

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 715

ISSN 1213-418X

Jan Bárta

**SYNCHRONNÍ STROJE
SPOUŠTĚNÉ ZE SÍTĚ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Ing. Jan Bárta, Ph.D.

SYNCHRONNÍ STROJE SPOUŠTĚNÉ ZE SÍTĚ

LINE-START SYNCHRONOUS MACHINES

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
V OBORU SILNOPROUDÁ ELEKTROTECHNIKA A ELEKTROENERGETIKA



BRNO 2022

KLÍČOVÁ SLOVA

střídavé stroje, synchronní stroje spouštěné ze sítě s permanentními magnety, optimalizace, stroje s permanentními magnety, asynchronní stroje, zvyšování účinnosti, testování

KEYWORDS

AC machines, permanent magnet synchronous machines, optimization, permanent magnet machines, asynchronous machines, efficiency improvement, testing

MÍSTO ULOŽENÍ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně
Technická 10
616 00 Brno
Česká Republika

© Jan Bárta, 2022

ISBN 978-80-214-6037-9

ISSN 1213-418X

Obsah

Představení autora	4
1 Úvod	5
2 Teorie synchronních strojů spouštěných ze sítě	8
2.1 Matematický model	9
2.2 Ustálený stav	11
2.3 Asynchronní moment	13
2.4 Momentová charakteristika	15
2.5 Synchronizace	16
3 Návrhové metody a aspekty	19
4 Případové studie	21
4.1 Výzkum a vývoj synchronního stroje malého výkonu spouštěného ze sítě	21
4.2 Výzkum a vývoj tvaru drážek rotoru prostřednictvím topologické optimalizace	26
5 Měření na synchronních strojích spouštěných ze sítě	30
5.1 Měření indukovaného napětí naprázdno	30
5.2 Měření zatěžovacích křivek	32
5.3 Měření rozběhů	32
6 Závěr	35
Literatura	37

Představení autora

Jan Bárta se narodil v roce 1989 v Novém Jičíně. Svůj vztah k silnoproudé elektrotechnice a zejména k elektrickým strojům našel již během svých studií na střední průmyslové škole elektrotechnické ve Frenštátě pod Radhoštěm. V roce 2009 zahájil své studium na Vysokém učení technickém v Brně, kde získal v roce 2012 bakalářský titul v oboru Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika obhajobou bakalářské práce s názvem *Výpočet synchronizovaného asynchronního motoru*. Inženýrské vzdělání získal v oboru Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika v roce 2014 složením státní závěrečné zkoušky a obhajobou diplomové práce *Návrh a optimalizace synchronního reluktančního motoru*. Část inženýrského studia strávil na Aalto University ve Finsku, kde úspěšně absolvoval řadu kurzů z oboru elektromechaniky. Během studií také nabyt průmyslovou praxi, kdy pracoval jako projektant elektro celkem 11 měsíců pro společnost LAC, s.r.o. a 14 měsíců pro společnost ABB.



V letech 2014-2018 absolvoval pod vedením školitele doc. Ing. Čestmíra Ondrůška, Csc. doktorské studium v oboru Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika, které ukončil v roce 2018 obhajobou disertační práce na téma *Návrh elektrického stroje 6 kW, 120 000 ot/min pro turbo-cirkulátor hélia*. Dvakrát během tohoto období absolvoval výzkumné pobyty v zahraničí, konkrétně dva měsíce v roce 2015 na Lappeenranta University of Technology ve Finsku, kde pracoval pod vedením přední kapacity v oboru elektrických strojů prof. Juhya Pyrhöнена, a tři měsíce ve Finské společnosti SpinDrive v roce 2017, kde byl součástí vývojového týmu vysokootáčkových elektrických strojů.

Po ukončení doktorského studia v roce 2018 strávil dalších šest měsíců prací pod vedením prof. Juhya Pyrhöнена na Lappeenranta University of Technology ve Finsku, a dále pokračoval svou kariéru na VUT v Brně. Několikrát byl úspěšný při psaní návrhů a získávání finančních prostředků z programů Technologické agentury ČR na vývoj pokročilých elektrických strojů. Jmenovitě se jednalo o následující projekty: Stroje s vysokou účinností spouštěné ze sítě, Elektromotory s účinností IE2 napájené z jednofázové sítě a inovativní lineární elektromechanické aktuátory. Významně se také podílel na přípravě a organizaci projektu Technologie vysokorychlostních systémů pro termojadernou fúzi, kde je momentálně zodpovědný za technické vedení konsorcia řešitelů.

Autor je příznivcem zahraniční spolupráce a předávání vědomostí studentům. Od roku 2019 aktivně rozvíjí spolupráci s Univerzitou Johannese Keplera v Linci a Lineckým centrem mechatroniky (LCM), která vyústila v zapojení Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně do projektu K2 2021++ Centrum symbiotické mechatroniky LCM. V rámci spolupráce se zahraničím skrze své kontakty již zajistil vypracování řady diplomových prací a několik stáží studentů jak doktorského, tak magisterského studia. Mimo jiné také inovoval metody výuky cvičení a laboratoří kurzu elektrické stroje a dále také zavedl nový anglicky vyučovaný kurz Selected problems of power electrical engineering, který v současné době garantuje.

1 Úvod

Svět má nekončící hlad po energiích a jejich konzumace roste neudržitelnou rychlostí každým dnem. Jenom v Evropské Unii se očekává nárůst spotřeby z 3 500 TWh z roku 2020 až na 4 900 TWh do roku 2050, tedy o 40 % [1]. To představuje nárůst spotřeby elektrické energie každý rok o 1,1 %. Výraznou měrou se na spotřebě elektrických energií podílejí elektrické stroje instalované v průmyslu. Technické zprávy [2] a [3] uvádí, že se globálně jedná o spotřebu mezi 30 % až 40 % veškeré vyrobené elektrické energie. Předpokládá se, že počet elektrických strojů provozovaných v průmyslových aplikacích je zhruba 300 000 000 a 50 % z nich je instalováno v US, EU a Číně. Je odhadováno že toto množství se každý rok zvyšuje o 15 % [4] a lze zjednodušeně tvrdit, že ekonomický růst jde v ruku v ruce s nárůstem používaných elektrických strojů. Pro příklad jenom moderní automobil se spalovacím motorem obsahuje okolo 60 elektromotorů [5].

Není tedy divu, že elektrické stroje představují obrovský potenciál pro významnou úsporu elektrických energií a jsou proto v poslední době kladeny vyšší požadavky na vysokou účinnost elektrických strojů pro minimalizaci jejich ztrát [6]. Výsledkem je například mezinárodní standard IEC/EN 60034-30-1 [7], [8] (v České Republice stanovuje norma ČSN EN 60034-30), který definuje čtyři účinnosti třídy: standardní účinnost (IE1), zvýšenou účinnost (IE2), velkou účinnost (IE3) a velmi vysokou účinnost (IE4). Od 1.1. 2017 je minimální požadovaná účinnostní třída motorů ve výkonovém rozsahu 750 W až 375 kW IE3 a při napájení s měničem pak třída IE2. Stroje standardní účinnosti jsou v EU zakázány.

V dnešním průmyslu se uplatňuje celá řada různých typů elektrických strojů, a zdaleka nejvíce používány jsou asynchronní stroje s klecí nakrátko [6]. Není tedy divu, že se pro tyto stroje vžilo označení "tažní koně průmyslu". Zatímco účinnostní třídy IE3 lze u asynchronních strojů dosáhnout pečlivou optimalizací jednotlivých částí, a to jak ve fázi návrhu tak i výroby, dosažení třídy IE4 je už značně obtížné. Nicméně, jak ukázala publikace [9], existují v současné době komerční asynchronní stroje s hliníkovou klecí, které jsou nabízeny s účinností třídou IE4 ve výkonovém rozsahu 5,5 kW až 355 kW. Dosažení účinnostní třídy IE4 pro stroje menších výkonů, tj. pod 5,5 kW, je již značně problematické, což lze přisuzovat velkému zastoupení ztrát ve vinutí statoru těchto strojů. Tyto ztráty lze u asynchronních strojů minimalizovat pouze do určité míry, protože z principu své funkce tento typ stroje vždy potřebuje odebírat ze sítě jalovou složku proudu, která zajistí jeho namagnetování. Tím se liší od strojů s permanentními magnety, kde magnet zajišťuje částečně nebo plně magnetizaci magnetického obvodu a proto magnetizační proud těchto strojů je nižší, nebo může být v některých případech i nulový.

Výrobci tedy hledají různé cesty jak trhu nabídnout stroje s velmi vysokou účinností (IE4) i pro výkony pod 5,5 kW. Jednou z možností je využití jiných typů strojů, jako jsou například reluktanční

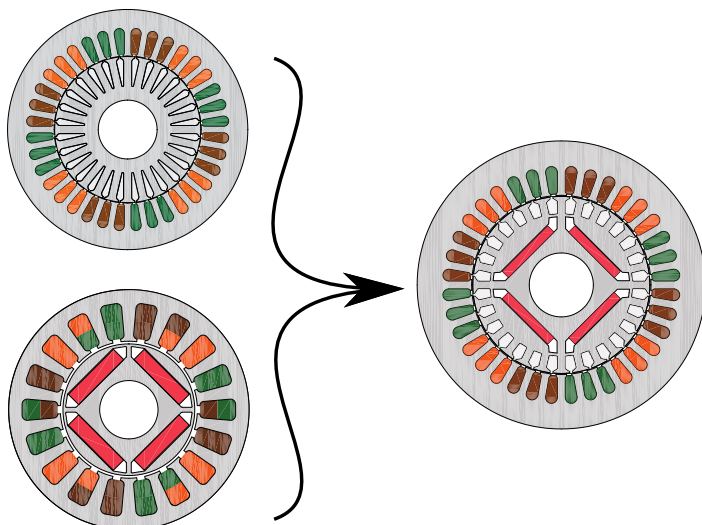
motory, jejichž poměrně obsáhlý teoretický popis je uveden v knize [10]. Klíčovou myšlenkou těchto strojů je to, že díky absenci klece nakrátko jsou zcela eliminovány Jouleovy ztráty v rotoru. Zároveň je tento stroj jednoduše vyrobitelný, jelikož rotor je sestaven pouze z plechů, které mají vhodně tvarované bariéry magnetického toku. Pro bariéry je dnes populární založit jejich tvar na přirozeném průběhu siločar [11]. Přestože jsou tyto stroje schopny dosáhnout účinnostní třídy IE4, tak jejich účinek je na druhou stranu horší než u strojů asynchronních [12]. To je dáno tím, že stejně jako u asynchronních strojů musí jejich magnetizaci plně zajistit napájecí proud, a vzhledem k provedení rotoru je jejich potřeba magnetizačního proudu dokonce vyšší pro vytvoření požadovaného syčení. Účinek synchronních reluktančních strojů lze zlepšit například použitím výrobně složitě axiálně laminované geometrie, jak je ukázáno v [13]. Případně se do dnešních reluktančních strojů někdy přidávají levné feritové magnety, které zajišťují částečnou magnetizaci magnetického obvodu a tím sníží odebíraný magnetizační proud [14], [15]. Takovéto stroje se nazývají synchronní reluktanční stroje asistované permanentními magnety.

Samozřejmě lze pro dosažení velmi vysoké účinnostní třídy IE4 použít i klasické synchronní stroje s permanentními magnety. Srovnání výhod a nevýhod asynchronního a synchronního stroje je na příkladu trakční aplikace provedeno v [16]. Obecně lze říct, že synchronní stroj s permanentními magnety bude mít vyšší účinnost i účinek než srovnatelný asynchronní motor. Nejenom, že nemá rotorovou klec, ve které by vznikaly ztráty, ale také díky přítomnosti magnetu odebírá pouze malý proud, což vede k malým ztrátám ve vinutí. Tyto výhody jsou ale vykoupeny vyšší cenou synchronního stroje, který často pro potřeby řízení musí být navíc vybaven snímačem polohy rotoru.

Nehledě na to, zdali se jedná o synchronní stroj s magnety nebo reluktanční stroj, je také nutné pro všechny vyjmenované napájení z frekvenčního měniče, neboli nedisponují schopnosti přímého spouštění ze sítě jako asynchronní stroje. Schopnost rozběhnout se bez přídavné elektroniky je velmi praktická v aplikacích, kde není vyžadována regulace otáček. Řízení prostřednictvím měniče totiž snižuje celkovou účinnost systému pohonu i jeho spolehlivost a naopak zvyšuje cenu za pořízení, instalaci a také požadavky na prostor a údržbu [17]. Dále jsou vyšší nároky na materiály pro výrobu celého pohonu řízeného měničem a tím se v konečném důsledku zvyšuje negativní dopad na životní prostředí.

Jeví se tedy jako výhodné mít elektromotor, který by kombinoval výhody jak asynchronního, tak synchronního stroje. Tedy rozbíhal by se stejně jako asynchronní motor po připojení k síti, a po rozběhu by pracoval v synchronních otáčkách jako synchronní motor. Stroj, který toto splňuje, a byl podle [18] publikován poprvé už v roce 1962, je označován jako synchronní stroj spouštěný ze sítě. Citovaná publikace dále uvedla, že tento typ strojů se objevil již dříve, avšak jejich konkrétní příklady jsou v dnešní době již těžce vyhledatelné. Myšlenka provedení tohoto stroje je jednoduchá: jedná se o kombinaci stroje asynchronního a synchronního s permanentními magnety dohromady tak, jak ukazuje Obr. 1.1.

Koncept činnosti a provedení synchronních strojů spouštěných ze sítě je tedy znám již po dekády, avšak nebyl často použit v reálných aplikacích z důvodu své vyšší ceny a komplikovanější výroby ve srovnání s asynchronními stroji [18]. Vyčerpávající přehled existujících technologií synchronních strojů spouštěných ze sítě a jejich historický vývoj uvádí publikace [19], a přehled současného stavu poznání lze nalézt v [20]. Se současným tlakem na zvyšování účinnosti elektrických strojů se však tyto stroje, jak již bylo naznačeno výše, stále častěji vyskytují v průmyslových aplikacích [9] a [21].



Obr. 1.1: Synchronní stroj spouštěný ze sítě kombinuje konstrukci stroje asynchronního a synchronního s vnořenými magnety.

Nižší ztráty synchronních strojů spouštěných ze sítě navíc umožňují u pohonů s měničem podstatně větší rozšíření oblasti konstantního výkonu ve srovnání se stroji asynchronními [22]. Proto mohou být synchronní stroje spouštěné ze sítě, za určitých podmínek, výrazně lepší pro pohon s proměnnými otáčkami než klasický asynchronní stroj. Praktické zkušenosti přímo z aplikace synchronního stroje spouštěného ze sítě v technické praxi jsou popsány v [23].

Synchronní stroje pro přímé spouštění ze sítě dosahují dle [23] účinnostní třídy IE4 a v některých případech, ovšem obtížně, dokonce teoretické účinnostní třídy IE5. Tento typ stroje je tak vhodným kandidátem pro nahrazení klasických asynchronních motorů v průmyslu za účelem úspory energií. Avšak vyššímu uplatnění brání jeho vysoká cena a další provozní nevýhody, mezi něž patří horší rozběhové vlastnosti [9]. V důsledku toho je jejich hlavní komerční potenciál pouze ve výkonech, pro které nejsou asynchronní motory v účinnostní třídě IE4 na trhu dostupné [24] a jedná se tedy o výkony pod 5,5 kW.

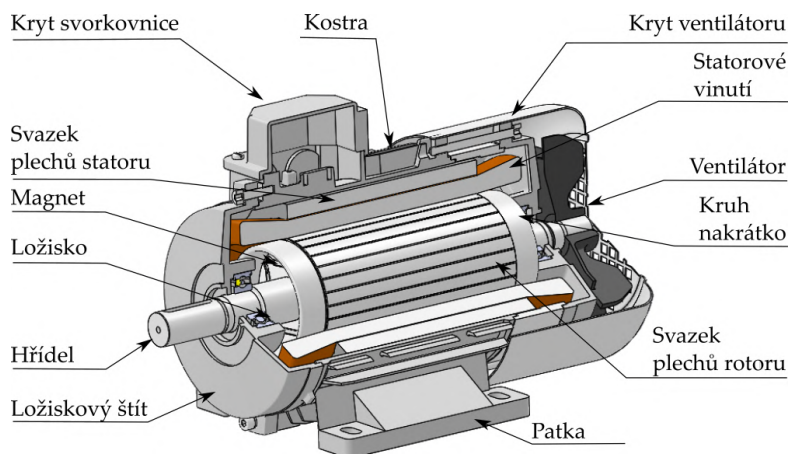
Je zřejmé, že zejména díky legislativním změnám snažícím se o zajištění udržitelné budoucnosti společnosti je téma synchronních strojů spouštěných ze sítě aktuální. Tato habilitační práce na tuto skutečnost reaguje a je věnována sepsání faktických poznatků, které vznikly výzkumem a vývojem těchto typů strojů prováděným autorem této práce. Hlavní motivací je nabídnout přehled teorie trojfázových synchronních strojů spouštěných ze sítě s permanentními magnety a jejich návrhu, včetně konkrétních případových studií společně s popisem měření na vyrobených vzorcích. Přestože se autor práce věnuje i výzkumu a vývoji trojfázových synchronních reluktančních strojů a jednofázových synchronních strojů spouštěných ze sítě, není jim věnována v této práci pozornost z důvodu udržení rozsahu prezentovaných informací v rozumných mezích.

2 Teorie synchronních strojů spouštěných ze sítě

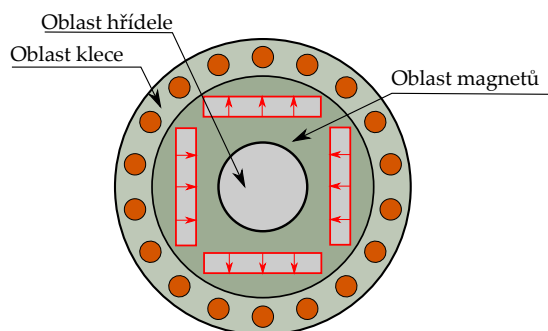
Trojfázový synchronní stroj spouštěný ze sítě s permanentními magnety obvykle využívá obdobné konstrukční provedení jako stroj asynchronní. Jeho hlavními částmi jsou svazek plechů statoru, statorové vinutí, rotor s klecí nakrátko a permanentními magnety, svorkovnice, ložiska, ložiskové štíty, kostra a ventilátor. Uspořádání těchto částí je patrné z vizualizace na Obr. 2.1.

Svazek plechů statoru je zalisován v kostře statoru, která dává stroji vnější tvar a umožňuje jeho upevnění k základu prostřednictvím dvojice patek. Plechy rotoru jsou nalisovány na hřídel, která je uložena ve dvou ložiscích. Plechy rotoru jsou tvarově uzpůsobeny tak, aby do nich bylo možné umístit tyče klece rotoru a také permanentní magnety. Na obou koncích rotorového svazku se pak nachází kruhy nakrátko zajišťující vodivé spojení mezi tyčemi.

Samotná ložiska jsou upevněna v ložiskových štítech, které jsou tvarově uzpůsobeny tvaru kostry a to tak, aby s ní tvořily po smontování jednotný celek. Přívod napájení k vinutí statoru zajišťuje statorová svorkovnice zakrytá plechovým krytem. Chlazení stroje je pak obvykle zajištěno ventilátorem, který je nasazen z vnějšku na hřídel. Ventilátor ofukuje proudem vzduchu žebrovaný povrch statoru a jeho otáčky jsou dány otáčkami stroje.



Obr. 2.1: Konstrukční provedení trojfázového synchronního stroje pro přímé spouštění ze sítě. Obrázek je upraven a převzat z autorovy publikace [25].



Obr. 2.2: Obecné rozdělení čtyř-pólového rotoru synchronního stroje spouštěného ze sítě do tří oblastí.

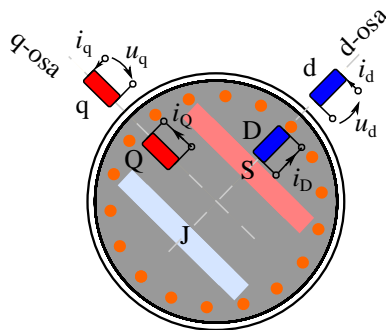
Hlavním konstrukčním rozdílem oproti asynchronnímu stroji je zejména provedení rotoru. Tento rotor nemá pouze klec nakrátko, ale má navíc i drážky pro uložení permanentních magnetů. Obecně se dá říct, že klec nakrátko zajistí rozběh stroje po připojení k síti, a magnet naopak zabezpečí provoz na synchronních otáčkách. Rotor synchronního stroje spouštěného ze sítě s permanentními magnety tak může vypadat jako rotor znázorněný na Obr. 2.2. Na vyobrazeném rotoru lze rozlišit tři oblasti. První je oblast klece, která umísťena blízko povrchu rotoru tak, aby měla dobrou vazbu s magnetickým polem ve vzduchové mezeře. Druhou je oblast, ve které se nachází magnet a třetí je otvor pro hřídel. Návrhář tohoto typu stroje musí vhodně zvolit jejich proporce k dosažení požadovaných provozních vlastností stroje. Často jsou tak drážky pro klec rotoru nižší výšky, než je tomu u strojů asynchronních, a to z toho důvodu, aby vznikl dostatečný prostor pro umístění magnetů. Synchronní stroje spouštěné ze sítě se z pravidla nerealizují s magnety na povrchu, i když takové provedení lze najít v některých publikacích, např. v [26].

2.1 Matematický model

Pro analytický výpočet chování synchronního stroje spouštěného ze sítě v přechodném a ustáleném stavu je nutné jej vhodně matematicky popsat. Běžně je pro modelování střídavých točivých strojů využívána teorie prostorového vektoru, která byla poprvé představena v Evropě v roce 1950 (Kovács a Rác) [27]. Tato teorie popisuje elektromagnetické veličiny střídavých strojů prostřednictvím vektorů. Teorie prostorového vektoru a její využití pro analýzu přechodných dějů střídavých strojů byla podrobně popsána v [27] a pracuje s následujícími zjednodušujícími předpoklady:

- 1) rozložení magnetické indukce po obvodu vzduchové mezery je sinusové, tzn. prostorové harmonické složky jsou zanedbány,
- 2) magnetizační charakteristika stroje je lineární, tzn. je zanedbána magnetická saturace,
- 3) ve stroji nevznikají ztráty v železe, tzn. ztráty hysterezí a vířivými proudy ve svazku rotoru a statoru jsou nulové, a
- 4) odpory a indukčnosti všech vinutí jsou nezávislé na teplotě a napájecí frekvenci.

Matematický model synchronního stroje s permanentními magnety spouštěného ze sítě vychází z modelu klasického synchronního stroje s vinutým rotorem a tlumícím vinutím popsaného v [27].



Obr. 2.3: DQ model synchronního stroje spouštěného ze sítě s permanentními magnety.

Hlavní rozdíl mezi těmito modely je záměna budícího vinutí v rotoru za permanentní magnet, který je zdrojem konstantního magnetického spřaženého toku ψ_{PM} .

Matematický model v d-q osách je ukázán na Obr. 2.3. Vinutí klece nakrátko je rozloženo do dvou na sebe kolmých vinutích D a Q, která jsou vyzkatována. Trojfázové vinutí statoru je nahrazeno dvěma vinutími d a q. Na d-ose se nachází s vinutím klece D a vinutím statoru d také permanentní magnet, který vytváří magnetický spřažený tok ψ_{PM} .

Protože matematický model synchronního stroje je popsán v rotorových souřadnicích, jsou napěťové rovnice synchronního stroje spouštěného ze sítě s permanentními magnety následující:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q, \quad (2.1.1)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d, \quad (2.1.2)$$

$$0 = R_D I_D + \frac{d\psi_D}{dt}, \quad (2.1.3)$$

$$0 = R_Q I_Q + \frac{d\psi_Q}{dt}. \quad (2.1.4)$$

Dále pro rovnice magnetických spřažených toků platí:

$$\psi_d = L_d i_d + L_{dD} i_D + \psi_{PM}, \quad (2.1.5)$$

$$\psi_D = L_{dD} i_d + L_D i_D + \psi_{PM}, \quad (2.1.6)$$

$$\psi_q = L_q i_q + L_{dQ} i_Q, \quad (2.1.7)$$

$$\psi_Q = L_{dQ} i_q + L_Q i_Q. \quad (2.1.8)$$

Pokud nejsou otáčky rotoru konstantní, pak pohybová rovnice nabývá tvaru

$$\frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} + M_{zat}. \quad (2.1.9)$$

Pro zahrnutí pozice rotoru v diferenciálních rovnicích je pro úhlovou rychlost používána následující rovnice

$$\omega = \frac{d\gamma}{dt}. \quad (2.1.10)$$

Nicméně daleko praktičtější je využití vzorce zahrnujícího zátěžný úhel, namísto pozičního úhlu rotoru. Zátěžný úhel je obvykle v technické literatuře značen jako δ a jedná se o úhel mezi fázorem

napájecího napětí a napětí naprázdno, které leží v příčné ose. Zavedením zátěžného úhlu přechází rovnice (2.1.10) do tvaru

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s. \quad (2.1.11)$$

2.2 Ustálený stav

Pro popis ustáleného stavu po rozběhu synchronního stroje spouštěného ze sítě je využit matematický model popsáný v rámci kapitoly 2.1. Napětíové rovnice uvedené v minulé kapitole (2.1.1) a (2.1.2) lze přepsat do tvaru

$$U_d = R_s I_d - \omega \Psi_q, \quad (2.2.1)$$

$$U_q = R_s I_q + \omega \Psi_d. \quad (2.2.2)$$

V rovnicích spřažených magnetických toků (2.1.5) a (2.1.6) jsou kvůli předpokladu nulového proudu v kleci rotoru vynechány součiny vzájemných indukčností s rotorovými proudy,

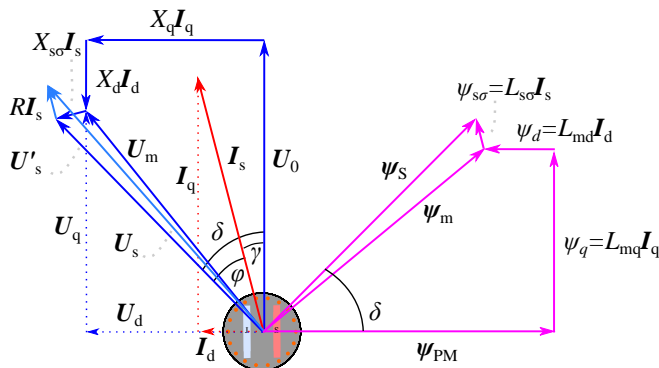
$$\Psi_d = L_d I_d + \Psi_{PM}, \quad (2.2.3)$$

$$\Psi_q = L_q I_q. \quad (2.2.4)$$

Prostorový vektor napětí statoru je pak dán kombinací složek napětí v podélné (2.2.1) a příčné ose stroje (2.2.2)

$$\mathbf{U}_s = R_s \mathbf{I}_s + j\omega \Psi_d - \omega \Psi_q = R_s \mathbf{I}_s + j\omega L_d I_d - \omega L_q I_q + \mathbf{U}_0. \quad (2.2.5)$$

Rovnici v ustáleném stavu lze graficky vyjádřit prostřednictvím fázorového diagramu Obr. 2.4, ve kterém délky zobrazených fázorů odpovídají amplitudám fázových veličin. Složky napětí statoru



Obr. 2.4: Fázorový diagram synchronního stroje spouštěného ze sítě pro ustálený stav se zahrnutým úbytkem na odporu vinutí statoru a rozptylovým magnetickým tokem. Diagram je kreslen pro motorický režim.

$$\mathbf{U}_s = U_d + jU_q, \quad (2.2.6)$$

jsou dány vztahy

$$U_d = -\mathbf{U}_s \sin \delta, \quad (2.2.7)$$

$$U_q = \mathbf{U}_s \cos \delta. \quad (2.2.8)$$

Kde zátěžný úhel δ lze nalézt jako úhel mezi fázorem spráženého magnetického toku permanentního magnetu ψ_{PM} a spráženého magnetického toku ve vzduchové mezeře ψ_m . Tento úhel je také mezi fázorem napětí statoru a indukovaným napětím naprázdno, nebo-li zátěžný úhel je součtem proudového úhlu γ (úhel mezi fázorem proudu statoru a indukovaného napětí naprázdno) a fázového posunu φ

$$\delta = \gamma + \varphi. \quad (2.2.9)$$

Z fázorového diagramu na Obr. 2.4 lze pro složky proudu napsat rovnice

$$I_d = -\mathbf{I}_s \sin(\delta \pm \varphi) = -\mathbf{I}_s \sin \gamma, \quad (2.2.10)$$

$$I_q = \mathbf{I}_s \cos(\delta \pm \varphi) = \mathbf{I}_s \cos \gamma. \quad (2.2.11)$$

Pro ustálený stav stroje, přechází pohybová rovnice (2.1.9) do tvaru

$$M_e = m_s p (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d). \quad (2.2.12)$$

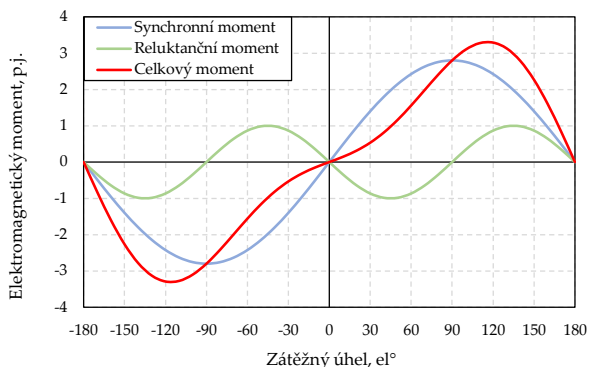
V této rovnici vyjadřuje m_s počet fází, který nahradil číslo 3 z levé strany rovnice (2.1.9). Tato modifikace je provedena za účelem zobecnění vztahu pro n -fázový stroj. Další úpravou této rovnice lze získat výsledný vztah pro moment synchronního stroje v závislosti na napájecím napětí U_s a zátěžném úhlu δ ,

$$M_e = \frac{m_s}{\Omega_{syn}} \left[\frac{U_0 \mathbf{U}_s \sin \delta}{X_d} + \frac{U_s^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right]. \quad (2.2.13)$$

Příklad průběhu elektromagnetického momentu vypočteného touto rovnicí je pro napájecí napětí $U_s = 1$ p.j. v závislosti na zátěžném úhlu δ ukázán na Obr. 2.5. Vykreslený moment odpovídá případu, kde $X_q > X_d$. V případě, kdyby podélná reaktance X_d byla větší než příčná reaktance X_q , by reluktanční moment byl kladný mezi $\delta = 0^\circ$ a $\delta = 90^\circ$. Tento případ nastává u reluktančních strojů.

Uvedená rovnice momentu (2.2.13) byla odvozena za předpokladu, že odpor vinutí statoru R_s je roven nule. Toto je běžný předpoklad zavedený v knihách zabývajících se teorií elektrických strojů [28–30]. Zjednodušením ve formě zanedbání odporu vinutí statoru $R_s = 0$ se nedopouštíme velké chyby zejména u strojů velkých výkonů, kde relativní hodnota tohoto odporu je zanedbatelně malá. Jako příklad lze uvést generátory s výkonem v řádech MW, určené např. pro výrobu elektrické energie v elektrárnách.

Naopak synchronní stroje spouštěné ze sítě se obvykle realizují v jednotkách kW. Tento rozsah plyne z toho, že právě pro nízké výkony jsou schopny tyto stroje dosahovat účinností, které jsou běžnými asynchronními stroji nerealizovatelné [9]. Neboli právě v malých výkonech jsou nejvíce konkurenceschopné s ostatními typy elektrických strojů. Na rozdíl od velkých strojů nelze v kW výkonové hladině zanedbat odpor vinutí statoru.



Obr. 2.5: Závislost složek momentu synchronního stroje spouštěného ze sítě na zátěžném úhlu při $I_s = 1$ p.j., $U_s = 1$ p.j., $U_0 = 0,7$ p.j., $X_d = 0,25$ p.j., $X_q = 0,5$ p.j. a $\Omega_{\text{syn}} = 1$ p.j..

Úpravou rovnice (2.2.12), při uvažování nenulového odporu vinutí statoru $R_s \neq 0$, je možné získat výslednou rovnici vyjadřující závislost elektromagnetického momentu M_e na zátěžném úhlu δ a napájecím napětí U_s v následující podobě:

$$M_e = \frac{m_s}{\Omega_{\text{syn}}} \left[-\frac{U_s^2 R_s}{R_s^2 + X_d X_q} + \frac{U_s U_0 (R_s \cos \delta + X_q \sin \delta)}{R_s^2 + X_d X_q} + \frac{U_s^2 (X_d - X_q)}{2 (R_s^2 + X_d X_q)} \sin 2\delta \right]. \quad (2.2.14)$$

Odvozená rovnice momentu (2.2.14) má tři členy, přičemž první člen reprezentuje Jouleovy ztráty ve vinutí statoru P_{Cus} , druhý člen je momentem synchronním a poslední člen se váže k reluktančnímu momentu. V případě, kdy odpor vinutí statoru R_s bude nulový, bude tato rovnice shodná s rovnicí (2.2.13).

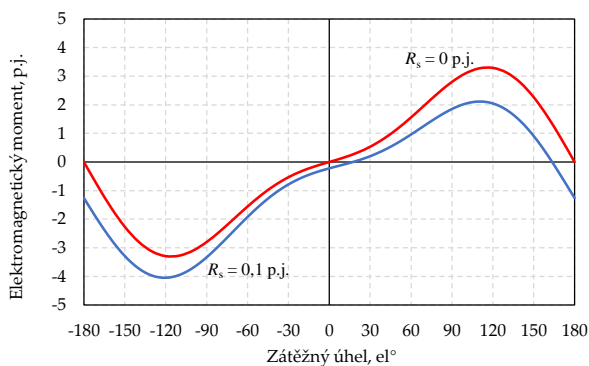
Rovnice (2.2.14) je vynesena do grafu na Obr. 2.6 pro nulový a malý odpor vinutí statoru R_s . Z vynesené závislosti je patrné, že i při malém $R_s = 0.1$ p.j. dochází k poměrně výraznému poklesu elektromagnetického momentu v motorické oblasti. To je dáno tím, že část příkonu je spotřebována na krytí Jouleových ztrát ve vinutí statoru. Je zřejmé, že u strojů malých výkonů, kde odpor může nabývat významné hodnoty, nelze jeho velikost zanedbat v rámci analyticky počítané momentové charakteristiky. Tento poznatek neplatí pouze pro synchronní stroje spouštěné ze sítě, ale rovněž také pro všechny typy synchronních strojů.

2.3 Asynchronní moment

Předchozí kapitola byla věnována matematickému popisu synchronního stroje spouštěného ze sítě a jeho ustálenému stavu. Tato kapitola je zaměřena na popis působících momentů během rozběhu stroje, jejichž znalost je nutná pro správný návrh.

Pro vyjádření elektromagnetického momentu generovaného strojem během rozběhu lze vyjít z levé strany rovnice (2.1.9), do které je za magnetické spřažené toky dosazeno z rovnic (2.1.5) a (2.1.7)

$$M_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} p (L_{\text{md}} (i_d + i_D + i_{\text{PM}}) i_q - L_{\text{mq}} (i_q + i_Q) i_d). \quad (2.3.1)$$



Obr. 2.6: Závislost složek momentu synchronního stroje spouštěného ze sítě na zátěžném úhlu pro různou velikost R_s při $I_s = 1$ p.j., $U_s = 1$ p.j., $U_0 = 0,7$ p.j., $X_d = 0,25$ p.j., $X_q = 0,5$ p.j. a $\Omega_{\text{syn}} = 1$ p.j..

Pro zjednodušení jsou členy s rozptylovou indukčností zanedbány. Jednoduchou úpravou lze rovnici přepsat do více názorného tvaru

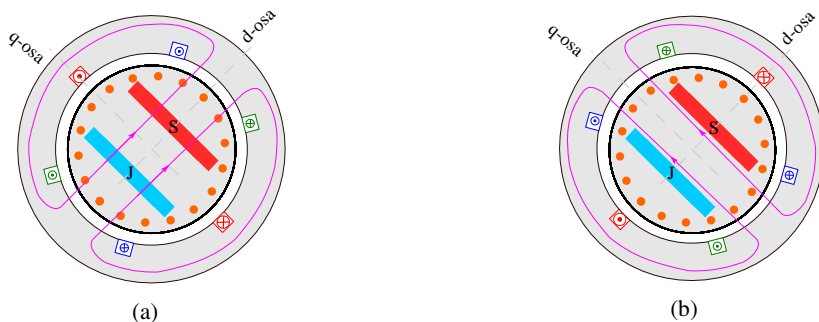
$$M_e = \frac{3}{2}p [\psi_{PM}i_q + (L_{md} - L_{mq})i_d i_q + L_{md}i_q i_D - L_{mq}i_d i_Q] = M_{pm} + M_{rel} + M_{klec}. \quad (2.3.2)$$

Tato rovnice obsahuje následující členy:

- moment vytvářený působením magnetického spřaženého toku magnetu a proudu v příčné ose stroje $\psi_{PM}i_q$,
- složku relukančního momentu vznikající z magnetické anizotropie stroje $(L_{md} - L_{mq})i_d i_q$, a
- složku momentu vznikající průchodem proudů v kleci nakrátko při přechodných dějích $L_{md}i_q i_D - L_{mq}i_d i_Q$.

U synchronních strojů spouštěných ze sítě se narozdíl od strojů asynchronních nerovná indukčnost podélné a příčné osy $L_d \neq L_q$. V podélné d - ose tok prochází vzduchovou mezerou do rotoru, kde překonává dvakrát výšku permanentního magnetu, viz Obr. 2.7(a). Relativní permeabilita permanentního magnetu μ_{rpm} je téměř shodná s permeabilitou vzduchu. Permanentní magnet tak představuje poměrně velký odpor v cestě magnetického toku, a díky tomu je indukčnost synchronního stroje spouštěného ze sítě v podélné ose relativně malá. Naproti tomu magnetický spřažený tok v q - ose neprochází v rotoru permanentním magnetem a má tak v této ose více vodivou cestu. Cesta tohoto toku je ukázána na Obr. 2.7(b). Synchronní stroje spouštěné ze sítě s permanentním magnetem tak mají větší indukčnost v příčné ose ve srovnání s osou podélnou.

Výpočet momentu během rozběhu stroje dle rovnice (2.3.2) komplikuje nelinearita magnetického materiálu. Při startu stroje je odebíraný proud mnohem vyšší než jmenovitý a dochází k přesycování částí magnetického obvodu. Indukčnosti v podélné a příčné ose se tak během rozběhu mění. Pro přesný výpočet momentu během rozběhu je tedy nutné provést analýzu numerickými metodami jako je např. metoda konečných prvků.



Obr. 2.7: Magnetický tok synchronního stroje spouštěného ze sítě s permanentním magnetem (a) v podélné d- ose a (b) v příčné q- ose.

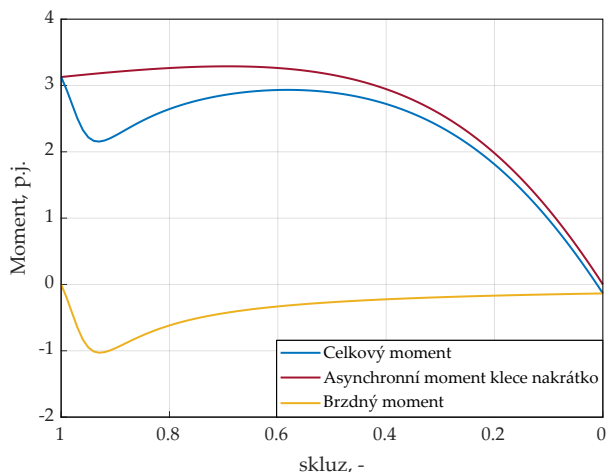
2.4 Momentová charakteristika

Jednou z typických závislostí udávanou pro běžné asynchronní stroje je tzv. momentová charakteristika [29], [28]. Tato charakteristika vyjadřuje závislost středního momentu stroje na otáčkách, přičemž střední hodnotou je myšlena střední hodnota momentu během elektrické periody pro všechny otáčky.

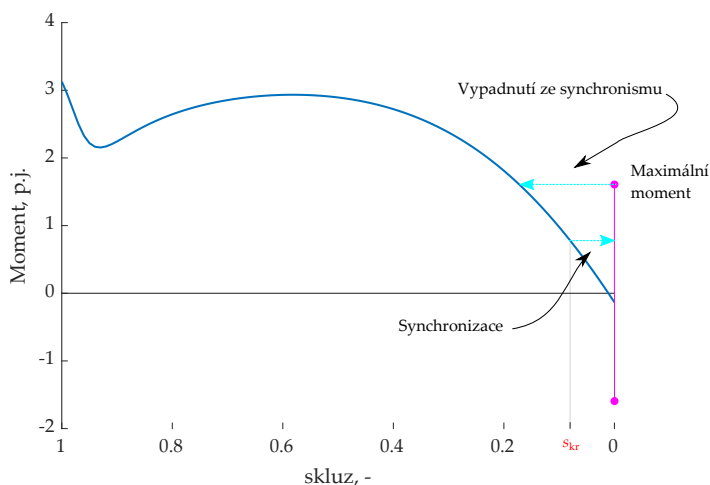
Střední hodnota momentu vytvářeného klecí, je vynesena červenou křivkou v grafu na Obr. 2.8. Spolu s tímto momentem je v grafu vykreslen rovněž brzdny moment. Součtem momentu klece a brzdnyho momentu je získána modrá křivka znázorňující celkový moment. Z Obr. 2.8 je zřejmé, že brzdny moment snižuje celkový moment stroje v oblasti nižších otáček, díky čemuž může být problematické spouštět tímto typem stroje některé druhy zátěže. Pro svou momentovou charakteristiku jsou synchronní stroje spouštěné ze sítě preferovány zejména pro pohon zátěží s ventilátorovou charakteristikou.

Stroj při zrychlování postupně snižuje svůj skluz a po překročení kritického skluzu s_{kr} dochází ke vtažení do synchronismu, Obr. 2.9. Pokud je stroj úspěšně synchronizován tak běží na synchronních otáčkách. Maximum jeho momentu je pak dáno rovnicí pro moment synchronního stroje v ustáleném stavu (2.2.14). Při překročení maxima momentu v synchronních otáčkách stroj vypadáva ze synchronismu a pracuje na momentové charakteristice vynesené na Obr. 2.9. Nicméně díky významným pulzujícím složkám asynchronního momentu (2.3.2) je provoz stroje na této charakteristice hlučný a momentové pulzace zatěžují rovněž i spojky, případně další zařízení připojené k hřídeli stroje.

V případě, kdy by moment zvratu stroje byl nižší, než maximální synchronní moment, došlo by po vypadnutí ze synchronismu k zastavení stroje. Závislost střední hodnoty asynchronního momentu klece nakrátko je ovlivněna stejně jako u konvenčních asynchronních strojů [29] provedením drážek rotoru. Pokud se bude odpor klece zvyšovat (např. snižováním průřezu tyčí) bude se posunovat moment zvratu směrem do hodnot vyšších skluzů. Velikost momentu zvratu asynchronní charakteristiky je pak ovlivněna reaktancemi stroje.



Obr. 2.8: Momentová charakteristika synchronního stroje spouštěného ze sítě s permanentními magnety se zakreslenými složkami momentu.

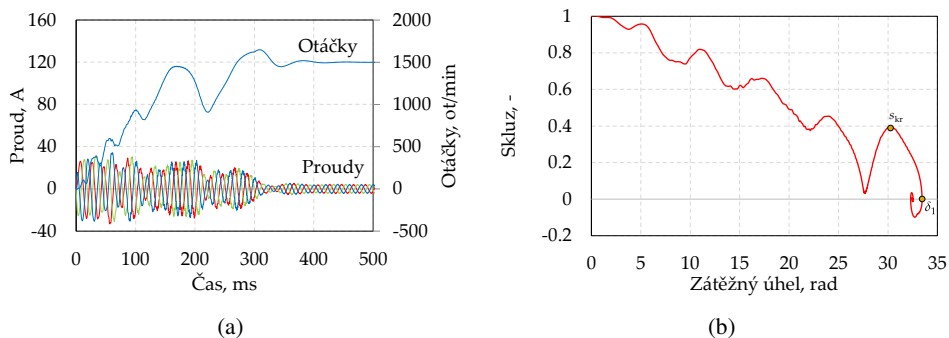


Obr. 2.9: Momentová charakteristika synchronního stroje spouštěného ze sítě s permanentními magnety a vyznačenými momentovými limity pro provoz při synchronních otáčkách.

2.5 Synchronizace

Proces přechodu z asynchronních otáček do synchronních je nazýván pojmem synchronizace. Ke vtažení do synchronismu dochází pod skluzem, který se často označuje jako kritický skluz s_{kr} [31], [32].

Na Obr.2.10(a) je ukázán příklad úspěšné synchronizace stroje. Je patrné, že stroj se téměř povede synchronizovat v čase přibližně 180 ms, avšak otáčky po tomto okamžiku klesají a k úspěšné



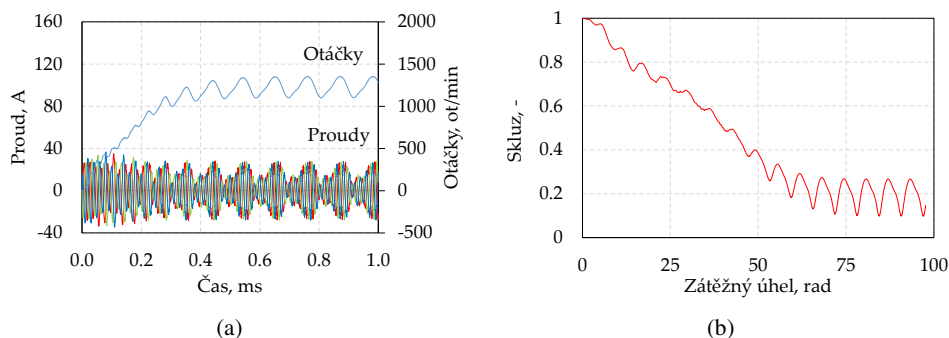
Obr. 2.10: Vypočtené průběhy (a) proudů a otáček na čase, a (b) skluzu na zátěžném úhlu pro úspěšnou synchronizaci. Prezentované průběhy byly získány výpočtem na provedení stroje T2, které bude ukázáno později v této práci a to v rámci kapitoly 4.1.

synchronizaci dojde až v čase 350 ms. K poklesu otáček dochází proto, že v tento okamžik má stroj takový zátěžný úhel, při kterém není schopen vyvinout dostatečný moment pro vtažení rotoru do synchronních otáček.

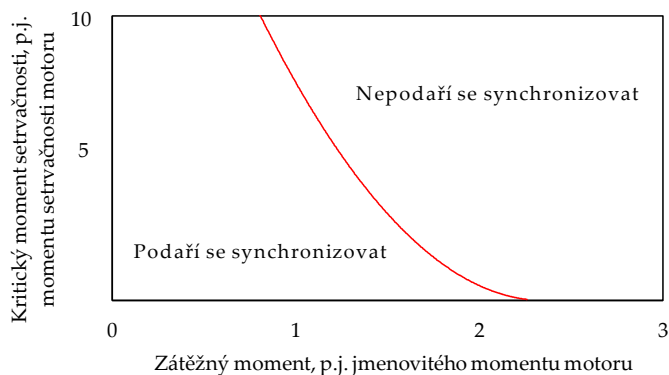
Vedlejší Obr. 2.10(b) ukazuje průběh skluzu na zátěžném úhlu po dobu celého tohoto procesu. Zejména důležitý je finální okamžik této křivky, kdy skluz roste téměř na hodnotu 0,4 a po tomto okamžiku klesá, a při zátěžném úhlu $\delta_1 = 33,45$ rad je poprvé nulový. Aby došlo k úspěšné synchronizaci, musí být stroj schopen vyvinout dostatečnou energii pro zrychlení rotoru z bodu $s = s_{kr}$ do bodu $s = 0$, který nastává při zátěžném úhlu δ_1 . V bodu při kterém se rotor otáčí skluzem $s = s_{kr}$ je změna skluzu na zátěžném úhlu nulová $\frac{ds}{d\delta} = 0$ a tedy stroj na malou chvíli nezrychluje, ale jeho zátěžný úhel neustále roste (rotor se otáčí pomaleji než točivé magnetické pole statoru). Pokud stroj bude schopen vyvinout dostatek kinetické energie, tak za tímto bodem dochází k vtažení do synchronismu, a to při zátěžném úhlu δ_1 .

Naopak pokud stroj není schopen vyvinout dostatečnou kinetickou energii pro zrychlení rotoru tak k synchronizaci nedochází. Otáčky v takovém případě budou pulzovat pod synchronními otáčkami tak, jak je ukázáno na Obr. 2.11(a). Odpovídající průběh skluzu na zátěžném úhlu je prezentován na vedlejším Obr. 2.11(b). Z něj je patrné, že stroj se opakovaně snaží zrychlit z kritického skluzu do synchronních otáček, ale protože není schopen vyvinout dostatek energie je tento proces neúspěšný a opakuje se periodicky dokola. Vzhledem k tomu, že při tomto stavu stroj vykazuje neustálé pulzace otáček, ale také i poměrně významné pulzace proudu Obr. 2.11(b), není vhodné dlouhodobě v tomto stavu stroj udržovat v provozu.

Jak bylo ukázáno v [18] tak malý nárůst zátěžného momentu způsobí velký pokles momentu setrvačnosti, který je schopen stroj vtáhnout do synchronismu. Stejně jako u asynchronních strojů je tedy pro synchronní stroje spouštění ze sítě výhodné, aby momentová charakteristika Obr. 2.9 byla v oblasti malých skluzů co nejstrmější. To by ale vyžadovalo hluboké tyče nakrátko, pro které není často u těchto typů strojů v rotoru prostor. Navíc by klec nakrátko s menším odporem měla menší záběrný moment, což by v kombinaci s brzdým momentem magnetu mohlo vést k tomu, že by stroj ukončil svůj rozběh na malých otáčkách. Synchronizaci lze také zlepšit instalací magnetů, které poskytují silnější pole, avšak tímto by byl opět zvýšen brzdý moment. Je zřejmé, že při návrhu



Obr. 2.11: Vypočtené průběhy (a) proudů a otáček na čase, a (b) skluzu na zátěžném úhlu pro neúspěšnou synchronizaci. Prezentované průběhy byly získány výpočtem na provedení stroje T2, které bude ukázáno později v této práci a to v rámci kapitoly 4.1.



Obr. 2.12: Synchronizační schopnost synchronního stroje spouštěného ze sítě vyjádřená prostřednictvím synchronizační křivky.

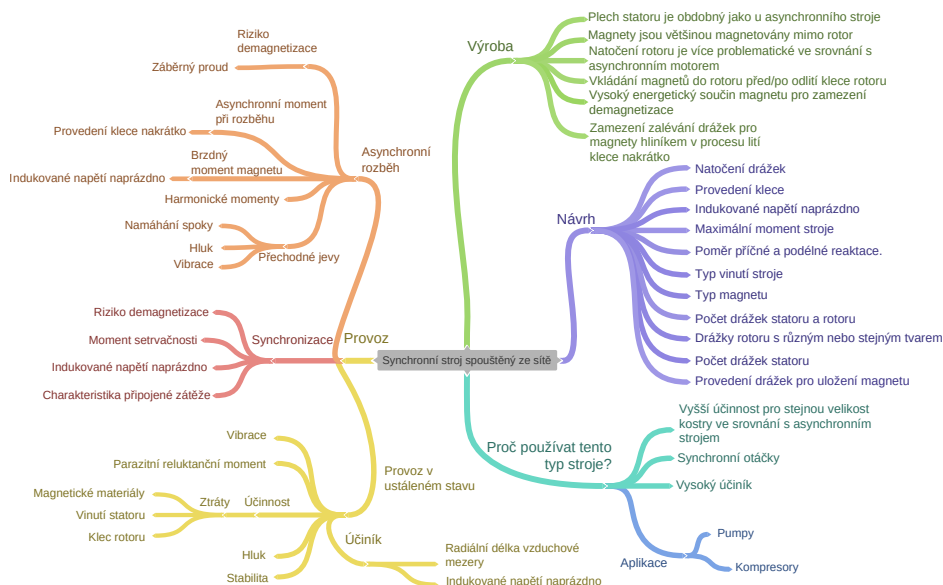
synchronních strojů ze sítě existuje řada konfliktních parametrů.

Pro synchronní stroje spouštěné ze sítě je zvykem vyjadřovat jejich schopnost synchronizace prostřednictvím synchronizační křivky. Tato křivka (Obr. 2.12) vyjadřuje závislost kritického momentu setrvačnosti na zátěžném momentu stroje. V oblasti nalevo od křivky dochází k úspěšnému vtažení rotoru stroje do synchronismu, a naopak v oblasti napravo k němu nedojde. Tuto křivku lze číst tak, že pokud bychom například stroj zatížili od nuly otáček jmenovitým momentem, tak setrvačnost zátěže, kterou je maximálně schopen rozběhnout, je přibližně rovna 8mi násobku momentu setrvačnosti rotoru stroje. Za povšimnutí stojí u této křivky již zmíněný fakt, a to, že s rostoucím zátěžným momentem prudce klesá setrvačnost se kterou je stroj schopen se vtáhnout do synchronismu.

3 Návrhové metody a aspekty

Jak plyne z předcházející kapitoly zaměřené na teorii synchronních strojů spouštěných ze sítě, je jejich návrh relativně komplexní problematika. Návrhář musí mít dostatečný vhléd do principů funkce a provozních stavů asynchronních i synchronních elektrických strojů. U dobře navrženého synchronního stroje spouštěného ze sítě se předpokládají dobré rozběhové vlastnosti, čímž se myslí zejména schopnost rozběhu a synchronizace s různými typy zátěže připojenými na volný konec hřídele stroje. Dále jsou také žádoucí lepší provozní parametry v ustáleném stavu než u srovnatelného asynchronního stroje, a to z důvodu konkurenceschopnosti a kompenzace vyšších výrobních nákladů. Provázanost jednotlivých provozních stavů ale i další aspekty návrhu tohoto typu stroje graficky zachycuje myšlenková mapa vyobrazená na Obr. 3.1.

Z hlediska provozních vlastností lze rozlišit tři důležité stavy tohoto stroje, a to rozběh, synchronizaci a provoz v ustáleném stavu. Jak ukázala kapitola 2.3, rozhoduje o velikosti momentu při asynchronním rozběhu provedení klece nakrátko, poměr reaktance v podélné a příčné ose, a dále také velikost spřaženého magnetického toku permanentního magnetu, který generuje nežádoucí brzdný moment.



Obr. 3.1: Myšlenková mapa synchronního stroje spouštěného ze sítě s permanentními magnety.

Maximální brzdny moment generovaný permanentním magnetem je přímo úměrný čtverci spřaženého magnetického toku permanentního magnetu, a tím tedy také i čtverci indukovaného napětí naprázdno. Velikost indukovaného napětí naprázdno se u běžných synchronních strojů s permanentními magnety volí v hodnotě blízké jmenovitému svorkovému napětí napájecího zdroje, a to například jako 90 %. U synchronních strojů spouštěných ze sítě se ale musí vzít v potaz nežádoucí vliv velikosti tohoto napětí na rozběhové vlastnosti, a proto například publikace [33] doporučuje velikost indukovaného napětí naprázdno volit v okolí 70 % napětí sítě.

Při rozběhu je nutné dále ověřit, zda nevzniká potenciální riziko demagnetizace magnetů umístěných v rotoru a dále se také mohou při rozběhu projevit nežádoucí jevy jako jsou zvýšené vibrace, neúměrné namáhání spojky a vyšší hluk. Obzvláště důležité je také zkontrolovat velikost odebíraného záběrného proudu, který může dosahovat zejména v prvních okamžicích po připojení do sítě podstatně vyšších hodnot, než je tomu u asynchronních strojů. O úspěšné synchronizaci, jak již bylo uvedeno v teoreticky zaměřené kapitole 2, rozhoduje zejména charakteristika zátěže, moment setrvačnosti ale také i indukované napětí naprázdno. Vhodné konfigurace rotorů s ohledem na rozběh byly ukázány v publikaci [34] a podrobnější analýzy rozběhů v [35]. Těsně před synchronizací dochází také ke zvýšenému riziku demagnetizace permanentních magnetů v rotoru stroje, které je dáno tím, že skluz je poměrně malý a tak klec nakrátko neposkytuje téměř žádné stínění pro magnety. Riziko demagnetizace lze snížit vhodným provedením geometrie rotoru, například tak, jak tomu bylo ukázáno v [36].

V ustáleném provozním stavu návrháře zajímají zejména parametry jako je účinnost, účinník, stabilita provozu, přetížitelnost, oteplení, vibrace a hluk. Účinnost stroje je ovlivněna ztrátami ve vinutích a v železe stroje, přičemž samotná velikost účinníku ovlivňuje velikost ztrát ve vinutí statoru. Obecně řečeno indukované napětí naprázdno volené blízko napětí svorkovému poskytuje vyšší účinník a tím i menší ztráty ve vinutí statoru, ale na druhou stranu zhoršuje rozběhové vlastnosti stroje.

Jak plyne z dosavadního popisu a myšlenkové mapy na Obr. 3.1, je právě indukované napětí naprázdno parametrem, který má vliv na všechny provozní vlastnosti stroje. Jeho volba je tak kritická z hlediska dosažitelných parametrů a chování za provozu navrženého synchronního stroje spouštěného ze sítě s permanentními magnety.

Dále by měl návrh stroje zohlednit aspekty související s jeho vlastní výrobou. Statorový plech lze u těchto strojů použít standardního tvaru, jako je běžný pro stroje asynchronní. Magnety by měli být magnetovány mimo rotor a vkládány až po vytvoření klece nakrátko. V opačném případě může být magnetování v rotoru po vytvoření klece velice obtížné, a to protože klec nakrátko může působit jako stínění pro pole magnetizující magnet. Avšak existují i publikace, které řešili magnetování magnetu umístěného v již vyrobeném rotoru, např. [37].

Správně navržený stroj by měl vzít všechny výše zmíněné aspekty v potaz a nabídnout ve výsledku vyšší účinnost pro stejnou velikost kostry jako u srovnatelného asynchronního motoru, vyšší účinník a také stabilní provoz na synchronních otáčkách s dostatečnou přetížitelností. S ohledem na rozběhové vlastnosti těchto typů strojů jsou jejich obvyklé aplikace u pohonů nevyžadujících vysoký záběrný moment, např. pumpy a kompresory.

4 Případové studie

4.1 Výzkum a vývoj synchronního stroje malého výkonu spouštěného ze sítě

Tato studie si klade za cíl vývoj synchronního stroje spouštěného ze sítě s permanentními magnety o výkonu 1,5 kW. Jak ukázala úvodní kapitola, jsou to právě malé výkony, kde popisovaný typ stroje má konkurenční výhodu z hlediska energetických úspor oproti klasickému asynchronnímu stroji.

Jsou zvoleny celkem dva způsoby návrhu. První, bez použití optimalizačních metod s cílem vyvinutí efektivní metodiky návrhu stroje, která dokáže velice rychle určit základní rozměry. Druhý, který využívá Samo-organizující se migrační algoritmus [38] pro optimalizaci. Za účelem snížení nákladů na výrobu je v obou případech pro zjednodušení využito standardně vyráběných dílů asynchronních elektromotorů. Vývoj se tak soustředí pouze na geometrii rotoru a počet závitů statorového vinutí.

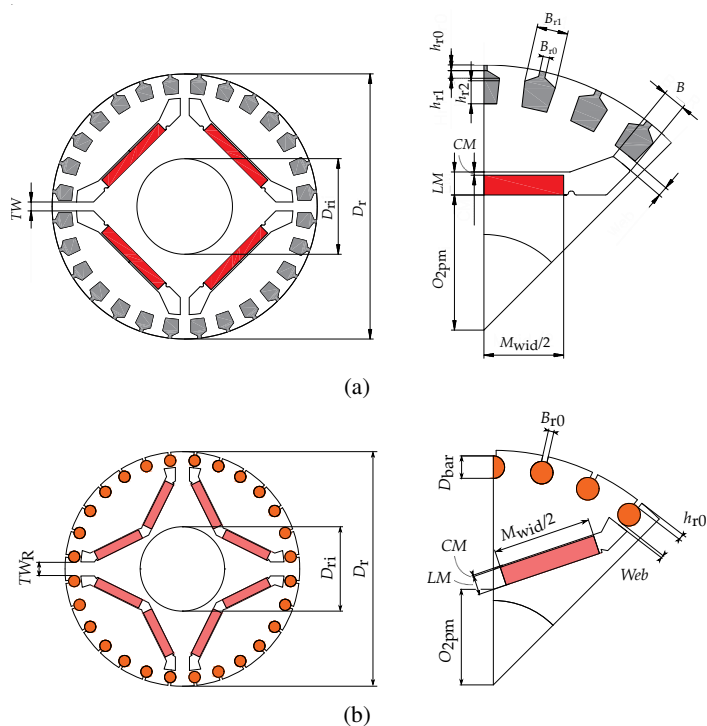
Jako referenční, respektive výchozí stroj, je ve studii použit komerční čtyřpólový asynchronní motor chlazený ventilátorem o jmenovitém výkonu 1,5 kW při 1500 ot/min. Stroj je určen pro provoz z třífázové sítě 400 V a 50 Hz. Motor je instalován v kostře s patkami a osová výška hřídele stroje je 90 mm. Magnetický obvod je vyroben z oceli M470-50A. Aktivní délka statoru a rotoru je stejná, a to 160 mm. Vnější průměr statoru je 135 mm a rotoru 83,4 mm. Klec nakrátko je tlakově litá do 28 rotorových drážek a statorové třífázové jednovrstvé soustředné vinutí s třemi drážkami na pól a fázi je instalováno v 36 statorových drážkách. Tyče rotoru jsou zešikmeny o jednu drážkovou rozteč statoru. Jedná se o běžnou úpravu, pomocí které se snižuje vliv drážkových harmonických složek magnetické indukce na provoz stroje. Klíčové parametry jsou pro přehled uvedeny v Tab. 4.1.

Pro realizaci rotoru v rámci této studie bez využití optimalizace byla vybrána tangenciální geometrie. Tato geometrie umístí uje do prostoru pod klecí vždy jeden magnet na pól. Rozměrové parametry tohoto provedení rotoru jsou kótovány na Obr. 4.1(a). Pro návrh bez optimalizace je na modelu rotoru doladěna výška magnetu, drážek a ostatních rozměrů dle vyvinuté metodiky. Dále je upraven počet vodičů v drážce statoru pro dosažení žádaného indukovaného napětí. Počet vodičů je konkrétně změněn z 35 pro asynchronní stroj na 39. Výsledná navržená geometrie je pak ukázána na Obr. 4.2(a) s šířkou magnetu 30 mm a výškou 4 mm.

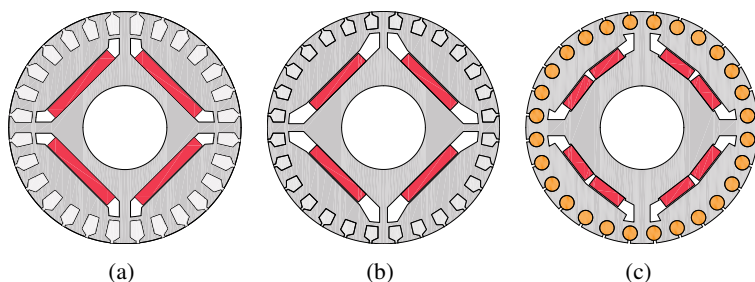
Prvním optimalizovaným rotorem je rotor s tangenciálním uložením magnetu (Obr. 4.1(a)), a druhou zde optimalizovanou geometrií je provedení uvažující uložení magnetů v drážkách ve tvaru V (Obr. 4.1(b)). Aby byl rozdíl mezi optimalizovanými geometriemi výraznější, je pro provedení s drážkou ve tvaru V uvažováno využití měděných tyčí a kruhů nakrátko namísto tlakově lité hliníkové klece.

Tab. 4.1: Klíčové parametry výchozího asynchronního motoru

Parametr	Hodnota
Jmenovitý výkon, kW	1,5
Počet pólů	4
Nominální frekvence, Hz	50
Jmenovité sdružené napětí, V	400
Proud, A	3,59
Napájecí napětí, V	400
Účinnost, %	82,32
Účíník, -	0,72
Zapojení vinutí statoru	Hvězda
Počet drážek statoru	36
Počet drážek rotoru	28
Aktivní délka, mm	160
Vnější průměr statoru, mm	135
Vnější průměr rotoru, mm	83,4
Radiální délka vzduchové mezery, mm	0,3



Obr. 4.1: Parametrický model rotoru s (a) tangenciálně uloženým magnetem, a (b) s uložením magnetů do drážek ve tvaru V a s měděnou klecí.



Obr. 4.2: Výsledný tvar rotoru: (a) navrženého bez využití optimalizačních technik s tangenciálním uložením magnetů a hliníkovou klecí (značeno v dalším textu jako T1 – uspořádání), (b) navrženého s využitím optimalizačního algoritmu a s tangenciálním uložením magnetů (značeno v dalším textu jako T2 – uspořádání), a (c) navrženého s využitím optimalizačního algoritmu a drážkami pro magnet ve tvaru V (značeno v dalším textu jako V – uspořádání).

Obě geometrie získané optimalizací jsou každá zvlášť ukázány na Obr. 4.2(b), a (c). Optimalizace byla nastavena tak, aby došlo k maximalizaci účinnosti a účinníku při současně minimalizaci zvlnění momentu a zohlednění synchronizačních schopností stroje. U optimalizované geometrie s tangenciálním uložením magnetu (Obr. 4.2(b)) došlo ve srovnání s geometrií navrženou bez optimalizace (Obr. 4.2(a)) ke zmenšení magnetů a průřezu klece nakrátko. Rovněž i tvar drážky magnetu má jiný tvar. Optimalizace geometrie s uložením magnetů do tvaru V vedla k jemnému vyklopení magnetů směrem k vnějšímu povrchu rotoru. Obě optimalizované geometrie jsou ale téměř srovnatelné z hlediska šířky zubů, celkového objemu všech magnetů a průřezu tyčí rotoru.

Pro elektromagnetické výpočty je ve vytvořených modelech uvažována ustálená teplota $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je zde tedy pro účely modelování zaveden zjednodušující předpoklad stejného oteplení všech částí stroje a to o 30 K při pokojové teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stejně zjednodušení bylo uvažováno i během optimalizace.

Vypočtené klíčové parametry všech vyvinutých strojů, při jmenovitém zatížení výkonem $1,5\text{ kW}$, jsou uvedeny v Tab. 4.2. Je patrné, že dosahují účinnostní třídy IE4 pro niž je dle [6] spodní limit $88,2\%$.

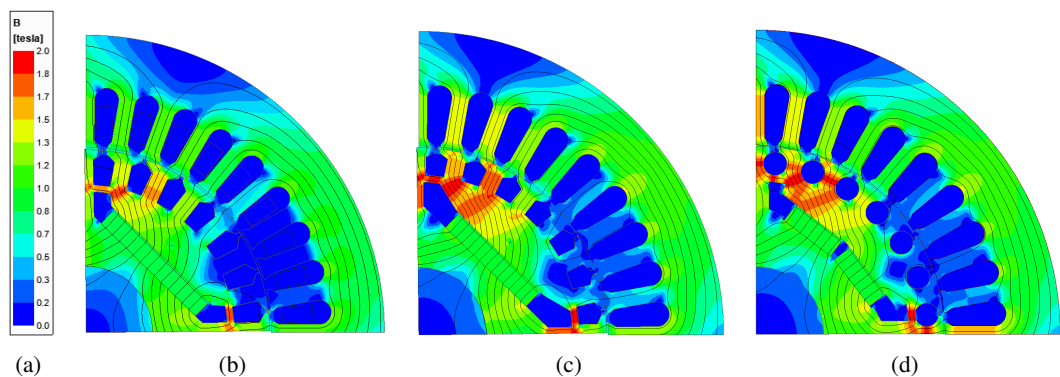
Hlavní rozdíl mezi optimalizovanými variantami a neoptimalizovaným návrhem, je v indukovaném napětí naprázdno. Optimalizovaná provedení mají menší celkovou šířku magnetů, přičemž výška je stejná (nebyla v optimalizaci měněna). Překvapivě má V – uspořádání i přes nižší hodnotu tohoto napětí vyšší účinník než T1 – uspořádání. Zvlnění momentu je nejnižší u optimalizovaného provedení stroje s tangenciálně uloženým magnetem T2 – uspořádání. O něco málo vyšší zvlnění má T1 – uspořádání a nejvyšší vykazuje geometrie V – uspořádání.

Z uvedených ztrát v Tab. 4.2 je zřejmé, že nejvíce jsou u všech srovnávaných variant zastoupeny Jouleovy ztráty ve vinutí statoru. Ty jsou pak nejvyšší u T2 – uspořádání, a naopak nejnižší u provedení V. Ztráty v železe jsou u obou optimalizovaných variant vyšší než u T1 – uspořádání.

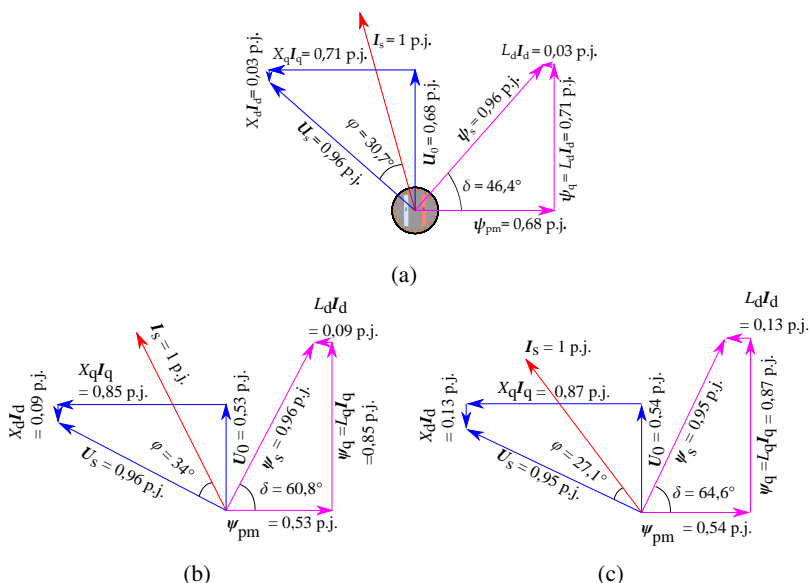
Vypočtené rozložení magnetické indukce je pro vyvinuté stroje při jmenovitém zatížení ukázáno na Obr. 4.3. U všech srovnávaných uspořádání je patrná při zatížení silná reakce kotvy. Ta se projevuje přesycováním jedné strany pólu a odsycením opačné. Na rozdíl od T1 – uspořádání je ale přesycovaná lokalita u optimalizovaných provedení rotorů větší.

Tab. 4.2: Srovnání vypočtených hodnot na elektromagnetických modelech optimalizovaných strojů z Obr. 4.2. Ztráty v železe u obou elektromagnetických modelů jsou násobeny koeficientem 1,8. Tento koeficient by měl vzít v potaz vliv výroby na parametry magnetického obvodu

Parametr	T1 – uspořádání	T2 – uspořádání	V – uspořádání
Moment, Nm	9,60	9,65	9,70
Proud, A	3,00	2,84	2,74
Účinnost, %	89,70	88,60	89,2
Účíník, -	0,86	0,83	0,88
Zvlnění momentu, %	18,31	18,21	23,48
Ind. napětí naprázdno, V	156,40	122,50	123
Ztráty ve vinutí statoru, W	95,90	105,42	85,38
Ztráty v železe, W	53,00	63,95	76,09
Ztráty v kleci nakrátko, W	5,00	6,31	3,56
Dodatečné ztráty, W	7,5	7,5	7,5
Mechanické ztráty, W	11,9	11,9	11,9
Celkové ztráty, W	173,30	195,08	184,43



Obr. 4.3: Rozložení magnetické indukce v příčném řezu synchronního stroje spouštěného ze sítě při jmenovitém zatížení pro (a) T1 –, (b) T2 –, a (c) T3 – uspořádání.



Obr. 4.4: Fázorový diagram pro jmenovité zatížení (a) T1 –, (b) T2 –, a (c) T3 – uspořádání.

Tab. 4.3: Vybrané podélné a příčné složky korespondující s vektorovým diagramem na Obr. 4.4

Parametr	T1- uspořádání	T2- uspořádání	V- uspořádání
I_d , p.j.	-0,27	-0,45	-0,96
I_q , p.j.	0,96	0,89	0,77
U_d , p.j.	-0,69	-0,83	-0,85
U_q , p.j.	0,67	0,47	0,43
L_d , p.j.	0,14	0,19	0,23
L_q , p.j.	0,73	0,95	1,13
L_q/L_d , -	5,21	5,00	4,83

Lepší pochopení pro rozložení toků a provozního stavu motoru při jmenovitém zatížení poskytuje fázorový diagram. Ten je pro oba optimalizované stroje ukázán na Obr. 4.4. S prezentovanými fázorovými diagramy souvisí také Tab. 4.3, která uvádí vybrané parametry použité pro jejich vytvoření. V této tabulce je rovněž srovnán s optimalizovanými provedeními i návrh T1.

Jak je z Tab. 4.3 patrné, největší poměr příčné a podélné indukčnosti (neboli reaktance) vykazují T1 – uspořádání. Optimalizované návrhy mají tento poměr nižší, přičemž geometrie s magnety uspořádanými do V jej má nejmenší. Přestože provedení T1 má ve srovnání s ostatními největší prostorovou složku vektoru proudu v příčné ose, nemá tak velkou reakci kotvy jako geometrie T2 a V. To je dáno tím, že indukčnost příčné a podélné osy je u T1 – provedení nižší ve srovnání s indukčnostmi T2 – a V – provedení.

Provoz naprázdno bez připojení vnějšího zdroje napětí byl pro výsledná provedení studován při 20 °C. Tomu odpovídalo nastavení parametrů magnetu v elektromagnetickém modelu. Stroj

Tab. 4.4: Vypočtené parametry stroje pro provoz naprázdno bez vnějšího napájení pro optimalizované geometrie algoritmem SOMA. Výpočty byly provedeny s předpokladem, že všechny části stroje jsou ustáleny na pokojové teplotě 20 °C

Parametr	T1	T2	V
Základní harm. složka mag. indukce ve vzduchové mezeře, T	0,47	0,39	0,39
Indukované napětí naprázdno ve fázi, efektivní hodnota, V	160,68	127,29	129,68
Amplituda parazitního rel. momentu, mNm	594,34	447,22	435,83
THD Magnetické indukce, %	41,46	48,29	51,94
THD indukovaného napětí, %	16,94	20,04	20,23

byl během simulace udržován prostřednictvím nastavení na synchronních otáčkách 1500 ot/min. Jak plyne z Tab. 4.4, tak optimalizované varianty stroje mají menší indukované napětí naprázdno a parazitní reluktanční moment (anglicky cogging) ve srovnání s provedením T1. Naopak mají větší obsah vyšších harmonických složek magnetické indukce ve vzduchové mezeře, které se projevují i v indukovaném napětí naprázdno. Stejně jako u fázorového diagramu na Obr. 4.4 se jeví obě optimalizované varianty jako velmi podobné.

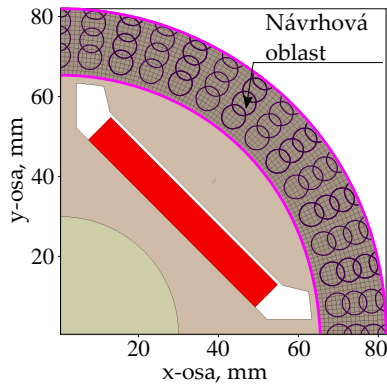
4.2 Výzkum a vývoj tvaru drážek rotoru prostřednictvím topologické optimalizace

Většina dříve publikovaných prací se zabývala synchronními stroji spouštěnými ze sítě, které používaly stejnou předdefinovanou geometrii pro optimalizaci založenou na tyčích klece nakrátko převzatých z klasických indukčních strojů. Autorem této práce nebyly zaznamenány žádné aktivity, které by se zabývaly topologickou optimalizací (TO) [39] pro zlepšení výkonu těchto typů strojů. Naopak pro konvenční synchronní stroje s permanentními magnety pro provoz s měničem frekvence lze nalézt mnoho takových studií, např. v [40], a také i pro synchronní reluktanční stroje [41].

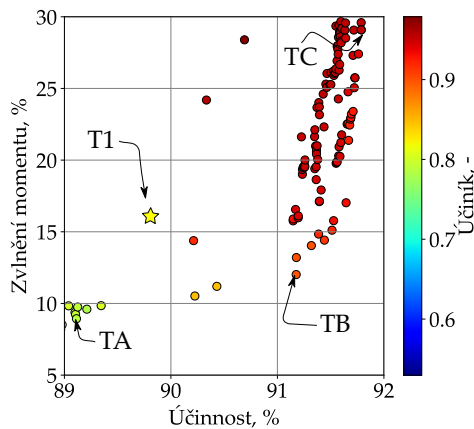
Hlavním důvodem proč synchronní stroje spouštěné ze sítě nejsou obvykle studovány prostřednictvím TO mohou být vysoké nároky na výpočet, které vznikají, když je potřeba ověřit schopnost stroje se synchronizovat.

Pro tuto studii je využita geometrie získaná v kapitole 4.1 rychlým návrhem bez využití optimalizace, která byla ukázána na Obr. 4.2(a). Návrhová oblast pro topologickou optimalizaci je omezena pouze na prostor klece nakrátko. Rozměry magnetů, počet závitů statoru a všechny ostatní parametry stroje tedy zůstávají stejné jako u referenčního modelu. Elektromagnetický model původního synchronního stroje spouštěného ze sítě byl odpovídajícím způsobem upraven, a to nahrazením části plochy rotoru konečným počtem malých dílků ("buněk"). Výsledná geometrie rotoru se zvýrazněnou návrhovou oblastí je znázorněna na Obr. 4.5.

Počet buněk v návrhové oblasti je 1 515. V tomto regionu bylo rozmístěno 60 tzv. Gaussů, jak je znázorněno na Obr. 4.5. Gaussy byly rovnoměrně rozmístěny v rámci návrhové oblasti. Tento přístup byl zvolen za účelem snížení počtu proměnných potřebných k optimalizaci. Dalšího zmenšení počtu



Obr. 4.5: Diskretizace návrhového prostoru a rozmístění Gaussových křivek používaných pro optimalizaci v návrhové oblasti. Obrázek je upraven a převzat z autorovy publikace [42].

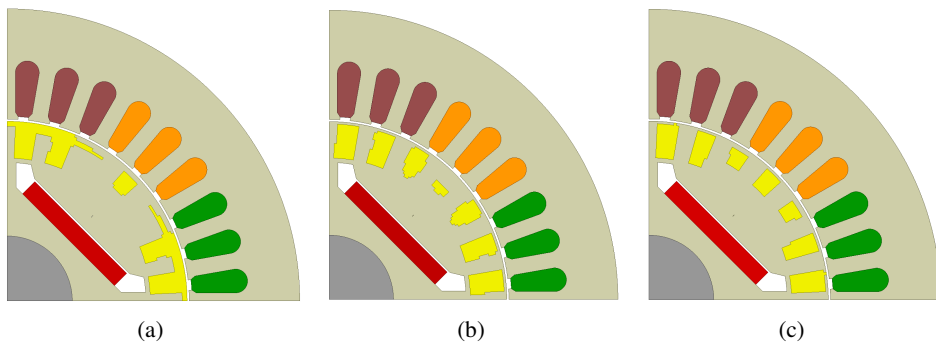


Obr. 4.6: Vypočtené Paretovo čelo pro topologickou optimalizaci. Hvězdičkou je označen bod, který odpovídá T1 – uspořádání, které bylo popsáno v rámci kapitoly 4.1. Dále jsou vyznačena provedení, která jsou podrobněji v rámci této kapitoly zkoumána a vyhodnocována. Obrázek je upraven a převzat z autorovy publikace [42].

návrhových proměnných bylo dosaženo předpokladem symetrie pólů. Proto byly optimalizovány pouze parametry Gaussových funkcí rozmístěných na jedné polovině pólu, včetně těch ve středu pólu. Celkový počet optimalizovaných Gaussů byl tedy 32.

Cílem optimalizace je maximalizace účinnosti, účinníku a snížení zvlnění momentu. Současně musí být optimalizovaný stroj schopen synchronizovat jmenovitou zátěž se setrvačností pětikrát větší, než je setrvačnost rotoru synchronního stroje spouštěného ze sítě s permanentními magnety. Vzhledem k tomu, že tyto cíle jsou protichůdné, je výsledkem optimalizace Paretovo čelo. Během optimalizace hybridním algoritmem DECMO2 [43] bylo vypočteno přibližně 43 500 různých provedení stroje. Z tohoto počtu byla provedena plná časová analýza s napětovým zdrojem na 35 400 designech.

Z Paretova čela ukázaného na Obr. 4.6 byla vybrána tři provedení stroje pro detailnější studii a



Obr. 4.7: Průřezy vybraných konstrukcí strojů: (a) provedení TA, (b) provedení TB a (c) provedení TC. Obrázek je upraven a převzat z autorovy publikace [42].

srovnání. První vybraný návrh, TA, má nízké zvlnění momentu a zároveň dostatečnou účinnost pro třídu účinnosti IE4. Druhá výsledná geometrie, TB, představuje určitý kompromis mezi účinností všech zkoumaných strojů a zvlněním momentu. Na závěr byla vybráno ještě třetí provedení TC, které má nejvyšší účinnost, ale také zvlnění točivého momentu.

Provedení TA, jak je znázorněno na Obr. 4.7(a), má podobný tvar pólu jako synchronní stroj s vyniklými póly [30], s tím rozdílem, že buzení zajišťují permanentní magnety. Klec je tvořena hliníkem umístěným v drážce ve středu pólu a dále velkými elektrovedivými plochami po jeho stranách. Je zřejmé, že z výrobního hlediska je problematické takovýto rotor vyrobit a musely by být provedeny nezbytné konstrukční úpravy před vlastní výrobou.

Další dvě provedení, Obr. 4.7(b) a (c), mají klasičtější geometrii s několika drážkami pro rotorovou klec. Jednotlivé drážky rotoru nejsou stejné, ale liší se svým tvarem a plochou. Největší drážky pro obě provedení jsou po okraji pólu a nejmenší v jeho středu. Geometrie TC má drážky uprostřed pólu menší než provedení TB. Dále lze konstatovat, že TO vytvořila nestejně drážky rotoru. To má za následek to, že odpor klece v podélné ose stroje není stejný jako v jeho příčné ose. Podle publikace [44], je odpor klece v podélné ose definován především tyčemi umístěnými v příčné ose a naopak odpor v příčné ose je definován tvarem tyčí v ose podélné. U provedení TB a TC mají tyče v příčné ose větší plochu než v podélné. Publikace [44] ukázala, že pro synchronní stroje spouštěné ze sítě může být takováto nesymetrie výhodná z hlediska rozběhových vlastností.

Všechny optimalizované geometrie ukázané na Obr. 4.7 mají víceméně obdélníkový, respektive hranatý tvar drážek pro klec nakrátko. Tento výsledný tvar je způsoben zejména počtem použitých Gaussů pro topologickou optimalizaci. Pokud bychom chtěli dosáhnout hladších tvarů drážek, bylo by nutné použít v návrhové oblasti více Gaussů, případně použít jiné pokročilé techniky, které jsou v kombinaci s topologickou optimalizací a využitím NGnet schopny dát geometrie s tenkými tvary objektů i při zachování nízkého počtu Gaussů. Takové techniky byly ukázány například v [45].

U optimalizovaných geometrií byl proveden výpočet parametrů v ustáleném stavu a srovnán s parametry provedení T1 z kapitoly 4.1. Pro verifikaci parametrů byl použit jemnější krok v elektromagnetickém výpočtu. Konkrétně je během optimalizace použito 100 kroků na periodu, zatímco výsledky prezentované dál v této kapitole byly získány s 200 kroky na periodu. Změna kroku je zdůvodnitelná tím, že u optimalizace bylo snahou snížit její čas, zatímco u ověření parametrů je větší

Tab. 4.5: Srovnání optimalizovaných provedení pro jmenovitý pracovní bod s T1 – uspořádáním

Parametr	T1	TA	TB	TC
Výkon, W	1511	1506	1535	1526
Moment, Nm	9,6	9,6	9,7	9,7
Proud, A	3	3,0	2,6	2,4
Účinnost, %	89,7	89,2	91,1	91,8
Účinník, -	0,86	0,78	0,91	0,96
Zvlnění momentu, %	18,31	8,90	15,73	24,92
Indukované napětí naprázdno, RMS hodnota, V -	156	192	174	179
Poměr L_q/L_d , -	5,21	2,17	6,00	4,22
Ztráty ve vinutí statoru, W	95,9	112,0	80,8	67,8
Ztráty v železe, W	53,0	44,9	44,8	43,5
Ztráty v kleci nakrátko, W	5,0	15,1	5,5	5,6
Mechanické ztráty, W	12	12	12	12
Celkové ztráty, W	173,3	182,8	150,8	136,5

důraz kladen na přesnost zde prezentovaných výsledků. Tímto je i způsoben rozdíl mezi výsledky uvedenými v Tab. 4.5 a Paretoým čelem ukázaným na Obr. 4.6.

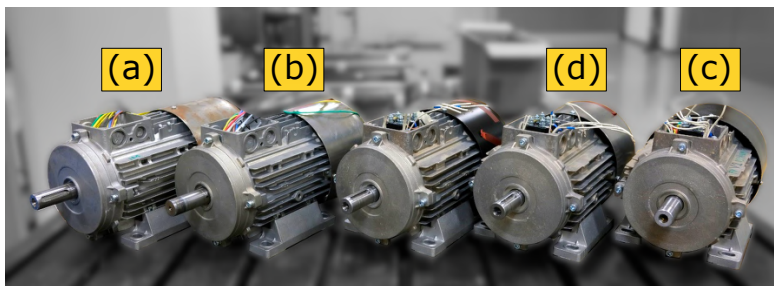
Z prezentovaného srovnání v Tab. 4.5 je patrné, že kromě TA mají optimalizovaná provedení vyšší účinnost v absolutní hodnotě o něco málo než 1 % ve srovnání s T1. Takovéto zvýšení účinnosti lze považovat za výrazné s ohledem k jmenovité výkonu srovnávaných strojů, 1,5 kW. Navíc mají optimalizovaná provedení nižší zvlnění momentu než T1 s tím, že nejmenší vykazuje provedení TA.

Získané výsledky naznačují, že další zlepšení parametrů synchronního stroje spouštěného ze sítě je možné realizací nejednotného tvaru tyčí rotorové klece. Publikace [42] uvádí mnohem podrobnější analýzy získaných výsledků a předkládá tak nové poznatky o návrhu.

5 Měření na synchronních strojích spouštěných ze sítě

Měření byla provedena za účelem ověření výpočtů provedených na elektromagnetických modelech prezentovaných v kapitole 4.1. Všechny vyrobené vzorky, včetně referenčního asynchronního stroje jsou zachyceny na Obr. 5.1. Jak je z fotografie patrné, tak realizované synchronní stroje spouštěné ze sítě využily stejných konstrukčních částí jako asynchronní stroj, ze kterého vycházejí (kostra, štíty, ložiska, ventilátor, kryt ventilátoru atd.). Osová výška vzorků je 90 mm a pro měření teploty jsou umístěny v jejich statorovém vinutí teplotní čidla, a to konkrétně ve statorových drážkách.

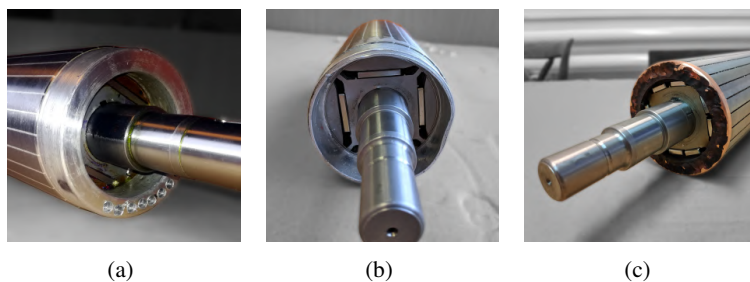
Realizované vzorky se liší tvarem drážky rotoru a magnetu. Průměry plechů a stejně tak i aktivní délky svazků jsou pro všechny totožné. Na Obr. 5.2 pak lze vidět jednotlivé vyrobené rotory. Je patrné, že geometrie T1 (Obr. 5.2(a)) a T2 (Obr. 5.2(b)) se liší také v rozměrech kruhu nakrátko. Provedení V se pak odlišuje zejména tím, že jeho klec je provedena z mědi, a to prostřednictvím tyčí umístěných v drážkách, které jsou svařeny ke zkratovacím kruhům na obou koncích rotoru (Obr. 5.2(c)).



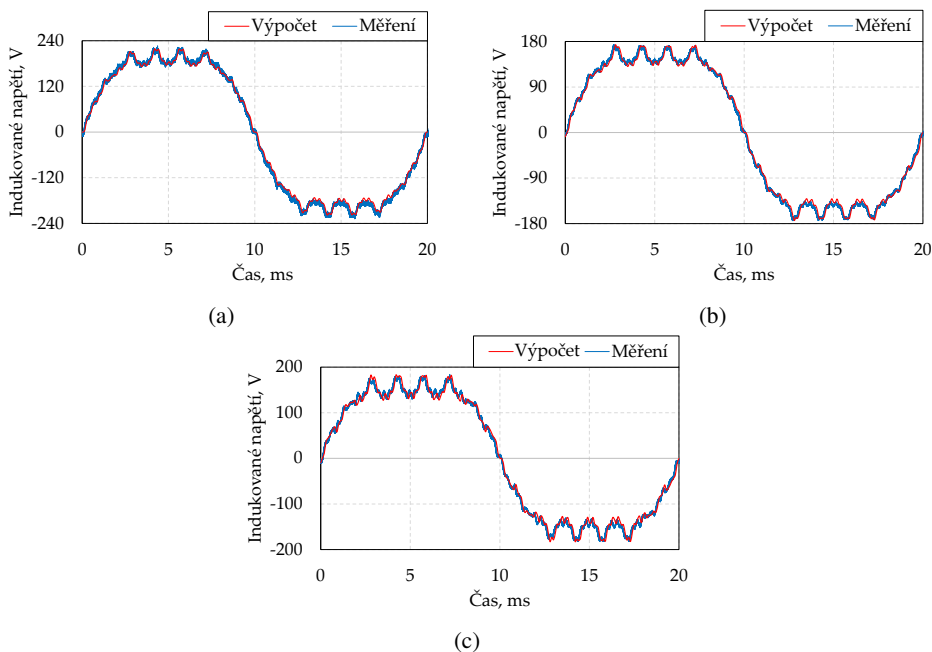
Obr. 5.1: Přehled vyrobených a měřených strojů; (a) referenční asynchronní motor, (b) synchronní stroj spouštěný ze sítě navržený rychlou metodou (T1 – provedení), (c) synchronní stroj spouštěný ze sítě s tangenciálním uspořádáním uložení magnetů (T2 – provedení) a d) synchronní stroj spouštěný ze sítě s magnety uloženými do V a měděnou klecí nakrátko (V – provedení).

5.1 Měření indukovaného napětí naprázdno

Jako první bylo provedeno měření naprázdno, které má za cíl ověřit velikost indukovaného napětí naprázdno. Jedná se o jedno z nejzákladnějších měření, jenž je prováděno na synchronních strojích.



Obr. 5.2: Vyrobené rotory (a) T1 –, (b) T2 – a (c) V – uspořádání.



Obr. 5.3: Srovnání vypočteného a naměřeného indukovaného fázového napětí naprázdno pro vyrobené vzorky. (a) T1 –, (b) T2 –, a (c) V – uspořádání.

Jak bylo ukázáno v rámci kapitoly 2, je to právě indukované napětí naprázdno, které zásadně ovlivňuje výsledné parametry stroje.

Měření naprázdno bylo provedeno tak, že zkoumané laboratorní vzorky synchronních strojů spouštěných ze sítě byly roztáčeny pomocí dynamometru, který byl spojkou připojen k volnému konci hřídele. Během testování byly udržovány synchronní otáčky 1500 ot/min.

Průběh v čase naměřeného indukovaného napětí naprázdno pro jednotlivá provedení je srovnán s vypočtenými průběhy na Obr. 5.3. Z uvedeného srovnání je patrná podobnost mezi vypočtenými a měřenými hodnotami. Lze tedy konstatovat, že vytvořené elektromagnetické modely poměrně dobře odhadly tvar a velikost indukovaného napětí naprázdno.

5.2 Měření zatěžovacích křivek

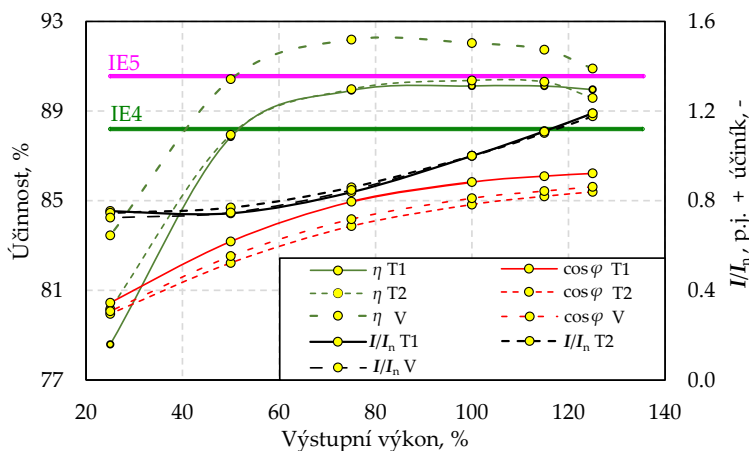
Jako další bylo provedeno měření zatěžovacích křivek dle metody 2-1-2A pro určení ztrát a účinnosti popsané v normě ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 [8]. Zatěžování stroje bylo zajištěno dynamometrem, který byl přes spojku připojen k testovanému stroji. Samotný testovaný stroj je po celou dobu měření napájen ze sinusového zdroje California Instruments 5001IX. Mezi zdroj a motor byl zapojen výkonový analyzátor Yokogawa WT 1800, který odečítal veličiny jako je napětí, proudy, účinník, příkon a další. Měřená data z výkonového analyzátoru byla ukládána během měření do počítače pro další vyhodnocení.

Vyrobené vzorky synchronních strojů spouštěných ze sítě měly také ve satorovém vinutí umístěna teplotní čidla. Ta sloužila pro kontrolu a vyhodnocení oteplení motorů během měření. Teploty byly odečítány přes měřící kartu NI-9234 od společnosti National Instruments a prostřednictvím LabView vizualizovány na počítači.

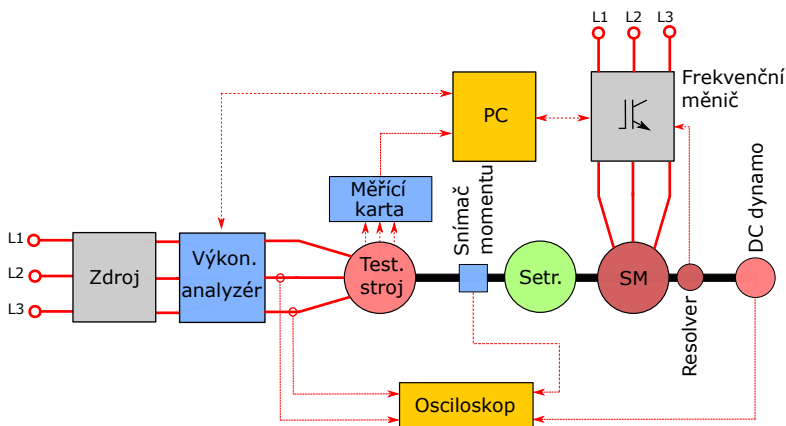
Změřené zatěžovací křivky vyrobených strojů jsou srovnány graficky na Obr. 5.4. V grafu jsou také ukázány hranice pro účinnostní třídy IE4 a 5. Je patrné, že V – uspořádání překračuje hranici IE5 poměrně výrazně v širokém rozsahu výstupního výkonu a ostatní provedení se této hranici blíží. Nejvyšší účinník, a tedy nejmenší magnetizační proud odebírá geometrie T1, pro provedení T2 a V je účinník obdobný. V grafu je také vyneseno změřené napájecí proud v poměrných jednotkách. Jeho hodnoty jsou pro všechny geometrie srovnatelné.

5.3 Měření rozběhů

Poslední měření prezentované v této práci se zaměřilo na ověření rozběhových vlastností vyvíjených strojů. Za účelem měření bylo navrženo a vytvořeno pracoviště, které obsahuje soustrojí s



Obr. 5.4: Srovnání zatěžovacích křivek měřených strojů.



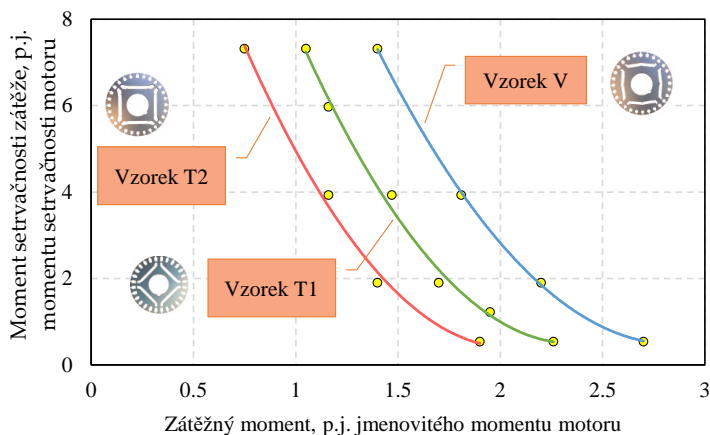
Obr. 5.5: Schéma zapojení pro měření rozběhů. V tomto schématu Setr. je setrvačnick a SM označuje synchronní motor.

testovaným strojem (synchronní stroj spouštěný ze sítě), snímačem momentu, setrvačností, synchronním motorem a stejnosměrným tacho-dynamem. Schématicky je tato sestava ukázána na Obr. 5.5.

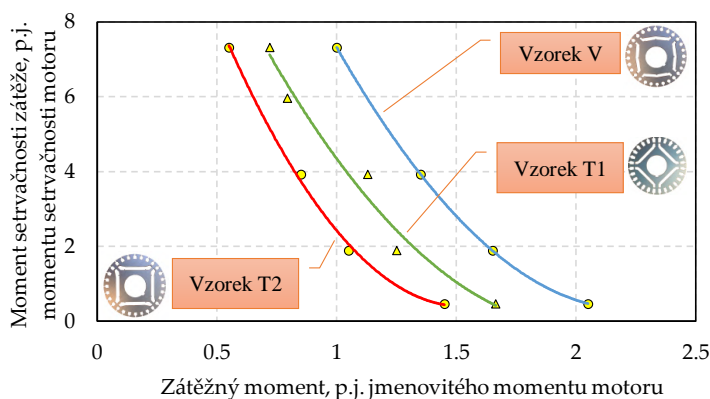
Protože synchronizační schopnost stroje je závislá na jeho teplotě (oteplení mění indukované napětí naprázdno a také velikost odporu vinutí statoru) bylo nutné provést jeho ověření pro přibližně stejné oteplení v rámci celého měření. Proto byl před měřením rozběhů stroj zatížen jmenovitým momentem, po ustálení teplot vypnut a následně ihned zapnut s předdefinovaným nastavením. Po rozběhu byl stroj opět zatížen tak aby dosáhl ustáleného oteplení jako při jmenovitém zatížení a až po úplném ustálení teplot bylo provedeno měření dalšího rozběhového bodu. Pro stabilizaci oteplení se dbalo na to, aby se teploty měřené čidly před jednotlivými rozběhy lišily maximálně o $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Měření byla prováděna pro vybrané momenty setrvačnosti a moment zátěže byl iterován opakovanými rozběhy tak dlouho, dokud nebyl určen bod synchronizační křivky. Celé měření proto bylo velmi časově náročné a takto změřené synchronizační křivky pro jmenovité napájecí napětí jsou ukázány na Obr. 5.6.

Změřený tvar synchronizačních křivek odpovídá teoretickým předpokladům popsaným dříve v rámci kapitoly 2.5. S rostoucím momentem zátěže prudce klesá velikost momentu setrvačnosti zátěže, se kterou je schopen se stroj vtáhnout do synchronismu. Nejlepší synchronizační schopnosti vykazuje vzorek ve V – uspořádání. Jedná se o stroj, který jak ukázala předchozí kapitola 5.2, má nejvyšší účinnost ze všech srovnávaných provedení. O něco horší je geometrie T1 navržená bez optimalizace. Při zatížení jmenovitým momentem je schopna rozběhnout moment setrvačnosti zátěže rovný maximálně 7,77 p.j. vztažených na moment setrvačnosti motoru. Nejhorší vlastnosti z hlediska synchronizace pak vykazuje T2 – uspořádání. Tento design při jmenovitém zatížení rozběhne pouze zátěž s 4,95násobkem momentu setrvačnosti motoru.

Dle normy ČSN EN 50 160 je toleranční pásmo pro napětí v síti $\pm 10\%$. Synchronizační schopnost stroje je přímo závislá na napájecím napětí U_s . Synchronizační křivky byly tedy i změřeny na dolní hranici zmíněného tolerančního pásma což odpovídá napětí 207 V. Získané křivky jsou ukázány na Obr. 5.7 a pokles synchronizační schopnosti je zcela zřetelný. Uvažujme například případ, kdy studované stroje budou zatíženy jeden a půl násobkem jmenovitého momentu. V případě kdy je



Obr. 5.6: Naměřené synchronizační křivky pro vyrobené vzorky synchronních strojů spouštěných ze sítě při fázovém napětí 230 V.



Obr. 5.7: Naměřené synchronizační křivky pro vyrobené vzorky synchronních strojů spouštěných ze sítě při fázovém napětí 207 V.

napájecí napětí jmenovité, tj. 230 V, tak jsou schopny provedení T1, T2 a V rozběhnout zátěž každá zvlášť s poměrným momentem setrvačnosti 3,39 p.j., 1,64 p.j. a 6,39 p.j.. Při poklesu napětí na 207 V rozběhnou při stejném zátěžném momentu každá zvlášť pouze 1,04 p.j., 0,40 p.j. a 2,80 p.j.. Pokles je tedy velice razantní. Pro variantu T1 se jedná o pokles o 24,36 %, pro T2 o 30,75 % a pro provedení V o 43,93 %. Je tedy zřejmé, že výrobce tohoto typu motoru musí vzít tento zásadní fakt v potaz při stanovování jeho provozních limitů pro uživatele.

6 Závěr

Předložená práce se zabývala synchronními stroji spouštěnými ze sítě, které představují energeticky úspornější alternativu k široce využívaným asynchronním strojům v dnešních průmyslových aplikacích. Díky legislativním změnám, jejichž snahou je omezení emisí skleníkových plynů, získávají právě tyto stroje v posledních letech pozornost jak pro svou vysokou účinnost, tak pro schopnost přímého spouštění ze sítě.

Ve druhé kapitole práce prezentovala typické konstrukční uspořádání těchto strojů a uvedla jejich matematický model vycházející z teorie prostorového vektoru. Tato teorie má obrovský praktický význam, jelikož zásadně zjednodušuje matematický popis stroje a tím i lépe umožňuje pochopení jeho chování. Bylo ukázáno, že teorie synchronních strojů spouštěných ze sítě je poměrně komplexní problematika, neboť propojuje dohromady prvky teorie asynchronních a synchronních strojů. Na znalosti návrháře těchto typů motorů to tak klade zvýšené nároky.

Následující kapitola popsala jednotlivé klíčové aspekty synchronních strojů spouštěných ze sítě, které se týkají návrhu, výrobitelnosti a aplikovatelnosti. Na tuto kapitolu pak přímo navazuje čtvrtá kapitola této práce, která se zaměřuje na konkrétní případové studie vycházející z výzkumné a vývojové činnosti autora prováděné v posledních letech.

Jako první byl ukázán návrh synchronního stroje spouštěného ze sítě bez využití jakékoliv optimalizační techniky. Pro návrh byly použity části již průmyslově vyráběného 1,5 kW asynchronního elektromotoru a pozornost tedy byla věnována zejména návrhu nového rotoru. I přestože byl návrh založen víceméně jen na inženýrském odhadu, povedlo se dosáhnout poměrně dobrých parametrů u navrženého provedení. Dle výpočtů metodou konečných prvků by měl vyvinutý stroj dosáhnout s dostatečnou rezervou účinnostní třídy IE4.

Dále již případová studie pro návrh využila sofistikovanější přístup, a to optimalizaci pomocí samo-organizujícího se migračního algoritmu. Bylo popsáno nastavení optimalizace a dále optimalizovaná provedení. Ty byly dvě, první s hliníkovou klecí nakrátko a druhé s měděnou klecí. Důvodem k tomuto byla snaha poskytnout širší záběr výsledků pro různě provedené stroje. Optimalizovaná provedení byla podrobně analyzována a srovnána se strojem navrženým bez využití optimalizačních technik. Je ukázáno, že optimalizovaná provedení mají některé parametry lepší a jiné naopak horší, než stroj z první případové studie. Nicméně všechna přesahují minimální hranici pro účinnostní třídu IE4.

Druhá studie aplikuje vyvinutou metodu topologické optimalizace pro hledání nových tvarů klece nakrátko synchronních strojů spouštěných ze sítě. Optimalizovaná provedení stroje mají menší výšku tyčí v podélné ose. Dalším rozdílem oproti ostatním optimalizovaným strojům je, že optimalizované

návrhy mají uzavřené drážky rotoru. Studie ukázala, že stroje s upraveným tvarem rotorové klece dosáhly lepšího výkonu v ustáleném stavu než původní stroj. Získané výsledky také naznačují, že dalšího zlepšení parametrů synchronních strojů spouštěných ze sítě je možné dosáhnout realizací neuniformního tvaru tyčí rotorové klece.

Na závěr byla vybraná provedení realizována a testována. Jejich měření včetně získaných dat jsou prezentována v páté kapitole této práce. Je ukázáno, že veškeré navržené stroje v této práci které byly realizovány dosahují účinnostní třídy IE4 s dostatečnou rezervou, a jedno provedení dokonce nedefinované účinnostní třídy IE5. To potvrzuje, že tento typ strojů je slibný pro aplikace, kde je kladen důraz na vysokou účinnost pohonu s vlastností přímého spouštění ze sítě.

Přestože tato práce poskytla poměrně rozsáhlé spektrum případových studií je zřejmé, že ke každé studii by se jistě dal provést hlubší rozbor výsledků. Na výsledky této habilitační práce, které jsou zcela konkrétní a poskytují nový vhled do návrhu těchto strojů, se dá tak smysluplně navázat v budoucím výzkumu a vývoji synchronních strojů spouštěných ze sítě. V současné době jsou popsané metody a prezentované výsledky výzkumné a vývojové činnosti ověřovány ve společnosti EMP s.r.o. Slavkov u Brna, při návrhu vysoce energeticky úsporné řady synchronních strojů spouštěných ze sítě malých výkonů.

Literatura

- [1] Transformation of Europe power system until 2050, Including specific considerations for Germany. Technická zpráva, McKinsey and Company, Inc., 2010.
- [2] A. De Almeida, J. F., F. Ferreira; Fonseca, P.: Improving the penetration of energy-efficient motors and drives. Technická zpráva, ISR-Univ. Coimbra, Final Rep. for the European Commission DG-TREN, SAVE Programme, 2000.
- [3] A. De Almeida, J. F., F. Ferreira; Fonseca, P.: EuP Lot 11 motors, ecodesign assessment of energy using products, final report for the European Commission, Brussels, Belgium. Technická zpráva, ISR-Univ. Coimbra, 2008.
- [4] De Keulenaer, H.: Energy Efficient Motor Driven Systems. 04 2004, doi:10.1260/0958305042886688.
- [5] Bramerdorfer, G.; Tapia, J. A.; Pyrhönen, J. J.; aj.: Modern Electrical Machine Design Optimization: Techniques, Trends, and Best Practices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 65, č. 10, 2018: s. 7672–7684, doi:10.1109/TIE.2018.2801805.
- [6] De Almeida, A. T.; Ferreira, F. J. T. E.; Fong, J. A. C.; aj.: Electric motor standards, ecodesign and global market transformation. In *2008 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, 2008, s. 1–9, doi:10.1109/ICPS.2008.4606292.
- [7] IEC 60034-30-1:2014. Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). 2014.
- [8] Adams, P.: Rotating Electrical Machines, Part 31: Selection of Energy-Efficient Motors Including Variable Speed Applications. *IEC/TS 60034-31, 1st Ed., 2010.*, ročník 4, č. 2, 7 1993: s. 201–213, an optional note.
- [9] De Almeida, A. T.; Ferreira, F. J. T. E.; Baoming, G.: Beyond Induction Motors—Technology Trends to Move Up Efficiency. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 50, č. 3, May 2014: s. 2103–2114, ISSN 0093-9994, doi:10.1109/TIA.2013.2288425.
- [10] Hrabovcova, V.; Ličko, M.: *Reluktančný synchronny motor*. Žilinská univerzita, 2001, ISBN 80-7100-891-5.
- [11] Moghaddam: *Synchronous reluctance machine (SynRM) in variable speed drives (VSD) applications*. Dizertační práce, Royal Institute of Technology, The School of Electrical Engineering, Stockholm, 2011.

- [12] Barta, J.; Ondrusek, C.: Rotor Design and Optimization of Synchronous Reluctance Machine. *MM Science Journal*, , č. 11, 2015: s. 555–559, doi:DOI:10.17973/MMSJ.2015_03_201504.
- [13] Rafajdus, P.; Hrabovcova, V.; Lehocky, P.; aj.: Analysis and Measurements of New Designed Reluctance Synchronous Rotor. In *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EE-EIC / I CPS Europe)*, 2018, s. 1–6, doi:10.1109/EEEIC.2018.8494585.
- [14] Knebl, L.; Ondrusek, C.; Kurfürst, J.: Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Motor Design, Manufacturing and Material Influence on Motor Characteristics. In *2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, 2018, s. 1–6.
- [15] Liu, Z.; Hu, Y.; Wu, J.; aj.: A Novel Modular Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor. *IEEE Access*, ročník 9, 2021: s. 19947–19959, doi:10.1109/ACCESS.2021.3054766.
- [16] Demmelmayr, F.; Troyer, M.; Schroedl, M.: Advantages of PM-machines compared to induction machines in terms of efficiency and sensorless control in traction applications. In *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2011, s. 2762–2768, doi: 10.1109/IECON.2011.6119749.
- [17] Ozcelik, N.; Dogru, U.; Imeryuz, M.; aj.: Synchronous Reluctance Motor vs. Induction Motor at Low-Power Industrial Applications: Design and Comparison. *Energies*, ročník 12, 06 2019: str. 2190, doi:10.3390/en12112190.
- [18] Hendershot, J. R.; Miller, T. J. E.: *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*. Motor Design Books LLC, 2010, ISBN 978-0-9840687-0-8.
- [19] Ugale, R. T.; Chaudhari, B. N.; Pramanik, A.: Overview of research evolution in the field of line-start permanent magnet synchronous motors. *IET Electric Power Applications*, ročník 8, č. 4, April 2014: s. 141–154, ISSN 1751-8660, doi:10.1049/iet-epa.2013.0241.
- [20] Palangar, M. F.; Soong, W. L.; Bianchi, N.; aj.: Design and Optimization Techniques in Performance Improvement of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 57, č. 9, 2021: s. 1–14, doi:10.1109/TMAG.2021.3098392.
- [21] Ugale, R. T.; Chaudhari, B. N.: Performance Enhancement of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor With a Special Consequent Pole Rotor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, ročník 36, č. 3, 2021: s. 1972–1982, doi:10.1109/TEC.2020.3038725.
- [22] Marcic, T.; Stumberger, B.; Stumberger, G.: Comparison of Induction Motor and Line-Start IPM Synchronous Motor Performance in a Variable-Speed Drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 48, č. 6, 2012: s. 2341–2352.
- [23] De Almeida, A. T.; Ferreira, F. J. T. E.; Duarte, A. Q.: Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 50, č. 2, March 2014: s. 1274–1285, ISSN 0093-9994, doi:10.1109/TIA.2013.2272548.

- [24] Mingardi, D.; Bianchi, N.; Pr?, M. D.: Geometry of Line-Start Synchronous Motors Suitable for Various Pole Combinations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 53, č. 5, 2017: s. 4360–4367.
- [25] Bárta, J.; Toman, M.; Lolová, I.; aj.: Synchronní stroje spouštěné ze sítě - Souhrnná výzkumná zpráva TJ01000433. Technická zpráva, Vysoké učení technické v Brně, 2019.
- [26] Zöhra, B.; Akar, M.; Eker, M.: Design of A Novel Line Start Synchronous Motor Rotor. *Electronics*, ročník 8, č. 1, 2019, ISSN 2079-9292, doi:10.3390/electronics8010025. URL <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/1/25>
- [27] Luomi, J.: *Transient Phenomena in Electrical Machines*. Lecture notes for a course in electrical machines, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1998.
- [28] Umans, S. D.; Fitzgerald, A. E.: *Fitzgerald and Kingsley's Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill Companies, sedmé vydání vydání, 2014, ISBN 978-0073380469.
- [29] Sen, P.: *Principles of Electric Machines and Power Electronics, 3rd Edition: Third Edition*. Wiley Global Education, 2013, ISBN 9781118804155.
- [30] Pyrhönen, J.; Jokinen, T.; Hrabovcova, V.: *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons, 2013, ISBN 9781118701652.
- [31] Rabbi, S. F.; Rahman, M. A.: Critical Criteria for Successful Synchronization of Line-Start IPM Motors. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, ročník 2, č. 2, 2014: s. 348–358, doi:10.1109/JESTPE.2013.2295178.
- [32] Sorgdrager, A. J.: *Design of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Machines Using the Taguchi Method*. Dizertační práce, Stellenbosch University, 2017.
- [33] SPEED™ Tutorial B07, PC-BDC Line-start Motors. 2017.
- [34] Ugale, R. T.; Chaudhari, B. N.: Rotor Configurations for Improved Starting and Synchronous Performance of Line Start Permanent-Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 64, č. 1, Jan 2017: s. 138–148, ISSN 0278-0046, doi: 10.1109/TIE.2016.2606587.
- [35] Chan, C.; Yan, L.; Chen, P.; aj.: Analysis of electromagnetic and thermal fields for induction motors during starting. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, ročník 9, č. 1, 1994: s. 53–60.
- [36] Shen, J.; Li, P.; Jin, M.; aj.: Investigation and Countermeasures for Demagnetization in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 49, č. 7, July 2013: s. 4068–4071, ISSN 0018-9464, doi:10.1109/TMAG.2013.2244582.
- [37] Lee, C.; Kwon, B.; Kim, B.-T.; aj.: Analysis of magnetization of magnet in the rotor of line start permanent magnet motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 39, č. 3, 2003: s. 1499–1502, doi:10.1109/TMAG.2003.810184.
- [38] Zelinka, I.: *Umělá inteligence v problémech globální optimalizace*. BEN - technická literatura, 2002, ISBN 80-7300-069-5.

- [39] Fu, J.; Huang, J.; Liu, J.: Topology Optimization With Selective Problem Setups. *IEEE Access*, ročník 7, 2019: s. 180846–180855, doi:10.1109/ACCESS.2019.2958645.
- [40] Hu, Y.; Xiao, Y.; Chen, B.; aj.: Topology Optimization of a Consequent-Pole Rotor with V-Shaped Magnet Placement. In *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2018, s. 234–239, doi:10.23919/ICEMS.2018.8549344.
- [41] Sato, S.; Sato, T.; Igarashi, H.: Topology Optimization of Synchronous Reluctance Motor Using Normalized Gaussian Network. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 51, č. 3, 2015: s. 1–4.
- [42] Barta, J.; Knebl, L.; Bramerdorfer, G.; aj.: Topology Optimization of Rotor Bars Geometry and Arrangement for a Line-Start Permanent Magnet Synchronous Machine. *IEEE Access*, ročník 9, 2021: s. 115192–115204, doi:10.1109/ACCESS.2021.3104642.
- [43] Zavoianu, C.; Lughofer, E.; Amrhein, W.; aj.: Efficient Multi-Objective Optimization Using 2-Population Cooperative Coevolution. 02 2013, ISBN 978-3-642-53855-1, s. 251–258, doi:10.1007/978-3-642-53856-8_32.
- [44] Boldea, I.; Tutelea, L.: *Reluctance Electric Machines: Design and Control*. CRC Press, 2018, ISBN 978-1-4987-8233-3.
- [45] Hiruma, S.; Ohtani, M.; Soma, S.; aj.: Novel Hybridization of Parameter and Topology Optimizations: Application to Permanent Magnet Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 57, č. 7, 2021: s. 1–4, doi:10.1109/TMAG.2021.3078435.

Abstrakt

Tato práce poskytuje přehled teorie nezbytné pro pochopení principu činnosti synchronních strojů spouštěných ze sítě. Dále také diskutuje aspekty spojené s jejich návrhem, výrobou a použitím. Tyto teoretické poznatky jsou doplněny konkrétními případovými studii založenými na výzkumu a vývoji těchto typů strojů. Ty se zaměřily na návrh synchronních strojů spouštěných ze sítě bez využití a s využitím optimalizačních metod. Vybraná navržená provedení jsou vyrobena a odměřena za účelem verifikace prezentovaných výsledků v této práci. Práce poskytuje nové poznatky plynoucí z výzkumu a vývoje synchronních strojů spouštěných ze sítě a dále ucelený soupis jejich teorie.

Abstract

This thesis provides an overview of the theory necessary to understand the principles of operation of line-start synchronous machines. It also describes aspects related to their design, manufacturing, and application. The presented theory is followed by case studies based on research and development of these types of machines. Case studies are focused on the design of line-start synchronous machines by utilization of optimization and analytical methods. Selected designs were fabricated and measured to verify the results presented in this work. This thesis provides new insights arising from the research and development of line-start synchronous machines, as well as a comprehensive review of their theory.