

DESIGN OF SUPER PREMIUM EFFICIENCY LINE-START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE

Iveta Lolová

Master Degree Programme (1), FEEC BUT

E-mail: xfajmo02@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Jan Bárta

E-mail: bartaj@feec.vutbr.cz

Abstract: This article deals with line-start permanent magnet synchronous motor, because the world focuses on energy saving in these days more than ever. Line-start permanent magnet motors represents a possible replacement for asynchronous motors, which are the most used types of motors and represent one of the greatest energy consumption apparatuses in the world. This article deals with the design of line-start permanent magnet synchronous motor based on previously designed asynchronous motor. LSPMSM is analyzed in Ansys Maxwell. The obtained results are compared with results of measurement in the last chapter.

Keywords: line-start permanent magnet synchronous motor, permanent magnet, design, Maxwell

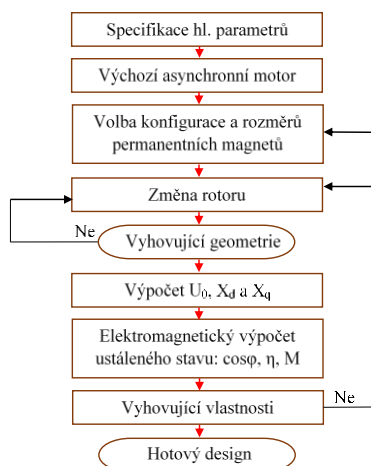
1 ÚVOD

V dnešní době je kladen stále větší důraz na snižování spotřeby elektrické energie z ekonomických a klimatických důvodů. Na spotřebě elektrické energie se významnou měrou podílí elektromotory, podle [1] více než 50 %. Proto elektrické stroje představují velký potenciál pro úsporu spotřeby elektrické energie. Mezi elektrickými stroji jsou nejužívanější skupinou asynchronní motory s kotvou nakrátko, u kterých lze zvyšovat účinnost už jen velmi obtížně [2]. Tento článek zkoumá novou, energeticky úspornější, technologii - synchronní stroj spouštěný ze sítě, v anglické literatuře označovaný Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor (LSPMSM), který v sobě spojuje vysokou účinnost synchronního stroje s možností rozběhu bez použití frekvenčního měniče jako u asynchronního stroje [3]. Cílem tohoto článku je ukázat postup návrhu LSPMSM v super prémiové účinnostní třídě IE4 dle normy EN 60034-30. Tento návrh je ověřen výpočtem laboratorního vzorku stroje, který byl vyroben a změřen. Naměřené hodnoty jsou pak srovnány s vypočtenými pomocí metody konečných prvků. Ukázaný postup návrhu je využitelný pro rychlý návrh LSPMSM v široké škále aplikací.

2 NÁVRH LSPMSM

Při návrhu LSPMSM může být navrhnout úplně nový stroj nebo může být vycházeno z již navrhnutého asynchronního motoru [4] a [5]. Pokud je při návrhu vycházeno z asynchronního motoru, většinou se stator ponechává jako u původního asynchronního stroje a jsou provedeny pouze změny na rotoru stroje. Díky tomu se také zmenší cena finálního výrobku, neboť mohou být využity standardně používané statorové plechy. Po volbě konfigurace a rozměrů magnetů se mění výška rotorové klece, kvůli vytvoření místa pro permanentní magnety. Veškeré rozměry jsou upravovány, dokud není dosaženo požadovaných vlastností stroje při rozběhu i v ustáleném stavu.

Navržená metodologie z Obrázku 1 byla aplikována na výchozí asynchronní motor, jehož parametry jsou uvedeny v Tabulce 1. Jedná se o běžný čtyřpólový asynchronní motor s klecí nakrátko. Napájecí napětí statoru je 400 V a jeho jednovrstvé vinutí s cívkovým krokem 9 je zapojeno do hvězdy. Asynchronní motor se nachází v účinnosti třídě IE1 – standardní účinnost. Na základě popsané metodologie byly prvky asynchronního motoru využity pro návrh LSPMSM s jmenovitým výkonem 1,5 kW při 1500 ot/min. Parametry takto navrženého stroje byly ověřeny elektromagnetickým výpočtem.



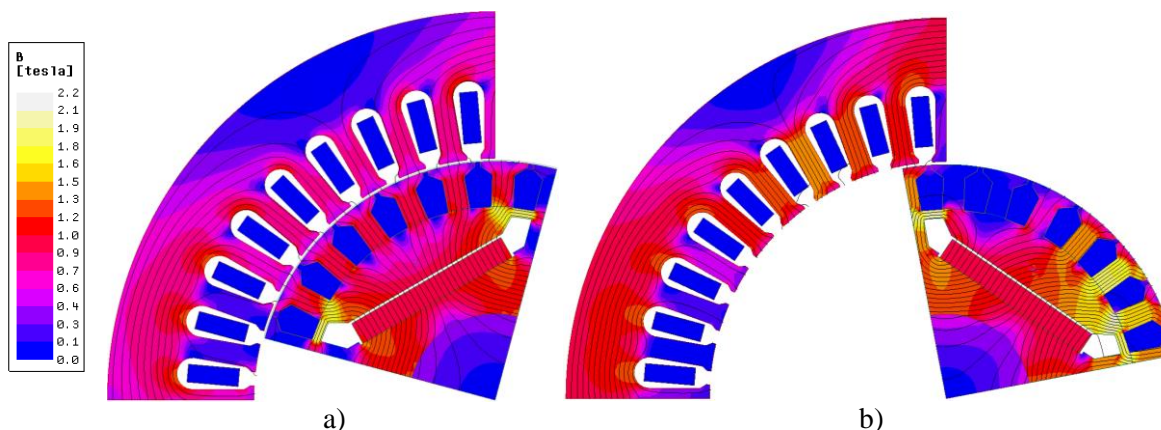
Obrázek 1: Algoritmus návrhu LSPMSM.

Parametr	Hodnota
Výkon [W]	1500
Moment [Nm]	9,905
Napětí [V]	400
Frekvence [Hz]	50
Skluz [%]	3,588
Otáčky [ot/min]	1446,2
Účinnost [%]	82,32
Počet pólů [-]	4
Počet fází [-]	3
Proud jmenovitý [A]	3,43
Doba rozběhu [s]	0,2
Osová výška [mm]	90

Tabulka 1: Parametry výchozího asynchronního motoru.

3 ELEKTROMAGNETICKÝ VÝPOČET

Pro navržený LSPMSM byl vytvořen parametrický elektromagnetický model v programu Ansys Maxwell. Tento model byl analyzován pro stav naprázdno, rozběh stroje a stav při zatížení. Jako zátěž byl zvolen ventilátor se setrvačností odpovídající rotoru LSPMSM. Teplota stroje je uvažována 75 °C, která byla zvolena na základě oteplení výchozího asynchronního stroje. Lze předpokládat, že u LSPMSM díky téměř nulovým ztrátám v kleci rotoru bude tato teplota nižší. Uvažovaná teplota je tedy na tzv. bezpečné straně, neboť díky nižší teplotě bude stroj v ustáleném stavu vykazovat lepší vlastnosti a také bude snáze dosahovat synchronismu, vzhledem k vyšší vodivosti rotoru. Ovšem zhorší se rozběhové vlastnosti LSPMSM, protože záběrný moment vlivem vyšší vodivosti klece bude ve skutečnosti menší, navíc proti němu působí brzdný moment od permanentních magnetů. Dále je při elektromagnetickém výpočtu uvažovaná teplota použitých magnetů N35UH rovna 60 °C. Výsledky pro jednotlivé stavy jsou ukázány v následujících podkapitolách.



Obrázek 2: Rozložení magnetické indukce pro a) chod naprázdno b) jmenovitý stav.

3.1 STAV NAPRÁZDNO

Vypočtené parametry stroje pro stav naprázdno jsou uvedeny v Tabulce 2. Je zde přítomný poměrně velký parazitní reluktanční moment s amplitudou 619,5 mNm, který je zapříčiněn tím, že kvůli náročnosti technologie výroby rotorových plechů není provedeno natočení rotorových drážek vůči drážkám statoru. Natočení statorového svazku nebylo realizováno za účelem snížení výrobních nákladů. V Obrázku 2 a) vidíme rozložení magnetické indukce pro stav naprázdno, je patrné výrazné přesycování můstku mezi drážkou pro uložení magnetů a rotorovou drážkou.

3.2 STAV PŘI JMENOVITÉM VÝSTUPNÍM MOMENTU

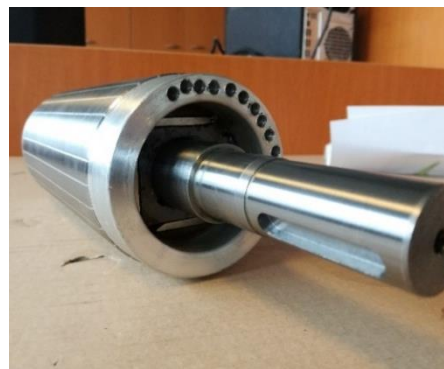
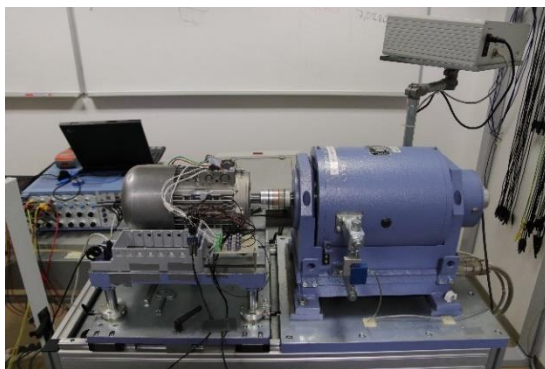
Při zatížení je z Obrázku 2 b) patrný vliv reakce kotvy, který vychyluje osu magnetického toku. Dochází k přesycování rotorových zubů a určitých oblastí na jedné straně pólu. Rovněž stejně jako při chodu naprázdno dochází k přesycování můstku mezi rotorovou drážkou a drážkou pro magnet rotoru. Výsledky z analýzy stroje při ustáleném stavu jsou uvedeny v Tabulce 3 společně s naměřenými hodnotami na vyrobeném stroji. Vypočtená účinnost s hodnotou 89 % spadá do kategorie velmi vysoké účinnosti IE4 definované normou ČSN EN 60034-30.

Parametr	Hodnota
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře, první harmonická [T]	0,484
Efektivní hodnota indukovaného napětí, první harmonická [V]	163
Napěťová konstanta [V/1000 ot.min ⁻¹]	109
Maximální hodnota parazitního reluktančního momentu [mNm]	619,466

Tabulka 2: Vypočtené parametry pro chod naprázdno.

4 SROVNÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VÝPOČTU S NAMĚŘENÝMI HODNOTAMI

Pro navržený LSPMSM v kapitole 2 byl vyroben laboratorní vzorek. Na laboratorním vzorku bylo provedeno měření za účelem ověření parametrů stroje. Výsledky měření jsou ukázány v Tabulce 3. Z této tabulky lze vidět, že vyrobený stroj měl menší výkon, a tedy i menší jmenovitý moment než vypočtený. Na druhou stranu ale stroj při měření vykázal vyšší účinnost, než byla vypočtená. To lze zdůvodnit tím, že elektromagnetické výpočty byly korigovány tak, aby byly vždy na tzv. bezpečné straně. Pro korigování byly použity korekční činitele – například pro navýšení ztrát v železe, třecí ztráty a podobně. Dále je ve výpočtu uvažovaná teplota vinutí 75 °C a permanentních magnetů 60 °C, která byla ve skutečnosti nižší. Naměřená teplota vinutí ve statoru byla 49 °C a na základě tepelné sítě byla teplota permanentních magnetů odhadnuta 48 °C. Tudiž permanentní magnety měly vyšší remanentní indukci a koercitivní sílu, a dále, díky nižší teplotě, byly menší ztráty ve vinutí. Přičemž také vzrostla měřená hodnota jmenovitého proudu, díky vyšší vodivosti vinutí.



Obrázek 3: a) Ukázka měření na vyrobeném LSPMSM b) Rotor LSPMSM.

Účinník byl u vyrobeného stroje patrně horší než při výpočtu. To znamená, že vyrobený stroj měl nižší magnetizační indukčnost, než bylo uvažováno ve výpočtu. Nižší indukčnost stroje byla zapříčiněna nedokonalostmi technologie výroby. Protože se během tlakového lití drážek rotoru nechtěně zaplnily i drážky pro uložení magnetů, nejpravděpodobněji došlo k prorážení můstku mezi drážkou pro uložení magnetu a drážkou rotoru, musely tyto drážky pro uložení magnetů být ručně zbaveny hliníku pomocí strunového řezání. To zapříčinilo malé zvětšení drážky pro uložení magnetů. Navíc byla zvětšena délka vzduchové mezery při soustružení rotoru stroje. Dále se vlivem řezání plechu mění magnetické vlastnosti plechů v nejbližším okolí řezu, což ve výpočtu není uvažováno. Kvůli horšímu účinníku se navýšil potřebný proud k namagnetování stroje. To je další důvod vzrůstu naměřené hodnoty jmenovitého proudu oproti vypočtené. Z výše popsaného plyne, že naměřená hodnota indukovaného napětí naprázdno je menší než vypočtená hodnota.

Parametr	Hodnota vypočtená	Hodnota naměřená
Jmenovitý výstupní výkon [W]	1512,89	1501,04
Jmenovitý moment [Nm]	9,63	9,56
Otáčky [ot/min]	1500	1500
Účinnost [%]	89,00	90,12
Účinník [-]	0,904	0,880
Ind. napětí naprázdno, 1. harmonická [V]	163,0	161,3
Jmenovitý proud [A]	2,54	2,77
Mag. indukce ve vzduch. mezeře při jmenovitém stavu, zákl. harmonická [T]	0,656	-

Tabulka 3: Vypočtené a naměřené parametry.

5 ZÁVĚR

Článek ukázal postup návrhu LSPMSM se super prémiovou účinnostní třídou využívající prvky asynchronního motoru. Metodika algoritmu návrhu byla ověřena na vyrobeném laboratorním vzorku LSPMSM, který při měření vykázal velmi dobré vlastnosti, především účinnost motoru. Díky změně rotoru asynchronního motoru na rotor LSPMSM bylo dosaženo kategorie účinnosti IE4 – velmi vysoká účinnost, z původní účinnosti asynchronního motoru IE1 – standardní účinnost.

Dále je posouzena přesnost elektromagnetického výpočtu a návrhu skrze porovnání výpočtů s hodnotami získanými z měření na vyrobeném vzorku LSPMSM. Přestože vyrobený motor měl dle předpokladů dobré vlastnosti, bude v budoucnu potřeba zpřesnit elektromagnetický výpočet, kvůli zajištění věrného modelu skutečnosti. Díky měření na vyrobeném motoru jsme schopni lépe korigovat chyby během výpočtu, především úpravou korekčních činitelů, a vytvořit přesnější model. V budoucnu by bylo vhodné v elektromagnetickém výpočtu určit vliv výrobních tolerancí na vlastnosti motoru, které také zapříčiňují nepřesnost výpočtu.

Přínosem tohoto článku je vypracování ověřené metodiky návrhu synchronních strojů spouštěných ze sítě s vysokou účinností. Tyto stroje by v budoucnu mohly nahradit velkou část méně účinných asynchronních motorů použitých v pohonech pro ventilátory, odstředivá čerpadla, kompresory a dalších průmyslových aplikacích.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl v rámci projektu: Stroje s vysokou účinností spouštěné ze sítě/TJ01000433, který je řešen s finanční podporou TA ČR.

REFERENCE

- [1] HASSANPOUR ISFAHANI, Arash a Sadegh VAEZ-ZADEH. *Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities*. Energy [online]. Elsevier, 2009, 34(11), 1755-1763 [cit. 2017-10-15]. DOI: 10.1016/j.energy.2009.04.022. ISSN 0360-5442.
- [2] DE ALMEIDA, Anibal T., Fernando J. T. E. FERREIRA a Ge BAOMING. *Beyond Induction Motors-Technology Trends to Move Up Efficiency*. IEEE Transactions on Industry Applications [online]. IEEE, 2014, 50(3), 2103-2114 [cit. 2019-03-08]. DOI: 10.1109/TIA.2013.2288425. ISSN 0093-9994.
- [3] FAJMONOVÁ (LOLOVÁ), Iveta. *Návrh synchronního stroje spouštěného ze sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Bárta, Ph.D.
- [4] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-70162-1.
- [5] ELISTRATOVA, Vera. *Optimal design of line-start permanent magnet synchronous motors of high efficiency*. Electric power. Ecole Centrale de Lille, 2015. English. NNT: 2015ECLI0022.