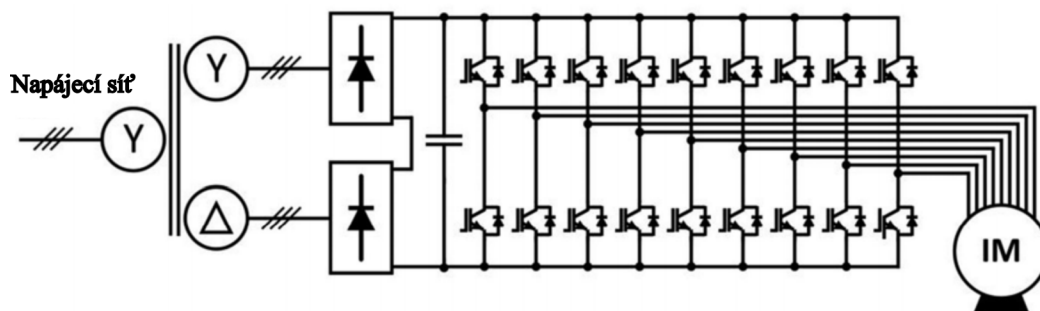
Součástka	počet kusů	cena za kus	výsledná cena
IGCT	12	4 000\$	48 000\$
Upínací diody	6	1 300\$	7 800\$
Usměrňovací diody	12	1 500\$	18 000\$
Celkem			72 800\$

fázového motoru se sníženým napětím můžeme v měničích použít součástky s menším jmenovitým napětím a použít dvouúrovňový střídač. Schéma 9-fázového měniče je na obr. 3.9. Napětí na jedné fázi bude

$$U_f = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 3} = 577V, \quad (3.34)$$

kde U_f je fázové napětí, $\sqrt{3}$ je přepočtení ze sdruženého napětí na fázové a 3 je hodnota, o kolik je snížené napětí z původního. Napětí na DC linku je

$$U_{DC} = \frac{3300 \cdot \sqrt{2}}{3} = 1556V, \quad (3.35)$$



Obr. 3.9: Schéma 9-fázového dvouúrovňového měniče, převzato z [29].

kde $\sqrt{2}$ je přepočítání z efektivní hodnoty na špičkovou hodnotu napětí a 3 je hodnota, o kolik je snižené napětí z původního. Díky sníženému napětí je možné využít ekonomičtějších součástek jako jsou IGBT tranzistory. Po teplotních výpočtech byly vybrány IGBT tranzistory, které se prodávají v modulech se závěrným napětím 2500V a kolektorovým proudem 1500A. Následně byl uvažován stejný princip usměrňovače, tj. 12-ti pulzní usměrňovač. Napětí na diodách je opět 3x menší, ale jelikož je usměrňovač napájen třemi fázemi, proud bude 3x větší. Proto byly zvoleny diody s jmenovitým napětím 1700V a proudem 3600A. Ceny součástek jsou uvedeny v tab 3.7.

Tab. 3.7: Ceny součástek 3-fázového frekvenčního měniče, převzato z [29]

Součástka	počet kusů	cena za kus	výsledná cena
IGBT modul	18	1 600\$	28 800\$
Usměrňovací diody	12	1 500\$	18 000\$
Celkem			46 800\$

Z tabulek lze vidět, že rozdíl cen je poměrně velký, 9-fázový frekvenční měnič je z hlediska výkonových součástek o 26 000\$ levnější než 3-fázový měnič.

3.5 Vliv vyšších harmonických

Jak je popsáno v [25], v každém motoru se vyskytují nějaké nelinearity a parazitní efekty, které bývají spojeny s vyššími harmonickými. Vyšší harmonické způsobují proudovou a momentovou pulzaci, hluk a zvyšují ztráty stroje. Vyšší harmonické jsou také spojeny s počtem drážek na pól a fází. Vlivem toho se u motoru s daným průřezem a vysokým počtem fází vyskytují vyšší harmonické o větších amplitudách než u motoru o stejném průřezu a méně fázích. Tyto harmonické jsou často způsobeny mrtvými časy v pulzně šířkové modulaci, nesymetrií napájecího napětí, sycením magnetického

obvodu, nesinusovým rozložením vinutí, drážkováním plechů a dalšími nesymetriemi. Podle povahy jejich vzniku dělíme tyto harmonické na časové a prostorové, přičemž nelze zanedbat jejich vzájemnou interakci.

Prostorové harmonické

Každý m -fázový asynchronní motor má prostorový posun mezi po sobě jdoucími fázemi roven $2\pi/m$. Statorové vinutí je navrženo co nejvíc sinusově rozložené, jak jen to jde a je napájeno m -fázovými sinusovými proudy. V ideálním případě, kdy uvažujeme počet statorových drážek blížíci se nekonečnu ($Q \mapsto \infty$) a nedojde k saturaci železného jádra, vytvoří vinutí ve vzduchové mezeře sinusové magnetické pole δ . Nicméně v praxi je maximální počet drážek omezen průměrem statoru a v železném jádře stroje vždy dojde k saturaci. Vlivem toho má vzniklé magnetické pole spíše stupňovitý průběh. Ten lze pomocí Fourierovy řady rozložit na vlny s násobkem frekvence základní vlny. Ty se nazývají prostorové harmonické a značí se symbolem v .

Časové harmonické

U běžných 3-fázových průmyslových asynchronních strojů spouštěných ze sítě je významným zdrojem neharmonického napětí především nevyváženost napájení. Vícefázové motory jsou obvykle napájeny z frekvenčních měničů používaných pro snadné a efektivní ovládání stroje. Měniče generují napětí, které má buď obdélníkový, nebo pulzní tvar. Jeho spektrum tedy obsahuje větší počet harmonických μ závislých na zátěži a nastavení pulzně šířkové modulace. Neharmonický zdroj napájení má za následek výše zmíněné momentové pulzy, vibrace, hluk, zvýšené napěťové namáhání izolace a ztráty ve vinutí.

Časových harmonických lze využít i způsobem, kdy je injektujeme do napájecího napětí tak, že získáme větší poměr momentu na ampéru. Dodatečný moment se získá díky skutečnosti, že rozložení toku ve vzduchové mezeře je zploštělé, takže se lze vyhnout saturaci železného jádra pro širší provozní rozsah.

3.6 Výhody vícefázových asynchronních strojů

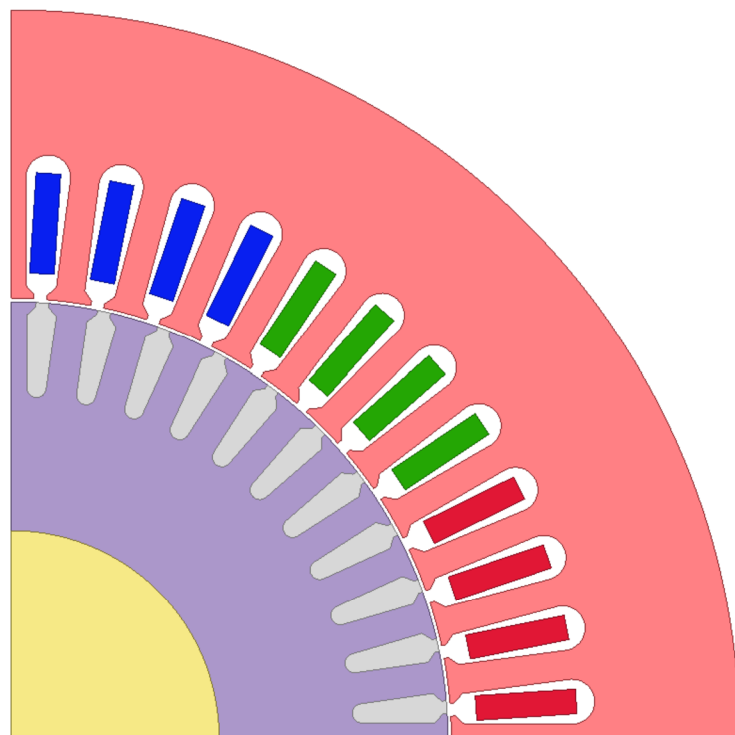
Výhodou vícefázových strojů oproti běžně používaným 3-fázovým je zvýšená spolehlivost, která se zvyšuje s počtem fází. Díky tomu jsou tyto stroje vhodné pro použití v aplikacích s velkými požadavky na nepřetržitý chod stroje a kde je špatná dostupnost v případě nutnosti oprav závad. Díky vyššímu počtu fází jsme schopni snížit jmenovitou hodnotu napětí, či proudu při zachování stejného výkonu a snížit tak náklady na frekvenční měnič. S vyšším počtem fází se naskytuje více možností zapojení vinutí a jejich kombinací a zlepšení účinnosti stroje. Při použití vícefázového stroje s počtem fází, který je násobkem 3, se naskytuje možnost napájení 3-fázovými měniči.

3.7 Nevýhody vícefázových asynchronních strojů

Nevýhodou vícefázových strojů oproti 3-fázovým strojům je mírné navýšení výrobní ceny stroje a složitější řízení. Dále je pro vícefázové stroje s prvočíselným počtem fází potřeba vyrobit frekvenční měnič.

4 Elektromagnetický model vícefázového stroje

V této části bakalářské práce se budeme věnovat vícefázovým asynchronním strojům v oblasti jejich jmenovitého zatížení v bezporuchovém stavu a při poruše 1 fáze. Dále budeme zkoumat k jakým změnám při poruše dojde a jak se změni obecné charakteristiky jako jsou momentová, proudová a zatěžovací. Pro tuto část bakalářské práce je použit čtyřpólový model 3-fázového asynchronního motoru o výkonu $30kW$, který byl vytvořen v programu Ansys Rmxprt. Motor byl poté převeden do programu Ansys Maxwell 2D, jelikož Rmxprt nepodporuje modelování vícefázového stroje. Všechny analýzy a úpravy stroje jsou prováděny v programu Ansys Maxwell. 3-fázový motor má ve statoru uloženo jednovrstvé rozložené vinutí, které je zapojené do Y. Rotor je s klecí nakrátko, tj. v rotoru jsou uloženy hliníkové tyče, které jsou na koncích spojeny zkratovacími kroužky. Stator a rotor jsou sestaveny z plechů M800-50A. Jde o plech s poměrně malou jakostí o tloušťce $0,5mm$, se ztrátami $8W/kg$ při sycení $1,5T$ a frekvenci $50Hz$. Hřídel je zhotovena z oceli. Řez motoru je zobrazen na obr. 4.1.

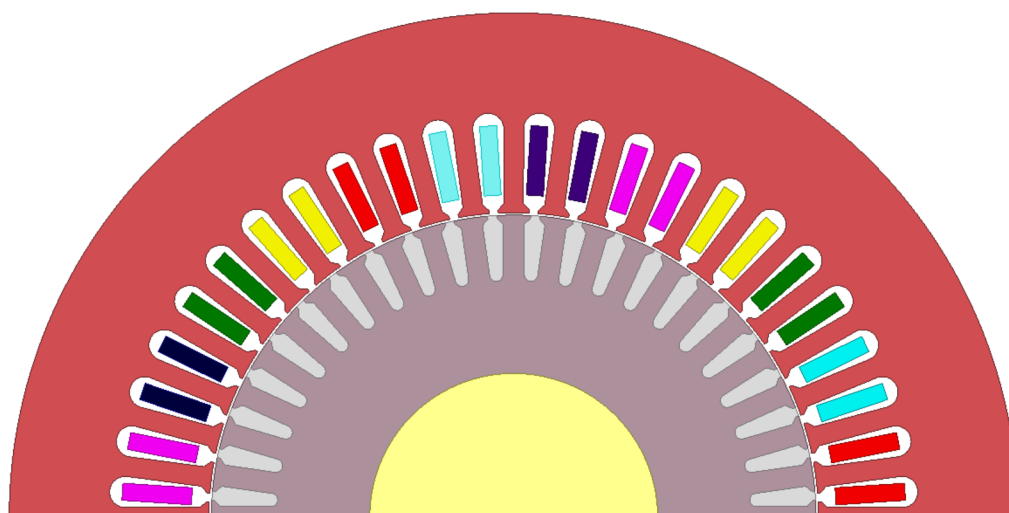


Obr. 4.1: Model 3-fázového asynchronního motoru.

Rozměrové parametry motoru spolu s počtem drážek ve statoru a počtem tyčí v rotoru jsou uvedeny v tab. 4.1. Tento motor byl následně teoreticky převinut na 6-fázový se zachováním typu a zapojením vinutí, počtem pólů a jeho ostatními parametry. Řez 6-fázového motoru je zobrazen na obr. 4.2. Jednotlivá vinutí jsou od sebe pro dobrou orientaci barevně rozlišena. Pro bakalářskou práci byl zvolen 6-fázový motor, jelikož jeho

Tab. 4.1: Tabulka rozměrových parametrů modelu motoru

Parametry Motoru	Hodnoty
Počet drážek statoru	48
Počet drážek na pól a fázi	4
Počet tyčí v rotoru	44
Vnější poloměr statoru	166,85 mm
Vnitřní poloměr statoru	100,8 mm
Vnější poloměr rotoru	100 mm
Vnitřní poloměr rotoru	47,6 mm
Délka vzduchové mezery	0,8 mm
Délka stroje	196,3 mm
Činitel tlumení	0.03706 Nm · sec/rad

**Obr. 4.2:** Model 6-fázového asynchronního motoru.

výskyt v praxi je z počátku implementace vícefázových strojů pravděpodobnější a nej-jednodušší. Z již uvedených druhů 6-fázových motorů byl zvolen typ se symetrickým vinutím zapojeným do hvězdy, který má elektrický úhel mezi jednotlivými fázemi 60° . Při zvyšování počtu fází motoru se zachováním stejného výkonu, je nutné jednu ze základních veličin (proud, napětí) zmenšit. V tomto případě bylo zvoleno snížení proudu, který se s dvojnásobným počtem fází sníží o polovinu. Pro zachování stejného počtu pólů byl vypočítán nový počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 6} = 2. \quad (4.1)$$

Následně byl podle [31] dopočítán počet závitů, odpor a indukčnost statorového vinutí, spolu s odporem a indukčností rotorové klece.

Uložení vinutí ve statoru je zobrazeno na obr.4.3. Jednotlivá vinutí jsou označena písmeny A až F. Dále jsou označeny znaménky + a -, která značí směr vinutí. Vinutí jsou napájeny níže uvedeným fázovým napětím:

$$U_A = \frac{U_{sd} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (4.2)$$

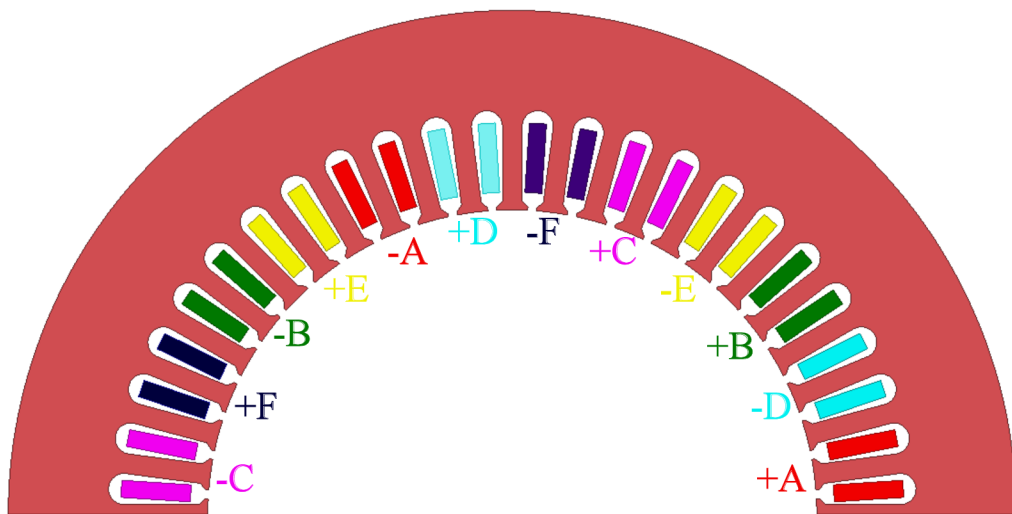
$$U_B = \frac{U_{sd} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{3}), \quad (4.3)$$

$$U_C = \frac{U_{sd} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}), \quad (4.4)$$

$$U_D = \frac{U_{sd} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \pi), \quad (4.5)$$

$$U_E = \frac{U_{sd} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}), \quad (4.6)$$

$$U_F = \frac{U_{sd} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{3}). \quad (4.7)$$

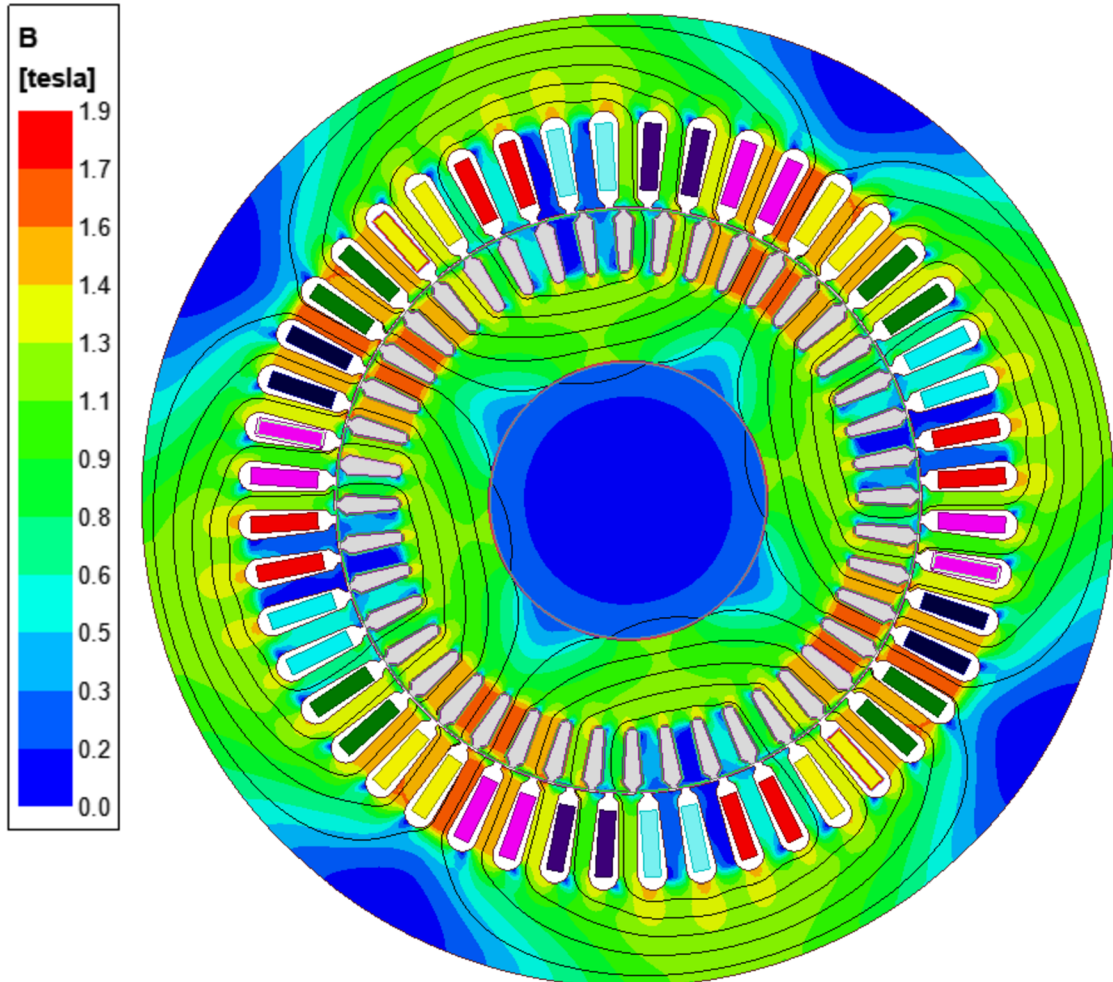


Obr. 4.3: Rozložení vinutí 6-fázového motoru.

4.1 Provozní vlastnosti 6-fázového motoru v bezporuchovém stavu

Model motoru byl analyzován v programu Ansys Maxwell 2D metodou konečných prvků. Pro analýzu jmenovitého zatížení motoru bylo nastaveno 100 vzorků na periodu při napájecí frekvenci 50Hz po dobu $0,5\text{s}$ pro získání hodnot v ustáleném stavu. Pro získání hodnot na sestavení momentové a zatěžovací charakteristiky bylo nastaveno 50

vzorků na periodu po dobu 0,6s. Počet vzorků je nižší z důvodu snížení času výpočtu. Při analýze byly uvažovány Jouleovy ztráty ve vinutí statoru a rotoru, hysterezní a mechanické ztráty. Mechanické ztráty byly vypočítány pomocí činitele tlumení uvedeného v tab. 4.1.



Obr. 4.4: Sycení 6-fázového motoru při jmenovitém zatížení.

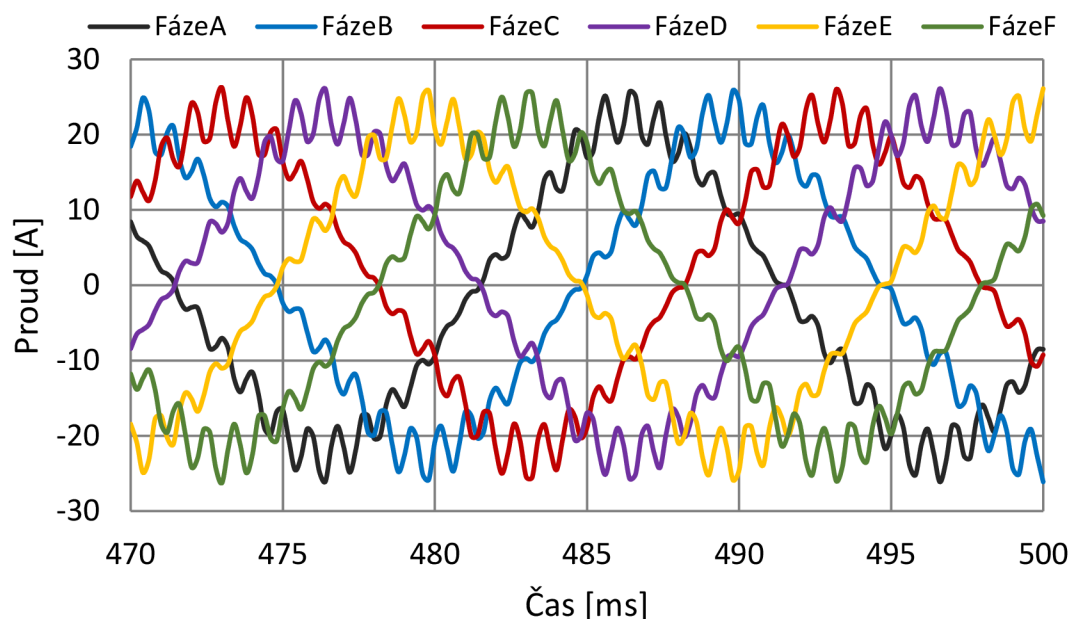
Na obr. 4.4 lze vidět rozložení magnetických siločar v motoru a velikost magnetické indukce při jmenovitém zatížení. Magnetická indukce dosahuje nejvyšší hodnoty ve statorových zubech, kde dochází k lokálnímu přesycení materiálu na hodnotu $1,7T$. Statorové a rotorové Jho se sytí na $1,2T$.

Analýzou byly zjištěny jmenovité hodnoty motoru, které jsou uvedeny v tab. 4.2, kde jsou pro porovnání uvedeny i jmenovité hodnoty původního 3-f motoru. K zásadním změnám v jmenovitých parametrech stroje nedošlo. Účinnost motoru se mírně zvýšila vlivem snížení fázových napájecích proudů, jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole.

Tab. 4.2: Tabulka jmenovitých parametrů modelu motoru

Jmenovité hodnoty Motoru	3-f motor	6-f motor
Výkon	30 kW	30 kW
Efektivní Sdružené napájecí napětí	690 V	690 V
Efektivní proud ve fázi	30,9A	15,1A
Počet pólů	4	4
Frekvence	50 Hz	50 Hz
Otáčky	1477 ot/min	1477 ot/min
Účinnost	0,88	0,9
Účinnost	91,92%	92,37%
Moment	194 Nm	194 Nm

Z analýzy jmenovitých hodnot byly získány průběhy fázových proudů, které jsou zobrazeny na obr. 4.5. Průměrná efektivní hodnota fázových proudů je 15,1A.



Obr. 4.5: Průběhy fázových proudů.

Z průběhů je jasná přítomnost vyšších harmonických. Pro jejich analýzu a výpočet celkového harmonického zkreslení THD_i byl využit program Matlab a Fourierova transformace. Celkové harmonické zkreslení se vyjadřuje v procentech a bylo vypočítáno následovně:

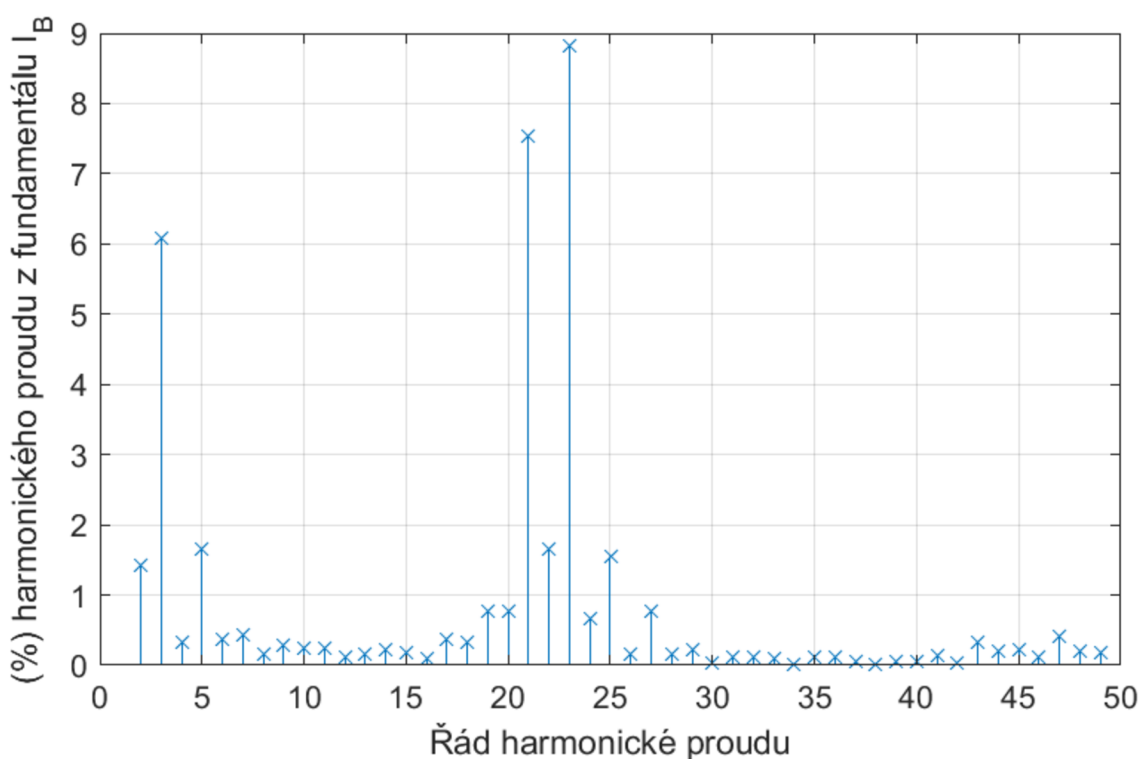
$$THD_i = \frac{\sqrt{I_{h2}^2 + I_{h3}^2 + I_{h4}^2 + \dots + I_{hn}^2}}{I_{h1}} \cdot 100. \quad (4.8)$$

Jelikož jsou proudy symetrické, lze předpokládat, že budou obsahovat stejné řady har-

monických frekvencí o stejné velikosti, a tak se frekvenční spektrum nebude moc lišit. Příklad obsahu vyšších harmonických byl proveden na fázi B, jejíž frekvenční spektrum je na obr. 4.6, jednotlivé harmonické jsou procentuálně vztaženy k 1. harmonické. Z frekvenčního spektra jde vidět, že na zkreslení se nejvíce podílí 3., 21. a 23., mírně také 2., 5., 22. a 25. harmonická. Následně bylo vypočítáno celkové harmonické zkreslení proudu (THD_i), které je uvedeno v tab. 4.3.

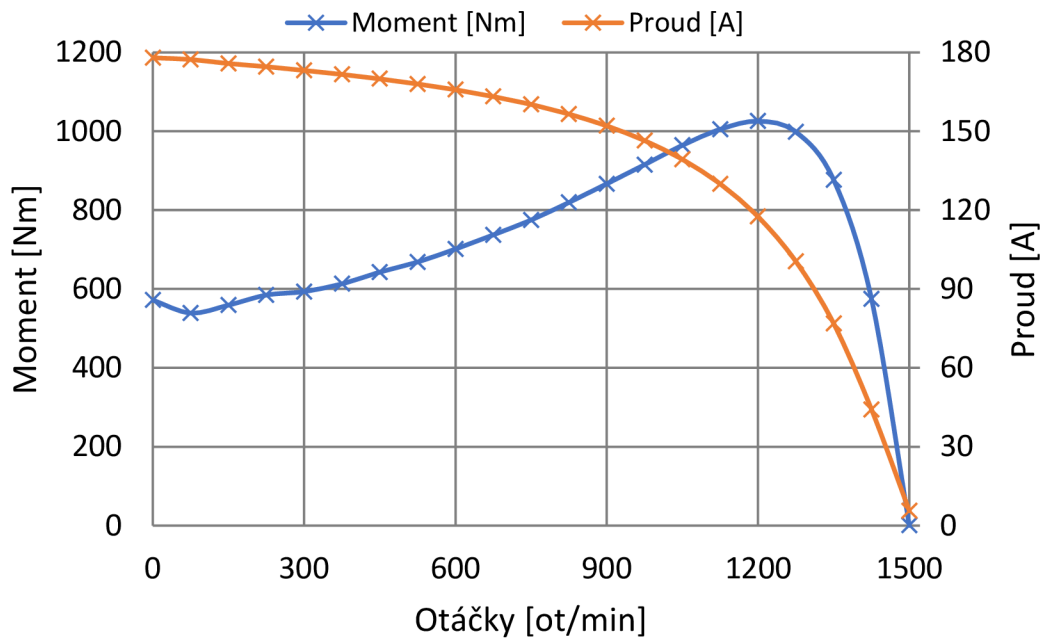
Tab. 4.3: Tabulka celkového harmonického zkreslení

Proudy	I_A	I_B	I_C	I_D	I_E	I_F
THD_i	13,56%	13,63%	13,76%	13,56%	13,63%	13,76%

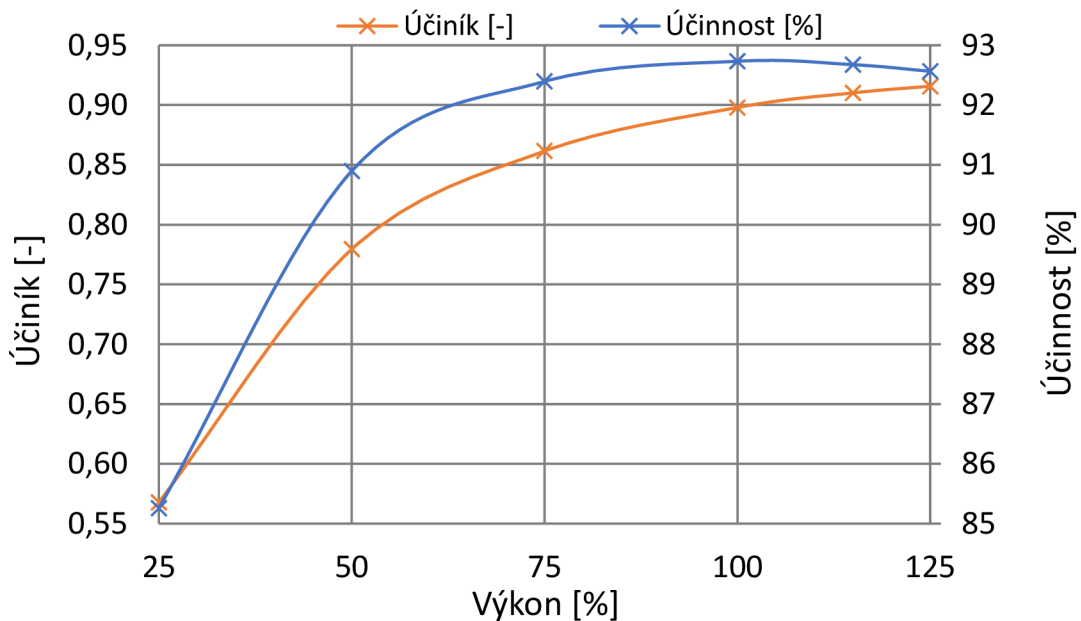


Obr. 4.6: Harmonické spektrum fáze B.

Dále byla provedena simulace pro zjištění hodnot pro vyobrazení momentové a proudové závislosti na otáčkách. Motor byl roztocen od nulových otáček až po otáčky naprázdno, tj. 1500 ot/min s krokem 75 ot/min pro přesnější vykreslení. Výsledné charakteristiky lze vidět na obr. 4.7. Mezi důležité body na momentové charakteristice patří záběrný moment, který je 572 Nm a moment zvratu, který dosahuje téměř dvojnásobné hodnoty, tedy 1026 Nm . Z proudové charakteristiky lze zjistit průměrnou efektivní hodnotu proudu při ustáleném stavu stroje. Obě charakteristiky jsou důležité pro určení otáček a odběru proudu motoru při zatížení různými momenty.



Obr. 4.7: Momentová charakteristika.



Obr. 4.8: Zatěžovací charakteristika.

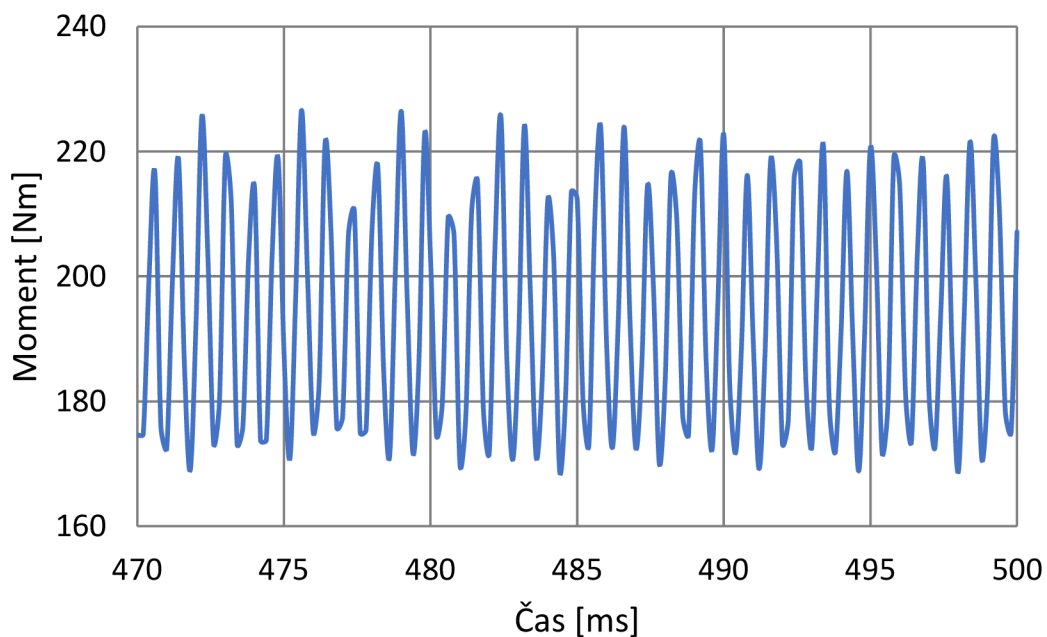
V katalozích motorů bývá velmi často uvedena zatěžovací charakteristika, která ukazuje závislost účinnosti a účinníku motoru na procentuálním zatížení motoru. Charakteristika se měří pro výkonové zatížení od 25% až po 100% s krokem 25%, následně se ještě změní hodnoty při výkonovém přetížení pro 115% a 125% zatížení. Ta je zobrazena na obr. 4.8. Nejlepší účinnosti motor dosahuje při jmenovitém zatížení. Při přetížení jeho

účinnost mírně klesá, je to způsobeno zvýšeným odběrem proudu a následným zvýšením Joulových ztrát, které rostou s druhou mocninou velikosti proudu tekoucího vodičem. Nejlepšího účinku dosahuje motor při 125% přetížení, ovšem z křivky lze vidět, že účinek by dále rostl do plného nasycení stroje, poté by začal klesat.

Momentová pulzace je zobrazena na Obr. 4.9. Lze vidět, že moment má rozptyl mezi 169 Nm a 227 Nm. Momentové zvlnění vyjádřené v procentech je 29,9% a bylo dopočítáno následovně

$$M_{pulse} = \frac{M_{max} - M_{min}}{M} \cdot 100. \quad (4.9)$$

Tak velký rozptyl je způsoben vyššími harmonickými, jejichž přítomnost jsme si ověřili harmonickou analýzou průběhu proudu.

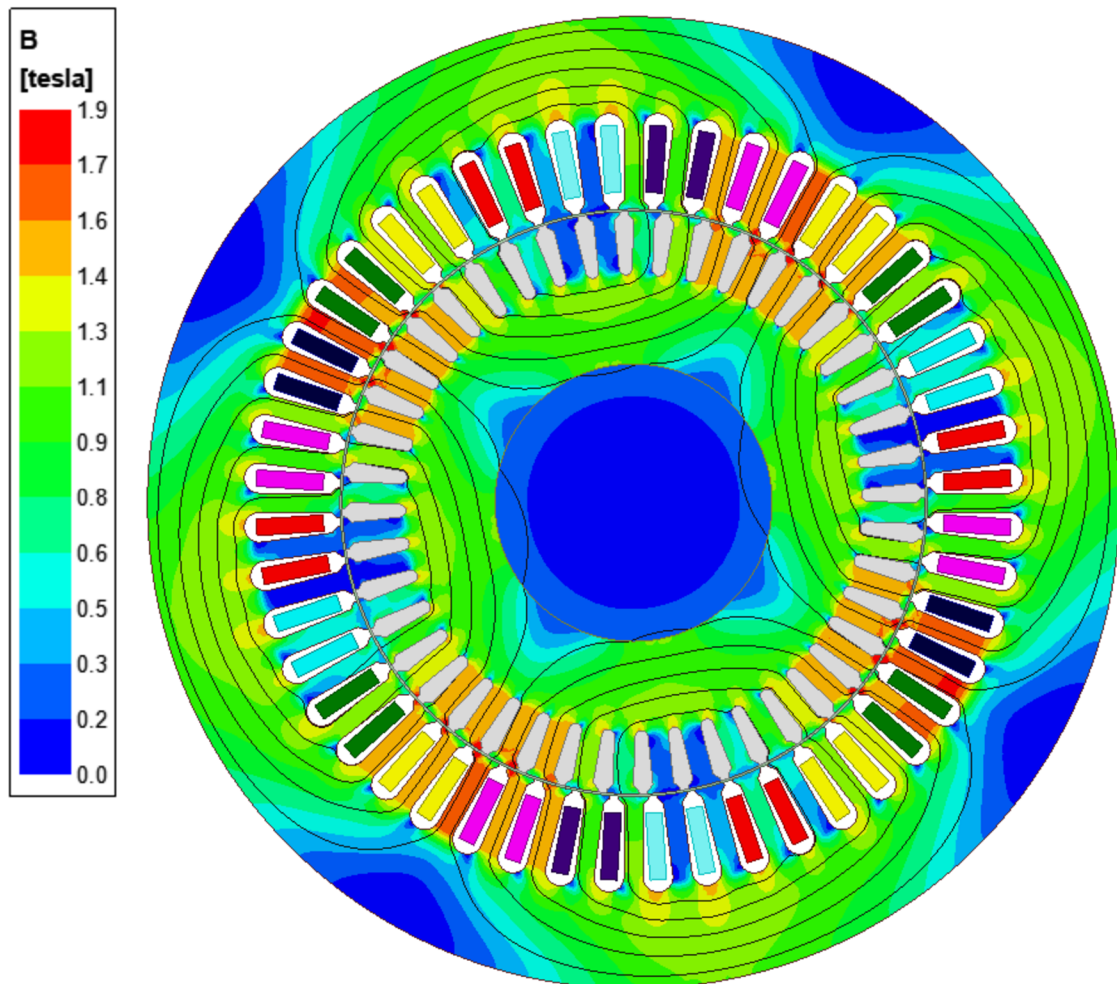


Obr. 4.9: Momentová pulzace.

4.2 Provozní vlastnosti 6-fázového motoru při poruše 1 fáze

Tato kapitola je věnována motoru při výpadku jedné fáze a následnému vlivu na jmenovité parametry a chod stroje. V tomto případě je porušena fáze U_A . Je uvažováno, že porušená fáze je odpojena a neindukuje se do ní žádné napětí, které by vytvářelo další nesymetrie. U vícefázových strojů je hlavní výhodou schopnost chodu a rozběhu motoru i při poruše jedné či více fází. Dojde-li ke ztrátě fáze, motoru se mírně zhorší provozní vlastnosti, ale je stále provozu schopný se stejným zatížením. Jak je zmíněno v předešlé kapitole, při poruše se nabízí několik možností řízení podle našich požadavků na chod stroje. My se v této části budeme věnovat provozním vlastnostem stroje bez kompenzace, tedy bez úpravy napájecího napětí a proudu.

Při výpadku jedné fáze dojde v motoru k narušení symetrie magnetického pole. Pro vizualizaci magnetického pole v motoru byla provedena analýza, kdy byl motor zatížen jmenovitým momentem jako u motoru v bezporuchovém stavu. Magnetickou indukci v motoru a siločáry magnetického pole lze vidět na obr. 4.10. Magnetická indukce v zubech statoru dosahuje stejně jako u motoru bez poruchy $1,7T$, statorové a rotorové jho se sytí na $1,2T$.



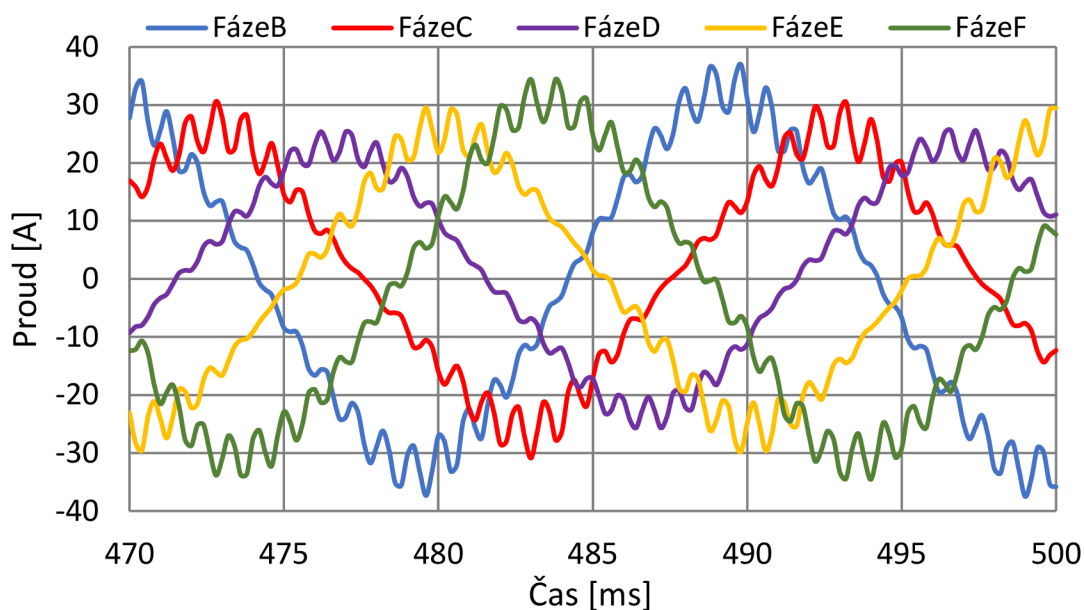
Obr. 4.10: Syčení 6-fázového motoru při poruše.

Při tomto zatížení byly zjištěny jmenovité parametry stroje, které jsou uvedeny v tab. 4.4. Průměrná efektivní hodnota proudu se zvýšila o 23,8%. Zvětšením amplitudy proudu se zvýší ztráty ve vinutí a následkem toho klesne účinnost, která se zmenšila o zhruba 1,5%. U účinníku došlo k zanedbatelnému poklesu.

Následkem výpadku jedné fáze dojde k nesymetrii napájecích proudů a jejich zvětšení. Průměrná efektivní hodnota je 18,7A. Průběhy proudů jsou zkuseny z důvodu obsahu vyšších harmonických a jsou zobrazeny na obr. 4.11.

Tab. 4.4: Tabulka pro porovnání jmenovitých parametrů modelu motoru

Jmenovité hodnoty Motoru	6-f	6-f bez 1 fáze
Výkon	30 kW	30 kW
Efektivní sdružené napájecí napětí	690 V	690 V
Efektivní proud ve fázi	15,1A	18,7A
Otáčky	1477 ot/min	1476 ot/min
Účinnost	0,9	0,9
Účinnost	92,37%	90,84%
Moment	194 Nm	194 Nm



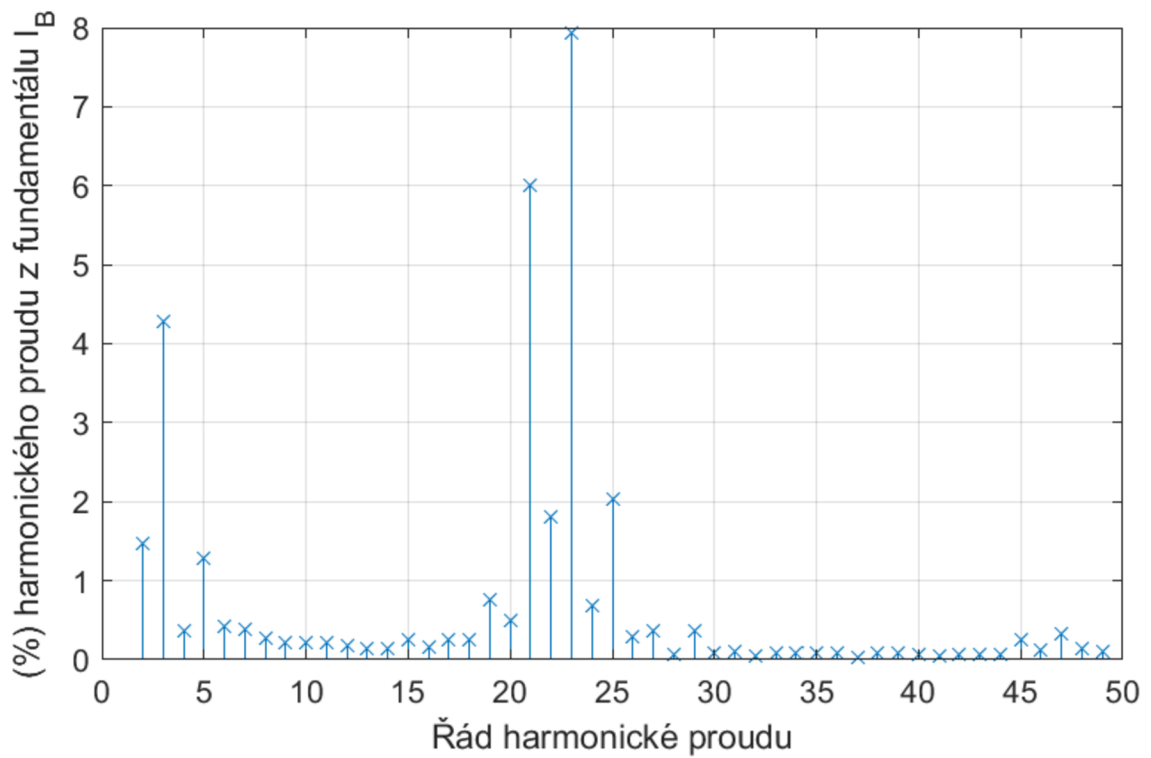
Obr. 4.11: Průběhy proudů při poruše 1 fáze.

Při poruše obsahují proudy stejné harmonické, ale o různých velikostech. Harmonické spektrum lze vidět na obr. 4.12, které bylo opět vypracováno pro fázi B. V případě fáze B došlo k viditelnému zmenšení 3., 21. a 23. harmonické. Celkové harmonické zkreslení proudu (THD_i) pro všechny proudy je v tab. 4.5.

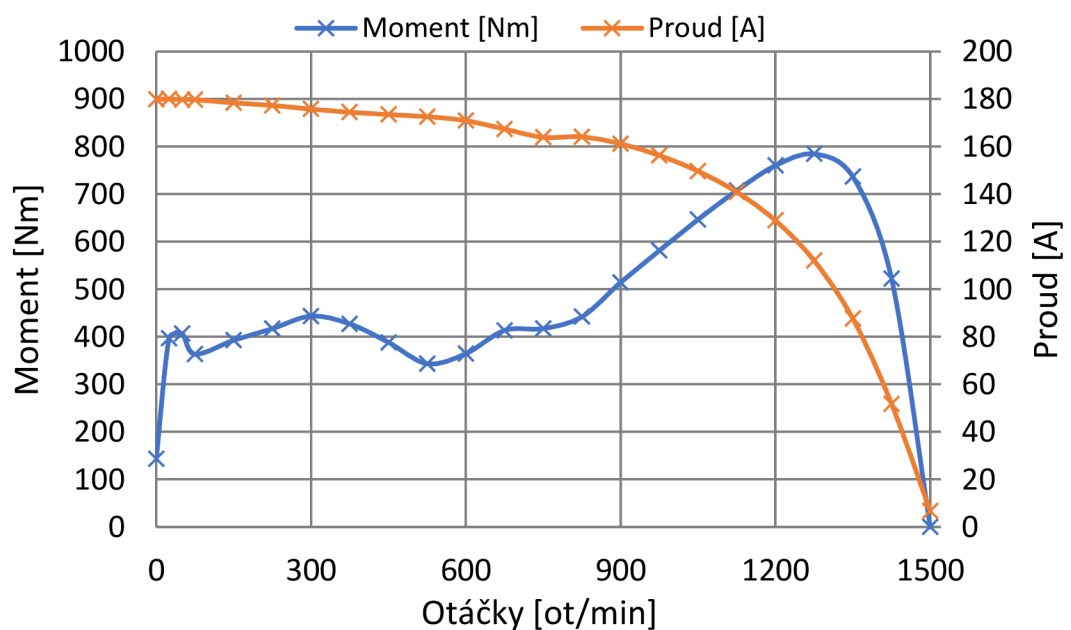
Tab. 4.5: Tabulka celkového harmonického zkreslení při poruše

Proudy	I_B	I_C	I_D	I_E	I_F
THD_i	11,46%	15,37%	10,92%	13,92%	12,36%

Byla provedena simulace pro sestavení momentové a proudové závislosti na otáčkách, kterou lze vidět na obr. 4.13. Při výpadku jedné fáze došlo ke značné deformaci momentové charakteristiky v oblasti záběrného momentu, který se razantně zmenšil na $143Nm$.



Obr. 4.12: Harmonické spektrum fáze B při poruše 1 fáze.

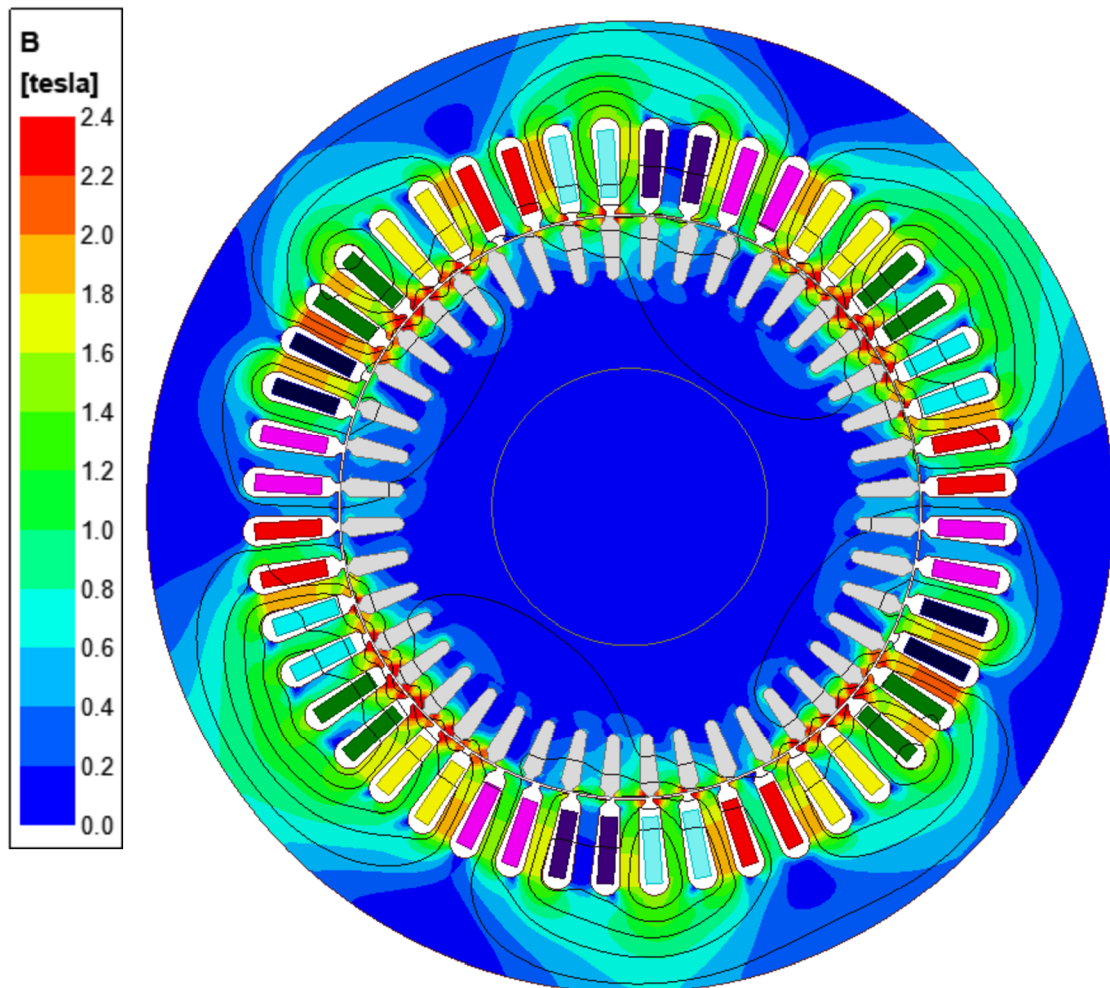


Obr. 4.13: Momentová charakteristika při poruše 1 fáze.

Příčinou toho může být nedostatečně velké sycení stroje. K další deformaci došlo v sedle, kde může být podle [32] příčinou přítomnost prostorových harmonických. Pro ověření by bylo potřeba provést podrobnější analýzu. Moment zvratu se zmenšil na $784Nm$ a

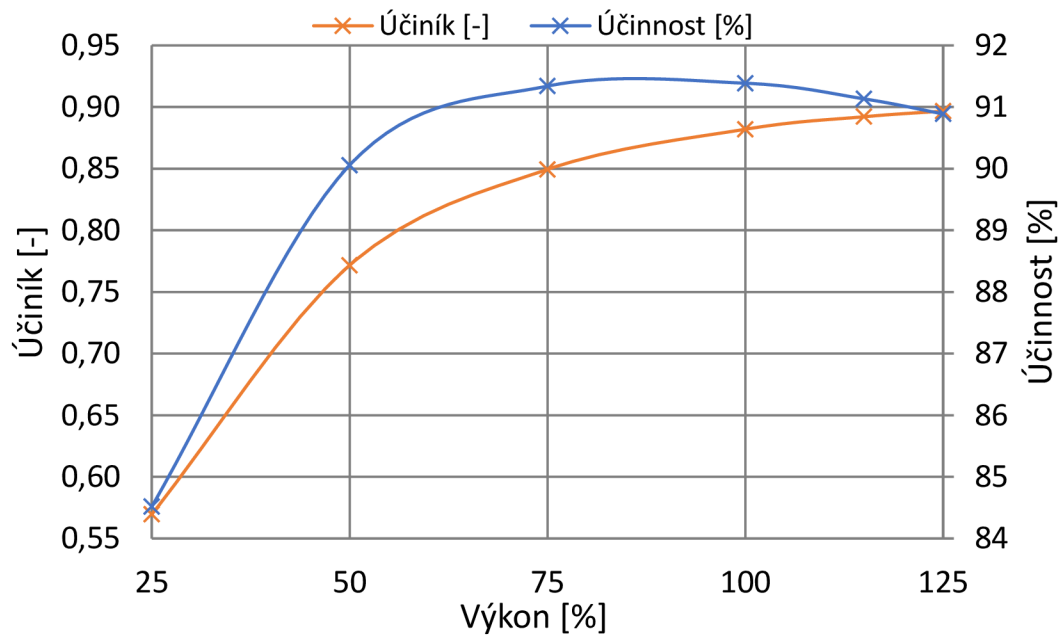
posunul se na $1275\text{ot}/\text{min}$. Závislost proudu na otáčkách se v oblasti od 0 do $900\text{ot}/\text{min}$ mírně zploštila. To má za následek odběr většího proudu z důvodu nesymetrie magnetického pole.

Pro lepší pochopení důvodu snížení záběrného momentu je na obr. 4.14 sycení motoru při chodu nakrátko s 1 porušenou fází. Lze vidět, že dochází k nedostatečnému nasycení, dále se neuzavírají siločáry přes póly, ale pól je rozdělen. Výsledkem je malá magnetická indukce ve vzduchové mezeře. V zubech rotoru a statoru dochází k přesycení, které místy dosahuje až $2,5T$.



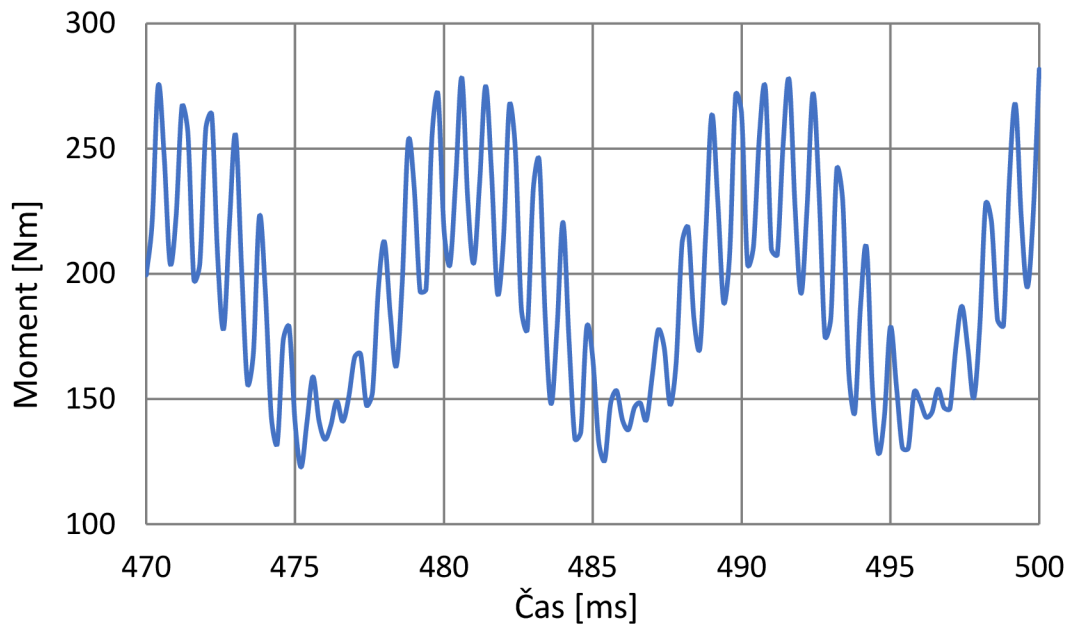
Obr. 4.14: Sycení motoru nakrátko při poruše 1 fáze.

Stejně jako u motoru bez poruchy i u motoru bez 1 fáze byla provedena analýza na sestavení zatěžovací křivky. Motor byl zatížen jmenovitým výkonem, tedy 30kW , který odpovídá 100% zatížení. Zatěžovací křivka je zobrazena na obr. 4.15. Z obrázku lze vidět, že křivka účinnosti se mírně snížila a při výkonovém přetížení má větší pokles, jelikož vzrostly Joulovy ztráty ve statoru a rotoru. Bod nejvyšší účinnosti se posunul na 86% jmenovitého zatížení. U křivky účinníku nedošlo téměř k žádné změně.



Obr. 4.15: Zatěžovací charakteristika při poruše 1 fáze.

Poměrně důležitým faktorem u motoru při poruše je, jak moc se zvýší velikost momentové pulzace. Ta u řešeného modelu při chodu v jmenovitých otáčkách kolísá mezi maximální hodnotou $282Nm$ a minimální $123Nm$. Momentové zvlnění vzrostlo na 81,96%. Takto velká pulzace může způsobovat vibrace a velký hluk. Její průběh je zobrazen na obr. 4.16



Obr. 4.16: Momentová pulzace při poruše 1 fáze.

4.3 Porovnání provozních vlastností

V tab. 4.6 jsou efektivní hodnoty napájecích fázových proudů motoru v bezporuchovém stavu a s poruchou 1 fáze. Také je vypočítán procentuální nárůst jednotlivých fázových proudů. Největší nárůst mají fáze s fázovým posuvem nejbližším k fázovému posuvu porušené fáze. S rostoucím fázovým posuvem nárůst klesá. Přesněji, nejvyšší nárůst mají fáze B a F a nejmenší fáze D.

Tab. 4.6: Tabulka pro porovnání efektivních hodnot proudů ve fázích

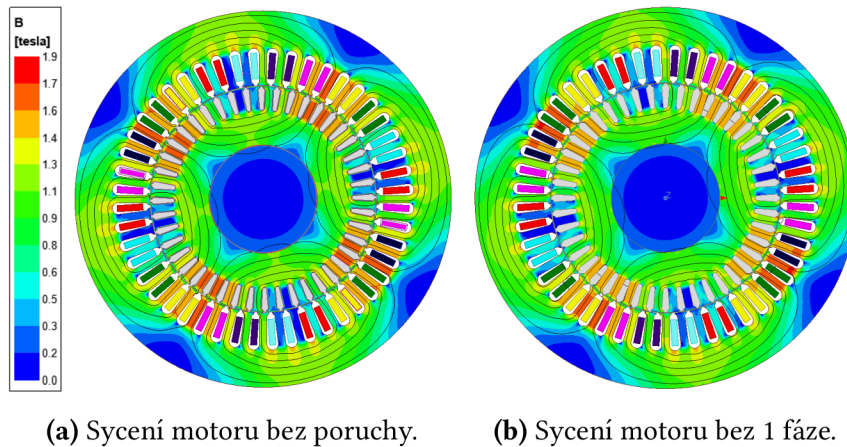
Proudy	6-f	6-f bez 1 fáze	Procentuální nárůst
I_A	15,15 A	porušená fáze	0
I_B	15,08 A	22,27 A	47,68%
I_C	15,13 A	17,3 A	14,34%
I_D	15,15 A	15,8 A	4,29%
I_E	15,08 A	17,28 A	14,59%
I_F	15,13 A	21,01 A	38,86%

Je také porovnáno, jak se změní THD_i při výpadku fáze, které je uvedeno v tab. 4.7. Při výpadku fáze dojde k nárůstu THD_i u fáze C a E, u zbytku fází se THD_i zmenší. K vyvýššímu poklesu harmonického zkreslení došlo u fáze D, kde se snížilo o 19,47%.

Tab. 4.7: Tabulka pro porovnání THD_i fázových proudů

Proudy	THD_i bez poruchy	THD_i bez 1 fáze	Procentuální rozdíl
I_A	13,56%	porušená fáze	0%
I_B	13,63%	11,46%	-15,92%
I_C	13,76%	15,37%	11,7%
I_D	13,56%	10,92%	-19,47%
I_E	13,63%	13,92%	2,13%
I_F	13,67%	12,36%	-9,58%

Při porovnání sycení motoru při jmenovitém zatížení v bezporuchovém stavu a stavu bez 1 fáze, které je na obr. 4.17, lze vidět mírnou nesymetrii v rozložení magnetických siločar a sycení. K větším změnám ve stroji nedochází díky použití vysokého počtu fází.



(a) Sycení motoru bez poruchy. (b) Sycení motoru bez 1 fáze.

Obr. 4.17: Porovnání sycení motoru při jmenovitém zatížení.

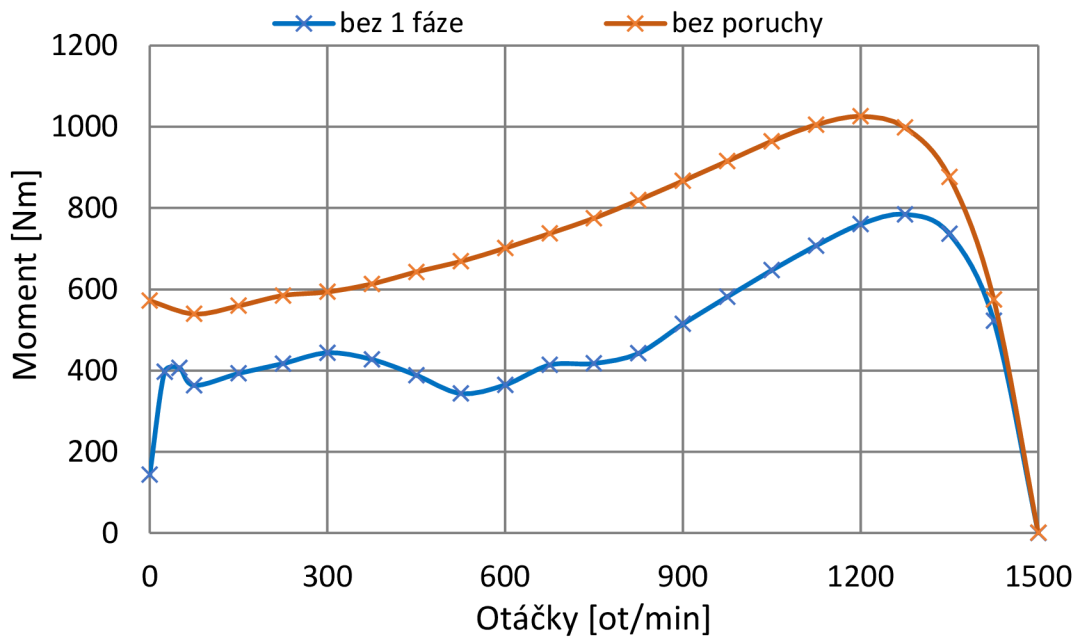
Z analýz jmenovitého zatížení byly také získány ztráty stroje, které jsou uvedeny v tab. 4.8. V tabulce je také vypočítaný procentuální nárůst ztrát pro motor bez 1 fáze. Ztráty ve vinutí statoru vzrostly o 34,86% vlivem závislosti na druhé mocnině velikosti protékajícího proudu, které se s porušenou fází zvětšily. Ztráty v rotoru narostly o 36,14% v důsledku nárůstu vyšších harmonických v rotoru. Hysterezní a mechanické ztráty se nezměnily, jelikož změna počtu fází na ně nemá žádný vliv.

Tab. 4.8: Tabulka pro porovnání ztrát ve stroji

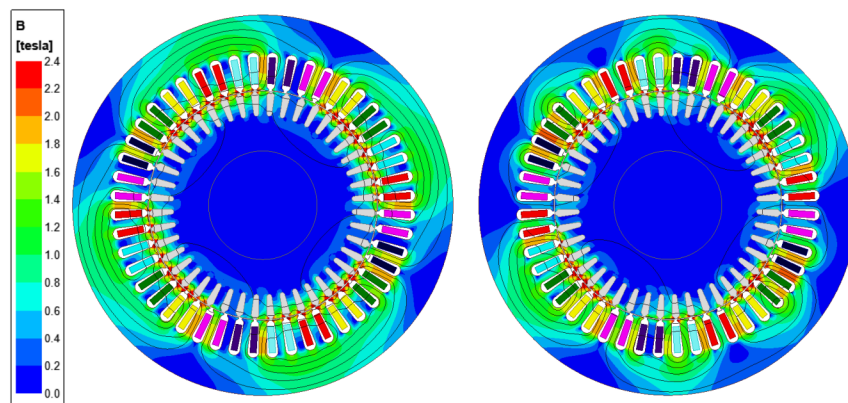
Proudy	6-f	6-f bez 1 fáze	Procentuální nárůst
Ztráty ve vinutí statoru	654W	882W	34,86%
Ztráty v rotoru	678W	923W	36,14%
Hysterezní ztráty	249W	251W	0,8%
Mechanické ztráty	887W	887W	0%

Porovnání momentových charakteristik je na obr. 4.18. Jak již bylo zmíněno, u motoru s porušenou fází došlo k celkovému snížení momentu, moment zvratu se posunul blíže k synchronním otáčkám a zmenšil se o 26,59% z 1026Nm na 784Nm. Záběrný moment se zmenšil o 75% z 572Nm na 143Nm. Pracovní oblast motoru za momentem zvratu je téměř stejná.

Na obr. 4.19 je pro porovnání zobrazeno sycení motoru bez poruchy a s 1 porušenou fází při chodu nakrátko. U motoru bez poruchy se magnetické siločáry uzavírají přes všechny vodiče a vytvářejí celistvý pól. Naopak u motoru s porušenou fází se siločáry neuzavírají přes všechny vodiče pólu a vzniká tak nesymetricky sycené magnetické pole.



Obr. 4.18: Porovnání momentových charakteristik.



(a) Sycení motoru bez poruchy.

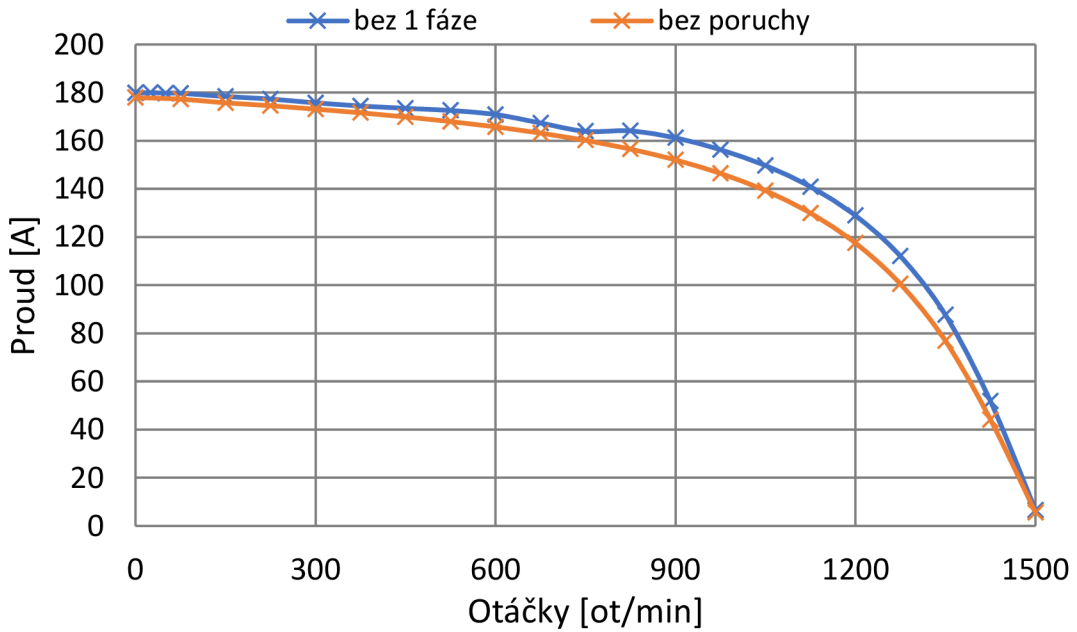
(b) Sycení motoru bez 1 fáze.

Obr. 4.19: Porovnání sycení motoru při chodu nakrátko.

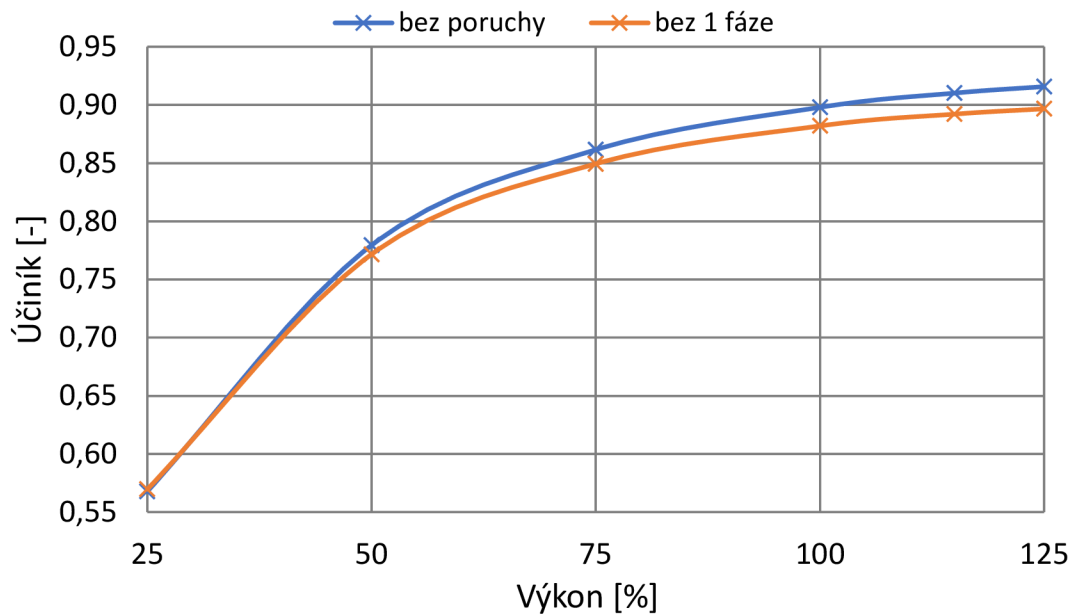
U proudových závislostí na otáčkách lze vidět menší nárůst u charakteristice motoru s poruchou. Ten má za následek navýšení odběru proudu pro kompenzaci nesymetrie magnetického pole. Proudové charakteristiky jsou zobrazeny na obr. 4.20.

Výpadek jedné fáze příliš neovlivní účinek stroje v závislosti na výkonu, jak je vidět na obr. 4.20. Počátek křivky je pro oba stavy téměř stejný, až po 50 % výkonu dochází k viditelně menšímu nárůstu účinnosti při výpadku 1 fáze.

Účinnost motoru je v případě poruchy fází závislá na změně ztrát ve vinutí statoru a rotoru. Při výpadku 1 fáze se zvětší amplitudy zbylých proudů a následkem toho vzrostou i ztráty ve vinutí statoru. Ztráty v rotoru vzrostou vlivem zvětšené přítomnosti vyšších harmonických v rotoru. Ve výsledku se účinnost motoru zmenší, jak je vidět na obr. 4.22.



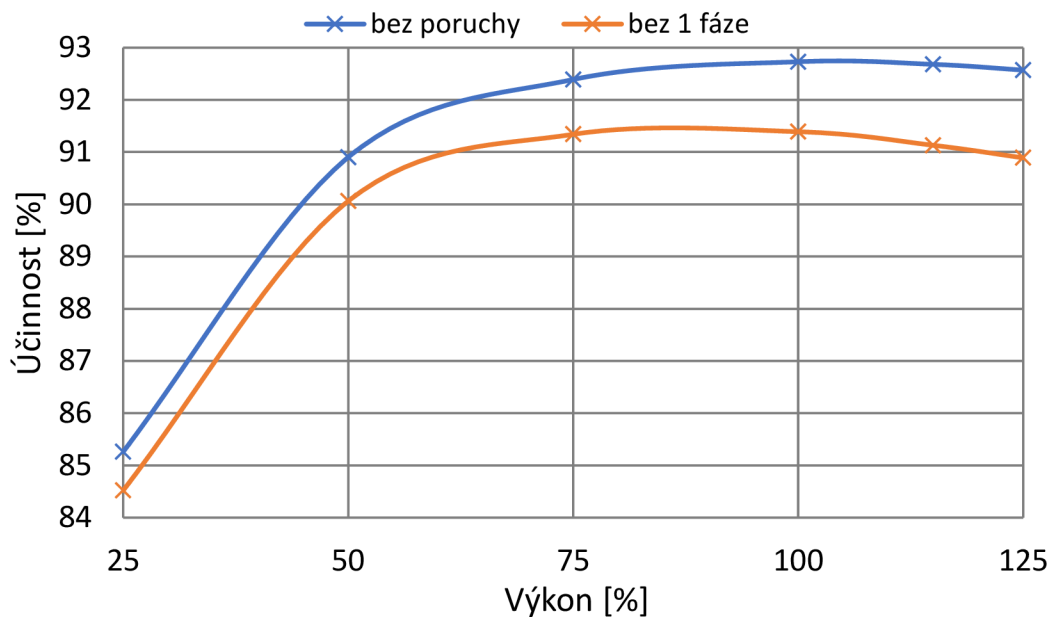
Obr. 4.20: Porovnání proudových charakteristik.



Obr. 4.21: Porovnání charakteristik účinníku.

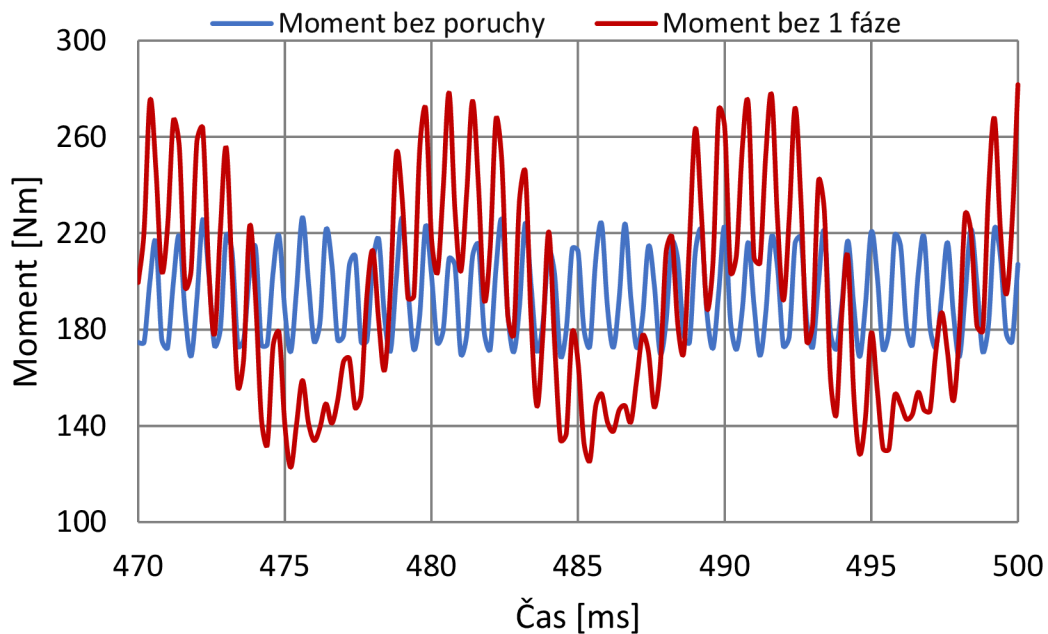
Při výkonovém přetížení účinnost motoru bez 1 fáze klesá strměji z důvodu závislosti Joulových ztrát na druhé mocnině protékajícího proudu.

Na obr. 4.23 lze vidět rozdíl ve změně velikosti momentové pulzace při poruše jedné fáze. Průběh momentové pulzace motoru bez 1 fáze připomíná sinusový tvar, který je způsobený nesymetrií točivého magnetického pole. Při výpadku fáze došlo k dvojnásobnému nárůstu momentové pulzace z 29,9% na 81,96%. Oba průběhy vykazují



Obr. 4.22: Porovnání charakteristik účinnosti.

přítomnost vyšších harmonických, které se dají potlačit úpravou stroje nebo použitím již zmíněných metod řízení. V praxi by se použila metoda vektorového řízení, která se v praxi běžně používá pro řízení asynchronních strojů, zároveň je neúčinnější.



Obr. 4.23: Porovnání momentové pulzace.

ZÁVĚR

První část této bakalářské práce se věnuje historii a současnému poznání vícefázových strojů. Vícefázové stroje jsou rozděleny do skupin na synchronní stroje a asynchronní stroje. Pro každou skupinu jsou uvedeny oblasti použití daných strojů a již vyráběné stroje. Hlavními oblastmi použití jsou transport, jako automobilová doprava, lodní doprava a letectví.

V druhé části jsou probrány aspekty spojené s vícefázovými asynchronními stroji. Za prvé je shrnuto základní dělení podle počtu vrstev vinutí a následně jsou probrány možnosti zapojení vinutí nejčastěji zmiňovaných 5-fázových a 6-fázových strojů. Jsou rozebrány i jejich vlastnosti a důvody, kdy je výhodné je použít. Poté je probrán vliv vyššího počtu fází na jednotlivé ztráty stroje, jako jsou Jouleovy ztráty, ztráty v železe a podobně. Je také probráno chování motoru v poruchovém stavu, kterým je myšlen výpadek jedné či více fází, přesněji jaký vliv má porucha na velikost ztrát stroje a momentovou pulzaci. V souvislosti s tím jsou zmíněny teoretické možnosti řízení na snížení ztrát ve stroji. Pro kompenzaci momentové pulzace jsou uvedeny způsoby řízení, které se dělí na dva způsoby. V prvním se změní fázový posuv zdravých fází a druhý spočívá ve vektorovém řízení. Také je probráno téma ceny motoru a měniče, které je předvedeno na příkladu z praxe. Jako poslední jsou probrány vyšší harmonické, které vznikají v motoru a v měniči. Jsou popsány jejich negativní vlivy, ale i možnost jejich využití. Na konci této kapitoly jsou shrnuty výhody a nevýhody vícefázových motorů, které byly zjištěny v této práci.

V poslední části této práce byl zkoumán elektromagnetický model 6-fázového asynchronního stroje. Na modelu byly provedeny analýzy pro získání parametrů při jmenovitém zatížení v bezporuchovém stavu a při poruše 1 fáze, které jsou uvedeny v tabulce. Z jmenovitého zatížení byly získány průběhy fázových proudů, které byly podrobeny harmonické analýze v programu Matlab. Také je zobrazeno sycení motoru při jmenovitém zatížení pro zjištění změn magnetického pole. Pro každý fázový proud bylo vypočítáno celkové harmonické zkreslení. Frekvenční spektrum je vykresleno pouze pro 1 fázi při obou stavech, jelikož obsah vyšších harmonických se nemění, pouze jejich amplitudy. Dále byly provedeny analýzy na sestavení základních charakteristik stroje, jako je momentová, proudová a zatěžovací charakteristika, opět pro oba stavy. Pro správnou dedukci změny v momentové charakteristice při poruše, hlavně v záběrném momentu, bylo zobrazeno sycení motoru při chodu nakrátko. Je také zobrazena momentová pulzace pro oba stavy. Na závěr jsou všechny výsledky porovnány, vyhodnoceny a zdůvodněny.

Tato bakalářská práce tvoří ucelený popis aspektů spojených s vícefázovými indukčními stroji, který je využitelný při jejich návrhu a řízení.

Literatura

- [1] Kříž Antonín. “Vícefázové elektrické stroje”. semestrální práce. Brno: Vysoké učení v Brně, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2023.
- [2] R. Bojoi et al. “Multiphase electrical machines and drives in the transportation electrification”. In: *2015 IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*. 2015, s. 205–212. DOI: [10.1109/RTSI.2015.7325099](https://doi.org/10.1109/RTSI.2015.7325099).
- [3] Jan Bárta. *Synchronní elektrické stroje*. Prezentace z přednášek kurzu BPC-ESB. Brno, 2022.
- [4] *SUMO TM HD*. URL: <https://www.danatm4.com/products/systems/sumo-hd/>.
- [5] *HVSM285*. URL: <https://www.aselsan.com.tr/HVSM285PermanentMagnetMotorForHybridElectricVehicleApplications4348.pdf>.
- [6] N. Nguyen et al. “Different Virtual Stator Winding Configurations of Open-End Winding Five-Phase PM Machines for Wide Speed Range without Flux Weakening Operation”. In: *zář.* 2013, s. 1–8. DOI: [10.1109/epe.2013.6634346](https://doi.org/10.1109/epe.2013.6634346).
- [7] Antoine Bruyere et al. “Modeling and control of a seven-phase claw-pole Integrated Starter Alternator for micro-hybrid automotive applications”. In: *říj.* 2008, s. 1–6. DOI: [10.1109/VPPC.2008.4677668](https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677668).
- [8] M. Galea et al. “Development of an aircraft wheel actuator for green taxiing”. In: *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2014, s. 2492–2498. DOI: [10.1109/ICELMACH.2014.6960537](https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2014.6960537).
- [9] S. Castellan et al. “Modeling and Simulation of Electric Propulsion Systems for All-Electric Cruise Liners”. In: *2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. 2007, s. 60–64. DOI: [10.1109/ESTS.2007.372064](https://doi.org/10.1109/ESTS.2007.372064).
- [10] Stéphane Brisset, Darius Vizireanu a Pascal Brochet. “Design and Optimization of a Nine-Phase Axial-Flux PM Synchronous Generator With Concentrated Winding for Direct-Drive Wind Turbine”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 44.3 (2008), s. 707–715. DOI: [10.1109/TIA.2008.921379](https://doi.org/10.1109/TIA.2008.921379).

- [11] R. Krishnan et al. “High reliability SRM drive system for aerospace applications”. In: *IECON’03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468)*. Sv. 2. 2003, 1110–1115 Vol.2. DOI: [10.1109/IECON.2003.1280202](https://doi.org/10.1109/IECON.2003.1280202).
- [12] *Advanced induction motor-AIM*. Paris, 2022. URL: <https://www.gepowerconversion.com/product-solutions/induction-motors/Advanced-Induction-Motor-AIM>.
- [13] Radu Bojoi et al. “Design Trade-off and Experimental Validation of multiphase starter generators for 48V mini-hybrid powertrain”. In: *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*. 2014, s. 1–7. DOI: [10.1109/IEVC.2014.7056179](https://doi.org/10.1109/IEVC.2014.7056179).
- [14] Mohamed Y. Metwly et al. “Multiphase Stator Winding: New Perspectives, Advanced Topologies, and Futuristic Applications”. In: *IEEE Access* 10 (2022), s. 103241–103263. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3209372](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3209372).
- [15] Ayman S. Abdel-Khalik et al. “An Improved Fault-Tolerant Five-Phase Induction Machine Using a Combined Star/Pentagon Single Layer Stator Winding Connection”. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63.1 (2016), s. 618–628. DOI: [10.1109/TIE.2015.2426672](https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2426672).
- [16] Ayman S. Abdel-Khalik et al. “Effect of Stator Winding Connection of Five-Phase Induction Machines on Torque Ripples Under Open Line Condition”. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 20.2 (2015), s. 580–593. DOI: [10.1109/TMECH.2014.2303254](https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2303254).
- [17] Ayman S. Abdel-Khalik, Mahmoud S. Abdel-Majeed a Shehab Ahmed. “Effect of Winding Configuration on Six-Phase Induction Machine Parameters and Performance”. In: *IEEE Access* 8 (2020), s. 223009–223020. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3044025](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044025).
- [18] B. Kundrotas et al. “Research of Six-Phase Induction Motor Windings”. In: *Electronics and Electrical Engineering* 20 (led. 2014). DOI: [10.5755/j01.eee.20.1.2237](https://doi.org/10.5755/j01.eee.20.1.2237).
- [19] S. Williamson a S. Smith. “Pulsating torque and losses in multiphase induction machines”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 39.4 (2003), s. 986–993. DOI: [10.1109/TIA.2003.813722](https://doi.org/10.1109/TIA.2003.813722).
- [20] Emil Levi et al. “Multiphase induction motor drives - A technology status review”. In: *Electric Power Applications, IET* 1 (srp. 2007), s. 489–516. DOI: [10.1049/iet-epa:20060342](https://doi.org/10.1049/iet-epa:20060342).
- [21] W.T. Thomson a M. Fenger. “Current signature analysis to detect induction motor faults”. In: *IEEE Industry Applications Magazine* 7.4 (2001), s. 26–34. DOI: [10.1109/2943.930988](https://doi.org/10.1109/2943.930988).

- [22] Ui-Min Choi, Frede Blaabjerg a Kyo-Beum Lee. “Study and Handling Methods of Power IGBT Module Failures in Power Electronic Converter Systems”. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 30.5 (2015), s. 2517–2533. DOI: [10.1109/TPEL.2014.2373390](https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2373390).
- [23] D. Kastha a B.K. Bose. “Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive”. In: *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 1992, 858–866 vol.1. DOI: [10.1109/IAS.1992.244307](https://doi.org/10.1109/IAS.1992.244307).
- [24] Vladimir Kindl et al. “Effect of induction machine’s load and rotor eccentricity on space harmonics in the air gap magnetic flux density”. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*. 2014, s. 463–468. DOI: [10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018303](https://doi.org/10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018303).
- [25] Vladimir Kindl et al. “Review of Time and Space Harmonics in Multi-Phase Induction Machine”. In: *Energies* 13 (led. 2020), s. 496. DOI: [10.3390/en13020496](https://doi.org/10.3390/en13020496).
- [26] A.C. Smith, S. Williamson a C.G. Hodge. “High torque dense naval propulsion motors”. In: *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC’03*. Sv. 3. 2003, 1421–1427 vol.3. DOI: [10.1109/IEMDC.2003.1210638](https://doi.org/10.1109/IEMDC.2003.1210638).
- [27] Jen-Ren Fu a T.A. Lipo. “Disturbance-free operation of a multiphase current-regulated motor drive with an opened phase”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 30.5 (1994), s. 1267–1274. DOI: [10.1109/28.315238](https://doi.org/10.1109/28.315238).
- [28] Reza Kianinezhad et al. “Modeling and Control of Six-Phase Symmetrical Induction Machine Under Fault Condition Due to Open Phases”. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55.5 (2008), s. 1966–1977. DOI: [10.1109/TIE.2008.918479](https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918479).
- [29] Rodrigo Rodrigues Bastos et al. “Assessment of a Nine-Phase Induction Motor Drive for Metal Industry Applications”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 56.6 (2020), s. 7217–7226. DOI: [10.1109/TIA.2020.3023061](https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3023061).
- [30] Leopoldo G. Franquelo et al. “The age of multilevel converters arrives”. In: *IEEE Industrial Electronics Magazine* 2.2 (2008), s. 28–39. DOI: [10.1109/MIE.2008.923519](https://doi.org/10.1109/MIE.2008.923519).
- [31] T. Jokinen, V. Hrabovcova a J. Pyrhonen. *Design of Rotating Electrical Machines*. Wiley, 2013. ISBN: 9781118701652. URL: <https://books.google.cz/books?id=4SUIAQAAQBAJ>.
- [32] Marek Michalík. “Simulace momentové charakteristiky asynchronního stroje”. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení v Brně, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2017.