

Vliv tepelné vodivosti v axiálním směru na celkový tepelný model vysokorychlostního PMSM

Lukáš Veg

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

vegl@kev.zcu.cz

Impact of Thermal Conductivity in Axial Direction on the Overall Thermal Model of High-Speed PM Synchronous Motor

Abstract – The subject of presented paper is research of impact on the change of thermal conductivity of stator lamination of high synchronous machine in axial direction. The thermal model of PMSM is calculated for different values of thermal conductivity in axial direction. The results are evaluated on the thermal model created in ANSYS. The modeled motor is a permanent magnet synchronous motor with tooth winding in the stator and surface mounted permanent magnets.

Keywords – Permanent Magnet Machines; Temperature Dependence; Thermal Analysis; Thermal Conductivity; Thermal Resistance.

I. ÚVOD

Optimální konstrukce elektromotoru je klíčem všech elektrických pohonů. Mnoho výzkumných týmů se zaměřuje na aplikace s vysokorychlostním pohonem, jejich optimalizaci a zvýšení hustoty výkonu a účinnosti. Proto se v této oblasti v současné době vydává mnoho publikací. Dosažení vyšší rychlosti použitím převodovky zvyšuje hmotnost a složitost celého pohonu. Na druhé straně konstrukcí vysokorychlostního stroje se motor zmenší a problémy s převodovkou mizí.

Pohony vysokorychlostních strojů jsou lehčí a kompaktnější v porovnání s řešením konvekčního motoru a převodovky. Ale hustota ztrátového výkonu se zvyšuje a musí se nalézt správný kompromis mezi snížením rozměrů a účinností pohonu. Vysoká frekvence a vysoká rychlost ovlivňují zejména ztráty v železe, ztráty vířivými proudy a ztráty třecí a ventilační. Proto je výpočet oteplení stroje jednou z rozhodujících částí konstrukce vysokorychlostního stroje. [1-6]

Hlavním cílem tepelného výpočtu je ověření maximálních teplot ve stroji, definice provozní teploty a ověření důležitých částí stroje, zejména vinutí a permanentních magnetů.

II. POPIS MODELOVANÉHO VYSOKORYCHLOSTNÍHO STROJE

Vysokorychlostní PMSM je navržen pro provozní otáčky v rozmezí od 3000 do 10000 ot / min. Rozsah otáček je vhodný pro použití v širokém spektru technických aplikací, jako je pohon výtahů, automobilů apod. Hlavní výhodou jsou kompaktní rozměry použitého elektrického stroje. PMSM zajišťuje vysokou účinnost a hustotu výkonu, nízkou hladinu hluku, jednoduchou konstrukci a absenci kluzných kontaktů.

Hlavní nevýhodou je tepelná závislost a nízká mechanická odolnost permanentních magnetů.

Hlavní parametry modelovaného PMSM jsou shrnuty v tabulce I.

TABULKA I. ZÁKLADNÍ INFORMACE O STROJI

Parametr	hodnota	jednotka
Jmenovitý výkon	110 000	W
Jmenovité napětí	400	V
Jmenovitý proud	198	A
Rozsah otáček	3000-10000	ot/min
Účinnost	96.4	%

Stroj je ochlazován přes povrch kostry chladicími žebry po celé ploše. Jmenovitá rychlost okolního vzduchu se očekává 10-40 km/h (očekává se pohyb pohonu ve vzduchu) a teplota chladicího vzduchu je 40 ° C. Stroj má jmenovité otáčky 3500 otáček za minutu a 110 kW výkonu v nominálním bodě (s přetížením až do 200 kW) s účinností 96,4%.

Celý stroj je navržen jako šestipólový motor s permanentními magnety na statoru a zubovým vinutím v devíti drážkách na statoru. Izolační systém je navržen pro teplotní třídu 200. Rotor je vyroben z pevné magnetické oceli, permanentní magnety (N40UH) jsou nalepeny na povrch rotoru a zajištěny sklotextitovou bandáží. Jedno z ložisek je izolováno, aby se potlačily ložiskové proudy, které mohou způsobit až zničení ložisek.

III. TEPELNÝ MODEL PM SYNCHRONNÍHO STROJE A DOPAD NASTAVENÍ KONDUKTIVITY V AXIÁLNÍM SMĚRU NA CELKOVÝ MODEL

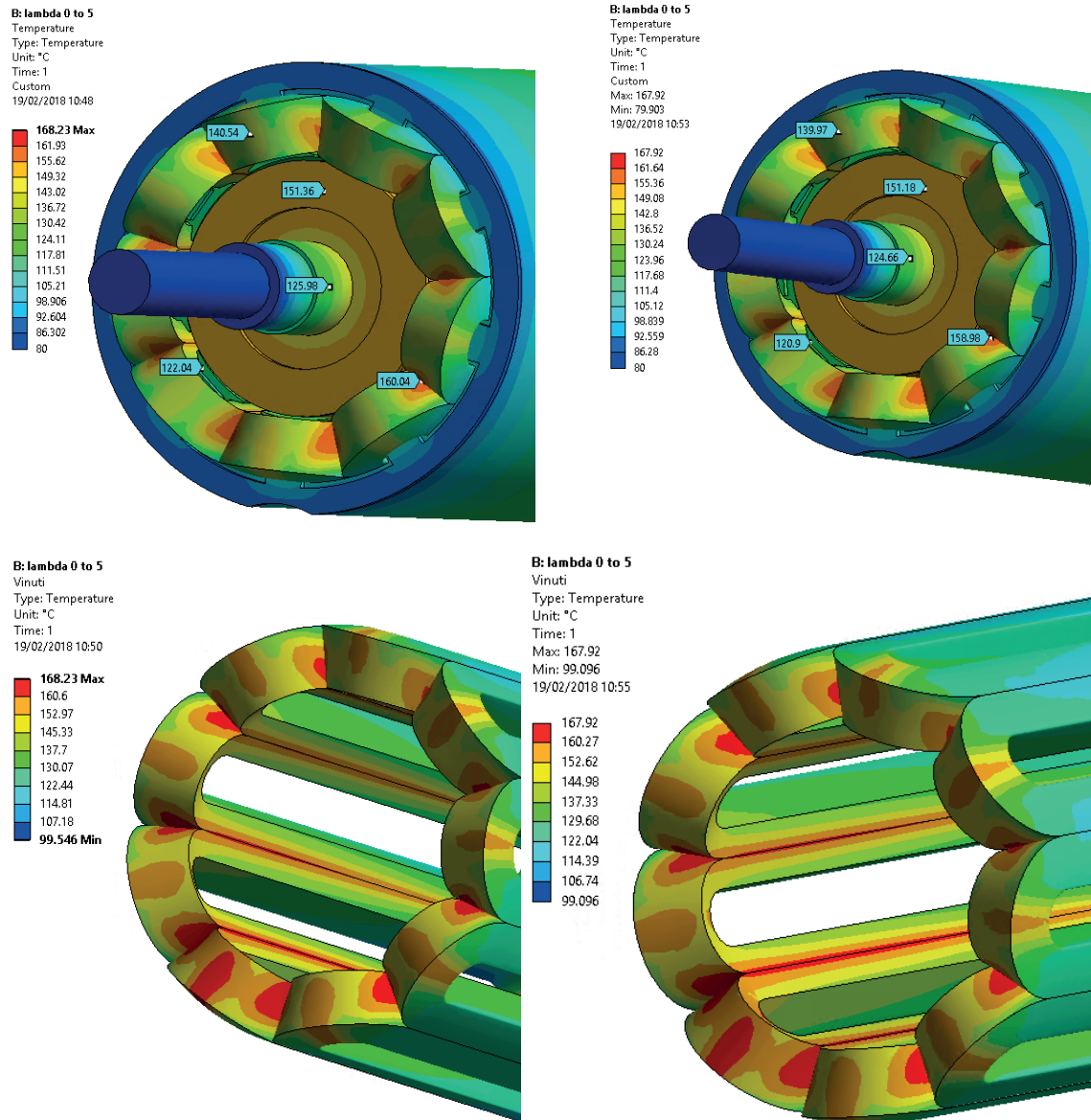
Tepelný model je vytvořen a simulován v systému ANSYS Workbench. Hlavní myšlenkou je analýza dopadu axiální tepelné vodivosti statorových plechů na celkový model. Motor je konstruován bez radiálních chladicích kanálů. Tepelný model je vytvořen ve 3D, jsou zde definovány různé části stroje, které poskytují nejlepší srovnání s realitou. Obvykle je v tepelném výpočtu použita hodnota pro radiální tepelnou vodivost 45 W.m⁻¹.K⁻¹ a pro axiální směr od hodnoty 0 až 5 W.m⁻¹.K⁻¹. Teplota 100 ° C uvnitř stroje byla nastavena na nejhorší případ simulace vytápění elektromotoru [1]

Konvekce do vnějšího vzduchu je nastavena na povrch tělesa stroje. Koeficient je nastaven na 20 W/m².K. Následující rovnice je použita pro odhad koeficientu přenosu tepla na čelech vinutí. Vzorec je

$$\alpha = k_1 + (k_2 \cdot v_r^{0.6}) \quad (1)$$

kde $k_1 = 6,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a $k_2 = 5,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a v_r je rychlost otáčení.

IV. VÝSLEDKY



Obrázek I. Porovnání rozložení teploty pro dvě hodnoty tepelné vodivosti

TABULKA II. VÝPIS VŠECH VÝSLEDKŮ

λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Maximální teplota ve vinutí [°C]	Minimální teplota ve vinutí [°C]	Maximální teplota v PM [°C]	Minimální teplota v PM [°C]	Celková maximální teplota [°C]
0	168.3	99.7	166.0	151.4	168.3
0.5	168.2	99.5	165.9	151.3	168.2
1	168.2	99.5	165.9	151.3	168.2
1.5	168.1	99.4	165.9	151.3	168.1
2	168.1	99.3	165.9	151.3	168.1
2.5	168.1	99.3	165.8	151.2	168.1
3	168.0	99.2	165.8	151.2	168.0

3.5	168.0	99.2	165.8	151.2	168.0
4	168.0	99.2	165.8	151.2	168.0
4.5	167.9	99.1	165.8	151.2	167.9
5	167.9	99.1	165.8	151.2	167.9
50	166.5	99.1	164.9	150.6	166.5

V. ZÁVĚR

Předložený článek je zaměřen na tepelné výpočty vysokorychlostního synchronního stroje s permanentním magnetem a ukazuje malý vliv axiální tepelné vodivosti (λ) na teploty ve stroji. V článku jsou uvedeny výsledky jednoho nastavení koeficientu přenosu tepla na čelní straně vinutí; $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro všechny výpočty byl porovnán vliv axiální tepelné vodivosti a výsledek byl ověřen analytickým výpočtem. U všech případů je ukázán velmi malý vliv tepelné vodivosti elektrotechnických plechů v axiálním směru. I když nastavíme λ na $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (nereálná hodnota), dopad je stále velmi malý. Hlavní příspěvek tohoto výzkumu by měla být skutečnost, že axiální tepelný tok by mohl být zanedbáván v analytickém výpočtu a výpočtu FEA. Pro tento teoretický závěr je aktuálně připraveno skutečné měření.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2018-005 a projektu SGS-2018-009.

LITERATURA

- [1] J. J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrabovcova, V.; Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK., 2008, ISBN: 9780470695166.
- [2] A. Boglietti and A. Cavagnino, "Analysis of end winding cooling effects in TEFC induction motors," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 43, no. 5, pp. 1214–1222, Sep./Oct. 2007.
- [3] D. Gerada, A. Mebarki, N. L. Brown, C. Gerada, A. Cavagnino and A. Boglietti, High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 6, pp.
- [4] A. B. Nachouane, A. Abdelli, G. Friedrich and S. Vivier, "Estimation of windage losses inside very narrow air gap of high speed electrical machines without an internal ventilation using CFD methods," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, 2016, pp. 2704–2710. doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732904L.
- [5] R. Vlach and R. Huzlik, "Thermal model of high speed asynchronous machine," 2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), Prague, Czech Republic, 2016, pp. 1–5.
- [6] J. Saari, "Thermal analysis of high-speed induction machines", Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, vol. 73, 1998. [online]. 10.2.2017 [cit. 2017-02-10].