

Magnetno modeliranje gredi v sinhronskih strojih z električnim vzbujanjem

Mario Vukotić, Roman Manko, Urban Rupnik, Alen Alić, Damijan Miljavec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: mario.vukotic@fe.uni-lj.si

Magnetic modeling of shaft in an electrically-excited synchronous machine

Abstract. *There are two different approaches for 2D magnetic modeling of shaft in electrically-excited synchronous machine. The first one takes its magnetic properties into account, while the other one does not. Instead, the shaft is modeled as air region with unity relative permeability. This can lead to magnetic over-dimensioning of the machine, particularly the machines with two magnetic poles and cylindrical rotor. The 2D finite element method simulations were performed in order to demonstrate the necessity of inclusion the shaft magnetic properties. This is necessary, even though the shaft materials do not achieve the same performance as the properties of the stator and rotor ferromagnetic cores.*

1 Uvod

Modeliranje električnih strojev z metodo končnih elementov omogoča natančne simulacije, ki nam dajejo vpogled v obratovanje stroja. Z modernimi orodji je med drugim možno izračunati električna in magnetna stanja stroja. Predvsem za izračun slednjih je zaradi nelinearnih lastnosti potrebno v simulaciji natančno opisati lastnosti feromagnetnih materialov. Stator in rotor, navadno feromagnetna, sta ključna konstrukcijska elementa rotacijskega električnega stroja. Za gred, kot del rotorja, se v simulacijah velikokrat predpostavi, da ni del glavnega magnetnega kroga, čeprav ima, razen v izjemnih primerih, prav tako feromagnetne lastnosti [1].

Predmet analize v tem članku je vpliv feromagnetnih lastnosti gredi na obratovanje sinhronskega stroja z električnim vzbujanjem (ang. *Electrically Excited Synchronous Machine*, EESM), t. j. vzbujalnim navitjem na rotorju. Ti imajo v primerjavi s stroji s trajnimi magneti praviloma manj magnetnih polov, saj je potrebno vzbujanje magnetnega kroga doseči z električnim tokom v rotorskih tuljavah. Le-te za enako magnetno vzbujanje namreč potrebujejo več prostora na rotorju kot trajni magneti.

Pri analizi smo se osredotočili na izvedbo EESM s cilindričnim rotorjem z dvema magnetnima poloma. Pri dveh magnetnih polih je namreč pri danem premeru zračne reže polova delitev največja. Posledično sta potrebni širini statorskega in rotorskega jarma veliki. Statorski jarem je možno širiti navzven, medtem ko je rotorski jarem navznoter omejen z gredjo, ki ima predpisan premer za prenos navora.

V literaturi se gred v simulacijah obratovanja asinhronskih strojev modelira kot področje s permeabilnostjo vakuumu (zrak) [2, 3]. V [4] je bila narejena podobna analiza vpliva materiala gredi v asinhronskem stroju. Tam je na rotorju prisotno vrtilno magnetno polje s frekvenco slipa, ki je sicer precej manjša od osnovne obratovalne frekvence, a vseeno povzroča vrtilne toke v masivni gredi. Ti toki vplivajo na porazdelitev magnetnega polja v gredi.

Podobno kot pri modeliranju asinhronskih strojev se tudi pri modeliranju sinhronskih strojev s trajnimi magneti na rotorju gred modelira kot zrak [5].

Pristopi pri modeliranju materialnih lastnosti gredi EESM so različni. Pri EESM z izraženimi poli na rotorju se gred modelira kot zrak [6, 7]. Razlog za to je število magnetnih polov EESM z izraženim rotorjem, ki je večje od 2 (od 4 do 8 magnetnih polov za stroje majhnih in srednjih moči). Rotorski jarem je zato lahko tanjši in kljub temu vodi celoten magnetni pretok, ne da bi bil v nasičenju. Lahko trdimo, da je vpliv materiala gredi na obratovalne lastnosti stroja zanemarljiv.

Pri modeliranju EESM s cilindričnim rotorjem je gred ravno tako lahko obravnavana kot zrak, v kolikor gre za mnogopolni rotor (npr. 6 polov v [8]). Ravno nasprotno pa v [9] gredi kot samostojnega konstrukcijskega elementa v dvopolnem cilindričnem EESM sploh ni, ampak je del lameliranega rotorskega paketa. Tak pristop je tudi eden od primerov v tej študiji, kjer smo za material gredi prevzeli elektro pločevino FLU_400_50A iz programa Altair Flux [10].

2 Metodologija

Pri 2D modeliranju EESM so bila upoštevana priporočila za magnetno oblikovanje električnih strojev [11, 12]. Pri analizi vpliva magnetnih lastnosti gredi smo se osredotočili predvsem na vpliv uporabljenega materiala v modelu na obratovalne lastnosti EESM. Lastnosti materiala ni bilo na voljo, zato smo jih sintetizirali glede na referenčni material FLU_M400_50A. Sintetične nelinearne karakteristike feromagnetnih materialov so bile opisane z analitično enačbo (1).

$$\mu_r(B) = 1 + \frac{A_1}{e^{B^4}} + \frac{A_2}{e^{B^2}} \quad (1)$$

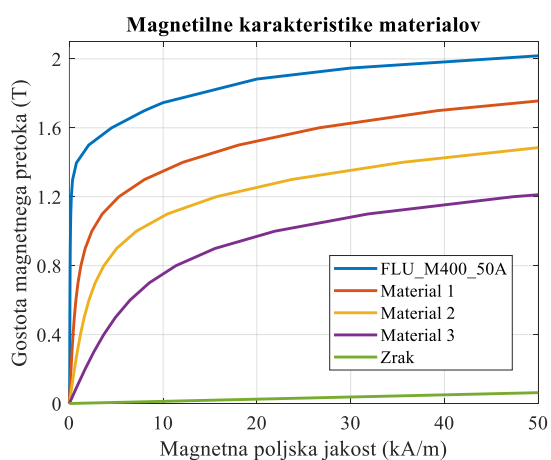
Odvisnost gostote magnetnega pretoka B od magnetne poljske jakosti H , upoštevajoč tako izračunano relativno permeabilnost μ_r , je prikazana na sliki 1. Koeficiente A_1 in A_2 smo določili tako, da je

razlika med gostotami magnetnega pretoka B pri magnetni poljski jakosti $H = 50 \text{ kA/m}$ za različne materiale približno enaka. Pri tem naj gostota magnetnega pretoka najslabšega materiala (Material 3) ne bo manjša od 1,2 T. Vrednosti koeficientov so podane v tabeli 1.

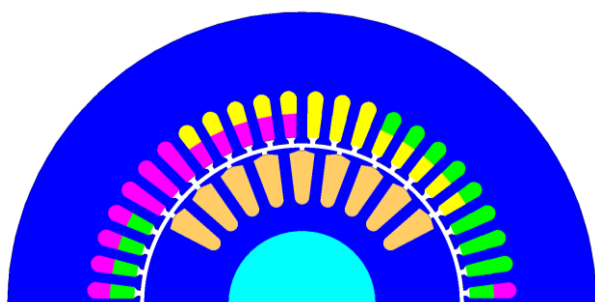
Geometrija stroja (slika 2) je bila povzeta iz kataloga Kienle+Spiess za asinhronske stroje. Velikost okvirja je 132 S, nazivna moč stroja pa 5,5 kW. Zunanji premer statorja je 200 mm, premer statorske izvrtine je 110 mm, premer gredi pa 50 mm. Aksialna dolžina aktivnega dela znaša 90 mm. Gostoti toka v statorskem in rotorskem navitju sta $7,5 \text{ A/mm}^2$. Statorsko navitje je dvoplastno z 8 utori na pol in fazo, pri čemer ima vsaka tuljava 8 ovojev. Posamezne faze navitja so na sliki 2 označene z različnimi barvami. Rotorsko navitje je enoplastno in sestavljeno iz 9 tuljav, vsaka s 50 ovoji, ki so vstavljene v 18 rotorskih utovorov.

Tabela 1: Vrednosti koeficientov za opis relativne permeabilnosti feromagnetnih materialov.

| Material | A_1 | A_2 |
|------------|-------|-------|
| Material 1 | 300 | 600 |
| Material 2 | 100 | 200 |
| Material 3 | 32 | 64 |

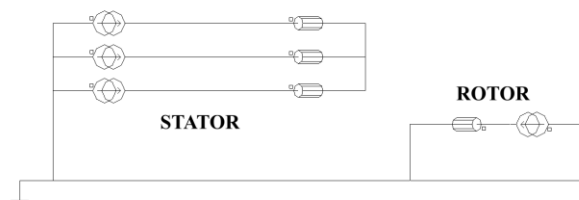


Slika 1: Magnetilne $B-H$ karakteristike materialov, uporabljenih v simulacijah.



Slika 2: Model enega magnetnega pola EESM, modeliranega v programu Altair Flux 2D.

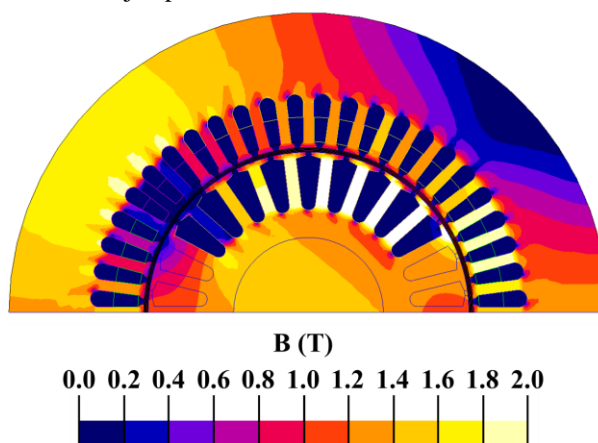
V programu Altair Flux 2D smo izvedli tranzientne (časovno odvisne) simulacije za različne materiale gredi na sliki 1. Vsiljena hitrost vrtenja je bila pri vseh $n = 3000 \text{ min}^{-1}$, kar je pri dvopolnem stroju ustreza električni frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$. Čas simulacije je bil 20 ms, kar je enako eni periodi. Tri fazna navitja so bila simetrično napajana s tremi izmeničnimi tokovnimi viri, rotorsko navitje pa z enosmernim tokovnim virom (slika 3). V simulacijah smo opazovali odvisnost fazne inducirane napetosti v prostem teku E_0 (osnovna harmonska komponenta) od izbranega materiala. Nadalje smo stroj obremenili z nazivnim efektivnim tokom ($I = 12 \text{ A}$), ki smo ga vsiljevali v prečni magnetni smeri (magnetna q os). Pri tem smo opazovali odvisnost amplitude fazne napetosti U (osnovna harmonska komponenta), faktor delavnosti $\cos\varphi$, ki smo izračunali iz faznega zamika φ med osnovnima harmonskima komponentama toka I in napetosti U , ter povprečen mehanski navor T in moč na gredi P .



Slika 3: Električno vezje za tokovno napajanje navitij EESM v programu Altair Flux 2D.

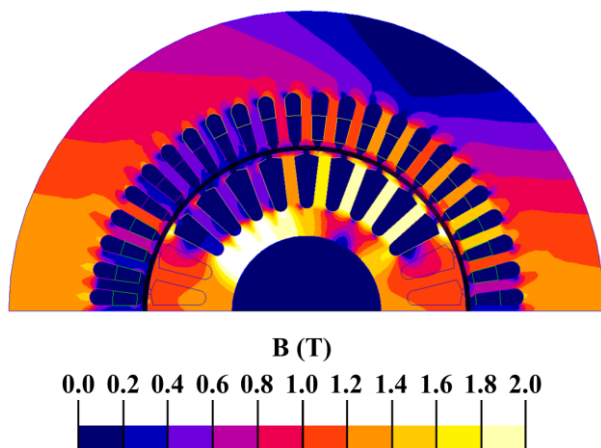
3 Rezultati

Za vsak material gredi s slike 1 sta bila narejena dva časovno odvisna izračuna. Prvi izračun je bil v neobremenjenem stanju (prosti tek), drugi pa pri nazivni tokovni obremenitvi v q osi. Slednji predstavlja magnetno bolj obremenjeno stanje v stroju. Na slikah 4 in 5 sta prikazani porazdelitvi gostote magnetnega pretoka B v stroju pri nazivni tokovni obremenitvi. Gre za dva skrajna primera.



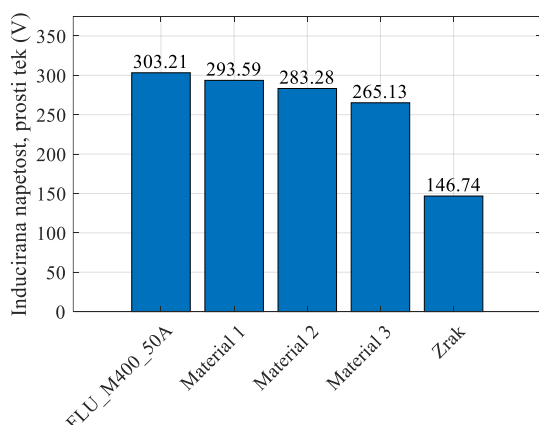
Slika 4: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka v stroju, če je material gredi FLU_M400_50A.

V prvem primeru je material gredi elektro pločevina FLU_M400_50A, v drugem pa zrak oz. vakuum. V resnici pa je material gredi jeklo, katerega $B-H$ karakteristika ni bila na voljo. Kljub tem lahko zanjo predpostavimo, da ima magnetne lastnosti boljše od zraka, vendar slabše od elektro pločevine.



Slika 5: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka v stroju, če je gred neferomagnetna (zrak).

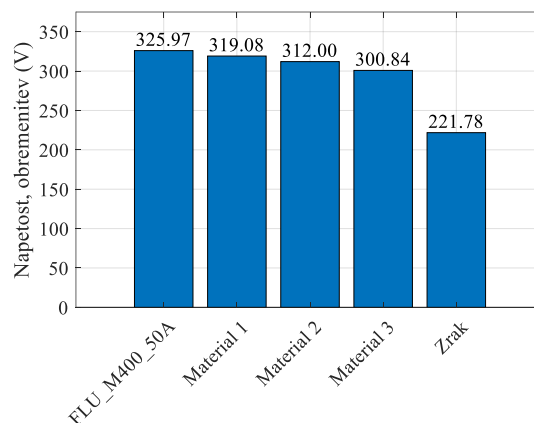
Na sliki 6 so prikazani rezultati simulacij induciranih napetosti E_0 v prostem teku pri vrtilni hitrosti $n = 3000 \text{ min}^{-1}$. Vzbujaalni tok je znašal $I_v = 5 \text{ A}$, njegova vrednost pa je bila določena tako, da je amplituda osnovne harmonske komponente gostote magnetnega pretoka v zračni reži $B_1 = 0,85 \text{ T}$ ob predpostavljene materialu gredi FLU_M400_50A. Prikazane vrednosti na sliki 6 so amplitude osnovne harmonske komponente napetosti. Inducirana napetost pri gredi, kjer smo predpostavili zrak ($\mu_r = 1$), je več kot za polovico manjša v primerjavi z gredjo iz FLU_M400_50A. Razlog za to leži v navidezno pretankem rotorskem jarmu, ki zaradi nemagnetne gredi preide v globoko nasičenje.



Slika 6: Primerjava amplitud faznih induciranih napetosti E_0 v prostem teku pri $n = 3000 \text{ min}^{-1}$.

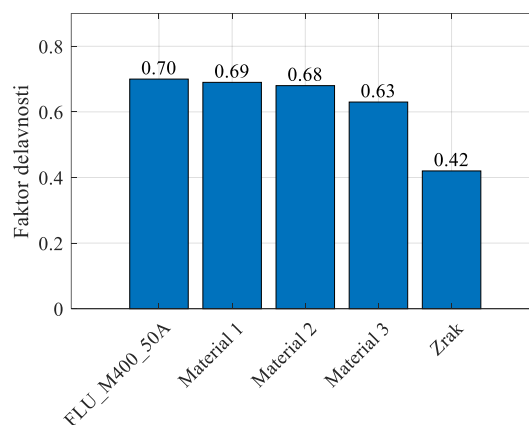
Slika 7 prikazuje amplitudne vrednosti osnovnih harmonskih komponent napetosti U pri efektivni tokovni obremenitvi $I = 12 \text{ A}$. Napetost U se relativno glede na inducirano napetost E_0 najbolj poveča v zadnjem primeru (zrak, $\mu_r = 1$), in sicer za 51,1 %. V

ostalih primerih je znaša relativno povečanje med 7,5 % in 13,5 %.



Slika 7: Primerjava amplitud faznih napetosti U pri nazivni tokovni obremenitvi pri $n = 3000 \text{ min}^{-1}$.

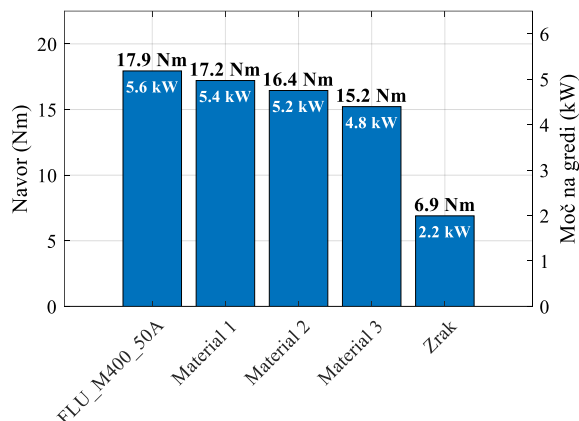
Rezultati za faktor delavnosti $\cos\phi$ so podani na grafu na sliki 8. V kolikor je gred feromagnetna, znaša vrednost faktorja delavnosti od 0,63 do 0,70. V primeru, da je gred neferomagnetna, pa znaša njegova vrednost 0,42.



Slika 8: Primerjava faktorjev delavnosti $\cos\phi$ pri nazivni tokovni obremenitvi pri $n = 3000 \text{ min}^{-1}$.

Elektromagnetni navor T z različnimi materiali na gredi je prikazan na sliki 9. Navor s slabšanjem feromagnetnih lastnosti gredi zvezno pada. Ko predpostavimo, da je material gredi zrak, pa se navor drastično zmanjša na 38 % do 45 % vrednosti navorov pri feromagnetnih gredeh.

Če elektromagnetne napore pomnožimo s hitrostjo rotorja, dobimo mehanske moči P (slika 9, desno). Izračunane moči se tako kot napetosti, faktorji delavnosti ter navor pri neferomagnetni gredi (zrak) močno razlikujejo od ostalih rezultatov, kjer smo modelirali gredi z različnimi feromagnetnimi lastnostmi. Ti se med seboj razlikujejo za največ 15 % (razlika med v navoru in moči Materialom 3 in FLU_M400_50A), medtem ko se pri neferomagnetni gredi navor oz. moč več kot prepolovi. Ob predpostavki, da je gred neferomagnetna, tako ne bi pravilno modelirali sinhronskega stroja, rezultati magnetnih stanj pa ne bi bili skladni z meritvami na realnem stroju.



Slika 9: Primerjava navorov T (srednja vrednost) ter moči na gredi P pri nazivni tokovni obremenitvi pri $n = 3000 \text{ min}^{-1}$.

4 Zaključek

V članku je predstavljena analiza vpliva materiala gredi na obratovalne lastnosti dvopolnega EESM s cilindričnim rotorjem. Zaradi velike polove delitve in posledično količine magnetnega pretoka, ki ga je potrebno voditi skozi rotor, ima material gredi ključno vlogo pri magnetni razbremenitvi rotorskega jarma. Narejena je bila kvantitativna primerjava različnih materialov gredi – od elektro pločevine do zraka, ki predstavljata dve skrajnosti, ter treh vmesnih feromagnetnih materialov s sintetično nelinearno magnetilno karakteristiko $B-H$. Ugotovili smo, da pri dvopolnem EESM s cilindričnim rotorjem ne smemo modelirati gredi kot nemagnetni material (npr. zrak), če je v resnici feromagnetna. Četudi ne poznamo točne $B-H$ karakteristike, je vseeno bolje sintetizirati karakteristiko, ki je nekoliko slabša od elektro pločevine, kot pa predpostaviti, da ima gred permeabilnost vakuumu oz. zraka.

Zahvala

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

Literatura

- [1] M. Vukotić, A. Alić, U. Rupnik, J. Burja in D. Miljavec, „The influence of material electromagnetic properties to the electric motor performance“, v *METAL*, Brno, 2022.
- [2] M. V. Cistelean, L. M. Melcescu, H. B. in M. Popescu, "Induction motors with changeable pole windings in the ratio 1:4," v International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Carigrad, 2011.

[3] S. Mallampalli, Z. Q. Zhu, J. C. Mipo in S. Personnaz, "Six-Phase Pole-Changing Winding Induction Machines With Improved Performance," v *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36 (1), pp. 534-546, 2021.

[4] M. Dems, K. Komez, "Effect of the shaft on the distribution of the magnetic field for two and four-pole induction motors", v International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, 2016.

[5] S. Mukundan, H. Dhulipati, Z. Li, M. S. Toulabi, J. Tjong in N. C. Kar, „Coupled Magnetic Circuit-Based Design of an IPMSM for Reduction of Circulating Currents in Asymmetrical Star-Delta Windings“ v *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8 (2), pp. 2971-2984, 2022.

[6] I. Jeong, B. -G. Gu, J. Kim, K. Nam in Y. Kim, "Inductance Estimation of Electrically Excited Synchronous Motor via Polynomial Approximations by Least Square Method", v *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51 (2), pp. 1526-1537, 2015.

[7] S. S. H. Bukhari, G. J. Sirewal, M. Ayub in J. -S. Ro, "A New Small-Scale Self-Excited Wound Rotor Synchronous Motor Topology," v *IEEE Transactions on Magnetics*, 57 (2), pp. 1-5, 2021.

[8] F. Graffeo, S. Vaschetto, M. Cossale, M. Kerschbaumer, E. C. Bortoni in A. Cavagnino, "Cylindrical Wound-Rotor Synchronous Machines for Traction Applications", v International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, 2020.

[9] D. Hiramatsu et al., "A Study on Rotor Surface Losses in Small-to-Medium Cylindrical Synchronous Machine", v *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27 (4), pp. 813-821, 2012.

[10] <https://altair.com/flux>. Dostopano: 26. 6. 2024.

[11] D. Miljavec in P. Jereb, *Električni stroji - temeljna znanja*, 2017.

[12] J. Pyrhönen, T. Jokinen in V. Hrabovcová, *Design of Rotating Electrical Machines*, Wiley-Blackwell, 2008.