

Model sinkronog motora sa permanentnim magnetima s uključenim gubitcima

Kubatka, Kristian

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:756527>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Stručni studij

**MODEL SINKRONOG MOTORA SA PERMANENTNIM
MAGNETIMA S UKLJUČENIM GUBICIMA**

Završni rad

Kristian Kubatka

Osijek, 2021.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju

Osijek, 20.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispit
na preddiplomskom stručnom studiju**

Ime i prezime studenta:	Kristian Kubatka
Studij, smjer:	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A 4496, 23.07.2018.
OIB studenta:	63780978509
Mentor:	Dr.sc. Venco Čorluka
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Dr. sc. Željko Špoljarić
Član Povjerenstva 1:	Dr.sc. Venco Čorluka
Član Povjerenstva 2:	Mr.sc. Dražen Dorić
Naslov završnog rada:	Model sinkronog motora sa permanentnim magnetima s uključenim gubitcima
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada	U radu opisati način rada i sve sastavne dijelove sinkronog motora sa permanentnim magnetima (SMPM). Opisati sve gubitke koji se pojavljuju u njegovom radu i dati mjere za njihovo smanjenje. Na osnovu matematičkog modela napraviti simulacijski model u MATLAB_u s uključenim gubitcima i na dijagramima prikazati snage i učinkovitost motora u stvarnim uvjetima rada.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	20.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 04.10.2021.

Ime i prezime studenta:	Kristian Kubatka
Studij:	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A 4496, 23.07.2018.
Turnitin podudaranje [%]:	13%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Model sinkronog motora sa permanentnim magnetima s uključenim gubitcima**

izrađen pod vodstvom mentora Dr.sc. Venco Ćorluka

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. SINKRONI MOTOR S PERMANENTNIM MAGNETIMA	3
2.1. Struktura SMPM_a	3
2.2. Permanentni magneti	5
2.3. Gubici željeza u PM motorima	5
2.4. Vrednovanje gubitaka željeza sa metodom konačnih elemenata.....	7
2.4.1. Gubici vrtložne struje	7
2.4.2. Gubici histereze	8
2.4.3. Ukupni gubici željeza	9
3. MJERENJE GUBITAKA SMPM_a	11
3.1. Mjerenje gubitaka SMPM_a	11
3.1.1. Mjerenje gubitaka SMPM_a u praznom hodu.....	11
3.1.2. Gubici opterećenja i učinkovitost motora	11
3.2. Provedba upravljanja sinkronog motora s permanentnim magnetima	13
3.2.1. Reguliranje struje ograničenjem brzine	13
3.2.2. Reguliranje brzine i moment.....	15
3.3. Matematičko modeliranje SMPM_a	16
3.3.1. Dinamičko modeliranje	17
3.4. Mjerenje napona, struje i snage	22
3.4.1. Prikupljanje računalnih podataka	22
3.5. Rastavljanje gubitaka željeza i mehaničkih gubitaka	26
3.5.1. Metoda pomoću rotora indukcijskog motora.....	26
3.5.2. Metoda pomoću nemagnetskog statora	26
3.5.3. Metoda mjerenja prije postavljanja magneti	26
4. SMANJIVANJE GUBITAKA ŽELJEZA U SMPM_a.....	27
4.1. Optimizacija električnih strojeva	27
4.2. Oblik magneti	28
4.2.1. Oblikovanje magneti	30
4.2.2. Širina i pokrivenost magneti	31
4.3. Oblikovanje utora.....	32
4.3.1. Broj utora	32

4.3.2. Zatvaranje utora	32
4.4. Broj polova	33
4.4.1. Utjecaj broja polova na gubitke željeza	34
4.4.2. Utjecaj broja polova na moment	35
4.4.3. Optimalan broj polova	36
5. ZAKLJUČAK.....	38
Literatura	40
SAŽETAK	42
ABSTRACT.....	43

1. UVOD

Sinkroni strojevi su rotacijski električki strojevi, a dijele se na sinkrone motore i sinkrone generatore. Kako je tema ovoga rada sinkroni motor, njemu ćemo posvetiti veću pažnju. Sinkroni motor se po konstruktivnoj izvedbi ne razlikuje od generatora, tj. Svaki sinkroni stroj može se primjeniti u ulozi motora i u ulozi generatora. Rad sinkronog motora isti je kao i kod generatora, ali čitav proces treba promatrati obrnutim putem. Motor se priključuje na električnu mrežu određenog napona i iz mreže uzima energiju te pretvara tu istu energiju u mehaničku.

Sinkroni motor rotira sinkronom brzinom a to znači da ga treba sinkronizirati s mrežom na koju se priključuje. Što se tiče pokretanja sinkronog motora, priključi li se mirujući sinkroni motor na mrežu, on se neće pokrenuti. Razlog tome jest što sila koja određuje smjer okretanja, mijenja smjer svog djelovanja 100 puta u sekundi. Da bi se motor uključio u paralelni rad sa stabilnom mrežom, potrebno je njegov rotor zarotirati na približno sinkronu brzinu, a uzбудu podići do razine kao u praznom hodu. Tek tada se motor može priključiti na mrežu, jer ga sinkronizacija sila povuče u sinkronizam. Pri pokretanju sinkronog motora i priključivanju na stabilnu mrežu, potrebno je ispuniti i ostale uvjete za paralelni rad. Uspoređujući sinkrone motore sa asinkronim motorima, nedostaci koji će se navesti obrazložiti će veću primjenu asinkronih motora nego sinkronih motora u praksi. Neki od nedostataka sinkronih motora su svakako visoka cijena, nemogućnost promjene brzine ukoliko motor nije priključen na izvor promjenjive frekvencije i napona, te se ne može pokrenuti bez pomoćnog namota. Odlika sinkronih motora jest što imaju sposobnost popravljivanja faktora snage mreže, tj. Imaju ulogu sinkronih kompenzatora.

Rad ima pet poglavlja.

Prvo poglavlje: u uvodnome dijelu su opisani sinkroni strojevi, njihovo prvo pojavljivanje u području industrije, njihovi prednosti i nedostaci. U uvodnome dijelu površno su obrazložene sastavnice koje će dovesti do krajnjeg cilja ovoga rada, a to je izračun gubitaka u sinkronim motorima sa permanentnim magnetima. Izračunom gubitaka, pravilnijim dizajniranjem motora, može se provesti njihova optimizacija, odnosno smanjivanje njihovih gubitaka a time, naravno, povećanje njihove učinkovitosti.

Drugo poglavlje: Dan je opis sinkronih motora sa permanentnim magnetima. U cilju razumijevanja matematičkih opisa modela SMPM_a dan je opis konstrukcijskih dijelova sinkronih motora sa permanentnim magnetima. Kratko su opisani permanentni magneti. Također je napravljen i uvod u gubitke željeza kod motora sa permanentnim magnetima. I na kraju ovog poglavlja, samo vrednovanje metode konačnih elemenata uz pomoć matematičkih izraza.

Treće poglavlje: Kako je tema ovoga rada sinkroni motor s permanentnim magnetima sa uključenim gubitcima, gubici i njihova mjerenja su svakako važan dio cjelokupnog rada. U trećem poglavlju opisana su mjerenja gubitaka SMPM_a. Nadalje, opisani su gubici opterećenja i sama učinkovitost motora pri tome. Opisana je provedba upravljanja SMPM_a koja se sastoji od opisa samog upravljanja, prijenosne matematičkog modeliranja SMPM_a, gdje uvrštavamo dinamičko modeliranje SMPM_a, reguliranja struje ograničenjem brzine, reguliranja brzine i momenta. Prikazani su gubici u računalnom simulacijskom softveru Matlab. Zatim, opisana su provedena mjerenja struje, napona i snage, te potvrđivanje ispravnosti tih mjerenja fazorskim dijagramom.

Četvrto poglavlje: Opisano je smanjivanje gubitaka kod SMPM_a. Dan je opis optimizacije SMPM_a. Dani su detaljniji opisi sastavnica optimizacije motora. Oblik magneta, oblikovanje utora, broj polova su sastavnice koje utječu na smanjivanje gubitaka, a koje su detaljnije objašnjene u ovom poglavlju.

Peto poglavlje: Zaključak. Krajnji rezultat provedenih mjerenja i iskaz rezultata. U radu su predloženi generalni pristupi za smanjivanje gubitaka željeza SMPM_a. U poglavlju su navedene metode u svrhu smanjenja gubitaka željeza SMPM_a.

2. SINKRONI MOTOR S PERMANENTNIM MAGNETIMA

Tipični pogonski sustav sinkronog motora s permanentnim magnetima uključuje sinkroni motor s permanentnim magnetima, pretvarač, osovinski enkoder i mikrokontroler.

Struktura sinkronog motora s permanentnim magnetima je slična strukturi istosmjernog uzbuđenog sinkronog motora, osim što je magnetsko polje napajano permanentnim magnetom u PM stroju.

Sa razvojem novoga, rijetkoga PM materijala, sada je moguće razviti PM motore sa velikom učinkovitošću, velikim faktorom snage i velikom gustoćom energije PM motora za industrijske svrhe i u druge svrhe u kojima ovakvi motori imaju neku ulogu. To je novi rijetki PM materijal, neodmij-željezo-bor (Nd-Fe-B). Smanjeni troškovi i manja temperaturna osjetljivost su stvorili ovaj materijal kao idealan materijal za stvaranje visoko djelotvornih sinkronih strojeva s permanentnim magnetima. [1]

2.1. Struktura SMPM_a

Struktura statora [2] sinkronog motora s permanentnim magnetima je slična onoj strukturi indukcijskog stroja. Ovisno o njezinoj primjeni, distribucija namota može biti približna sinusoidalnoj ili trapezoidalnoj. Poželjno je izgraditi namotaje PM motora sa sinusoidalnom primjenom. U svrhu izbjegavanja okretnog momenta zupčanika, koristi se ukošeni stator.

Struktura rotora sinkronog motora s permanentnim magnetima se može izvesti kao površinski montirani, zatim kao površinski umetnut magnet i površinski zaobljen. Izvedbe rotora prikazane su na slici **2.1**.

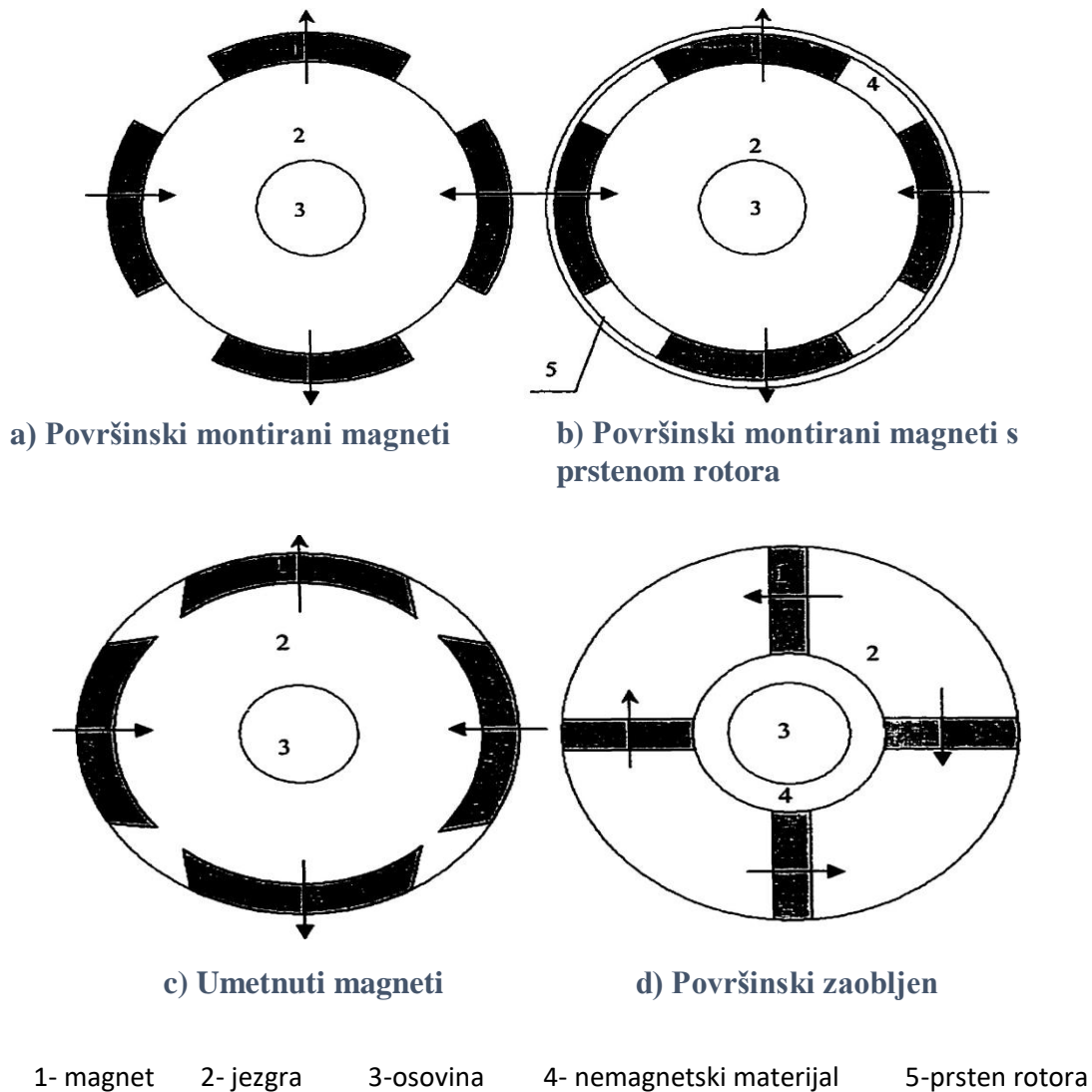
Prema [2] Najčešće korištena izvedba je **2.1. a)** zbog svoje jednostavnosti, dok je nedostatak što se mogu lako istrošiti od površine ukoliko su izvorno zalijepljeni na površini rotora. Rijetki PM materijali su lomljivi i krhki, te ukoliko su izloženi zraku, njihov životni vijek je skraćen u tim uvjetima.

Rotori sa umetnutim magnetima prikazani su na slici **2.1. c)**, njihova prednost je veća sigurnost postavljanja magneti. Jedna od prednosti je i veći maksimalni moment zbog nejednakosti reluktancije d-osi i q-osi. Površinski montirani magneti **a)** i površinski montirani magneti s

prstenom rotora *b*) zahtjevaju oblikovane magnete koje uveliko povećavaju cijenu proizvodnje, dok sa umetnutim magnetima nije takav slučaj, te zbog toga su i troškovi proizvodnje manji.

PM motori sa magnetima umetnutima ispod same površine imaju mehaničke prednosti uspoređujući sa površinski montiranim PM motorim ponajviše pri velikim brzinama.

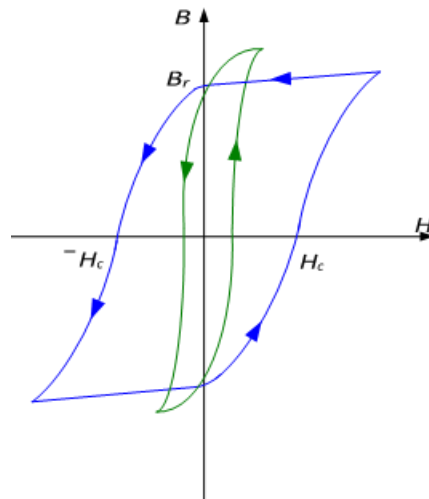
Moguće je također dizajnirati i motor sa površinski zaobljenim umetnutim magnetima, kao na slici *2.1. d*). Ukupni troškovi proizvodnje mogu biti smanjeni ukoliko se umjesto oblikovanih magneta koriste magneti u obliku pravokutnih traka.



Slika 2.1. Strukture rotora SMPM

2.2. Permanentni magneti

Permanentni magnet [3] može proizvesti magnetsko polje u zračnom rasporu strojeva bez postojanja uzbuđenog namota i bez potrošnje električne energije. Vanjska energija se dovodi samo za promjenu energije magnetskog polja, a ne i za njegovo održavanje. Kao i svi drugi feromagnetski materijali permanentni magnet opisuje se petljom histereze. Permanentni magneti zovu se još i tvrdi magnetski materijali, što znači da im je petlja histereze široka. Primjer široke i uske petlje histereze sa označenim koercitivnim poljem H_c i remanentnom indukcijom B_r dan je slikom 2.2.



Slika 2.2. Uska i široka petlja histereze

2.3. Gubici željeza u PM motorima

Gubici sinkronog motora [4] su podijeljeni u sljedeće grupe: mehanički gubici (gubici ventilacije, trenje); gubici željeza; zalutali gubitak; gubici bakra statora.

Mehanički gubici se pojavljuju zbog trenja nosivosti, ventilacije rotora, ventilacije ventilatora i rashladne pumpe. Ovi gubici su konstantni pri konstantnoj brzini te oni variraju proporcionalno promjeni brzine. Gubici željeza se pojavljuju zbog promjene magnetnog polja u jezgrama statora i rotora. Rastavljaju se na gubitke vrtložne struje i gubitke histereze.

Gubici histereze su zbog pojave petlje histereze u jezgri. Gubici vrtložne struje su zbog induciranih struja u materijalu jezgre, koji su uostalom vodiči električne struje. Zalutali teret se javlja zbog reakcije armature, propuštanja toka i mehaničkih nesavršenosti motora. Gubici bakra se javljaju zbog protoka struje kroz namot. Neznatno se povećava sa opterećenjem zbog skin efekta i vrtložnih struja u namotu.

Izračun gubitka bakra je relativno jednostavan i precizan. Predviđanje mehaničkih gubitaka je općenito iskazano uspoređivanjem gubitaka sa sličnim strojevima. Izračuni gubitaka željeza i zalutalih gubitaka su daleko od kompletnih. Za motore male i srednje veličine, uobičajeno je da se pretpostavi postotak od ukupne ulazne snage kao zalutali gubitak. U klasičnom dizajniranju motora, gubici željeza se smatraju kao posljedica temeljnih varijacija frekvencije magnetskog polja. Mjereni gubici željeza električnog motora su većinom mnogo veći od gubitaka dobivenih sinusoidalnom pretpostavkom.

Prema [4] Gubici željeza se sastoje od dva dijela: jedan je proporcionalan frekvenciji dok je drugi proporcionalan kvadratu frekvencije. Prvi navedeni je vezan za gubitak histereze, dok je drugi navedeni vezan za gubitke vrtložne struje.

Za sinusoidalnu gustoću toka, koji je izvan radnog raspona frekvencije, ukupni gubici željeza mogu se prikazati kao zbroj gubitaka histereze (proporcionalni frekvenciji) i gubitaka vrtložnih struja (proporcionalni kvadratu frekvencije)

$$p_{iron} = p_h + p_e = k_h B^\beta \omega_s + k_e B^2 \omega^2 \quad (W/m^3) \quad (2-1)$$

Gdje je B maksimalna gustoća toka u željezu, p_{iron} je ukupni gubitak gustoće željeza, p_h je gubitak gustoće histereze i p_e gubitak gustoće vrtložne struje; ω_s je kutna brzina magnetskog polja; k_h , k_e i β su empirijski izvedene konstante koje se mogu dobiti prilagodbom iz zaposlenikovih podataka mjerenih sa sinusoidalnim tokom gustoće. Tipične vrijednosti za materijal od silicijskog željeza često korištenog u indukcijskim strojevima sa frekvencijom statora u rad/s, su $k_h = 44 - 56$, $\beta=1.5-2.5$, $k_e = 0.01 - 0.07$.

Izraz za klasični gubitak vrtložne struje također može biti izveden bazirajući se na otpornost materijala jezgre. Rezultat je većinom manji od onoga u izrazu (2-1).

U površinski-montiranom PM sinkronom motoru, gubici željeza su uglavnom u jezgri statora. Valni oblik gustoće toka jezgre statora niti uniforman niti sinusoidalni. Ovaj nesinusoidalni valni oblik gustoće toka ne utječe na gubitke histereze samo ako nema malih petlji, ali je kritičan za gubitke vrtložne struje. Stoga je poželjno ponoviti izraz za gubitke gustoće vrtložnih struja u sljedećem obliku:

$$p_e = 2k_e \left| \frac{dB}{dt} \right|^2 \quad (W/m^3) \quad (2-2)$$

U izrazu (2-2), derivacija po vremenu vektora gustoće toka \mathbf{B} se koristi ocijenu trenutnog gubitka toka vrtložne struje p_e . Također pokazuje da su gubici željeza inducirani i varijacijom polja, bilo da je pulzirajuće ili rotirajuće. Gubici vrtložne struje su povezani ne samo sa veličinom gustoće toka, već i o načinu kako se dvije ortogonalne komponente mijenjaju.

Za periodična varijabilna polja, prosječni gubitak gustoće vrtložne struje se može dobiti integriranjem preko jedne periode:

$$P_e = \frac{2k_e}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^2 dt \quad (W/m^3) \quad (2-3)$$

2.4. Vrednovanje gubitaka željeza sa metodom konačnih elemenata

2.4.1. Gubici vrtložne struje

Gubici vrtložne struje [5] su inducirani promjenom magnetskog toka, bilo da je pulzirajući ili rotirajući. Gustoća toka u jezgri se obično sastoji od dvije ortogonalne komponente te se gubici vrtložne struje mogu dobiti uzimajući u obzir doprinos svake komponente. Ako je magnetsko polje periodično u vremenskom području, gubici gustoće vrtložne struje se mogu izvesti izrazom prema [5]:

$$p_e = \frac{2k_e}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^2 dt = \frac{2k_e}{T} \int_0^T \left(\frac{dB_x}{dt} \right)^2 dt + \frac{2k_e}{T} \int_0^T \left(\frac{dB_y}{dt} \right)^2 dt \quad (W/m^3) \quad (2-4)$$

Gubici vrtložne struje se mogu dobiti pomoću izraza (2-4) u vremenskom području koristeći metodu konačnih elemenata. Ako su dvije ortogonalne komponente gustoće toka

elementa e u željezu statora u trenutku t_n izraženi sa $B_{ex,n}$, $B_{ey,n}$ kvadrat izvoda vektorske gustoće toka B se može napisati kao:

$$\left| \frac{d\mathbf{B}}{dt} \right|^2 dt = \left(\frac{B_{ex,n} - B_{ex,n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right)^2 + \left(\frac{B_{ey,n} - B_{ey,n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right)^2, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2-5)$$

Gdje je N ukupni broj koraka u provođenju analize poluperiode vremenski usklađenom metodom konačnih postupaka. U izvođenju vremenski usklađene metode konačnih elemenata, cijeli stator je podijeljen na broj elemenata. Gustoća toka svakog elementa može biti izvedena u svakom trenutku vremena. Ako je analizirana samo poluperioda, vremenski interval između koraka dviju uzastopnih metoda konačnih elemenata je:

$$\Delta t = t_n - t_{n-1} = \frac{T}{2N} = \frac{1}{2Nf}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2-6)$$

Gdje je f frekvencija magnetskog polja.

Koristeći izraze (2-5) i (2-6), ukupni gubici vrtložne struje mogu biti izraženi kao:

$$P_e = 4pNk_e l_{fe} f^2 \sum_{e=1}^E A_e \left[\sum_{n=1}^N (B_{ex,n} - B_{ex,n-1})^2 + \sum_{n=1}^N (B_{ey,n} - B_{ey,n-1})^2 \right] \quad (\text{W}) \quad (2-7)$$

Gdje je A_e područje elementa e , E je ukupni broj elemenata jezgre statora i l_{fe} je ukupna duljina snopa statora.

2.4.2. Gubici histereze

Pretpostavljajući da nema malih petlja histereze, gubici histereze su proporcionalni umnošku kvazi-statičkom području petlje histereze i frekvenciji te tako nisu ovisni o obliku gustoće toka. Za dani material, gubici histereze se mogu izračunati jednom kada se dobiju vršne gustoće toka svakog elementa. Gubici histereze se iskazuju izrazom;

$$p_h = k_h \omega_s B^\beta \quad (\text{W}/\text{m}^3) \quad (2-8)$$

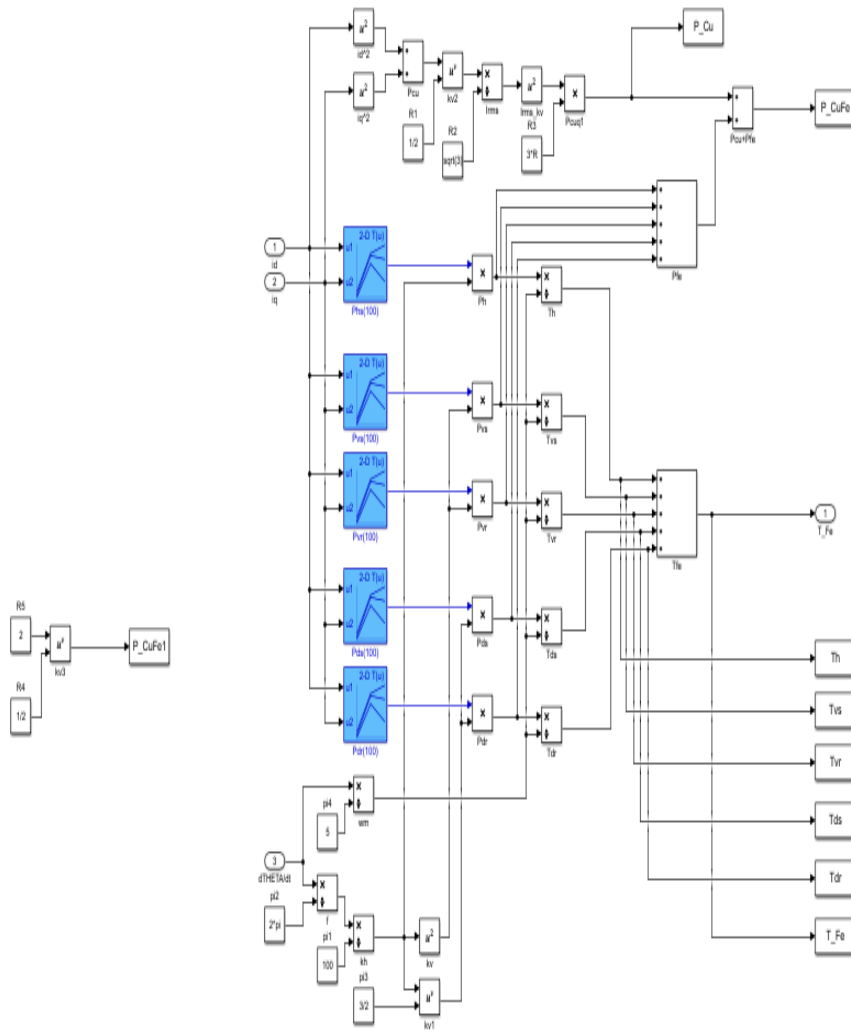
Izvedeći vremenski usklađenu analizu metode konačnih elemenata, može se dobiti vršna vrijednost gustoće toka $B_{e,max}$ za svaki element. Gubici histereze statora su:

$$p_h = k_h \sum_{e=1}^E \left[A_e l_{fe} B_{e,max}^\beta \omega_s \right] = 2\pi k_h l_{fe} f \sum_{e=1}^E \left[A_e B_{e,max}^\beta \right] \quad (\text{W}) \quad (2-9)$$

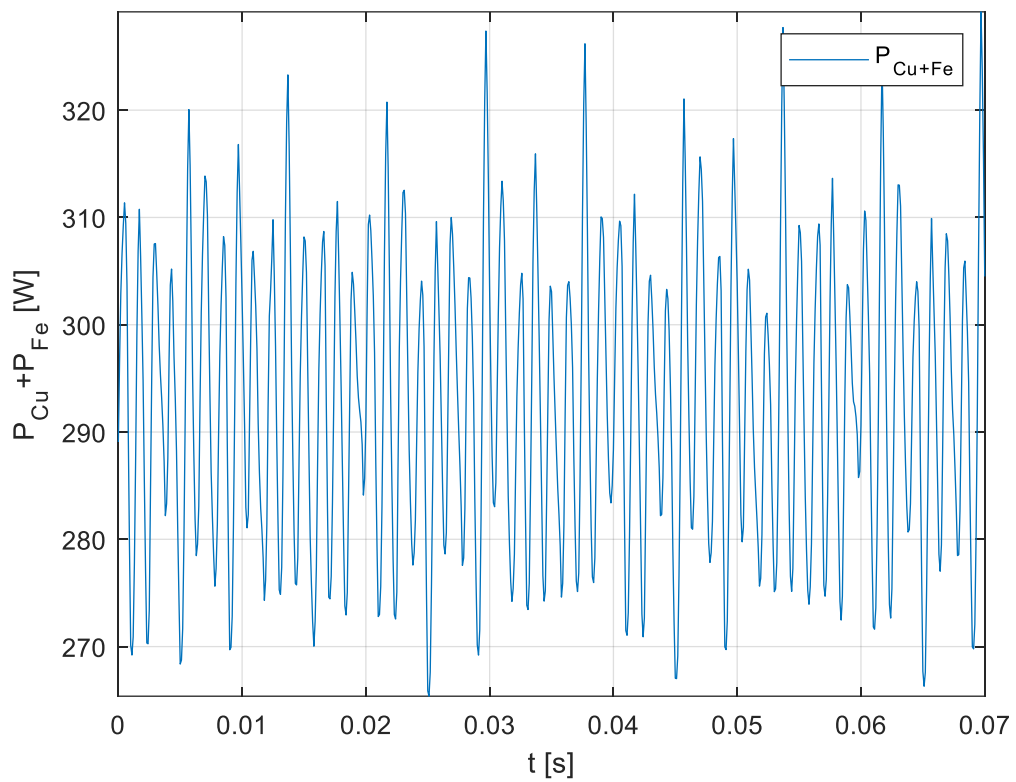
2.4.3. Ukupni gubici željeza

Ukupni gubici željeza se dobiju zbrojem gubitaka vrtložnih struja i gubitaka histereze:

$$P_{iron} = P_e + P_h \quad (W) \quad (2-10)$$



Slika 2.3. Model s ukupnim gubicima u željezu i bakru



Slika 2.4. Ukupni gubici željeza i bakra grafički prikazani

3. MJERENJE GUBITAKA SMPM_a

3.1. Mjerenje gubitaka SMPM_a

Mjerenje gubitaka u električnim strojevima [6] je općenito težak zadatak za električnu industriju. Električna industrija troši mnogo novca za opremu s što većom preciznošću koja se upotrebljava za mjerenje korisnosti motora unutar $\pm 0.5\%$. Kod mjerenja gubitaka, važno je koristiti instrumente s što većom preciznošću zbog točnijeg rezultata. Također je poželjno napraviti ponovljene uzorke podataka u svakom trenutku kako bi bili u mogućnosti izračunati srednju vrijednost mjerenja.

3.1.1. Mjerenje gubitaka SMPM_a u praznom hodu

Gubici SMPM_a u praznom hodu uključuju: gubitke željeza statora, mehaničke gubitke (gubitci ventilacije i trenja) i gubitke bakra u statoru. Za površinski-montirane SMPM_a gubici željeza rotora su zanemarivi. Za umetnuti SMPM_a se moraju uračunati i gubitci željeza rotora. Kada je sinkroni stroj s permanentnim magnetima upravljan kao motor, bez ikakvih spojenih uređaja na osovini, mjerenja ulazna snaga, sa oduzetim gubiticima bakra, predstavlja kombinaciju gubitaka željeza i gubitaka ventilacije te gubitaka trenja pri praznom hodu. Isto tako, u slučaju da je SMPM_a upravljan istosmjernim motorom sa otvorenim krugom statora permanentnog magneta, mjereni moment osovine pomnožen sa brzinom predstavlja kombinaciju gubitaka željeza, gubitaka trenja i gubitaka ventilacije praznog hoda.

3.1.2. Gubici opterećenja i učinkovitost motora

Gubici opterećenog SMPM_a uključuju gubitke bakra, gubitke željeza, gubitke ventilacije, gubitke trenja i lutajuće gubitke. Poznato je da se lutajući gubici javljaju zbog propuštanja toka, mehaničke nesavršenosti zračnog procjepa, nesinusoidalne distribucije struje itd. Jedan zaključak je siguran, a to je da istraživanje lutajućih gubitaka u rotirajućim strojevima daleko od završenog te su dostupni podaci podvrgnuti visokom stupnju nesigurnosti. U svrhu izbjegavanja mjerenja lutajućih gubitaka, predloženo je da se koristi direktno ulazno/izlazno mjerenje. Iako i ta metoda ima svojih nedostataka, kao što su skuplja cijena te su dugotrajniji, svejedno je najprihvaćenija metoda te će biti glavna metoda u mjerenju učinkovitosti motora u nadolazećim godinama. Kada SMPM_a djeluje kao motor sa mehaničkim opterećenjem na njegovoj osovini, mogu se dobiti ukupni gubitci te učinkovitost motora, direktnim mjerenjem okretnog momenta te ulazne snage. SMPM_a s pogonom promjenjive brzine obično su dizajnirani bez prigušenja kaveza. Stoga PM

motor mora biti upravljani sa zatvorenim okvirom. Pulsno-širinski modulacijski valni oblik je neizbježan u kontroliranju promjenjive brzine Sinkronog motora sa permanentnim magnetima. Mjerenje pulsno-širinskog valnog oblika nije moguće mjeriti uobičajenim električnim instrumentima. Korisnost mjerenja pulsno-širinske modulacije će se detaljnije objasniti u ovom poglavlju.

Učinkovitost motora

Opći izraz za ovisnost momenta motora o snazi i kutnoj brzini motora može se koristiti za izračun bruto snage motora korištenjem srednje vrijednosti momenta prema jednadžbi:

$$P_{MKE} = M_{MKE} \omega = M_{MKE} 2\pi n_s = M_{MKE} 2\pi \frac{f}{p} \quad (3-1)$$

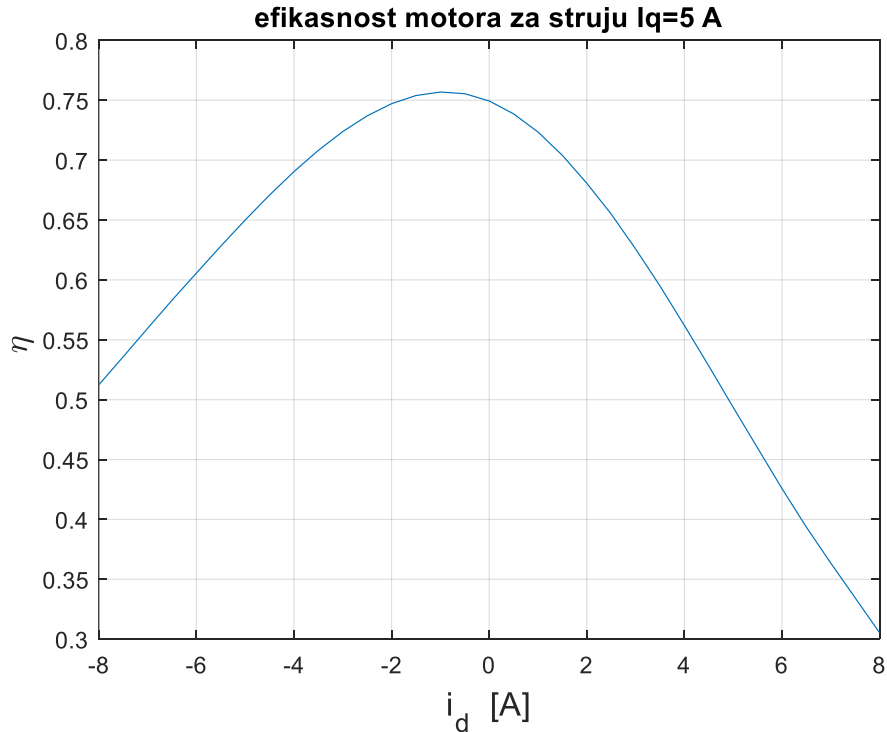
Oduzimanjem ukupnih gubitaka u željezu od snage P_{MKE} dobivaju se mehanička snaga na osovini motora P_{os} . Električna snaga P_{el} na stezaljkama motora dobiva se dodavanjem gubitaka u namotu P_{Cu} snazi P_{MKE}

Za motorni režim rada vrijedi:

$$\eta_{mot} = \frac{P_{os}}{P_{el}} \quad (3-2)$$

Za generatorski režim rada vrijedi:

$$\eta_{gen} = \frac{P_{el}}{P_{os}} \quad (3-3)$$



Slika 3.1. Efikasnost motora za struju $I_q = 5$ A

3.2. Provedba upravljanja sinkronog motora s permanentnim magnetima

U svrhu mjerenja gubitaka SMPM_a kada se pogoni kao motor, provodi se i sustav kontrole. [7]

3.2.1. Reguliranje struje ograničenjem brzine

Maksimalni izlazni napon pretvarača je ograničen istosmjernim priključnim naponom. Ovo ograničenje napona utječe na ograničenje maksimalne brzine vrtnje motora. Broj okretaja motora u minuti linijskog napona pretvarača U_{LL} se može napisati kao:

$$U_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a U_d = 0.612 m_a U_d \quad (3-4)$$

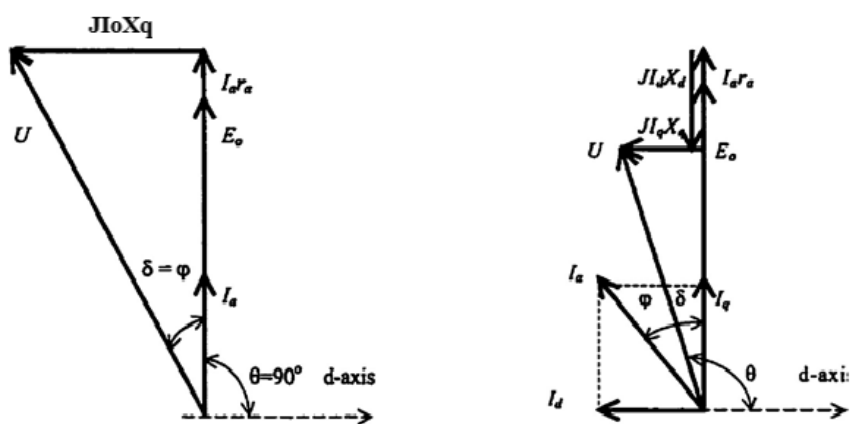
Gdje je m_a omjer modulacije i U_d istosmjerni napon napajanja.

Fazorski dijagram SMPM_a pri maksimalnom momentu i pri slabljenju toka su pojedinačno prikazani na slici 3.2. Naredna jednadžba je izvedena iz fazorskog dijagrama prikazanog na slici 3.2. :

$$(E_o + I_a R)^2 + (I_a X_q)^2 = U^2 \quad (3-5)$$

Tada se ograničenje brzine pri maksimalnom momentu može izraziti kao:

$$n_{max} = \frac{60}{p} \cdot \frac{\sqrt{(I_a r_a k_e)^2 + [C_e^2 + (2\pi I_a L_q)^2] [0.1253 U_d^2 - (I_a r_a)^2] - 2 I_a r_a C_e}}{C_e^2 + (2\pi I_a L_q)^2} \quad (3-6)$$

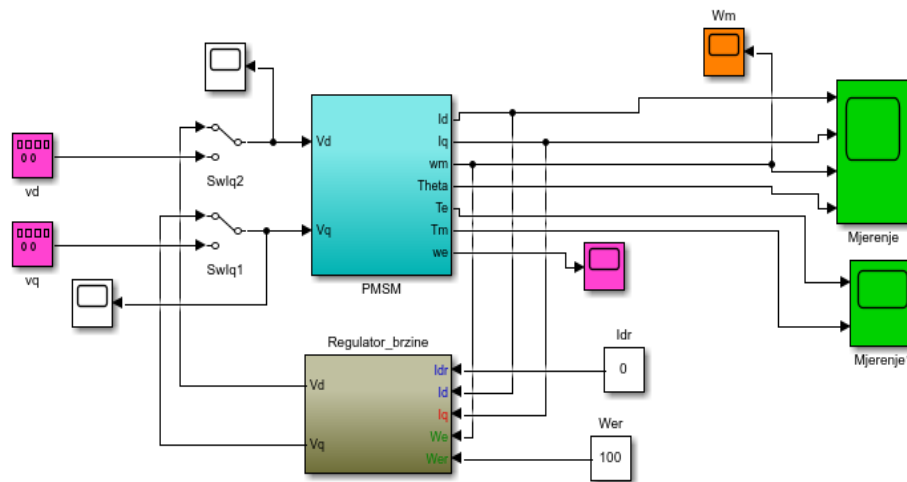


Slika 3.2. Fazorski dijagram SMPM_a

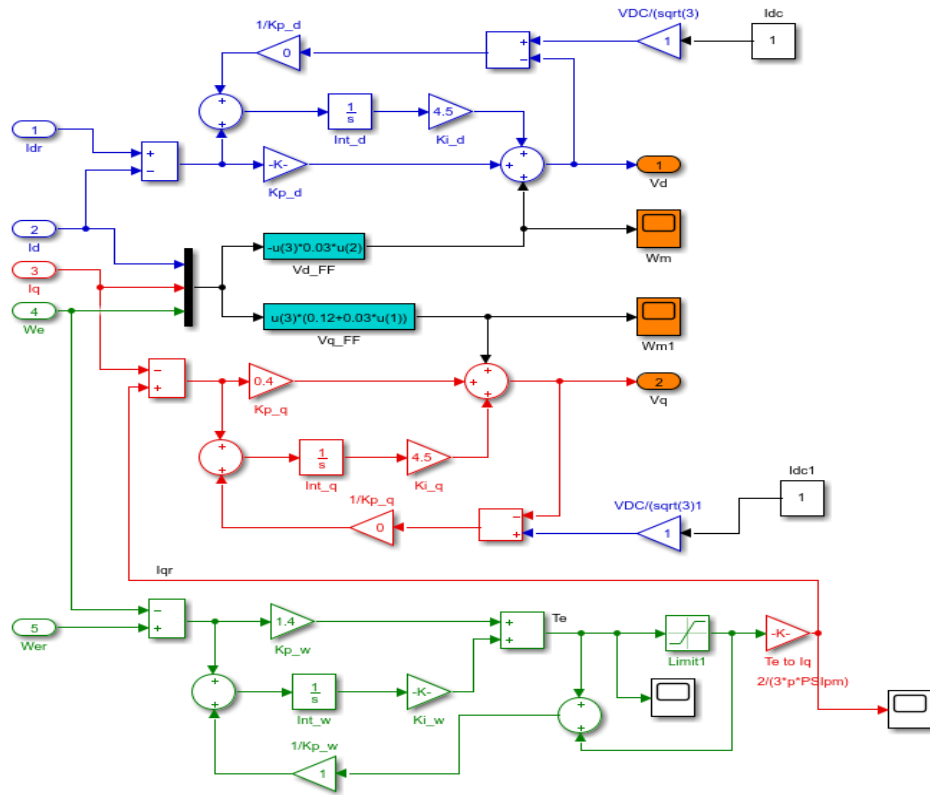
- a) Djelovanje maksimalnim momentom b) Djelovanje slabljenjem toka

3.2.2. Reguliranje brzine i moment

Regulacija brzine pogona na modelu SMPM_a je prikazana na slici 3.3.



Slika 3.3. Model SMPM s regulatorom brzine vrtnje



Slika 3.4. Regulator brzine

3.3. Matematičko modeliranje SMPM_a

Matematičko modeliranje [8,9] složenih tehničkih uređaja vrlo je zahtjevno, a fizikalno ponašanje materijala u dinamičkim uvjetima vezano je za niz parametara. Osnovna topologija stroja (linearni model s koncentriranim parametrima) dovoljna je da bi se moglo uočiti tokove energije i važnost pojedinih elemenata stroja. Za potrebe upravljanja složenim pogonima (sustavi energetske elektronike upravljaju tokovima električne energije) po principima regulacije potrebno je poznavati što točniji model procesa kojim se upravlja (motor).

Razvijeni okretni moment sinkronog motora sa permanentnim magnetima se može izraziti kao:

$$T_q = \frac{p}{2} (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d) \quad (3-7)$$

Gdje je I_d struja na d-osi, I_q struja na q-osi, Ψ_d tok na d-osi i Ψ_q tok na q-osi

U uravnoteženom sustavu, može se napisati izraz za okretni moment:

$$T_q = \frac{p}{2} \Psi_m I_a \sin \theta \quad (3-8)$$

Gdje je I_a veličina statorske struje i Ψ_m veličina toka

Kako je kod PM motora tok konstantan, upravljanje okretnim momentum se može postići upravljanjem amplitude statorske struje ili kutom θ . Može se zaključiti da se mjenjanjem kuta θ moment proporcionalan statorskoj struji. U slučaju kada kut θ iznosi 90° , moment je dostiže maksimum sa istom strujom napajanja.

Površinski-montirani cilindrični SMPM_a u osnovi imaju slične izravne i kvadraturne osi reaktancije.

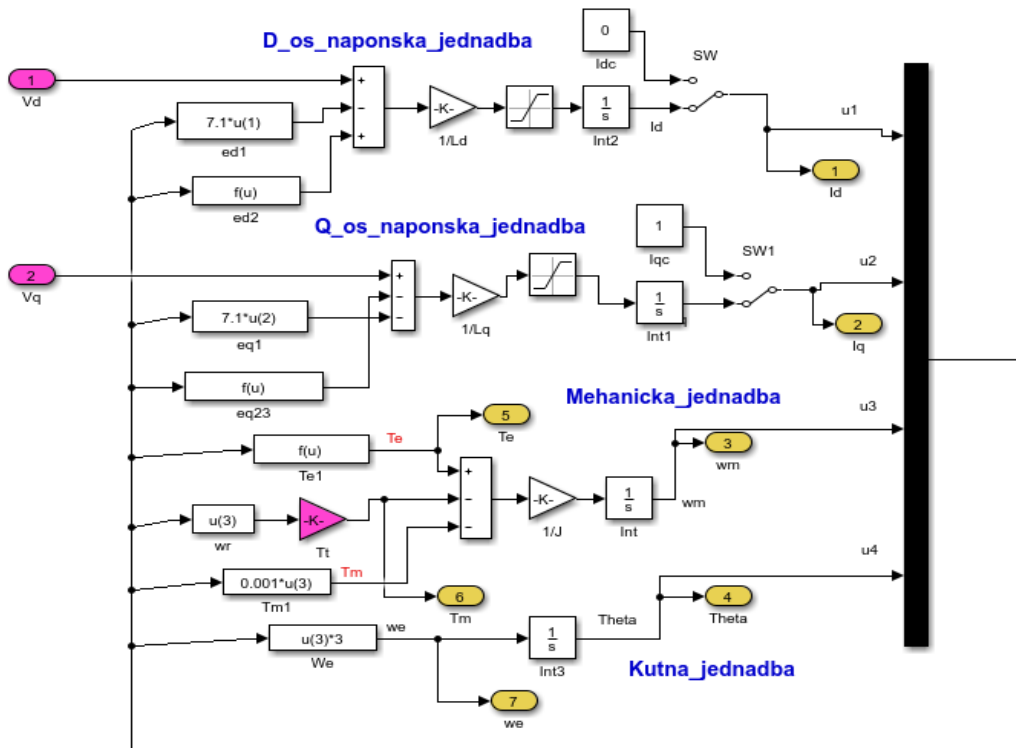
3.3.1. Dinamičko modeliranje

Modeliranje nekog problema podrazumijeva uočavanje bitnih čimbenika, definiranje osnovnih fizikalnih zakona koji opisuju problem, te matematičku formulaciju problema

Postupci modeliranja električkih strojeva u osnovi se dijele na dvije osnovne aktivnosti:

Projektiranje zahtijeva poznavanje detaljnije magnetske slike stroja, za što su razvijeni modeli s raspodijeljenim parametrima (npr. MKE) kod kojih parametri ovise i o vremenu i o prostoru. Osnovna je karakteristika ovakvih modela potrebno dugo vrijeme izračuna zbog velikog broja elemenata koji definiraju točnost. Zato modeli s raspodijeljenim parametrima nisu pogodni za modeliranje sustava u realnom vremenu.

Za potrebe upravljanja, simuliranja i analize dinamičnih sustava potrebno je da model daje rezultate u realnom vremenu. U tom se slučaju promatrani sustav pojednostavljuje konačnim brojem idealiziranih pojedinačnih elemenata. Osnovno je svojstvo ovakvih modela da nema dimenzije, odnosno djelovanje je trenutno.



Slika 3.5. Model SMPM_a

Prema [8,9] I pomoću slike 3.5. možemo doći do naponske jednadžbe na d-osi, q-osi i mehaničke jednadžbe.

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_s i_{qs} \quad (3-9)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r (L_s i_{ds} + \lambda_{pm}) \quad (3-10)$$

Mehanička jednadžba:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \lambda_{pm} i_{qs} \quad (3-11)$$

Ulazna je električna snaga motora u d-q sustavu:

$$P_e = (u_{dm} i_{dm} + u_{qm} i_{qm}) \quad (3-12)$$

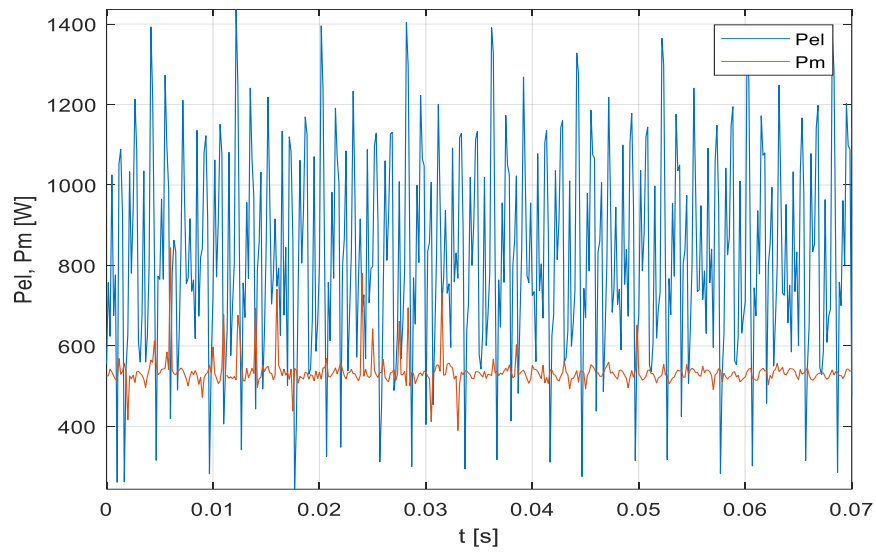
Gdje su u_{dm} , i_{dm} , u_{qm} i i_{qm} mjereni naponi i struje d i q osi.

Mehanička snaga dobije se množenjem izmjerenoga momenta M_m i kutne brzine ω_m :

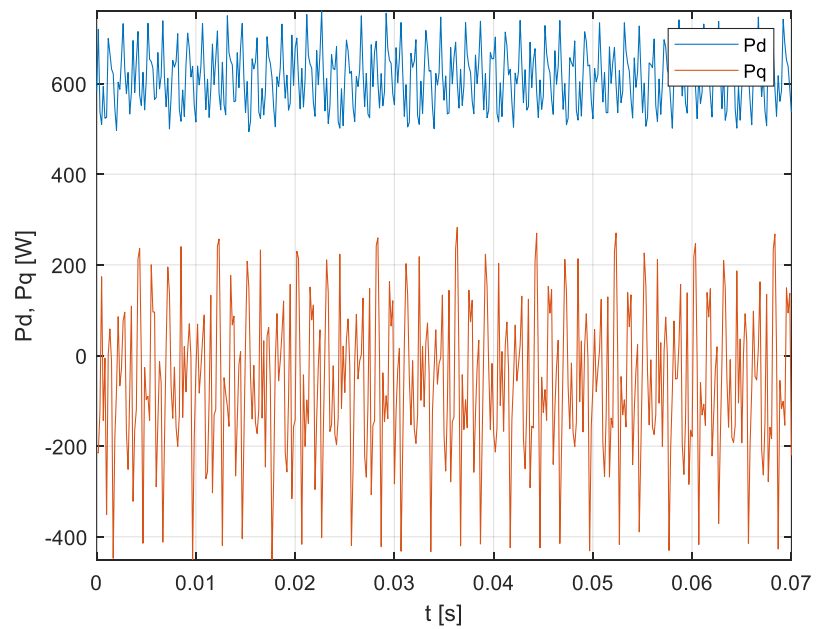
$$P_m = M_m \omega_m \quad (3-13)$$

Razlika električne i mehaničke snage daje gubitke P_{gm} u motoru:

$$P_{gm} = P_e - P_m \quad (3-14)$$



Slika 3.6. Električna i mehanička snaga motora



Slika 3.7. Snaga u d-osi i q-osi

Podatci za mjerene struje u d i q osi s motora unose se u dinamički model u kojem se računuju gubici u namotu P_{Cu} i željezu P_{Fe} , elektromagnetski moment M_{es} , moment gubitaka u željezu M_{Fe} , kutna brzina rotora ω_s i kut položaja rotora θ_s .

Gubici u namotu jednaki su umnošku kvadrata efektivne vrijednosti struje statora I_s i otpora namota R za svaku fazu, a pritom treba struje u d i q osi izraziti preko struje statora:

$$P_{Cu} = \left(\frac{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}}{\sqrt{3}} \right)^2 3R = I_s^2 3R = \left(\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \right)^2 R \quad (3-15)$$

Ukupni su gubici u motoru zbroj gubitaka u namotima i željezu:

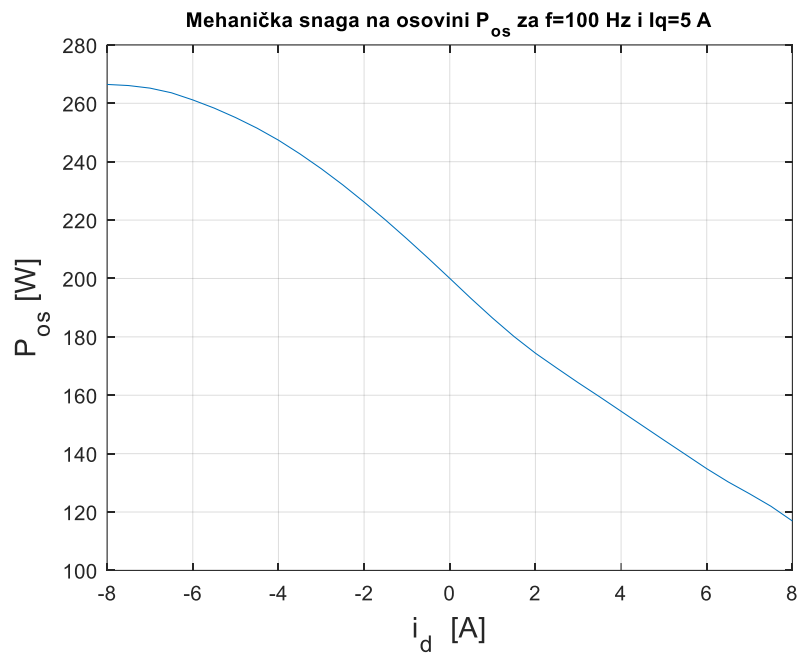
$$P_{FeCu} = P_{Cu} + P_{Fe} \quad (3-16)$$

Moment gubitaka u željezu M_{Fe} dobije se ako numerički izračunate gubitke u željezu podijelimo sa mehaničkom kutnom brzinom.

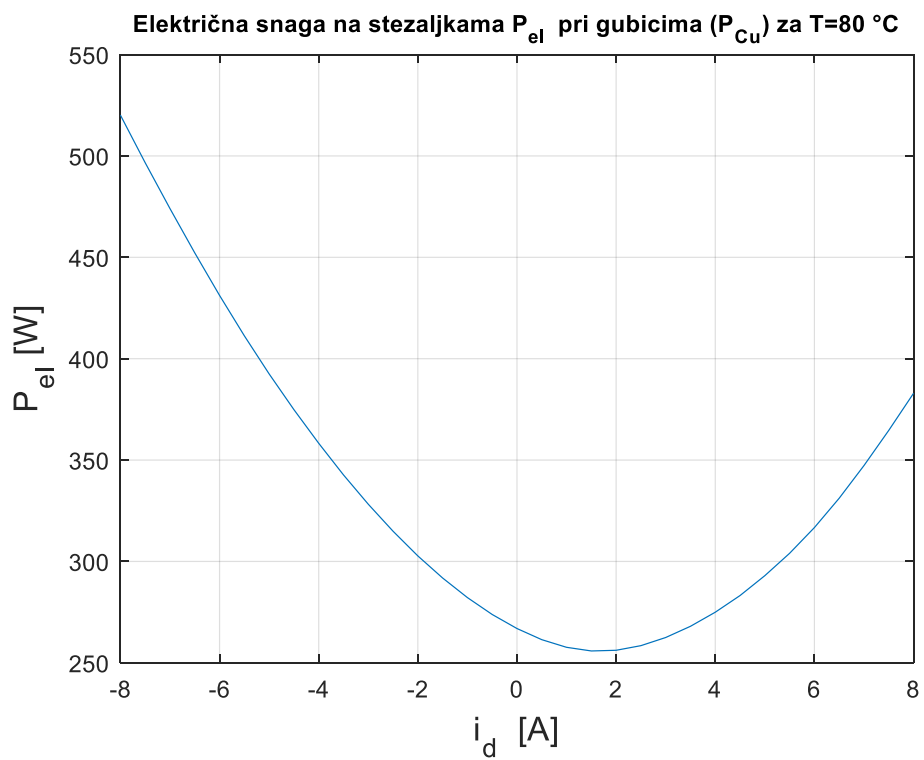
$$M_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{\omega_s} \quad (3-17)$$

Ovaj moment treba oduzeti od elektromagnetskoga momenta da bi se dobio stvarni zakretni moment M_{esr} :

$$M_{esr} = M_{es} - M_{Fe} \quad (3-18)$$



Slika 3.8. Mehanička snaga na osovini



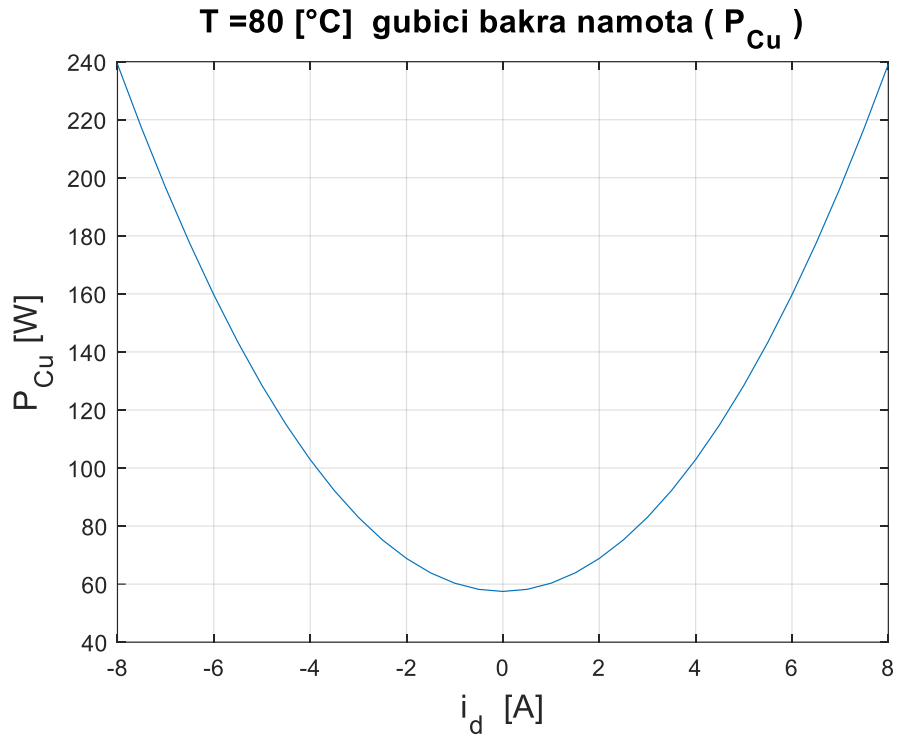
Slika 3.9. Električna snaga na stezaljkama pri gubicima P_{Cu}

3.4. Mjerenje napona, struje i snage

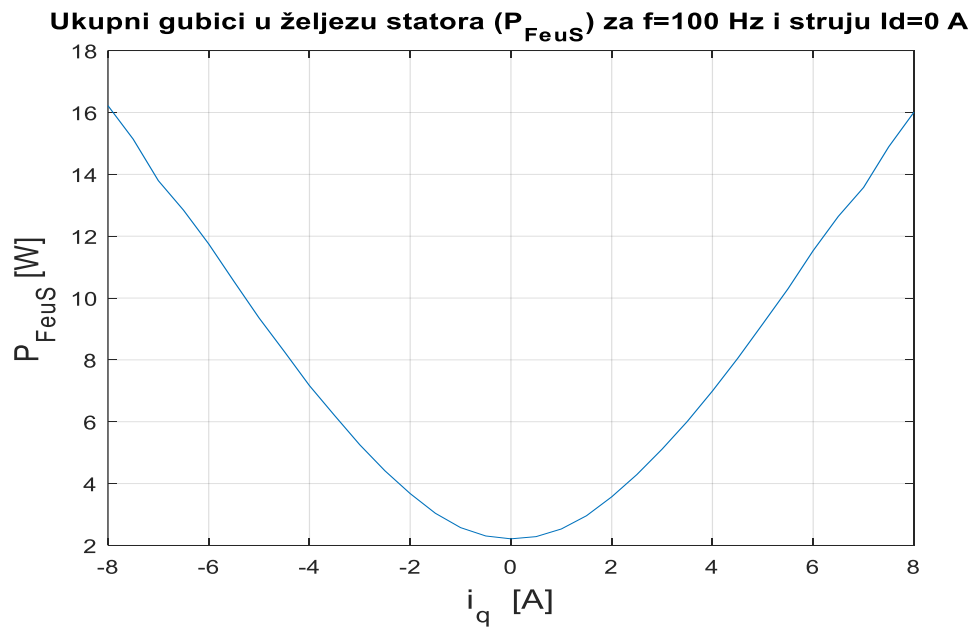
Provodeći testiranja s SMPM_a, može se doći do zaključka da mjerenjem struje, napona i snage s različitim instrumentima imamo značajna odstupanja. Instrumenti korišteni tokom testiranja uključuju voltmetar, ampermetar, vatmetar, digitalne multimetre i direktno ispitivanje koristeći računalo. Odstupanja u rezultatima su uzrokovana pulsno-širinskim valnim oblicima kojim su često napajani motori s permanentnim magnetima. Pulsno-širinski valni oblici su serije impulsa s različitim širinama. Uobičajeni instrumenti su dizajnirani za kontinuirane valne oblike, dok je pulsno-širinska modulacija diskontinuiranog tipa. Stoga, uobičajeni električni instrumenti ne mogu dati točne kvantitativne podatke pulsno-širinskih valnih oblika. U svrhu rješavanja ovog problema, predlaže se prikupljanje računalnih podataka kao i primjenjivanje filtera kako bi mjerenja bila kvalitetnija.

3.4.1. Prikupljanje računalnih podataka

Kako preciznost standardnih voltmetara i ampermetara nije adekvatna za mjerenja kod pulsno-širinskih valnih oblika, nužno je koristiti trenutne vrijednosti za izračun njihovih srednjih vrijednosti te za izračun snage. Sa brzim pretvaračima i mikroprocesorima, napon napajanja i struja SMPM_a se može pretvoriti u digitalne signale. Strujni senzor i naponski senzor trebaju imati vrlo malu propusnost te malo iskrivljenje signala. Vrijednost brzine vrtnje, snaga i faktor snage mogu se izvesti iz trenutnih vrijednosti koristeći računalni simulacijski softver kao što je Matlab.

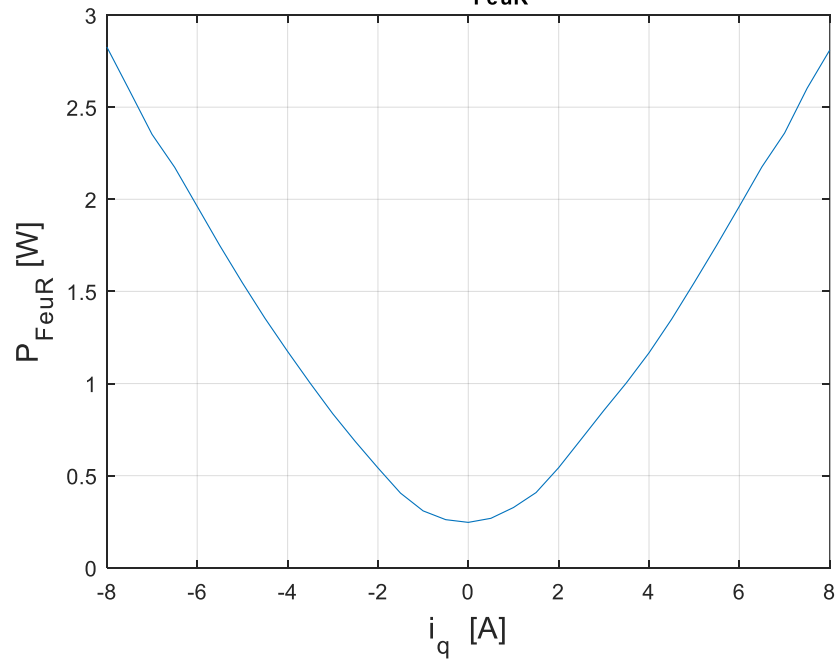


Slika 3.10. Gubici u bakru namota



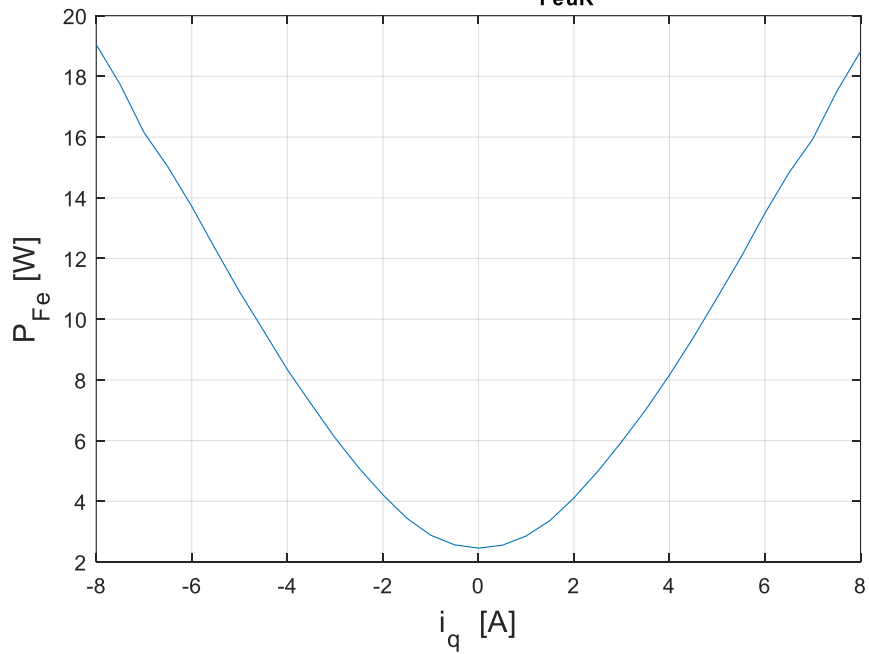
Slika 3.11. Ukupni gubici u željezu statora

Ukupni gubici u željezu rotora (P_{FeuR}) za $f=100$ Hz i struju $I_d=0$ A

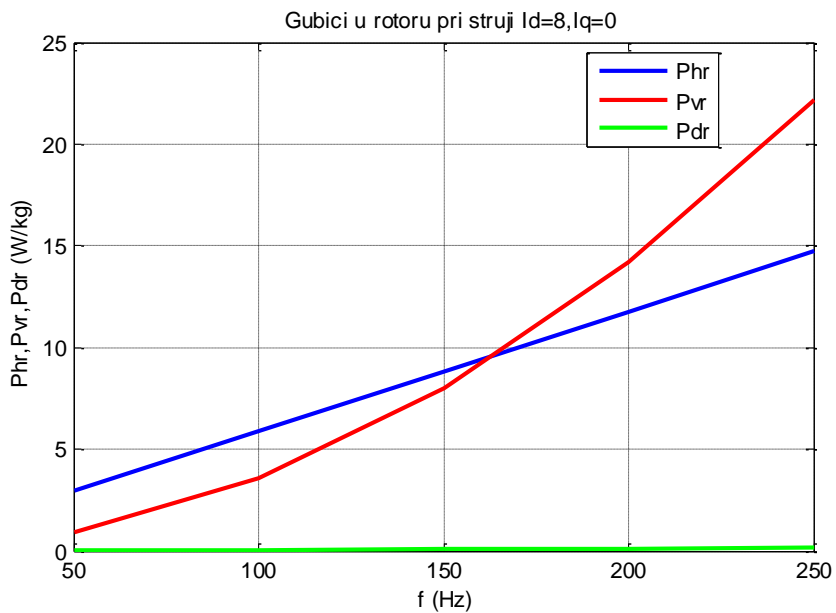


Slika 3.12. Ukupni gubici u željezu rotora

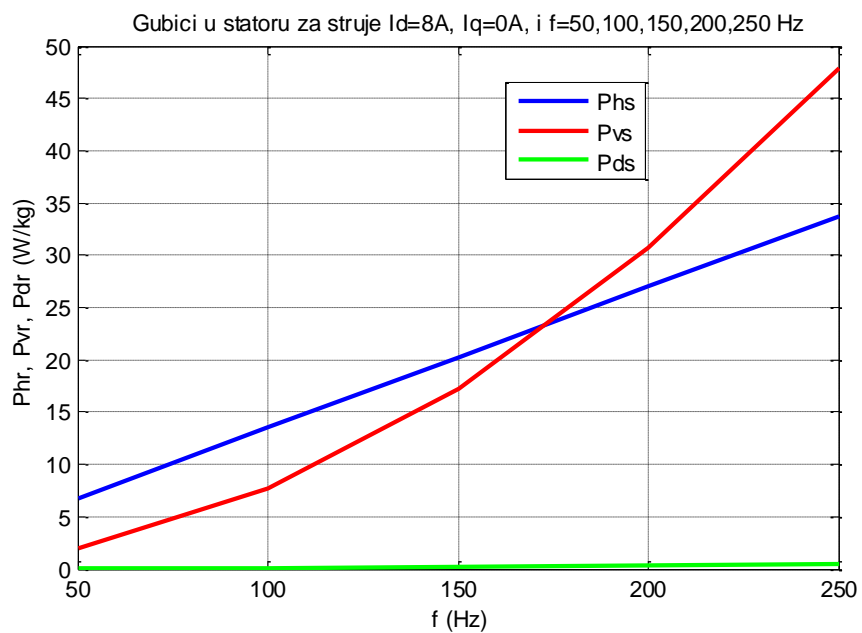
Ukupni gubici u željezu rotora i statora (P_{FeuR}) za $f=100$ Hz i struju $I_d=0$ A



Slika 3.13. Ukupni gubici u željezu rotora i statora



Slika 3.14. Gubici u rotoru pri struji $I_d=8A, I_q=0A$



Slika 3.15. Gubici u statoru za struje $I_d= 8 A, I_q= 0 A, f= 50,100,150,200,250$ Hz

3.5. Rastavljanje gubitaka željeza i mehaničkih gubitaka

Kod sinkronih motora sa permanentnim magnetima, gubici željeza i mehanički gubici su uvijek spomenuti zajedno. Kako bi shvatili gubitke željeza, potrebno je detaljnije objasniti mehaničke gubitke kod motora sa permanentnim magnetima, koji uključuju gubitke ventilacije i gubitke trenja. Tri su načina u ispunjavanju ovog zadatka. Prvi je način pomoću rotora indukcijskog motora. Drugi način je pomoću replike nemagnetskog statora i treći je izvođenjem mjerenja prije postavljanja magneta na rotor.

3.5.1. Metoda pomoću rotora indukcijskog motora

SMPM_a je obično ugrađen unutar istog okvira kao standardni indukcijski motor. Ukoliko je stator PM motora istih dimenzija kao što ima indukcijski stroj, rotor indukcijskog motora se može ugraditi, te se gubici trenja i ventilacije mogu izračunati. U ovakvom postupku, gubici trenja ležajeva će biti eventualno isti, ali neće nužno biti i gubici ventilacije. Razlog tome jest što će zračni procjep biti drugačiji te površinski-montirani PM rotor nema glatku površinu.

3.5.2. Metoda pomoću nemagnetskog statora

Metoda mjerenja gubitaka željeza zamjenjivanjem statora sa replikom nemagnetskog statora napravljenog od tvrde plastike sa identičnim geometrijskim dimenzijama kao što ima pravi stator. Kada je postavljen originalni stator, mjereni gubici uključuju gubitke željezne gubitke i mehaničke gubitke u statoru. Kada je magnetski rotor postavljen sa nemagnetskom replikom statora, tada se računaju samo mehanički gubici. Stoga, razlika između ove dvije metode će biti gubici željeza rotora i gubici željeza statora. U ovom postupku, trenje ležajeva može biti drugačije u replici statora, ukoliko mu je težina drugačija.

3.5.3. Metoda mjerenja prije postavljanja magneta

Praktična i precizna metoda za mjerenje mehaničkih gubitaka prije postavljanja magneta. Poželjno je postaviti PM motor sa nemagnetiziranim magnetima postavljenih na površinu rotora da simuliraju magnetski rotor. U ovom postupku, "lažni" motor ima istu konfiguraciju kao i pravi motor, samo bez gubitaka željeza. [10]

4. SMANJIVANJE GUBITAKA ŽELJEZA U SMPM_a

4.1. Optimizacija električnih strojeva

Uređaji elektromotornog pogona iskorištavaju oko 58% potrošene električne energije. Uz ovu korisnost motora, 93% energije je potrošeno indukcijskim motorima sa nazivnom snagom od 3.8 kW i većom, dok je 5% potrošeno indukcijskim motorima sa nazivnom snagom od 3.72 kW i manjom od toga. Istosmjerni motori i sinkroni motori troše samo 2% ukupne električne energije. Od 1982. Do 1992. Cijena električne energije je porasla od 120-150 %. Ovaj trend je natjerao mnoge proizvođače na rješavanje problema korisnosti električnih motora. Kako je u upotrebi električnih motora većina indukcijskih, tako se najveći fokus dao upravo optimizaciji indukcijskih motora. Međutim, indukcijski motori imaju svoje nedostatke, kao što su gubitci klizanja, koji su uvijek prisutni. Ovo je dovelo do potrage za alternativnim pristupom rješavanja ovoga problema. Jedan važan pristup pod tim uključujemo promjenjivu brzinu motora sa permanentnim magnetima. Sa pravim dizajnom, PM motori će obično imati veću energetska učinkovitost od bilo kojeg drugog rotacijskog stroja sa istom izlaznom snagom. Razlog tome je eliminacija omskog gubitka polja u odnosu na istosmjerne uzbuđene strojeve, te zbog eliminacije gubitaka rotora u odnosu na indukcijske motore. Općenito, strojevi sa permanentnim magnetima imaju prednost veće korisnosti, manjeg su obujma i težine, imaju veći faktor snage i bolju kontrolu upravljanja. [11]

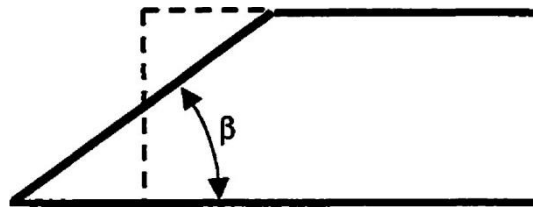
Prije 30 godina, bio je mali interes za pogone sa strojevima sa permanentnim magnetima. Interes se povećao pojavljivanjem novog rijetkog materijala permanentnog magneta sa njegovim visokoenergetskim proizvodima i niske cijene troškova, te je svijet industrije prepoznao strojeve sa permanentnim magnetima da nisu samo niskoenergetski uređaji sa minimalnom komercijalnom važnošću, te se mogu iskoristiti na puno bolji način. Sa prednostima koje ima i niskom cijenom, sada je moguće uzeti u obzir koristiti ovakve motore u primjeni pogona sa kompresorima, pumpama, ventilatorima, gdje će se visoki troškovi proizvodnje brzo isplatiti uštedom energije koristeći ovaj tip motora.

Gubici SMPM_a se mogu rastaviti na četiri dijela. To su gubitci ventilacije statora, gubitci željeza, mehanički gubitci i zalutali gubitci. Smanjivanje ovih gubitaka moguće je korištenjem boljeg materijala, ili poboljšanjem, tj. Optimizacijom dizajna motora i njegovih parametara, ili i jednom i drugom metodom.

U ovome poglavlju, u nekim pristupima je predloženo smanjiti gubitke željeza SMPM_a održavajući maksimalni moment i maksimalnu korisnost. Ovi pristupi zahtjevaju odgovarajuće dizajne motora, utora i određen broj polova. [12]

4.2. Oblik magneta

Zakošenje ruba će promijeniti nagib valnog oblika zuba. U svrhu testiranja, izvodi se metoda konačnih elemenata na 4-polnom motoru sa promjenjivim kutom β ruba magneta vidljivo je na slici 4.1. Isprekidana linija je originalni magnet sa pravokutnim rubovima.



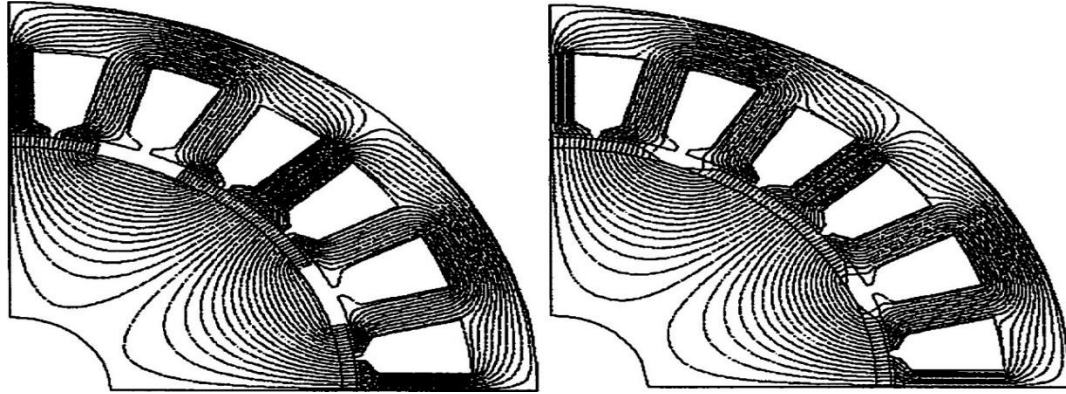
Slika 4.1. Zakošenje ruba magneta

U svrhu dobivanja konzistentnih rezultata, volumen magneta je ostao konstantan pri mjenjanju ruba magneta. Tablica 4.1. prikazuje računate gubitke željeza motora metodom konačnih elemenata za različite rubove magneta.

Tablica 4.1. Gubici vrtložne struje zuba i zakošenje magneta na 50 Hz

Kut kosine	90°	75°	63°	51°	39°	27°
Gubitak vrtložne struje zuba (W)	29.5	29.4	29.2	28.8	28.1	26.7
Gubitak histereze zuba(W)	14.5	14.4	14.4	14	14.4	14.4
Gubitak vrtložne struje jarma(W)	20.6	20.6	20.6	20.5	20.5	20.3
Gubitak histereze jarma (W)	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.7
Ukupni gubici željeza (W)	77.0	77.0	76.8	76.0	75.6	74.1
Ukupni protok zraka po polu ($\times 10^{-3}Wb$)	1.3768	1.3770	1.3773	1.3777	1.3789	1.3820
Smanjenje gubitaka vrtložne struje zuba (%)	-	-0.2	-1.0	-2.3	-4.8	-9.5
Ukupno smanjenje gubitaka željeza (%)	-	-0.1	-0.4	-1.4	-1.9	-3.9

Može se vidjeti iz tablice (4.1.) da se povećanjem kosine ruba magneta smanjuju gubici struje zuba. U slučaju kada je magnet zakošen na 27°, gubici vrtložne struje zuba su smanjeni za 9.5% ; ukupni gubici željeza su smanjeni za 4%, dok je ukupni zračni protok i ostale sastavnice gubitaka željeza skoro konstantne. Slika 4.2. prikazuje distribuciju toka promatranih motora sa nezakošenim i zakošenim rubovima magneta.

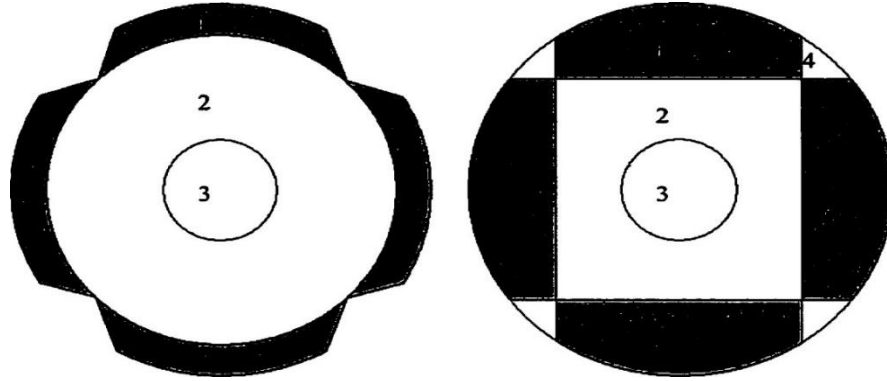


Slika 4.2. Distribucija toka motora sa nezakošenim i zakošenim rubovima magneta

4.2.1. Oblikovanje magneta

Prema prethodnim rezultatima i tvrdnjama, slični ali alternativni pristupi mogu se primjeniti za ostvarenje istog učinka kao kod zakošenja ruba magneta. Kod jedne metode se koriste zakrivljeni magneti sa najvećom debljinom u sredini i najtanjom kod dva kraja, vidljivo na slici 4.3. (b). To će poboljšati zakrivljenost valnih oblika toka zuba i jarma. Stoga, može se smanjiti gubitak vrtložnih struja. Nedostatak ove metode jest što će sama proizvodnja ovakvih magneta biti složenija, a time i skuplja.

Druga metoda je paralelno magnetizirati magnete sa povećanjem toka sa krajeva prema sredini magneta. Nedostatak ove metode jest nedovoljna iskorištenost magneta.



Slika 4.3. PM rotor sa zakošenim i zakrivljenim magnetima

(a) Zakošeni magneti

(b) Zakrivljeni magneti

1- magnet

2-jezgra

3-osovina

4-nemagnetski materijal

4.2.2. Širina i pokrivenost magneta

Mjenjanjem širine magneta u širokom rasponu ne mijenja maksimalnu gustoću toka postignutu na zubu, niti mijenja kosinu valnih oblika toka zuba. Međutim, kada je prostor između dva magneta manji od jednog polja za utor, nagib toka zuba počinje rasti. Naročito kada je pokrivenost magneta postiže vrijednost 1.0, nagib toka zuba raste i tako rastu gubici vrtložne struje zuba. Stoga, za m-faza PM motora sa q utorima po polu faze, maksimalna pokrivenost magnetima s povezanim tokom ali niskim gubitcima vrtložne struje zuba je:

$$\frac{1}{mq} < \alpha < \frac{mq-1}{mq} \quad (4-1)$$

Kako su gubici vrtložne struje jarma aproksimalno obrnuto proporcionalni pokrivenosti magneta, pokrivenost magneta trebala bi biti dovoljno velika u svrhu smanjivanja gubitaka vrtložne struje jarma. U drugom slučaju, širina magneta također ima veliki utjecaj na zatezanje okretnog momenta. Optimalna pokrivenost magneta za postizanje najmanjeg zatezanja je:

$$\alpha = \frac{(n+0.14)\lambda}{\tau} = \frac{n+0.14}{mq} \quad (4-2)$$

Gdje je n bilo koji cijeli broj koji zadovoljava uvjet $\alpha < 1$.

Kombinacijom izraza (4-1) i (4-2), može se dobiti optimalna magnetska pokrivenost. Primjer za motore sa dva utora po polu jedne faze ($m=3$, $q=2$), pokrivenost magneta koji zadovoljava uvjet (4-1) i (4-2) je $\alpha=0.527$ ili $\alpha=0.693$. U svrhu smanjivanja gubitaka vrložne struje jarma, optimalna magnetska pokrivenost je $\alpha=0.693$. [13,14]

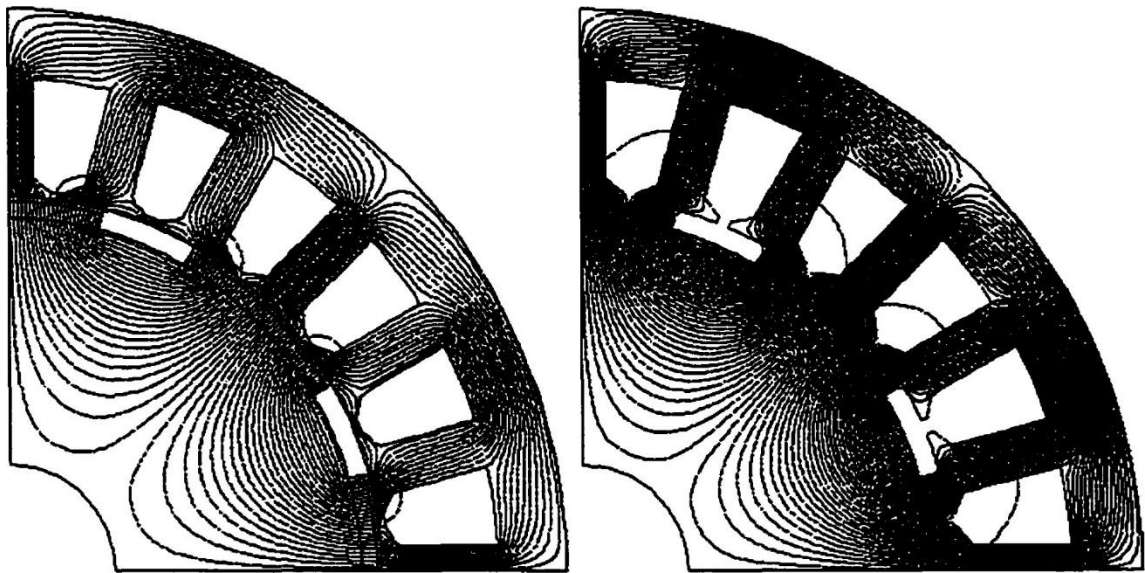
4.3. Oblikovanje utora

4.3.1. Broj utora

Prema [15,16,17,18] Za danu frekvenciju napajanja, gubici vrložne struje su proporcionalni broju utora po polu jedne faze. Stoga, korisnije je koristiti manje ali šire zube. Minimalna mogućnost korištenja je 1 utor po polu jedne faze. Sa druge strane, za prilično dobru aproksimaciju sinusoidalne aproksimacije inducirane elektromotorne sile, broj utora po polu jedne faze bi trebao biti barem dva.

4.3.2. Zatvaranje utora

Povećanjem zatvaranja utora, može se povećati vrijednost maksimalnog toka gustoće zračnog procjepa ukoliko je ista količina magnetskog materijala korištena. Distribucija toka 8-polnog PM motora sa različitim zatvaranjem utora je prikazana na slici **4.4**. Mali otvori utora su prihvaćeni kod većine motornih dizajna. Razlog tomu jest iako smanjenjem otvora utora se ne smanjuju gubici željeza statora motora, povećavaju izlazni moment i smanjuju gubitke vrložne struje rotora. Međutim, potpuno zatvaranje utora, kao na slici **4.4**, će povećati protok curenja na dnu utora. Ovaj tok ne pridonosi razvoju momenta, ali povećava gubitke željeza. Stoga, zatvoreni utori nisu preporučeni.



Slika 4.4. *Distribucija toka s potpuno zatvorenim utorima i djelomično zatvorenim utorima*

a) Potpuno zatvoren utori

b) Djelomično zavoren utori

4.4. Broj polova

Pogoni promjenjive brzine su neovisni od nametnutih ograničenja broja polova kod izmjeničnih motora upravljanih na konstantnoj frekvenciji. Pretvarač može upravljati na frekvenciji od nekoliko herca do nekoliko stotina herca. Ovo omogućuje slobodan odabir broja polova za postizanje najboljeg mogućeg dizajna motora. Povećanjem broja polova, smanjuje se duljina krajeva namota, a time i uporaba bakra te gubici bakra statora se smanjuju. Debljina jarma statora je također smanjena, a time je smanjena uporaba materijala jezge za jaram. Sa povećanjem broja polova za isti okvir zbog smanjenja debljine jarma i/ili povećanjem unutarnjeg radijusa statora se može dobiti veća izlazna snaga ili moment. Budući da je radna frekvencija se proporcionalno povećava sa brojem polova u svrhu održavanja željene brzine, gubici vrtložne struje se povećavaju unatoč činjenici da je smanjena masa materijala jezgre. U svrhu sadržavanja baze podataka za usporedbu, naredne analize daju pretpostavke o danom okviru i brzini. Ova pretpostavka je bazirana na nepromjenjivoj duljini jezgre stroja i nepromjenjivim gubitcima bakra i mehaničkim gubitcima (gubici trenja i ventilacije).

4.4.1. Utjecaj broja polova na gubitke željeza

Broj utora je obično ograničen veličinom okvira motora. Kada je poznat broj utora, broj utora po polu jedne faze je obrnuto proporcionalan broju polova. Prema [15] Gubici vrtložne struje zuba i gubici histereze zuba se mogu napisati kao:

$$P_{et} = \frac{pS}{900} k_q k_c k_e B_{th}^2 n^2 V_t \quad (4-3)$$

$$P_{hr} = \frac{\pi n p}{60} k_h B_{th}^\beta V_t \quad (4-4)$$

Gdje je S ukupan broj utora statora

$$S = mpq \quad (4-5)$$

Stoga, i gubici vrtložne struje zuba i gubici histereze zuba su proporcionalni broju polova.

Volumen jarma se može izraziti kao funkcija broja polova:

$$V_y = \pi r_j^2 - \pi \left(r_j - \frac{2}{p} d_{y2} \right)^2 = \frac{4\pi d_{y2}}{p} \left(r_j - \frac{d_{y2}}{p} \right) \quad (4-6)$$

Gdje je r_j vanjski radijus statora, d_{y2} je debljina jarma motora sa 2-polnom konfiguracijom.

Gubici vrtložne struje jarma i gubici histereze jarma se mogu napisati kao:

$$P_{ey} = \frac{\pi p n^2}{112\alpha} k_r k_e B_y^2 d_{y2} \left(r_j - \frac{d_{y2}}{p} \right) \quad (4-7)$$

$$P_{hy} = \frac{\pi^2 n}{15} k_h B_y^\beta d_{y2} \left(r_j - \frac{d_{y2}}{p} \right) \quad (4-8)$$

Stoga, gubici vrtložne struje jarma su proporcionalni broju polova, dok gubici histereze jarma ostaju otprilike isti pri promjeni broja polova. Kao primjer nam može poslužiti 4-polni PM motor. Gubici željeza su izračunati u tablici 4.2. Ukupan broj utora je S=36. Mogući broj polova su 2,4,6 i 12. Može se vidjeti iz tablice 4.2. da se gubici željeza motora povećavaju za 24 W ukoliko se broj polova udvostruči.

Tablica 4.2. Gubitci željeza kao funkcija broja polova

Broj polova	2	4	6	12
Upravljačka frekvencija (Hz)	30	60	90	180
Gubitci vrtložne struje zuba (W)	8.7	17.3	26.0	52.0
Gubitci vrtložne struje jarma (W)	8.5	18.2	27.6	55.8
Gubitci histereze zuba (W)	5.4	10.8	16.4	32.6
Gubitci histereze jarma (W)	21.4	22.3	22.8	23.2
Gubitci željeza (W)	44.1	68.8	92.7	163.8

4.4.2. Utjecaj broja polova na moment

Prema [16] Izraz za moment permanentnog motora je:

$$T_q = 2\pi r^2 l_{fe} B_{lg} K_{l\delta} \quad (\text{Nm}) \quad (4-9)$$

Gdje su B_{lg} i $K_{l\delta}$ efektivna vrijednost toka zračnog procjepa i linearna gustoća struje unutarnjim krajevima statora.

Linearna gustoća struje se može iskazati kao funkcija struje statora:

$$K_{l\delta} = \frac{mW I_a}{\pi r} \quad (\text{A/m}) \quad (4-10)$$

Gdje je W ukupan broj namota za svaku fazu, r je unutrašnji radijus statora.

Stoga, moment motora je funkcija radijusa rotora, gustoće toka zračnog procjepa i struje statora. Ukoliko je pretpostavka da je gustoća toka zračnog procjepa konstantna i struja statora, tada je:

$$T = k_t r \quad (\text{Nm}) \quad (4-11)$$

Pretpostavimo da je visina utora konstantna. Prema [17] Tada se unutrašnji radijus statora može izraziti kao funkcija broja polova:

$$r = r_j - \frac{2}{p} d_{y2} - d_t \quad (4-12)$$

Vidljivo je iz izraza (4-12) kada je broj polova p malen, porast radijusa r je značajan kako broj polova raste. Tako, povećava se i moment povećavajući broj polova, pretpostavljajući da je broj polova malen.

Kao primjer ćemo uzeti okvir 4-polnog PM motora. Moment je

$$T = k_t \left(r_j - \frac{2}{p} d_{y2} - d_t \right) = 332 \times \left(0.095 - \frac{0.0696}{p} - 0.0172 \right) \quad (4-13)$$

Moment motora kao funkcija broja polova je prikazan u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Moment kao funkcija broja polova

Broj polova	2	4	6	12
Moment (Nm)	14.3	20.0	22.0	23.9
Porast momenta (%)	-	40	10	8.6

Vidljivo je iz tablice 4.3. da se moment povećava 40 % u slučaju povećavanja broja polova sa dva na četiri. Povećavanjem sa četiri na 6 polova, taj rast iznosi 10 %. Zadnji slučaj je povećavanje broja polova sa šest na dvanaest, te rast momenta iznosi 8.6%

4.4.3. Optimalan broj polova

Optimalan broj polova se mijenja mjenjanjem primjena. Kriterij je postizanje optimalne učinkovitosti i maksimalnog momenta. Prema [18] Učinkovitost motora je:

$$\eta = \frac{P_{izl}}{P_{izl} + p_{fw} + p_{Cu} + p_{iron}} \quad (4-14)$$

Izlazna snaga P_{izl} i gubitci željeza p_{iron} su funkcije broja polova p . Za gubitke bakra i gubitke trenja je pretpostavka da su konstantni. Optimalna učinkovitost se može otkriti rješavanjem izraza:

$$\frac{d\eta}{dp} = 0, \quad p = 2,4,6,8 \dots \quad (4-15)$$

Tablica 4.4. Moment i učinkovitost kao funkcije broja polova pri brzini od 1800 okr/min

Broj polova	2	4	6	12
Moment (Nm)	14.3	20.0	22.0	23.9
Učinkovitost (%)	89.0	91.4	91.6	90.9

Izbor broja polova ovisi o primjeni. Zahtjeva ravnotežu korištenih materijala, postignuti maksimalni moment, učinkovitost i trošak proizvodnje. Obično je najbolji izbor sa četiri, šest ili osam polova među svim mogućnostima u dizajniranju motora sa permanentnim magnetima. U manjim strojevima, broj polova je ograničen maksimalnim brojem utora koji su opet ograničeni sa minimalnom praktičnom širinom zuba i utora statora.

5. ZAKLJUČAK

Bazirano na modelima, evaluacija gubitaka željeza za površinski montirane PM sinkrone motore se može izvesti bez velikih napora vremenski usklađene metode konačnih elemenata. Ovi modeli daju konstruktorima motora bolji i precizniji alat za predviđanje gubitaka željeza površinski montiranog PM sinkronog motora u njegovom prvotnom obliku ovisno o veličinama konstrukcije.

Od razvoja pojednostavljenih modela površinski montiranih sinkronih motora sa permanentnim magnetima sa uključenim gubitcima, zaključci za gubitke vrtložne struje zuba su sljedeći:

- Za pravokutno obrubljene magnete, gustoća toka u zubu SMPM_a je približno ujednačena. Uobičajena komponenta gustoće toka zuba je trapezoidnog valnog oblika.
- Za aproksimirane trapezoidne valne oblike toka normalne komponente gustoće toka zuba, vrijeme potrebno da se podigne od nule do vrha je približno vrijeme potrebno da magnetski rubovi prijeđu jedan utora.
- Gubici vrtložne struje u zubu SMPM_a može se procijeniti prvo uzimajući u obzir normalnu komponentu gustoće toka zuba, a zatim korekcijski faktor za obodnu komponentu.
- Za zadanu radnu frekvenciju, gubici vrtložne struje zuba za SMPM_a su proporcionalni broju utora po polu jedne faze.
- Za zadani moment i brzinu, gubici vrtložne struje zuba su približno proporcionalni umnošku broju polova na kvadrat i broja utora pola po fazi.
- Gubici vrtložne struje zuba su neovisni o kutnoj širini magneta.
- Mjenjanjem širine zuba na većem rasponu sa istim brojem utora neće promijeniti gubitke vrtložne struje zuba motora sa permanentnim magnetima.
- Gubici vrtložne struje zuba ne ovise o zatvaranju utora.
- Korekcijski faktor se može prikazati za odražavanje učinka duljine zračnog procjepa, utora i debljine magneta motora.

Za gubitke vrtložne struje jarma se mogu napisati sljedeći zaključci:

- Obodna komponenta gustoće toka jarma je približno podjednako distribuirana preko debljine jarma. Može se usporediti sa trapezoidnim valnim oblikom. Vrijeme potrebno za ovu komponentu da od nule naraste do vrha jest vrijeme kada točka u jarmu prijeđe pola magnetske širine.
- Normalna komponenta gustoće toka jarma ima isti valni oblik kao i onaj kod valnog oblika gustoće toka zuba. Vršna vrijednost gustoće toka jarma je linearno distribuirana preko debljine jarma sa vrijednošću nule na površini jarma i maksimalnom vrijednošću u blizini zuba.
- Gubici vrtložne struje jarma se mogu izjednačiti prvo uzimajući u obzir obodnu komponentu, a zatim korekcijski faktor za normalnu komponentu.
- Za danu frekvenciju, gubici vrtložne struje jarma su obrnuto proporcionalni magnetskoj pokrivenosti.
- Za dani moment i brzinu, gubici vrtložne struje jarma su proporcionalni kvadratu broja polova.
- Glavne geometrijske varijacije kao što su debljina magneta, duljina zračnog procjepa, broj utora po polu jedne faze i širina zuba sinkronog motora sa permanentnim magnetima nema veliki utjecaj na gubitke vrtložne struje jarma.

Provedena su mjerenja gubitaka željeza na površinski montiranom SMPM_a. U ovome radu je objašnjena širinsko-pulsna modulacija valnih oblika te fazorski dijagrami, uz pomoć kojih smo potvrdili ispravnost naših mjerenja na sinkronom motoru sa permanentnim magnetima sa uključenim gubitcima.

U radu su predloženi generalni pristupi za smanjivanje gubitaka željeza SMPM_a. Gubici željeza SMPM_a se mogu smanjiti primjenom jedne od metoda:

- Kosi magneti, zakrivljeni magneti i optimizirana magnetska pokrivenost će smanjiti gubitke željeza u SMPM_a
- Koristeći manji broj utora, ali šire utore može smanjiti gubitke vrtložne struje zuba.
- Koristeći više polova može povećati moment motora. Optimalan broj polova je 4,6 ili 8 ovisno o primjeni

Literatura

- [1] J. Kolonić, *Bez kolektorski istosmjerni motori (strojevi)*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2010.
- [2] M. Chunting, "Modelling of iron losses of permanent magnet synchronous motors," 2001. [Online].
- [3] K. Strnat, *Modern permanent magnets for applications in electro-technology*, 1990.
- [4] B. A. C. M. C. D. F. F. i. L. M. Bertotti G., *An Improved Estimation of Iron Losses in Rotation Electrical Machines*, 1991.
- [5] R. V. a. W. P. Zhu J. G., *Finite Element Calculation of Core Losses in Motors with Non-Sinusoidal Fields*, Manchester, UK, 1992.
- [6] G. Š. M. H. I. Z. A. M. T. B. Štumberger, *Permanent magnet synchronous motor with exterior-rotor: distributed or concentrated windings-motor performance*, Baiona, Spain, 2005.
- [7] J. Gieras, *Permanent magnet motor technology: design and applications*, CRC Press, 2010.
- [8] V. Ćorluka, "MODELIRANJE SINKRONOG MOTRA S UNUTARNJIM PERMANENTNIM MAGNETIMA I KONCENTRIRANIM NAMOTOM," 2018. [Online]. Available: <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:1727>.
- [9] D. Žarko, *Dinamički model sinkronog stroja*, Zagreb, 2011.
- [10] C. Yung-kang, "A permanent magnet synchronous motor for an electric vehicle-design analysis," 2004. [Online].
- [11] J. Luukko, *Direct torque control of permanent magnet synchronous machines - analysis and implementation*, 2000.
- [12] i. D. N. Jamil M.K, *Harmonics and Core Losses of Permanent Magnet DC Motors Controlled by Chopper Circuits*, 1990.
- [13] F. Deng, *An Improved Iron Loss Estimation for Permanent Magnet Brushless Machines*, New York, 1999.
- [14] F. Deng, *An Improved Iron Loss Estimation for Permanent Magnet Brushless Machines*, New York, 1997.
- [15] G. Slemon, *Core Losses in Permanent Magnet Motors*, 1990.
- [16] i. W. S. Tseng K.J, *Analysis of Flux Distribution and Core Losses in Interior Permanent Magnet Motors*, 1999.
- [17] B. Amin, *Contribution to Iron-Loss Evaluation in Electrical Machines*, 1995.

[18] M. C. i. J. X., Effect of Ring Material on Airgap Flux of Permanent Magnet Machines, 1993.

SAŽETAK

Tema ovog rada je bolji pristup vrednovanja gubitaka željeza na površinski montiranom sinkronom motoru.

PM sinkroni motori imaju veću učinkovitost od indukcijskih motora sa istim okvirom i istim nazivnim vrijednostima. Unatoč tome, u PM sinkronim motorima se stvaraju veći gubici željeza od onih u indukcijskim motorima. Stoga, precizni izračuni i smanjivanje gubitaka željeza su od značajne važnosti u dizajniranju sinkronih motora sa permanentnim magnetima.

Iako vremenski usklađena metoda konačnih elemenata može pružiti dobru procjenu gubitaka željeza, zahtjeva velike napore i dugotrajna je za većinu dizajna motora, a naročito za optimizaciju. Uostalom, MKE se može provesti samo kada su određene geometrijske veličine. Ipak, približno prikazani analitički model gubitaka daje brzi uvid zahtjevajući manje vremena za proračune te su dostupni u preliminarnoj fazi kada se ponavlja dizajniranje motora. Stoga, poželjno je razviti modele sa prihvatljivom procjenom gubitka željeza.

U ovom radu, pojednostavljeni modeli za procjenu gubitaka vrtložnih struja zuba i jarma su bazirani analiziranjem rezultata metode konačnih elemenata i analitičkim analizama magnetskog polja. Provedena su istraživanja učinkovitosti i ograničenja modela. Korekcijski faktori su izvedeni zbog geometrijskih utjecaja.

Gustoća toka valnih oblika ima veliki utjecaj na gubitke željeza. Stoga, smanjivanje gubitaka željeza se može postići pravilnim oblikovanjem magneta, dizajniranjem utora i biranjem primjerenog broja polova.

U svrhu testiranja preporučenih pojednostavljenih modela za gubitke, mjerenja su izvršena na dva površinski montirana SMPM_a. Najveća pozornost se usmjerila mjerenje pulsno-širinskih valnih oblika i rastavljanju gubitaka u praznom hodu. Rezultati eksperimenta dvaju motora su potvrdili ispravnost procjene modela gubitaka željeza.

Ključne riječi: Gubici željeza, Metoda konačnih elemenata, modeli gubitaka, pulsno-širinska modulacija valnih oblika, sinkroni motor sa permanentnim magnetima.

ABSTRACT

This thesis proposes a refined approach to evaluate iron losses of surface-mounted permanent magnet (PM) synchronous motors.

PM synchronous moton have higher efficiency than induction machines with the same frame and same power ratnigs. However, in PM synchronous motors, iron losses form a larger portion of the total losses than in induction machines. Therefore, accurate calculation and minimization of iron losses is of particular importance in the design of PM synchronous motors.

Although time-stepped FEM can provide good estimations of iron losses, it requires high effort and is very time-consuming for most designs and particularly for optimizations. Besides, FEM analysis can oniy be performed after the machine geometrical dimensions have been determined. In contrast, approximate analytical loss mode1 yields quick insight while requiring much less computation time and are readily available during the preliminary stage when the motor design is being iterated. Therefore, it is desirable to develop iron loss models that produce an acceptable prediction of the overall iron losses.

In this thesis, simplified models for the estimation of tooth and yoke eddy current losses are developed based on the observations of FEM results and analytical analyses of the magnetic fields taking into account detailed geometrical effects. The effectiveness and limitations of the models are investigated. Correction factors are derived for geometrical influences.

The nature of the flux density waveform has great impact on iron losses. Therefore, reduction of iron losses can be achieved by properly shaping the magnets, designing the slots and choosing appropriate number of poles.

In order to test the proposed simplified loss models, measurements were performed on two surface-mounted PM synchronous motors. Particular attention was focused on the measment of PWM wavefoms and decomposition of no-load losses. Experimental results of the two motors confirmed the validity of the proposed iron loss models.

Key Words: Finite Element Method,Iron losses,Loss models,Permanent magnet synchronous motor, Pulse-width modulation waveforms.