

Fakulta elektrotechnická
Research and Innovation Centre for Electrical Engineering

Analýza možnosti návrhu strojů s redu- kovaným množstvím permanentních magnetů

Pracoviště: Research and Innovation Centre for Electrical Engineering

Číslo dokumentu: 22190 – 018 – 2024

Typ zprávy: Výzkumná zpráva

Řešitelé: Karel Hruška
Jan Laksar
Lukáš Sobotka
Jan Šobra

Hlavní řešitel: Karel Hruška

Počet stran: 32

Datum vydání: 24.10.2024

Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Automation and control system

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation Centre for
Electrical Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Karel Hruška
tel. +420 377 63 4429
khruska@fel.zcu.cz

Zpráva vznikla s finanční podporou projektu TAČR NCK2 TN02000054 BOVENAC
„Božek Vehicle Engineering National Center of Competence.“

Zpráva podléhá tajemství!

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá možnostmi návrhu elektrických strojů pro trakci s vyloučením použití permanentních magnetů s cílem dosažení pokud možno co nejvyšší účinnosti. Analýza je založena na principu náhrady existujícího asynchronního stroje synchronním strojem s vinutým rotorem a reluktančním synchronním strojem s možností doplňkového buzení.

Klíčová slova

elektrický stroj, asynchronní stroj, synchronní stroj, synchronní reluktanční stroj, pomocné buzení

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Reduced Permanent Magnet Volume Electric Machines Design Feasibility Study

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with possibility of design of electric machines for traction purposes with avoidance of permanent magnet usage with respect to achieve possibly highest machine efficiency. The analysis is based on the principle of replacement of existing induction machine by an electrically excited synchronous machine and synchronous reluctance machine with possibility of additional excitation.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

electric machine, induction machine, synchronous machine, synchronous reluctance machine, additional excitation

Seznam symbolů a zkratk

b_0	šíře otevření drážky	[m]
b_{pn}	šíře pólového nástavce	[m]
B_δ	amplituda indukce ve vzduchové mezeře	[T]
$B_{\delta 1}$	amplituda základní harmonické indukce ve vzduchové mezeře	[T]
C_{b1}	činitel tvaru magnetického pole buzení	[-]
C_{d1}	činitel tvaru magnetického pole statoru v ose d	[-]
C_{q1}	činitel tvaru magnetického pole statoru v ose q	[-]
D_b	průměr vodiče budícího vinutí	[m]
F_{b0}	magnetické napětí buzení naprázdno	[A]
g	převod proudu synchronního stroje	[-]
g_L	převod indukčností synchronního stroje	[-]
I_1	proud statorem	[A]
I_{b0}	budící proud naprázdno	[A]
I_{bmax}	maximální budící proud	[A]
I_{bopt}	optimální budící proud	[A]
I_n	jmenovitý proud	[A]
k_C	Carterův činitel	[-]
k_{sat}	činitel nasycení magnetického obvodu	[-]
k_{v1}	činitel statorového vinutí	[-]
L_b	indukčnost budícího vinutí	[H]
L_d	podélná indukčnost stroje	[H]
L_q	příčná indukčnost stroje	[H]
L_μ	magnetizační indukčnost stroje	[H]
m	počet fází vinutí	[-]
M	moment	[Nm]
M_n	jmenovitý moment	[Nm]
n	rychlost	[min ⁻¹]
n_n	jmenovitá rychlost	[min ⁻¹]
N_b	počet závitů buzení	[-]
N_c	počet závitů budící cívky	[-]
N_{s1}	počet závitů statorového vinutí	[-]

P	výkon	[W]
P_n	jmenovitý výkon	[W]
R_2	poloměr rotoru	[m]
R_b	odpor budícího vinutí	[Ω]
S_{RM}	průřez cívky budícího vinutí reluktančního stroje	[m ²]
S_{SM}	průřez cívky budícího vinutí synchronního stroje	[m ²]
t_{d1}	drážková rozteč statoru	[m]
U_{i0}	indukované napětí naprázdno	[V]
U_n	jmenovité napětí	[V]
δ	velikost vzduchové mezery	[m]
ΔP	celkové ztráty	[W]
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	[W]
ΔP_{J1}	Jouleovy ztráty statoru	[W]
ΔP_{J2}	Jouleovy ztráty rotoru	[W]
λ	vyniklost	[-]
$\cos \varphi_n$	jmenovitý účinník	[-]
η	účinnost	[-; %]
μ_0	permeabilita vakua	[H.m ⁻¹]

Obsah

1 ÚVOD.....	6
2 ASYNCHRONNÍ STROJ SIEMENS 1LA7 163-4AA10.....	7
3 ODVOZENÝ ELEKTRICKÝ BUZENÝ SYNCHRONNÍ STROJ.....	9
3.1 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH STROJE.....	9
3.2 PROVOZ S BUZENÍM NAPRÁZDNO PŘI JMENOVITÉM VÝKONU.....	11
3.3 OPTIMÁLNÍ PROVOZ PŘI JMENOVITÉM VÝKONU.....	13
3.4 PROVOZ BEZ BUZENÍ STROJE.....	14
4 SYNCHRONNÍ RELUKTANČNÍ STROJ S DOPLŇKOVÝM BUZENÍM.....	15
4.1 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH STROJE.....	15
4.2 EKVIVALENTNÍ SYNCHRONNÍ RELUKTANČNÍ STROJ.....	17
4.2.1 Provoz bez buzení stroje.....	17
4.2.2 Provoz s buzením odpovídajícím synchronnímu stroji.....	20
4.2.3 Provoz s buzením odpovídajícím ztrátám v buzení synchronního stroje.....	20
4.2.4 Provoz s optimálním buzením.....	21
4.3 OPTIMÁLNÍ SYNCHRONNÍ RELUKTANČNÍ STROJ.....	22
4.3.1 Provoz bez buzení stroje.....	22
4.3.2 Provoz s buzením odpovídajícím synchronnímu stroji.....	24
4.3.3 Provoz s buzením odpovídajícím ztrátám v buzení synchronního stroje.....	25
4.3.4 Provoz s optimálním buzením.....	25
5 POROVNÁNÍ TRAKČNÍCH CHARAKTERISTIK STUDOVANÝCH STROJŮ.....	26
6 ZÁVĚR.....	27

1 Úvod

Vzhledem k rostoucím cenám permanentních magnetů ze vzácných zemin a dodavatelské závislosti na jediném velkém vývozci, se v poslední době často uvažuje odklon od této technologie při návrhu a výrobě elektrických strojů. Tento trend je pozorován zejména u výrobců velkých sérií elektrických strojů v oblasti automotive, jako například Volkswagen, ZF, Mahle, Renault a další.

Na základě rešerše provedené v [1], proto bylo v první fázi výzkumu přistoupeno k analýze možnosti návrhu elektrických strojů s nulovým obsahem vzácných zemin ve své konstrukci. Postup výzkumu byl veden systémem design-of-experiments, kdy byl jako vzorový stroj použit asynchronní motor a úkolem bylo naleznout náhradu tohoto stroje s minimálně stejně kvalitními elektrickými vlastnostmi. Jako náhrady byly uvažovány následující dva typy elektrických strojů:

- Elektricky buzený synchronní stroj
- Synchronní reluktanční stroj s doplňkovým buzením

V případě elektricky buzeného synchronního stroje je uvažována tradiční konstrukce s vyniklými póly, přičemž jsou dále studovány možnosti využití reluktančního momentu tohoto stroje jakožto nouzového prostředku pohybu v případě výpadku buzení motoru.

V případě synchronního reluktančního stroje je uvažována rotorová topologie označovaná jako „segmentovaný rotor,“ tzn. rotor, jenž je tvořen „spojkami“ mezi protilehlými statorovými póly. Tato topologie zajišťuje vysokou vyniklost a značnou mechanickou robustnost, která je vyžadována u trakčních strojů. Vzhledem k tomu, že synchronní reluktanční stroje umožňují dosáhnout pouze velmi omezeného účinníku, který se projevuje i na účinnosti těchto strojů, je tento stroj v rámci návrhu doplněn o budící vinutí, které zavádí do jeho funkce jistou hodnotu indukovaného napětí, která vede ke zlepšení účinníku stroje.

Oba typy strojů jsou odvozeny od vzorového asynchronního stroje SIEMENS 1LA7 163-4AA10, tj. čtyřpólového průmyslového asynchronního stroje s klecí nakrátko o jmenovitém výkonu 11 kW. Tento stroj byl pro následující postup vybrán z následujících důvodů:

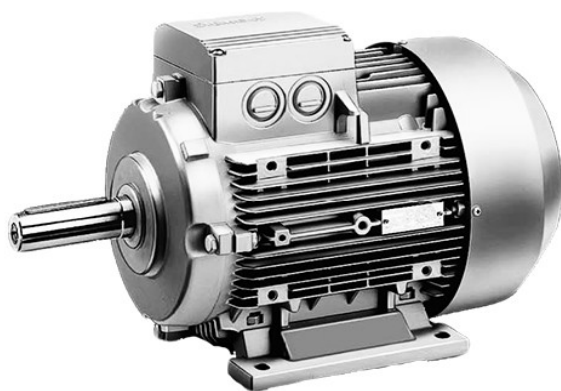
- elektromagnetický výpočet tohoto stroje je řešitelskému teamu dobře znám a je k dispozici i výkresová dokumentace stroje
- uvedený stroj se nachází v laboratořích FEL ZČU v několika kusech, které lze následně modifikovat pro stavbu prototypu
- díky svému výkonu lze tento stroj, respektive jeho úpravy, relativně snadno sestavit do soustrojí, které lze následně měřit a dále analyzovat

Vzhledem k tomu, že reverzní engineering vzorového stroje i návrhy odvozených strojů byly provedeny dle dobře známých výpočetních metod popsaných například v publikacích [2], [3], [4], [5], jsou v této výzkumné zprávě popsány pouze navazující výpočty, které jsou nad rámec standardního elektromagnetického výpočtu uvedených strojů.

2 Asynchronní stroj SIEMENS 1LA7 163-4AA10

Asynchronní stroj SIEMENS 1LA7 163-4AA10 je čtyřpólovým asynchronním motorem s klecí nakrátko, která je vyrobená z odlévaného hliníku. Štítkové hodnoty tohoto stroje jsou uvedeny v Tab. 2.1. Uvedená klec nakrátko je atypická vůči velké části asynchronních strojů, neboť je tvořena drážkami označovanými jako Boucherotova kotva – tj. drážkami simulujícími dvojitou klec nakrátko tím, že jsou rozděleny na dva hlavní segmenty propojené pouze tenkým elektrickým kontaktem. Takováto klec nakrátko umožňuje asynchronním strojům dosáhnout značného záběrného momentu, který může být až několikanásobkem momentu jmenovitého, jak je patrné z dodávané charakteristiky uvedené v Obr. 2.1. Zároveň se tímto opatřením redukuje velikost záběrného proudu stroje. Z dodané charakteristiky je též patrné, že uvedený stroj má při jmenovité napájecí frekvenci přetížitelnost mezi 250 a 320 procenty.

Z hlediska provozu stroje jako trakčního motoru napájeného z polovodičového měniče je výše zmiňovaný nárůst záběrného momentu irelevantní, nicméně právě uvedená přetížitelnost stroje je jednou z hojně využívaných vlastností elektrických strojů v trakci, kdy se tato vlastnost využívá velmi často, zejména při rozjezdech, akceleracích či brždění poháněného vozidla. Vzhledem k tomu, že elektrické stroje pro automotive se často navrhují jako minimálně dvojnásobně přetížitelné, je tento parametr vzorovým strojem splněn a je tedy použitelný pro další postup i z tohoto hlediska.

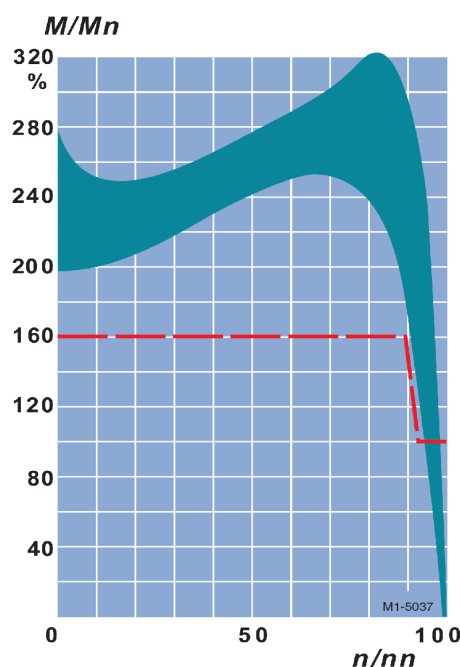


Obr. 2.2: Motor SIEMENS 1LA7 163-4AA10

Snímek modelovaného stroje a modelovaná výseč magnetického obvodu jsou uvedeny v Obr. 2.2 a Obr. 2.3.

Parametr	Hodnota	Jednotka
P_n	11000	W
U_n	Y 400 / Δ 230	V
I_n	21,5	A
M_n	72	Nm
n_n	1460	ot.min ⁻¹
$\cos \varphi_n$	0,84	-
η	88,5	%

Tab. 2.1: Štítkové parametry stroje



Obr. 2.1: Momentová charakteristika stroje [6]

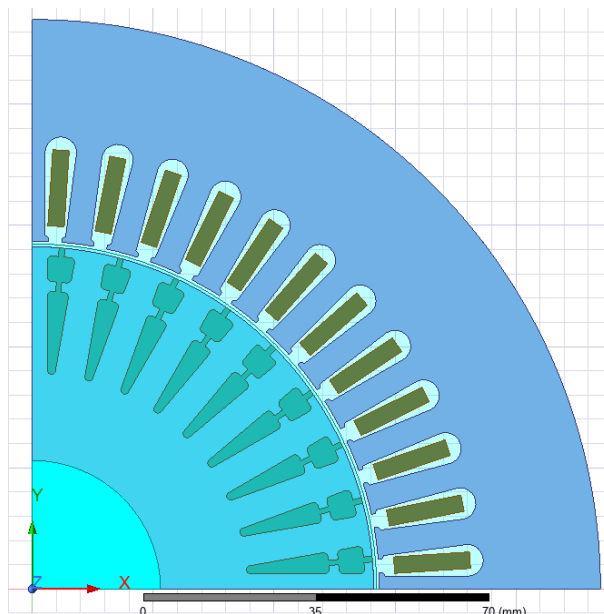
Aby bylo možné provést analýzu rozdělení ztrát v uvedeném stroji byl využit dříve provedený elektromagnetický výpočet stroje uvedený v [7], za jehož pomoci byl nadefinován konečněprvkový model stroje v software ANSYS Electronics Desktop [8]. Kromě známých materiálových vlastností základních materiálů (měď, hliník) bylo využito pro definici materiálu magnetického obvodu materiálu JFE_Steel_50JN600, jakožto zástupce elektrotechnických plechů běžné tloušťky a nižší kvality z hlediska produ-

V uvedeném modelu byly počítány Jouleovy ztráty v obou částech stroje (statoru i rotoru) a zároveň byly počítány i ztráty v železe obou komponent. Model samotný byl nalaďen tak, aby bylo dosaženo jmenovitého momentu stroje, který pro výkon $P = 11 \text{ kW}$ přibližně odpovídá hodnotě $M = 71 \text{ Nm}$. Uvedené kombinaci parametrů pak odpovídá rychlost stroje $n = 1469 \text{ min}^{-1}$. Výsledky obdržené za pomoci metody konečných prvků jsou uvedeny v Tab. 2.2.

V porovnání se štítkovými hodnotami stroje je patrné, že metoda konečných prvků ukazuje na mírně vyšší jmenovitou rychlost stroje (o cca 0,616 procenta, z hlediska skluzu jde o rozdíl cca 22,5 %) a mírně vyšší vychází hodnota jmenovitého proudu stroje (o cca 7,5 procenta). V souvislosti s těmito výsledky vychází mírně nižší účinník stroje (o cca 10 procenta). Celková účinnost stroje přesto vychází vyšší, nežli udává výrobce – 89,5 procenta namísto deklarovaných 88,5 procentům

Uvedené rozdíly lze částečně přičíst na vrub nepřesnostem vyplývajícím z modelování za pomoci metody konečných prvků (nelze uvažovat technologické vlivy, které jsou autorům neznámé) a částečně též běžným variacím, které se vyskytují v rámci výrobních sérií takovýchto strojů. Zároveň je nutné zohlednit fakt, že ve výpočtu zcela chybí mechanické ztráty ve stroji (u uvedeného stroje jsou na základě prováděných měření cca 50 W) a veškeré přídatné ztráty, které se u strojů této koncepce a velikosti odhadují jako jedno až dvě procenta z celkového výkonu stroje.

Kromě uvedených parametrů pak byla sledována též magnetizační indukčnost stroje L_μ , která je dále využívána pro přesnější určení parametrů odvozených strojů.



Obr. 2.3: Modelovaná výseč stroje v software ANSYS Electronics Desktop

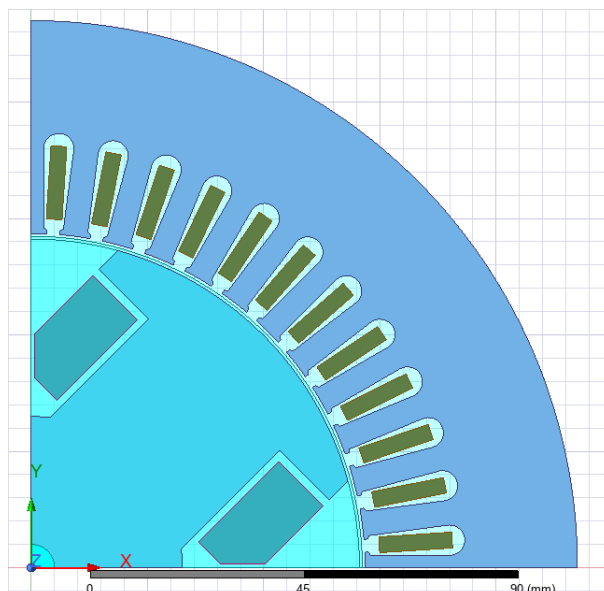
proměnná	značení	hodnota	jednotka
jmenovitý výkon	P	10847,65	W
rychlost stroje	n	1469,00	min^{-1}
moment	M	70,52	Nm
jmenovité napětí	U_n	400,00	V
statorový proud	I_1	23,11	A
účinník	$\cos \varphi$	0,75	-
ztráty v železe	ΔP_{Fe}	179,69	W
ztráty ve vinutí – stator	ΔP_{J1}	838,98	W
ztráty ve vinutí – rotor	ΔP_{J2}	254,23	W
celkové ztráty	ΔP	1272,90	W
magnetizační indukčnost	L_μ	55,97	mH
účinnost stroje	η	89,50	%

Tab. 2.2: Výstupy simulace jmenovitého stavu stroje v programu ANSYS Electronics Desktop

3 Odvozený elektricky buzený synchronní stroj

3.1 Elektromagnetický návrh stroje

Na základě známé geometrie vzorového asynchronního stroje byl odvozen elektromagnetický návrh elektricky buzeného synchronního stroje s vyniklými póly. Tato koncepce byla zvolena, neboť je často využívána ve elektromobilech firmami jako Renault či BMW [1]. Pro porovnání výchozí konstrukce bez dalších optimalizací (např.: tvaru indukovaného napětí, mechanických vlastností atp.) byl využit návrh stroje s konstantní vzduchovou mezerou mezi pólovým nástavcem a statorem. Velikost vzduchové mezery byla zvolena shodná se vzorovým asynchronním strojem, tj. $\delta = 1,2 \text{ mm}$. Při použití shodné velikosti vzduchové mezery tak lze limitně považovat rotor asynchronního stroje za homogenní válec a za pomoci dopočtené velikosti podélné a příčné indukčnosti synchronního stroje v porovnání s magnetizační indukčností vzorového asynchronního stroje tak lze velmi přesně určit koeficienty tvaru magnetického pole statoru v osách d a q , tj. Činitele C_{d1} a C_{q1} .



Obr. 3.1: Model navrženého ekvivalentního elektricky buzeného synchronního stroje

Pro šíři pólového nástavce stroje byl zvolen oblouk o délce 60 úhlových stupňů, což odpovídá délce tětiny rotoru (a šíři pólového nástavce)

$$b_{pn} = 2(R_2 \sin 30^\circ) = 2[(R_1 - \delta) \sin 30^\circ] = 2[(71,8 - 1,2) \sin 30^\circ] = 70,6 \text{ mm} \quad (3.1)$$

se zaokrouhlením na výrobní šíři pólových nástavců $b_{pn} = 70 \text{ mm}$. Model stroje v software ANSYS je pak uveden na obr. 3.1.

Pro dosažení ekvivalentní indukce ve vzduchové mezeře stroje jako v případě vzorového asynchronního stroje ($B_\delta = 0,89 \text{ T}$) je nutný budící proud o velikosti

$$I_{b0} = \frac{F_{b0}}{N_c} = \frac{1032,76}{100} = 10,33 \text{ A} \quad , \quad (3.2)$$

přičemž se pro další úvahy předpokládá použití $N_c = 100$ závitů cívky buzení stroje. Magnetické napětí buzení naprázdno bylo určeno jako

$$F_{b0} = k_C k_{sat} \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta = 1,105 \cdot 1,10 \cdot \frac{0,89}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,0012 = 1032,76 \text{ A} \quad , \quad (3.3)$$

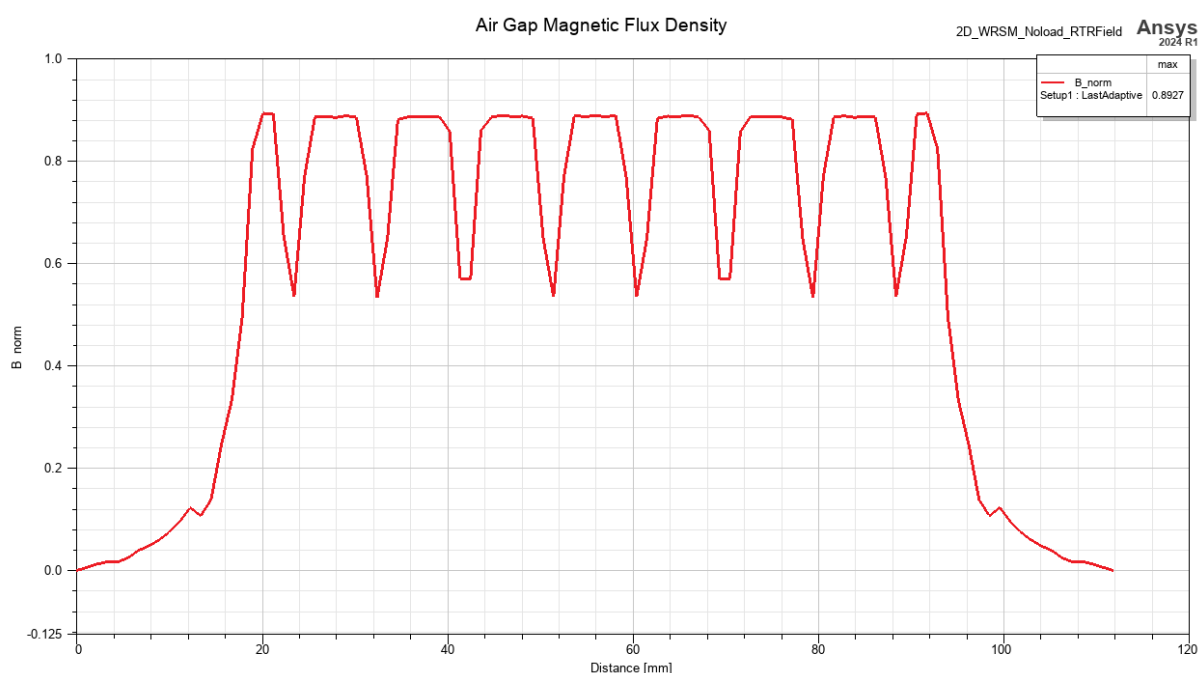
kde se předpokládá činitel nasycení železa magnetického obvodu $k_{sat} = 1,10$ a Carterův činitel k_C vychází

$$k_C = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma b_0} = \frac{9,4}{9,4 - 0,318 \cdot 2,8} = 1,105 \quad , \quad (3.4)$$

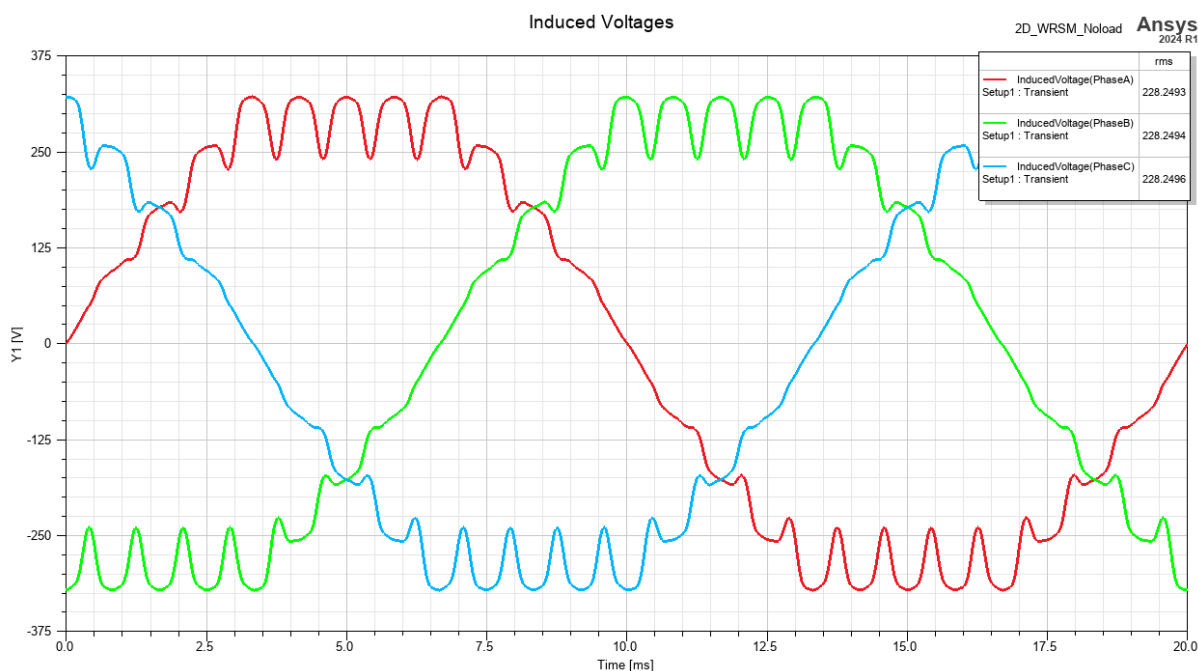
kde drážková rozteč t_{d1} a šíře otevření drážky b_0 jsou hodnoty odměřené z dostupných elektrotechnických plechů daného stroje a činitel γ vychází ze vztahu

$$\gamma = \frac{b_0}{b_0 + 5\delta} = \frac{2,8}{2,8 + 5 \cdot 1,2} = 0,318 \quad . \quad (3.5)$$

Odpor uvedeného budicího vinutí byl za předpokladu použití vodiče o průměru $d_b = 1,8 \text{ mm}$ určen na $R_b = 1,464 \Omega$.



Obr. 3.2: Průběh magnetické indukce ekvivalentního synchronního stroje pod jedním pólem



Obr. 3.3: Průběhy indukovaného napětí ekvivalentního synchronního stroje

Ověření správnosti návrhu buzení bylo provedeno za pomoci modelů navrženého stroje naprázdno, v rámci kterých byla ověřena velikost amplitudy indukce ve vzduchové mezeře a velikosti indukovaného napětí s uvedeným buzením. Jak je patrné z výsledků uvedených v obr. 3.2 a 3.3, výsledná hodnota amplitudy indukce ve vzduchové mezeře stroje je $B_\delta = 0,8927 \text{ T}$ a velikost indukovaného napětí vychází $U_{i0} = 228,25 \text{ V}$, což je v porovnání s cílovými hodnotami $B_\delta = 0,89 \text{ T}$ a $U_{i0} = 230,94 \text{ V}$ odchylka o 0,3, respektive 1,6 procenta. Uvedený návrh buzení stroje lze tedy považovat za akceptovatelný z hlediska dalšího postupu.

3.2 Provoz s buzením naprázdno při jmenovitém výkonu

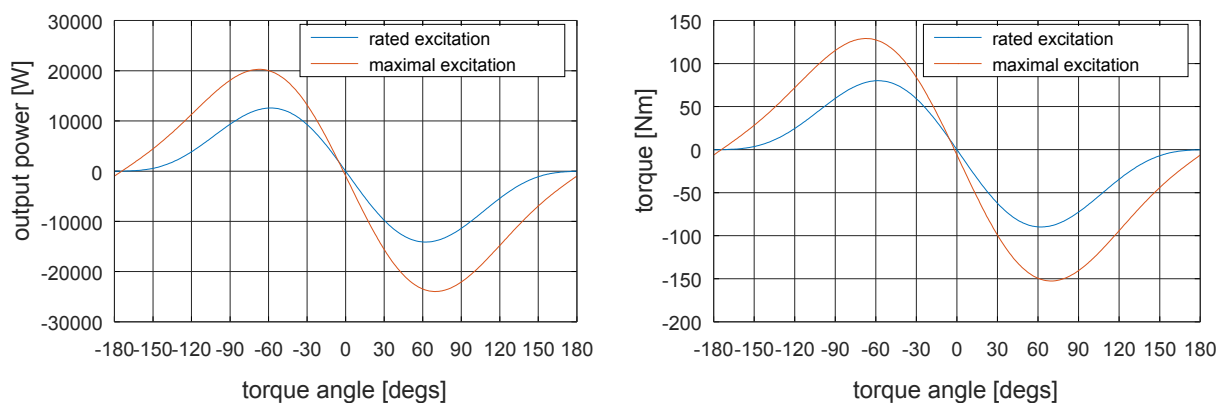
Pro výše určený budící proud byla provedena analýza možnosti dosažení jmenovitého výkonu stroje jakožto provoz s minimálním možným buzením. V případě použití shodného budícího proudu, jako je budící proud stroje naprázdno je pak stroj *možné* provozovat s jmenovitým výkonem při zátěžném úhlu 32 stupňů. Parametry takto provozovaného stroje jsou uvedeny v tab. 3.1.

proměnná	značení	hodnota	jednotka
jmenovitý výkon	P	10966,40	W
rychlost stroje	n	1500,00	min^{-1}
moment	M	69,81	Nm
jmenovité napětí	U_n	400,00	V
statorový proud	I_1	18,75	A
účinník	$\cos \varphi$	0,89	-
ztráty v železe	ΔP_{Fe}	206,61	W
ztráty ve vinutí – stator	ΔP_{J1}	552,14	W
ztráty ve vinutí – rotor	ΔP_{J2}	156,17	W
celkové ztráty	ΔP	914,92	W
podélná indukčnost	L_d	48,71	mH
příčná indukčnost	L_q	24,76	mH
indukčnost budícího vinutí	L_b	349,87	mH
účinnost stroje	η	92,30	%

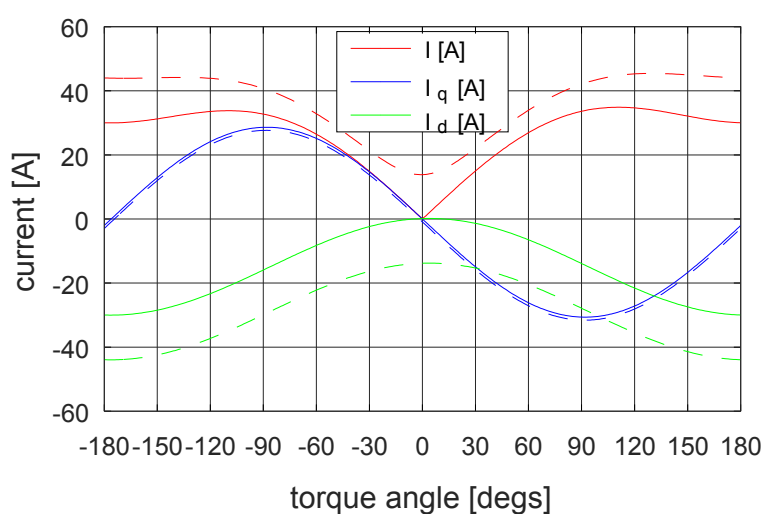
Tab. 3.1: Parametry ekvivalentního synchronního stroje s elektrickým buzením provozovaného při budícím proudu naprázdno

Při porovnání parametrů se vzorovým asynchronním strojem je zřejmé, že dochází k přesunu části ztrát ze statorového vinutí stroje do magnetického obvodu, nicméně celková suma ztrát klesá díky přítomnosti uzení v rotoru stroje. Navržený stroj tak poskytuje vyšší účinnost v daném pracovním režimu, nežli vzorový asynchronní stroj.

V porovnání se vzorovým asynchronním strojem však značně klesá jeho přetížitelnost, neboť při uvedeném buzení dosahuje navržený ekvivalentní synchronní stroj maximálního výkonu v motorickém režimu pouze cca 12 kW. Pro dosažení minimálně dvojnásobné přetížitelnosti (maximální výkon min. 22 kW) je pak nutný budící proud minimálně 30 A, což vede na přibližně devítinásobný nárůst ztrát v rotoru. Ztráty v rotoru by pak dosáhly hodnoty cca 1500 W. Porovnání momentů a výkonů navrženého ekvivalentního synchronního stroje pro buzení odpovídající buzení naprázdno a pro buzení proudem $I_{bmax} = 30 \text{ A}$ a související proudové charakteristiky jsou uvedeny v obr. 3.4 a 3.5.



Obr. 3.4: Výkonové (vlevo) a momentové (vpravo) charakteristiky navrženého ekvivalentního synchronního stroje



Obr. 3.5: Proudové charakteristiky ekvivalentního synchronního stroje (jmenovité buzení - plnou čarou, maximální buzení - čárkovanou)

Z určených parametrů synchronního stroje pak lze pro další postup stanovit:

- činitel tvaru magnetického pole statoru v ose d :

$$C_{d1} = \frac{L_d}{L_\mu} = \frac{48,71}{55,97} = 0,881 \quad (3.6)$$

- činitel tvaru magnetického pole statoru v ose q :

$$C_{q1} = \frac{L_q}{L_\mu} = \frac{24,77}{55,97} = 0,443 \quad (3.7)$$

- činitel tvaru budícího pole:

$$C_{b1} = \frac{B_{\delta 1}}{B_\delta} = \frac{0,9145}{0,8927} = 1,024 \quad (3.8)$$

kde $B_{\delta 1}$ je amplituda indukce ve vzduchové mezeře ekvivalentního synchronního stroje ve stavu naprázdno určená za pomoci rychlé Fourierovy transformace

- převod proudu ekvivalentního synchronního stroje

$$g = \frac{C_{b1}}{C_{d1}} \cdot \frac{\pi}{2m} \cdot \frac{N_b}{N_{s1} k_{v1}} = \frac{1,024}{0,881} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot 3} \cdot \frac{400}{120 \cdot 0,949} = 2,137 \quad (3.9)$$

- převod impedancí ekvivalentního synchronního stroje (dle [9])

$$g_L = \frac{C_{d1}}{C_{b1}} \cdot \left(\frac{2m}{\pi} \cdot \frac{N_{s1} k_{v1}}{N_b} \right)^2 = \frac{0,881}{1,024} \cdot \left(\frac{2 \cdot 3}{\pi} \cdot \frac{120 \cdot 0,949}{400} \right)^2 = 0,133 \quad , \quad (3.10)$$

kde m je počet fází stroje ($m = 3$),
 N_{s1} je počet závitů statoru v sérii (z [7], $N_{s1} = 120$),
 k_{v1} je činitel statorového vinutí (z [7], $k_{v1} = 0,949$),
a N_b je celkový počet závitů budícího vinutí,

$$N_b = 2 p N_c = 2 \cdot 2 \cdot 100 = 400 \quad (3.11)$$

3.3 Optimální provoz při jmenovitém výkonu

Za pomoci nástroje pro analýzu provozu synchronního stroje dle teorému ztrátově optimálního řízení popsaného blíže v [9] byla provedena kontrola možnosti optimalizace velikosti budícího proudu s ohledem na další navýšení účinnosti navrženého ekvivalentního synchronního stroje. Pro jmenovitý výkon stroje 11 kW a rychlost 1500 min^{-1} tak byla dopočtena optimální velikost budícího proudu $I_{bopt} = 12,55 \text{ A}$, pro kterou byly určeny provozní parametry stroje uvedené v tab. .

proměnná	značení	hodnota	jednotka
jmenovitý výkon	P	10846,86	W
rychlost stroje	n	1500,00	min^{-1}
moment	M	69,05	Nm
jmenovité napětí	U_n	400,00	V
statorový proud	I_1	16,59	A
účinník	$\cos \varphi$	0,98	-
ztráty v železe	ΔP_{Fe}	197,68	W
ztráty ve vinutí – stator	ΔP_{J1}	432,10	W
ztráty ve vinutí – rotor	ΔP_{J2}	230,51	W
celkové ztráty	ΔP	860,29	W
podélná indukčnost	L_d	48,44	mH
příčná indukčnost	L_q	24,95	mH
indukčnost budícího vinutí	L_b	346,85	mH
účinnost stroje	η	92,65	%

Tab. 3.2: Parametry ekvivalentního synchronního stroje s elektrickým buzením provozovaného při optimálním budícím proudu

Z dopočtených provozních parametrů je patrná možnost dalšího navýšení účinnosti stroje, a to o 0,35 procentního bodu, což odpovídá poklesu celkových ztrát ve stroji o cca 55 Wattů. V porovnání s buzením stroje pouze za pomoci budícího proudu naprázdno je též zřejmý nárůst účinníku stroje, a to z hodnoty 0,89 k hodnotě 0,98. Použití optimalizovaného budícího proudu je tedy dále výhodné i z hlediska snížení jakové složky proudu odebírané z napájení stroje.

3.4 Provoz bez buzení stroje

Jako víceméně hypotetická možnost byla provedena analýza možnosti provozu stroje zcela bez buzení, tzn. v reluktančním režimu. Vzhledem k minimální vyniklosti stroje, která je pro navrženou geometrii pouze

$$\lambda = \frac{L_d}{L_q} = \frac{48,71}{24,7645} = 1,97 \quad , \quad (3.12)$$

a faktu, že i při buzení naprázdno má stroj minimální přetížitelnost, je zřejmé, že jmenovitého výkonu není možno dosáhnout. Toto dále potvrzují i výsledky uvedené v tab. 3.3.

proměnná	značení	hodnota	jednotka
jmenovitý výkon	P	4623,56	W
rychlost stroje	n	1500,00	min^{-1}
moment	M	29,43	Nm
jmenovité napětí	U_n	400,00	V
statorový proud	I_1	26,21	A
účinník	$\cos \varphi$	0,31	-
ztráty v železe	ΔP_{Fe}	279,36	W
ztráty ve vinutí – stator	ΔP_{J1}	1078,99	W
ztráty ve vinutí – rotor	ΔP_{J2}	0,00	W
celkové ztráty	ΔP	1358,35	W
podélná indukčnost	L_d	48,71	mH
příčná indukčnost	L_q	25,06	mH
indukčnost budícího vinutí	L_b	353,69	mH
účinnost stroje	η	77,29	%

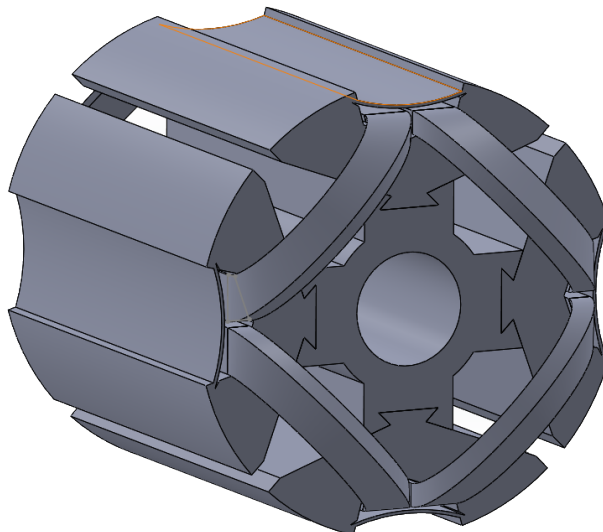
Tab. 3.3: Parametry ekvivalentního synchronního stroje s elektrickým buzením provozovaného v reluktančním režimu

Z obdržených výsledků je zřejmé, že v reluktančním režimu má tento stroj maximální výkon cca 4600 W při účinníku 0,31. To se projevuje na vysokém proudovém odběru a vysokých celkových ztrátách ve stroji. Výsledný účinnost stroje pak činí 77,29 %.

4 Synchronní reluktanční stroj s doplňkovým buzením

4.1 Elektromagnetický návrh stroje

Pro návrh stroje byla zvolena segmentová topologie rotorového vinutí, která v porovnání s tradičními topologiemi využívající magnetických bariér (například stroje ABB či SIEMENS) poskytuje jednak vyšší vyniklost a jednak vyšší mechanickou stabilitu. Uvedená topologie byla dále doplněna jednoduchou cívkou pro doplňkové buzení stroje, které má za úkol kompenzovat zásadní nevýhodu synchronních reluktančních strojů, kterou je jejich nízký provozní účinník. Náhled navrženého rotoru je uveden v obr. 4.1.



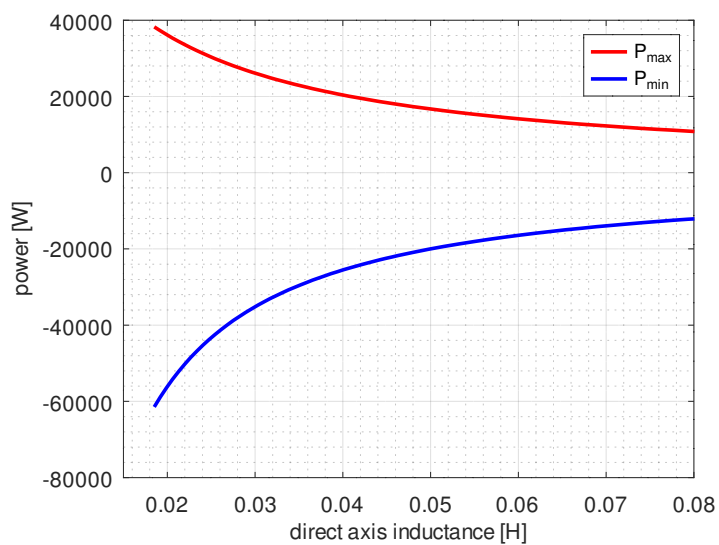
Obr. 4.1: Navržený segmentový rotor s doplňkovým budícím vinutím

Z elektromagnetického hlediska je v první fázi (dále analyzované v kapitole 4.2) navržen jako plnohodnotná náhrada původního rotoru, který byl navržen jako tradiční rotor elektricky buzeného synchronního stroje s vyniklými póly. Zachována je tedy původní vzduchová mezera o velikosti $\delta = 1,2 \text{ mm}$ a šíře pólu v oblasti vzduchové mezery, která je $b_{pn} = 70 \text{ mm}$. Mezera mezi segmenty má velikost 8 mm . Podmínkou správné funkce této rotorové topologie je použití hřídele vyrobené z nemagnetické oceli, aby nedocházelo k přestupu magnetického pole mezi segmenty rotoru.

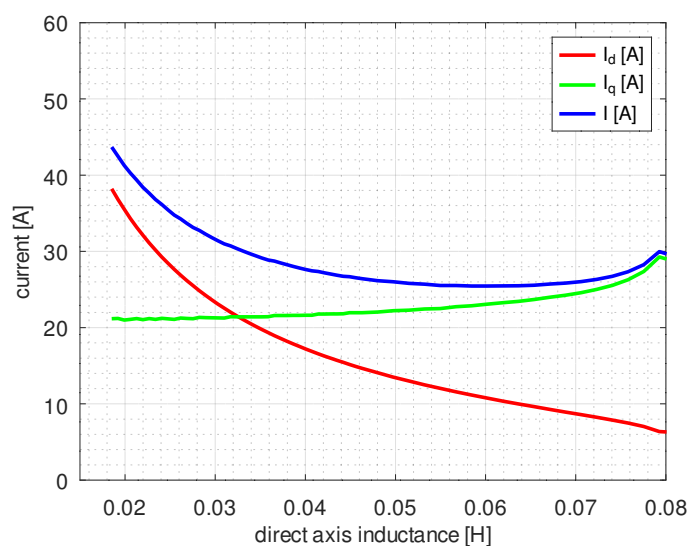
V porovnání s původním budícím vinutím, jehož celkový dostupný průřez byl $S_{SM} = 308,08 \text{ mm}^2$, se v tomto případě redukuje dostupný průřez pro budící vinutí na $S_{RM} = 66,09 \text{ mm}^2$, tedy na 21,5 procenta původního dostupného prostoru. Z tohoto důvodu je dále ponížěn počet závitů budící cívky synchronního reluktančního stroje na $N_c = 20$ závitů, tzn. celkový počet závitů budícího vinutí je v případě upraveného stroje $N_b = 80$ závitů. Odpor budícího vinutí tak klesá na 20 % původní hodnoty, tzn. $R_b = 0,293 \Omega$.

Na základě výsledků z kapitoly 4.2 je dosažená vyniklost rotoru s danou topologií rovna $\lambda = 4,60$. Na základě znalosti této hodnoty lze provést parametrickou analýzu přetížitelnosti strojů v závislosti na velikosti podélné indukčnosti stroje. Výsledky této analýzy jsou uvedeny na obr. 4.2 až 4.4, a jsou uvedeny v závislosti na podélné indukčnosti (vše s předpokladem vyniklosti $\lambda = 4,6$ a nulového buzení stroje)

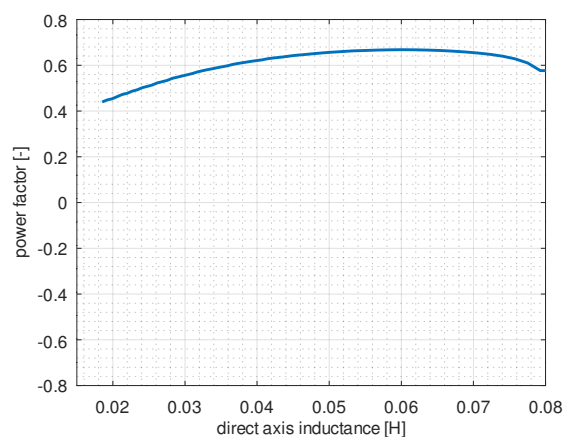
- analýza velikosti maximálního a minimálního výkonu stroje
- analýza velikosti odebíraného proudu
- analýza účinníku stroje



Obr. 4.2: Závislosti maximálního a minimálního výkonu na podélné indukčnosti reluktančního stroje



Obr. 4.3: Závislosti odebíraného proudu a jeho složek na podélné indukčnosti reluktančního stroje



Obr. 4.4: Závislost účinníku na podélné indukčnosti reluktančního stroje

Z provedené analýzy je zřejmé, že stroj s očekávanou indukčností cca 50 mH bude dosahovat přetížitelnosti menší, nežli 18 kW, výchozí uvažovaná topologie tedy zřejmě nebude požadavku na minimálně dvojnásobnou přetížitelnost bez dodatečného buzení vyhovovat. Z obr. 4.2 lze přitom odečíst, že pro přetížitelnost na minimálně 22 kW je maximální požadovaná hodnota podélné indukčnosti stroje cca $L_d = 35 \text{ mH}$, což odpovídá zhruba velikosti vzduchové mezery $\delta = 1,6 \text{ mm}$. Na základě uvedené analýzy byla proto pro druhou fázi analýz zvolena shodná rotorová topologie, ovšem se vzduchovou mezerou zvětšenou na $\delta = 1,6 \text{ mm}$.

Jako třetí možné řešení lze z uvedených závislostí uvést řešení orientované na dosažení maximálního možného účinníku reluktančního stroje. V případě uvedené topologie lze dosáhnout maximálního účinníku $\cos \varphi = 0,7$ za předpokladu, že podélná indukčnost stroje bude přibližně 60 mH. V tomto případě ovšem bude možné stroj v čistě reluktančním režimu přetížít pouze na cca 14 kW.

V obou fázích analýz jsou obě navržené modifikace stroje analyzovány následovně:

- jako čistě reluktanční stroj, tzn. $I_b = 0$
- jako stroje s buzením ekvivalentním proudem naprázdno ekvivalentnímu synchronnímu stroji, tzn. $I_b = 10,33 \text{ A}$
- jako stroje s rotorovými ztrátami ekvivalentními k buzení ekvivalentního synchronního stroje naprázdno, tzn. $I_b = 23,1 \text{ A}$ dle

$$I_{bmax} = \sqrt{\frac{\Delta P_{J20}}{R_b}} = \sqrt{\frac{156,17}{0,293}} = 23,1 \text{ A} \quad , \quad (4.1)$$

který je zároveň uvažován jako maximální budicí proud pro daný stroj

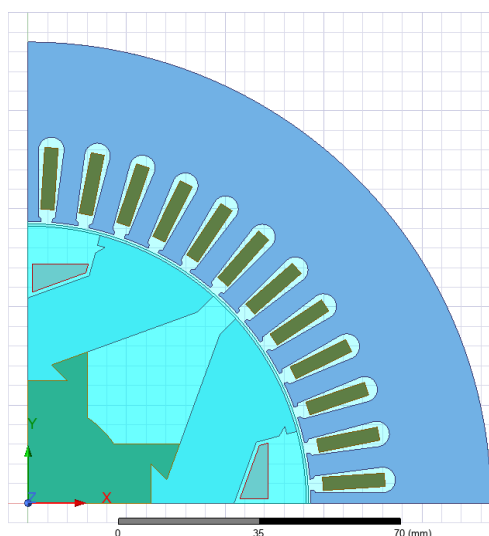
- jako stroje buzené optimálním proudem vyplývajícím z MTPW dle [9]

4.2 Ekvivalentní synchronní reluktanční stroj

4.2.1 Provoz bez buzení stroje

Synchronní reluktanční stroj se segmentovým rotorem bez doplňkového buzení byl analyzován z hlediska provozu na jmenovitém pracovním bodě originálního asynchronního stroje. Řez strojem, který byl použit pro modelování v software ANSYS Electronics Desktop je uveden v obr. 4.5. Výstupní parametry získané z transientní simulace jeho provozu jsou pak uvedeny v tab. 4.1.

V porovnání s výsledky pro elektricky buzený synchronní stroj obecně je zřejmý mírný pokles podélné indukčnosti stroje, který je daný ventrální bariérou mezi oběma segmenty rotorových pólů. Zároveň ale dochází k navýšení vyniklosti stroje, která dosahuje hodnoty



Obr. 4.5: Částečný řez navrženým synchronním reluktančním strojem

$$\lambda = \frac{L_d}{L_q} = \frac{46,28}{10,07} = 4,60 \quad (4.2)$$

I přes značně vysokou vyniklost ale zůstává účinník stroje poměrně nízký, díky čemuž dosahují výsledné ztráty ve stroji hodnoty cca 1338 W, tedy o přibližně 70 Wattů více, než v případě původního asynchronního stroje.

proměnná	značení	hodnota	jednotka
jmenovitý výkon	P	10993,52	W
rychlost stroje	n	1500,00	min^{-1}
moment	M	69,99	Nm
jmenovité napětí	U_n	400,00	V
statorový proud	I_1	26,52	A
účinník	$\cos \varphi$	0,68	-
ztráty v železe	ΔP_{Fe}	232,83	W
ztráty ve vinutí – stator	ΔP_{J1}	1104,99	W
ztráty ve vinutí – rotor	ΔP_{J2}	0,00	W
celkové ztráty	ΔP	1337,82	W
podélná indukčnost	L_d	46,28	mH
příčná indukčnost	L_q	10,07	mH
indukčnost budícího vinutí	L_b	13,85	mH
účinnost stroje	η	89,15	%

Tab. 4.1: Parametry ekvivalentního synchronního reluktančního stroje provozovaného v reluktančním režimu

Pro potřeby další analýzy lze dopočítat, stejně jako v případě elektricky buzeného synchronního stroje, následující parametry:

- činitel tvaru magnetického pole statoru v ose d :

$$C_{d1} = \frac{L_d}{L_\mu} = \frac{46,28}{55,97} = 0,827 \quad (4.3)$$

- činitel tvaru magnetického pole statoru v ose q :

$$C_{q1} = \frac{L_q}{L_\mu} = \frac{10,07}{55,97} = 0,180 \quad (4.4)$$

Pro další analýzu byl jako pomocný model vytvořen model stroje ve stavu naprázdno s buzením proudem $I_b = 23,1$ A. Za pomoci tohoto modelu je dále možné určit:

- činitel tvaru budícího pole:

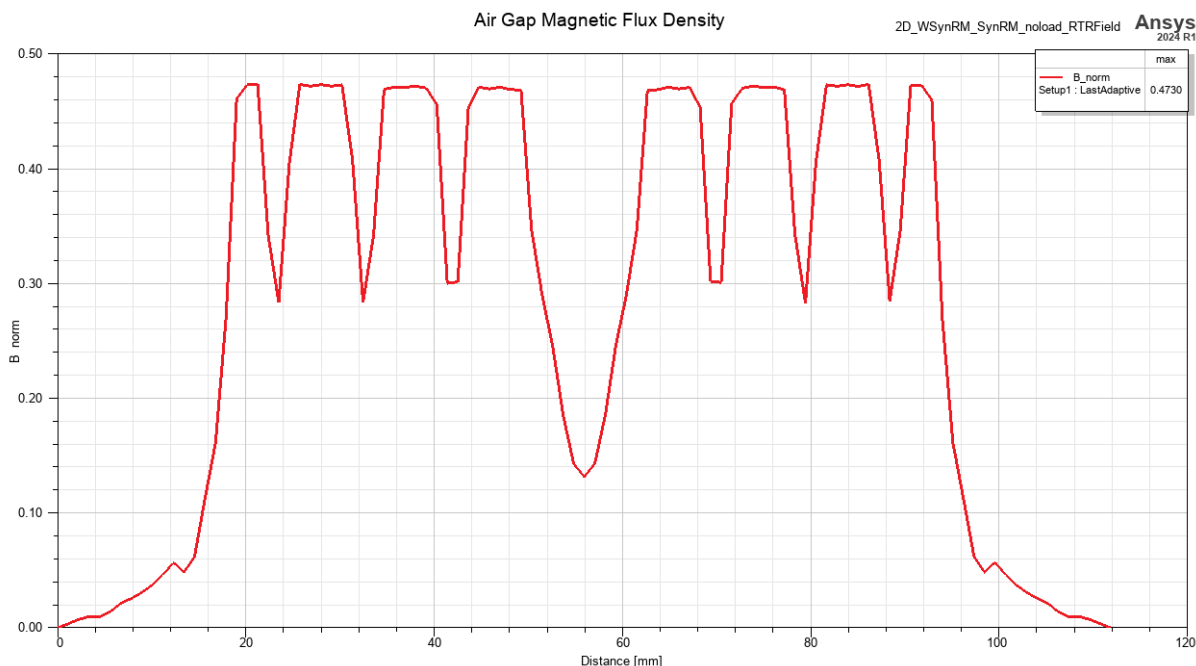
$$C_{b1} = \frac{B_{\delta 1}}{B_\delta} = \frac{0,4470}{0,4730} = 0,945 \quad (4.5)$$

- převod proudu ekvivalentního synchronního stroje

$$g = \frac{C_{b1}}{C_{d1}} \cdot \frac{\pi}{2m} \cdot \frac{N_b}{N_{s1} k_{v1}} = \frac{0,945}{0,827} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot 3} \cdot \frac{80}{120 \cdot 0,949} = 0,420 \quad (4.6)$$

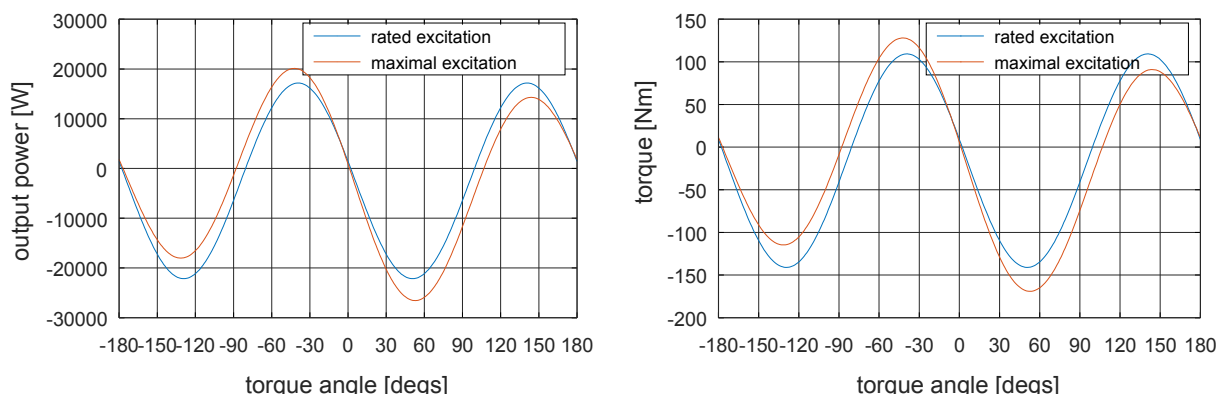
- převod impedancí ekvivalentního synchronního stroje

$$g_L = \frac{C_{d1}}{C_{b1}} \cdot \left(\frac{2m}{\pi} \cdot \frac{N_{s1} k_{v1}}{N_b} \right)^2 = \frac{0,827}{0,945} \cdot \left(\frac{2,3}{\pi} \cdot \frac{120 \cdot 0,949}{80} \right)^2 = 3,390 \quad (4.7)$$

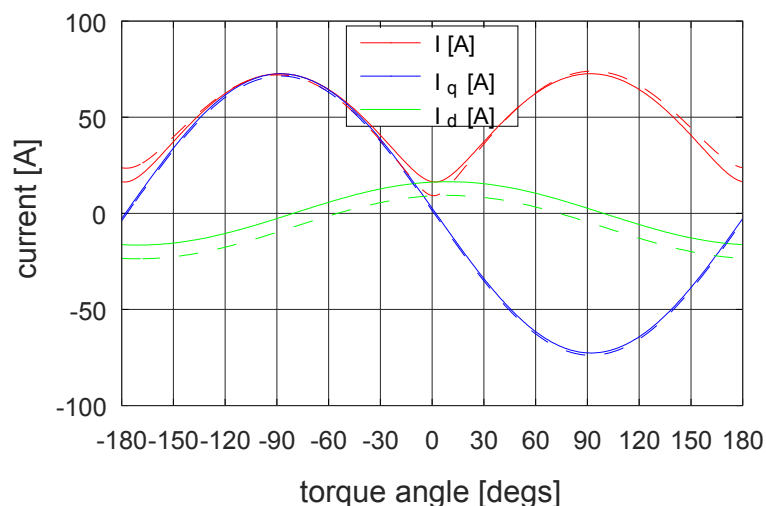


Obr. 4.6: Indukce ve vzduchové mezeře synchronního reluktančního stroje se segmentovým rotorem při doplňkovém buzení proudem 23,1 A

Na základě obdržených parametrů náhradního schématu stroje byly dále vyneseny výkonové, momentové a proudové charakteristiky stroje. Dopočtené charakteristiky stroje potvrzují výše uvedenou tezi, že stroj není schopen dosáhnout dvojnásobné přetížitelnosti, což je dáno zejména jeho vysokou indukčností, což omezuje maximální velikost proudu protékající strojem. Zároveň je patrné, že ani při dosažení maximálního budícího proudu tento stroj není schopen dosáhnout optimálního provozu, neboť proudové charakteristiky podélné hodnoty proudu I_d se v pracovní oblasti nepřibližují nulovým hodnotám. Dopočtené charakteristiky jsou uvedeny v obr. 4.7 a 4.8.



Obr. 4.7: Výkonová (vlevo) a momentová (vpravo) charakteristika ekvivalentního synchronního reluktančního stroje bez buzení a s maximálním buzením



Obr. 4.8: Proudové charakteristiky ekvivalentního synchronního reluktančního stroje bez buzení (plnou čarou) a s maximálním buzením (čárkovaně)

4.2.2 Provoz s buzením odpovídajícím synchronnímu stroji

Prvotní analýza doplňkového buzení byla provedena pro proud odpovídající buzení ekvivalentního synchronního stroje naprázdno. Souhrn výsledků je uveden v tab. 4.2.

proměnná	značení	hodnota	jednotka
jmenovitý výkon	P	11015,30	W
rychlost stroje	n	1500,00	min^{-1}
moment	M	70,13	Nm
jmenovité napětí	U_n	400,00	V
statorový proud	I_1	23,96	A
účinník	$\cos \varphi$	0,71	-
ztráty v železe	ΔP_{Fe}	228,79	W
ztráty ve vinutí – stator	ΔP_{J1}	901,85	W
ztráty ve vinutí – rotor	ΔP_{J2}	31,23	W
celkové ztráty	ΔP	1161,88	W
podélná indukčnost	L_d	45,78	mH
příčná indukčnost	L_q	10,07	mH
indukčnost budícího vinutí	L_b	13,64	mH
účinnost stroje	η	90,46	%

Tab. 4.2: Parametry ekvivalentního synchronního reluktančního stroje s doplňkovým buzením o velikosti 10,33 A

V porovnání s čistě reluktančním režimem stroje dochází v případě doplňkového buzení k očekávanému nárůstu účinku stroje, což snižuje velikost proudu, protékajícího statorem. Zároveň dochází k poklesu ztrát za cenu minimálního zvýšení ztrát o ztráty v rotorovém budícím vinutí. V porovnání se vzorovým asynchronním strojem tak dochází k poklesu celkových ztrát o cca 110 W a nárůstu účinnosti na výsledných 90,46 %.

4.2.3 Provoz s buzením odpovídajícím ztrátám v buzení synchronního stroje

Další navýšení proudu budícím vinutím na hodnotu 23,1 A vede k výsledným ekvivalentním ztrátám v budícím vinutí jako v případě ekvivalentního synchronního stroje ve stavu naprázdno. Výsledky modelování tohoto stavu jsou uvedeny v tab. 4.3.

proměnná	značení	hodnota	jednotka
jmenovitý výkon	P	10880,29	W
rychlost stroje	n	1500,00	min^{-1}
moment	M	69,27	Nm
jmenovité napětí	U_n	400,00	V
statorový proud	I_1	21,00	A
účinník	$\cos \varphi$	0,79	-
ztráty v železe	ΔP_{Fe}	225,96	W
ztráty ve vinutí – stator	ΔP_{J1}	692,55	W
ztráty ve vinutí – rotor	ΔP_{J2}	156,17	W
celkové ztráty	ΔP	1074,68	W
podélná indukčnost	L_d	44,89	mH
příčná indukčnost	L_q	10,07	mH
indukčnost budícího vinutí	L_b	13,39	mH
účinnost stroje	η	91,01	%

Tab. 4.3: Parametry ekvivalentního synchronního reluktančního stroje s doplňkovým buzením o velikosti 23,1 A

V porovnání s předchozím řešením je patrný další nárůst účinnosti, který je zapříčiněn zejména poklesem statorového proudu, který v tomto případě klesá pod hodnotu statorového proudu vzorového asynchronního stroje. Výsledná účinnost synchronního reluktančního stroje v tomto režimu tak dosahuje obdobných hodnot jako v případě ekvivalentního synchronního stroje a převyšuje účinnost referenčního asynchronního motoru SIEMENS.

4.2.4 Provoz s optimálním buzením

Provoz s optimálním buzením není pro dostupný proud možný.

4.3 Optimální synchronní reluktanční stroj

4.3.1 Provoz bez buzení stroje

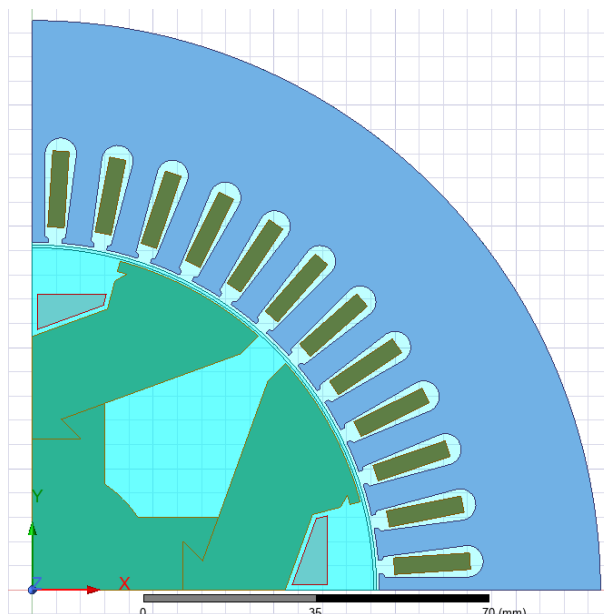
Základní analýzou stroje se zvětšenou vzduchovou mezerou na $\delta = 1,6$ mm bylo ověřeno možnosti provozu stroje v režimu zcela bez buzení při jmenovitém výkonu, tj. při výkonu 11 kW. Výsledky uvedené analýzy jsou uvedeny v tab. 4.4, částečný řez strojem je pak vyobrazen v obr. 4.9.

V porovnání s předchozí variantou je zřejmý nárůst statorového proudu, který souvisí zejména se zvětšenou vzduchovou mezerou stroje. Díky tomu zároveň rostou celkové ztráty ve stroji, jehož účinnost v tomto případě klesá na hodnotu 87,68 %, tedy pod úroveň původního asynchronního stroje SIEMENS.

Dalším pozorovatelným efektem je snížení vyniklosti stroje – se snížením podélné indukčnosti stroje v podélné ose nedošlo k proporcionálnímu snížení indukčnosti stroje v ose příčné, což se projevuje výsledným snížením vyniklosti stroje z hodnoty $\lambda = 4,6$ v případě stroje se vzduchovou mezerou o velikosti 1,2 mm na hodnotu

$$\lambda = \frac{L_d}{L_q} = \frac{37,52}{9,12} = 4,11 \quad (4.8)$$

což znamená pokles vyniklosti o cca 10,6 procenta, což se negativně projevuje na dalších vlastnostech stroje – jeho momentu a zároveň na účinku, se kterým jej lze provozovat.

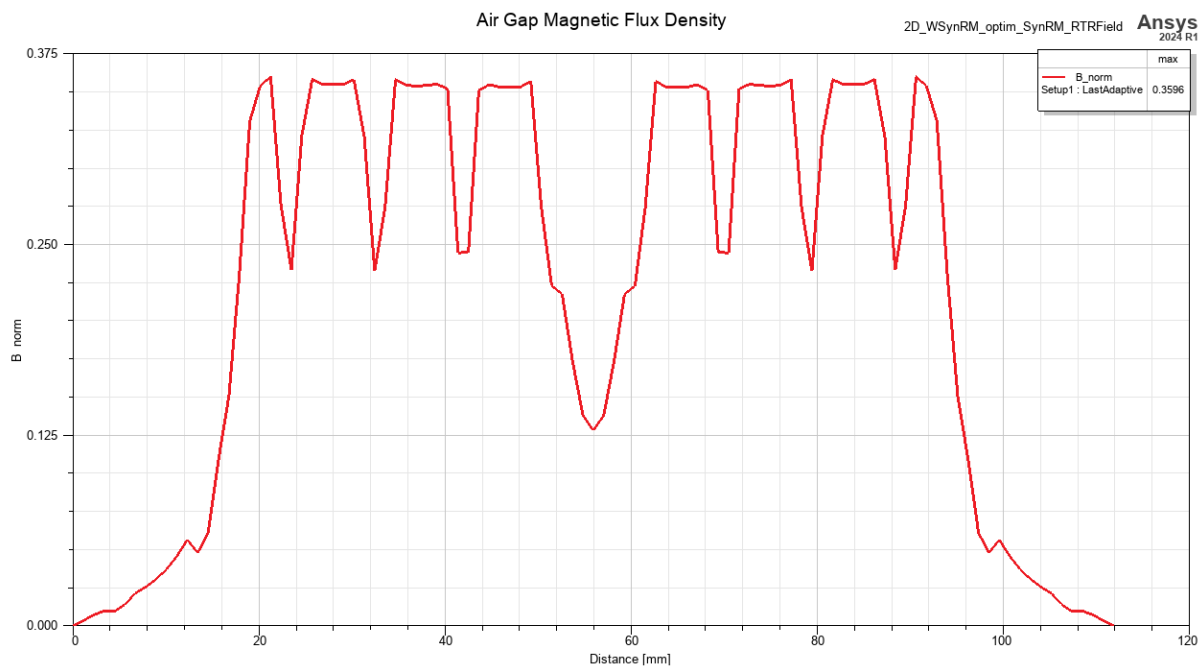


Obr. 4.9: Částečný řez strojem se zvětšenou vzduchovou mezerou

proměnná	značení	hodnota	jednotka
jmenovitý výkon	P	11043,60	W
rychlost stroje	n	1500,00	min^{-1}
moment	M	70,31	Nm
jmenovité napětí	U_n	400,00	V
statorový proud	I_1	29,18	A
účinník	$\cos \varphi$	0,64	-
ztráty v železe	ΔP_{Fe}	213,78	W
ztráty ve vinutí – stator	ΔP_{J1}	1337,21	W
ztráty ve vinutí – rotor	ΔP_{J2}	0,00	W
celkové ztráty	ΔP	1550,99	W
podélná indukčnost	L_d	37,52	mH
příčná indukčnost	L_q	9,12	mH
indukčnost budícího vinutí	L_b	11,23	mH
účinnost stroje	η	87,69	%

Tab. 4.4: Parametry optimálního synchronního reluktančního stroje provozovaného v reluktančním režimu

Pro doplnění parametrů nutných pro výpočet převodů stroje byl vytvořen magnetostatický model umožňující analýzu magnetického pole rotoru. Magnetické pole rotoru generované v rámci jedné pólové rozteče proudem $I_b = 23,1 \text{ A}$ je zobrazeno na obr. 4.10.



Obr. 4.10: Indukce ve vzduchové mezeře synchronního reluktančního stroje se segmentovým rotorem a vzduchovou mezerou 1,6 mm při doplňkovém buzení proudem 23,1 A

Z obdržených výsledků vycházejí doplňkové parametry stroje pro další analýzy:

- činitel tvaru magnetického pole statoru v ose d :

$$C_{d1} = \frac{L_d}{L_\mu} = \frac{37,52}{55,97} = 0,670 \quad (4.9)$$

- činitel tvaru magnetického pole statoru v ose q :

$$C_{q1} = \frac{L_q}{L_\mu} = \frac{11,23}{55,97} = 0,20 \quad (4.10)$$

- činitel tvaru budícího pole:

$$C_{b1} = \frac{B_{\delta 1}}{B_\delta} = \frac{0,3491}{0,3596} = 0,971 \quad (4.11)$$

- převod proudu ekvivalentního synchronního stroje

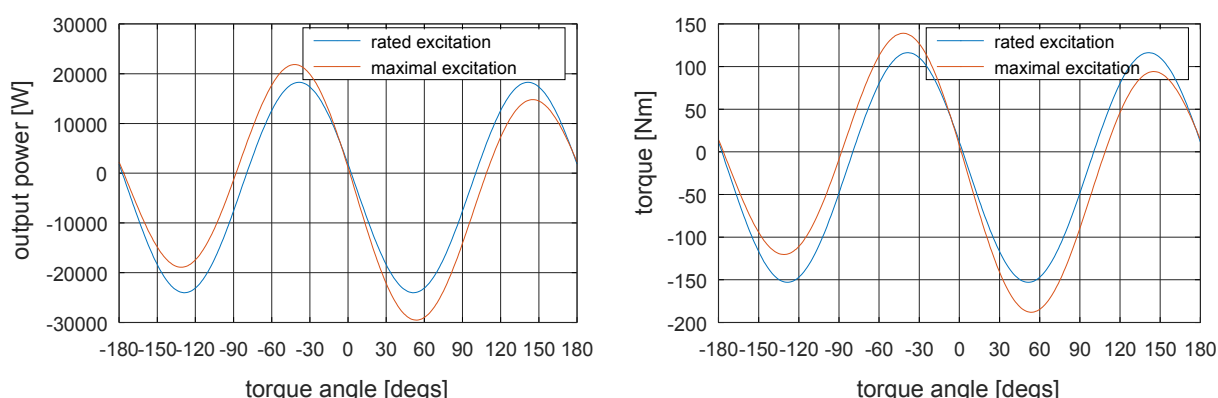
$$g = \frac{C_{b1}}{C_{d1}} \cdot \frac{\pi}{2m} \cdot \frac{N_b}{N_{s1} k_{v1}} = \frac{0,971}{0,670} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot 3} \cdot \frac{80}{120 \cdot 0,949} = 0,532 \quad (4.12)$$

- převod impedancí ekvivalentního synchronního stroje

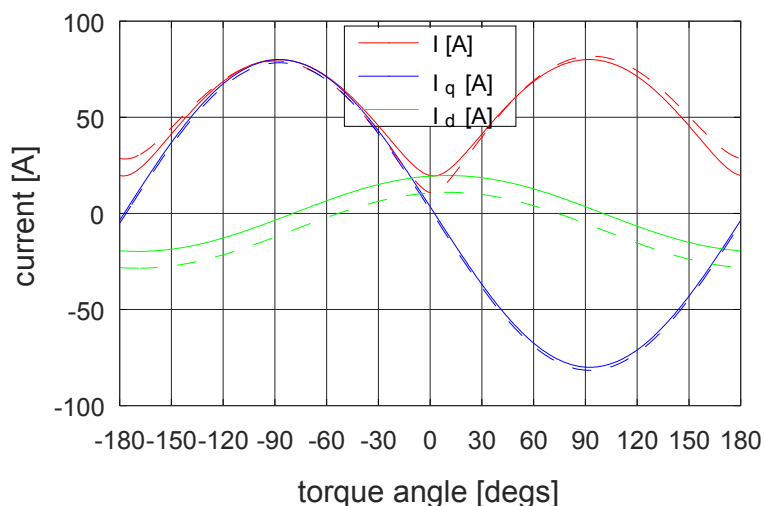
$$g_L = \frac{C_{d1}}{C_{b1}} \cdot \left(\frac{2m}{\pi} \cdot \frac{N_{s1} k_{v1}}{N_b} \right)^2 = \frac{0,670}{0,971} \cdot \left(\frac{2 \cdot 3}{\pi} \cdot \frac{120 \cdot 0,949}{80} \right)^2 = 2,675 \quad (4.13)$$

Při porovnání vypočtených hodnot je patrná značná variabilita uvedených parametrů i v rámci jediné konstrukce rotoru bez zásadnějších dalších geometrických úprav. Při dalším vývoji stroje je tedy třeba respektovat i tento fakt a je třeba navrženou konstrukci dále optimalizovat i při změně velikosti vzduchové mezery.

Jak bylo výše uvedeno, pokles vyniklosti rotoru se dále propisuje i do velikosti momentu generovaného strojem. Výsledkem toho je i nižší přetížitelnost stroje, nežli byla původně očekávaná hodnota – namísto přetížitelnosti stroje bez doplňkového buzení na 22 kW je tento stroj schopen daného přetížení až s maximálním stanoveným buzením, tj. s budícím proudem o velikosti 23,1 A. Vyšší přetížitelnosti stroje by bylo možné dosáhnout pouze za předpokladu rozvolnění požadavku na maximální velikost budícího proudu.



Obr. 4.11: Výkonová (vlevo) a momentová (vpravo) charakteristika optimálního synchronního reluktančního stroje bez buzení a s maximálním buzením



Obr. 4.12: Proudové charakteristiky optimálního synchronního reluktančního stroje bez buzení (plnou čarou) a s maximálním buzením (čárkovaně)

4.3.2 Provoz s buzením odpovídajícím synchronnímu stroji

Výsledky řešení simulace stroje se zvětšenou vzduchovou mezerou s buzením odpovídajícím ekvivalentnímu synchronnímu stroji s buzením naprázdno jsou uvedeny v tab. 4.5. Stejně jako v případě předchozí varianty stroje je i v tomto případě patrný nárůst účinníku v důsledku přídatného buzení, což má pozitivní vliv na velikost odebíraného proudu a celkovou účinnost stroje. Stroj optimalizovaný pro vyšší přetížitelnost tak v tomto případě do-

sahuje účinnosti 89,16 procenta, která se již blíží účinnosti vzorového asynchronního stroje SIEMENS, od kterého jsou studované modifikace odvozeny.

proměnná	značení	hodnota	jednotka
jmenovitý výkon	P	10961,17	W
rychlost stroje	n	1500,00	min^{-1}
moment	M	69,78	Nm
jmenovité napětí	U_n	400,00	V
statorový proud	I_1	26,34	A
účinník	$\cos \varphi$	0,68	-
ztráty v železe	ΔP_{Fe}	211,47	W
ztráty ve vinutí – stator	ΔP_{J1}	1090,15	W
ztráty ve vinutí – rotor	ΔP_{J2}	31,23	W
celkové ztráty	ΔP	1332,86	W
podélná indukčnost	L_d	37,22	mH
příčná indukčnost	L_q	9,13	mH
indukčnost budícího vinutí	L_b	11,10	mH
účinnost stroje	η	89,16	%

Tab. 4.5: Parametry optimálního synchronního reluktančního stroje s doplňkovým buzením o velikosti 10,33 A

4.3.3 Provoz s buzením odpovídajícím ztrátám v buzení synchronního stroje

V případě navýšení budícího proudu na maximální dovolenou hodnotu, tj. na $I_b = 23,1$ A, dochází k dalšímu navýšení účinnosti stroje, tentokrát na hodnotu 89,95 %. V tomto případě již vychází účinnost vyšší, nežli v případě referenčního asynchronního stroje, nicméně v porovnání s ostatními konstrukcemi se stále jeví použití zvětšené vzduchové mezery jako nevýhodné z hlediska celkové účinnosti stroje.

proměnná	značení	hodnota	jednotka
jmenovitý výkon	P	10941,43	W
rychlost stroje	n	1500,00	min^{-1}
moment	M	69,66	Nm
jmenovité napětí	U_n	400,00	V
statorový proud	I_1	23,34	A
účinník	$\cos \varphi$	0,75	-
ztráty v železe	ΔP_{Fe}	210,33	W
ztráty ve vinutí – stator	ΔP_{J1}	855,69	W
ztráty ve vinutí – rotor	ΔP_{J2}	156,17	W
celkové ztráty	ΔP	1222,19	W
podélná indukčnost	L_d	36,73	mH
příčná indukčnost	L_q	9,12	mH
indukčnost budícího vinutí	L_b	10,91	mH
účinnost stroje	η	89,95	%

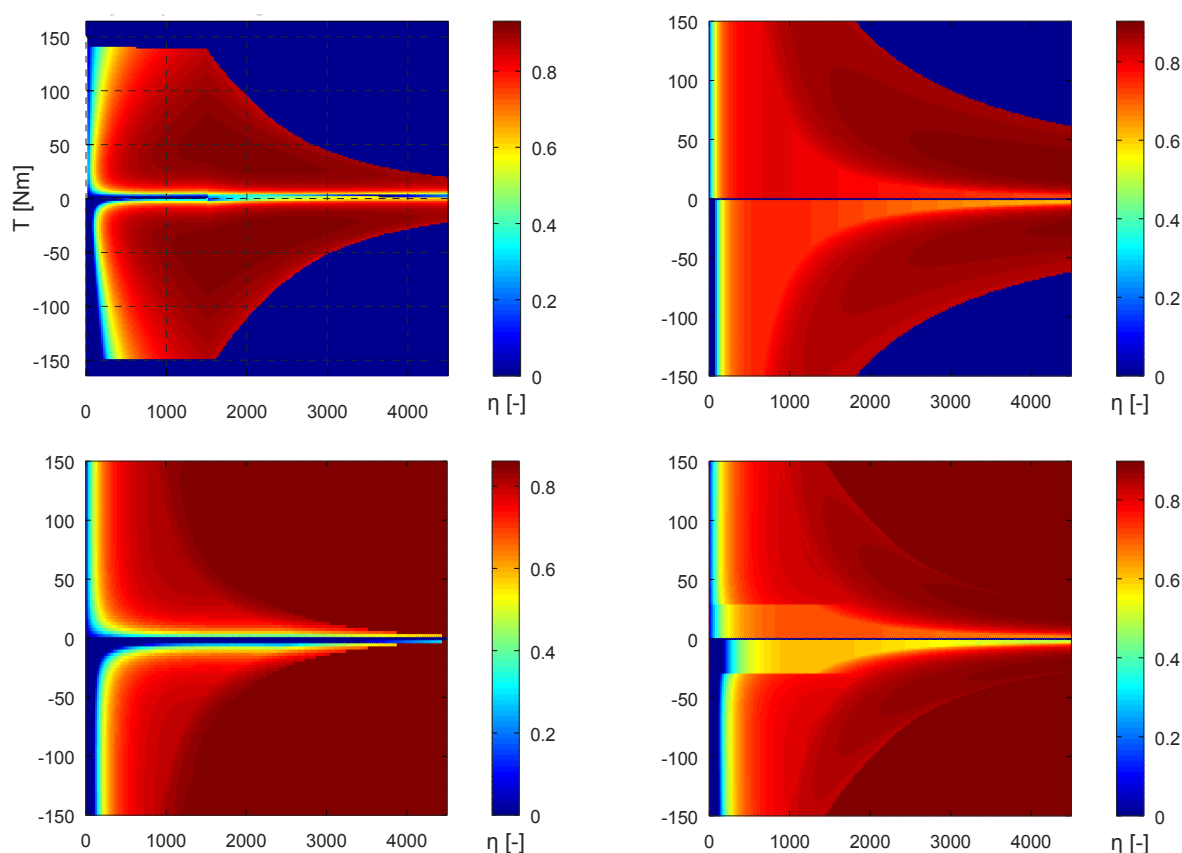
Tab. 4.6: Parametry optimálního synchronního reluktančního stroje s doplňkovým buzením o velikosti 23,1 A

4.3.4 Provoz s optimálním buzením

Provoz s optimálním buzením není s dostupnou velikostí budícího proudu možný.

5 Porovnání trakčních charakteristik studovaných strojů

Představu o chování navržených strojů ve vysokých rychlostech v porovnání se vzorovým asynchronním motorem lze získat z vynesení trakčních charakteristik s mapami účinnosti v obr. 5.1. Z nich je patrné, že nejlepší chování ve vysokých rychlostech má elektricky buzený synchronní stroj, jehož moment při 4500 min^{-1} dosahuje v motorickém režimu velikosti $61,5 \text{ Nm}$, čímž je o 3,1 násobně vyšší, nežli moment asynchronního stroje, jenž klesá na hodnotu 18 Nm . Vyššího momentu pak dosahuje též optimalizovaný synchronní reluktanční stroj, jehož moment je při 4500 min^{-1} 27 Nm . Synchronní reluktanční stroj s původní velikostí vzduchové mezery pak není schopen dosáhnout ani tohoto momentu.



Obr. 5.1: Mapy účinnosti vzorového asynchronního stroje (vlevo nahoře), ekvivalentního synchronního stroje (vpravo nahoře), ekvivalentního synchronního reluktančního stroje (vlevo dole) a optimalizovaného synchronního reluktančního stroje (vpravo dole)

6 Závěr

V rámci této výzkumné zprávy byla provedena studie náhrady asynchronního motoru motorem jiného typu za účelem zvýšení účinnosti pohonu. Jako náhrady byly studovány dva základní typy motorů – elektricky buzený synchronní stroj a synchronní reluktanční motor, který byl vybaven doplňkovým buzením, které bylo navrženo za účelem zvýšení jeho účinníku, přetížitelnosti a chování ve vysokých rychlostech.

V rámci studie byla vytvořena nová metoda návrhu synchronního reluktančního motoru vycházející z parametrické studie přetížitelnosti navrženého stroje v závislosti na jeho podélné indukčnosti a předpokladu znalosti vyniklosti daného stroje. V návaznosti na tuto studii byly odděleny dvě návrhové větve synchronního reluktančního stroje na větev zachovávající původní velikost vzduchové mezery stroje (ekvivalentní ke vzorovému asynchronnímu stroji) a větev se zvětšenou vzduchovou mezerou, která umožňuje získání vyšší přetížitelnosti stroje.

Z obdržených výsledků vyplývá, že nejlepší chování v širokém rozsahu otáček a zároveň nejvyšší účinnosti dosahuje elektricky buzený synchronní stroj. Jeho účinnost v případě optimálního napájení roste na hodnotu 92,65 % v porovnání s asynchronním motorem, jehož účinnost dosahuje pouze hodnoty 89,5 %.

V případě synchronních reluktančních strojů se pak ukázalo jako nemožné dosáhnout buď dvojnásobné přetížitelnosti stroje a nebo dosáhnout navýšení účinnosti stroje. Z tohoto pohledu navržené stroje nesplnily požadavky a nejeví se jako vhodné pro další vývoj. Veškeré obdržené výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.1 na straně 28.

Z hlediska konvenčních typů elektrických strojů tak lze pro další vývoj doporučit elektricky buzený synchronní stroj. Vzhledem k tomu, že tato studie byla orientována zejména za účelem potenciálně za účelem plného vyloučení veškerého buzení, byl studován pouze synchronní stroj s vyniklými póly, jenž vykazuje relativně výraznou vyniklost a vykazuje tedy reluktanční moment. Z tohoto důvodu nebyl ve studii zahrnut synchronní stroj s hladkým rotorem, který má další výhodné vlastnosti, které by mohly být využity v automotive průmyslu.

Z tohoto důvodu se doporučuje další vývoj zaměřit zejména na studium a návrh elektricky buzených synchronních strojů a zhodnocení vlastností obou potenciálních hlavních konstrukcí, tj. synchronního stroje s vyniklými póly a synchronního stroje s hladkým rotorem.

	P [W]	n [min^{-1}]	M [Nm]	U_n [V]	I_p [A]	I_i [A]	φ [ms]	$\cos \varphi$ [-]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP_{st} [W]	ΔP_{st} [W]	ΔP [W]	δ [mm]	L_g [mH]	L_g [mH]	L_g/L_g [-]	L_b [mH]	η [%]
SIEMENS 1LA7 163-4AA10	10847,7	1469	70,52	400	---	23,11	2,30	0,750	179,69	838,98	254,23	1272,90	1,2	55,97	---	---	---	89,50
Ekvivalentní WRSM s I_{b0}	10966,4	1500	69,81	400	10,33	18,75	1,50	0,891	206,61	552,14	156,17	914,93	1,2	48,71	24,7645	1,97	349,87	92,30
Ekvivalentní WRSM s I_{bopt}	10846,9	1500	69,05	400	12,55	16,59	0,70	0,976	197,68	432,10	230,51	860,29	1,2	48,44	24,9501	1,94	346,85	92,65
Ekvivalentní WRSM	4623,6	1500	29,43	400	0,00	26,21	4,00	0,309	279,36	1078,99	0	1358,35	1,2	48,71	25,0578	1,94	353,69	77,29
Ekvivalentní WSynRM	10993,5	1500	69,99	400	0,00	26,52	2,60	0,685	232,83	1104,99	0	1337,82	1,2	46,28	10,0657	4,60	13,85	89,15
Ekvivalentní WSynRM s I_{b0}	11015,3	1500	70,13	400	10,33	23,96	2,50	0,707	228,79	901,85	31,23	1161,88	1,2	45,78	10,0655	4,55	13,64	90,46
Ekvivalentní WSynRM s I_{bekv}	10880,3	1500	69,27	400	23,10	21,00	2,10	0,790	225,96	692,55	156,17	1074,68	1,2	44,89	10,067	4,46	13,39	91,01
Optimální WSynRM	11043,6	1500	70,31	400	0,00	29,18	2,80	0,637	213,78	1337,21	0,00	1550,99	1,6	37,52	9,1239	4,11	11,23	87,69
Optimální WSynRM s I_{b0}	10961,2	1500	69,78	400	10,33	26,34	2,60	0,685	211,47	1090,15	31,23	1332,86	1,6	37,22	9,1264	4,08	11,10	89,16
Optimální WSynRM s I_{bekv}	10941,4	1500	69,66	400	23,10	23,34	2,30	0,750	210,33	855,69	156,17	1222,19	1,6	36,73	9,1245	4,03	10,91	89,95

Tab. 6.1: Porovnání parametrů navržených strojů na základě modelování v software ANSYS

Literatura

- [1] Šobra, J.; Sobotka, L.; Skalický, M.; Hruška, K.: *Motory bez permanentních magnetů ze vzácných zemin určené pro pohon elektrických vozidel*. ZČU v Plzni, Plzeň, 2024. Výzkumná zpráva č. 22190 – 034 – 2023.
- [2] Kučera, J., Hapl, J.: *Vinutí elektrických strojů točivých*. Praha, ČSAV, 1959. ISBN není
- [3] Heller, B.; Hamata, V.: *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. Praha, Nakladatelství ČSAV, 1961. ISBN není
- [4] Kopylov, I. P. a kol.: *Stavba elektrických strojů*. Praha, Československá socialistická republika, SNTL, 1988. ISBN 04-532-88
- [5] Müller, G., Vogt, K., Ponick, B.: *Berechnung elektrischer Maschinen*. Weinheim, Wiley-Vch, 2007. ISBN 978-3527405251
- [6] SIEMENS, s.r.o.: *Katalog K02-0409CZ*. SIEMENS, s.r.o., Praha, 2009.
- [7] Hruška, K.: *Speciální klece asynchronních strojů*. Plzeň, ZČU v Plzni, 2011. Dizertační práce.
- [8] ANSYS Inc.: Ansys Electronics [online]. <<https://www.ansys.com/products/electronics>> [cit. 9. 10. 2024]
- [9] Hruška, K.: *Ztrátově optimální řízení synchronních strojů s vinutým rotorem*. ZČU v Plzni, Plzeň, 2020. Výzkumná zpráva č. 22190 – 013 – 2020.

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Momentová charakteristika stroje [6].....	7
Obr. 2.2: Motor SIEMENS 1LA7 163-4AA10.....	7
Obr. 2.3: Modelovaná výseč stroje v software ANSYS Electronics Desktop.....	8
Obr. 3.1: Model navrženého ekvivalentního elektricky buzeného synchronního stroje.....	9
Obr. 3.2: Průběh magnetické indukce ekvivalentního synchronního stroje pod jedním pólem.....	10
Obr. 3.3: Průběhy indukovaného napětí ekvivalentního synchronního stroje.....	10
Obr. 3.4: Výkonové (vlevo) a momentové (vpravo) charakteristiky navrženého ekvivalentního synchronního stroje.....	12
Obr. 3.5: Proudové charakteristiky ekvivalentního synchronního stroje (jmenovité buzení - plnou čarou, maximální buzení - čárkovanou).....	12
Obr. 4.1: Navržený segmentový rotor s doplňkovým budícím vinutím.....	15
Obr. 4.2: Závislosti maximálního a minimálního výkonu na podélné indukčnosti reluktančního stroje.	16
Obr. 4.3: Závislosti odebíraného proudu a jeho složek na podélné indukčnosti reluktančního stroje...	16
Obr. 4.4: Závislost účinníku na podélné indukčnosti reluktančního stroje.....	16
Obr. 4.5: Částečný řez navrženým synchronním reluktančním strojem.....	17
Obr. 4.6: Indukce ve vzduchové mezeře synchronního reluktančního stroje se segmentovým rotorem při doplňkovém buzení proudem 23,1 A.....	19
Obr. 4.7: Výkonová (vlevo) a momentová (vpravo) charakteristika ekvivalentního synchronního reluktančního stroje bez buzení a s maximálním buzením.....	19
Obr. 4.8: Proudové charakteristiky ekvivalentního synchronního reluktančního stroje bez buzení (plnou čarou) a s maximálním buzením (čárkovaně).....	20
Obr. 4.9: Částečný řez strojem se zvětšenou vzduchovou mezerou.....	22
Obr. 4.10: Indukce ve vzduchové mezeře synchronního reluktančního stroje se segmentovým rotorem a vzduchovou mezerou 1,6 mm při doplňkovém buzení proudem 23,1 A.....	23
Obr. 4.11: Výkonová (vlevo) a momentová (vpravo) charakteristika optimálního synchronního reluktančního stroje bez buzení a s maximálním buzením.....	24
Obr. 4.12: Proudové charakteristiky optimálního synchronního reluktančního stroje bez buzení (plnou čarou) a s maximálním buzením (čárkovaně).....	24
Obr. 5.1: Mapy účinnosti vzorového asynchronního stroje (vlevo nahoře), ekvivalentního synchronního stroje (vpravo nahoře), ekvivalentního synchronního reluktančního stroje (vlevo dole) a optimalizovaného synchronního reluktančního stroje (vpravo dole).....	26

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Štítkové parametry stroje.....	7
Tab. 2.2: Výstupy simulace jmenovitého stavu stroje v programu ANSYS Electronics Desktop	8
Tab. 3.1: Parametry ekvivalentního synchronního stroje s elektrickým buzením provozované- ho při budícím proudu naprázdno.....	11
Tab. 3.2: Parametry ekvivalentního synchronního stroje s elektrickým buzením provozované- ho při optimálním budícím proudu.....	13
Tab. 3.3: Parametry ekvivalentního synchronního stroje s elektrickým buzením provozované- ho v reluktančním režimu.....	14
Tab. 4.1: Parametry ekvivalentního synchronního reluktančního stroje provozovaného v re- luktančním režimu.....	18
Tab. 4.2: Parametry ekvivalentního synchronního reluktančního stroje s doplňkovým bu- zením o velikosti 10,33 A.....	20
Tab. 4.3: Parametry ekvivalentního synchronního reluktančního stroje s doplňkovým bu- zením o velikosti 23,1 A.....	21
Tab. 4.4: Parametry optimálního synchronního reluktančního stroje provozovaného v reluk- tančním režimu.....	22
Tab. 4.5: Parametry optimálního synchronního reluktančního stroje s doplňkovým buzením o velikosti 10,33 A.....	25
Tab. 4.6: Parametry optimálního synchronního reluktančního stroje s doplňkovým buzením o velikosti 23,1 A.....	25
Tab. 6.1: Porovnání parametrů navržených strojů na základě modelování v software ANSYS	28

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
1.0	Všechny	Publikování dokumentu	24. 10. 2024	khruska