

# THERMAL MODEL OF LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR AND ITS PRACTICAL VERIFICATION

**Romana Homolová**

Master Degree Programme (1), FEEC BUT

E-mail: xhomol18@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Marek Toman

E-mail: marek.toman@vutbr.cz

**Abstract:** This project contains a brief introduction of The Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor. It also contains the theory of calculation using the method of thermal networks and a designed thermal network for the rotor of LSPMSM. Finally, the measured and calculated temperatures of the entire LSPMSM are reported.

**Keywords:** LSPMSM, Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor, heating of motor, thermal network

## 1 ÚVOD

V poslední době je často probíraným tématem zvyšování účinnosti elektromotorů. Nejvíce využívanými jsou motory asynchronní. Zvyšování účinnosti těchto motorů je však možné pouze pomocí optimalizace konstrukce, což vede jen k omezenému úspěchu. Možným řešením je tak vytváření alternativ, kterými by tyto motory mohly být nahrazeny. Jednou z nich je i synchronní motor s permanentními magnety a klecí nakrátko umožňující přímé připojení na elektrickou síť. Tento motor je spíše známý pod anglickým názvem Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor, či pod zkratkou LSPMSM. Kombinuje vysokou účinnost synchronních strojů s permanentními magnety a možnost připojení přímo na elektrickou síť, kterou umožňují motory asynchronní.

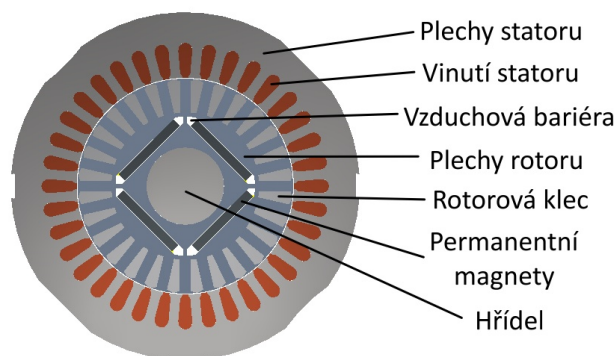
Jako u ostatních typů motorů, i zde je třeba správně určit oteplení jednotlivých částí motoru. Vysoké oteplení totiž obecně může způsobit poškození izolace vinutí, či snížení její životnosti. Hrozí také zhoršení teplotně závislých parametrů permanentních magnetů. Pro výpočet je zde využita metoda analytická - metoda tepelných sítí. [1]

## 2 SYNCHRONNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY A KLECÍ NAKRÁTKO UMOŽŇUJÍCÍ PŘÍMÝ ROZBĚH ZE SÍTĚ

LSPMSM má rozběh podobný rozběhu motoru asynchronního, ovšem v ustáleném stavu se téměř neliší od synchronního motoru s permanentními magnety.

Konstrukce motoru (viz Obrázek 1) je velice podobná motoru asynchronnímu. Skládá se z třífázového statoru, který je totožný ze statorem motoru asynchronního. Rozdílný je ovšem rotor. Ten obsahuje jak klec nakrátko, tak i permanentní magnety. Dle uložení permanentních magnetů jsou pak rozlišovány jednotlivé typy LSPMSM. Zde je uveden typ s permanentními magnety uloženými uvnitř rotoru.

V motorech jsou nejčastěji využívány permanentní magnety typu Samarium-Cobalt (SmCo), či Neodym-Železo-Bor (NdFeB). Tyto magnety mají vysokou odolnost proti působení vnějšího magnetického pole a vysokou Currieho teplotu, což znamená nižší riziko demagnetizace permanentních magnetů při výrobě motoru (při lití klece).



**Obrázek 1: Řez LSPMSM [1]**

LSPMSM má hned několik výhod. Díky zanedbatelným ztrátám v rotoru dosahuje tento motor vyšších účinností než motor asynchronní. Má také vyšší účinník. Je možné jej také připojit přímo na elektrickou síť. To znamená, že nemusí být napájen z měniče a narůstá celková účinnost pohonu.

Nevýhodou jsou ovšem vyšší náklady spojené s náročnou výrobou díky složitější konstrukci. [1]

### 3 VÝPOČET A EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ OTEPLENÍ LSPMSM

Jak již bylo zmíněno, v LSPMSM jsou ztráty v rotoru téměř zanedbatelné. Z toho plyne, že teplota rotoru tohoto motoru je nižší než teplota asynchronního motoru o stejném výkonu. I přesto je důležité tepelně analyzovat motor, abychom zjistili, zda nehrozí poškození izolace, snížení její životnosti či zhoršení parametrů zvolených permanentních magnetů.

Námi analyzovaný motor vychází z asynchronního motoru o výkonu 1,5 kW, s otáčkami 1500 min<sup>-1</sup>, IP54 s vlastním povrchovým chlazením a třídou izolace vinutí F. V konstrukci tohoto motoru byla změněna pouze rotorová část, v níž jsou přidány permanentní magnety typu NdFeB. Parametry analyzovaného motoru jsou tedy totožné s motorem původním. [1].

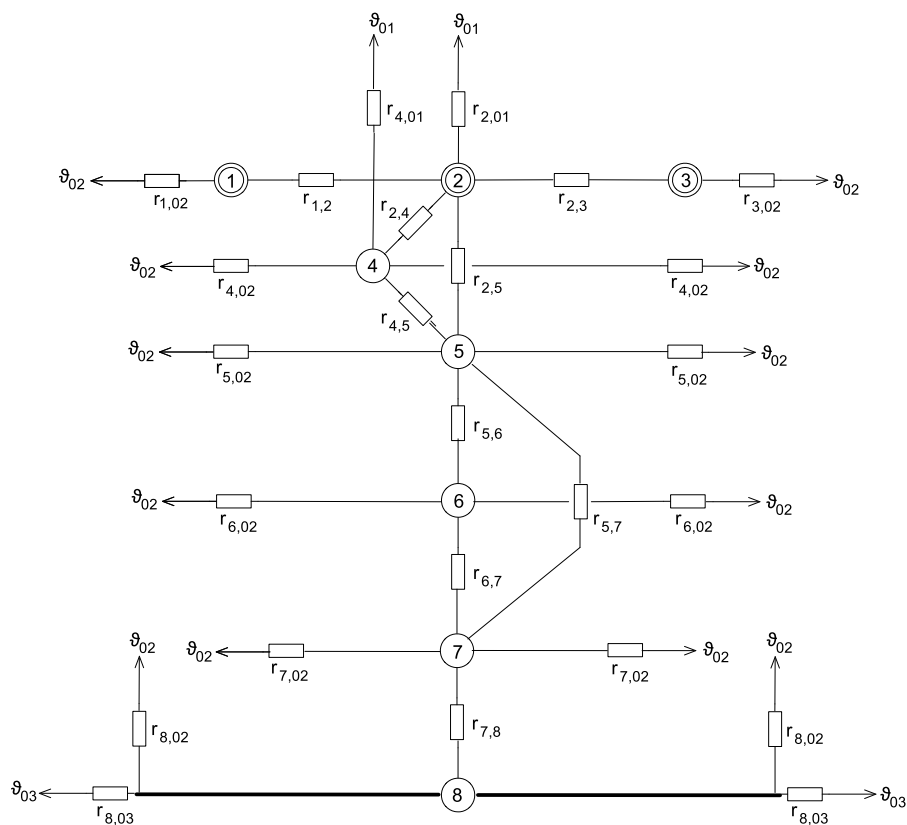
#### 3.1 TEPELNÁ SÍŤ ROTORU LSPMSM

Tepelný model pro výpočet oteplení je založen na metodě tepelných sítí. Tato metoda využívá analogii tepelných obvodů s obvody elektrickými.

Při výpočtech se využívá řada zjednodušujících předpokladů, ale i tak jsou výsledky velmi dobré. Metoda tepelných sítí spočívá ve vytvoření tepelného schématu, které zahrnuje všechny části stroje. Určují se střední teploty jednotlivých částí stroje. [2]

Tepelná síť LSPMSM vychází z tepelné sítě asynchronního motoru známé např. z [2]. Z konstrukce vyplývá, že stator LSPMSM je stejný jako stator asynchronního motoru. Změny tedy byly provedeny pouze v rotorové části sítě. Jho rotoru je díky přítomnosti permanentních magnetů rozděleno na dvě části (dále označovány jako jho 1 a jho 2).

Pro přehlednost je na Obrázku 3 zachycena pouze rotorová část navržené tepelné sítě nezávisle na motorovém celku. Z uzlů je tedy dán přechod pouze do okolních teplot. Pro výpočty byla využita tepelná síť celého motoru. Tzn., že v tepelné síti asynchronního motoru byla nahrazena rotorová část. V celkovém výpočtu jsou poté zahrnuty ztráty  $P_{j1}$ ,  $P_{j2}$ ,  $P_{Fe}$ ,  $P_{mech}$ ,  $P_d$ ,  $P_{zs}$ ,  $P_{js}$ ,  $P_{zr}$ ,  $P_{jr}$ . [1]



Obrázek 2: Tepelná síť rotoru LSPMSM [1]

### Význam jednotlivých uzlů sítě

- |                         |                        |
|-------------------------|------------------------|
| 1 - Kruh rotorové klece | 5 - Jho 1 rotoru       |
| 2 - Tyče rotorové klece | 6 - Permanentní magnet |
| 3 - Kruh rotorové klece | 7 - Jho 2 rotoru       |
| 4 - Zuby rotoru         | 8 - Hřídel             |

### Význam okolních teplot

- $\vartheta_{01}$  - Teplota statoru  
 $\vartheta_{02}$  - Teplota vnitřního vzduchu  
 $\vartheta_{03}$  - Teplota ložisek

Z navržené tepelné sítě rotoru lze vyjádřit obecné matice pro výpočet jako

$$\begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vartheta_4 \\ \vartheta_5 \\ \vartheta_6 \\ \vartheta_7 \\ \vartheta_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -g_{12} & G_2 & -g_{23} & -g_{24} & -g_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g_{23} & G_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g_{24} & 0 & G_4 & -g_{45} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g_{25} & 0 & -g_{45} & G_5 & -g_{56} & -g_{57} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{56} & G_6 & -g_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{57} & -g_{67} & G_7 & -g_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{78} & G_8 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} P_1 + g_{1o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_2 + g_{2o1} \cdot \vartheta_{o1} \\ P_3 + g_{3o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_4 + g_{4o1} \cdot \vartheta_{o1} + g_{4o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_5 + 2 \cdot g_{5o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_6 + 2 \cdot g_{6o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_7 + 2 \cdot g_{7o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_8 + 2 \cdot g_{8o2} \cdot \vartheta_{o2} + 2 \cdot g_{8o3} \cdot \vartheta_{o3} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Členy hlavní diagonály  $G_i$  matice tepelných vodivostí  $\mathbf{G}$  jsou dány součtem všech vodivostí vstupujících i-tého uzlu.[1]

### 3.2 NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY TEPLOT

Pomocí tepelné sítě celého LSPMSM byly vypočteny střední teploty jednotlivých částí. Tyto teploty jsou uvedeny v Tabulce 1. Při výpočtu byla uvažována teplota okolí 24,6 °C, aby bylo možné výsledky porovnat s měřením, které probíhalo právě při této teplotě okolí. Pro určení správnosti vypočtených hodnot byla na daném motoru provedena oteplovací zkouška při zatížení motoru jmenovitým momentem. Měření oteplení jednotlivých částí byla použita 4 čidla typu PT100 a naměřené hodnoty byly zaznamenávány. Hodnoty naměřených ustálených teplot jsou uvedeny v Tabulce 1 za lomítkem.

**Tabulka 1:** Porovnání teplot získaných výpočtem a měřením

| Název                           | $\vartheta_{\text{Tep.sit}}/\vartheta_{\text{zmer}} [^{\circ}\text{C}]$ | Název                         | $\vartheta_{\text{Tep.sit}}/\vartheta_{\text{zmer}} [^{\circ}\text{C}]$ |
|---------------------------------|---|-------------------------------|---|
| Teplota čela vinutí statoru 1   | <b>50,4 / 52,5</b>  | Teplota zubů rotoru           | 48,4  |
| Teplota vinutí v drážce statoru | <b>48,7 / 48,6</b>  | Teplota jha rotoru 1          | 48,4  |
| Teplota čela vinutí statoru 2   | <b>50,4 / 52,4</b>  | Teplota permanentního magnetu | 48,4  |
| Teplota zubů statoru            | 44,0  | Teplota jha rotoru 2          | 48,4  |
| Teplota jha statoru             | 43,3  | Teplota hřídele               | 48,3  |
| Teplota kruhů rotorové klece    | 48,2  | Teplota kostry                | <b>40,1 / 38,2</b>  |
| Teplota tyčí rotorové klece     | 48,4  | Teplota ložiska               | 50,7  |

## 4 ZÁVĚR

Práce je zaměřená na analýzu oteplení LSPMSM pomocí metody tepelné sítě. Tepelná síť tohoto motoru je z velké části shodná s tepelnou sítí pro motor asynchronní. Změny tepelné sítě byly provedeny pouze v rotorové části.

Z výsledků plyne, že části rotoru mají téměř shodnou střední teplotu. Tudíž můžeme zjednodušeně uvažovat, že teplota rotoru je ve všech částech stejná. Nejvyšší teplota je dle předpokladů na čelech vinutí statoru, avšak při daných podmínkách nehrozí žádné poškození izolace statorového vinutí.

Měření oteplení ve všech částech motoru není možné, proto nemůže být celý výpočet porovnán s naměřenými hodnotami. Avšak z naměřených hodnot je patrné, že je navržena tepelná síť funkční. Na čelech vinutí byla naměřena vyšší teplota, než bylo vypočteno. Rozdíly naměřených a vypočtených teplot jsou ovšem téměř zanedbatelné. Výsledky tedy dosahují velmi dobré shody.

## PODĚKOVÁNÍ

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

## REFERENCE

- [1] HOMOLOVÁ, Romana. *Tepelný výpočet motoru s permanentními magnety a klecí nakrátko*. Brno, 2017, 33 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Ing. Marek Toman
- [2] Ing. TOMAN, Marek. *Řízení asynchronního motoru s ohledem na účinnost při činnosti v širokém rozsahu otáček a momentu*. Brno, 2017, 36 s. Pojednání o dizertační práci. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.