

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vícefázové elektrické motory v elektromobilitě

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jiří HOLÝ**
Osobní číslo: **E18B0060P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Vícefázové elektrické motory v elektromobilitě**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši používaných typů vícefázových motorů v oblasti elektromobility.
2. Proveďte vzájemné srovnání těchto motorů z hlediska jejich typických vlastností a provozních charakteristik.
3. Shrňte hlavní výhody a nevýhody vícefázových motorů v porovnání s běžnými trojfázovými motory.
4. Diskutujte nejnovější trendy a označte hlavní směry vývoje.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Elektronické informační zdroje IEEE (dostupné přes knihovnu ZČU – <http://ieeexplore.ieee.org/>).

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan





Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Cíli této bakalářské práce jsou zjištění dostupnosti vícefázových motorů v elektromobilitě a jejich porovnání. Práce porovnává, jak možné typy používaných strojů jako jsou PMSM a IM, tak třífázové a vícefázové stroje mezi sebou hlavně v oblasti provozu během poruchy, Joulových ztrát nebo např. složitosti měniče. Ke konci jsou poté napsány trendy a možná budoucnost vícefázových motorů v elektromobilitě.

Klíčová slova

Vícefázový motor, třífázový motor, hustota výkonu, injektáž vyšších harmonických složek proudu, synchronní motor s permanentními magnety, moment, asynchronní motor, Joulovy ztráty, porovnání

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to summarize the application and availability of multiphase electric motors in elektromobility and to compare them. The thesis types of machines used such as PMSM and IM as well as three-phase and multiphase machines with each other mainly in terms of operation during fault, joule losses or e.g. inverter complexity. Towards the end, the trends and possible future of multiphase motors in electromobility are then written.

Key words

Multiphase motor, three phase motor, power density, injection of higher harmonics, PMSM, torque, induction drive, Joule loss, compare

Prohlášení

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

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

Holý

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	9
1 ELEKTRICKÉ MOTORY V ELEKTROMOBILITĚ	11
1.1 ELEKTRICKÉ AUTOMOBILY	11
1.2 DOSTUPNÉ VÍCEFÁZOVÉ MOTORY V ELEKTROMOBILITĚ	19
1.2.1 <i>TM4 SUMOTM HD</i>	19
1.2.2 <i>HVSM-285</i>	21
1.2.3 <i>Asynchronní motor určený pro letadla</i>	22
2 POROVNÁNÍ TYPŮ STROJŮ	25
2.1 SYNCHRONNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY (PMSM)	25
2.1.1 <i>PMSM s vnějšími magnety (SPMSM)</i>	25
2.1.2 <i>PMSM s vnitřními magnety (IPMSM)</i>	26
2.2 ASYNCHRONNÍ MOTOR (IM)	28
2.3 POROVNÁNÍ PMSM A IM	29
3 SROVNÁNÍ VÍCEFÁZOVÝCH MOTORŮ S KONVENČNÍMI TŘÍFÁZOVÝMI	31
3.1 NOUZOVÉ DOJETÍ DO CÍLE.....	31
3.2 JOULOVY ZTRÁTY	33
3.3 SLOŽITĚJŠÍ STŘÍDAČ A LEVNĚJŠÍ VÝKONOVÉ PRVKY	35
4 BUDOUCNOST VÍCEFÁZOVÝCH MOTORŮ V ELEKTROMOBILITĚ . 36	36
4.1 INJEKTÁŽ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH PRO ZLEPŠENÍ MOMENTU	36
4.1.1 <i>Různé tvary permanentních magnetů a proudu statoru</i>	36
4.1.2 <i>Porovnání momentu</i>	38
4.1.3 <i>Ztráty v železe a ve vinutí</i>	41
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43

Úvod

V poslední době se klade v elektromobilitě důraz na zmenšování elektrických motorů a úsporu místa. Pro konvenční třífázové motory je toto již náročná výzva a v některých případech nedokážou splnit podmínky, které se od nich očekávají. Z toho důvodu se v posledních letech stále více mluví o vícefázových motorech. Ty mají přirozeně větší hustotu výkonu. Díky této a jiným výhodám, které jsou v této práci popsány, se z nich stávají lepší kandidáti pro standardní aplikace, jako je automobilová nebo železniční doprava. Na druhou stranu je zde možnost tyto motory využít i v lodní nebo letecké dopravě, kde je kladen vyšší nárok na bezporuchovost nebo alespoň na provoz během poruchového stavu.

Jelikož nejsou tyto motory tolik rozšířené, není možné najít velké množství komerčně prodáváných a nabízených variant. Jednou ze společností je DANA TM4. Ta nabízí spektrum šestifázových a několik devítifázových variant pro různé aplikace. Primárně jsou však určeny pro komerční sféru jako jsou trolejbusy, těžká technika a jiná elektrická vozidla. Tyto motory jsou prodávány přímo s výkonovými měniči v jedné sestavě.

Stejně jako jsou různé aplikace a společnosti, tak jsou různé i typy motorů a jejich možnosti použití v praxi. Nejčastěji se v dnešní době setkáme s typy motorů, které jsou v této práci popsány také.

Seznam symbolů a zkratk

kW	Jednotka výkonu – „kilo-Watt“
Nm	Jednotka momentu síly – „Newton-metr“
RPM.....	Otáčky za minutu – „revolutions per minute“
m ³	Jednotka objemu – „metr krychlový“
V	Objem
n _s	Synchronní otáčky statoru
f.....	Frekvence napájecího napětí
p	Počet pólových dvojic statoru

1 Elektrické motory v elektromobilitě

1.1 Elektrické automobily

Různé automobilové společnosti jsou v poslední době tlačeny ke stále větší ekologii. Z toho důvodu začaly vytvářet a dodávat na trh elektrická nebo hybridní elektrická vozidla.

První z automobilů, které jsou v dnešní době rozšířené, je Nissan Leaf. Druhá generace tohoto automobilu byla představena roku 2017. Tento automobil využívá synchronní motor s permanentními magnety s vnitřním uložením (IPMSM). Permanentní magnety jsou ze vzácných zemin jako je např. neodym nebo dysprosium [1]. Specifikace automobilu jsou [2]:

- Maximální rychlost = 160 km/h
- Výkon motoru = 160 kW
- Moment motoru = 339 Nm
- Spotřeba = 16 kWh/100 km
- Dojezd = 385 km
- Kapacita baterie = 62 kWh

Motor využívá vodního chlazení z důvodu velkého zahřívání. Statorové vinutí je třífázové. [1]



Obr. 1: Nissan Leaf [3]

Další značkou, která vytváří elektrická vozidla, je BMW. BMW i3 z roku 2018 je model elektrického vozidla, které využívá reluktančního motoru s pomocnými permanentními magnety [4]. Základní specifikace jsou [5]:

- Maximální rychlost = 150 km/h
- Výkon motoru = 125 kW
- Moment motoru = 249 Nm
- Spotřeba = 14 kWh/100 km
- Dojezd = 310 km
- Kapacita baterie = 42,2 kWh



Obr. 2: BMW i3 [6]

Velice známým automobilem je Tesla model S P100D z roku 2018. Tesla využívá u svým starších typů automobilů asynchronní motory. U novějších typů tomu je již jinak. Základní specifikace jsou [7]:

- Maximální rychlost = 250 km/h
- Výkon motoru = 451 kW
- Moment motoru = 967 Nm
- Spotřeba = 16 kWh/100 km
- Dojezd = 613 km
- Kapacita baterie = 100 kWh



Obr. 3: Tesla model S P100D [8]

Dalším z automobilů, které mají synchronní motor s permanentními magnety, je Chevrolet Bolt. Specifikace [9]:

- Maximální rychlost = 146 km/h
- Výkon motoru = 149 kW
- Moment motoru = 361 Nm
- Spotřeba = 16 kWh/100 km
- Dojezd = 380 km
- Kapacita baterie = 60 kWh



Obr. 4: Chevrolet Bolt [9]

Vozidlem z Jižokorejské republiky je Hyundai Ioniq Electric. Stejně jako většina zde vypsanych automobilů má synchronní motor s permanentními magnety. Specifikace [10]:

- Maximální rychlost = 165 km/h
- Výkon motoru = 101 kW
- Moment motoru = 296 Nm
- Spotřeba = 13 kWh/100 km
- Dojezd = 294 km
- Kapacita baterie = 38,3 kWh



Obr. 5: Hyundai Ioniq Electric [10]

Pro porovnání s Teslou model S P100D je zde často zmiňované Porsche Taycan. Na rozdíl od Tesly model S P100D používá ale opět synchronní motor s permanentními magnety. Specifikace [11]:

- Maximální rychlost = 260 km/h
- Výkon motoru = 420 kW
- Moment motoru = 651 Nm
- Spotřeba = 20 kWh/100 km
- Dojezd = 463 km
- Kapacita baterie = 93,4 kWh



Obr. 6: Porsche Taycan [11]

Další vůz na porovnání s těmi to dražšími automobily je Ford Mustang Mach-E se stejnou technologií motorů jako většina automobilů. Specifikace [12]:

- Maximální rychlost = 180 km/h
- Výkon motoru = 248 kW
- Moment motoru = 415 Nm
- Spotřeba = 26 kWh/100 km
- Dojezd = 600 km
- Kapacita baterie = 98,8 kWh



Obr. 7: Ford Mustang Mach-E [12]

Jeden z levnějších automobilů s permanentními magnety je Renault ZOE. Jako jediný v dnešní době má klasický buzený synchronní motor, který má velkou výhodu jednoduché odbuzování rotoru [13]. Specifikace [14]:

- Maximální rychlost = 135 km/h
- Výkon motoru = 66 kW
- Moment motoru = 220 Nm
- Spotřeba = 10 kWh/100 km
- Dojezd = 400 km
- Kapacita baterie = 41kWh



Obr. 8: Renault ZOE [14]

Existují i další automobilové společnosti, které mají ve svém portfoliu elektrická vozidla. Většina z nich bude poháněna synchronními motory s permanentními magnety nebo asynchronními motory. Malé procento bude mít ještě stále např. stejnosměrné motory. To je ale již minulost. Žádný z nalezených automobilů sice nemá vícefázové vinutí na statoru, nicméně existují společnosti, které vytvářejí právě tyto motory do komerční sféry. Používají se například v trolejbusích, těžké technice v dolech apod.

1.2 Dostupné vícefázové motory v elektromobilitě

V momentální době je konstrukce vícefázové motory vcelku mladým oborem. Z tohoto důvodu bylo nalezeno velmi málo produktů, se kterými zde můžeme pracovat. Jako příklad může být uveden devítifázový motor TM4 SUMO™ HD od společnosti DANA TM4 a HVSM-285 od společnosti Aselsan. Oba tyto motory jsou synchronní s permanentními magnety.

1.2.1 TM4 SUMO™ HD

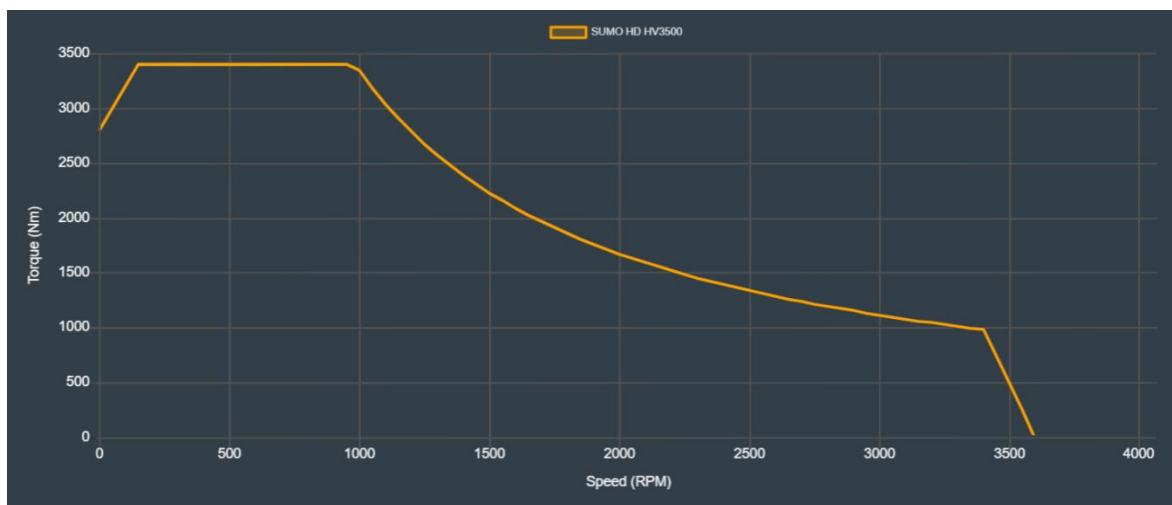
Přesněji bude zaměřeno na model SUMO HD HV3500-9P. Jsou zde ještě další dvě varianty, které se jemně liší parametry jako jsou výkon, otáčky za minutu, moment apod. Je tomu tak kvůli různé aplikaci. Podle společnosti DANA TM4 jsou tyto motory určeny primárně do komerčních vozidel jako jsou například trolejbusy nebo kamiony či nákladní vozidla. Je to kvůli navrženým parametrům, které tento stroj má [15]:

- Maximální výkon $P_m = 370$ kW
- Jmenovitý výkon $P_j = 260$ kW
- Maximální moment $M_m = 3445$ Nm
- Jmenovitý moment $M_j = 1970$ Nm
- Maximální otáčky $n_{max} = 3400$ RPM
- Váha motoru $m = 340$ kg
- Váha invertoru $m_i = 36$ kg
- Délka motoru $l_m = 505$ mm
- Průměr motoru $d = 572$ mm

Pro svoje rozměry a hmotnost se tyto motory nehodí pro osobní automobily. Dalším důležitým aspektem u těchto motorů je tzv. hustota výkonu, která je udávána ve W na m^3 . DANA TM4 ji neudává, ale může být přibližně vypočtena z hodnot, které již známe:

$$\begin{aligned}
 P_D &= \frac{P_j}{V} = \frac{P_j}{\pi \cdot \frac{d}{2} \cdot l_m} = \frac{260\,000}{\pi \cdot \frac{0,572}{2} \cdot 0,505} = \\
 &= 573\,015 \text{ W}/m^3 = 0,573 \text{ W}/cm^3
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Další důležitý parametr je trakční charakteristika motoru. Tu máme přímo od výrobce vyobrazenou níže na obrázku 9.



Obr. 9: Momentová charakteristika motoru SUMO HD HV3500-9P [15]

Jedná se o ideální trakční charakteristiku. Může na ní být povšimnuto konstantního momentu až do bodu jmenovitých otáček. Poté začíná moment hyperbolicky klesat, což je zapříčiněno vlastnostmi PMSM, které jsou popsány níže v další kapitole.

Dále se DANA TM4 pyšní např. nízkým tvořeným hlukem, vibracemi motoru a velmi dobrou tepelnou ochranou. Střídač musí být samozřejmě devítifázový. Výhodami jsou variabilní frekvence spínání, vysoká účinnost, EMI filtr a velmi dobrá hustota výkonu.

Prodejce uvádí, že motor může být připojen přímo na diferenciál. To má za následek následující výhody:

- Vyšší spolehlivost díky absenci převodovky
- Není potřeba úpravy karoserie vozidla díky svým menším rozměrům
- DANA TM4 uvádí, že jejich motory jsou bezúdržbové
- DANA TM4 slibuje rychlou návratnost investic

Další informace o motoru jsou systémová ochrana IP 6K9K. To znamená, že pohon je prachotěsný a je chráněn před tryskající vodou pod větším tlakem. Navíc má ochranu před vnějšími materiály jako je šterk, sůl a chemické výrobky, které způsobují korozi.

Co se týče softwarových funkcí, tak společnost využívá sinusový proud v motoru, snímání teploty pro snížení výkonu při poruše, diagnostické zařízení vyvinuté v DANA TM4, detekci poruch komunikace a pokročilý řídicí algoritmus. [15]

1.2.2 HVSM-285

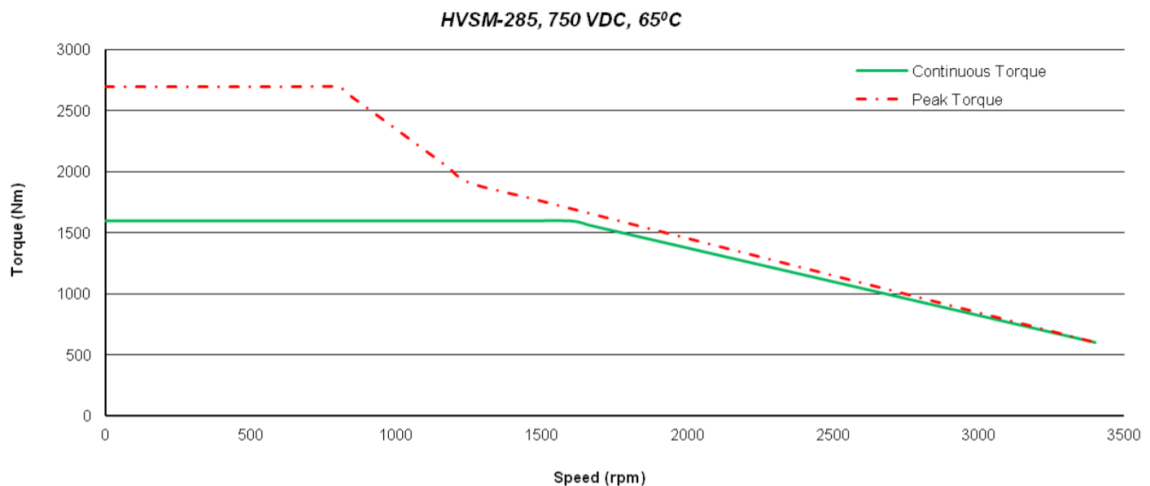
Tento motor od turecké společnosti Aselsan má využití podobně jako SUMO HD primárně pro komerční dopravu a jiná velká vozidla. Může být použit do plně elektrických i hybridních modelů. Stejně jako využití má podobné i parametry:

- Maximální výkon $P_m = 250$ kW
- Jmenovitý výkon $P_j = 150$ kW
- Maximální moment $M_m = 2700$ Nm
- Jmenovitý moment $M_j = 1600$ Nm
- Maximální otáčky $n_{max} = 3400$ RPM
- Hmotnost motoru $m = 350$ kg
- Délka motoru $l_m = 505,6$ mm
- Průměr motoru $d = 571,5$ mm

Podobně jako u SUMO HD, i zde si můžeme přibližně dopočítat hustotu výkonu podobným způsobem:

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{P_j}{V} = \frac{P_j}{\pi \cdot \frac{d}{2} \cdot l_m} = \frac{150\,000}{\pi \cdot \frac{0,5715}{2} \cdot 0,5056} = \\ &= 330\,482 \text{ W/m}^3 = 0,330 \text{ W/cm}^3 \end{aligned} \quad (1.2)$$

I zde máme od výrobce vyobrazenou trakční charakteristiku motoru [16]:



Obr. 10: Trakční charakteristika motoru HVSM-285 [16]

1.2.3 Asynchronní motor určený pro letadla

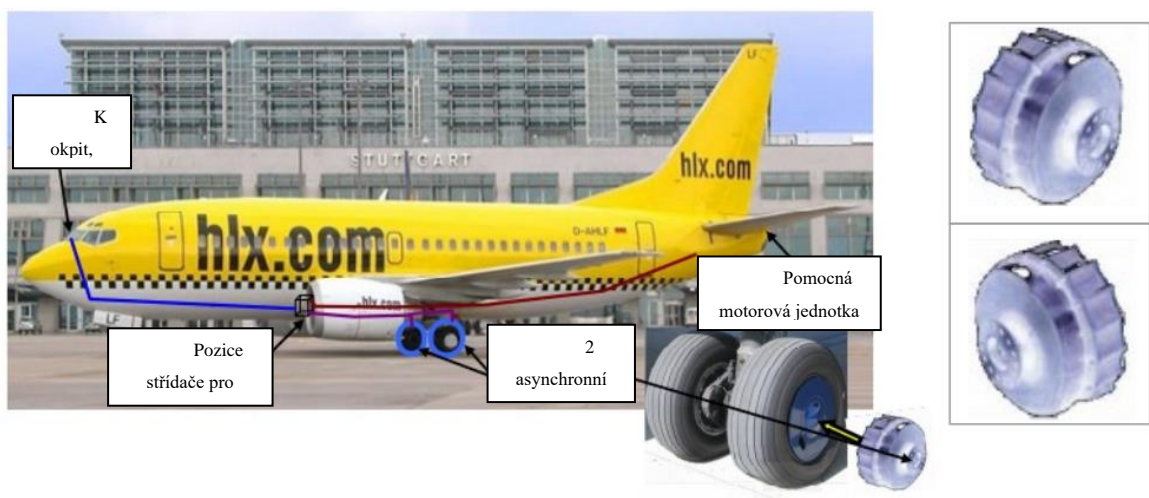
V dnešní době neexistuje na trhu výrobce, který by se soustředil na výrobu a prodej vícefázových asynchronních strojů. Jako jedna z možných aplikací by mohla být právě letadlová doprava. Použití motorů by se soustředilo na režim jízdy po dráze a přesouvání letadla po letišti. Pro tento motor byla napsána studie, která vytváří model pohonu pro letadlo Boeing B737NG. Toto letadlo má přesně dané specifikace jako jsou např. hmotnost při vzletu a při přistání, maximální čtená rychlost při pohybu, průměr kol, poměr převodu apod. S těmito specifikacemi dokážeme dopočítat potřebné základní parametry pro pohon:

- Jmenovitý výkon = 30,55 kW
- Jmenovitý moment = 3417,4 Nm
- Potřebné otáčky = 154,5 RPM

Většina komerčních letadel má 2 páry kol (tomu je tak i v případě této studie). Každý pár kol je ve studii poháněn jedním elektrickým motorem. Bude zde použita převodovka s poměrem 1:10. Proto bude moment na motoru také desetinný.

Po upřesnění parametrů se ve studii rozhodli vybrat osmnáctifázový asynchronní motor s těmito parametry:

- Jmenovitý výkon = 14,920 kW
- Jmenovité otáčky = 1760 RPM
- Jmenovité napětí = 460 V
- Počet pól párů = 2



Obr. 11: Aplikace 18-fázového motoru do letadla [17]

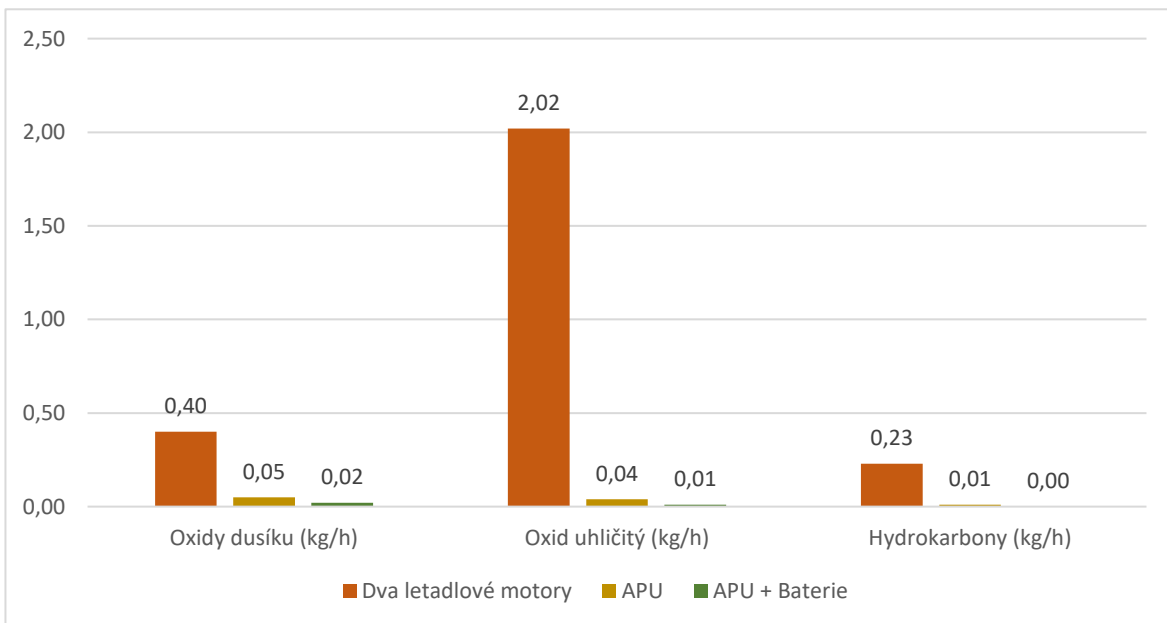
Využití těchto motorů pro pohon letadla při pozemním přemísťování má ekonomické výhody. Použití elektromotorů obecně snižuje emise při rozjezdu letadla, protože není potřeba použít klasické motory. Rozjezd letadla můžeme provést třemi různými způsoby:

- Pomocí obou hlavních letadlových motorů
- Pomocí podpůrných elektromotorů napájených z pomocné motorové jednotky (APU)
- Pomocí podpůrných elektromotorů napájených z kombinace APU a baterie

Celkové vypuštěné emise do ovzduší lze vidět a porovnat na grafech a tabulce dále.

Tab. 1: Emisní plyny vypouštěné do ovzduší různými typy pohonů [17]

Použitý typ pohonu	Oxidy dusíku (kg/h)	Oxid uhličitý (kg/h)	Hydrokarbony (kg/h)
Dva letadlové motory	0,40	2,02	0,23
APU	0,05	0,04	0,01
APU + Baterie	0,02	0,01	0,00



Graf 1: Emisní látky vypouštěné s použitím různých typů pohonů

Z tohoto grafu a tabulky lze vidět velmi vysoké snížení emisí, které jsou v průběhu přemístování letadla vypouštěny. Nevýhodou je, že se letadlo nemůže pohybovat po dráze jen čistě pomocí baterií. Těch by muselo mít větší počet. Musí tedy být zapojena APU, která bude dodávat energii nad rámec možností baterií.

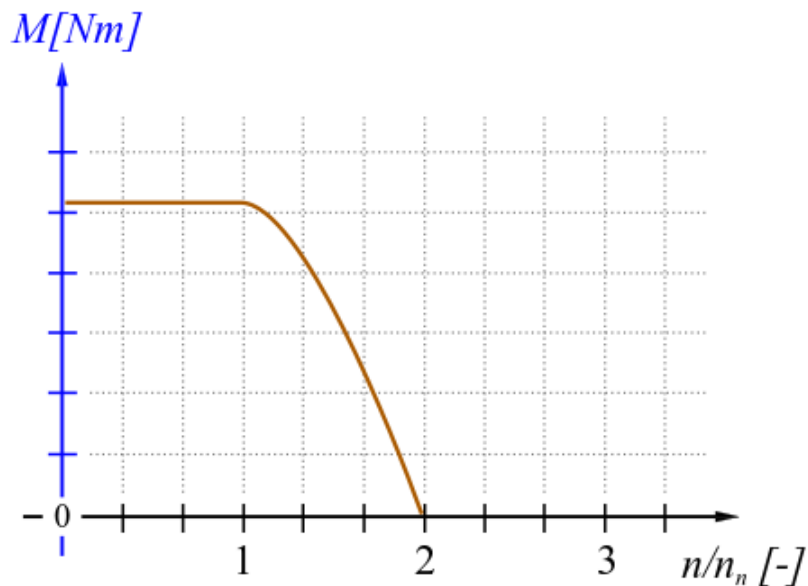
Použití elektromotorů má svůj význam, obzvlášť v oblasti ekologie a působení letadel na své okolí při pozemním přesouvání. Byly by produkovány daleko menší zplodiny a zároveň by se snížil možný hluk. Díky vlastnostem vícefázových motorů a jejich odolnosti proti chybám jsou dobrou volbou pro tuto oblast využití. [17]

2 Porovnání typů strojů

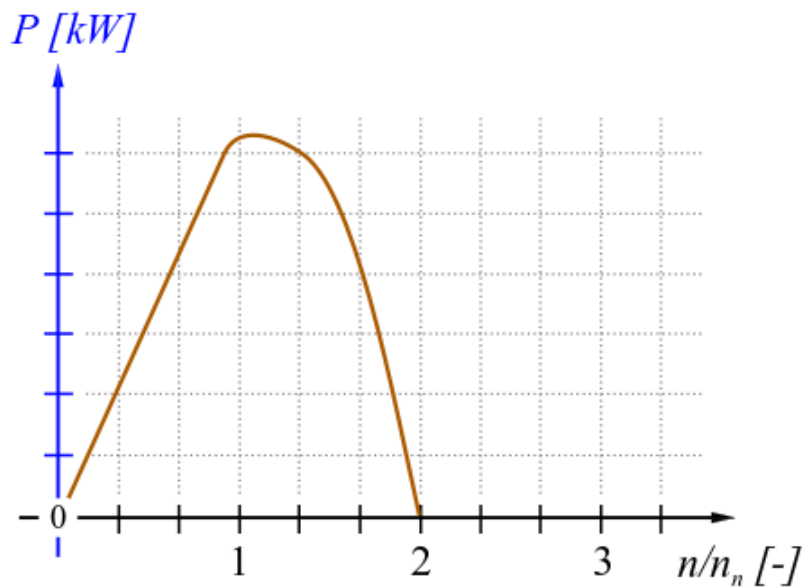
2.1 Synchronní motor s permanentními magnety (PMSM)

2.1.1 PMSM s vnějšími magnety (SPMSM)

Synchronní motory s povrchovými permanentními magnety jsou určeny pro nižší otáčky a vyšší počet pólů. Na obrázku níže je vidět konstantní moment do bodu jmenovitých otáček. Poté je zde ale prudký pokles momentu se zvyšujícími otáčkami. To je zapříčiněno tím, že už dále nemohou být odbuzovány permanentní magnety v rotoru pomocí navyšování proudu ve vinutí statoru. Toto je dáno velikostí příčné a podélné indukčnosti. Dále je to také dáno maximálním napájecím napětím a maximálním výkonem výkonových prvků v měniči.



Obr. 12: Typická trakční charakteristika SPMSM [18]



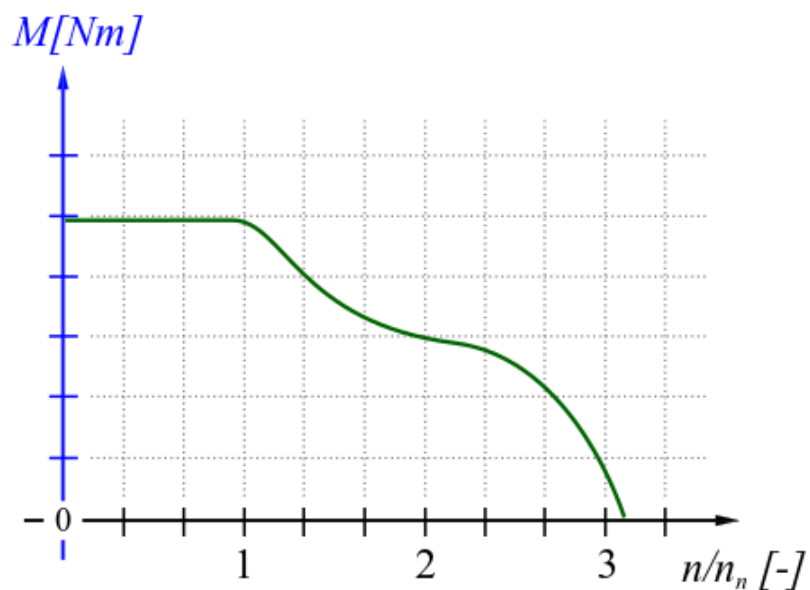
Obr. 13: Typická výkonová charakteristika SPMSM [18]

Na výkonové charakteristice lze vidět konstantní nárůst výkonu až do jmenovitých otáček stroje. V druhé části, kde má být výkon konstantní, ale dochází k prudkému poklesu z důvodů vlastností stroje stejně jako u momentu.

2.1.2 PMSM s vnitřními magnety (IPMSM)

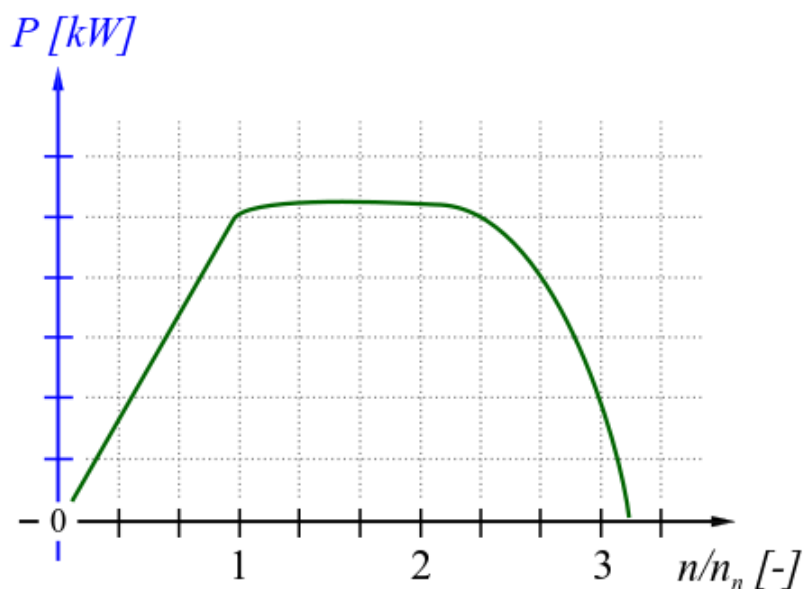
Umístění magnetů do vnitřní části rotoru dává možnosti stroji pracovat ve vyšších otáčkách, protože má motor větší indukčnost. Také je zde pomocný vliv reluktančního momentu. Díky tomu není potřeba tak vysokého proudu na odbuzení jako u SPMSM. To nám dává možnost stroj odbuzovat do vyšších otáček, protože limitu napájecího napětí nedosáhneme tak rychle.

Na momentové charakteristice PMSM s vnitřními magnety si lze všimnout stejné konstantní části do jmenovitých otáček motoru. Poté je zde ale rozdíl. V oblasti po jmenovitých otáčkách zde není pokles prudký, ale jen pozvolný hyperbolický.



Obr. 14: Typická trakční charakteristika IPMSM [18]

Výkonová charakteristika je v tomto stejná. Je zde nárůst výkonu po jmenovité otáčce v oblasti konstantního momentu a poté konstantní část výkonu v druhé oblasti. Na konci je propad kvůli omezení stroje.



Obr. 15: Typická výkonová charakteristika IPMSM [18]

2.2 Asynchronní motor (IM)

Asynchronní motory jsou nejjednodušší typy motorů. Zároveň jsou levnější než synchronní motory s permanentními magnety. Je tomu tak hlavně z důvodu ceny permanentních magnetů.

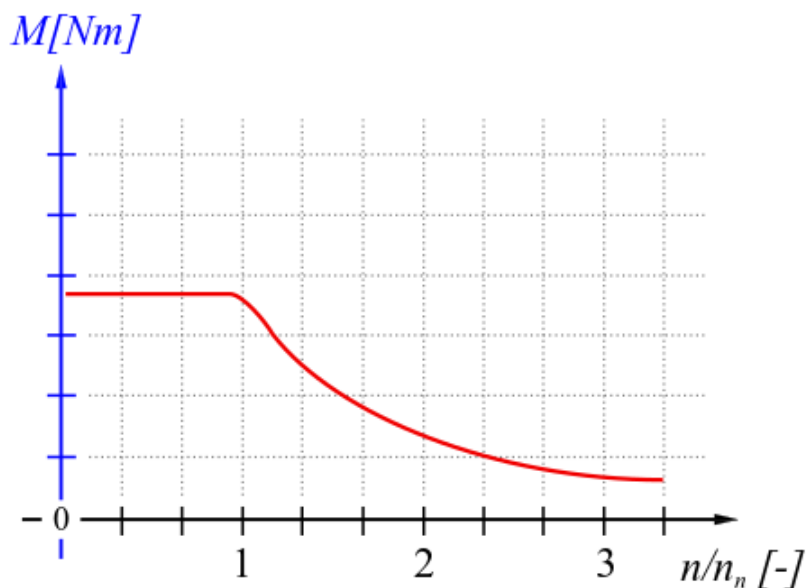
Asynchronní stroje obecně jsou založeny na indukování napětí, a tím vytvořených proudů v rotoru. Z toho důvodu se jim říká často indukční motor – IM.

Konstrukčně mohou být asynchronní stroje rozděleny podle konstrukce rotoru. Ten může být buďto s kotvou nakrátko, nebo kroužkovou. [19]

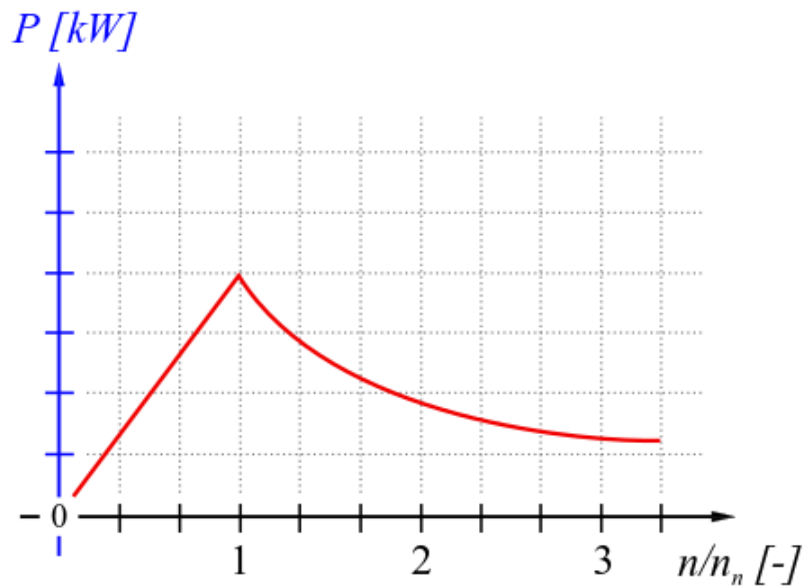
Trakční charakteristika asynchronního motoru má konstantní moment stejně jako PMSM do jmenovitých otáček. Poté nastane hyperbolické klesání.

Trakční charakteristiku můžeme rozdělit na dvě části. Jedna část je před dosažením jmenovitých otáček a druhá část je po dosažení těchto otáček. V první části můžeme řídit motor zvyšováním napětí. Při dosažení jmenovitého napětí dosáhneme i jmenovitých otáček. V tuto chvíli nelze dále navyšovat napětí. Podle základního algoritmu regulace $\frac{U_s}{f_s} = \text{konst.}$ tedy dále můžeme regulovat asynchronní motor jen pomocí frekvence. Moment je ale nepřímo úměrný frekvenci. Z toho důvodu klesá moment hyperbolicky v druhé části trakční charakteristiky.

Na druhou stranu je ale dosažený moment pro stejnou velikost a hmotnost motoru daleko menší než u PMSM.



Obr. 16: Typická trakční charakteristika asynchronního motoru [18]



Obr. 17: Typická výkonová charakteristika asynchronního motoru [18]

Na výkonové charakteristice indukčního motoru lze vidět lineární nárůst výkonu po jmenovité otáčce stejně jako u PMSM. Rozdíl je ale v oblasti po jmenovitých otáčkách, kde dochází ke klesání.

2.3 Porovnání PMSM a IM

Každý motor má své výhody i nevýhody. PMSM jsou v poslední dekádě často používané do pohonných jednotek automobilů kvůli svojí vysoké hustotě výkonu v porovnání s ostatními typy.

PMSM mají jako jednu z velkých nevýhod finanční náklady. To je kvůli ceně vzácných zemin používaných do permanentních magnetů, bez kterých by motor nedosahoval tak vysoké hustoty výkonu. Další velký technický problém je složité odbuzování permanentních magnetů. SPMSM mají také větší vzduchovou mezeru. Další velká komplikace je odvod ztrátového tepla, který musí být provozován vodním chlazením. Na druhou stranu nemají ale PMSM budící vinutí a tím pádem ani ztráty v budícím vinutí.

IM mají až třikrát horší hustotu výkonu než PMSM. Velké plus je v poslední době ale jejich dobrá cenová dostupnost. Nepotřebují ke svému fungování žádné drahé a vzácné materiály jako PMSM. Konstrukčně jsou také jednoduché. Kromě nižší hustoty výkonu oproti PMSM mají také horší účinnost a účinnost do jmenovitých otáček. [18]

Tab. 2: Porovnání IM a PMSM

PMSM	IM
<i>Výhody</i>	<i>Výhody</i>
Vyšší hustota výkonu	Jednoduchá konstrukce
Složitě odbuzování permanentních magnetů	Vyšší účinnost při otáčkách vyšších, než jsou jmenovité
Vyšší účinnost do jmenovitých otáček	Levnější
Vyšší účinník	
<i>Nevýhody</i>	<i>Nevýhody</i>
Drahé permanentní magnety	Nízká hustota výkonu
Složitější odbuzování permanentních magnetů	Horší účinnost při otáčkách nižších, než jsou jmenovité
Horší účinnost po jmenovitých otáčkách	Horší účinník

Tabulce 2 jsou vypsány některé výhody a nevýhody dvou používaných motorů.

3 Srovnání vícefázových motorů s konvenčními třífázovými

Porovnání klasických třífázových a vícefázových motorů lze provést v několika oblastech. Níže jsou popsány rozdíly mezi těmito typy motorů jako jsou např. nouzové dojetí do cíle, nižší Joulovy ztráty a použitý střídač.

3.1 Nouzové dojetí do cíle

U každého stroje se může objevit za určitých okolností porucha. Jinak tomu není ani u elektrických pohonů třífázových nebo i vícefázových. Kvůli stále větším nárokům na bezpečnost provozu a stále většímu používání vícefázových strojů se kladou nároky na větší bezpečnost a spolehlivost celého pohonu. Jako určité měřítko těchto faktorů se používá odolnost proti chybám nebo robustnost. Ta je definována jako schopnost správně sledovat otáčky a moment v poruchovém stavu. Robustnost se u konvenčních třífázových pohonů zajišťuje vylepšením struktury a technologie motoru. [20] Mezi tyto technologie patří např. integrované snímání proudu, řízení teploty nebo systém chlazení kapalinou v uzavřené smyčce. [21] Naopak vícefázové motory mají tuto odolnost vyšší a nevyžadují žádné další vylepšení navíc, nýbrž pouze správné řízení během poruchového stavu. To je také důvod, proč jsou vhodnou volbou do aplikací, kde je potřeba větší spolehlivost jako je například námořní nebo letecká doprava. Existují 3 hlavní oblasti chyb:

- Chyba na výkonovém měniči
- Chyba způsobená poruchou senzorů
- Mechanická chyba ve stroji jako např. zkrat fáze nebo mezi fázemi, odpojení fáze apod.

Můžeme nalézt spoustu vad, které se řadí pod mechanické chyby. Poruchy, které tyto chyby způsobují, můžeme dělit na poruchy na statoru, rotoru, poruchy ložisek, poruchy ohnuté hřídele a nepravidelnosti vzduchové mezery.

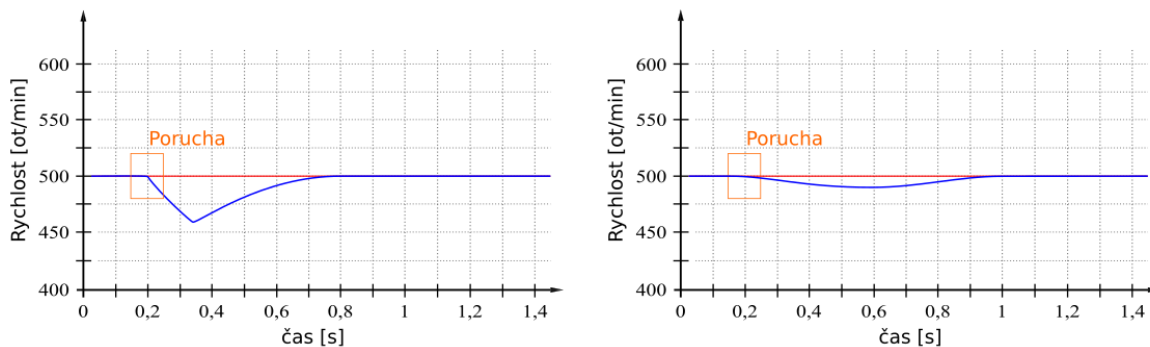
Nejčastějšími mechanickými poruchami jsou poruchy vinutí statoru, ložisek, zlomená tyč rotoru nebo prasklé koncové kruhy nakrátko rotoru, poruchy hřídele a spojky, přehřátí, pokles točivého momentu, vibrace strojů a hluk.

Poruchy senzorů, obvykle snímačů rychlosti, napětí a proudů pro řízení, mohou mít za

následek přílišné namáhání strojů.

Poruchy výkonového měniče patří mezi nejběžnější poruchy elektrických pohonů. Může se jednat o poškození výkonové součástky, která poté funguje buďto jen ve stavu zapnuto anebo vypnuto. Z toho vyplývá, že výkonový měnič poté může udržovat některou fází otevřenou nebo naopak ztratit schopnost řízení na dané fázi. V tomto případě se tedy analyzuje systém jako zcela jiný. [20]

Byla provedena simulace a experiment, který testoval pětifázový motor v přechodu z ustáleného stavu do poruchového. Pro řízení v poruchovém stavu jsou ve studii porovnávány dva typy řízení. Jedním z nich je prediktivní řízení proudu (Predictive current control – PCC) a druhým je proporcionální rezonanční řízení (Proportional resonant control – PR). Navíc je zde aplikováno kritérium minimálních ztrát z důvodu nepřekročení maximálních možných proudů v poruchovém stavu na statoru. Kdyby tomu tak nebylo, mohlo by dojít k velkým tepelným ztrátám na vinutí, které by stroj nebyl schopen uchládit.



Obr. 18: Otáčky za minutu během přechodu z ustáleného na poruchový stav (převzato a zprůměrováno z [20])

Na obrázku výše jsou vyobrazeny otáčky za minutu závislé na čase během přechodu z ustáleného do poruchového stavu. Nalevo je metoda řízení PCC a napravo PR. Zatížení testovaného motoru je na 0,56 násobku jmenovitého momentu. Toto číslo bylo dosaženo z kritéria minimálních ztrát. Z experimentu je vidět, že každá metoda má jiný průběh. Důležité ale je, že oba styly řízení vedou ke stejnému závěru, a to je, že pětifázový motor lze řídit a využívat i v poruchovém stavu. [20]

3.2 Joulovy ztráty

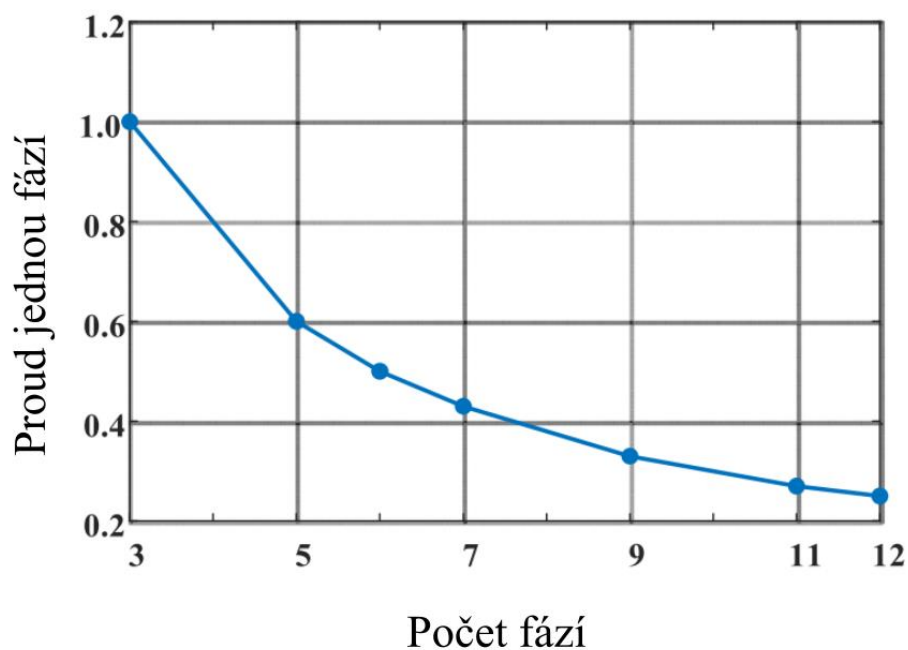
Pro dva stroje, které jsou totožné s výjimkou počtu fází statoru a jsou vyrobeny pro stejný moment při určité rychlosti otáček, vychází ztráty rotoru, plocha vzduchové mezery a potřebný proud ve statorovém vinutí stejně. Rozdíl se nachází ve ztrátách ve statorovém vinutí. Díky vícefázovému statorovému vinutí mohou jeho ztráty klesnout o několik procent.

Tab. 3: Snížení ztrát ve statorovém vinutí podle počtu fází [22]

Počet fází	5	6	9	12	15	∞
Redukce ztrát ve vinutí [%]	5,6	6,7	7,9	8,3	8,5	8,8

V tabulce je možné vidět snížení ztrát vícefázového stroje podle počtu fází. Je zde vidět, že klesání ztrát je hyperbolické. To znamená, že při použití vysokého počtu fází už nedochází k takovému počtu snížení ztrát, aby to bylo výhodné.

Důležitá informace je, že při použití vyššího počtu fází statorového vinutí se zvyšuje i podíl vyšších harmonických složek proudu a magnetického toku. Z toho důvodu mohou narůstat ztráty v železe a ztráty v rotoru. Zároveň ale vyšší počet fází znamená rozdělení proudu do jednotlivých fází. V důsledku toho se snižuje proud protékající fází. [22]



Obr. 19: Proud protékající fází vztahovaný k třífázovému motoru [23]

Na obrázku 19 je vidět snížení proudu při použití vyššího počtu fází. Je to vztaženo na třífázový motor, který značí 100 % proudu. Je vidět, že u šestifázového systému je proud fází poloviční. Čím větší je počet fází, tím je menší pokles proudu na fázi. Největší skok je tedy mezi třífázovým a pětifázovým systémem. [23]

Za zmínku stojí i chování stroje v poruchovém stavu. Pokud by došlo k chybě, kdy by byla jedna z fází odpojena, mohou nastat 3 možnosti řízení:

- Ponechat proud v nezasazených fázích jako byl před poruchou
- Zvýšit proud v ostatních fázích na takovou úroveň, aby ztráty ve vinutí statoru byly stejné jako před poruchou
- Zvýšit proud ve zbývajících fázích natolik, aby výsledný moment a ztráty rotoru zůstaly neměnné

Tab. 4: Srovnání ztrát a výstupního výkonu podle počtu fází statorového vinutí a typu řízení motoru [22]

Počet fází	Způsob řízení	Skuz	Výstupní výkon (%)	Změna ztrát ve vinutí statoru (%)	Změna ztrát ve vinutí rotoru (%)
6	1.	0,01427	-1,29	-16,7	42,7
	2.	0,01195	-0,59	0	19,5
	3.	0,01000	0,00	+20	0
9	1.	0,01259	-0,78	-11,1	25,9
	2.	0,01122	-0,37	0	12,2
	3.	0,01000	0,00	12,5	0
12	1.	0,01186	-0,56	-8,3	18,6
	2.	0,01089	-0,27	0	8,9
	3.	0,01000	0,00	9,1	0
15	1.	0,01145	-0,44	-6,7	14,5
	2.	0,01070	-0,21	0	7
	3.	0,01000	0,00	+7,1	0

Dle hodnot z tabulky, která byla vytvořena pro klasickou zátěž s ventilátorem nebo vrtulí pro jmenovitý pracovní bod, si lze všimnout jaké výsledky mají dané způsoby řízení.

První způsob má za následek zvýšení skluzu a momentu, snížení ztrát statoru a razantní zvýšení ztrát ve vinutí rotoru. Druhý způsob řízení nemá tak špatný dopad na moment a skluz. Zároveň nedochází k tak velkým ztrátám na rotoru jako v případě prvního způsobu řízení. Třetí způsob eliminuje změnu momentu, skluzu a ztrát rotoru na úkor velkých ztrát ve statorovém vinutím.

Je také vidět, že kromě použitého způsobu řízení má velikost ztrát vliv i počet fází statoru. Čím vyšší počet fází, tím menší ztráty. Za zmínku ale stojí, že v tabulce se nepočítá s dodatečnými ztrátami vzniklými v důsledku vyšších harmonických složek, které budou vznikat nevyvážeností motoru.

V praktickém použití může být komplikací proud protékající výkonovými prvky. Pokud je příliš vysoký, může dojít ke zničení součástky. Motory vytvořené s vyšším počtem fází tedy mohou obsahovat levnější a dostupnější výkonové prvky pro měniče než motory třífázové. [22]

3.3 Složitější střídač a levnější výkonové prvky

Pro napájení většiny elektrických motorů a pohonů, vytvořených pro větší výkon, se používají výkonové měniče. Volba měniče záleží na typu motoru, využití, dostupné napájecí síti atd.

Výhodou u vícefázových měničů je, že proud se rozdělí do více větví nebo fází. To má za důsledek:

- Snížení proudů a výkonů procházejících jednou součástkou, větví nebo fází
- Snížení obsahu nechtěných vysokých harmonických složek proudu
- Možnost vytvořit měniče pro vyšší výkony

Použit můžeme výkonový prvek, který je dimenzovaný na nižší proud. Díky snížení proudu výkonovou součástkou můžeme vytvořit měnič, který bude levnější. Naopak můžeme vytvořit i měnič, který bude dimenzovaný na stejný proud, ale bude pro motor s větším výkonem. [24]

Měniče pro vícefázové stroje se skládají z více součástek. Obecně platí, že čím větší počet fází má stroj na statoru, tím je potřeba více součástek na daný měnič. Právě vysoký počet součástek ale znamená větší riziko poškození jedné součástky, fáze, a tedy větší pravděpodobnost poruchy.

4 Budoucnost vícefázových motorů v elektromobilitě

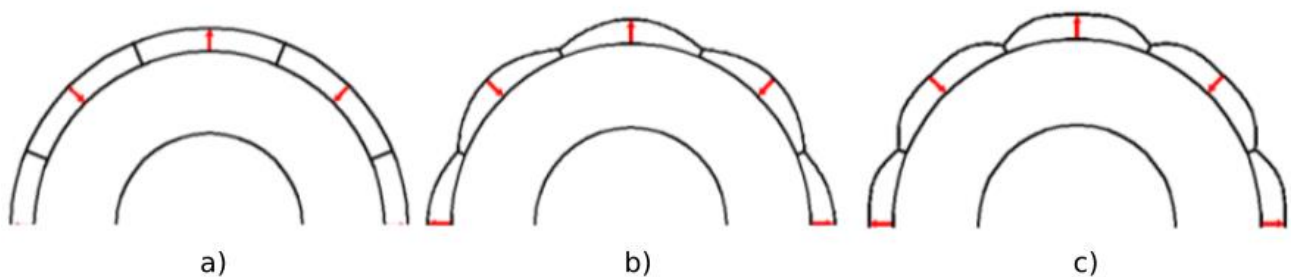
4.1 Injektáž vyšších harmonických pro zlepšení momentu

Jednou z dalších výhod vícefázových motorů je jejich možnost zvýšení momentu při použití injektáže vyšších harmonických. Při využití injektáže třetí harmonické se u pětifázového stroje zjistilo, že optimální amplituda třetí harmonické je $1/6$ základní složky. To platí obecně i pro PMSM, kde se ale v potaz bere daleko více faktorů jako je např. tvar rotoru.

Pokud má tvar standardního hladkého rotoru a je napájen sinusovým proudem, vzniká tím zvlnění momentu, které je nežádoucí. Z tohoto důvodu se společně s injektáží přizpůsobují i tvary magnetů na rotoru.

4.1.1 Různé tvary permanentních magnetů a proudu statoru

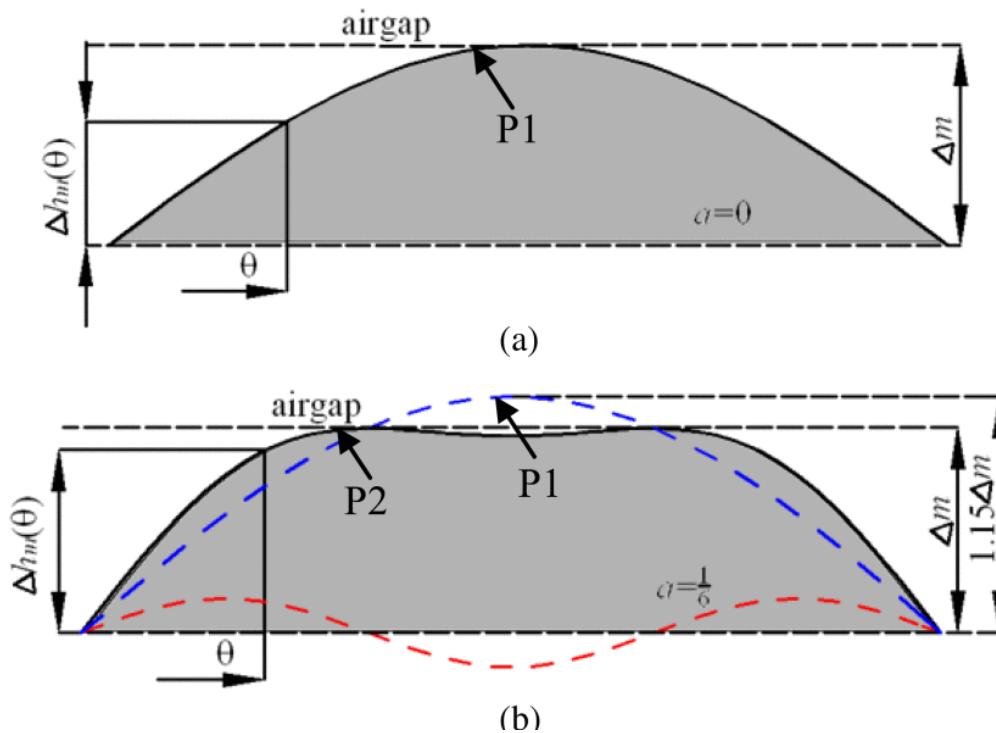
Pro pětifázový stroj je možné využít 3 typy tvaru rotorových magnetů. Ty jsou vyobrazeny níže. Varianta a) znázorňuje klasický hladký rotor. Je vidět, že pro variantu b) a c) nebude konstantní šířka čistě vzduchové mezery jako u varianty a). Dále je vidět, že pro varianty b) a c) není povrch magnetů konstantní. U varianty b) je magnet nejvyšší v ose d a je zde tedy neušší čistě vzduchová mezera. U osy q je tomu naopak. Varianta c) má tyto vzdálenosti a šířku čistě vzduchové mezery závislou na podílu třetí harmonické ve vzhledu magnetu.



Obr. 20: Tvary rotoru pro PMSM s vnějšími magnety [25]

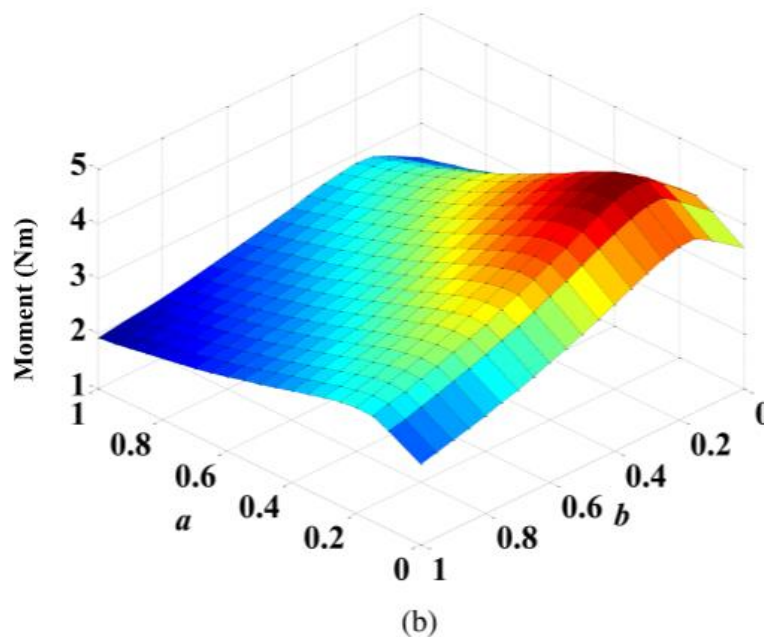
Varianta a) je čistě konvenční varianta rotoru s povrchovými permanentními magnety. Varianta b) respektuje sinusový signál a tok procházející skrze vzduchovou mezeru. Stejně jako varianta b), tak i c) respektuje tok, který bude procházet vzduchovou mezerou. Zde to

bude ale nesinusový tok, který se bude vytvářet proudem, který je složen ze základní a třetí harmonické složky. Přesný vzhled magnetů je dán poměrem velikostí složek proudu. Jak tento vzhled vznikl je vidět na obrázku 21. Je to dáno součtem 1. a 3. harmonické složky o přesném poměru, který je odvozen a vypočítán na hodnotu $1/6$ základní složky.



Obr. 21: Přesnější vzhled permanentního magnetu na rotoru pro injektáž třetí harmonické [25]

Na obrázku 22 je ukázán 3D graf. Osa a znázorňuje poměr třetí harmonické k základní složce. Osa b ukazuje tvar magnetu založený na poměru základní a třetí složky proudu. Je vidět, že největší zlepšení momentu vychází pro $a = 1/6$ a $b = 1/6$. Při použití sinusového tvaru permanentních magnetů a proudu s injektáží třetí harmonické vychází zlepšení maximálně 15,4 %.



Obr. 22: 3D graf závislosti použitého poměru tvaru magnetu a a proudu na zlepšení momentu [25]

Při aplikaci varianty magnetů c) z obrázku 20 je teoretické zlepšení momentu až 33 % v porovnání s použitím sinusového tvaru magnetů a proudu. Při dalších úpravách lze dosáhnout až 37% zlepšení. Celkové shrnutí lze vidět i v tabulce 4. [25]

Tab. 4: Srovnání zlepšení momentu pro různé rotorů a tvarů proudu [25]

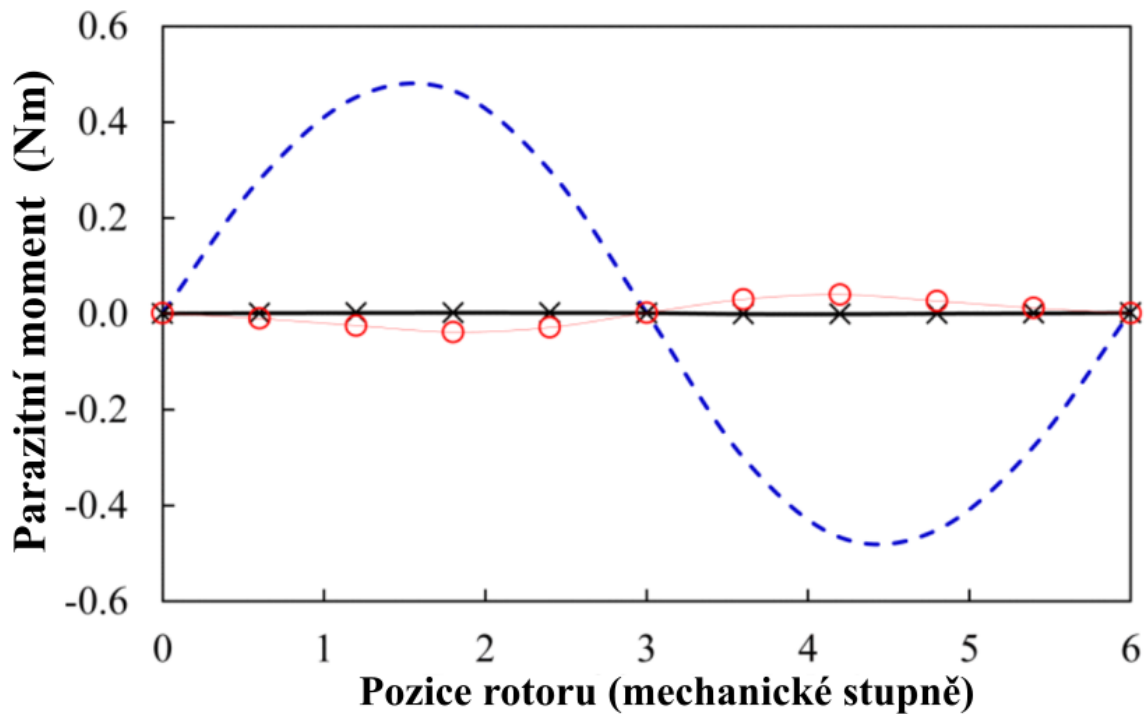
Tvar magnetů/proudu	Sinusový	Sin. + 3. harm.
Sinusový	0 %	15,4 %
Sin. + 3. harm.	15,4 %	37 %

4.1.2 Porovnání momentu

Při porovnávání momentu stroje se nelze soustředit jen na velikost momentu, ale také na jeho zvlnění. U PMSM je jedním z nepříjemných faktorů zvlnění momentu, které je tvořeno vzájemnými silami mezi rotorem a statorem.

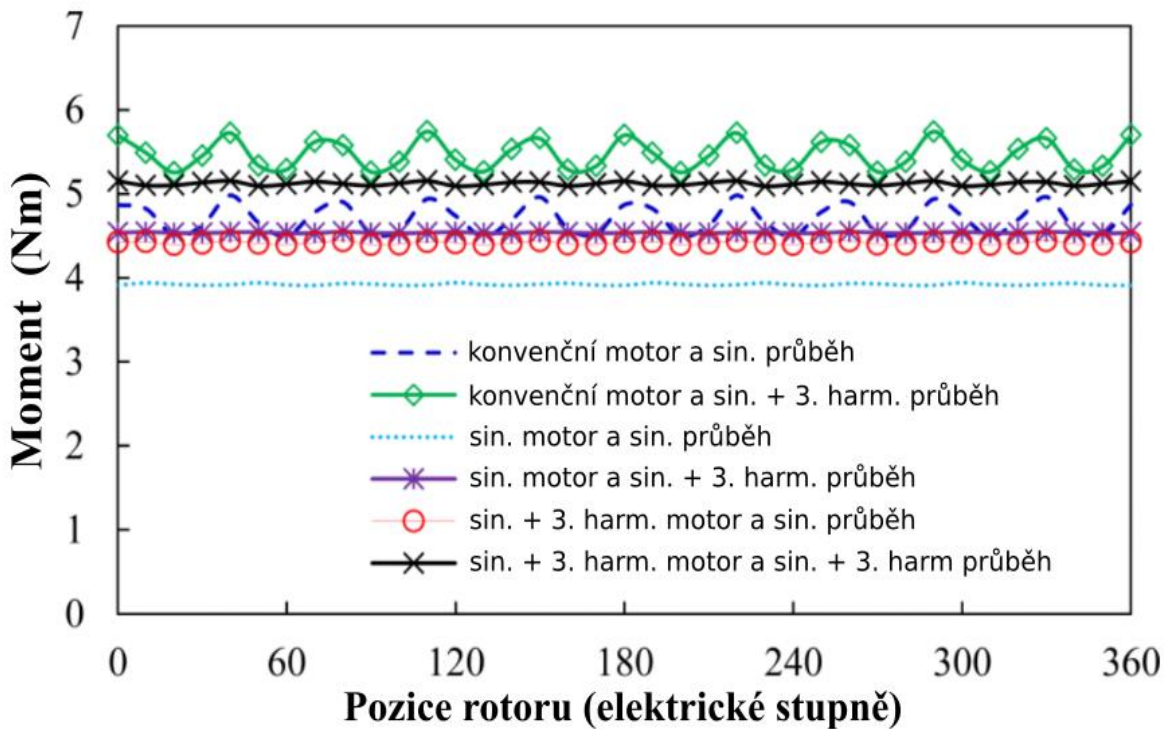
Obrázek 23 obsahuje tři křivky. Modrá křivka patří konvenčnímu hladkému rotoru. Černá křivka sinusovému typu permanentních magnetů na rotoru. Červená křivka zobrazuje zvlnění momentu, který vzniká v motoru, který je určen pro injektáž třetí harmonické a má k tomu uzpůsobený vzhled rotoru. Je patrné, že nejhorší je konvenční rotor a nejlepší

sinusový tvar rotoru se sinusovým proudem ve statorovém vinutí. Avšak ani způsob pro injektáž 3. harmonické není špatný.



Obr. 23: Zvlnění momentu pro různé typy rotoru [25]

Obrázek 24 znázorňuje graf, který porovnává dosažené momenty a jejich zvlnění pro různé varianty použitých vzhledů permanentních magnetů rotoru a dva průběhy elektrického proudu statorem. Na první pohled je vidět, že nejhůře je na tom sinusový průběh proudu se sinusovou variantou vzhledu rotoru. Mohlo by se zdát, že nejlépe je na tom konvenční motor s injektáží třetí harmonické. Kvůli svému velkému zvlnění tomu tak ale není. Nejlépe je na tom rotor s přizpůsobenými magnety pro injektáž třetí harmonické. Ten má o něco menší moment. Na druhou stranu jeho vlnění je téměř nulové. [25]



Obr. 24: Graf momentů pro různé typy rotorů a průběhů proudu [25]

Velice důležitý je ale fakt, že vytvoření a aplikace magnetů, které by měly tvar respektující injektáž třetí harmonické, není tak jednoduché. Naopak by to bylo složité a velmi nákladné. V momentální chvíli na trhu neexistují společnosti, které by takový tvar dokázaly dodat. Z toho důvodu je v praxi nemožné získat příslušný moment jako je napsáno výše. Proto se v praktickém použití lze bavit jen o variantách bez tohoto typu motoru. Z těchto velikostí momentu vychází nejlépe klasický konvenční rotor s injektáží. Jak je ale zmíněno výše, tak zvlnění momentu je nežádoucí a problémové. Další možností je opět klasický rotor s hladkými magnety. Tentokrát napájený čistě sinusovým proudem. Stejně jako varianta s injektáží, i zde dochází ke zvlnění momentu. Nejlepší reálnou možností se tedy stává varianta se sinusovým tvarem rotoru a injektáží, kdy dochází k minimálnímu zvlnění momentu oproti dvěma výše zmíněným variantám. Z praktického hlediska je tato varianta nejlepší v aplikaci pro elektromobilitu.

4.1.3 Ztráty v železe a ve vinutí

Ztráty v železe závisí na toku procházejícím magnetickým obvodem. A to nejenom na základní složce, ale také na vyšších harmonických složkách. Nejnížší ztráty v železe má rotor se sinusovou variantou, a to i pokud použijeme injektáž třetí harmonické. Pro rotor uzpůsobený pro injektáž jsou ztráty vyšší, ale stále ne tak velké jako u konvenčního rotoru. Celkově to ale není tak velký nárůst ztrát.

Daleko větší nárůst mají ztráty ve vinutí statoru. Nárůst ztrát ve vinutí při použití injektáže je přes 30 %. Je ale důležité zmínit, že pokud by se vytvořil motor, který by měl díky injektáži stejný výstupní moment jako klasický motor se sinusovým průběhem, tak by ztráty ve vinutí byly téměř totožné. Tento motor má navíc o 30 % menší délku. Díky tomu se ušetří na celkových nákladech na motor. [25]

Závěr

V této práci jsou shrnuty základní informace ohledně vícefázových motorů a jejich použití v elektromobilitě. Na trhu teď není mnoho výrobců, kteří by přímo komerčně vyráběli vícefázové stroje. Jedním z těch, kteří tak dělají je DANA TM4, která má řadu variant pro různé aplikace. K popisu byl vybrán jen jeden z těchto motorů, který je uzpůsoben pro klasické komerční použití. Dále byl nalezen turecký výrobce, který má také minimálně jeden vícefázový motor. Oba tyto motory jsou synchronní s permanentními magnety. Nebyly nalezeny motory, které by měly jinou konstrukci jako např. asynchronní nebo reluktanční. Je ale několik studií, které aplikace těchto konstrukcí motorů sledují a je možné, že do budoucna se tedy i tyto typy motorů na trhu objeví.

Různé typy motorů mají jiné trakční charakteristiky. Tyto motory byly porovnány v samostatné kapitole. Je důležité zmínit, že neexistuje ideální volba. Typ zvoleného motoru velmi závisí na aplikaci a možnostech v daném případě.

Jedním z hlavních faktorů a výhod vícefázových strojů je jejich větší spolehlivost. Díky většímu počtu fází je chyba na jedné fázi částečně zanedbatelná a stroj dokáže dojet do cíle, i když na nižší celkový výkon. Musí se ale počítat s komplexnějším řízením. Joulové ztráty vychází nižší pro vyšší počet fází.

Důležitým prvkem vícefázových motorů oproti klasickým třífázovým je možnost injektáže vyšších harmonických. Při injektáži se docílí většího momentu při stejném rozměru stroje, a tedy i větší hustotě momentu motoru. Injektáž má i několik nevýhod jako jsou zvýšení ztrát v železe a vinutí statoru. To znamená, že není potřeba většího měniče pro provoz takového stroje s použitím injektáže.

Injektování vyšších harmonických, které je popsáno v této práci je určeno pro pětifázový PMSM motor. Jiné varianty jako sedmifázové, devítifázové nebo třeba indukční motory mohou mít jiné výsledky. Je tedy jasné, že toto je složitější způsob využívání motoru. Z pohledu této práce je zde velký potenciál výzkumu a využití celého odvětví vícefázových motorů pro elektromobilitu v budoucnu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MarkLines, s.r.o., 2018. *Nissan LEAF Teardown: Powertrain with electromechanical structure, and drive system* [online]. Tokyo: MarkLines, s.r.o. [cit. 21. 5. 2021]. Dostupné z: https://www.marklines.com/en/report_all/rep1779_201811
- [2] EcoMotors, s.r.o., 2021. *Nissan Leaf* [online]. New Jersey: EcoMotors, s.r.o. [cit. 26. 5. 2021]. Dostupné z: https://evcompare.io/cars/nissan/nissan_leaf_62kwh_e_plus/
- [3] Internet Brands Automotive Group, 2017. The Car Connection. *2017 Nissan Leaf* [online]. Internet Brands Automotive Group. [cit. 21. 5. 2021]. Dostupné z: https://www.thecarconnection.com/overview/nissan_leaf_2017
- [4] Západočeská univerzita v Plzni, 2021. *Točivé elektrické stroje*. Výukový materiál doc. Ing. Vladimíra Kindla Ph.D. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [5] EcoMotors, s.r.o., 2021. *BMW i3* [online]. New Jersey: EcoMotors, s.r.o. [cit. 26. 5. 2021]. Dostupné z: https://evcompare.io/cars/bmw/bmw_i3_beve_120_ah/
- [6] Kelley Blue Book, s.r.o., 2018. *Used 2018 BMW i3* [online]. Kelley Blue Book, s.r.o. [cit. 21. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.kbb.com/bmw/i3/2018/>
- [7] EcoMotors, s.r.o., 2021. *Tesla Model S* [online]. New Jersey: EcoMotors, s.r.o. [cit. 26. 5. 2021]. Dostupné z: https://evcompare.io/cars/tesla/tesla_model_s_p100d/
- [8] Consumer Reports, s.r.o., 2018. *Tesla Model S* [online]. Consumer Reports, s.r.o. [cit. 21. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.consumerreports.org/cars/tesla/model-s/2018/overview/>
- [9] EcoMotors, s.r.o., 2021. *Chevrolet Bolt* [online]. New Jersey: EcoMotors, s.r.o. [cit. 26. 5. 2021]. Dostupné z: https://evcompare.io/cars/chevrolet/chevrolet_bolt/
- [10] EcoMotors, s.r.o., 2021. *Hyundai Ioniq Electric* [online]. New Jersey: EcoMotors, s.r.o. [cit. 26. 5. 2021]. Dostupné z: <https://evcompare.io/cars/hyundai/hyundai-ioniq-electric-38-kwh/?from=search.title>

- [11] EcoMotors, s.r.o., 2021. *Porsche Taycan* [online]. New Jersey: EcoMotors, s.r.o. [cit. 26. 5. 2021]. Dostupné z: <https://evcompare.io/cars/porsche/porsche-taycan-4s-plus/>
- [12] EcoMotors, s.r.o., 2021. *Ford Mustang Mach-E* [online]. New Jersey: EcoMotors, s.r.o. [cit. 26. 5. 2021]. Dostupné z: <https://evcompare.io/cars/ford/ford-mustang-mach-e-er-rwd/>
- [13] BioAge Group, s.r.o., 2015. *Renault boosts ZOE EV's range by almost 15% to 149 miles with new motor unit* [online]. Mill Valley: BioAge Group, s.r.o. [cit. 27. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2015/03/20150304-zoe.html>
- [14] EcoMotors, s.r.o., 2021. *Renault ZOE* [online]. New Jersey: EcoMotors, s.r.o. [cit. 26. 5. 2021]. Dostupné z: https://evcompare.io/cars/renault/renault_zoe_2017_44kwh_r90/
- [15] Dana TM4 INC., 2020. *SUMOTM HD* [online]. Boucherville: Dana TM4. [cit. 27. 11. 2020]. Dostupné z: <https://www.danatm4.com/products/systems/sumo-hd/>
- [16] Aselsan, a.s., 2017. *HVSM-285* [online]. Interní dokument podniku Aselsan, a.s. se sídlem v Ankaře. [cit. 13. 3. 2021]. Dostupné z: https://www.aselsan.com.tr/HVSM285_Permanent_Magnet_Motor_For_HybridElectric_Vehicle_Applications_4348.pdf
- [17] GRIGORE-MÜLER, Octavian a BARBELIAN, Mihai. The simulation of a multi-phase induction motor drive. *2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*. 2010, 297-306. ISSN 1842-0133.
- [18] Západočeská univerzita v Plzni, 2021. *Elektrické motory v e-mobilitě*. Výukový materiál doc. Ing. Vladimíra Kindla Ph.D. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [19] KOČMAN, Stanislav a KOUDELKA, Ctírad. *Asynchronní stroje*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004.
- [20] GUZMAN, Hugo, GONZALEZ, Ignacio, BARRERO, Federic a DURÁN, Mario. Open-Phase Fault Operation on Multiphase Induction Motor Drives. In: GREGOR, Raúl. *Induction Motors - Applications, Control and Fault Diagnostics*. Londýn: IntechOpen Limited, 2015, s. 327-356. ISBN: 978-953-51-6399-2.

-
- [21] CONSOLI, Alfio. Special Section on Robust Operation of Electrical Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012, **27**(2), 476-478. ISSN 1941-0107.
- [22] LEVI, Emil, BOJOI, Radu, PROFUMO, Francesco, TOLIYAT, Hamid a WILLIAMSON, S. Multiphase induction motor drives - A technology status review. *IET Electric Power Applications*. 2007, **1**(4), 489 - 516. ISSN 1751-8679.
- [23] SALEM, Ahmed a NARIMANI, Mehdi. A Review on Multiphase Drives for Automotive Traction Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2019, **5**(4), 1329-1348. ISSN 2332-7782.
- [24] SANTOS, C. Euzeli, JACOBINA, B. Cursino, ROCHA, Nady a SILVA, R. C. Edison. Six-Phase Machine Drive System With Reversible Parallel AC–DC–AC Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011, **58**(5), 2049-2053. ISSN 1557-9948.
- [25] WANG, Kai, ZHU, Zi-Qiang a OMBACH, Grzegorz. Torque Improvement of Five-Phase Surface-Mounted Permanent Magnet Machine Using Third-Order Harmonic. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2014, **29**(3), 735-747. ISSN 1558-0059.