

UTICAJ ZASIĆENJA NA INDUKTIVNOSTI SINHRONE MAŠINE SA STALNIM MAGNETIMA**IMPACT OF SATURATION ON THE INDUCTANCES OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE**Miljana Naumov, Dejan Jerkan, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je obrađen linearni magnetski model sinhronne mašine sa stalnim magnetima i naznačeni su njegovi nedostaci. Zatim je predstavljen nelinearni magnetski model čije induktivnosti nisu konstantne vrednosti, već zavise od struje, a u detaljnijim razmatranjima se uvažavaju i sprežne induktivnosti. Ove vrednosti induktivnosti se dobijaju pomoću metode zamrznutih permeabilnosti koja je implementirana u sklopu numeričkih FEA simulacija. Na kraju rada su priloženi rezultati pomenutih simulacija.

Ključne reči: Metoda konačnih elemenata, sinhrona mašina sa utisnutim stalnim magnetima, induktivnosti

Abstract - The paper addresses the linear magnetic model of a permanent magnet synchronous machine and highlights its shortcomings. Then, a nonlinear magnetic model is presented, where the inductances are not constant values but depend on the current, and in more detailed analyses, mutual inductances are also considered. These inductance values are obtained using the frozen permeability method, which is implemented within numerical FEA simulations. The results of the mentioned simulations are provided at the end of the paper.

Keywords: Finite Element Method, Internal Permanent Magnet Synchronous Machine, Inductances

1. Uvod

U ovom radu biće obrađen tip sinhronne mašine sa utisnutim stalnim magnetima (engl. *IPMSM*). Utisnut stalni magneti značajno smanjuju količinu gvožđa u podužnoj osi što čini da je induktivnost po podužnoj osi L_d mnogo manja od induktivnosti po poprečnoj osi dq koordinatnog sistema.

Ovim se kod *IPMSM* javlja izražena zavisnost induktivnosti statora od ugla rotora koja dovodi do pojave relativno velikog reluktantnog momenta. Posledica ove konstrukcijske osobine je da *IPMSM* generiše dva tipa momenta (osnovni i reluktantni).

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada, čiji mentor je bio dr Dejan Jerkan, vanr. prof.

Upravljanje *IPMSM* zbog mogućnosti razvijanja reluktantnog momenta unosi dodatni zadatak kontrolnom sistemu u vidu proračuna optimalnog ugla vektora struje statora u odnosu na osu magneta za koji se dobija maksimalni odnos razvijenog momenta i amplitude struje (*MTPA*, *MAPT* algoritmi). Da bi se pomenuti algoritmi efikasno implementirali ključne su tačne vrednosti induktivnosti koje će biti dobijene pomoću metode konačnih elemenata (engl. *Finite Element Analysis - FEA*). U većini slučajeva vrednosti ovih induktivnosti se uzimaju kao konstantne, međutim na kraju ovog rada biće prikazano da one to ipak nisu. Kada se uvaži promenljivost induktivnosti, dobija se kvalitetnija kontrola kojom se postižu maksimalne performanse i doprinosi većoj efikasnosti.

2. Linearni magnetski model IPMSM

Jednostavnost i upotrebljivost linearnog magnetskog modela preko konstantnih parametara je široko rasprostranjena, dok je definiciona forma kojom je uobičajno dat:

$$\psi_{sd} = L_d \cdot i_{sd} + \psi_{PM} \quad (1)$$

$$\psi_{sq} = L_q \cdot i_{sq} \quad (2)$$

gde su:

L_d, L_q – sinhronne rasipne induktivnosti po podužnoj d i poprečnoj q osi namotaja statora, respektivno;
 ψ_{PM} – fluksni obuhvat uzrokovan postojanjem stalnih magneta na rotoru.

Konstantni parametri induktivnosti u jednačinama (1) i (2) ne uvažavaju efekte zasićenja magnetskog kola mašine koji se neminovno javljaju pri većim strujama opterećenja, tako da ovakav model može biti prihvatljivo tačan u oblasti malih opterećenja, na primer kod pogona električnog vozila.

Model postaje precizniji kada se uvažava međuinduktivnosti koje su posledica činjenice da i ψ_{sd} i ψ_{sq} dele isti magnetni put preko jarma mašine.

$$\psi_{sd} = L_d \cdot i_{sd} + L_{dq} \cdot i_{sq} + \psi_{PM} \quad (3)$$

$$\psi_{sq} = L_q \cdot i_{sq} + L_{qd} \cdot i_{sd} \quad (4)$$

gde su:

L_{dq}, L_{qd} – međusobne induktivnosti po podužnoj d i poprečnoj q osi namotaja statora, respektivno.

Dodatno model može uvažiti i pojavu fluksnog obuhvata stalnih magneta u poprečnoj, q osi. Iako je ovo neuobičajna pojava koja se retko modeluje, ona postoji takođe usled međusobne uvezanosti magnetnih osa. Tada se prethodni model može dodatno modifikovati kao:

$$\psi_{sd} = L_d \cdot i_{sd} + L_{dq} \cdot i_{sq} + \psi_{PMd} \quad (5)$$

$$\psi_{sq} = L_q \cdot i_{sq} + L_{qd} \cdot i_{sd} + \psi_{PMq} \quad (6)$$

gde su:

ψ_{PMd} – fluksni obuhvat u d osi uzrokovan postojanjem stalnih magneta na rotoru;

ψ_{PMq} – fluksni obuhvat u q osi uzrokovan postojanjem stalnih magneta na rotoru.

3. Nelinearni magnetski model *IPMSM*

Kako bi se uvažio uticaj efekata saturacije magnetskog kola mašine moguće je modifikovati prethodno definisane linearne magnetske modele tako da se dobijaju sledeći oblici modela:

$$\psi_{sd} = L_d(i_{sd}, i_{sq}) \cdot i_{sd} + \psi_{PM}(i_{sd}, i_{sq}) \quad (7)$$

$$\psi_{sq} = L_q(i_{sd}, i_{sq}) \cdot i_{sq}, \quad (8)$$

koji sad predstavlja nelinearan model koji uvažava promenu sinhronu rasipne induktivnosti po d i q osi namotaja statora usled efekata samosaturacije i međusaturacije usled promenljivih vrednosti struja statora (i_{sd}, i_{sq}). Konačan nelinearan magnetski model *IPMSM* ima oblik:

$$\psi_{sd} = L_d(i_{sd}, i_{sq}) \cdot i_{sd} + L_{dq}(i_{sd}, i_{sq}) \cdot i_{sq} + \psi_{PMd}(i_{sd}, i_{sq}) \quad (9)$$

$$\psi_{sq} = L_q(i_{sd}, i_{sq}) \cdot i_{sq} + L_{qd}(i_{sd}, i_{sq}) \cdot i_{sd} + \psi_{PMq}(i_{sd}, i_{sq}) \quad (10)$$

4. Metoda zamrznutih permeabilnosti

Glavni problem koji rešava ova specijalna metoda vezan je za nelinearnost magnetskih kola električnih mašina, odnosno nedostatak dovoljno efikasnih i kavalitetnih metoda za kvantifikovanje doprinosa različitih izvora magnetskog polja u okviru rezultatnog magnetskog polja mašine. Pomenuto se takođe odnosi na

nelinearne funkcije magnetskih modela *IPMSM*, kao što su fluksni obuhvati prikazani u jednačinama (7) i (8). Konvencionalni magnetski modeli koriste jednoznačno razdvajanje ekscitacionih komponenata fluksnih obuhvata gde se metoda superpozicije primenjuje na nelinearan sistem, što zasigurno dovodi do nedovoljno tačnih magnetskih modela.

Metoda zamrznutih permeabilnosti se koristi u numeričkim *FEA* simulacijama radi razdvajanja doprinosa različitih izvora pobude unutar ukupne (rezultantne) vrednosti fluksnog obuhvata električne mašine. Osnovna ideja za primenu tehnike zamrznutih permeabilnosti u svrhu dobijanja visoko preciznog magnetskog modela *IPMSM* biće objašnjena u nastavku.

Ova metoda koristi se u svrhu dobijanja stvarnih zavisnosti induktivnosti od struja, kroz numeričke proračune kojima se pokriva široki opseg mogućih radnih režima mašine na kojoj se metoda primenjuje. U ovu svrhu, algoritam prvo implementira nelinearnu *FEA* simulaciju sa zadatim vrednostima dq struja u kojoj sve ekscitacije u mašini deluju istovremeno. Rezultat opisane simulacije jeste raspodela magnetskog polja identična onoj u realnim pogonskim uslovima mašine sa istim zadatim vrednostima dq struja. Nakon toga, naredni i ključni korak metode zamrznutih permeabilnosti sastoji se u čuvanju ("zamrzavanju") vrednosti relativne magnetske permeabilnosti svakog konačnog elementa u okviru celokupnog magnetskog kola *IPMSM*.

Magnetsko kolo sa zamrznutim permeabilnostima modelovano softverom na bazi analize konačnih elemenata sada postaje magnetski linearno, pa se doprinosi različitih pobuda unutar mašine mogu posmatrati odvojeno.

Potom su po algoritmu izvedene dve nezavisne *FEA* simulacije na linearnom modelu magnetskog kola. U prvoj simulaciji posmatra se samo doprinos dq struja tako što se uticaj stalnih magneta zanemaruje zamenjivanjem njihovog prostora u modelu mašine permeabilnošću vazduha. Na opisani način moguće je precizno razdvojiti uticaje dq struja na fluksne obuhvate pri čemu su magnetski uslovi u mašini jednaki kao i kod mašine u kojoj podjednako deluju svi izvori pobude. U drugoj *FEA* simulaciji određuje se uticaj delovanja samo stalnih magneta podešavanjem struja u d i q osi tako da one budu jednake nuli.

5. Primer izračunavanja induktivnosti

Primer izračunavanja induktivnosti biće prikazan na modelu sinhronu mašine sa utisnutim stalnim magnetima koja ima parametre date u tabeli 1.

Induktivnosti dobijamo na osnovu sledećih izraza:

$$L_d = \frac{\Psi_{sd}(i_{sd} = 1A, i_{sq} = 0A)}{i_{sd}}, \quad (11)$$

$$L_q = \frac{\Psi_{sq}(i_{sd} = 0A, i_{sq} = 1A)}{i_{sq}}$$

$$L_{dq} = \frac{\Psi_{sd}(i_{sd} = 0A, i_{sq} = 1A)}{i_{sq}}, \quad (12)$$

$$L_{qd} = \frac{\Psi_{sq}(i_{sd} = 1A, i_{sq} = 0A)}{i_{sd}}$$

Dati su i osnovni nazivni i dimenzioni podaci kao i tipovi materijala korišćeni za samu izradu odabrane IPMSM. Ovaj tip IPMSM se koristi u aplikaciji električne vuče i ima konfiguraciju magneta koji su ukopani u „V“ oblik (engl. *V shape configuration*) gde su efekti nelinearnosti izuzetno izraženi.

Tabela 1

Parametar	Vrednost	Parametar	Vrednost
Osnovna snaga (sl)	4,4 kW	Broj žlebova na statoru	36
Nominalni napon	48 V	Dužina lim paketa	80 mm
Nominalna struja	390 A	Broj polova	8
Režim rada	S2-60 min	Frekvencija	66.66 Hz
Stator spoljna dimenzija	175 mm	Širina vazdušnog zazora	0.5 mm
Stator unutrašnja dimenzija	110 mm	Dimenzije magneta	2 x (4 x 10) mm
Rotor spoljna dimenzija	109 mm	Materijal magneta	N35UH
Rotor unutrašnja dimenzija	33 mm	Materijal feromagnetskog jezgra	M250-35A

Induktivnost po d osi u funkciji struja i_{sd} i i_{sq} biće prikazana na slici 1. Ono što se prvo može uočiti jeste da je oblik grafika simetričan u odnosu na q osu, što je i očekivano, sa aspekta činjenice da su magneti postavljeni u d osi i da magnetski put po njoj nije konzistentan kao u slučaju q ose. Postoji tačka u kojoj induktivnost L_d dostiže svoj maksimum i to je pri struji i_{sd} od oko 150A, dok je struja i_{sq} na nultoj vrednosti. U slučaju kada obe struje imaju vrlo velike negativne vrednosti, opet dolazi do zasićenja samo u suprotnom smislu.

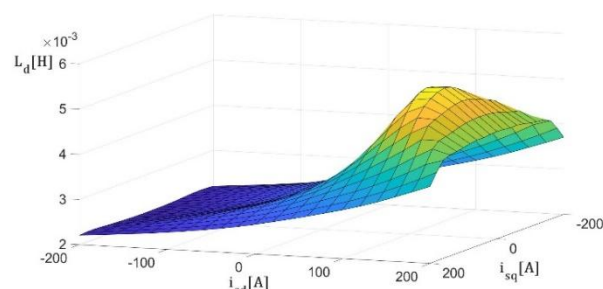
Kada je reč o induktivnosti po q osi, možemo na slici 2 videti da je ona simetrična i po d i po q osi, a razlog tome je što dešavanja u d osi slabo utiču na q osu, pa nema odraza asimetrije. Induktivnost L_q dominantno zavisi od

struje i_{sq} , svoj maksimum dostiže pri nultoj vrednosti i_{sq} , ali čim dođe do promene i_{sq} , dolazi i do promena L_q . Ovde se mora obratiti posebna pažnja na dramatičnost promena L_q sa i_{sq} , koja je mnogo manje izražena nego u slučaju promena L_d sa i_{sd} . Struja i_{sd} ne utiče mnogo na vrednost induktivnosti L_q , postoji mali ugib koji je slabo izražen.

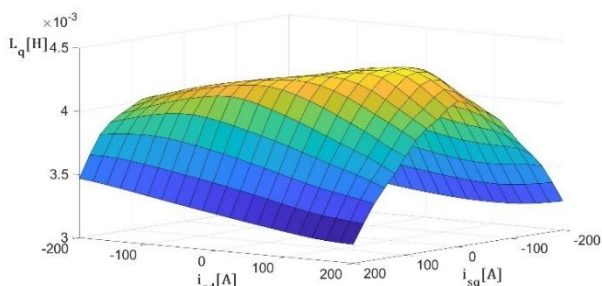
Sprežne induktivnosti L_{dq} i L_{qd} koje su prikazane na slikama 3 i 4 koje postoje usled činjenice da fluks po d i fluks po q osi dele isto magnetno kolo, mogu imati i pozitivne i negativne vrednosti, što zavisi od nivoa zasićenja. Ukoliko d ili q osa previše zasite, može se desiti da se taj fluks rasipa i u pozitivnom i u negativnom smislu, odnosno od d ka q osi i obrnuto od q ka d osi. Svakako, vrednost ovih induktivnosti je mnogo manja od vrednosti sopstvenih induktivnosti po d i q osi, ali one ipak postoje. Značajno je još napomenuti i da sprežne induktivnosti nisu simetrične, što je očekivano iz razloga što mi želimo da vidimo doprinos q struje u d osi koja je nesimetrična, u slučaju L_{dq} , ili doprinos d struje (iz nesimetrične d ose) u q osi koja je simetrična, u slučaju L_{qd} .

U simulacijama je takođe analiziran fluks stalnih magneta koji je prikazan na slici 5 i prvo će biti prikazan doprinos fluksa stalnih magneta u d osi. Vrlo je uočljiv deo slike gde se imaju velike vrednosti struja i po d i po q osi, koje dovode do dramatičnog zasićenja gvožđa. U takvim situacijama zasićeno gvožđe ima karakteristike vazduha i predstavlja put velikog magnetskog otpora za fluks stalnih magneta, čije se polje usled toga lokalno zatvara. Ovo ne znači da je fluks stalnih magneta mali, naprotiv on je velik, ali slabo doprinosi ukupnom polju iz gore navedenog razloga. Ovakve situacije se u praksi naravno ne dešavaju, ali je u cilju veće ekstenzibilnosti simulacija prikazan i taj momenat u ponašanju fluksa mašine.

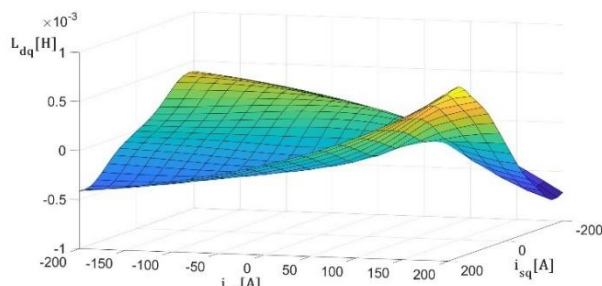
Na slici 6 dat je prikaz fluksa stalnog magneta u q osi. On nije nula, kao što bismo to pretpostavili na osnovu teorijskih razmatranja. Postoji, ali je značajno manje izražen i ovde će biti predstavljen samo zbog teorijskog značaja i akademskog zaokruženja svih fenomena. Nije simetričan, iz razloga što istražujemo doprinos nesimetrične d ose i magneta koji bi suštinski trebali da doprinose samo u d osi, u q osi.



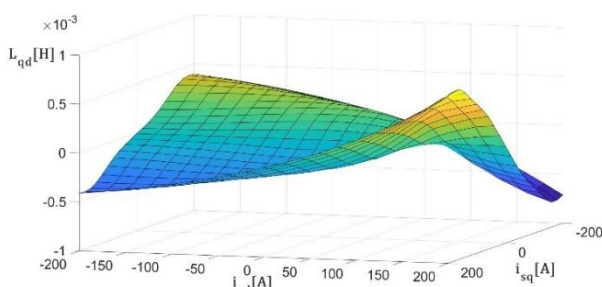
Slika 1. Induktivnost po d osi, u funkciji struja i_{sd} i i_{sq}



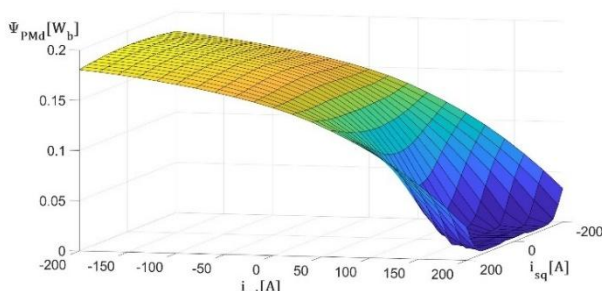
Slika 2. Induktivnost po q osi, u funkciji struja i_{sd} i i_{sq}



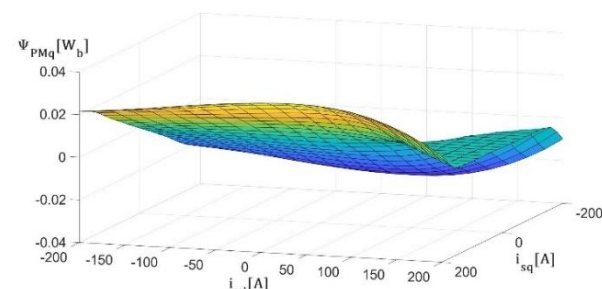
Slika 3. Sprežna induktivnost L_{dq} , u funkciji struja i_{sd} i i_{sq}



Slika 4. Sprežna induktivnost L_{qd} , u funkciji struja i_{sd} i i_{sq}



Slika 5. Doprinos fluksa stalnih magneta u d osi, ukupnom fluksu u d osi



Slika 6. Doprinos fluksa stalnih magneta koji se nalaze u d osi, ukupnom fluksu u q osi

6. Zaključak

U radu je obrađen fenomen varijacija vrednosti induktivnosti u širokom radnom opsegu sinhronne mašine sa utisnutim stalnim magnetima. Rezultati su dobijeni pomoću metode konačnih elemenata i primenjene tehnike zamrznutih permeabilnosti. Iz priloženog je jasno da vrednosti induktivnosti nisu konstantne i ukoliko se teži kontroli koja daje visoke performanse mašine, ove varijacije je neophodno uzeti u obzir.

7. Reference

- [1] Nicola Bianchi, Silverio Bologani, "Magnetic Models of Saturated Interior Permanent Magnet Motors based on Finite Element Analysis"
- [2] Mladen Vučković, "Nonlinear Magnetic Model of IPMSM based on the Frozen Permeability Technique utilized in improved MTPA control", 2024
- [3] Dejan G. Jerkan, Marko A. Gecić, "IPMSM inductances calculation using FEA"
- [4] Dejan G. Jerkan, "Dinamički model trofazne kavezne asinhronne mašine zasnovan na metodi konačnih elemenata"
- [5] Milica Jarić, Vladimir Popović, "Comparison of optimal control trajectories of IPMSM with different saliency ratios"

Miljana Naumov je rođena u Novom Kneževcu 5. 1. 2000. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranila je 2024.god.

Dejan Jerkan je vanr. prof na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblast interesovanja su mu modelovanje i dijagnostika električnih mašina, kao i metoda konačnih elemenata.