

Modeliranje in analiza električno vzbujanega sinhronskega motorja s cilindričnim rotorjem

Gal Štampihar¹, Danilo Makuc¹, Damijan Miljavec¹, Selma Čorović¹

¹Laboratorij za električne stroje, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, SI1000
e-mail: selma.corovic@fe.uni-lj.si

Modeling and analysis of a cylindrical wound-rotor synchronous motor

Abstract. In this paper analytical and numerical modeling of a cylindrical wound-rotor synchronous motor is presented. A Matlab script was written for calculation of its geometric, electrical and magnetic parameters based on electromagnetic theory of rotational electrical machines. Based on the analytically determined parameters a finite element based FEM numerical model was built. Numerical simulations were compared to the analytical calculations for the modeling approach verification. The final FEM model was used to analyze the profiles of the magnetic flux density in the air gap, induced voltage and torque of the motor.

1 Uvod

V industriji električnih in/ali hibridnih avtomobilov se uporabljajo različne topologije električnih motorjev. Zaradi visoke cene redkih zemelj se čedalje več pozornosti posveča razvoju električnih motorjev brez prisotnosti trajnih magnetov. [1-3]

Cilj naše raziskave je bil konstruirati električno vzbujan sinhronski motor s cilindričnim rotorjem ter predlagati konstrukcijske ukrepe, za doseg ustrežne oblike gostote magnetnega pretoka v zračni reži in inducirane napetosti ter posledično čim bolj gladke statične navorne karakteristike stroja. Konstruiranja motorja smo se lotili analitično in numerično. V prvem delu smo na podlagi elektromagnetne teorije električnih strojev [2,3] izvedli analitične izračune za dane vhodne električne, magnetne in mehanske zahteve in omejitve stroja. Le-te smo v nadaljevanju uporabili za izračun geometrijskih parametrov motorja. Sledilo je numerično modeliranje stroja z metodo končnih elementov v programskem okolju FEMM ter primerjava numeričnih izračunov z analitičnimi. Na končnem dizajnu motorja smo izvedli avtomatizirano parametrično analizo, na podlagi katere smo podali priporočila za doseg čim bolj gladke oblike inducirane napetosti in želene vrednosti navora motorja.

2 Metodologija

2.1. Analitična analiza in vhodni parametri

Zahtevani vhodni podatki stroja skupaj z električnimi in magnetnimi obremenitvami, določenimi glede na priporočila literature [2], so navedeni v tabeli 1. Na podlagi teh vrednosti določimo in/ali izračunamo ostale

električne, magnetne, mehanske in geometrijske parametre, ki opisujejo končni dizajn motorja.

Tabela 1. Vhodni parametri motorja in električne in magnetne obremenitve, določene glede na priporočila literature [2]

	količina	ozn.	vrednost
Maksimalna hitrost		n_{\max}	14000 min ⁻¹
Nazivna hitrost		n_n	7000 min ⁻¹
Napetost vzbujalnega navitja		U_{DC}	600 V
Nazivna moč		P_n	80 kW
Efektivna fazna napetost		U_f	245 V
Število polovih parov		p_p	1
Tokovna obloga		A	150000 A/m
Gostota B v zračni reži		B_{zr}	0,94 T
Faktor delavnosti		$\cos(\varphi)$	0,95
Izkoristek		η	0,9
Faktor navitja		k_{ws1}	0,96
Faktor polnjenja statorja		k_{Cus}	0,5
Faktor polnjenja rotorja		k_{Cur}	0,5
Faktor polnjenja železa		k_{Fe}	0,96
Statorski tok		I_s	122,3 A

V literaturi [2] so navedena priporočila glede električnih, magnetnih in termičnih obremenitev za različne tipe strojev. Obravnavani stroj je dvopolen električno vzbujan sinhronski motor s cilindričnim rotorjem namenjen za vgradnjo v pogon električnega vozila. Ob takšnih predpostavkah privzamemo, da gre za vodno (ali hladilno olje) hlajen električni motor večje gostote moči. Parametrom, ki določajo magnetno obremenitev železa in pa električno obremenitev navitij, določimo ustrezno visoke vrednosti (tabela 1). Električne in magnetne obremenitve stroja v tabeli 1 so povezane predvsem s termično limito stroja in neposredno določajo tudi dimenzije stroja. Takšen stroj mora zato biti vodno hlajen, saj naravna ali prisilna zračna konvekcija ne bi odvajala dovolj toplote, kar bi lahko povzročilo v najboljšem primeru hitrejše staranje izolacije navitja. V obsegu tega članka nismo izvajali termičnih analiz, privzeli smo namreč (posredno s podatki v tabeli 1), da imamo dovolj zmogljiv hladilni sistem, ki lahko ohranja končni motor na primerni delovni temperaturi.

Ko imamo določene parametre glede magnetne in električne obremenitve stroja, se lahko lotimo izračuna geometrijskih parametrov, začeni z izračunom volumna rotorja V v skladu z enačbo (1):

$$P_{meh} = 4 \frac{\pi}{\sqrt{2}} V f \cos(\varphi) \frac{U_f}{E_m} k_w B A \eta \quad (1)$$

kjer P_{meh} predstavlja mehansko moč motorja, V volumen rotorja, f električno frekvenco, $\cos(\varphi)$ faktor delavnosti,

U_f fazno napetost, E_m inducirano napetost, k_w faktor statorskega navitja, B amplitudo gostote magnetnega pretoka v zračni reži, A tokovno oblogo in η izkoristek stroja. Enačbo (1) matematično izpeljemo na podlagi elektromagnetne teorije in priporočil za konstrukcijo rotacijskih električnih strojev [2,3]. Iz volumna rotorja določimo premer in dolžino rotorja. Za obravnavan tip stroja pa smo upoštevali daljšo dolžino rotorja kot premer, saj se rotor v slabljenju polja zavrti do visokih obratov, kar posledično pomeni velike centrifugalne sile na rotor. Takšen ukrep pripomore k nižji vztrajnosti rotorja in posledično boljši dinamiki in odzivnosti stroja. Razmerje med dolžino in premerom rotorja smo v fazi izračunavanja parametrov še nekoliko prilagajali, prav tako vrednost magnetnih obremenitev, kar vpliva na volumen stroja, vse z namenom, da smo dobili celoštevilčno vrednost ovojev posamezne faze statorskega navitja. Dolžina stroja vpliva na površino tuljav skozi katero prehaja magnetni pretok, magnetna obremenitev pa določa amplitudo magnetnega pretoka; zato ta dva parametra neposredno vplivata na število statorskih ovojev, s katerimi želimo doseči inducirano napetost, ki mora biti nekaj procentov nižja od uvodoma zastavljene fazne napetosti, ki jo določa enosmerna napetost pretvornika. Število ovojev izračunamo po enačbi (2) [3]:

$$E_m = 4,44 f N \phi_M k_w \quad (2)$$

kjer je ϕ_M magnetni pretok.

Sledili so še izračuni parametrov statorskih dimenzij, ki so predvsem odvisni od električne obremenitve statorskega navitja oziroma gostote toka v statorskem utoru in pa faktorja polnjenja utora ter od magnetne obremenitve statorskega jedra. Podobno so dimenzije rotorja odvisne od električnih in magnetnih obremenitev rotorja, ter faktorja polnjenja rotorskega vzbujalnega navitja. Po enačbah iz literature [2], ki upoštevajo električne in magnetne obremenitve posameznih delov stroja, izračunamo geometrijske parametre. V tabeli 2 so tabelirani izračunani geometrijski parametri stroja, ki poleg električnih ter magnetnih parametrov služijo kot vhodni podatki za modeliranje v programu FEMM.

Poleg izračunanih parametrov (tabela 2), je treba izbrati še material železnega jedra. Ker gre za električni motor večje gostote moči, smo se odločili za kvalitetnejše železo statorskega in rotorskega jedra in sicer M235-35A. Kvalitetnejši material in tanjše lamele jedra zagotavljajo manjše izgube, kar pripomore k manjšim toplotnim izgubam, kar je pri energijsko gostih strojih pomembno. Ko določimo material železa in imamo znane geometrijske gabarite stroja, pa lahko določimo tudi padec magnetne napetosti zaradi magnetne upornosti vzdolž magnetnih gostotnic. Padec magnetne napetosti θ izračunamo z integriranjem magnetne poljske jakosti H vzdolž poti magnetnih gostotnic:

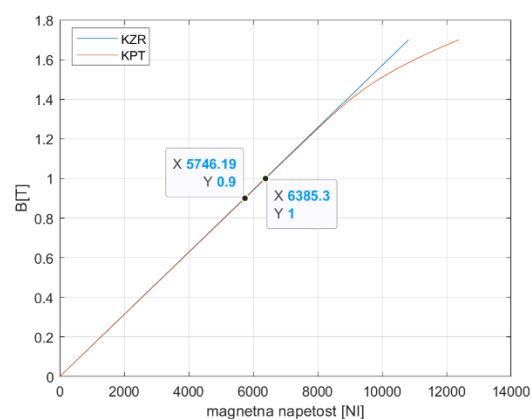
$$\theta = \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (3)$$

Pri računanju smo upoštevali srednje vrednosti poti pretoka magnetnega polja.

Tabela 2. Analitično izračunani izhodni parametri motorja

količina	oznaka	vrednost
Premer statorja	D_s	278,8 mm
Polmer statorja	R_s	139,4 mm
Dolžina motorja (izračun)	L	211,1 mm
Dejanska dolžina motorja	l_m	203,1 mm
Polova delitev	τ_p	209,7 mm
Zračna reža	d_{zr}	4 mm
Dolžina železa paketa	L_{fe}	211,6 mm
Odprtina utora statorja	b_1	2,5 mm
Carterjev faktor	K_c	1,1 mm
Število ovojev ene faze	N	18
Število utorov statorja	Q	18
Širina zoba statorja	b_{ds}	14,2 mm
Širina zoba ob zr. reži	b_{dss}	22,4 mm
Širina utora	b_d	10,1 mm
Višina utora (zoba)	h_s	20,2 mm
Višina jarma statorja	h_{ys}	43,8 mm
Polmer rotorja	R_r	71,3 mm
Premer rotorja	D_r	142,6 mm
Višina jarma rotorja	h_{yr}	41,1 mm
Polmer gredi	R_{gred}	10,6 mm
Višina rotorskega utora	h_{ut}	19,6 mm
Širina rotorskega utora	l_{ut}	6,8 mm

Vrednost magnetne poljske jakosti in posledično padca magnetne napetosti je odvisna od magnetne permeabilnosti materiala, zato je največji padec magnetne napetosti v zračni reži. Kljub temu smo upoštevali tudi padec v železu rotorja in statorja, ter izrisali poteka karakteristike prostega teka (KPT) in zračne reže (KZR) (slika 2).

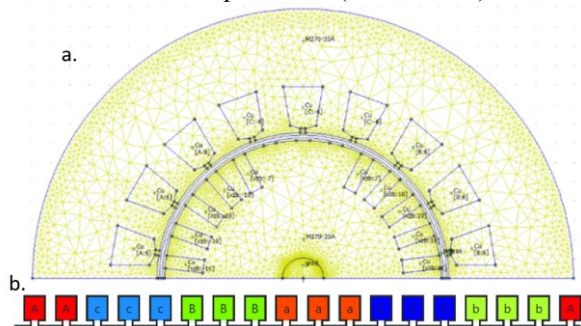


Slika 2. Karakteristiki prostega teka in zračne reže

S pomočjo KPT določimo vrednost magnetnega vzbujanja na rotorju, za dosego zastavljenih magnetnih razmer v zračni reži (gostota magnetnega pretoka $B_{zr} = 0,94$ T, tabela 1). Glede na to zahtevo, smo analitično izračunali 6000 ampernih ovojev magnetnega vzbujanja na rotorju.

2.2 Numerično modeliranje

Numerični model smo zgradili v programu FEMM, ki je zmogljivo odprtokodno orodje za nizko-frekvenčno elektromagnetno ter termično analizo, ki temelji na metodi končnih elementov. Program ima možnost skriptnega programiranja z Lua jezikom, prilagojene Lua skripte pa lahko kličemo z drugimi programskimi orodji. V našem primeru smo uporabili programsko okolje Matlab, v katerem smo napisali skripto, ki nam je avtomatsko zagnala program FEMM ter izrisala geometrijo stroja (slika 2), upoštevajoč predhodno analitično izračunane parametre (tabela 1 in 2).



Slika 2. a. 2D geometrija modela izrisana v programu FEMM z mrežo in b. statorsko navitje (emeter.com)

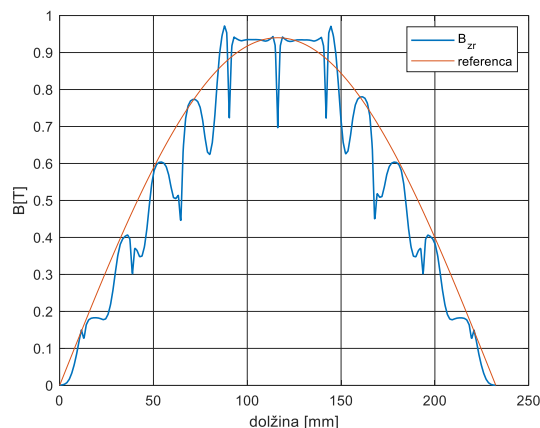
Na sliki 2a je prikazan numerični model motorja, z dodeljenimi materiali, navitji, robnimi pogoji in generirano mrežo končnih elementov. Modelirana je polovica celotnega motorja, kar je najmanjši simetrični del stroja, saj ima motor le en polov par. Z modeliranjem zgolj polovice stroja privarčujemo pri računski zahtevnosti modela (manj končnih elementov) in posledično so simulacije modela krajše. V model smo nato ročno vstavili materiale in sicer; baker v utorih, železo M235-35A v jedro, linearno magnetno železo relativne permeabilnosti 300 za gred in zrak v zračno režo med rotorjem in statorjem. Na rotorju smo definirali električno vezje za vzbujanje z enosmernim tokom, na stator pa smo definirali 3 različna vezja z različnimi usmeritvami tuljav, glede na izbrano statorsko navitje za število utorov (slika 2b). Modelu smo prav tako definirali Dirichletov robni pogoj konstantnega magnetnega potenciala ($A = 0$) na obodu statorja, na meji med rotorjem in statorjem pa smo definirali antiperiodična robna pogoja zračne reže (vmesni pas, kjer FEMM ne generira mreže končnih elementov, zato da je mreža končnih elementov v zračni reži pravilno razporejena). Na robu modela smo definirali antiperiodične robne pogoje, saj se navidezno, čez simetralo stroja nadaljuje model z nasprotnim magnetnim polom ter nasprotno usmerjenostjo tuljav.

3 Rezultati in razprava

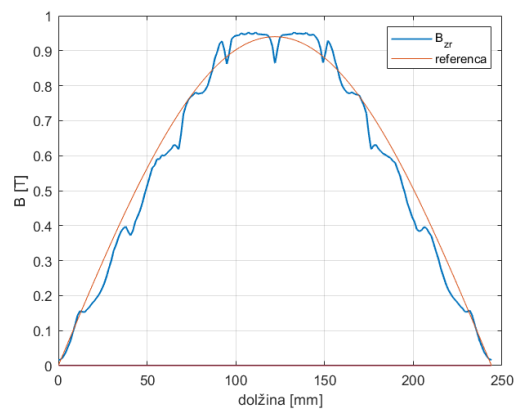
Numerični model smo uporabili za analizo gostote magnetnega pretoka v zračni reži, inducirane napetosti in navora. Na sliki 3 je prikazan potek gostote magnetnega pretoka vzdolž zračne reže. Za doseg vrednosti $B_{zr} = 0,94$ T, smo morali v modelu rotorsko vzbujanje še nekoliko povečati, in sicer iz 6000 ampernih ovojev na 6865. Na sliki 3 opazimo, da v zračni reži $d_{zr} = 4$ mm

dosežemo željeno vrednost 0,94 T, vendar pa oblika signala precej odstopa od referenčnega sinusnega poteka (rdeča krivulja). Razlog za to so t.i. utorski in drugi harmoniki, ki so posledica geometrije realnega stroja, zaradi česar zračna reža med rotorjem in statorjem ni enakomerna. Poleg statorja imamo uture še na rotorju, zato so utorski harmoniki še bolj izraziti. Takšen signal B povzroča dodatne izgube, ki jih ni možno popolnoma izničiti.

Potek B v zračni reži lahko do neke mere zgladimo, če povečamo zračno režo, s čimer omilimo reakcijo indukta. Na sliki 4 je prikazan potek B pri povečani zračni reži na $d_{zr} = 9,47$ mm.



Slika 3. B vzdolž zračne reže širine $d_{zr} = 4$ mm (referenca pomeni idealni sinusni signal)

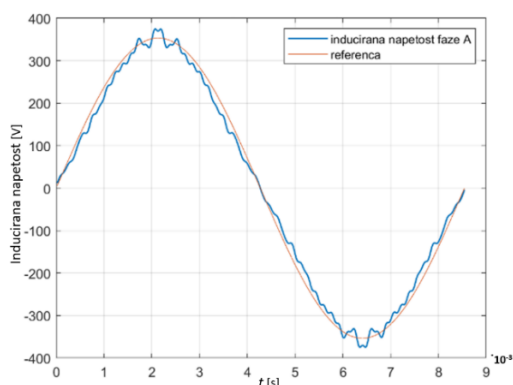


Slika 4. B vzdolž povečane zračne reže širine $d_{zr} = 9,57$ mm

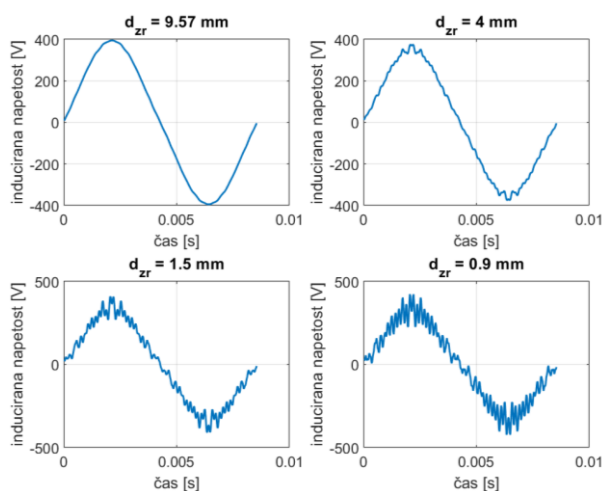
Opazimo, da se pri večji zračni reži potek B občutno zgladi, kar je pozitiven ukrep, ki bi lahko prispeval tudi k izboljšanju izkoristka stroja. Vendar pa bi pri takšni geometriji morali občutno povečati tudi vzbujanje rotorja, da bi dosegli željeno amplitudo polja v zračni reži, s tem pa bi morali precej povečati tudi dimenzije stroja.

Izrisali smo tudi potek inducirane fazne napetosti, ki je prikazana na sliki 5. Potek inducirane napetosti smo dobili z iterativnim izvajanjem simulacij, kjer smo za vsak korak inkrementalno zavrteli pozicijo rotorja glede na stator za eno električno periodo inducirane napetosti. Postopek smo izvedli s pomočjo Matlab skripte, s katero smo avtomatizirali proces izračuna. Slika 5 kaže, da inducirana napetost zaradi neidealne geometrije ni sinusna vendar jo lahko izboljšamo s povečanjem širine

zračne reže. Na sliki 6 so prikazane izračunane inducirane napetosti za različne širine zračnih rež.



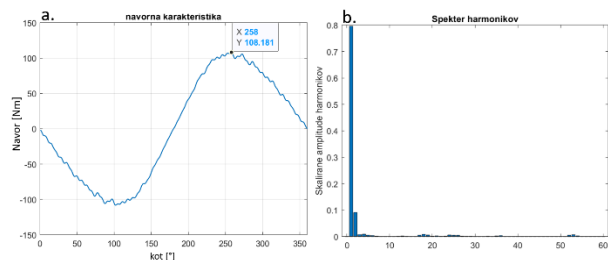
Slika 5. Inducirana napetost pri $d_{zr}=4$ mm in 7000 min^{-1}



Slika 6. Primerjava izračunanih faznih induciranih napetosti pri štirih različnih širinah zračne reže d_{zr}

Velikost zračne reže je pogojena tudi s končnim napajanjem stroja ter z zahtevami nazivnimi vrednostmi. V praksi se takšni tipi strojev uporabljajo predvsem kot sinhronski generatorji in imajo velike zračne reže, s čimer omilijo vpliv utorskih harmonikov in omrežju zagotavljajo ustrezno kvaliteten sinusni signal napetosti. To lastnost smo upoštevali tudi pri konstruiranju električno vzbujanega sinhronskega stroja v motorskem režimu delovanja.

V nadaljevanju smo preverili ali model motorja dosega uvodoma zastavljeno moč in navor, slika 7.



Slika 7. a. Statična navorna karakteristika pri $d_{zr} = 4$ mm in b. frekvenčni spekter karakteristike.

Na sliki 7a vidimo, da je dosežena amplituda navora 108 Nm. Naš model se je torej uspešno približal uvodoma zastavljenemu cilju (tabela 1), saj za doseg zastavljene moči 80 kW pri 7000 min^{-1} , potrebujemo 110 Nm. Na sliki 7b je prikazan spekter harmonikov navorne karakteristike. Poleg višjih harmonikov, ki nam zmanjšujejo vrednost uporabnega navora, na spektru harmonikov opazimo tudi 2. harmonik, ki v navoru predstavlja reluktančni navor, saj je rotor rahlo izražen zaradi odsotnosti treh rotorskih utorov v vzdolžni osi rotorja (slika 2a) [3]. V zadnjem koraku smo analitično in numerično izračunali še induktivnosti modela (tabela 3). Slednje smo izračunali preko zamrznjene permeabilnosti in predstavljajo vzdolžno L_d in prečno L_q induktivnost pri nazivno obremenjenem stroju. V spektru navorne karakteristike (slika 7b) smo opazili delno izraženost rotorja, kar potrjuje tudi izračun induktivnosti v tabeli 3 ($L_d > L_q$).

Tabela 3. Vrednosti vzdolžne L_d in prečne L_q induktivnosti

	L_d	L_q	enota
analitično	2,595	/	mH
numerično	2,353	2,256	mH

4 Zaključki

V okviru študije smo napisali Matlab skripto, ki predstavlja programsko orodje, s pomočjo katerega na podlagi zahtevanih vhodnih parametrov analitično oblikujemo sinhronski motor s cilindričnim navitim rotorjem. Analitične izračune smo v drugem delu študije uporabili kot vhodne podatke za 2D numerično modeliranje in nadaljnjo analizo stroja. V ta namen smo Matlab skripto razširili z uporabo programskega orodja FEMM, s katero smo avtomatizirali parametrični izris geometrije motorja in izračunali B v zračni reži, inducirano napetost ter navor. Izvedli smo numerične simulacije in iterativne parametrične prelete ter izračunali karakteristike motorja. Z numeričnimi izračuni smo preverili analitične izračune in uvodoma zastavljene zahteve motorja.

Zahvala

Raziskavo je finančno podprla Javna agencija za znanstveno-raziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS šifra L2-50084).

Literatura

- [1] Graffeo, Federica, et al. "Cylindrical wound-rotor synchronous machines for traction applications." *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Vol. 1. IEEE, 2020.
- [2] Pyrhonen, Juha, Tapani Jokinen, and Valeria Hrabovcova. *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons, 2013.
- [3] D. Miljavec and P. Jereb, *Električni stroji: temeljna znanja*. Fakulteta za elektrotehniko, 2023.