

PERMANENT MAGNET ASSISTED SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR

Ladislav Knebl

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xknebl03@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Čestmír Ondrůšek

E-mail: ondrusek@feec.vutbr.cz

Abstract: In these days, there is big emphasis put on electric motors efficiency, the best efficiency can be achieved with surface mounted permanent magnet (SMPM) motor. The SMPM motors efficiency may be even in cases of small machines, higher than 90%. Unfortunately this kind of motor is expensive, because neodymium magnets are used. The synchronous reluctance assisted motor (SRAM) topology is one of many possible machines that might in some cases replace the SMPM machines. Because cheap ferrite magnets are used and still similar characteristics can be achieved.

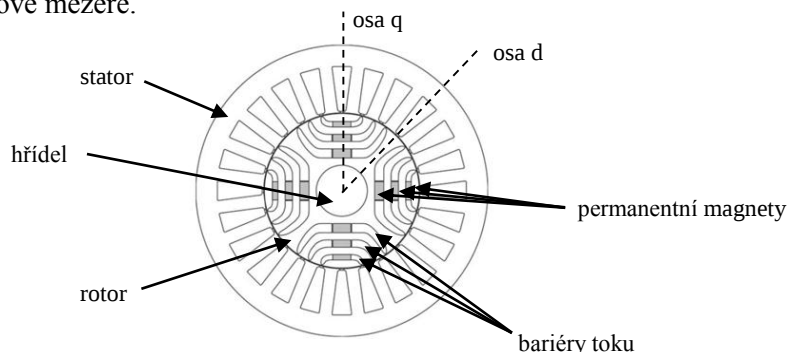
Keywords: permanent magnet assisted synchronous reluctance motor, permanent magnet synchronous motor, ferrite magnets, permanent magnet, finite element analysis, synchronous reluctance motor.

1 ÚVOD

V posledních 20 letech dosáhl výzkum a vývoj synchronního reluktančního motoru (SRM) takové úrovně, že se výrobou tohoto typ motoru začaly zabývat i komerční firmy. SRAM lze označit za vylepšenou verzi SRM. Ačkoli jsou si obě topologie velice podobné, geometrie SRAM profituje z použití permanentních magnetů. Permanentní magnety, které jsou vloženy v rotoru, vytvářejí elektromagnetický moment a zároveň zvyšují účinnost motoru, tedy redukuje některé z nevýhod SRM.

2 SYNCHRONNÍ RELUKTANČNÍ ASISTOVANÝ MOTOR

SRAM lze zařadit do kategorie synchronních motorů s vnořenými magnety v rotoru. Na obrázku č. 1 je uvedena SRAM geometrie s popisem základních částí. Motor se skládá ze stacionární části složené z plechů nazývané stator a rotující části, nazývané rotor. Rotor je podobně jako stator složen z plechů, ve kterých jsou vytvořeny oblasti nazývané „bariéry toku“. V těchto bariérách toku jsou vloženy permanentní magnety. Plechy jsou nalisovány na hřídel, která se otáčí a přenáší moment vytvořený ve vzduchové mezeře.



Obrázek 1: Geometrie synchronního reluktančního asistovaného motoru s popisem [1]

V literatuře [2] je uvedeno několik příčin, které mohou způsobit problémy při výrobě motorů s permanentními magnety umístěnými na povrchu rotoru. Od problémů s kvalitou lepidla, přes na-

nesení nerovnoměrné vrstvy lepidla až po dislokaci magnetů, tím vzniku parazitního reluktančního momentu. U geometrie SRAM tyto problémy odpadají, dále se nabízí možnost použití levných feritových magnetů. Magnety jsou vloženy do navržených bariér bez potřeby použití lepidla, tím dosáhneme velkého zjednodušení a zrychlení výroby. Nevýhodou této geometrie avšak zůstává menší mechanická pevnost rotoru, což může činit problém v případě vyšších otáček.

3 MATEMATICKÝ POPIS SRAM

Matematická definice vychází z d-q souřadného systému, přičemž osy jsou orientovány tak, že d-osa leží v místě s největší magnetickou vodivostí a je posunuta za osou q o 90° elektrických (viz. Obrázek 1:). Pro jednotlivé napětí a spřažené toky můžeme napsat rovnice:

$$u_d = R_d \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \cdot \psi_q \quad (1)$$

$$u_q = R_q \cdot i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \cdot \psi_d \quad (2)$$

$$\psi_d = L_d \cdot i_d \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q - \psi_{PM} \quad (4)$$

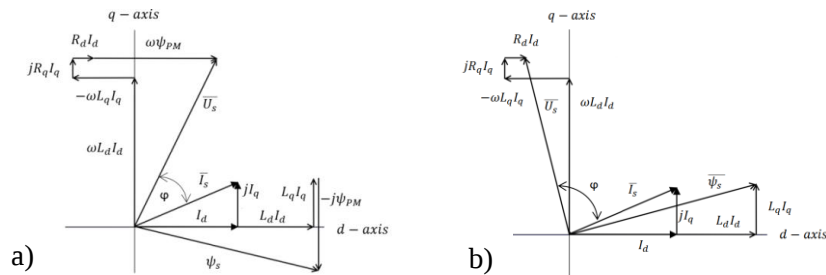
Kde v rovnicích (1-4) veličiny u , R , i , ψ představují napětí, odpor, proud a spřažený tok, dle indexu ose d, či q. Veličina ω je úhlová el. rychlost. Pro elektromagnetický moment motoru platí:

$$M_{mot} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [\psi_{PM} \cdot i_d + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q] \quad (5)$$

Kde podobně jako v rovnicích (1-4) i , L podle indexu představují proud a indukčnost podle indexu v ose d či q. Veličina ψ_{PM} představuje spřažený tok PM a p je počet pólových dvojic motoru.

V rovnici č. 5 je ukázáno, že spřažený tok magnetu ψ_{PM} vytváří elektromagnetický moment. Moment je tvořen i mag. asymetrií (rozdíl mezi L_d a L_q), tato část momentu se nazývá reluktanční.

Při uvažování ustáleného stavu může být vytvořen fázorový diagram. Z porovnání fázorových diagramů je zřejmé, že tok permanentních magnetů zvyšuje účinnost stroje oproti klasickému SRM.



Obrázek 2: Porovnání fázorových diagramů SRAM a) a SRM (b)

Ve fázorových diagramech označují veličiny R , L , I , ψ odpory, indukčnosti, proudy a spřažené toky, veličiny jsou indexem rozlišeny pro osu d a osu q. Přičemž $\overline{U_s}$, $\overline{I_s}$, $\overline{\psi_s}$ označují satorové napětí, proud satoru respektive spřažený tok satoru. Z úhlu φ mezi $\overline{U_s}$, $\overline{I_s}$ se určí účinnost motoru $\cos \varphi$.

4 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH SRAM

Elektromagnetický návrh synchronního reluktančního asistovaného motoru byl proveden v softwaru FEMAG využívající metody konečných prvků (MKP). Skript pro tvorbu parametrického modelu je vytvořen v jazyce LUA. El. model byl při výpočtech buzen proudově. Poté byl zahájen vývoj motoru, požadavkem byl jmenovitý moment 6,7 Nm při otáčkách 2450 ot/min s účinností splňující normu IE4 (>90%). Přičemž vnější průměr satoru je limitován na 135 mm.

Vývoj probíhal způsobem, že byly propočítány různé kombinace počtu pólů a drážek, přičemž ideální poměr počtu pólů k počtu drážek na fázi byl nalezen $q=1,5$ a to hlavně z pohledu zvlnění momentu. Byly provedeny různé parametrické analýzy, které se týkaly počtu bariér toku v rotoru nebo i šířky statorového zubu. Výsledkem byl motor s kombinací počtu drážek statoru a pólů 36/8 a feritovými magnety ve dvou bariérách toku s délkou paketu 68mm.

5 VÝROBA A SROVNÁNÍ PROTOTYPU S MKP MODELEM

Navržený motor byl vyroben a následně v laboratoři proměřen. V následující tabulce č. 1 jsou srovnány naměřené hodnoty s hodnotami vypočtenými pomocí MKP:

Veličina	MKP	Prototyp	Rozdíl v %
Proud odebíraný strojem	4,4 A	4,408 A	0,182 %
Moment	6,748 Nm	5,46 Nm	-19,1 %
Účinnost	91 %	86,2 %	-5,3 %
Účíník	0,746	0,74	-0,8 %
Teplota magnetů	80 °C	119,8 °C	49,8 %

Tabulka 1: Požadavky a naměřené hodnoty na synchronním reluktančním asistovaném motoru

Vyrobený prototyp nedosáhl požadovaného momentu, je nutné zjistit chyby ve výpočtu (konečně prvková síť, materiálové konstanty). Rozdíl momentu mezi vypočteným modelem a prototypem může být způsoben technologickým postupem, jelikož plechy byly vyrobeny laserováním. Laserování zhoršuje magnetické vlastnosti plechů a tím i moment a zvyšuje i ztráty, tím i teplotu magnetů. Důležité bude odhalení příčiny proč je teplota permanentních magnetů tak vysoká oproti předpokladu a to téměř o 40°C (49,8%). Teplota byla porovnána na základě indukovaného napětí stroje, kde byl zjištěn spřažený tok magnetů, ze kterého byla odečtena teplota z datového listu výrobce. Teplota v magnetech pro výpočet v softwaru FEMAG vycházela z předchozích zkušeností při návrhu strojů s vnořenými magnety v rotoru. Jelikož tepelný výpočet nenavrhoval zvýšené teplotě, nebyla návrhová teplota upravována.

6 ZÁVĚR

Tento článek představuje geometrii synchronního reluktančního motoru s jeho výhodami i nevýhodami. Dále byl na základě vytvořeného MKP modelu vyroben prototyp, který byl ověřen měřením. Ačkoli nebyly dosaženy vypočtené hodnoty z MKP modelu, posloužil prototyp pro zpřesnění výpočtů a získání zkušeností, které budou v dalších návrzích bezesporu velice cenné.

PODĚKOVÁNÍ

Autor děkuje doc. Ing. Čestmírovi Ondruškovi, Csc. a Ing. Jiřímu Kurfürstovi, Ph.D. za odborné vedení celé doposud provedené práce v praktické i teoretické oblasti.

REFERENCE

- [1] BARCARO, Massimo. *Design and Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicles*. Padova, 2011. Doctoral thesis. Università degli studi di Padova. Supervisor Ch.Mo Prof. Nicola Bianchi.
- [2] VÍCHA, Adam. *Vlivy výrobních tolerancí permanentních magnetů na synchronní motory s permanentními magnety*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016.