

ELEKTROTEHNI^KI FAKULTET
BEOGRAD

POSTDIPLOMSKE STUDIJE

Profil: UPRAVLJANJE SISTEMIMA

Predmet: Mikroprocesorsko upravljanje elektromotornim pogonima

UTICAJ RASIPNIH INDUKTIVNOSTI SINHRONOG MOTORA SA PERMANENTNIM
MAGNETIMA NA EKSPLOATAIONU KARAKTERISTIKU POGONA

-semestralni rad-

MENTOR:
dr Slobodan Vukosavi }

KANDIDAT:
Matijevi } Vladimir

BEOGRAD , maj, 1996. godine

SADR@AJ:

1.	Matemati~ki model sinhronog motora sa permanentnim magnetima	1
2.	Eksploaciona karakteristika sinhronog motora sa permanentnim magnetima	1
3.	Prikaz simulacionih rezultata	2
4.	Listinzi programa	5
5.	Literatura	8

MATEMATI^KI MODEL SINHRONOG MOTORA SA PERMANENTNIM MAGNETIMA U D-Q KOORDINATNOM SISTEMU

Radi pogodnog matemati~kog opisa sinhronog motora uvode se uobi~ajene polazne pretpostavke [1]. Smatra se da su fazni namoti statora identi~ni i me|usobno pomereni za 120° elektri~nih, magnetopobudna sila po obimu zazora je sinusoidalno raspore|ena, zanemaruje se magnetno zasi}enje, parametri su konstantni.

Matemati~ki model sinhronog motor napisan u d-q ravni glasi:

$$v_d = Ri_d + \frac{d}{dt}\lambda_d - \omega_s\lambda_q \quad (1)$$

$$v_q = Ri_q + \frac{d}{dt}\lambda_q + \omega_s\lambda_d \quad (2)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (3)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{sf} \quad (4)$$

gde su v_d i v_q naponi statora po d i q osi, i_d i i_q su statorske struje po d i q osi, L_d i L_q su induktivnosti po d i q osi, λ_d i λ_q su fluksevi po d i q osi, R je otpornost statora, ω_s je u~estanost napajanja i λ_{sf} je fluks od stalnog magneta na rotoru. Elektromagnetni moment koji se razvija dat je slede}om jedna~inom:

$$T_e = 3P[\lambda_{sf}i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] / 2 \quad (5)$$

gde je P broj pari polova motora. U~estanost napajanja motora je povezana sa u~estano}u obrtanja rotora sa slede}om jedna~inom:

$$\omega_s = P\omega_r \quad (6)$$

gde je ω_r u~estanost obrtanja rotora motora.

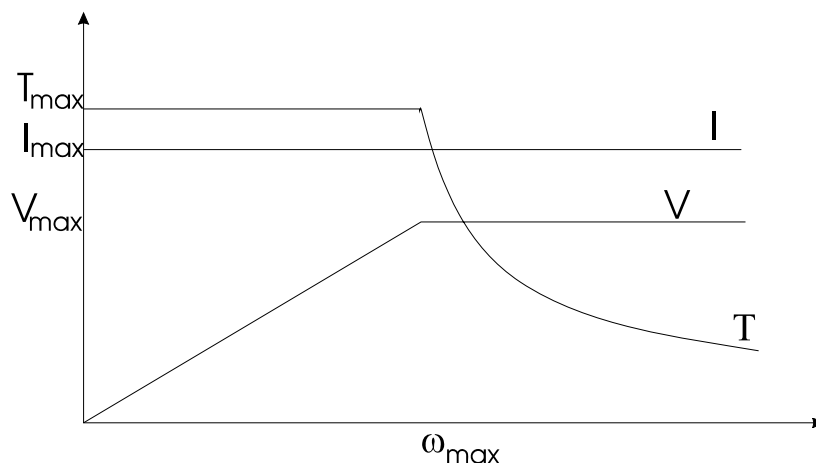
EKSPLOATACIONA KARAKTERISTIKA SINHRONOG MOTORA SA PERMANENTNIM MAGNETIMA

Jedna od veoma va`nih karakteristika svakog motora je njegova eksploataciona karakteristika odnosno zavisnost maksimalnog momenta motora od brzine. Dva su osnovna uslova koja oblikuju envelopu momenta u funkciji brzine i to su:

- Nominalna struja motora nesme biti du`e vremena prekora~ena jer }e do}i do preteranog zagrevanja motora.
- Nominalni napon nemo`e biti prekora~en zbog fiksnog maksimalnog napona invertora koji napaja motor.

Pri brzinama koje su ni`e od nominalne brzine motora uslov o nominalnoj struji je dominantan jer je napon indukovan u statoru motora srazmeran (maloj) brzini rotora. Iz ovog razloga envelopa momenta predstavlja pravu liniju za brzine ni`e od nominalne (Slika 1.). Kada brzina rotora postane ve}a od nominalne uticaj na envelopu momenta uzima i uslov o nominalnom naponu koji nesme biti prevazi}en. Usled toga {to indukovana kontraelektromotorna sila raste sa pove}anjem brzine

proporcionalno se mora smanjivati fluks kako napon na prikljucima motora ne bi bio veći od nominalnog (to ima za posledicu opadanje envelope momentna (Slika 1).



Slika 1. Karakteristika zavisnost maksimalnog momenta od brzine

Ova dva uslova se mogu napisati sledećim jednačinama:

$$i_d^2 + i_q^2 = i_{nom}^2 \quad (7)$$

$$v_d^2 + v_q^2 = v_{nom}^2 \quad (8)$$

imajući u vidu da se posmatra sistem u stacionarnom stanju (svi prelazni procesi su završeni) jednačine (1-4) se mogu napisati na sledećim način:

$$v_d = R i_d - \omega_s \lambda_q \quad (9)$$

$$v_q = R i_q + \omega_s \lambda_d \quad (10)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (11)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{sf} \quad (12)$$

Jednačine (7-12) na jednoznačan način definišu zavisnost maksimalnog momenta od brzine obrtanja motora.

PRIKAZ SIMULACIONIH REZULTATA

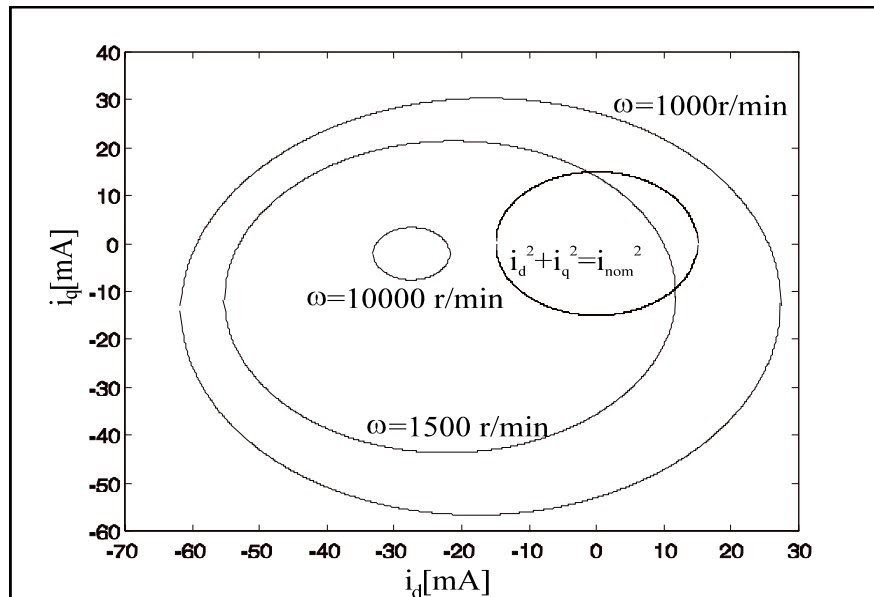
U radu se analizira uticaj rasipnih induktivnosti sinhronog motora sa permanentnim magnetima na eksploatacionu karakteristiku pogona. Parametri motora koji su korišćeni za simulaciju su dati u tabeli 1.

R[Ω]	P	L _d [mH]	L _q [mH]	λ _{sf} [V/(rad/s)]	i _{nom} [A]	u _{nom} [V]	ω _{nom} [s ⁻¹]
1.4	6	5.6	5.8	0.1546	15	100	1450

Tabela 1.

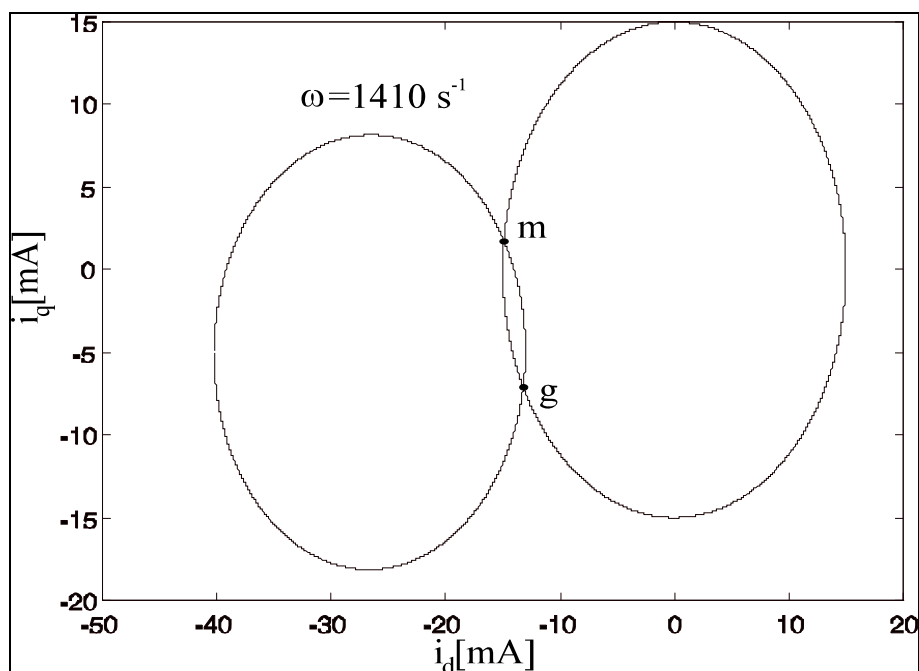
Da bi ispitao uticaj rasipnih induktivnosti na eksploatacionu karakteristiku pogona, menjao sam veličinu rasipnih induktivnosti L_d i L_q oko

katalogu njihovih vrednosti. Izražavanje karakteristike sam vrši se po proceduri definisanoj jednačinama (7-12). Jednačina (7) predstavlja jednačinu kruga dok



Slika 2. Jednaine struje i napona u d-q koordinatnom sistemu za razliite vrednosti brzine

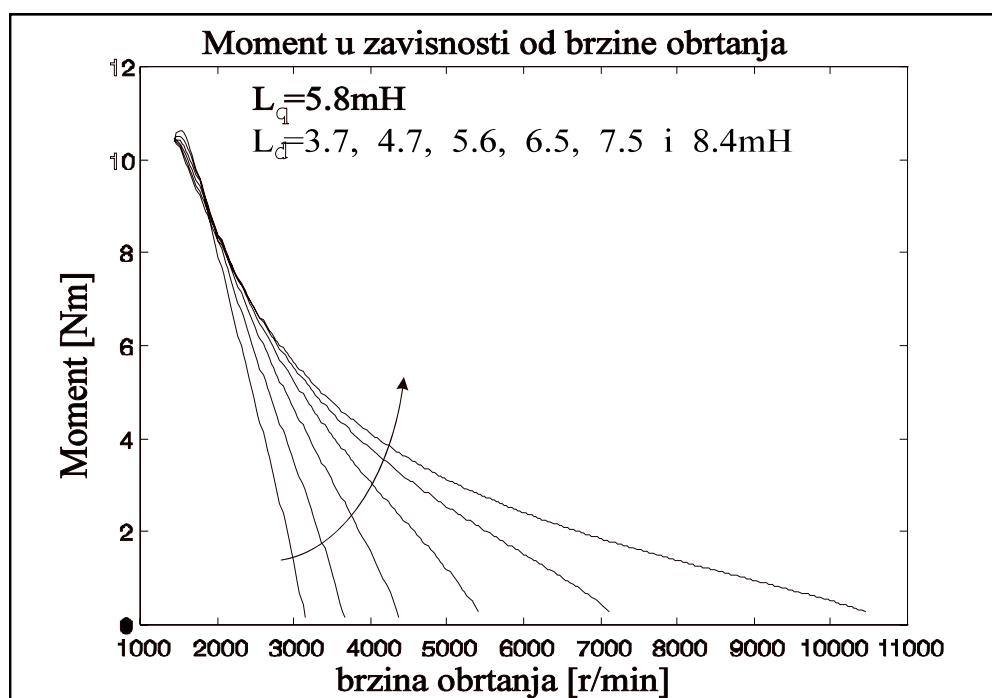
je jednačina (8) elipsa. Za male vrednosti brzine sistem jednačina (7-12) nema rešenje odnosno krug i elipsa se ne seku (to je i očekivano jer za male brzine naponsko ograničenje nije dostignuto već je dominantan naponski uslov (Slika 2). Kada se dostigne nominalna brzina krug i elipsa se seku odnosno sistem jednačina (7-12) ima rešenje da bi opet za velike brzine strujni uslov postao dominantan i sistem jednačina (7-12) nema rešenje (krug i elipsa se ne seku).



Slika 3. Grafici strujnog i naponskog ograničenja (m-motorski rad, g- generatorski rad)

Na slici 3. je nacrtano naponsko i strujno ograničenje (jednačine (7-8)) za brzinu $\omega_r=1410\text{ob/min}$. Sa slike i 3. se vidi da postoje dve presečne tačke između kruga i elipse. Od interesa su samo presečne tačke u kojima je $i_d < 0$ jer samo tada dolazi do slabljenja polja stalnog magneta rotora. Jedna presečna tačka odgovara motorskom radu (na slici 3 obeležena sa m, $i_q > 0$) dok druga odgovara generatorskom radu (na slici 3 obeležena sa g, $i_q < 0$). Sa slike 3. se može primetiti da tačka g (generatorski rad) odgovara veća po apsolutnoj vrednosti struja i_q nego tačka m (motorski rad) tako da je moment u generatorskom radu veći nego moment u motorskom radu. Ovo je posledica postojanja statorske otpornosti. Pri generatorskom radu napon na priključcima generatora je manji za pad napona na statorskoj otpornosti od indukovane EMS pa zato za veću brzinu (EMS) nastupa strujno ograničenje. Pri motorskom radu smer struje je suprotan pa je i napon na priključcima motora veći za pad napona na statorskoj otpornosti od indukovane EMS pa za manje brzine nastupa naponsko ograničenje. Posledica je da je envelope momenta nešto veća u generatorskom radu nego u motorskom.

Ako menjamo vrednosti induktivnosti L_d u opsegu $L_d/1.5$ do $1.5L_d$ dobićemo familiju krivih prikazanu na Slici 4.



Slika 4. Promena envelope momenta u zavisnosti od induktivnosti L_d .

Sa slike 4. se vidi da je envelope momentne karakteristike veoma zavisna od induktivnosti L_d . Može se primetiti da sa porastom induktivnosti L_d raste i envelope momentne karakteristike. Ovo je rezultat koji se mogao i očekivati jer što je veća induktivnost L_d to je manja struja potrebna da se uspostavi fluks suprotan fluksu stalnog magneta na rotoru i veći deo struje može da ode na L_q što doprinosi povećanju momenta.

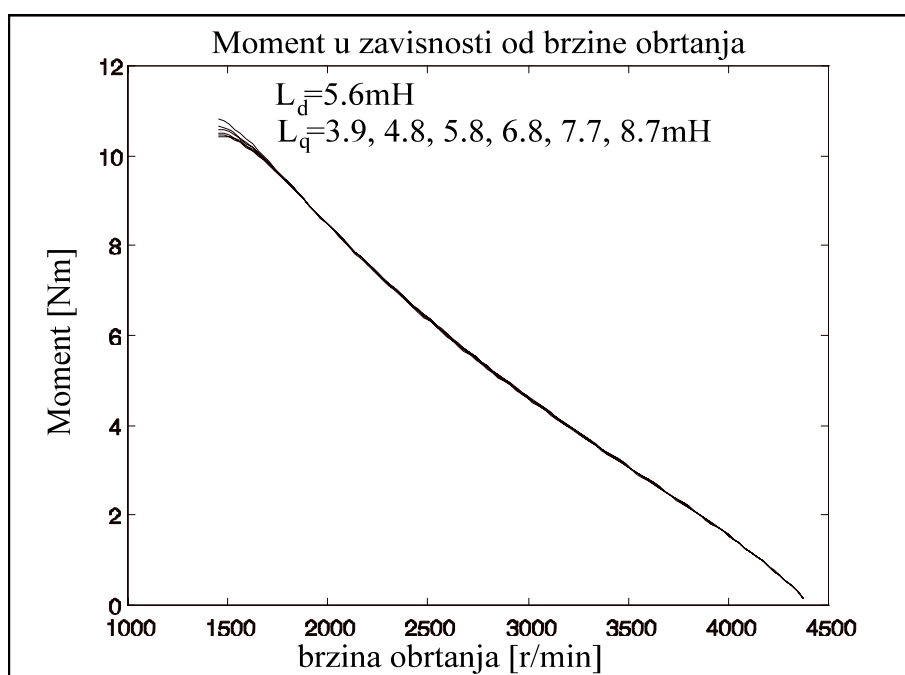
Na slici 4. se može primetiti da postoji u okolini ω_{nom} postoji maksimum na momentnoj karakteristici koji je više izražen što je razlika $L_d - L_q$ veća. Ovo je

posledica reluktantnog momenta, odnosno nejednakosti induktivnosti L_d i L_q . Moment sinhronog motora sa istaknutim polovima ($L_d \neq L_q$) je dat jednačinom (13) [2]:

$$T_e = 3 \left(\frac{P}{2} \right) \frac{1}{\omega_e} \left(\frac{V_s V_f}{X_{ds}} \sin \delta + V_s^2 \frac{X_{ds} - X_{qs}}{2X_{ds} X_{qs}} \sin 2\delta \right) \quad (13)$$

gde je V_s efektivna vrednost statorskog napona, V_f je ekvivalentni napon napajanja rotora X_{ds} i X_{qs} predstavljaju sinhronu reaktansu napisanu u d-q koordinatnom sistemu i δ je ugao između V_s i V_f . Iz jednačine (13) se vidi da promenom sinhrono reaktanse (brzine) menja se i veličina reluktantnog momenta pa samim tim i ukupnog momenta sinhronog motora sa stalnim magnetima {to dovodi do pojave maksimuma.

Nasuprot ovome ako menjamo induktivnost L_q u opsegu od $L_q/1.5$ do $1.5L_q$ dobićemo familiju krivih prikazanu na slici 5.



Slika 5. Promena envelope momenta u zavisnosti od induktivnosti L_q .

Sa slike 5. se vidi da envelope momentne karakteristike vrlo malo zavisi od induktivnosti L_q . Tako se može primetiti maksimum na momentnoj karakteristici koji je posledica reluktantnog momenta.

Program za izra~unavanje eksploatacione karakteristike:

```
clear
global L_d L_q psi_sf R_s i_nom u_nom omega_s
L_d=5.6e-3;
L_q=5.8e-3;
psi_sf=0.1546;
R_s=1.4;
i_nom=15;
u_nom=100;
P_=3;
L_dpoc=L_d/1.5;
L_dkraj=1.5*L_d;
omega_poc=P_*1382*2*pi/60;
delta=P_*3;
kk=0;
for L_d=L_dpoc:(L_dkraj-L_dpoc)/5:L_dkraj,
    kk=kk+1
    LL(kk)=L_d;
    poc=[2;2];
    jj=0;
    tacno=1;
    omega_s=omega_poc-delta;
    while tacno
        jj=jj+1;
        % disp(jj);
        % omega_s=omega_poc+(jj-1)*delta;
        omega_s=omega_s+delta;
        omega(jj)=omega_s/P_;
        i_dq=fsolve('id_iq',poc);
        id(jj,kk)=i_dq(1);
        iq(jj,kk)=i_dq(2);
        if id_iq(i_dq)>0.1,
            id_iq(i_dq)
            error
        end
        poc=i_dq;
        T(jj,kk)=3*(P_/2)*(psi_sf*i_dq(2)+(L_d-L_q)*i_dq(1)*i_dq(2));
        if T(jj,kk)<0.3,
            tacno=0;
        end
        NoSamples(kk)=jj;
        if i_dq(1)>0 | i_dq(2)<0,
            jj=jj-1;
        end
    end
end
end
clg
for nn=1:kk,
    if nn==1,
        boja='r';
    elseif nn==2,
        boja='g';
    elseif nn==3,
        boja='y';
    elseif nn==4,
        boja='b';
    elseif nn==5,
        boja='c';
    end
end
```



```

elseif nn==6,
    boja='m';
end
plot(omega(1:NoSamples(nn))*60/(2*pi),T(1:NoSamples(nn),nn),boja);
title('Moment u zavisnosti od brzine obrtanja')
xlabel('brzina obrtanja [r/min]')
ylabel('Moment [Nm] ')
print -dmeta momenta.wmf
pause(3)
hold on
end

```

Potprogram za izra~unavanje jedna~ina (7) i (8):

```

function f=id_iq(x)
global L_d L_q psi_sf R_s i_nom u_nom omega_s
id=x(1);iq=x(2);
f(1)=id^2+iq^2-i_nom^2;
ud=R_s*id-omega_s*L_q*iq;
uq=R_s*iq+omega_s*(L_d*id+psi_sf);
f(2)=ud^2+uq^2-u_nom^2;

```

Program za grafi~ko predstavljanje jedna~ina (7) i (8):

```

clear
L_d=5.6e-3;
L_q=5.8e-3*2;
psi_sf=0.1546;
R_s=1.4;
i_nom=15;
u_nom=100;
P_=3;
wr=3500*2*pi/60;
we=wr*P_;
a=R_s^2+we^2*L_d^2;
b=R_s^2+we^2*L_q^2;
c=2*R_s*we*(L_d-L_q);
d=2*L_d*we^2*psi_sf;
e=2*R_s*we*psi_sf;
f=we^2*psi_sf^2-u_nom^2;
i1=0;
i2=0;
id_poc=-30*i_nom;
id_kraj=30*i_nom;
for id=id_poc:(id_kraj-id_poc)/1000:id_kraj,
    iq_pom2=i_nom^2-id^2;
    if iq_pom2>=0,
        i2=i2+1;
        id_iq3(i2,:)=id sqrt(iq_pom2);
        id_iq4(i2,:)=id -sqrt(iq_pom2);
    end
    rez=roots([b c*id+e a*id^2+d*id+f]);
    for kk=1:max(size(rez)),
        if imag(rez(kk))==0,
            i1=i1+1;
            id_iq1(i1,:)=id rez(1);
            id_iq2(i1,:)=id rez(2);
        end
    end
end
end
plot(id_iq1(:,1),id_iq1(:,2),'r',id_iq2(:,1),id_iq2(:,2),'r');

```

hold on
plot(id_iq3(:,1),id_iq3(:,2),'g',id_iq4(:,1),id_iq4(:,2),'g');

Literatura

1. P.Pillay, *Performance and design of permanent magnet AC motor drives*, IEEE IAS Annual Meeting Michigan, 1991.
2. B. Bose, *Power electronic and ac drives*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1986.