



UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**ANALIZA USLOVA ZA PREBACIVANJE
VISOKONAPONSKIH ASINHRONIH MOTORA
SA JEDNOG NA DRUGI SISTEM SABIRNICA**

STUDENT :
Đurišić R. Željko
reg. br.: 602/93

MENTOR :
Prof. Dr Milenko Đurić

BEOGRAD, Novembar 1999. god.

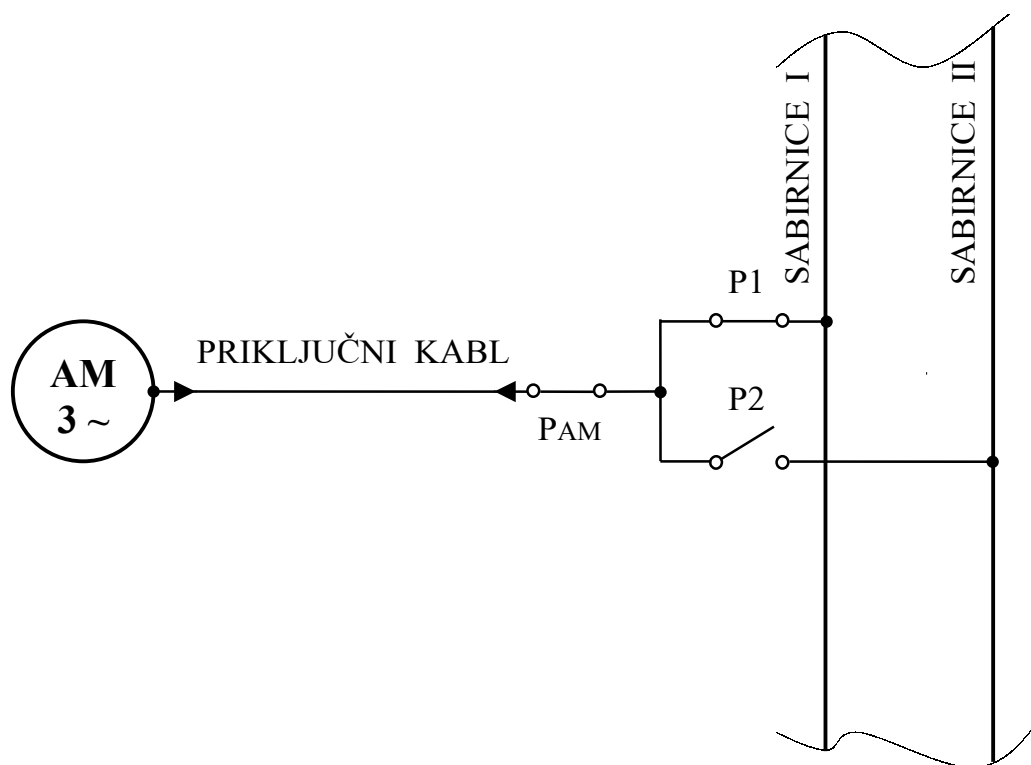
S A D R Ź A J

UVOD	3
1. MATEMATIČKI MODEL ASINHRONOG MOTORA	6
1.1 <i>MATEMATIČKI MODEL ASINHRONOG MOTORA U STACIONARNOM TROFAZNOM SISTEMU</i>	7
1.2 <i>MATEMATIČKI MODEL ASINHRONOG MOTORA U STACIONARNOM $d^{(s)}$-$q^{(s)}$ SISTEMU</i>	11
1.3 <i>MODEL ASINHRONOG MOTORA U SINHRONOROTIRAJUĆEM $d^{(e)}$-$q^{(e)}$ SISTEMU (PARKOV MODEL ASINHRONOG MOTORA)</i>	13
<i>-transformacija statorskih veličina</i>	13
<i>-transformacija rotorskih veličina</i>	15
<i>-zamenska šema asinchronog motora u $d^{(e)}$-$q^{(e)}$ sistemu</i>	21
2. MODIFIKOVANI PARKOV MODEL ASINHRONOG MOTORA	22
2.1 <i>MODELOVANJE NAPOJNOG VODA ASINHRONOG MOTORA</i>	22
2.2 <i>MODELOVANJE GUBITAKA U GVOŽĐU ASINHRONOG MOTORA</i>	26
2.3 <i>ZAMENSKA ŠEMA I ODGOVARAJUĆI MATEMATIČKI MODEL SISTEMA NAPOJNI VOD – ASINHRONI MOTOR SA UVAŽENIM GUBICIMA U GVOŽĐU</i>	28
3. $d - q$ MODEL ASINHRONOG MOTORA U PROSTORU STANJA	33
3.1 <i>DINAMIČKI MODEL ASINHRONOG MOTORA U PROSTORU STANJA</i>	33
3.2 <i>STACIONARNO RADNO STANJE ASINHRONOG MOTORA</i>	37
4. PREKID NAPAJANJA ASINHRONOG MOTORA	39
4.1 <i>ANALIZA BRZOG (TRENUTNOG) ISKLJUČENJA ASINHRONOG MOTORA SA MREŽE</i>	39
4.2 <i>REALAN PREKID NAPAJANJA ASINHRONOG OTORA</i>	41

5. SOFTVER ZA ANALIZU PRELAZNIH POJAVA U ASINHRONOM MOTORU PRI NJEGOVOM KRATKOTRAJNOM ODVAJANJU OD MREŽE.....	43
5.1 PROGRAM „AMOS“.....	43
- datoteka „ulpo”.....	43
- datoteka „kons”.....	44
- datoteka „stac”.....	44
- podešavanje trenutka prekida napajanja.....	45
- datoteka „norma”.....	48
- datoteka „sys”.....	48
- datoteka „am”.....	48
- datoteka „amos”.....	49
5.2 BRZINA IZVRŠENJA PROGRAMA.....	49
5.3 STARTOVANJE PROGRAMA.....	49
5.4 LOGIČKI BLOK DIJAGRAM PROGRAMA „AMOS”.....	50
6. PRIMENA RAČUNARSKOG PROGRAMA „AMOS” NA KONKRETAN ASINHRONI MOTOR.....	51
6.1 FORMIRANJE ULAZNIH PODATAKA ZA PROGRAM „AMOS”.....	51
6.2 PREKID NAPAJANJA ASINHRONOG MOTORA KOME JE PRETHODIO NOMINALAN REŽIM RADA.....	53
- izlazni rezultati.....	53
6.3 PREKID NAPAJANJA ASINHRONOG MOTORA KOME JE PRETHODIO REŽIM PRAZNOG HODA.....	56
- izlazni rezultati.....	56
6.4 ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA.....	59
- analiza napona na priključcima asinhronog motora po njegovom isključenju sa napajanja.....	59
7. ANALIZA USLOVA ZA SINHRONO PONOVRNO UKLJUČENJE VISOKONAPONSKIH ASINHRONIH MOTORA.....	63
7.1 TEORIJSKI ASPEKTI ANALIZE.....	63
7.2 PRAKTIČNA REALIZACIJA SINHRONOG PREBACIVANJA ASINHRONIH MOTORA SA JEDNOG NA DRUGI SABIRNIČKI SISTEM...65	65
- realizacija sinhronog ponovnog uključenja asinhronih motora pomoću faznog komparatora.....	65
LITERATURA.....	68

UVOD

Ovaj diplomski rad ima za cilj da pomogne u rešavanju praktičnih problema koji se mogu javiti u nekim industrijskim postrojenjima sa velikim visokonaponskim asinhronim motorima (VN AM), kada se javi potreba za prebacivanjem tih AM-a sa jednog na drugi sabirnički sistem. S obzirom da u postojećoj literaturi koja se bavi problematikom električnih mašina ima vrlo malo reči o navedenim problemima, koji su tema ovog diplomskog rada, to će se u ovom radu analizirati neki jednostavniji slučajevi prebacivanja AM sa jednog na drugi sabirnički sistem. Jedan od takvih slučajeva (koji će biti analiziran u ovom radu) prikazan je na slici1. .



Sl. 1. Primer prebacivanja AM sa sabirnica I na sabirnice II, koji je analiziran u diplomskom radu

U toku rada AM-a, koji je priključen na sabirnički sistem I može se, iz nekih razloga, javiti potreba za njegovim prebacivanjem na sabirnički

sistem II. Najčešće se zahteva da se ovaj komutacioni proces izvede brzo, da se ne bi prekidao radni proces. To je bitno ne samo iz ekonomskih, već u nekim slučajevima, i iz tehničkih razloga. S obzirom da se radi o velikim AM-ima imaju se veliki momenti inercije što pozitivno utiče na zahtevanu neprekidnost radnog procesa.

U toku manipulacije komutacionim uređajima (P1 i P2) AM biva kratkotrajno otkaćen od mreže tj. ostaje bez napajanja. U trenutku isključenja AM-a sa sabirnica I u njemu se ima određena magnetska energija (koja je najvećim delom akumulisana u vazдушnom zazoru između statora i rotora), odnosno ima se fluks koji se ne može, shodno teoremi o nepromenljivosti fluksa, trenutno promeniti.

Zbog obrtanja zamajnih masa sistema *asinhroni motor - radna mašina*, u trenutku odvajanja AM-a od mreže ima se i određena mehanička energija, odnosno kinetička energija rotacije tih zamajnih masa. Ona se takođe ne može trenutno promeniti jer se brzina obrtanja inercionih masa ne može trenutno promeniti.

Na kraju, u analizi je uzeta u obzir i elektrostatička energija akumulisana u priključnom vodu AM-a i eventualnim baterijama kondenzatora za kompenzaciju reaktivne snage priključenim na sabirnice I . Shodno teoremi o nepromenljivosti napona na kondenzatoru i ova energija ima kontinualnu promenu u trenutku odvajanja AM-a od mreže.

Ove energije i njihove disipacije rezultuju elektromehaničkim prelaznim procesom u AM-u. Njihova nepromenljivost u trenutku prekida napajanja AM-a nam obezbeđuje početne uslove za sistem diferencijalnih jednačina, odnosno matematički model kojim se opisuje ovaj proces.

Zadatak ovog diplomskog rada jeste formiranje tog matematičkog modela i na osnovu njega sprovođenje analize prelaznog procesa sa aspekta napona na priključcima AM-a, da bi se utvrdilo postojanje kvazistacionarnih prenapona i sa tim u vezi sagledala mogućnost izbegavanja reagovanja prenaponske zaštite AM-a. Na kraju ćemo, na osnovu analize vremenskog toka ovih napona, sprovesti analizu mogućnosti sinhronog ponovnog uključanja AM-a na napajanje.

Shodno ovom zadatku koncipiran je diplomski rad. On se sastoji od šest poglavlja koja se mogu svrstati u tri celine.

U prvom delu su dati dinamički modeli AM-a u različitim koordinatnim sistemima i prilagođavanje standardnog Parkovog modela AM-a analizi prelaznog procesa koji se ima pri njegovom isključenju sa mreže. U okviru tog modela, izvršena je analiza prekida napajanja AM-a.

Drugi deo diplomskog rada predstavlja programsko rešenje matematičkog modela AM-a u softverskom paketu MATLAB (ovaj program je dat u prilogu ovog rada na floppy disku). U okviru ovog dela, prikazani su rezultati primene dobijenog programa na konkretan AM i izvršena je analiza tih rezultata.

Treći deo odnosi se na teorijsku analizu uslova i praktičnu realizaciju sinhronog uključenja AM-a na mrežu.

Matematički model AM-a i njegovo programsko rešenje koji su dati u ovom diplomskom radu, a koji prvenstveno služe za analizu navedenih problema u industrijskim elektromotornim postrojenjima, mogu korisno poslužiti i za analizu nekih drugih problema u postrojenjima sa AM-ima i mrežama koje napajaju te pogone (npr. za analiza uticaja velikih AM-a na struje kvara (kratkog spoja) u mreži koja ih napaja).

1. MATEMATIČKI MODEL ASINHRONOG MOTORA

U ovom poglavlju biće reči o dinamičkim modelima AM-a koji se najčešće mogu sresti u literaturi koja se bavi problematikom električnih mašina, pri čemu će posebna pažnja biti posvećena analizi složenosti matematičkih formi pojedinih modela, kao i opravdanosti zanemarenja koja se imaju u tim modelima sa aspekta analize napona na priključcima AM-a kada on kratkotrajno ostane bez napajanja.

S obzirom da je oblast kojom se bavi ovaj diplomski rad visokonaponski asinhroni motori tj. AM-i srednjih i velikih snaga, a oni se isključivo grade kao trofazni, to će se i modeli i analize koje slede odnositi na trofazne AM-e. U praksi se najčešće sreće kavezni tip AM-a. Međutim, u postrojenjima gde se imaju otežani uslovi starta (veliki zahtevani polazni moment, mali nivo snage trolnog kratkog spoja na priključnim sabirnicama, ...) mogu se sresti AM-i sa namotanim rotorom i prstenovima, odnosno AM-i sa trofaznim namotom na rotoru (tj. tri fazna namotaja čiji je jedan kraj spojen u zajedničko zvezdište a drugi kraj izveden na odgovarajući klizni prsten). Analizom je potrebno obuhvatiti i ovaj tip AM-a. Pod pojmom „*namotaj*” podrazumeva se element mašine sastavljen od provodnika koji imaju dva odredljiva priključka. Pojmom „*namot*” definiše se više namotaja koji čine jednu celinu sa više od dva priključka (npr. statorski namot se sastoji od tri fazna namotaja i ima tri priključka i jedno zvezdište za spregu „*Y*”, odnosno samo tri priključka za spregu „*Δ*”).

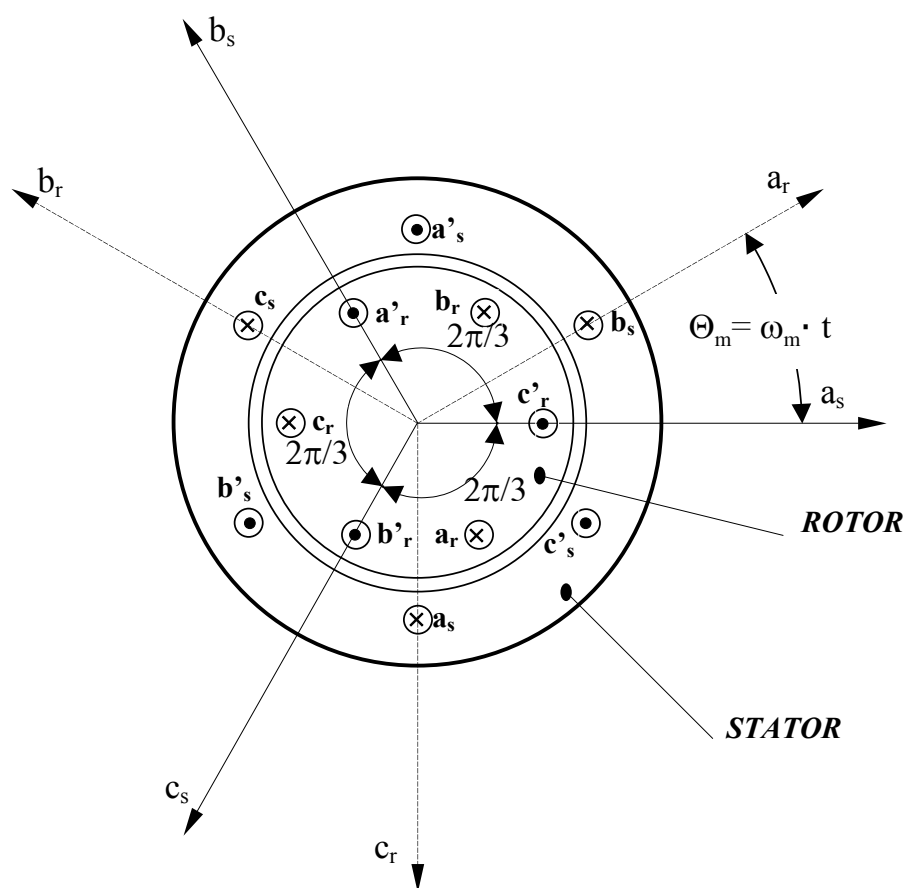
Višefazni kratkospojeni namot na rotoru, koji se ima kod kavezni AM-a, može se ekvivalentirati odgovarajućim trofaznim namotom odnosno sa tri fazna namotaja čiji su priključci kratko spojeni. Ovako posmatran, kavezni AM odgovara AM-u sa namotanim rotorom kod koga su prstenovi kratko spojeni. Na osnovu ovoga zaključujemo da se ova dva tipa AM-a mogu opisivati istim matematičkim modelima.

Matematički model asinhronne mašine čini nekoliko grupa jednačina koje možemo svrstati na sledeći način :

- Jednačine ravnoteže za napone koji vladaju na krajevima pojedinih namotaja
- Definicione jednačine flukseva
- Jednačine ravnoteže momenata koji deluju na vratilo asinhronne mašine.

1.1 Matematički model asinhronog motora u stacionarnom trofaznom a - b - c sistemu

Pošto analiziramo trofazni AM, na statoru imamo tri eksplicitna fazna namotaja čije su ose normalne na aksijalnu osu simetrije motora, a međusobni položaj im je kao na sl. 1.1, označićemo ih slovima a_s , b_s i c_s . Rotorski namot se takođe, kao što smo rekli, može predstaviti sa tri implicitna fazna namotaja a_r , b_r i c_r . Međusobni položaj ovih osa je prikazan na sl. 1.1 .



Sl. 1.1 Raspored faza na statoru i rotoru asinhronog motora

Za svaki od ovih namotaja mogu se napisati jednačine naponskog balansa .

Jednačine naponskog balansa za statorski namot

Jednačine naponskog balansa za statorske namotaje su :

$$\begin{aligned} u_{as} &= R_s \cdot i_{as} + \frac{d\Psi_{as}}{dt} \\ u_{bs} &= R_s \cdot i_{bs} + \frac{d\Psi_{bs}}{dt} \\ u_{cs} &= R_s \cdot i_{cs} + \frac{d\Psi_{cs}}{dt} \end{aligned} \quad (1.1)$$

gde je :

R_s - otpornost statorskog namotaja,
 i_{as} , i_{bs} , i_{cs} - struje kroz fazne namotaje statora : a_s , b_s i c_s , respektivno,
 u_{as} , u_{bs} , u_{cs} - naponi na krajevima faznih namotaja statora : a_s , b_s i c_s ,
 respektivno.

Jednačine (1.1) su napisane uz pretpostavku da su otpornosti sva tri fazna namotaja na statoru iste, tj. da je $R_a = R_b = R_c = R_s$. Ova pretpostavka je sasvim realna jer se pri izradi motora teži njegovoj potpunoj simetriji, kako električnoj tako i magnetskoj, i tolerancije u tom pogledu su vrlo stroge.

Jednačine naponskog balansa za rotorski namot

Jednačine naponskog balansa za rotor možemo pisati u istom obliku kao i za stator, u onom koordinatnom sistemu u kome se namotaji, odnosno provodnici rotora stvarno i nalaze tj. u koordinatnom sistemu fiksiranom za rotor. Pošto se rotor obrće ugaonom brzinom ω_m i koordinatni sistem, u kome treba pisati jednačine za rotorske namotaje će se obrtati tom brzinom u odnosu na statorski koordinatni sistem. Jednačine naponskog balansa za rotorske namotaje su :

$$\begin{aligned} u_{ar} &= R_r \cdot i_{ar} + \frac{d\Psi_{ar}}{dt} \\ u_{br} &= R_r \cdot i_{br} + \frac{d\Psi_{br}}{dt} \\ u_{cr} &= R_r \cdot i_{cr} + \frac{d\Psi_{cr}}{dt} \end{aligned} \quad (1.2)$$

gde je :

R_r - otpornost rotorskog namotaja (važi ista pretpostavka, u pogledu simetričnosti, kao i za statorski namot),
 i_{ar}, i_{br}, i_{cr} - struje kroz fazne namotaje rotora: a_r, b_r i c_r , respektivno,
 u_{ar}, u_{br}, u_{cr} - naponi na krajevima faznih namotaja rotora; a_r, b_r i c_r , respektivno. Ovi naponi su jednaki nuli kod kaveznih AM-a tj. važi :

$$u_{ar} = u_{br} = u_{cr} = 0 . \quad (1.3)$$

Kod AM-a sa prstenovima moguća su različita radna stanja u kojima ne važi relacija (1.3). Jedno od takvih radnih stanja je kaskadni rad dva AM-a (npr. električno vratilo kod brodskih prevodnica na rečnim branama). Ovakva radna stanja AM-a kao i radna stanja sa nesimetrično priključenim dodatnim otporom na kliznim prstenovima (npr. usled kvara na dirkama) neće biti obuhvaćena daljom analizom. Asinhroni motore sa kliznim prstenovima preko kojih je simetrično uključen dodatni otpor u kolo rotora opisaćemo istim jednačinama kao i kavezne AM-e, tako što ćemo otpor faznog namota rotora R_r u relaciji (1.2) uvećati za dodatni otpor R_d , jer je :

$$\begin{aligned} u_{ar} &= -R_d \cdot i_{ar} \\ u_{br} &= -R_d \cdot i_{br} \\ u_{cr} &= -R_d \cdot i_{cr} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Zamenom relacije (1.4) u (1.2) dobijamo jednačine naponskog balansa za rotorski namot AM-a sa prstenovima :

$$\begin{aligned} u_{ar} &= (R_r + R_d) \cdot i_{ar} + \frac{d\Psi_{ar}}{dt} = 0 \\ u_{br} &= (R_r + R_d) \cdot i_{br} + \frac{d\Psi_{br}}{dt} = 0 \\ u_{cr} &= (R_r + R_d) \cdot i_{cr} + \frac{d\Psi_{cr}}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (1.5)$$

Jednačine flukseva statorskog i rotorskog namota

Jednačine flukseva statorskih i rotorskih namotaja možemo napisati u sledećem obliku :

$$\begin{aligned}
\Psi_{as} &= L_s \cdot i_{as} + M_{a_s b_s} \cdot i_{bs} + M_{a_s c_s} \cdot i_{cs} + M_{a_s a_r} \cdot i_{ar} + M_{a_s b_r} \cdot i_{br} + M_{a_s c_r} \cdot i_{cr} \\
\Psi_{bs} &= M_{b_s a_s} \cdot i_{as} + L_s \cdot i_{bs} + M_{b_s c_s} \cdot i_{cs} + M_{b_s a_r} \cdot i_{ar} + M_{b_s b_r} \cdot i_{br} + M_{b_s c_r} \cdot i_{cr} \\
\Psi_{cs} &= M_{c_s a_s} \cdot i_{as} + M_{c_s b_s} \cdot i_{bs} + L_s \cdot i_{cs} + M_{c_s a_r} \cdot i_{ar} + M_{c_s b_r} \cdot i_{br} + M_{c_s c_r} \cdot i_{cr} \\
\Psi_{ar} &= M_{a_r a_s} \cdot i_{as} + M_{a_r b_s} \cdot i_{bs} + M_{a_r c_s} \cdot i_{cs} + L_r \cdot i_{ar} + M_{a_r b_r} \cdot i_{br} + M_{a_r c_r} \cdot i_{cr} \\
\Psi_{br} &= M_{b_r a_s} \cdot i_{as} + M_{b_r b_s} \cdot i_{bs} + M_{b_r c_s} \cdot i_{cs} + M_{b_r a_r} \cdot i_{ar} + L_r \cdot i_{br} + M_{b_r c_r} \cdot i_{cr} \\
\Psi_{cr} &= M_{c_r a_s} \cdot i_{as} + M_{c_r b_s} \cdot i_{bs} + M_{c_r c_s} \cdot i_{cs} + M_{c_r a_r} \cdot i_{ar} + M_{c_r b_r} \cdot i_{br} + L_r \cdot i_{cr}
\end{aligned} \tag{1.6}$$

gde su :

- L_s, L_r - sopstvene induktivnosti faznih namotaja statora i rotora, respektivno,
- $M_{x_s y_s}$ - međusobne induktivnosti statorskih namotaja; one imaju vrednost $(1/2)L_s$ zbog međusobnog položaja namotaja statora,
- $M_{x_r y_r}$ - međusobne induktivnosti rotorskih namotaja, njihove vrednosti su, analogno statorskim, $(1/2)L_r$,
- $M_{x_s y_r}$ - međusobne induktivnosti statorskih i rotorskih namotaja, promenljive su sa vremenom. Njihova maksimalna vrednost je induktivnost magnećenja (L_m).

Treba napomenuti da su jednačine (1.6) izvedene uz pretpostavku da je AM u potpunosti simetričan i u magnetskom pogledu, tj. zanemaren je uticaj ugiba vratila i drugi uticaji na poremećaj simetričnosti AM-a.

Jednačina ravnoteže momenata koji deluju na vratilo AM-a

Ravnoteža momenata AM-a je iskazana kroz Njutnovu mehaničku jednačinu, čiji je opšti oblik dat sledećom relacijom :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L \tag{1.7}$$

gde je :

- J – ekvivalentni moment inercije motora (moment inercije motora uvećan za moment inercije gonjene mašine sveden na vratilo motora),

ω_m – mehanička brzina obrtanja rotora,
 T_e – aktivni elektromagnetski moment AM-a,
 T_L – moment opterećenja AM-a .

U jednačini (1.7) zanemarene su frikcije čije uzimanje u obzir bi na desnoj strani jednačine dodalo član $-k_f \cdot \omega_m$. One se mogu uključiti u T_L , koji i sam može biti funkcija brzine.

Za simetrična radna stanja važi : $u_{as} + u_{bs} + u_{cs} = 0$, pa jednačine naponskog balansa za statorski namot, a to važi i za rotorski, nisu nezavisne tj. jedna može da se izrazi preko druge dve. To znači da u tim jednačinama imamo zapravo dve koordinate stanja. Zato je jednačine AM-a pogodno pisati u Dekartovom pravouglom koordinatnom sistemu.

1.2 Matematički model asinhronog motora u stacionarnom $d^{(s)} - q^{(s)}$ sistemu

Primenom Klarkove transformacije prelazi se iz stacionarnog $a-b-c$ u stacionarni $d^{(s)} - q^{(s)}$ sistem. Postoji nekoliko modaliteta primene Klarkove transformacije na veličine AM-a. Oni se razlikuju u invarijantnosti veličina AM-a (struja, napon, snaga, ...) pri prelasku iz jednog u drugi sistem. Pošto nas u ovoj analizi prvenstveno interesuju naponi u AM-u, primenićemo Klarkovu transformaciju invarijantnu po faznim veličinama, tj. transformaciju koja obezbeđuje da amplitude napona u $a-b-c$ sistemu budu jednake amplitudama napona u $d^{(s)} - q^{(s)}$ sistemu. S obzirom da su jednačine statora i rotora pisane u različitim stacionarnim $a-b-c$ sistemima kao rezultat transformacije dobijaju se jednačine statora i rotora u takođe različitim $d^{(s)} - q^{(s)}$ koordinatnim sistemima; $d_s^{(s)} - q_s^{(s)}$ stacionarnom u odnosu na stator i $d_r^{(s)} - q_r^{(s)}$ stacionarnom u odnosu na rotor. Pošto se rotor obrće ugaonom brzinom ω_m , to će se i koordinatni sistem $d_r^{(s)} - q_r^{(s)}$ obrtati brzinom ω_m u odnosu na statorski koordinatni sistem.

Klarkova transformacija primenjena na sistem faznih napona statorskog namota je data sledećom matričnom jednačinom:

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{os}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta - 240^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta - 240^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

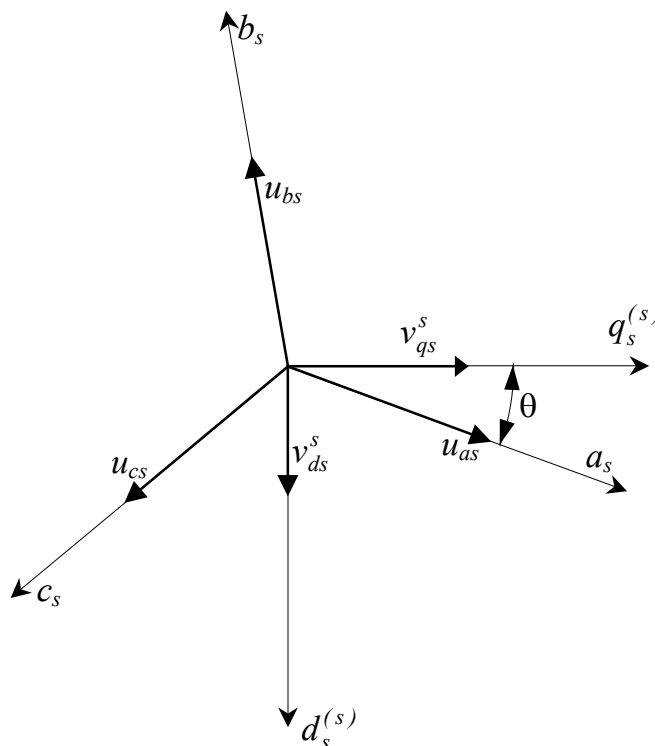
gde je θ proizvoljan ugao između dva seta koordinata kao na sl. 1.2 .

Relacija (1.8) predstavlja transformaciju faznih napona statora iz a - b - c u $d^{(s)}$ - $q^{(s)}$ sistem. Prelazak iz $d^{(s)}$ - $q^{(s)}$ u a - b - c sistem je dat njenom inverznom transformacijom :

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta - 240^\circ) & \sin(\theta - 240^\circ) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{os}^s \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Transformacija ostalih statorskih i rotorskih veličina vrši se na isti način (iste su matrice transformacije) kao u relacijama (1.8), odnosno (1.9), pa ih nećemo ispisivati.

U najopštijem slučaju (asimetrična radna stanja AM-a), Klark-ovom transformacijom ne postiže se nikakav efekat jer imamo i nulte komponente: napona, struja i flukseva, pa red sistema ostaje isti kao u a - b - c sistemu. Međutim, za simetrične radne režime, nulta komponenta ne egzistira, pa je broj jednačina u stacionarnom $d^{(s)}$ - $q^{(s)}$ sistemu manji, što ga čini jednostavnijim od stacionarnog a - b - c sistema.



Sl. 1.2 Transformacija koordinata na statoru

Ako izaberemo takav koordinatni sistem da osa $q^{(s)}$ koincidira sa osom a_s , tj. uzmemo da je $\theta = 0$ i izostavimo nultu komponentu, relacije (1.8) i (1.9) se pojednostavljaju, tj. postaju :

$$\begin{aligned} u_{as} &= v_{qs}^s \\ u_{bs} &= -\frac{1}{2}v_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s \\ u_{cs} &= -\frac{1}{2}v_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s \end{aligned} \quad (1.10)$$

odnosno :

$$\begin{aligned} v_{qs}^s &= \frac{2}{3}u_{as} - \frac{1}{3}u_{bs} - \frac{1}{3}u_{cs} \\ v_{ds}^s &= -\frac{1}{\sqrt{3}}u_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{cs} \end{aligned} \quad (1.11)$$

1.3 Model asinhronog motora u sinhronorotirajućem $d^{(e)} - q^{(e)}$ sistemu (Parkov model AM-a)

Do sada izloženi matematički modeli AM-a imaju nekoliko mana. Jedna od njih je što se jednačine za stator i rotor ne pišu u jedinstvenom koordinatnom sistemu, a posledica toga je pojava vremenski promenljivih koeficijenata u jednačinama fluksnog obuhvata. Drugi problem je što su, u stacionarnom stanju, sve fazne veličine prostoperiodične, što takođe znatno usložnjava analizu prelaznih procesa.

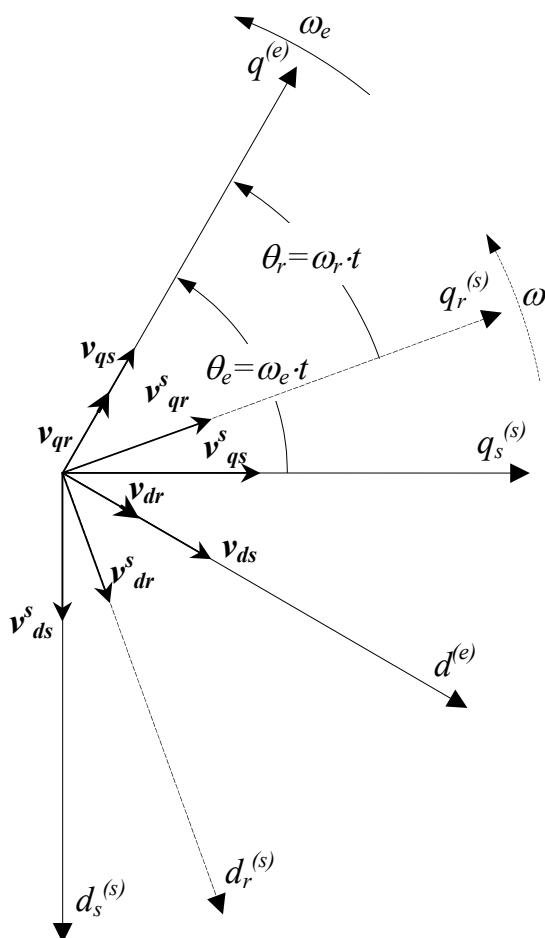
Ovi problemi prevaziđeni su ispisivanjem jednačina AM-a u jedinstvenom koordinatnom sistemu koji rotira sinhronom brzinom u odnosu na namot statora. Veza između veličina u ovom koordinatnom sistemu i korespondentnih veličina u stacionarnom $d^{(s)} - q^{(s)}$ sistemu je data Parkovom transformacijom.

Transformacija statorskih veličina

Na osnovu slike 1.3 mogu se napisati jednačine Parkove transformacije za napone statora :

$$\begin{aligned} v_{qs} &= v_{qs}^s \cos \omega_e t - v_{ds}^s \sin \omega_e t \\ v_{ds} &= v_{qs}^s \sin \omega_e t + v_{ds}^s \cos \omega_e t \end{aligned} \quad (1.12)$$

gde su v_{qs} i v_{ds} naponi na ekvivalentnim „ d ” i „ q ” statorskim namotajima, respektivno. Indeks „ e ”, kojim je naglašena rotacija koordinata na sl. 1.3, se neće pojavljivati u oznakama veličina u $d^{(e)}-q^{(e)}$ sistemu, već će se podrazumevati.



Sl. 1.3 Transformacija stacionarnih statorskih i rotorskih koordinatnih sistema u jedinstveni sinhronotirajući $d^{(e)}-q^{(e)}$ sistem i prikaz napona asinhronog motora u tim sistemima

Rešavanjem jednačina (1.12) po promenljivim v_{qs}^s i v_{ds}^s dobijaju se jednačine (1.13) koje definišu inverznu Parkovu transformaciju,

odnosno definišu transformaciju faznih veličina AM-a iz sinhronog $d^{(e)} - q^{(e)}$ u stacionarni $d^{(s)} - q^{(s)}$ sistem :

$$\begin{aligned} v_{qs}^s &= v_{qs} \cos \omega_e t + v_{ds} \sin \omega_e t \\ v_{ds}^s &= -v_{qs} \sin \omega_e t + v_{ds} \cos \omega_e t \end{aligned} \quad (1.13)$$

Jednačine (1.12) i (1.13), koje u suštini definišu Parkovu transformaciju, ilustrovane su na sl. 1.3 .

Transformacija rotorskih veličina

Stacionarni rotorski $d_r^{(s)} - q_r^{(s)}$ koordinatni sistem je fiksiran za rotor (stacionaran u odnosu na rotor) pa će njegova relativna brzina obrtanja u odnosu na stator biti jednaka električnoj brzini obrtanja rotora ω . Pošto sinhroni $d^e - q^e$ sistem rotira, u smeru obrtanja rotora, sinhronom brzinom ω_e , zaključimo da je relativna brzina obrtanja sinhronog $d^e - q^e$ sistema u odnosu na stacionarni rotorski $d_r^{(s)} - q_r^{(s)}$ koordinatni sistem :

$$\omega_r = \omega_e - \omega \quad (1.14)$$

gde je ω_r apsolutno klizanje AM-a.

Na osnovu slike 1.3 možemo napisati jednačine direktne Parkove transformacije za napone rotora :

$$\begin{aligned} v_{qr} &= v_{qr}^s \cos \omega_r t - v_{dr}^s \sin \omega_r t \\ v_{dr} &= v_{qr}^s \sin \omega_r t + v_{dr}^s \cos \omega_r t \end{aligned} \quad (1.15)$$

odnosno, jednačne inverzne transformacije :

$$\begin{aligned} v_{qr}^s &= v_{qr} \cos \omega_r t + v_{dr} \sin \omega_r t \\ v_{dr}^s &= -v_{qr} \sin \omega_r t + v_{dr} \cos \omega_r t \end{aligned} \quad (1.16)$$

Transformacija ostalih faznih veličina statora i rotora (struja, fluksa, ...) vrši se na isti način kao i prikazane transformacije napona, pa ih nećemo ispisivati.

Pretpostavićemo da se motor napaja iz mreže sa uravnoteženim sinusoidalnim sistemom faznih napona : u_{as} , u_{bs} i u_{cs} , tj. da je :

$$\begin{aligned}
u_{as} &= V_{sm} \cos \omega_e t \\
u_{bs} &= V_{sm} \cos(\omega_e t - 120^\circ) \\
u_{cs} &= V_{sm} \cos(\omega_e t - 240^\circ)
\end{aligned} \tag{1.17}$$

gde je V_{sm} amplituda faznih napona na statoru. Zamenom ovih relacija u relacije (1.11) dobijamo:

$$\begin{aligned}
v_{qs}^s &= V_{sm} \cos \omega_e t \\
v_{ds}^s &= -V_{sm} \sin \omega_e t
\end{aligned} \tag{1.18}$$

Daljom zamenom relacija (1.18) u jednačine Parkove transformacije napona statora (1.12), dobijamo sledeće relacije :

$$\begin{aligned}
v_{qs} &= V_{sm} = \hat{V}_m \\
v_{ds} &= 0
\end{aligned} \tag{1.19}$$

Ove relacije nam potvrđuju da se sinusoidalno promenljive veličine (čija je učestanost ω_e), koje se imaju u realnom stacionarnom a - b - c sistemu, javljaju kao „jednosmerne” veličine (\hat{V}_m) u sinhrono-rotirajućem d^e - q^e sistemu. Takođe se može primetiti da se pogodnim izborom ugla θ , u relacijama (1.8), može podesiti da jedna od komponenti faznih napona statora bude jednaka nuli. U ovom slučaju smo uzeli da je $\theta = 0$, pa je komponenta napona statora po d osi $v_{ds}^s = 0$. Da smo izabrali da je $\theta = \pi/2$ onda bi osa a_s koincidirala sa osom $d_s^{(s)}$, sl. 1.2, pa bi, imajući u vidu relacije: (1.8), (1.17) i (1.15), dobili da je: $v_{qs}^s = 0$ i $v_{ds}^s = V_{sm}$. U opštem slučaju, za proizvoljan ugao θ , obe komponente napona u d^e - q^e sistemu su različite od nule i važi sledeća relacija:

$$|\hat{V}_m| = \sqrt{v_{qs}^2 + v_{ds}^2} \tag{1.20}$$

Jednačine naponskog balansa za statorski namot

Da bi smo napisali jednačine naponskog balansa u d^e - q^e sistemu poći ćemo od jednačine (1.1), koja je u vektorskom obliku data sa sledećom jednačinom:

$$\bar{V}_s^s = R_s \bar{I}_s^s + \frac{d\bar{\Psi}_s^s}{dt} \quad (1.21)$$

gde su \bar{V}_s^s , \bar{I}_s^s i $\bar{\Psi}_s^s$ vektori napona, struje i fluksa statorskog namota u stacionarnom $d^{(s)}$ - $q^{(s)}$ koordinatnom sistemu, respektivno.

Ako pretpostavimo da se koordinatni sistem obrće ugaonom brzinom ω_e tada prethodna jednačina ima sledeći oblik:

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + \bar{\Omega}_e \times \bar{\Psi}_s \quad (1.22)$$

Dakle, kao posledica rotacije koordinatnog sistema u jednačini naponskog balansa javlja se član $\bar{\Omega}_e \times \bar{\Psi}_s$. Matematički gledano, ovaj vektorski proizvod je posledica primene operatora rotacije (koji je funkcija brzine) na jednačinu koja sadrži prvi izvod funkcije ($\bar{\Psi}_s^s = f(t)$) po vremenu t .

Ako jednačinu (1.22) posmatramo u sinhronom d^e - q^e koordinatnom sistemu, onda vektor napona \bar{V}_s možemo razložiti na dve komponente, koje su date sledećim jednačinama :

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_e \psi_{ds} \quad (1.23)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_e \psi_{qs} \quad (1.24)$$

Ove jednačine su napisane pod pretpostavkom da d^e - q^e koordinatni sistem rotira brzinom ω_e u smeru obrtanja vektora fluksa AM-a (kao na sl. 1.3).

Jednačine naponskog balansa za rotorski namot

Jednačine naponskog balansa za rotorski namot u stacionarnom a - b - c sistemu su date jednačinom (1.2). Ovu jednačinu možemo napisati u matričnom obliku kao :

$$\bar{V}_r^s = R_s \bar{I}_r^s + \frac{d\bar{\Psi}_r^s}{dt} \quad (1.25)$$

Jednačina (1.25) je opšteg karaktera, tj. važi u svim stacionarnim koordinatnim sistemima, a \bar{V}_r^s , \bar{I}_r^s i $\bar{\Psi}_r^s$ su respektivno vektori : napona, struje i fluksa rotorskog namota u datom stacionarnom koordinatnom sistemu.

Pošto se rotor obrće relativnom brzinom ω_r u odnosu na sinhroni $d^e - q^e$ koordinatni sistem (sl. 1.3), vektor napona rotorskog namota u ovom koordinatnom sistemu je, analogno kao i za stator, definisan sledećom jednačinom:

$$\bar{V}_r = R_s \bar{I}_r^s + \frac{d\bar{\Psi}_r^s}{dt} + \bar{\Omega}_r \times \bar{\Psi}_r \quad (1.26)$$

Vektorskoj jednačini (1.26) odgovaraju skalarne jednačine (1.27) i (1.28), koje nam daju izraze za komponente napona rotorskog namotaja u $d^e - q^e$ koordinatnom sistemu.

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr} \quad (1.27)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_r \psi_{qr} \quad (1.28)$$

Jednačine flukseva statorskog i rotorskog namota

Jednačine (1.6), u kojima su dati fluksevi AM-a u stacionarnom $a-b-c$ sistemu, možemo napisati u sinhronom $d^e - q^e$ sistemu kao:

$$\begin{aligned} \psi_{qs} &= L_{\gamma s} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \psi_{qr} &= L_{\gamma r} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \psi_{ds} &= L_{\gamma s} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \psi_{dr} &= L_{\gamma r} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \end{aligned} \quad (1.29)$$

gde su :

Ψ_{qs} , Ψ_{qr} - fluksevi statorskog i rotorskog namotaja po „ q ” osi,
 Ψ_{ds} , Ψ_{dr} - fluksevi statorskog i rotorskog namotaja po „ d ” osi,

$L_{\gamma s}, L_{\gamma r}$ - induktivnosti rasipanja statorskog i rotorskog namotaja (svedene na stator), respektivno.

Mehanička jednačina AM-a

Jednačina ravnoteže momenata koji deluju na vratilo AM-a je data Njutnovom jednačinom (1.7) koju ćemo sada napisati u malo proširenoj formi, odnosno :

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{P} J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.30)$$

gde su ω_m i ω mehanička i električna brzina obrtanja rotora, respektivno, zapravo reč je o istoj veličini (brzini obrtanja rotora) ali izraženoj u različitim jedinicama; ω_m je izražena u [rad/s], dok je ω izražena u [el.rad/s] . Veza između ovih jedinica sadržana je u sledećoj relaciji :

$$\omega_m = \frac{1}{P} \omega \quad (1.31)$$

gde je P broj pari polova AM-a. Ostale oznake u izrazu (1.30) su iste kao u relaciji (1.7).

Ako u jednačini (1.30) brzinu obrtanja rotora ω izrazimo preko sinhronne brzine ω_e i apsolutnog klizanja ω_r , relacija (1.14), dobijamo sledeću jednačinu:

$$T_e - T_L = \frac{1}{P} J \frac{d(\omega_e - \omega_r)}{dt} \quad (1.32)$$

Pod pretpostavkom da učestanost napajanja motora nije funkcija vremena, tj. da je $\omega_e = const.$, za dati režim rada AM-a, relacija (1.32) se može napisati i u sledećem obliku :

$$T_L - T_e = \frac{1}{P} J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (1.33)$$

Da bi smo izveli izraz za elektromagnetski moment poći ćemo od njegove opšte vektorske jednačine, koja proističe iz principa rada AM-a :

$$\bar{T}_e = \frac{3}{2} P (\bar{\Psi}_m \times \bar{I}_r) \quad (1.34)$$

Razlaganjem vektora fluksa magnećenja $\bar{\Psi}_m$ i vektora struje rotora \bar{I}_r na d^e i q^e komponente, jednačinu (1.34) možemo napisati u sledećem skalarnom obliku :

$$T_e = \frac{3}{2} P(\psi_{dm} i_{qr} - \psi_{qm} i_{dr}) \quad (1.35)$$

gde je:

ψ_{qm} - fluks magnećenja asinhronne mašine po q^e osi,

ψ_{dm} - fluks magnećenja asinhronne mašine po d^e osi.

Imajući u vidu relaciju (1.29), izraz za elektromagnetni moment (1.35) možemo napisati u sledećem obliku :

$$T_e = \frac{3}{2} P(\psi_{dm} i_{qs} - \psi_{qm} i_{ds}) \quad (1.36)$$

Na osnovu relacije (1.29) možemo napisati izraze za komponente fluksa magnećenja $\bar{\Psi}_m$ u $d^e - q^e$ sistemu kao :

$$\begin{aligned} \psi_{qm} &= L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \psi_{dm} &= L_m (i_{ds} + i_{dr}) \end{aligned} \quad (1.37)$$

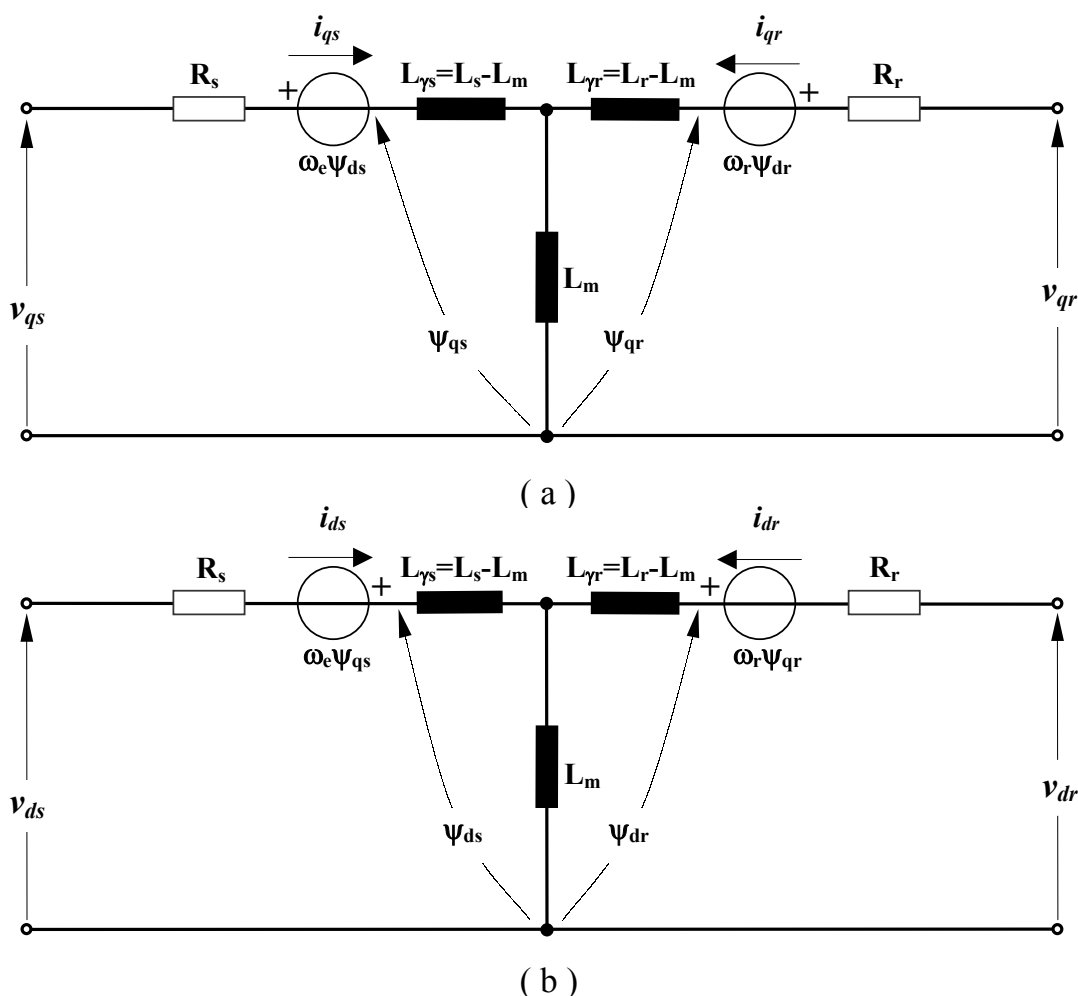
Zamenom izraza (1.37) u jednačinu (1.36) ili (1.35) dobijamo izraz za elektromagnetni moment u funkciji struja asinhronne mašine, tj. dobijamo sledeću relaciju :

$$T_e = \frac{3}{2} PL_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (1.38)$$

Relacijom (1.38) smo kompletirali Parkov matematički model asinhronne mašine.

Zamenska šema asinchronog motora u d^e - q^e sistemu

Na osnovu dobijenih jednačina naponskog balansa i jednačina flukseva možemo nacrtati zamensku šemu AM-a u d^e - q^e sistemu:



Sl. 1.4 d - q ekvivalentna šema asinchronog motora; (a) zamenska šema namotaja po q^e osi; (b) zamenska šema namotaja po d^e osi

Na osnovu sl. 1.4 možemo zaključiti da se analiza prelaznih procesa u AM-u ne može sprovesti nezavisno za d i za q ekvivalentni namotaj, jer su šeme 1.4a i 1.4b međusobno povezane fluksevima. Komponenta fluksa statorskog namotaja po d^e osi generiše ems $\omega_e \Psi_{ds}$ koja deluje u pravcu q^e ose, odnosno, komponenta statorskog fluksa po q^e osi generiše ems $\omega_e \Psi_{qs}$ koja djeluje u pravcu d^e ose.

2. MODIFIKOVANI PARKOV MODEL AM-a

Parkov model AM-a, koji smo izložili u prethodnom poglavlju, je prvenstveno formiran i prilagođen analizi prelaznih pojava u AM-u koji je vezan na mrežu (zaletanje, promena opterećenja, promena napona napajanja, ...). Obično su ove pojave interesantne sa stanovišta projektovanja vučnih pretvarača, pa se izloženi model uglavnom sreće u literaturi koja se bavi ovom problematikom.

Analiza prelaznog procesa u sistemu „*napojni vod – asinhroni motor – radna mašina*”, koji se javlja pri njegovom odvajanju od mreže, odnosno izvora, je specifična i zahteva modifikovanje standardnog Parkovog modela AM-a. Ta specifičnost se ogleda u tome što AM po isključenju čini jedan zaseban sistem, odnosno jedan sistem koji je odvojen od mreže a poseduje izvesnu akumulisanu energiju. Fluktuacija ove energije u pomenutom sistemu više nije diktirana mrežom odnosno njenom učestanošću ω_e , pa ćemo iz tog razloga osnovnu učestanost napona na statoru nadalje označavati sa ω_s da bi istakli mogućnost da ω_s može biti različito od sinhronne brzine ω_e . To znači da ćemo AM posmatrati u koordinatnom sistemu koji rotira brzinom ω_s i taj sistem ćemo nadalje označavati kao *d-q* sistem. Pored ovoga, analiza prelaznih procesa u ovakvim uslovima zahteva uvažavanje nekih fizičkih pojava koje su zanemarene u modelima izloženim u prethodnom poglavlju. U tom cilju, da bi smo dobili što korektniji model za analizu naponskih prilika u AM-u po njegovom odvajanju od mreže, uopštavanje (modifikovanje) standardnog Parkovog modela će biti izvršeno kroz uvažavanje :

- uticaja napojnog voda,
- uticaja gubitaka u gvožđu AM-a.

2.1 Modelovanje napojnog voda asinhronog motora

Povezivanje asinhronih motora na napojne sabirnice vrši se isključivo kablovskim vodovima. U velikim industrijskim postrojenjima AM-i mogu biti udaljeni i nekoliko stotina metara od napojnih sabirnica. U takvim uslovima uticaj napojnog kabla na prelazni proces može biti relativno veliki, pa ga je potrebno uvažiti.

S obzirom da se radi o kablovskom vodu, fazni provodnici (žile kabla) su na malom međusobnom rastojanju. Iz tog razloga je njegova

pogonska induktivnost relativno mala dok je pogonska otočna kapacitivnost za red veličine veća nego kod odgovarajućeg vazdušnog voda. Uvažavajući ove činjenice, u daljoj analizi ćemo napojni vod modelovati koncentrisanom kapacitivnošću C_e , koju možemo izraziti preko podužnog parametra kabla kao :

$$C_e = c \cdot l \quad (2.1)$$

gde je :

c – podužna kapacitivnost napojnog kablovskog voda,
 l – dužina napojnog kablovskog voda .

Matematički se ova kapacitivnost, s obzirom da je otočno-simetrično vezana na statorske priključke AM-a, uvažava preko sledeće vektorske jednačine :

$$\bar{I}_c^{(s)} = C_e \frac{d\bar{V}_s^{(s)}}{dt} \quad (2.2)$$

gde je $\bar{V}_s^{(s)}$ vektor napona statora a $\bar{I}_c^{(s)}$ vektor struja kroz kapacitet C_e u posmatranom stacionarnom sistemu. Npr., u stacionarnom a - b - c sistemu je :

$$\begin{aligned} \bar{V}_s^{(s)} &= [u_{as} \quad u_{bs} \quad u_{cs}]^T \\ \bar{I}_c^{(s)} &= [i_{ca} \quad i_{cb} \quad i_{cc}]^T \end{aligned} \quad (2.3)$$

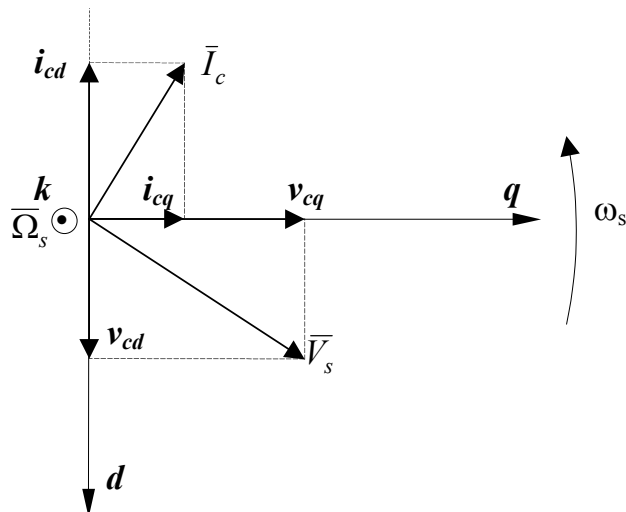
U rotirajućim d - q sistemu, kao posledica relativne rotacije osa ovog koordinatnog sistema u odnosu na stator, jednačina (2.2) poprima sledeći oblik :

$$\bar{I}_c = C_e \frac{d\bar{V}_s}{dt} + C_e (\bar{\Omega}_s \times \bar{V}_s) \quad (2.4)$$

gde je \bar{V}_s vektor napona statora a \bar{I}_c vektor struja kroz kapacitet C_e u d - q sistemu. Relacija (2.4) može se dobiti primenom teoreme dualnosti na jednačinu idealnog kalema, odnosno na jednačinu (1.22) (za $R_s = 0$).

Da bi smo napisali skalarni sistem jednačina koji odgovara vektorskoj jednačini (2.4) moramo ovu jednačinu, u početku, posmatrati

u trodimenzionalnom d - q - k sistemu (koji rotira brzinom ω_s oko ose k) jer je vektor $\bar{\Omega}_s$ normalan na d - q ravan, sl. 2.1 .



Sl. 2.1 *Ilustracija vektorske jednačine (2.4) u d-q-k sistemu*

Na osnovu slike 2.1 možemo pisati :

$$\begin{aligned}\bar{I}_c &= [i_{cd} \quad i_{cq} \quad 0]^T \\ \bar{V}_c &= [v_{ds} \quad v_{qs} \quad 0]^T \\ \bar{\Omega}_s &= [0 \quad 0 \quad \omega_s]^T\end{aligned}\quad (2.5)$$

pa je :

$$\bar{\Omega}_s \times \bar{V}_s = \begin{vmatrix} \vec{d} & \vec{q} & \vec{k} \\ 0 & 0 & \omega_s \\ v_{ds} & v_{qs} & 0 \end{vmatrix} = -\vec{d} \cdot (\omega_s v_{qs}) + \vec{q} \cdot (\omega_s v_{ds}) + \vec{k} \cdot 0 \quad (2.6)$$

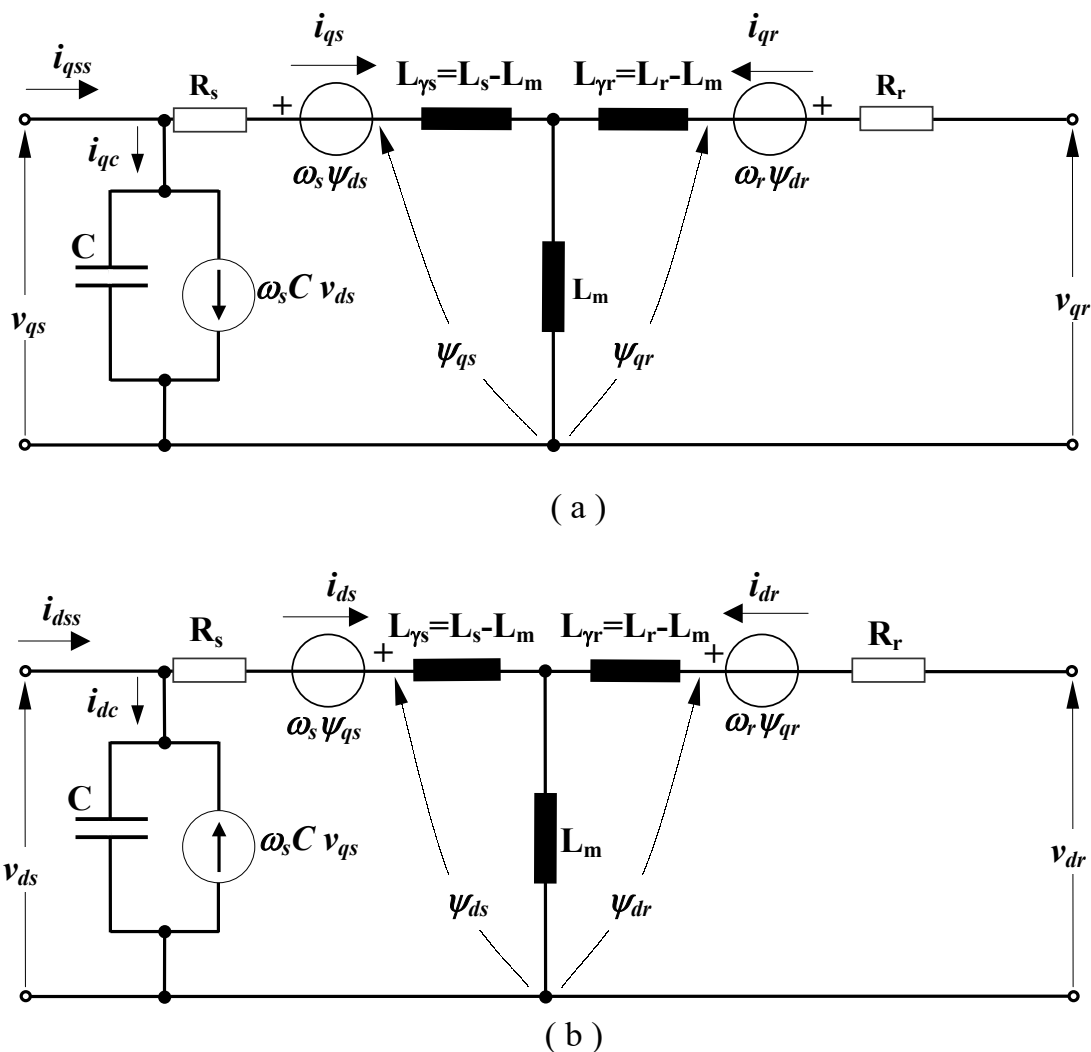
gde su \vec{d} , \vec{q} i \vec{k} ortovi koji koincidiraju sa osama d , q i k , respektivno. Na osnovu izraza (2.5) i (2.6) možemo vektorsku jednačinu (2.4) napisati kao dve skalarne jednačine, odnosno :

$$i_{qc} = C_e \frac{dv_{qs}}{dt} + \omega_s C_e \cdot v_{ds} \quad (2.7)$$

$$i_{dc} = C_e \frac{dv_{ds}}{dt} - \omega_s C_e \cdot v_{qs} \quad (2.8)$$

Treba napomenuti da u C_e možemo uključiti i sve ostale kapacitivnosti (ukoliko one postoje) očno vezane u odnosu na statorski namot.

Uvrštavanjem jednačina (2.7) i (2.8) u Parkov matematički model AM-a, koji je dat u prethodnom poglavlju, dobija se proširen model u kome je uvažena kapacitivnost napojnog voda. Ovom proširenom modelu, shodno relacijama (2.8) i (2.9), odgovara zamenska šema data na sl. 2.2 .



Sl. 2.2 *d – q zamenska šema sistema napojni vod – asinhroni motor;*
(a) – zamenska šema po q osi; (b) – zamenska šema po d osi

2.2 Modelovanje gubitaka u gvožđu asinhronog motora

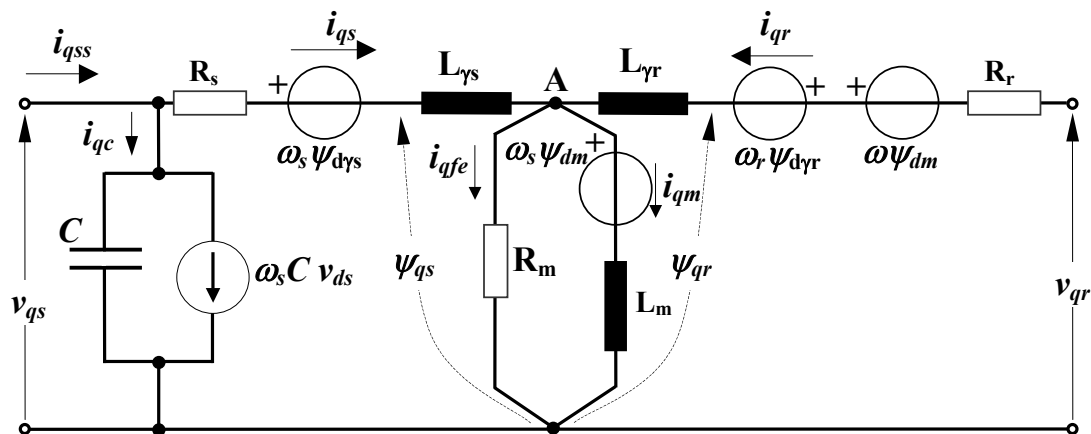
Sistem *napojni vod – asinhroni motor* nakon isključenja sa mreže delom predstavlja jedno složeno RLC kolo. U njemu se, neposredno nakon isključenja, javlja visokofrekventna fluktuacija dela akumulisane energije sistema između kapaciteta C_e i magnetnog sistema motora. Ova fluktuacija energije, između ostalog, se manifestuje postojanjem visokofrekventne komponente napona na statorskim priključcima AM-a. Pomenuti proces je prigušen, tj. amplituda visokofrekventne komponente napona opada sa vremenom jer se energija, koja stvara taj napon, disipira u toku fluktuacije. Disipacija ove energije se odvija, u manjoj ili većoj mjeri, u svim elementima „RLC kola”, tj. u kابلu, provodnicima statora i gvožđu AM-a. Stvarne otpornosti, kojima se disipacija energije u ovim elementima može modelovati, se teško mogu tačno proceniti jer se radi o vrlo visokim frekvencijama pa skin efekat i parazitne kapacitivnosti (kako između navojaka u namotajima tako i između namotaja i magnetnog kola) postaju nezanemarljivi. Naročito je teško tačno modelovati gubitke ove energije u gvožđu AM-a jer su oni, kao što je poznato iz teorije električnih mašina, složena funkcija frekvencije i induktivnosti.

S obzirom da je prvenstveni cilj ovog diplomskog rada vremenski tok niskofrekventne (kvazistacionarne) komponente napona, to ćemo u ovoj analizi gubitke u gvožđu modelovati sa konstantnom, očno vezanom, otpornošću u grani magnećenja AM-a. Vrednost ove otpornosti zavisi od konstrukcionih parametara AM-a, i data je od strane proizvođača. Da bi smo pravilno uvrstili ovu otpornost u zamensku šemu sa sl. 2.2 moramo prethodno ovu šemu nacrtati sa izvorima ems na mestima na kojima oni stvarno i deluju u $d - q$ sistemu, sl. 2.3 .

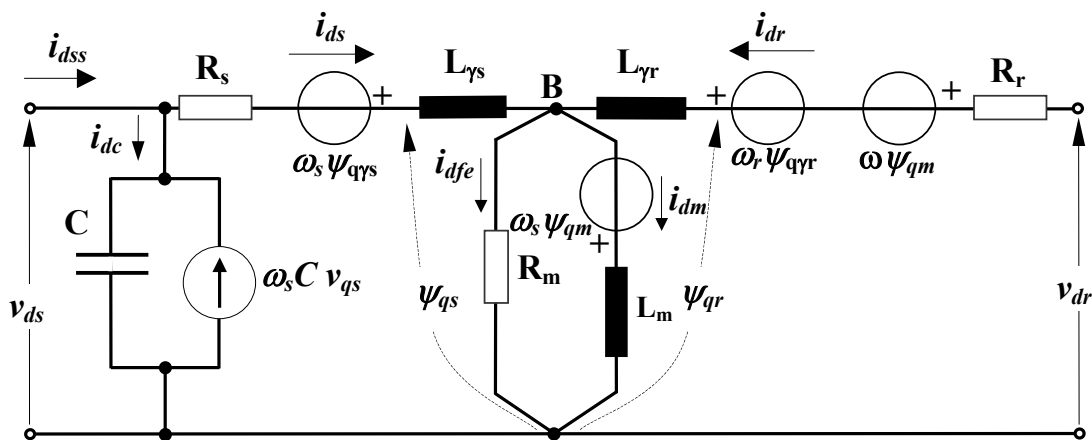
Pri crtanju ove šeme korišćena je činjenica koja sledi iz jednačine (1.22) (za $R_s=0$); idealan kalem, koji se u stacionarnim koordinatnim sistemima modeluje sa induktivnošću, u rotirajućem sistemu se modeluje sa rednom vezom te induktivnosti i naponskim izvorom.

Naponski izvori $\omega\psi_{dm}$ i $\omega\psi_{qm}$, na slici 2.2, su posledica toga što je grana magnećenja vezana i u rotorskom i u statorskom kolu. Pošto se magnećenje posmatra sa strane statora, u grani magnećenja djeluje ems $\bar{\Omega}_s \times \bar{\Psi}_m$. Pošto se rotor obrće brzinom ω u odnosu na stator to je sa njegove strane potrebno, u $d-q$ sistemu, magnećenje posmatrati kao rednu vezu induktivnosti L_m i ems-e $\bar{\Omega}_r \times \bar{\Psi}_m$. Da bi bio zadovoljen i statorski i rotorski uslov u grani magnećenja je zadržana ems $\bar{\Omega}_s \times \bar{\Psi}_m$, ali je u rotoru „ ubačena “ ems - $\bar{\Omega} \times \bar{\Psi}_m$. Matematički bi potpuno isto bilo i da u

grani magnećenja deluje $\bar{\Omega}_r \times \bar{\Psi}_m$ a na strani statora da se „ubaci” naponski izvor $\bar{\Omega} \times \bar{\Psi}_m$, ali je prirodnije posmatrati magnećenje asinhronne mašine sa strane statora.



(a)



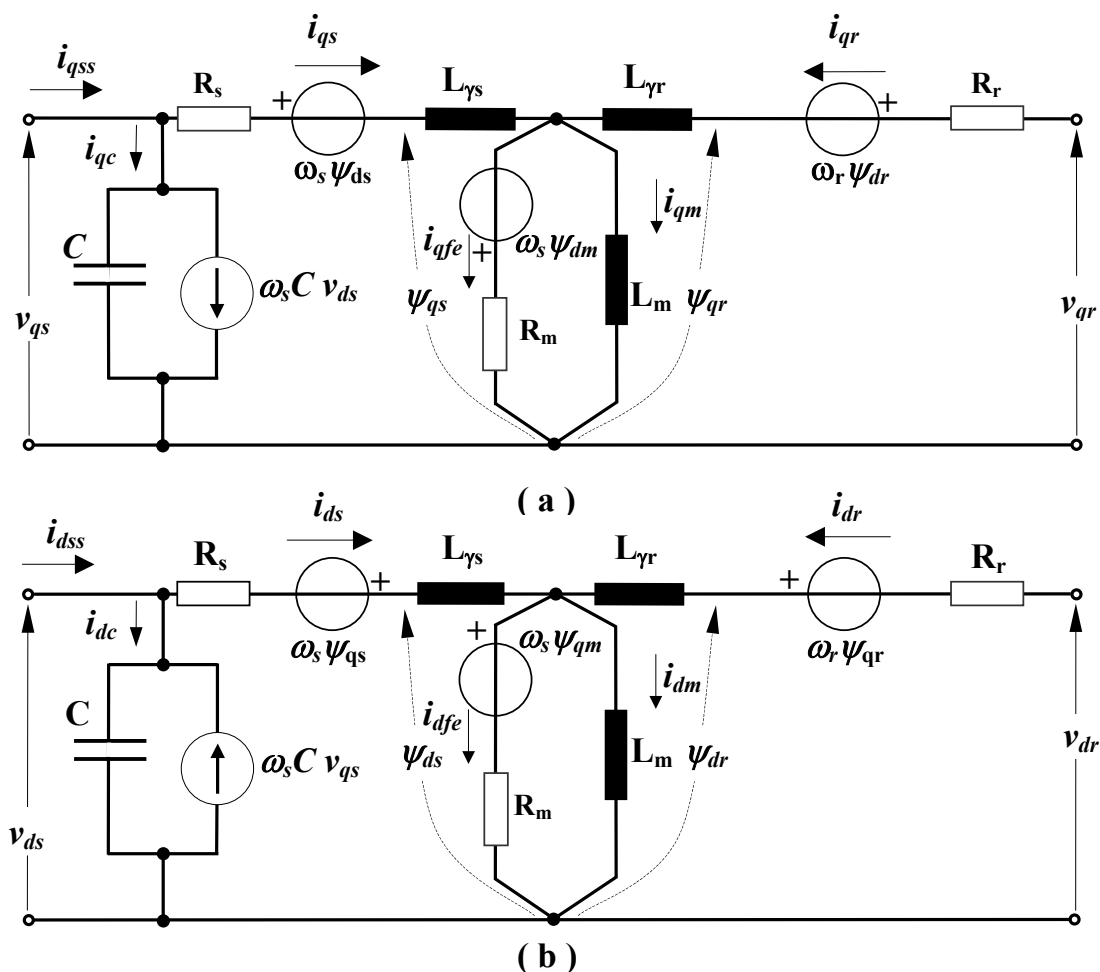
(b)

Sl. 2.3 *d - q zamenska šema sistema napojni vod – asinhroni motor sa uvažanim gubicima u gvožđu; (a) – zamenska šema po q osi, (b) – zamenska šema po d osi*

Iz šeme sa slike 2.3 stavljanjem da: $R_m \rightarrow \infty$, $C_e \rightarrow 0$ i $\omega_s \equiv \omega_e$, direktno dobijamo šemu datu na sl. 1.4 . To znači da su modifikacije, izložene u ovom poglavlju, bile u pravcu uopštavanja standardnog Parkovog modela AM-a.

2.3 Zamenska šema i odgovarajući matematički model sistema napojni vod – asinhroni motor sa uvaženim gubicima u gvožđu

U cilju dobijanja nešto jednostavnije šeme za teorijsku analizu sistema izvršićemo izmeštanje izvora $\omega_s \psi_{qm}$ i $\omega_s \psi_{dm}$ iz grane magnećenja u sve ostale grane koje se stiču u čvor A, odnosno čvor B na sl. 2.3 . U tako dobijenoj šemi možemo sve naponske izvore koji djeluju u jednoj grani ekvivalentirati jednim izvorom. Ovim transformacijama dobijamo zamensku šemu 2.4 na kojoj će biti bazirana dalja analiza u ovom diplomskom radu.



Sl. 2.4 *Sređena d-q zamenska šema sistema “napojni vod – asinhroni motor sa uvaženim gubicima u gvožđu”; (a) – zamenska šema po q osi; (b) – zamenska šema po d osi*

Uvažavanjem kapacitivnosti napojnog kabla i gubitaka u gvožđu AM-a dobijena je znatno složenija zamenska šema, sl. 2.4, od one koja se najčešće sreće u literaturi, a koju smo dali u prethodnom poglavlju, sl. 1.4 . Shodno tome je i matematički model, koji odgovara ovoj zamenskoj šemi, višeg reda, odnosno AM se sada opisuje sa većim brojem jednačina .

U šemi datoj na sl. 2.4 je uvažena mogućnost da rotorski namot ne mora biti kratkospojen (šema je opšteg karaktera u pogledu tipa AM-a). Mi ćemo u daljoj analizi smatrati da su naponi rotorskog namota jednaki nuli, odnosno da su rotorski priključci u šemi 2.4 kratkospojeni (o čemu je bilo riječi u prvom poglavlju). Imajući u vidu ovu pretpostavku, možemo na osnovu šeme na sl. 2.4, formirati matematički model AM-a u d - q sistemu.

Jednačine naponskog balansa za statorski i rotorski namot AM-a

Jednačine naponskog balansa za statorski i rotorski namot AM-a u d - q sistemu su date sledećom relacijom :

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \\
 v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\
 v_{qr} &= 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr} \\
 v_{dr} &= 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_r \psi_{qr}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Ovim jednačinama treba dodati jednačinu (2.10) koja povezuje električnu brzinu obrtanja rotora ω sa rotorskom i statorskom učestanošću.

$$\omega_r = \omega_s - \omega \tag{2.10}$$

Jednačine flukseva asinhronog motora

Jednačine flukseva asinhronog motora u d – q koordinatnom sistemu su date sledećom relacijom :

$$\begin{aligned}
\psi_{qs} &= \psi_{q\gamma s} + \psi_{qm} = L_{\gamma s} i_{qs} + L_m i_{qm} \\
\psi_{ds} &= \psi_{d\gamma s} + \psi_{dm} = L_{\gamma s} i_{ds} + L_m i_{dm} \\
\psi_{qr} &= \psi_{q\gamma r} + \psi_{qm} = L_{\gamma r} i_{qr} + L_m i_{qm} \\
\psi_{dr} &= \psi_{d\gamma r} + \psi_{dm} = L_{\gamma r} i_{dr} + L_m i_{dm}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

gde su :

$\psi_{q\gamma s}, \psi_{d\gamma s}$ – q i d komponente fluksa rasipanja statorskog namota,
 $\psi_{q\gamma r}, \psi_{d\gamma r}$ – q i d komponente fluksa rasipanja rotorskog namota.

Dopunske jednačine

U ovu grupu jednačina svrstaćemo one jednačine koje su posledica uvažavanja kapaciteta napojnog kabla i gubitaka u gvožđu AM-a. Neke od ovih jednačina smo ranije izveli (jednačine (2.7) i (2.8)) ali ćemo ih, zbog kompletnosti modela, ovde ponoviti.

$$i_{qc} = C_e \frac{dv_{qs}}{dt} + \omega_s C_e \cdot v_{ds} \tag{2.12}$$

$$i_{dc} = C_e \frac{dv_{ds}}{dt} - \omega_s C_e \cdot v_{qs} \tag{2.13}$$

Pored ovih jednačina, možemo napisati i jednačine nezavisnih čvorova za šemu datu na sl. 2.4, a to su sledeće jednačine:

$$i_{qss} = i_{qs} + i_{qc} \tag{2.14}$$

$$i_{dss} = i_{ds} + i_{dc} \tag{2.15}$$

$$i_{qs} + i_{qr} = i_{qm} + i_{qfe} \tag{2.16}$$

$$i_{qs} + i_{qr} = i_{dm} + i_{dfe} \tag{2.17}$$

Na kraju, u ovu grupu jednačina svrstaćemo i dve jednačine za konture magnćenja u pomenutoj šemi, a to su:

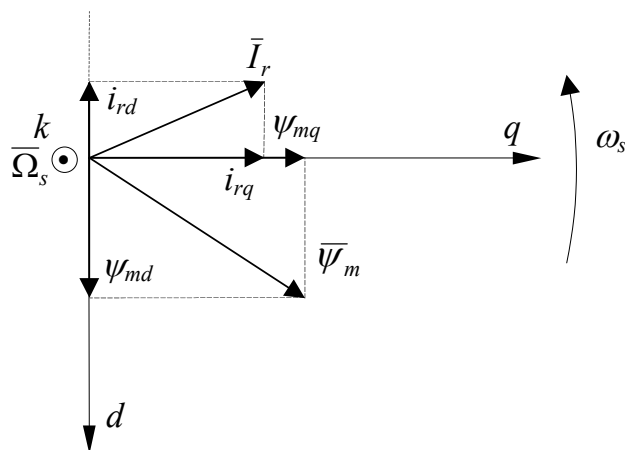
$$\frac{d\psi_{qm}}{dt} = -\omega_s \psi_{dm} + R_m i_{qfe} \tag{2.18}$$

$$\frac{d\psi_{dm}}{dt} = \omega_s \psi_{qm} + R_m i_{dfe} \tag{2.19}$$

gde su :

- i_{qss}, i_{dss} – q i d komponenta struje koja se ima na početku kablovskog voda, gledano od sabirnica,
- i_{qm}, i_{dm} – q i d komponenta struje u reaktivnoj grani magnećenja asinhronog motora,
- i_{qfe}, i_{dfe} – q i d komponenta struje u aktivnoj grani magnećenja, asinhronog motora.

Da bi se kompletirao matematički model potrebno je dodati još i mehaničku jednačinu AM-a, koju smo ranije definisali, jednačina (1.30). Krajnji izraz za aktivni elektromagnetski moment iz prethodnog modela, jednačina (1.38), nije u potpunosti korektan u ovom modelu, jer kroz granu sa L_m , u ovom modelu, ne protiče celokupan algebarski zbir struja rotora i statora. Iz tog razloga ćemo ponovo izvesti izraz za elektromagnetski moment. Krenućemo od njegove opšte vektorske jednačine (1.34), koju ćemo ovdje posmatrati u $d - q - k$ koordinatnom sistemu, sl. 2.5 .



Sl. 2.5 Ilustracija vektorske jednačine (1.34) u d - q - k koordinatnom sistemu

Na osnovu sl. 2.5 vektorsku jednačinu (1.34) možemo napisati u sledećem obliku:

$$\bar{T}_e = \frac{3}{2} P (\bar{\Psi}_m \times \bar{I}_r) = \frac{3}{2} P \cdot \begin{vmatrix} \vec{d} & \vec{q} & \vec{k} \\ \psi_{dm} & \psi_{qm} & 0 \\ i_{dr} & i_{qr} & 0 \end{vmatrix} = \frac{3}{2} P \vec{k} (\psi_{dm} i_{qr} - \psi_{qm} i_{dr}) \quad (2.20)$$

odnosno, zamenom izraza $\psi_{dm} = L_m i_{dm}$ i $\psi_{qm} = L_m i_{qm}$ u prethodnu jednačinu (2.20) dobijamo :

$$T_e = |\bar{T}_e| = \frac{3}{2} P L_m (i_{dm} i_{qr} - i_{qm} i_{dr}) \quad (2.21)$$

Zamenom izraza (2.21) u mehaničku jednačinu AM-a (1.30) ona sada postaje :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3P^2 L_m}{2J} (i_{dm} i_{qr} - i_{qm} i_{dr}) - \frac{P}{J} T_L \quad (2.22)$$

Jednačine (2.9) do (2.22) predstavljaju kompletan $d-q$ matematički model sistema *napojni vod – AM – radna mašina*.

3. $d - q$ MODEL ASINHRONOG MOTORA U PROSTORU STANJA

Da bi prethodno izvedeni matematički model AM-a bio prilagođen njegovom programskom rešavanju, kao i da bi bilo omogućeno dobijanje informacija o nekim pomoćnim promenljivima (struje u rotorskim namotajima, struje u grani magnećenja, itd.) pogodno je ovaj model napisati u prostoru stanja. U tom cilju sve grupe jednačina AM-a, iz prethodnog odeljka, posmatraćemo sada kao jedan sistem.

3.1 Dinamički model AM-a u prostoru stanja

Ako u jednačinama naponskog balansa (2.9) uvrstimo jednačine flukseva (2.11) matematički model AM-a možemo napisati kao:

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} [L_{\gamma s} i_{qs} + L_m i_{qm}] + \omega_s [L_{\gamma s} i_{ds} + L_m i_{dm}] \\
 v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} [L_{\gamma s} i_{ds} + L_m i_{dm}] - \omega_s [L_{\gamma s} i_{qs} + L_m i_{qm}] \\
 0 &= R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} [L_{\gamma r} i_{qr} + L_m i_{qm}] + \omega_r [L_{\gamma r} i_{dr} + L_m i_{dm}] \\
 0 &= R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} [L_{\gamma r} i_{dr} + L_m i_{dm}] + \omega_r [L_{\gamma r} i_{qr} + L_m i_{qm}] \\
 \frac{d}{dt} [L_m i_{qm}] &= -\omega_s L_m i_{dm} + R_m i_{qfe} \\
 \frac{d}{dt} [L_m i_{dm}] &= \omega_s L_m i_{qm} + R_m i_{dfe} \\
 i_{qfe} &= i_{qs} + i_{qr} - i_{qm} \\
 i_{dfe} &= i_{ds} + i_{dr} - i_{dm} \\
 i_{qc} &= C_e \frac{dv_{qs}}{dt} + \omega_s C_e \cdot v_{ds} \\
 i_{dc} &= C_e \frac{dv_{ds}}{dt} - \omega_s C_e \cdot v_{qs} \\
 i_{qc} &= i_{qss} - i_{qs} \\
 i_{dc} &= i_{dss} - i_{ds} \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3P^2 L_m}{2J} (i_{dm} i_{qr} - i_{qm} i_{dr}) - \frac{P}{J} T_L \\
 \omega_r &= \omega_s - \omega
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

U ovoj analizi zanemarimo efekat zasićenja asinhronne mašine tj. pretpostavimo da je $L_m = const$. Ova pretpostavka ima smisla naročito kod velikih asinhronih mašina, kakve ovde i analiziramo, jer je kod njih, iz mehaničkih razloga (problem ugiba vratila i centrifugalnih sila), vazdušni zazor između statora i rotora relativno veliki (reda nekoliko milimetara) pa je njihovo magnetno kolo približno linearno. Naravno, ukoliko se želi uvažiti efekat zasićenja važi matematički model dat sistemom (3.1) ali je potrebno analitički definisati funkcije $L_{mq} = f_1(i_{qm})$ i $L_{md} = f_2(i_{dm})$. Ove jednačine su opšteg karaktera, tj. važe za sve mašine naizmenične struje. Asinhrona mašina ima istu magnetnu otpornost u svim radijalnim pravcima (tj. ima beskonačan broj radijalnih osa simetrije) pa za nju važi da je $L_{mq} = L_{md} = L_m = f(i_{qm}) = f(i_{dm})$, što je uvaženo u prethodnim modelima AM-a.

Uzimanjem u obzir pretpostavke da je $L_m = const$. i korišćenjem nekih osnovnih matematičkih transformacija u sistemu (3.1), on poprima sledeći oblik:

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= R_s i_{qs} + \omega_s L_{\gamma s} i_{ds} + \omega_s L_m i_{dm} + L_{\gamma s} \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di_{qm}}{dt} \\
 v_{ds} &= R_s i_{ds} - \omega_s L_{\gamma s} i_{qs} - \omega_s L_m i_{qm} + L_{\gamma s} \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di_{dm}}{dt} \\
 0 &= R_r i_{qr} + \omega_r L_{\gamma r} i_{dr} + \omega_r L_m i_{dm} + L_{\gamma r} \frac{di_{qr}}{dt} + L_m \frac{di_{qm}}{dt} \\
 0 &= R_r i_{dr} - \omega_r L_{\gamma r} i_{qr} - \omega_r L_m i_{qm} + L_{\gamma r} \frac{di_{dr}}{dt} + L_m \frac{di_{dm}}{dt} \\
 L_m \frac{di_{qm}}{dt} &= -\omega_s L_m i_{dm} + R_m (i_{qs} + i_{qr} - i_{qm}) \\
 L_m \frac{di_{dm}}{dt} &= \omega_s L_m i_{qm} + R_m (i_{ds} + i_{dr} - i_{dm}) \\
 i_{qss} - i_{qs} &= C_e \frac{dv_{qs}}{dt} + \omega_s C_e \cdot v_{ds} \\
 i_{dss} - i_{ds} &= C_e \frac{dv_{ds}}{dt} - \omega_s C_e \cdot v_{qs} \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3P^2 L_m}{2J} (i_{dm} i_{qr} - i_{qm} i_{dr}) - \frac{P}{J} T_L \\
 \omega_r &= \omega_s - \omega
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Grupisanjem članova u kojima se vrši operacija diferenciranja sa jedne strane jednakosti i prebacivanjem ostalih na drugu stranu te

jednakosti, prethodni sistem jednačina (3.2) možemo napisati u sledećem obliku:

$$\begin{aligned}
\frac{di_{qs}}{dt} &= -\frac{R_s}{L_{\gamma s}} i_{qs} - \omega_s i_{ds} - \omega_s \frac{L_m}{L_{\gamma s}} i_{dm} + \omega_s \frac{L_m}{L_{\gamma s}} i_{dm} - \frac{R_m}{L_{\gamma s}} (i_{qs} + i_{qr} - i_{qm}) + \frac{1}{L_{\gamma s}} v_{qs} \\
\frac{di_{ds}}{dt} &= -\frac{R_s}{L_{\gamma s}} i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \omega_s \frac{L_m}{L_{\gamma s}} i_{qm} - \omega_s \frac{L_m}{L_{\gamma s}} i_{qm} - \frac{R_m}{L_{\gamma s}} (i_{ds} + i_{dr} - i_{dm}) + \frac{1}{L_{\gamma s}} v_{ds} \\
\frac{di_{qr}}{dt} &= -\frac{R_r}{L_{\gamma r}} i_{qr} - \omega_r i_{dr} - \omega_r \frac{L_m}{L_{\gamma r}} i_{dm} + \omega_s \frac{L_m}{L_{\gamma r}} i_{dm} - \frac{R_m}{L_{\gamma r}} (i_{qs} + i_{qr} - i_{qm}) \\
\frac{di_{dr}}{dt} &= -\frac{R_r}{L_{\gamma r}} i_{dr} + \omega_r i_{qr} + \omega_r \frac{L_m}{L_{\gamma r}} i_{qm} - \omega_s \frac{L_m}{L_{\gamma r}} i_{qm} - \frac{R_m}{L_{\gamma r}} (i_{ds} + i_{dr} - i_{dm}) \\
\frac{di_{qm}}{dt} &= -\omega_s i_{dm} + \frac{R_m}{L_m} (i_{qs} + i_{qr} - i_{qm}) \\
\frac{di_{dm}}{dt} &= \omega_s i_{qm} + \frac{R_m}{L_m} (i_{ds} + i_{dr} - i_{dm}) \\
\frac{dv_{qs}}{dt} &= -\omega_s v_{ds} - \frac{1}{C_e} i_{qs} + \frac{1}{C_e} i_{qss} \\
\frac{dv_{ds}}{dt} &= \omega_s v_{qs} - \frac{1}{C_e} i_{ds} + \frac{1}{C_e} i_{dss} \\
\frac{d\omega}{dt} &= \frac{3P^2 L_m}{2J} (i_{dm} i_{qr} - i_{qm} i_{dr}) - \frac{P}{J} T_L \\
\omega_r &= \omega_s - \omega
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Konstante koje figurišu u matematičkom modelu asinhronog motora u prostoru stanja

Da bi smo imali pregledniji sistem jednačina, odnosno matematički model, definišaćemo sledeće konstante:

$$\begin{aligned}
A_1 &= \frac{1}{L_{\gamma s}}; & A_2 &= \frac{R_m}{L_{\gamma s}}; & A_3 &= \frac{R_m + R_s}{L_{\gamma s}}; & A_4 &= \frac{L_m}{L_{\gamma r}}; \\
A_5 &= \frac{R_m}{L_{\gamma r}}; & A_6 &= \frac{R_m + R_r}{L_{\gamma r}}; & A_7 &= \frac{R_m}{L_m}; & A_8 &= \frac{3L_m P^2}{2J}; \\
A_9 &= \frac{P}{J}; & A_{10} &= C_e; & A_{11} &= \frac{1}{C_e};
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Nakon grupisanja koeficijenata uz promenljive u sistemu (3.3) i zamenom prethodno definisanih konstanti u njemu, dobijamo sistem (3.5) koji predstavlja model AM-a u prostoru stanja.

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{qs}}{dt} &= -A_3 i_{qs} - A_2 i_{qr} + A_2 i_{qm} - \omega_s i_{ds} + A_1 v_{qs} \\
 \frac{di_{ds}}{dt} &= -A_3 i_{ds} - A_2 i_{dr} + A_2 i_{dm} + \omega_s i_{qs} + A_1 v_{ds} \\
 \frac{di_{qr}}{dt} &= -A_6 i_{qr} - A_5 i_{qs} + A_5 i_{qm} - \omega_r i_{dr} + A_4 (\omega_s - \omega_r) i_{dm} \\
 \frac{di_{dr}}{dt} &= -A_6 i_{dr} - A_5 i_{ds} + A_5 i_{dm} + \omega_r i_{qr} - A_4 (\omega_s - \omega_r) i_{qm} \\
 \frac{di_{qm}}{dt} &= A_7 i_{qs} + A_7 i_{qr} - A_7 i_{qm} - \omega_s i_{dm} \\
 \frac{di_{dm}}{dt} &= A_7 i_{ds} + A_7 i_{dr} - A_7 i_{dm} + \omega_s i_{qm} \\
 \frac{dv_{qs}}{dt} &= -\omega_s v_{ds} - A_{11} i_{qs} + A_{11} i_{qss} \\
 \frac{dv_{ds}}{dt} &= \omega_s v_{qs} - A_{11} i_{ds} + A_{11} i_{dss} \\
 \frac{d\omega}{dt} &= A_8 i_{dm} i_{qr} - A_8 i_{qm} i_{dr} - A_9 T_L \\
 \omega_r &= \omega_s - \omega
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Na osnovu forme modela (3.5) možemo definisati vektor promenljivih stanja (\bar{X}) i vektor ulaznih promenljivih (\bar{U}):

$$[\bar{X}] = [i_{qs} \quad i_{ds} \quad i_{qr} \quad i_{dr} \quad i_{qm} \quad i_{dm} \quad v_{qs} \quad v_{ds} \quad \omega \quad \omega_s]^T \tag{3.6}$$

$$[\bar{U}] = [i_{qss} \quad i_{dss} \quad \omega_r \quad T_L]^T \tag{3.7}$$

Promenljive stanja i ulazne promenljive u modelu (3.5) su odabrane tako da model ima formu pogodnu za analizu prelaznih pojava u AM-u kada je on odvojen od mreže, ali on može poslužiti i za druge analize rada AM-a.

Problem analize nekog prelaznog procesa u AM-u se ovim sveo na rešavanje nelinearnog sistema (3.5) koji čini devet diferencijalnih jednačina. Da bi se ovaj sistem rešio potrebno je definisati početne vrednosti promenljivih stanja i ulazne promenljive, odnosno početnu vrednost vektora (3.6), kao i vektor ulaznih promenljivih (3.7), kojim se matematički simulira vrsta poremećaja.

3.2 Stacionarno radno stanje asinhronog motora

Vrednosti promenljivih stanja u trenutku nekog poremećaja rada AM-a, odnosno početne vrednosti za rešavanje sistema (3.5), su određene radnim stanjem AM-a koje se ima u trenutku neposredno pre nastanka poremećaja (u ovom slučaju prekida napajanja AM-a). U ovom radu ćemo analizirati prekid napajanja AM-a iz nekog normalnog, stacionarnog režima rada (npr. nominalnog ili praznog hoda). Iz tog razloga ćemo, u ovom odjeljku, dati analitički model za stacionarna radna stanja AM-a. Pošto imamo formiran matematički model AM-a u prostoru stanja (3.5), matematički se stacionarno stanje može definisati sledećom matricnom jednačinom :

$$\frac{d[\bar{X}]}{dt} = 0 \quad (3.8)$$

Uvrštavanjem jednačine (3.8) u sistem (3.5) dobijamo sistem nelinearnih algebarskih jednačina (3.9), koji predstavlja matematički model AM-a koji se nalazi u stacionarnom radnom stanju.

$$\begin{aligned} 0 &= -A_3 i_{qs} - A_2 i_{qr} + A_2 i_{qm} - \omega_s i_{ds} + A_1 v_{qs} \\ 0 &= -A_3 i_{ds} - A_2 i_{dr} + A_2 i_{dm} + \omega_s i_{qs} + A_1 v_{ds} \\ 0 &= -A_6 i_{qr} - A_5 i_{qs} + A_5 i_{qm} - \omega_r i_{dr} + A_4 (\omega_s - \omega_r) i_{dm} \\ 0 &= -A_6 i_{dr} - A_5 i_{ds} + A_5 i_{dm} + \omega_r i_{qr} - A_4 (\omega_s - \omega_r) i_{qm} \\ 0 &= A_7 i_{qs} + A_7 i_{qr} - A_7 i_{qm} - \omega_s i_{dm} \\ 0 &= A_7 i_{ds} + A_7 i_{dr} - A_7 i_{dm} + \omega_s i_{qm} \\ 0 &= -\omega_s v_{ds} - A_{11} i_{qs} + A_{11} i_{qss} \\ 0 &= \omega_s v_{qs} - A_{11} i_{ds} + A_{11} i_{dss} \\ 0 &= A_8 i_{dm} i_{qr} - A_8 i_{qm} i_{dr} - A_9 T_L \\ 0 &= \omega_s - \omega - \omega_r \end{aligned} \quad (3.9)$$

Kao vektor nepoznatih može se posmatrati bilo koji set od maksimalno $N = 10$ od ukupno $M = 14$ veličina koje figurišu u sistemu (3.9), jer je broj jednačina koje čine sistem (3.9) jednak N . Preostale, $M - N = 4$ promenljive se moraju unapred definisati da bi sistem imao jedinstveno rešenje. S obzirom da je AM u stacionarnom radnom stanju priključen na mrežu to nam ona daje tri nezavisno promenljive za sistem (3.9), a to su: d i q komponente napona statora (v_{ds} i v_{qs}) i učestanost napajanja AM-a odnosno statorska učestanost ω_s . Četvrta nezavisno promenljiva je moment opterećenja AM-a T_L , koji može biti dat i kao funkcija brzine obrtanja motora.

Sada možemo definisati vektor nepoznatih \bar{X}_0 i vektor ulaznih veličina \bar{U}_0 za sistem (3.9) :

$$[\bar{X}_0] = [i_{qso} \quad i_{dso} \quad i_{qro} \quad i_{dro} \quad i_{qmo} \quad i_{dmo} \quad i_{qss0} \quad i_{dss0} \quad \omega_o \quad \omega_{ro}]^T \quad (3.10)$$

$$[\bar{U}_0] = [v_{qso} \quad v_{dso} \quad \omega_{so} \quad T_{L0}]^T \quad (3.11)$$

Pošto je $\text{rang}[\bar{X}_0] = 10 = M$, sistem (3.9) ima jedinstveno rešenje koje nam daje vrednost promenljivih \bar{X}_0 za definisani sistem nezavisno promenljivih \bar{U}_0 . Na osnovu ovih vrednosti definišu se početni uslovi za rešavanje sistema diferencijalnih jednačina (3.5), odnosno za sprovođenje analize prelaznog režima koji se ima pri prekidu napajanja AM-a.

4. PREKID NAPAJANJA ASINHRONOG MOTORA

U ovom poglavlju ćemo pokušati da objasnimo fizički proces koji se odvija u sistemu u trenutku odvajanja AM-a od mreže. Na osnovu toga formiraćemo vektor ulaznih veličina za matematički model AM-a u prostoru stanja (2.26) i na taj način ćemo dobiti model na kojem će se bazirati računarski program za analizu prelaznih pojava u AM-u kada on kratkotrajno ostane bez napajanja.

4.1 ANALIZA BRZOG (TRENUTNOG) ISKLJUČENJA AM-a SA MREŽE

Pod pojmom „trenutno isključenje” podrazumijevaćemo da se prekid napajanja AM-a može desiti u proizvoljnom vremenskom trenutku i da je jednovremen za sve tri faze. Matematički ovaj pojam bi se mogao formulisati na sledeći način:

Ako se kontakti komutacionog uređaja (prekidača ili rastavljača snage), kojim se vrši prekidanje napajanja AM-a, počnu odvajati u trenutku t_0 onda je, uvažavajući pretpostavku o trenutnom isključenju, u trenutku $t = t_0 - \theta$ AM bio prikačen na mrežu (nalazio se u stacionarnom radnom stanju) a u trenutku $t = t_0 + \theta$ on će biti potpuno (sve tri faze) odvojen od mreže.

Na osnovu ove pretpostavke i sl. 2.4 možemo zaljučiti da u trenutku prekida napajanja struja na početku kablovskog napojnog voda „pada” trenutno na nulu, tj.

$$\begin{aligned} i_{qss}(t=t_0+0) &= 0 \\ i_{dss}(t=t_0+0) &= 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

U ovoj analizi pretpostavićemo da i klizanje AM-a (ω_r) u trenutku prekida napajanja trenutno pada na nulu, odnosno :

$$\omega_{r(t=t_0+0)} = 0 \quad (4.2)$$

Ova pretpostavka nije u potpunosti tačna iz sledeća dva razloga :

- 1) Neposredno nakon prekida napajanja AM-a u njegovom napojnom kablju ima se određena elektrostatička energija kojom će se motor napajati izvjesno vrijeme nakon prekida napajanja. Međutim, učestanost fluktuacije ove energije je velika (jer su C_e i L_e relativno mali) pa se praktično sva ova energija disipira u električnom i magnetnom kolu statora odno-sno ne prenosi se na rotor, pa samim tim i ne stvara elektromagnetni momenat, odnosno klizanje.
- 2) Od trenutka kada se odvoji od mreže asinhroni motor se može posmatrati kao autonomni asinhroni generator u praznom hodu. Pošto u kolu statora nema potrošača aktivne snage i elektromagnetni momenat bi bio jednak nuli , odnosno ne bi bilo klizanja, međutim, u gvožđu statora se imaju gubici aktivne snage (oni su ekvivalentirani otpornošću R_m na sl. 2.4), koji se praktično javljaju kao aktivno opterećenje za generator. Iz ovog razloga će i u praznom hodu generatora postojati neko malo klizanje. S obzirom da su ovi gubici mali, odnosno R_m relativno veliko, klizanje se može praktično zanemariti. U prilog ovome ide i činjenica da se zbog smanjenja brzine obrtanja rotora i indukcije u magnetnom kolu motora ovi gubici smanjuju, odnosno R_m raste sa vremenom trajanja prelaznog procesa. Ova promjena otpornosti R_m neće biti uvažena u ovom radu jer smo je, kao što smo rekli u odeljku 2.2, prvenstveno uveli zbog visokofrekventne komponente napona, odnosno da bi smo dobili što realnije prigušenje ove komponente, a njen uticaj je mali na ostale „spo-re” fizičke procese.

Na osnovu gore navedenog, zaključujemo da je pretpostavka data relacijom 4.2 praktično održiva za analizirani slučaj prekida napajanja AM-a .

Zamjenom relacije 4.2 u poslednju jednačinu sistema 2.26 dobijamo sledeću relaciju:

$$\omega_{s(t>t_0)} = \omega \quad (4.3)$$

Uvažavanjem relacija 4.1 do 4.2, vektor ulaznih promjenljivih 2.28 postaje:

$$[\bar{U}] = [i_{qss} \quad i_{dss} \quad \omega_r \quad T_L]^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad T_L]^T \quad (4.4)$$

Ostale promjenljive koje figurišu u modelu 2.26 se ne mijenjaju u trenutku prekida, odnosno diferencijabilne su u tački t_0 .

Ova konstatacija uz relacije 4.3 i 4.4, nam omogućavaju da na osnovu sistema jednačina 2.26 formiramo matematički model odnosno sistem nelinearnih diferencijalnih jednačina 4.5 koji opisuje fizički sistem

napojni vod – AM – radna mašina, nakon njegovog brzog isključenja sa mreže.

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{qs}}{dt} &= -A_3 i_{qs} - A_2 i_{qr} + A_2 i_{qm} - \omega i_{ds} + A_1 v_{qs} \\
 \frac{di_{ds}}{dt} &= -A_3 i_{ds} - A_2 i_{dr} + A_2 i_{dm} + \omega i_{qs} + A_1 v_{ds} \\
 \frac{di_{qr}}{dt} &= -A_6 i_{qr} - A_5 i_{qs} + A_5 i_{qm} - \omega_r i_{dr} \\
 \frac{di_{dr}}{dt} &= -A_6 i_{dr} - A_5 i_{ds} + A_5 i_{dm} + \omega_r i_{qr} \\
 \frac{di_{qm}}{dt} &= A_7 i_{qs} + A_7 i_{qr} - A_7 i_{qm} - \omega i_{dm} \\
 \frac{di_{dm}}{dt} &= A_7 i_{ds} + A_7 i_{dr} - A_7 i_{dm} + \omega i_{qm} \\
 \frac{dv_{qs}}{dt} &= -\omega_s v_{ds} - A_{11} i_{qs} \\
 \frac{dv_{ds}}{dt} &= \omega_s v_{qs} - A_{11} i_{ds} \\
 \frac{d\omega}{dt} &= A_8 i_{dm} i_{qr} - A_8 i_{qm} i_{dr} - A_9 T_L
 \end{aligned}$$

(4.5) *d-q matematički model sistema napojni vod – AM – radna mašina za vrijeme trajanja njegovog isključenja sa napojne mreže*

Početne vrijednosti za promjenljive u sistemu 3.6 su određene stacio-narnim radnim stanjem koje je predhodilo prekidu napajanja, odnosno one su date kao rješenje sistema 2.30 koji opisuje to stanje.

4.2 REALAN PREKID NAPAJANJA AM-a

Pretpostavka o trenutnom prekidu napajanja AM-a, koju smo izložili u predhodnom odeljku, je teorijska. U realnosti prekid napajanja, odnosno sam proces odvajanja AM-a od mreže je složen fizički proces koji traje izvjesno vrijeme. Suština ovog procesa leži u teoremi o neprekidnosti struje kroz rea-lan kalem. Ovdje ćemo pokušati da objasnimo fiziku tog procesa i na osnovu toga pokušaćemo da približimo izvedeni matematički model (4.5) realnosti.

Proces isključenja AM-a od mreže započinje u trenutku kada se počnu odvajati kontakti komutacionog uređaja kojim se vrši to isključenje. Ovaj trenutak može biti proizvoljan, dakle, u opštem slučaju, u tom trenutku postoje struje kroz sva tri fazna provodnika napojnog voda AM-a. Prema pomenutoj teoremi ove struje se nemogu trenutno prekinuti. U predhodnom odeljku smo takođe uvažili ovu teoremu pretpostavljajući da cjelokupne fazne struje statorskih namotaja preuzima kapacitet C_e . S obzirom da se prekidaju relativno velike struje, a kapacitet C_e je relativno mali, to će u početnom trenutku idealizovanog prekida napajanja napon na priključnim kontaktima napojnog voda biti izuzetno veliki i srazmjern strujama koje su se imale u trenutku prekida. Tako veliki napon se u realnosti ne postiže jer u trenutku početka odvajanja kontakata komutacionog uređaja između njih se pali električni luk. U početku, u opštem slučaju, imamo tri luka (u svakoj fazi između odgovarajućeg para kontakata). S obzirom da je se radi o kra-tkim lukovima, njihova otpornost je mala pa motor praktično ima i dalje trofazno napajanje kao i prije prekida, iako su kontakti komutacionog uređaja fizički odvojeni. Period postojanja lukova u svim fazama traje sve dok jedna od faznih struja ne prođe kroz nulu, u tom trenutku luk u toj fazi se gasi i ona je nadalje praktično odvojena od mreže. Od ovog trenutka motor se napaja preko ostala dva fazna priključka, jer struje u njima još uvijek nijesu pale na nulu pa i dalje gore lukovi između parova kontakata u tim fazama. Dakle, AM u ovom periodu biva dvofazno napajan (zapravo ima se monofazan rad trofaznog motora priključenog na međufazni napon). Ovaj period traje sve dok struja u ovom monofaznom kolu ne padne na nulu, tada se gasi preostala dva luka i od tog trenutka AM je potpuno odvojen od mreže. Period dvofaznog napajanja AM, u toku procesa njegovog isključenja traje, računato od trenutka gašenja prvog luka, $\approx T/3$ (za $f = 50 \text{ Hz}$ to je oko 6,67 mS). Ukupno vrijeme trajanja procesa isključenja, računato od trenutka početka odvajanja kontakata u prekidaču do trenutka potpunog isključenja AM-a, je u opsegu od $T/3$ do $2T/3$.

Na osnovu ove analize zaključujemo da bi matematički model AM-a koji bi obuhvatao sve ove činjenice bio vrlo složen, naročito ako bi uvažava-li i nelinearnu otpornost luka . Zbog toga ćemo pokušati da izvedeni model AM-a (4.5) približimo realnom prekidu napajanja AM-a. Zapravo nećemo mijenjati formu modela 4.5 nego ćemo pretpostaviti da se prekid napajanja dešava u trenutku kada jedna od faznih struja u napojnom kابلu prođe kroz nulu. Ovim bi praktično bio uvažen onaj prvi period u procesu realnog prekida (kada gori luk u sve tri faze). Uvažavanje trenutka prekida se vrši izborom komponenti napona statora (v_{qs} i v_{ds}), pri čemu treba da bude zadovoljena relacija 1.20. Ovo podešavanje se vrši programski o čemu će biti riječi u snarednom poglavlju.

5. SOFTVER ZA ANALIZU PRELAZNIH POJAVA U ASINHRONOM MOTORU PRI NJEGOVOM KRATKOTRAJNOM ODVAJANJU OD MREŽE

U ovom odeljku biće opisan računarski program „AMOS”, koji je dat u prilogu ovog rada i služi za naslovljenu analizu.

5.1 Program “AMOS”

AMOS u suštini predstavlja program za rešavanje sistema nelinearnih diferencijalnih jednačina (4.27) i (4.34) za početne uslove koji su dati kao rešenja sistema nelinearnih algebarskih jednačina (3.9). Program je napisan u softverskom paketu MATLAB verzija 5.2 i smešten je u sedam M – datoteka, a to su sledeće datoteke : *amos* , *am* , *stac* , *sys* , *kons* , *norma* i *ulpo*.

U datoteci *amos* nalazi se glavni program, odnosno program AMOS. Izvršavanje ovog programa zahteva postojanje sedam navedenih datoteka u istom direktorijumu. Opisaćemo ulogu svake od ovih datoteka bez ulaženja u detalje programiranja, jer su u sadržajima datoteka dati propratni komentari, koji označavaju šta svaka od sekvenci programa u toj datoteci radi.

Datoteka „ulpo”

U ovoj datoteci smešteni su svi ulazni podaci potrebni za rad programa. Sa stanovišta korisnika programa ovo je jedina datoteka u koju je potrebno da se korisnik edituje (da bi uneo zahtevane podatke). Unošenje podataka nakon editovanja je jednostavno jer pored svakog zahtevanog podatka stoji komentar koji tačno precizira o kom je podatku reč i u kojim jedinicama ga treba uneti. Takođe, svi podaci su sortirani prema delu sistema *mreža – napojni vod – AM – radna mašina* na koji se odnose. Pored radnih veličina sistema, u ovoj datoteci se zahtevaju i neke osnovne nominalne veličine AM-a. One su potrebne za formiranje baznih veličina na osnovu kojih je izvršena normalizacija matematičkog modela AM-a (kako modela (3.9) za stacionarni tako i modela (4.5) za prelazni period).

Poseban komentar zahteva moment opterećenja T_L , koji je u ovom programu, zbog jednostavnosti, predviđen da se unosi kao konstantna vrednost. U realnosti ovaj moment, u zavisnosti od vrste radne

mašine koju AM pokreće, može biti neka funkcija brzine (npr. T_L je kvadratna funkcija brzine kod pumpi). Ovakav moment se takođe može uneti u program. U tom cilju potrebno je u ovoj datoteci definisati koeficijente koji figurišu u funkciji $T_L = f(\omega)$. Npr. ako je $T_L = a + b\omega + c\omega^2$ potrebno je, umesto T_L , definisati koeficijente a , b i c i deklarirati ih kao globalne promenljive. Zatim, u svim ostalim datotekama gde se pojavljuje T_L , umesto njega staviti funkciju $T_L = f(\omega)$, (u ovom slučaju $T_L = a + b\omega + c\omega^2$). Program obuhvata i generatorski režim rada asinhrone mašine tj. moment može da se unese i kao negativna vrednost i da se dobiju korektni podaci za zadati generatorski režim rada asinhrone mašine. Predviđen je rad sa momentima reaktivnog tipa, jer se uglavnom oni sreću u industriji. Naravno, program je korektan i za momente potencijalnog tipa u periodu od trenutka isključenja do trenutka zaustavljanja motora. Ako je, iz teorijskih razloga, korisniku interesantan proces koji se ima kada motor pod dejstvom momenta potencijalnog tipa, u odsustvu napajanja, menja smer obrtanja onda se to može jednostavno rešiti tako što se iz datoteke *am* ukloni druga *if – else – end* naredba i zadrži deo programa između *if* i *else*.

Bitno je napomenuti da program neće dati korektne rezultate ako se kapacitivnost i rasipanja zanemare, tj. ovi podaci moraju imati neku vrednost različitu od nule.

Datoteka „ kons “

U ovoj datoteci smešten je podprogram koji sračunava, na osnovu ulaznih podataka, konstante koje figurišu u sistemima (3.9) , (4.5). Pored ovih konstanti, u ovoj datoteci sračunava se i prevalni moment AM-a na osnovu sledeće relacije :

$$M_{pr} = \frac{3PU^2}{2\omega_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_s^2 + \omega_s^2(L_{js} + L_{jr})^2 + R_s}} \quad (5.1)$$

Uloga M_{pr} u ovom programu biće objašnjena kasnije.

datoteka „ stac “

Ova datoteka, zajedno sa datotekama *ulpo*, *norma*, *kons* i *sys* čini jedan deo programa AMOS koji analizira stacionarni režim zadatog AM-a za zadato opterećenje. Zapravo u datoteci *stac* i *sys* je smešten program za rešavanje nelinearnog sistema algebarskih jednačina (3.9) za zadati vektor ulaza (3.11). Datoteka *stac*, odnosno program u njoj je tako koncipiran da on čini jedan zaseban program koji može da funkcioniše

nezavisno od glavnog programa. Iz tog razloga se u izlaznim podacima iz ove datoteke nalaze neke veličine koje nisu potrebne za AMOS ali mogu biti interesantne iz drugih razloga. Zapravo, ovaj program može izvršiti potpunu analizu za sva stacionarna radna stanja kako za motorni tako i za generatorski režim rada asinhronne mašine. S obzirom da su nam prvenstveni cilj podaci iz AMOS-a, izlazni podaci iz STAC-a su predviđeni kao propratni podaci (to su numerički podaci o osnovnim veličinama koje karakterišu stacionarni radni režim koji je prethodio prekidu napajanja AM-a). Ovi podaci nam mogu koristiti i kao gruba provera za ulazne podatke.

Ukoliko se želi više informacija o stacionarnom stanju u programu STAC se to može jednostavno ostvariti, kao i omogućiti grafička prezentacija tih rezultata. Ukoliko za zadati skup ulaznih podataka (*ulpo*) ne postoji stacionarno radno stanje, programom je predviđeno da se program STAC odnosno AMOS automatski zaustavi i javi grešku. Ova konstatacija greške vrši se programskim „ limitiranjem “ ulaznog momenta opterećenja na vrednost M_{pr} , gde je M_{pr} prevalni moment zadate asinhronne mašine (uzet za motorni režim rada), koji program sračunava na osnovu relacije (5.1). Iz tog razloga i poruka o grešci je u vidu sledećeg teksta :

» amos

.....
**ZADATI MOMENT OPTERECENJA (T) JE VECI OD MAKSIMALNOG
MOMENTA KOJI ZADATI ASINHRONI MOTOR MOZE DA RAZVIJE!!!
PROVERITE DA LI SU ULAZNI PODACI KOREKTNI!**
.....

»

Dakle, ako se pojavi ovakav tekst u komandnom prozoru MATLAB-a potrebno je proveriti ulazne podatke u datoteci *ulpo*.

Podešavanje trenutka prekida napajanja asinhronog motora

U okviru programa AMOS glavni zadatak podprograma STAC je da formira vektor početnih vrednosti stanja (\bar{X}_0) za sistem (4.5). U datoteci *stac* su jasno definisani elementi vektora \bar{X}_0 tako da ih ovde nećemo ponavljati.

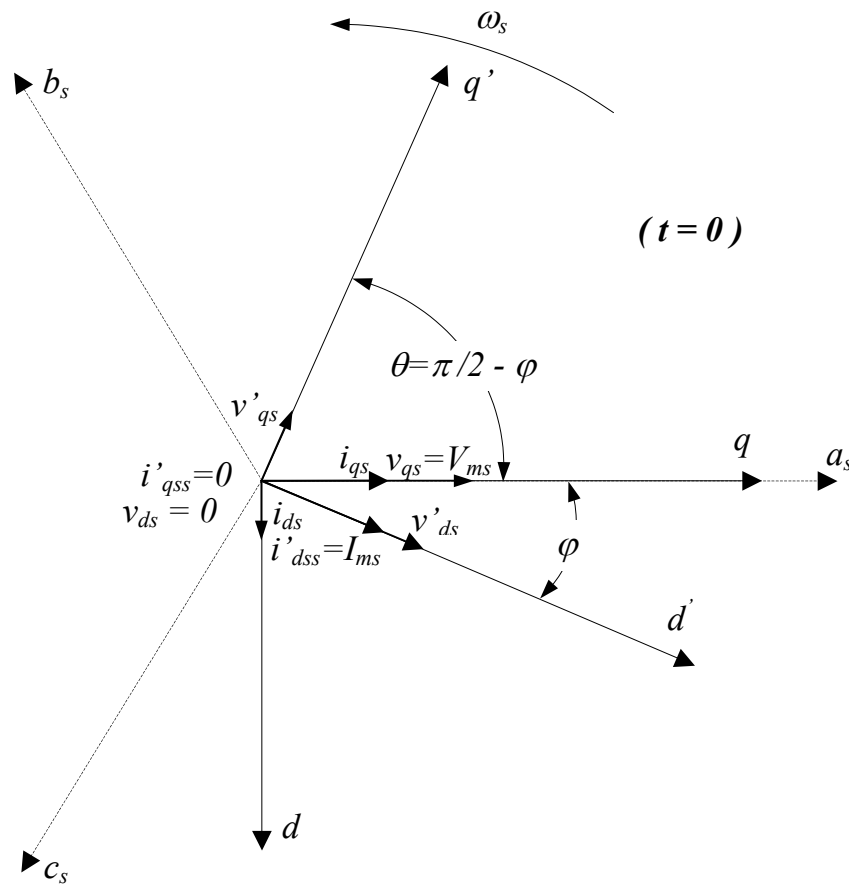
Pri definisanju ovih elemenata uvažena je pretpostavka da prekid napajanja nastupa u trenutku kada struja u jednoj od žila napojnog kabla prođe kroz nulu. Ova pretpostavka je ostvarena u podprogramu STAC transformacijom električnih veličina AM-a (struja i napona) iz jednog sinhronorotirajućeg $d-q$ sistema u drugi takođe sinhronorotirajući $d-q$ sistem koji je, za razliku od prethodnog, sinhronizovan sa statorskim veličinama AM-a u trenutku kada struja kroz fazni priključak *a* napojnog voda prođe kroz nulu. Da bi smo izvršili ovakvu sinhronizaciju,

posmaćemo AM u $d - q$ sistemu koji je zarotiran u odnosu na osu a_s stacionarnog $a-b-c$ sistema za ugao θ , koji iznosi :

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (5.2)$$

gde je φ ugao između fazora napona i struje na početku napojnog voda AM-a.

Transformacija je prikazana na sl. 5.1, pri čemu su zbog preglednosti prikazane samo komponente struje i napona statora.



Sl. 5.1 *Podlašavanje trenutka prekida rotacijom koordinatnog $d-q$ sistema (međusobni položaj koordinatnih sistema datih na slici odgovara trenutku prekida napajanja $t = 0$).*

Na osnovu slike 5.1 možemo definisati matricu transformacije A za prelazak iz $d-q$ u $d'-q'$ koordinatni sistem :

$$A = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Koristeći jednačinu (5.3) možemo napisati jednačine transformacije za napone i struje AM-a u sledećim matrice oblicima:

$$\begin{bmatrix} v'_{qs} \\ v'_{ds} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$\begin{bmatrix} i'_{qss} \\ i'_{dss} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} i_{qss} \\ i_{dss} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Ostale veličine transformišu se na isti način.

Transformacijom, prikazanoj na sl. 5.1, postiže se da trenutak prekida napajanja bude baš onaj kada struja u fazi a napojnog kabla prođe kroz nulu (pošto se radi o simetričnom režimu svejedno je koju fazu odabiramo). Naime, mi smo u prethodnim poglavljima posmatrali AM u takvom sinhronorotirajućem $d-q$ sistemu u kojem njegova osa q koincidira sa osom a_s stacionarnog $a_s-b_s-c_s$ sistema u trenucima $t = \frac{2k\pi}{\omega_s}$

($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), tj. odabrali smo da je $\theta = 0$ u jednačinama Klarkove transformacije. Pretpostavljajući da se prostoperiodične veličine AM-a predstavljaju kosinusnim funkcijama, zaključujemo da se u trenutku $t = 0$ (koji uzimamo kao trenutak prekida napajanja u programu) fazor napona statora \underline{V}_{as} poklapa sa q osom. U tom trenutku ($t = 0$), fazor struje \underline{I}_{as} je u odnosu na osu q pomeren za ugao φ . Rotacijom koordinata za ugao $\theta = (\pi/2) - \varphi$, postizemo da u takvom, zarotiranom, $d-q$ koordinatnom sistemu u trenutku $t = 0$ fazor \underline{I}_{as} koincidira sa d osom tog sistema, odnosno da je struja u fazi a u tom trenutku jednaka nuli.

Da bi smo izvršili transformaciju koordinata potreban nam je faktor snage, odnosno ugao φ za režim koji neposredno prethodi prekidu napajanja. S obzirom da ugao φ zavisi od režima rada (npr. opterećenja AM-a), ali ne i od koordinatnog sistema u kojem se posmatra dati AM to ga možemo proračunati u proizvoljnom koordinatnom sistemu. U programu je φ proračunat u $d - q$ sistemu sa $\theta = 0$, a nakon toga smo prešli u sistem $d' - q'$.

Zaključujemo da podešavanjem ugla θ možemo na jednostavan i praktičan način (bez pravljenja petlji u programu) podesiti da prekid napanjanja AM-a bude u željenom trenutku.

Datoteka „norma”

U ovoj datoteci je smešten podprogram za normalizaciju fizičkih veličina koje karakterišu AM. Zamenom normalizovanih veličina u sisteme jednačina (3.9) i (4.5) dobijamo normalizovane modele AM-a, sa kojim program AMOS radi.

Normalizacijom, sistem (3.9) zadržava istu formu dok sistem (4.5) menjaju formu, tačnije, menja im se samo mehanička jednačina, dok ostale jednačine u tom sistemu ostaju nepromenjene. Mehanička jednačina AM-a u normalizovanom obliku glasi :

$$\frac{d\omega}{dt} = (A_8 i_{dm} i_{qr} - A_8 i_{qm} i_{dr} - A_9 T_L) \cdot \frac{T_B}{\omega_B^2} \quad (5.6)$$

Sve veličine u prethodnoj jednačini, uključujući i koeficijente, su normalizovane. Kao posledica te normalizacije, odnosno činjenice da moment inercije koji je sadržan u koeficijentima koji figurišu u jednačini (5.6) nije normalizovan, pojavio se član T_B/ω_B^2 .

Izlazni podaci iz progama su u apsolutnim jedinicama, jer je normalizacija u programu izvršena isključivo iz razloga da bi se ubrzao rad programa.

Datoteka „sys”

Ova datoteka je u okviru podprograma STAC, i u njoj je u pogodnoj formi napisan matematički model AM-a koji karakteriše njegovo stacionarno stanje rada, odnosno normalizovani sistem jednačina (3.9).

Datoteka „am”

U ovoj datoteci su, u programskoj formi, napisana tri sistema jednačina, i nalaze se u strukturi *if-else-end* naredbi.

Parametar odlučivanja koji od ova dva sistema će biti izvršen u okviru programa je brzina obrtanja rotora ω . Ukoliko je $\omega > 0$ AMOS uzima u obzir drugi sistem koji odgovara normalizovanom sistemu (4.34), a ako nije ispunjen gornji uslov onda se uzima treći sistem koji odgovara normalizovanom sistemu (4.5) u kome je zamenjeno $\omega = 0$ i $T_L = 0$. Na ovaj način uvažena je reaktivna priroda momenta opterećenja T_L , odnosno postigli smo da program uvažava činjenicu da nakon zaustavljanja rotor ne menja smer obrtanja nego ostaje zaustavljen.

Datoteka „amos”

Ova datoteka sadrži komande kojim objedinjuje sve ostale datoteke u jedinstven program (AMOS). Pored tih komandi u ovoj datoteci se nalazi i deo podprograma za rešavanje sistema diferencijalnih jednačina smeštenih u datoteci *am*, kao i podprogram za obradu izlaznih podataka koji su rešenja sistema diferencijalnih jednačina (4.27) i (4.34). Obrada ovih podataka se sastoji u njihovoj pripremi za grafičku prezentaciju u *d-q* i realnom *a-b-c* sistemu.

5.2 Brzina izvršenja programa “AMOS”

Brzina izvršenja programa zavisi od opsega željenog vremena posmatranja prelaznog procesa, odnosno od vrednosti ulazne promenljive t_f , kao i od nekih ulaznih parametara sistema (kapacitivnosti i induktivnosti). Što je kapacitivnost (C_e) veća vreme trajanja izvršenja programa je kraće i obrnuto.

S obzirom da je primenjeni postupak za rešavanje sistema diferencijalnih jednačina iterativan (bazira se na metodi Runge-Kutta drugog i trećeg reda), brzina njegovog izvršenja se može povećati povećanjem koraka integracije, odnosno povećavanjem tolerancije, pri čemu se može podešavati kako apsolutna tako i relativna tolerancija za sve ili pojedine promenljive sistema (4.27) i (4.34). U programu je, u okviru datoteke *amos* predviđeno podešavanje apsolutne tolerancije svih promenljivih.

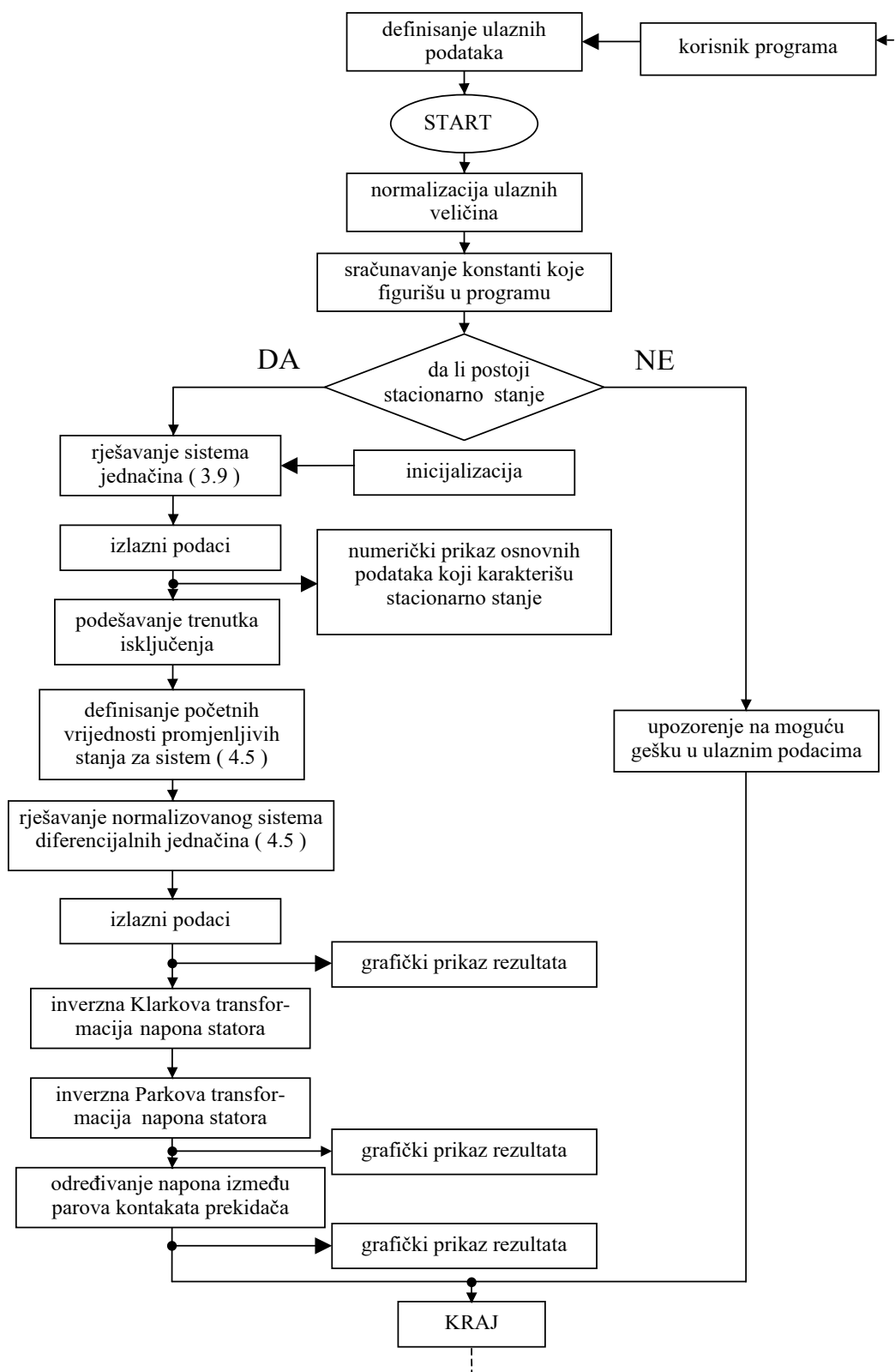
5.3 Startovanje programa

Procedura startovanja programa je sledeća:

1. Uneti zahtevane podatke u datoteku *ulpo*
2. U komandnom prozoru MATLAB-a definisati putanju (*path*) foldera *Amos*, u kome se nalaze datoteke programa AMOS
3. Pozivanjem datoteke *amos* u komandnom prozoru MATLAB-a direktno se startuje program AMOS

Ukoliko nas interesuju podaci samo za stacionaran režim rada tada se ne mora pokretati celokupan program AMOS već samo podprogram STAC. Procedura njegovog pokretanja je ista kao i za glavni program.

5.4 Logički blok dijagram programa “AMOS”



6. PRIMJENA RAČUNARSKOG PROGRAMA „AMOS” NA KONKRETAN ASINHRONI MOTOR

U ovom poglavlju ćemo analizirati rezultate koje smo dobili primjenom formiranog softvera na konkretan AM-r, za nekoliko režima rada. Pri tome ćemo se uglavnom ograničiti na analizu napona na statorskim priključcima AM-a u cilju utvrđivanja postojanja kvazistacionarnih prenapona i sa tim u vezi sagledavanja mogućnosti izbjegavanja reagovanja prenaponske zaštite AM-a. Na kraju ćemo, na osnovu analize vremenskog toka ovih napona, sprovesti analizu mogućnosti sinhronog ponovnog uključivanja AM-a na napajanje, odnosno njegovog prebacivanja na druge sabirnice za vrijeme trajanja prelaznog procesa.

6.1 Formiranje ulaznih podataka za program “AMOS”

Osnovni podaci o analiziranom asinhronom motoru dati su u sledećoj tabeli :

<i>asinhroni motor</i>			
<i>tip</i>	<i>kavezni</i>		
<i>sprega</i>	<i>Y</i>		
<i>nominalni napon</i>	U_n	3	kV
<i>nominalna učestanost</i>	f_n	50	Hz
<i>nominalna snaga</i>	P_n	500	kW
<i>nominalna struja</i>	I_n	111	A
<i>broj polova</i>	2P	6	-
<i>nominalna brzina obrtanja</i>	n_n	988	ob/min
<i>moment inercije rotora</i>	J	44.8	kgm ²
<i>parametri zamjenske šeme</i>			
<i>otpornost faznog namotaja statora</i>	R_s	0.173	Ω
<i>reaktansa rasipanja faznog namotaja statora</i>	X_s	1.4	Ω
<i>otpornost ekvivalentnog faznog namotaja rotora</i>	R_r'	0.19	Ω
<i>reaktansa rasipanja ekvivalentnog faznog namotaja rotora</i>	X_s'	1.69	Ω
<i>ekvivalent gubitaka u gvožđu</i>	R_m	150	Ω
<i>reaktansa magnećenja</i>	X_m	58	Ω

TABELA 6.1 *Proizvođački podaci za analizirani asinhroni motor*

S obzirom da se u programu AMOS zahtijevaju induktivnosti, izračunaćemo ih na osnovu odgovarajućih reaktansi iz tebele 6.1, odnosno:

$$\begin{aligned} L_{\gamma s} &= \frac{X_s}{2\pi \cdot f_n} = \frac{1.4}{2\pi \cdot 50} = 0.004456 \text{ H} \\ L_{\gamma r} &= \frac{X_r'}{2\pi \cdot f_n} = \frac{1.69}{2\pi \cdot 50} = 0.005379 \text{ H} \\ L_m &= \frac{X_m}{2\pi \cdot f_n} = \frac{58}{2\pi \cdot 50} = 0.18462 \text{ H} \end{aligned} \quad (6.1)$$

6.2 Prekid napajanja asinhronog motora kome je prethodio nominalan režim rada

Dakle, u ovom odjeljku pretpostavićemo da je motor prije prekida napajanja bio napajan nominalnim naponom, nominalne učestanosti i da je opterećen nominalnim momentom, odnosno da je:

$$T_L = T_{en} \quad (6.2)$$

Na osnovu podataka iz tabele 6.1 možemo izračunati nominalni elektromagnetni moment za ovaj AM-r kao:

$$T_{en} = \frac{P_n}{\omega_{mn}} = \frac{60 \cdot P_n}{2\pi \cdot n_n} = \frac{60 \cdot 500 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 988} = 4832 \text{ Nm} . \quad (6.3)$$

Pretpostavićemo da je moment inercije zamajnih masa radne mašine sveden na vratilo AM-a :

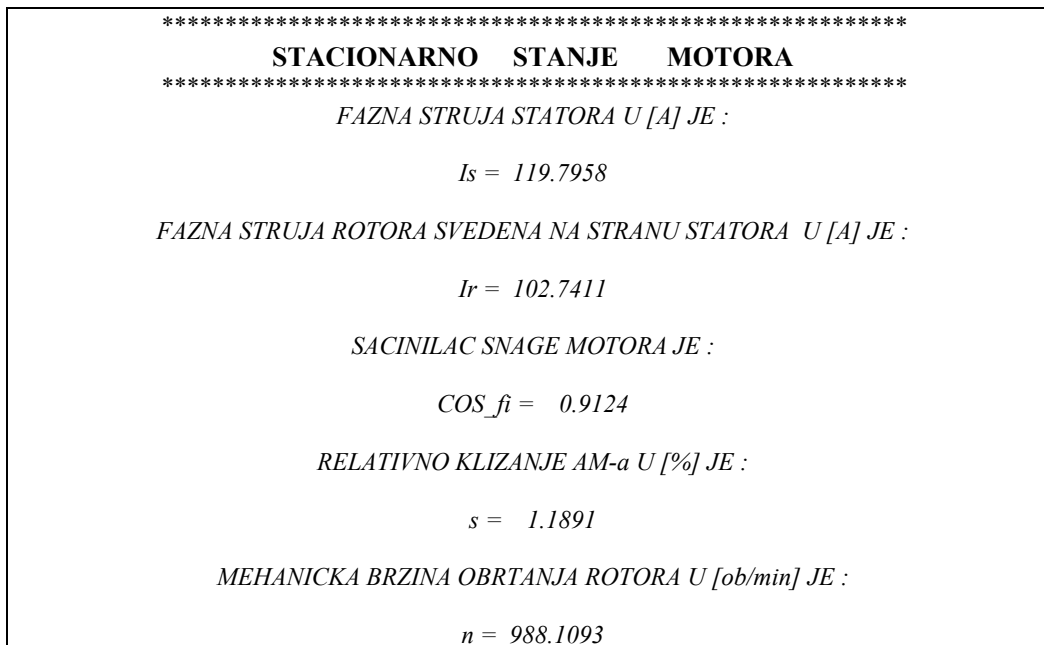
$$J_0 = 50 \text{ kgm}^2 \quad (6.4)$$

Što se tiče napojnog kabla, nećemo usvajati neki konkretan kabl već ćemo uzeti tipičnu vrijednost za njegov podužni kapacitet a dužinu ćemo uzeti proizvoljno.

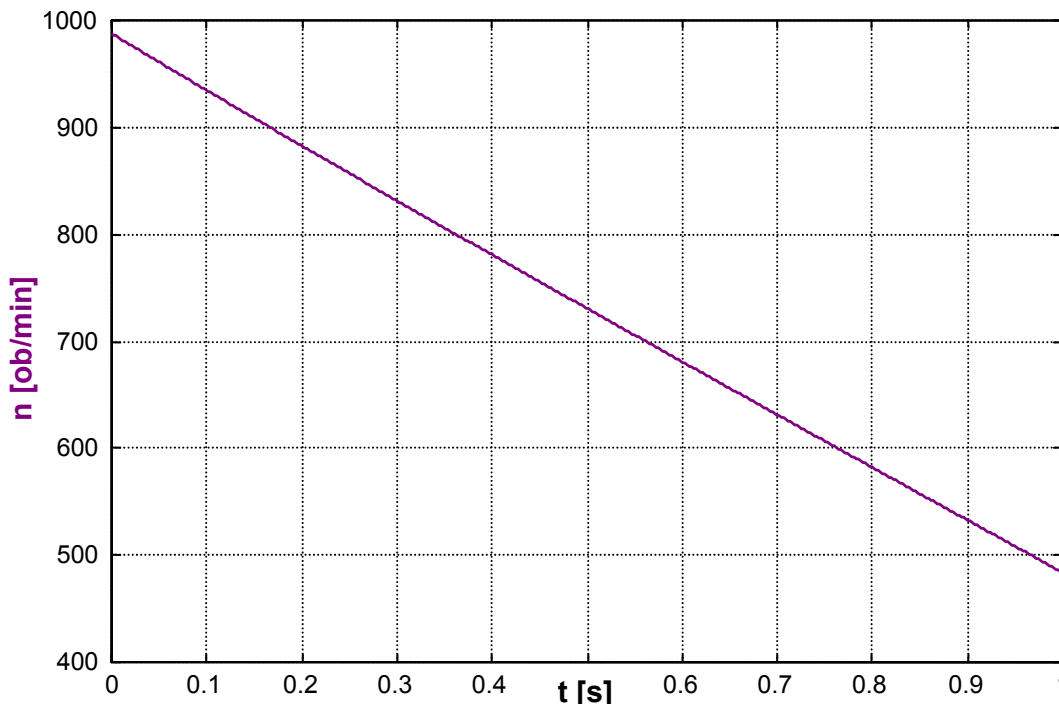
$$\begin{aligned} c &= 0.4 \cdot 10^{-6} \text{ F/km} \\ l &= 0.5 \text{ km} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Prelazni proces ćemo posmatrati u opsegu od trenutka prekida $t = 0$ do $t_f = 1 \text{ s}$.

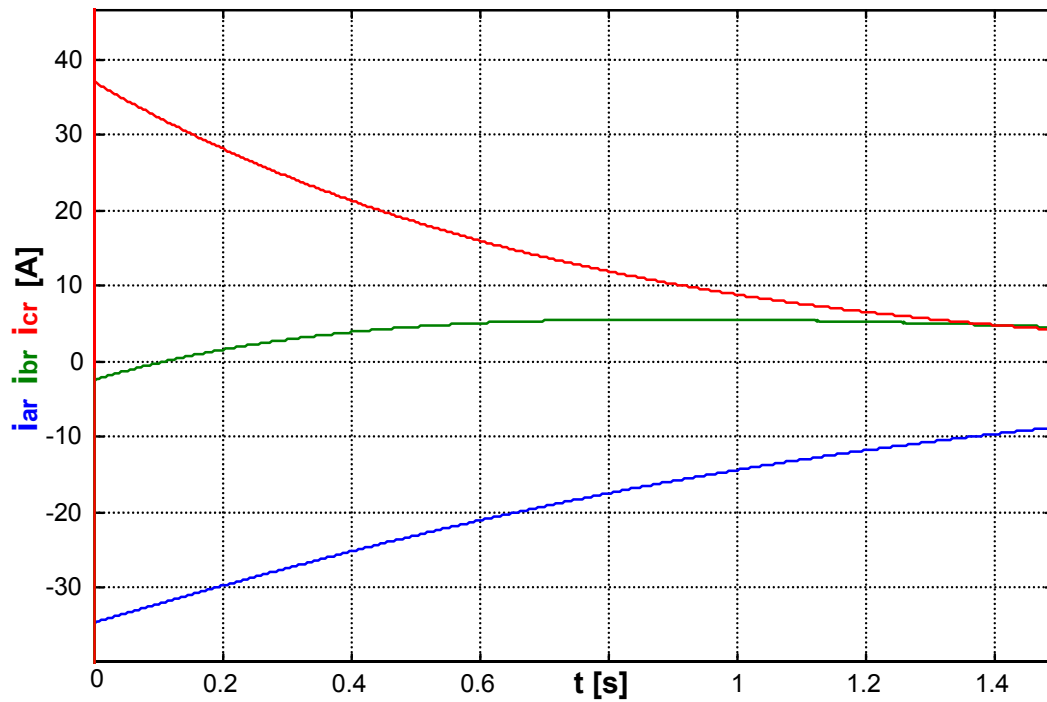
IZLAZNI REZULTATI



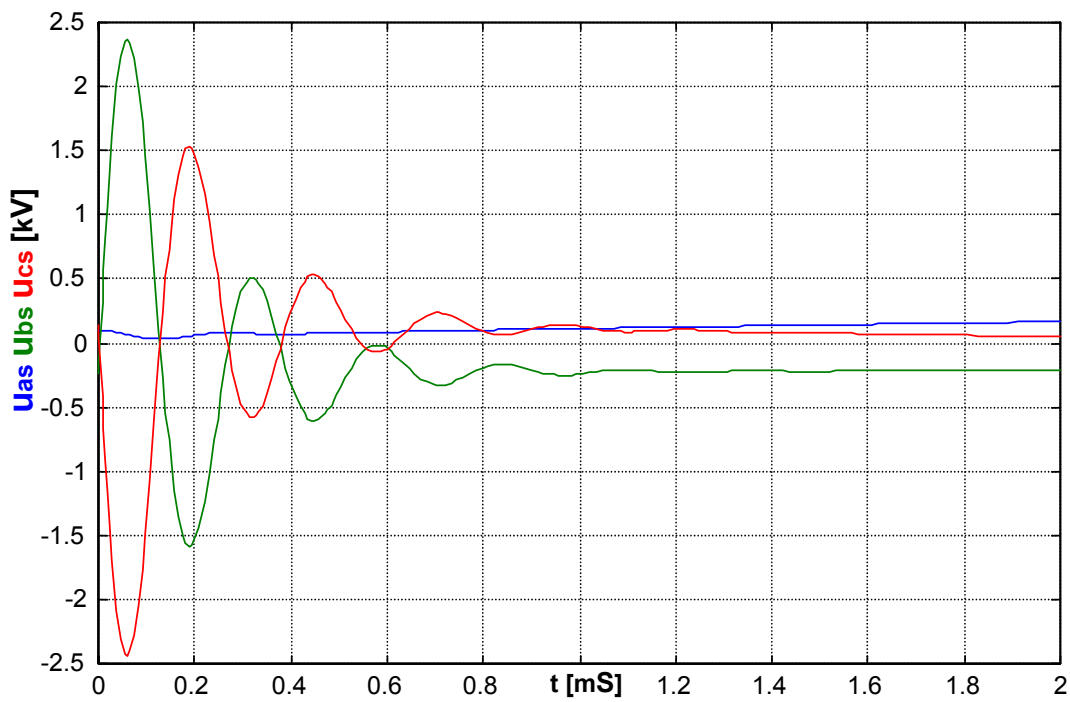
Sl. 5.1 Izlazni rezultati iz podprograma STAC, za nominalno opterećeni asinhroni motor



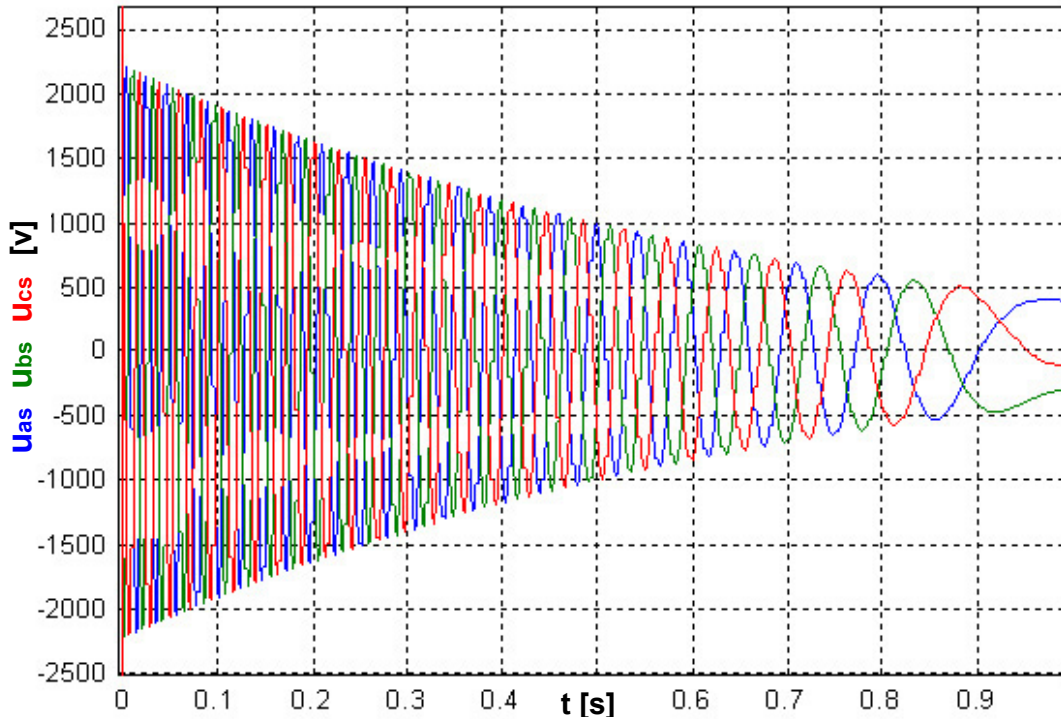
Sl. 6.2 Vremenska zavisnost brzine obrtanja rotora asinhronog motora nakon njegovog isključenja sa napojne mreže



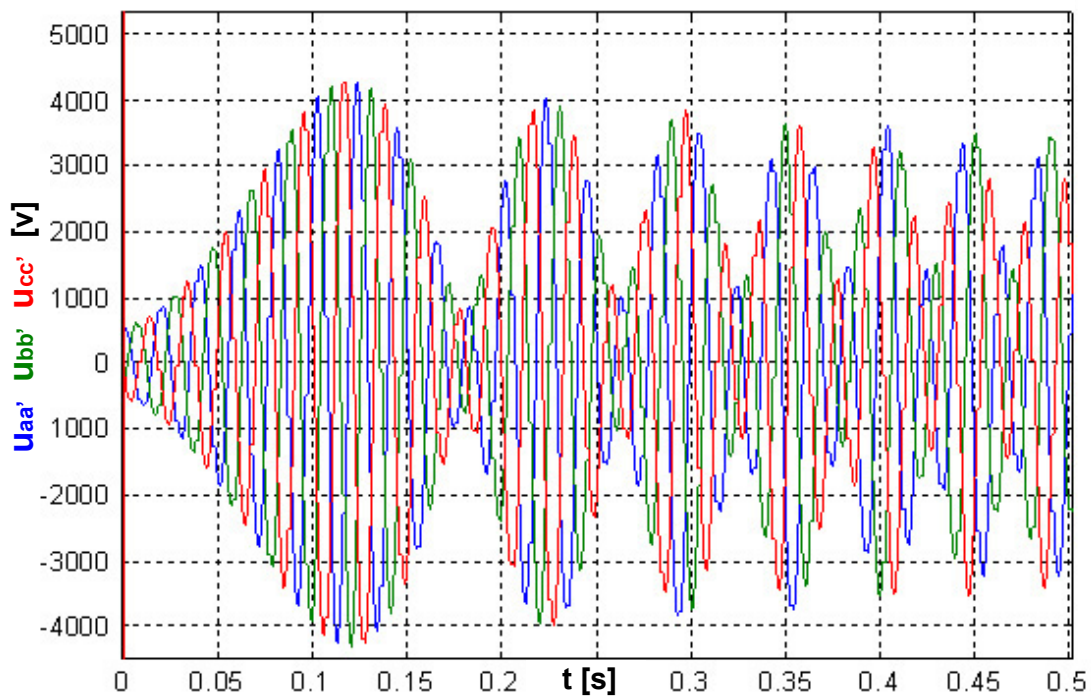
Sl. 6.3 *Vremenski oblik struja u ekvivalentnim faznim namotajima rotora (posmatranih sa statorske strane) u prvih 1.5 s nakon isključenja AM-a*



Sl. 6.4 *Naponi na faznim priključcima statora AM-a neposredno nakon prestanka njegovog napajanja (subtranzijentni period)*



Sl. 6.5 *Vremenski oblik napona na priključcima AM-a u prvoj sekundi nakon njegovog isključenja sa napojne mreže*



Sl. 6.6 *Vremenski oblik napona između parova kontakata prekidača koji razdvaja AM-r od napojne mreže, posmatran u periodu 0.5 s nakon njegovog isključenja*

6.3 Prekid napajanja asinhronog motora kome je prethodio režim praznog hoda

U ovoj simulaciji pretpostavićemo da je AM-r odvojen od radne mašine i da se prije prekida napajanja nalazio u idealnom praznom hodu, tj. da je:

$$T_L = 0 \quad (6.6)$$

$$J_0 = 0 \quad (6.7)$$

a da je napajanje je kao i u prethodnoj simulaciji (nominalno).

IZLAZNI REZULTATI

```

*****
STACIONARNO STANJE MOTORA
*****
FAZNA STRUJA STATORA U [A] JE :

Is = 31.2288

FAZNA STRUJA ROTORA SVEDENA NA STRANU STATORA U [A] JE :

Ir = 0

SACINILAC SNAGE MOTORA JE :

COS_fi = 0.3548

RELATIVNO KLIZANJE AM-a U [%] JE :

s = 0

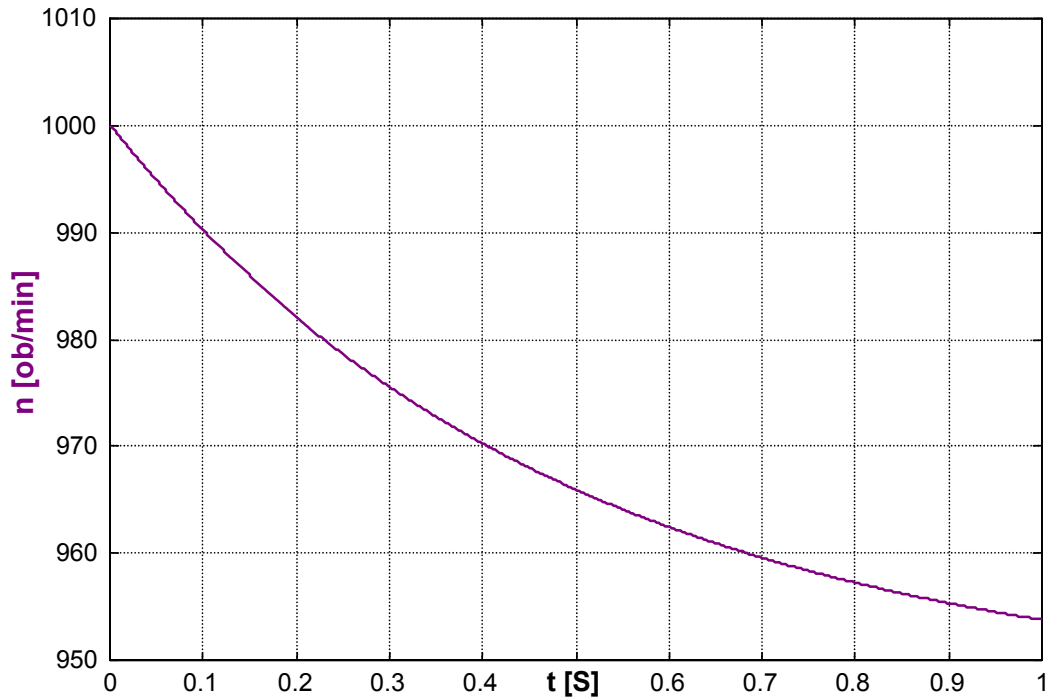
MEHANICKA BRZINA OBRTANJA ROTORA U [ob/min] JE :

n = 1000

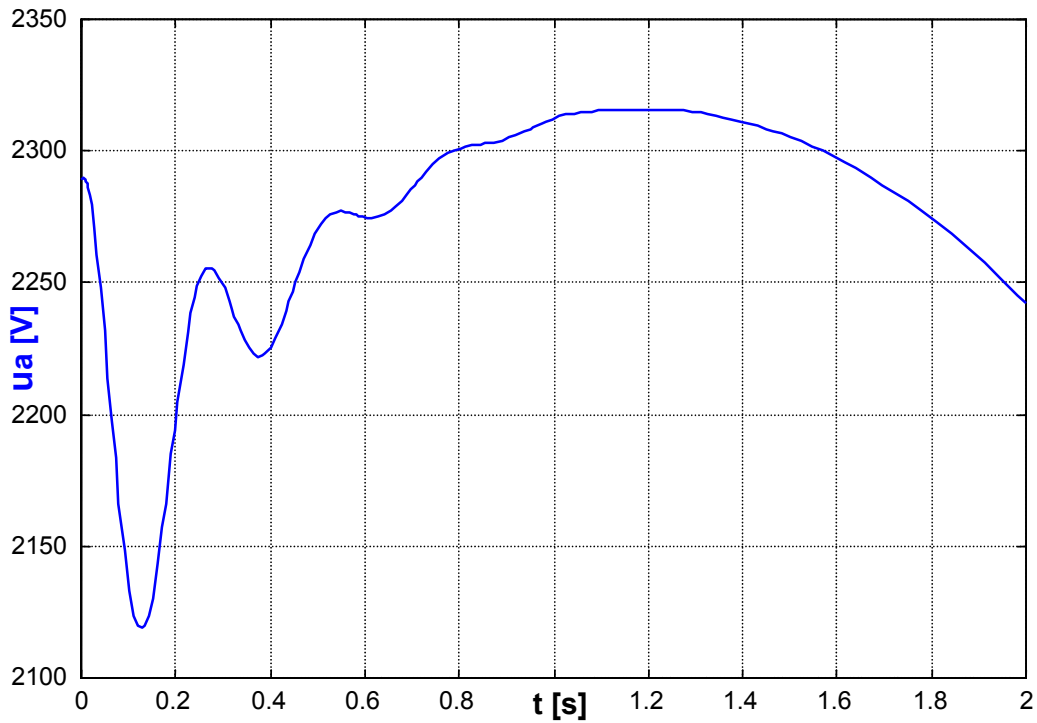
```

Sl. 6.7 Izlazni rezultati iz podprograma STAC , koji definišu stacionarno stanje AM-a koje se imalo neposredno prije njegovog prestanka napajanja

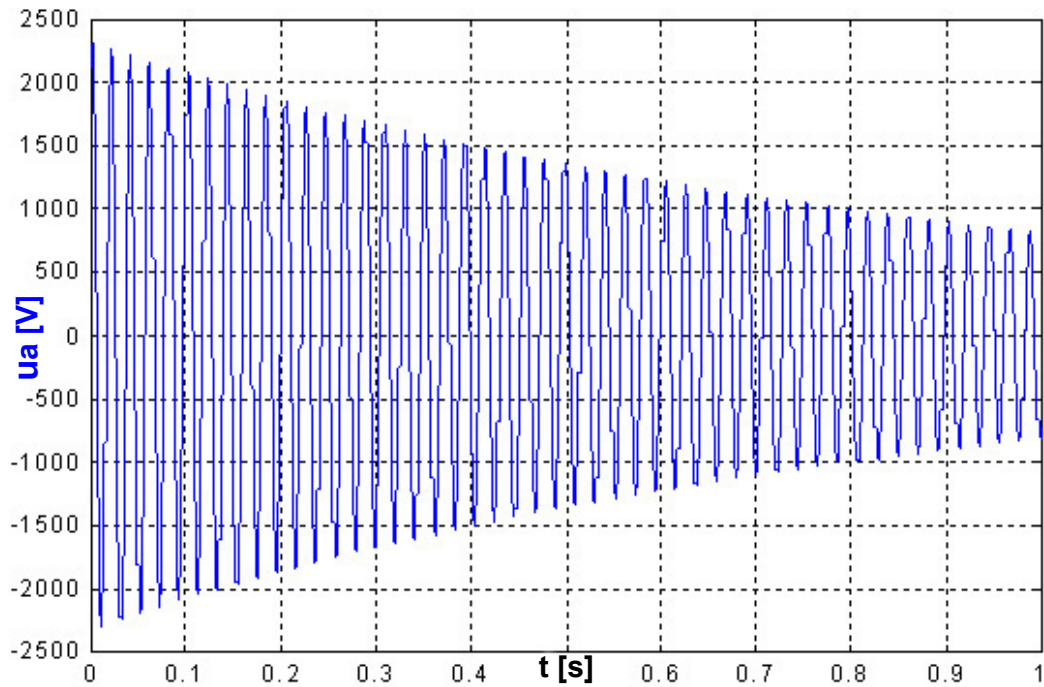
Što se tiče prelaznog perioda za ovaj slučaj, na graficim koji slijede, da bi se imala bolja preglednost, daćemo samo vremenske zavisnosti napona faze *a* (za ovu fazu je prtpostavljen najrealniji prekid napajanja).



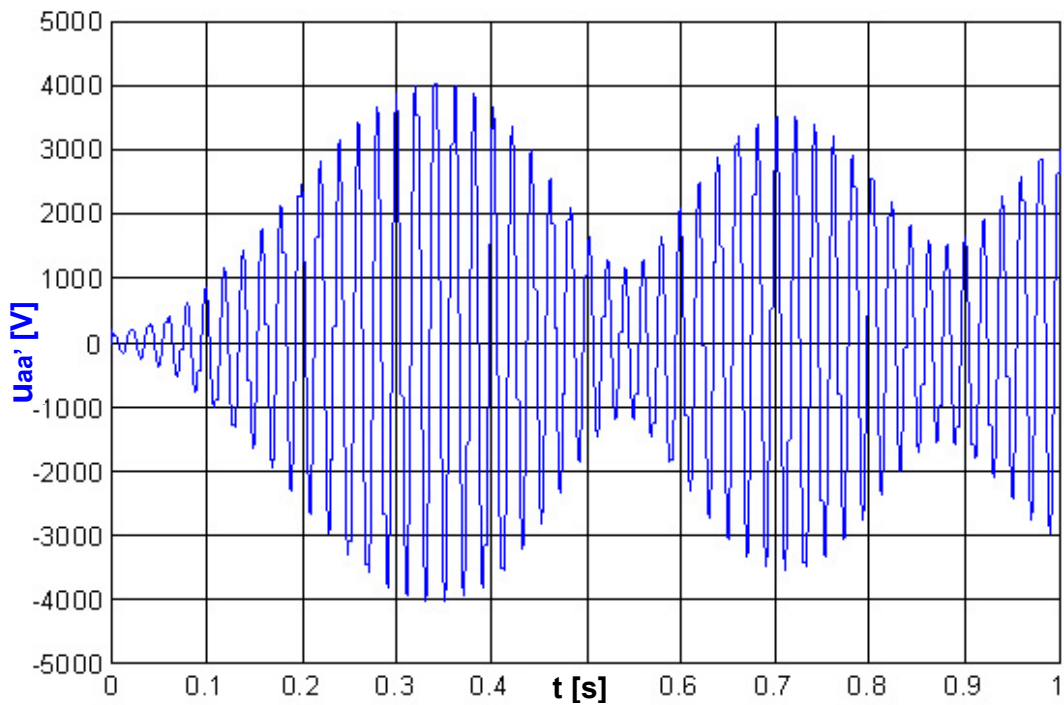
Sl. 6.8 *Vremenska zavisnost brzine obrtanja asinhronog motora nakon njegovog isključenja*



Sl. 6.9 *Napon na faznom priključku „a” statora AM-a, neposredno nakon njegovog isključenja (subtranzijentni period)*



Sl. 6.10 *Napon na faznom priključku „a” statora AM-a u prvoj sekundi nakon njegovog isključenja*



Sl 6.11 *napon između kontakata pola prekidača u fazi A nakon isključenja AM-a sa napajanja*

6.4 Analiza dobijenih rezultata

Prije nego što započnemo ovu analizu treba napomenuti da su rezultati, prezentovani u prethodnom odjeljku, samo dio izlaznih podataka iz programa AMOS. Zapravo, prikazani su samo rezultati koji su neophodni za analizu koja je tema ovog diplomskog rada.

Upoređujući rezultate dobijene za stacionarni režim pri nominalnom opterećenju sa odgovarajućim podacima sa pločice AM-a tabela 6.1 možemo konstatovati da su oni gotovo identični. To nam potvrđuje da je matematički model AM-a koji smo formirali u ovom radu, i na osnovu koga smo razvili softver AMOS, blizak realnosti.

Analiza napona na priključcima asinhronog motora po njegovom isključenju sa napajnja

Analizirajući slike 6.4 i 6.5 za nominalan, odnosno, 6.9 i 6.10 za režim praznog hoda zaključujemo da se, sa aspekta napona na statorskim priključcima, mogu uočiti dva perioda u toku trajanja prelaznog procesa.

Neposredno nakon prekida napajanja AM-a ima se elektromagnetski prelazni proces kojeg karakteriše pojava visokofrekventne komponente napona na statorskim priključcima. Amplituda ovih napona je u pojedinim fazama (u ovom slučaju u fazama b i c) nerealno velika. Nerealna je zato što smo pretpostavili trenutni prekid u svim fazama. Prigušenje ove komponente napona je dosta veliko, tako da je trajanje ovog subtranzijentnog perioda relativno kratko (u ovom slučaju oko 1.5ms). Dužina trajanja ovog perioda kao i amplitude napona dominantno zavise od kapacitivnosti napojnog kabla (odnosno kapacitivnosti koja se ima u statorskom kolu). Pošto je pretpostavka o prekidu napajanja torijska nećemo se upustati u dublju analizu ovog perioda, jer je on u realnosti drugačiji. Možda je vremenski tok napona u fazi a približan realnosti jer smo za nju pretpostavili realan prekid, pa je iz tog razloga on dat na posebnim dijagramima.

Nakon subtranzijentnog perioda nastupa tranzijentni kvazistacionarni period. U ovom periodu vremenski oblik napona na statorskim priključcima je pseudoperiodičan. Učestanost ovih napona je direktno srazmjerna brzini obrtanja a amplituda im zavisi pored brzine obrtanja i od brzine prigušenja fluksa u magnetnom kolu AM-a.

Pošto je rotor kratko spojen njegova vremenska konstanta dominantno definše brzinu opadanja fluksa, pa možemo napisati sljedeću relaciju:

$$\phi \approx \Phi_m e^{-\frac{t}{\tau_r}} = \Phi_m e^{-\gamma t} \quad (6.8)$$

gdje je:

ϕ - amplituda fluksa u međugvožđu AM-a nakon njegovog isključenja,
 Φ_m - amplituda fluksa u međugvožđu AM-a prije njegovog isključenja,
 τ_r - vremenska konstanta rotorskog namota, ona je data sledećim izrazom :

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{L_{\gamma r} + L_m}{R_r} \quad (6.9)$$

γ - prigušenje rotorskog namota, odnosno :

$$\gamma = \frac{1}{\tau_r} . \quad (6.10)$$

Za asinhroni motor koji analiziramo vremenska konstanta rotora je:

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{L_{\gamma r} + L_m}{R_r} = \frac{0.005379 + 0.18462}{0.19} = 1 \text{ s} ,$$

pa će u ovom slučaju tranzijentni period trajati oko 4 s.

Ukoliko je vremenska konstanta rotora mala, odnosno njegovo prigušenje veliko imaće se brzo izčezavanje fluksa pa se, kao posljedica toga, mogu pojaviti prenaponi koji bi mogli izazvati reagovanje prenaponske zaštite AM-a. Mogućnost postojanja niskofrekventnih prenapona možemo dokazati i analitički na osnovu sledeće aproksimirane fazorske analize.

Krenućemo od relacije (6.8) koju ćemo napisati u fazorskom obliku kao:

$$\widehat{\Phi} = \Phi e^{-\gamma_r t} e^{j\omega t} = \Phi e^{(j\omega - \gamma_r)t} \quad (6.11)$$

gdje je Φ efektivna vrijednost fluksa u međugvožđu AM-a prije njegovog isključenja, a $\widehat{\Phi}$ je njegov odgovarajući fazor.

Za vrijeme stacionarnog stanja, odnosno neposredno prije isključenja AM-a, u namotu statora je djelovala ems čiji je fazor, shodno zakonu elektromagnetske indukcije, dat relacijom (6.12).

$$\hat{E} = \omega_s \frac{d\hat{\Phi}}{dt} = -j\omega_s \cdot \Phi \omega_s e^{j\omega_s t} \quad (6.12)$$

Neposredno nakon prekida napajanja važi da je $\omega \approx \omega_s$, pa uz takvu pretpostavku možemo napisati sledeću relaciju :

$$\hat{E}' = -\omega_s \cdot (j\omega_s - \gamma_r) \Phi e^{j\omega_s t} \quad (6.13)$$

gdje je \hat{E}' fazor ems u statorskom namotaju AM-a neposredno nakon njegovog isključenja.

Za trenutak prekida ($t = 0$), iz relacija (6.12) i (6.13) slijedi da je:

$$\left| \frac{\hat{E}'}{\hat{E}} \right| = \frac{E'}{E} = \left| 1 + j \frac{\gamma_r}{\omega_s} \right| = \sqrt{1 + \left(\frac{R_r}{\omega_s L_r} \right)^2} \quad (6.14)$$

Na osnovu relacije (6.14) zaključujemo da se pri brzom odvajanju AM-a od napojne mreže može pojaviti znatan prenapon ukoliko je otpornost rotorskog namotaja velika. Teorijski, ako $R_r \rightarrow \infty$ prenapon bi u trenutku prekida napajanja, shodno relaciji (6.14), bio beskonačan. Ovaj slučaj je interesantan za AM-e sa namotanim rotorom kod kojih se može desiti da u trenutku njihovog isključenja namot rotora bude otvoren. Međutim, u praksi se pokazalo da pri brzom isključenju ovakvog AM-a prenapon koji se tada indukuje na njegovim statorskim priključcima ima vrijednost (3 – 4) U_{nf} . Ovo se objašnjava time što se i u gvožđu rotora i statora indukuju vihorne struje koje onemogućavaju trenutno isčezavanje fluksa odnosno doprinose da njegov gradijent nakon isključenja bude konačan iako je rotorski namot otvoren. Uticaj magnetnog kola na prigušenje fluksa je u programu AMOS uvažen preko otpornosti R_m .

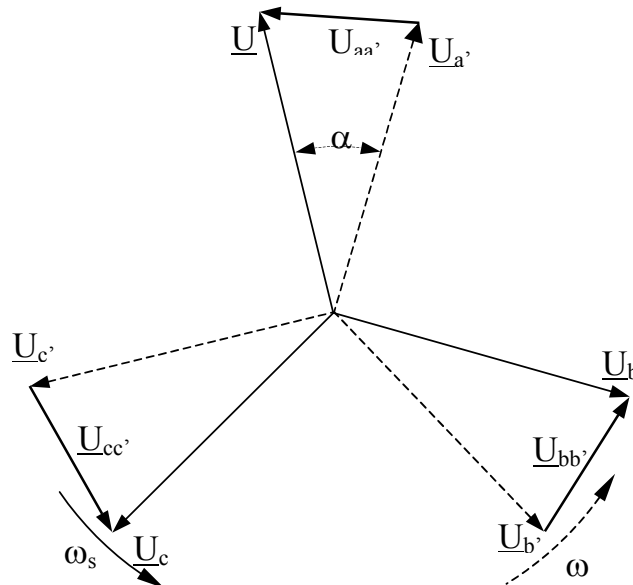
Na osnovu ove analize zaključujemo da, sa aspekta prenapona, AM-i sa namotanim rotorom su kritičniji od kaveznih. Kod njih je moguća pojava prenapona koji bi mogli izazvati ne samo reagovanje njihove prenaponske zaštite (čime bi definitivno ispali iz pogona) već i oštećenje izolacije statorskih namotaja. Da bi se pojava ozbiljnih prenapona kod takvih motora izbjegla njihovi klizni prstenovi moraju biti kratko spojeni u toku procesa isključenja.

7. ANALIZA USLOVA ZA SINHRONO PONOVRNO UKLJUČENJE VNAM

U ovom poglavlju ćemo na osnovu dobijenih rezultata za konkretan AM-r sprovesti uopštenu analizu uslova za ponovno sinhrono uključanje AM-a na napojnu mrežu. Na kraju ćemo, na osnovu te analize, predložiti praktično rješenje za realizaciju takvog uključanja.

7.1 Teorijski aspekti analize

Na osnovu dosadašnje analize možemo konstatovati da nakon isključenja AM-a sa mreže, i isteka kratkotrajnog subtranzijentnog perioda (koji na ovu analizu ne utiče), na priključcima statora se imaju pseudoperiodični naponi. S druge strane, učestanost napona mreže je konstantna, pa se između parova kontakata prekidača, kojim treba da se izvrši priključenje AM-a na „novi” sabirnički sistem, javlja napon. Vremenski dijagram ovog napona je, za konkretan sistem, dat na slici 6.6, za slučaj isključenja iz nominalnog režima, odnosno, na sl. 6.12 za slučaj isključenja iz praznog hoda datog AM-a. Ovim vremenskim dijagramima odgovara fazorski dijagram dat na sl. 7.1.



Sl. 7.1 *Fazorski dijagram: faznih napona mreže (pune tanje linije), faznih napona na priključcima AM-a (isprekidane linije) i napona između parova kontakata iste faze u prekidaču (pune deblje linije)*

U trenutku neposredno prije prekida napajanja ($t = +0$) fazori napona mreže i odgovarajući fazori napona na priključcima AM-a koincidiraju (to su u stvari isti naponi), te ne postoji napon između kontakata prekidača (koji su još uvijek spojeni). Nakon prekida napajanja rotor AM-a usporava, pri čemu intenzitet usporenja zavisi od veličine kočionog momenta (praktično je to moment opterećenja) i ukupnog momenta inercije zamajnih masa sistema svedenog na vratilo motora (i u slučaju praznog hoda i zanemarenja svih frikcija rotor će usporavati, sl. 6.7, zato što postoje gubici u gvožđu statora). Kao posledica ovog usporavanja, odnosno činjenice da je sada $\omega_s > \omega$, javlja se fazni raskorak α između pomenutih fazora napona. Pored opadanja brzine obrtanja fazora napona AM-a, opada i njihov moduo jer se smanjuje nivo i gradijent fluksa u motoru. Kao posljedica opisanih procesa javlja se napon između parova kontakata prekidača kojim treba da izvršimo ponovno priključenje AM-a na napajanje (to je prekidač P2 na sl. 1.). Ovaj napon je mjerodavan za analizu sinhronog ponovnog uključenja AM-a na napajanje (odnosno njegovo sinhrono prebacivanje na sabirnice II na sl. 1.). Naime, u trenutku ponovnog uključenja AM-a ovaj sistem napona odgovara sistemu ems-a koji bi djelovao u namotu statora. Iz vremenskog dijagrama ovih napona (slike 6.6 i 6.11) vidimo da oni u pojedinim trenucima dostižu gotovo dvostruku vrijednost nominalnog faznog napona (tim trenucima odgovara fazni raskorak $\alpha = \pi$ na sl. 7.1).

Ukoliko bi AM uključili u trenutku kada je $\alpha = \pi$, ili uopšte u nekom trenutku kada je $U_{xx'} > U_{nf}$ ($x = a, b, c$), došlo bi do strujnog udara koji, u zavisnosti od veličine napona $U_{xx'}$ u tom trenutku, može biti dovoljno veliki da izazove reagovanje brze prekostrujne zaštite AM-a ili čak da izazove kvarove u komutacionoj opremi i samom AM-u. Reagovanje zaštite AM-a značilo bi definitivian ispad tog AM-a jer bi se otvorio njegov sopstveni prekidač (prekidač PAM na sl. 1.). Iz tog razloga potrebno je uključenje AM-a vršiti u periodima kada je $U_{xx'} \leq U_{nf}$. Oprema i sam AM-r će najmanje trpjeti ako se ponovno uključenje vrši u trenucima kada je napon $U_{xx'}$ najmanji, a to su trenuci kada fazori \underline{U}_x i \underline{U}_{xs} , na sl. 7.1, koincidiraju, odnosno kada je $\alpha = 0$. Za takvo ponovno uključenje AM-a kažemo da je sinhrono.

Treba težiti da se motor sinhrono prebaci na druge sabirnice u što kraćem roku iz sledeća dva razloga:

- 1) Sa trajanjem odvojenosti AM-a od napajanja napon na njegovim priključcima opada (sl. 6.5 i 6.10). U trenutku kada on postane jednak podešenom naponu reagovanja njegove podnaponske zaštite, stvorili bi se potrebni uslovi za reagovanje te zaštite. Reagovanje podnaponske zaštite AM-a značilo bi njegov definitivian ispad iz pogona.

- 2) Pri prvom poklapanju fazora \underline{U}_x i \underline{U}_{xs} , nakon prekida napajanja, naponi $|\underline{U}_{xx}|$ su najmanji, dok su pri svakom narednom poklapanju oni sve veći jer su $|\underline{U}_{xs}|$ sve manji.

Ako pretpostavimo da je podešeni napon podnaponske zaštite AM-a iz prethodnog poglavlja $U_{pod} = 0.7U_n$ onda, na osnovu dijagrama 6.5 i 6.10, možemo zaključiti da bi trenuci reagovanja podnaponskog releja AM-a, računati od trenutka njegovog prekida napajanja, bili:

$$t_{reag.} \approx 0.2 \text{ s} \quad (7.1)$$

za prekid napajanja iz nominalnog režima, odnosno:

$$t_{reag.} \approx 0.32 \text{ s} \quad (7.2)$$

za prekid napajanja iz praznog hoda i zanemarenih frikcija.

Imajući u vidu jednakosti (7.1) i (7.2), sa dijagrama datih na slikama 6.6 i 6.11 vidimo da u slučaju prekida napajanja iz nominalnog režima, za pretpostavljeni moment inercije zamajnih masa radne mašine, postoje uslovi za sinhrono ponovno uključenje datog AM-a prije nego što bi odreagovao njegov podnaponski relej. Za prekid napajanja iz idealnog praznog hoda podnaponski relej će odreagovati prije nego što se steknu uslovi za sinhrono ponovno uključenje AM-a. Međutim, reagovanje podnaponskog releja je samo potreban uslov za reagovanje cjelokupne podnaponske zaštite, jer se ona, kod VN AM-a, izvodi sa definisanim vremenom reagovanja.

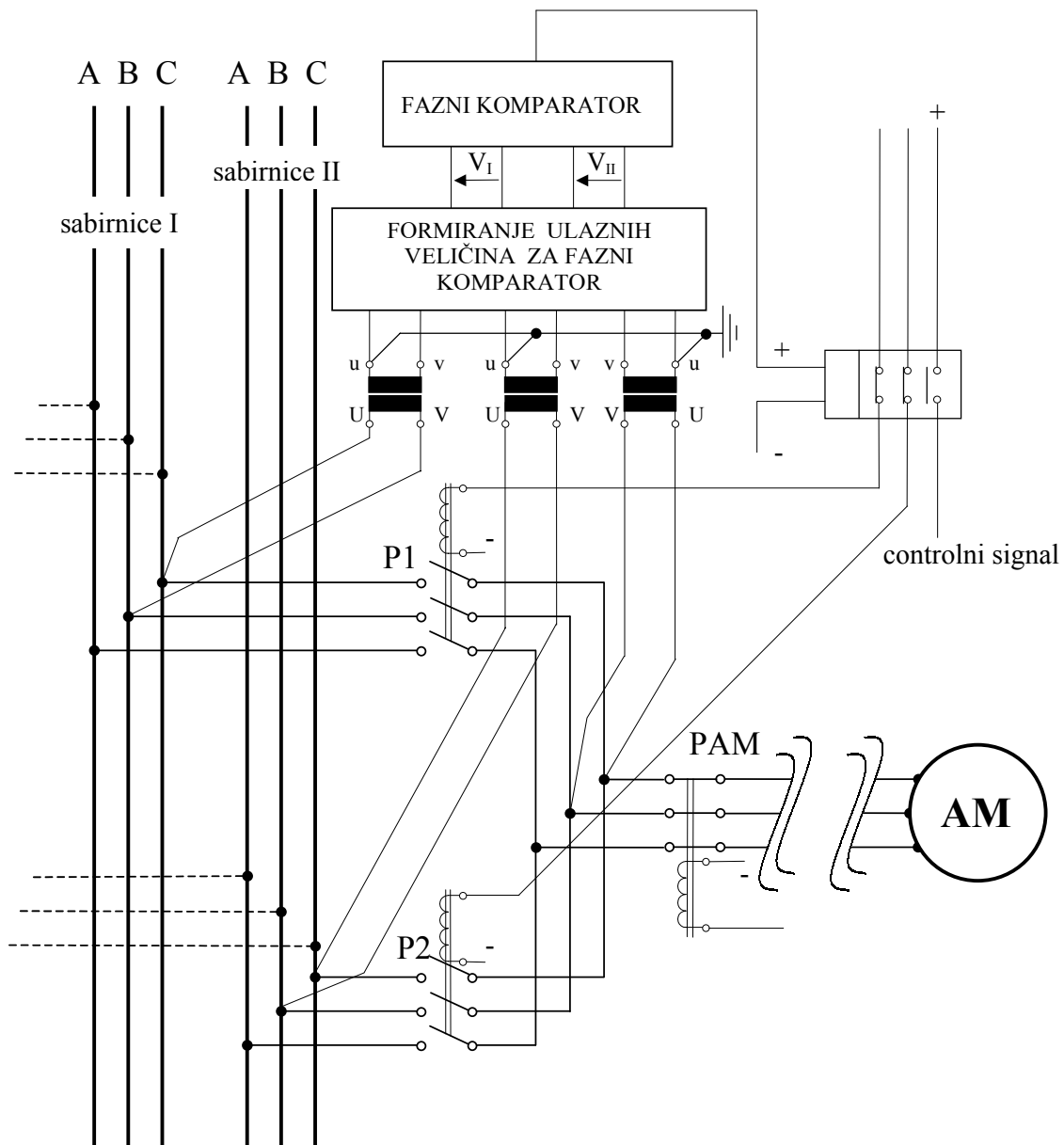
7.2 praktična realizacija sinhronog prebacivanja AM-a sa jednog na drugi sabirnički sistem

U ovom odjeljku predložićemo jedno od mogućih rješenja praktične realizacije sinhronog ponovnog uključena AM-a na mrežu.

Realizacija sinhronog ponovnog uključanja asinhronog motora pomoću faznog komparatora

Ovo rješenje proističe iz fazorskog dijagrama napona datog na sl. 7.1. Zasniva se na mjerenju faznih stavova napona mreže i napona na priključcima AM-a. Principijelna šema realizacije za slučaj dvosabirni-

čkog sistema (koji odgovara jednopolnoj šemi datoj na sl. 1) je prikazan na slici 7.2 .



Sl. 6.2 *Zaštita od nesinhronog ponovnog uključenja AM-a na napajanje pomoću faznog komparatora*

S obzirom da su oba sistema napona, čije fazne stavove mjerimo, simetrični koristićemo monofazne naponske transformatore. Pošto su industrijske mreže uglavnom izolovane, ovi naponski transformatori su povezani na međufazni napon.

Zaštita od nesinhronog ponovnog priključenja AM-a na napojne sabirnice, koja je prikazana na sl. 7.2, zasniva se na mjerenju i poređenu

faznih stavova napona na priključnim sabirnicama i odgovarajućeg napona na statorskim priključcima AM-a. Dakle, faznom komparatoru se dovode naponi koji se imaju sa jedne i druge strane prekidača kojim treba da se izvrši priključenje AM-a na novi sabirnički sistem. Komparator treba da onemogući uključenje tog prekidača kada je fazni raskorak između mjerenih napona (α) veći od zadatog. Izvršni organ je pomoćni relej sa mirnim kontaktima. On blokira komandni sistem prekidača kada nijesu stečeni uslovi za sinhrono ponovno priključenje AM-a.

Imajući u vidu svo ovo, zaključujemo da opseg reagovanja faznog komparatora na sl. 7.2 treba da bude :

$$-\alpha_{gr} < \arg\left(\frac{V_I}{V_{II}}\right) = \alpha < \alpha_{gr} \quad (7.3)$$

Izbor graničnih uglova komparatora zavisi od više faktora, a to su : radni režim koji je prethodio isključenju AM-a, podešenost podnaponske zaštite AM-a (naponska i vremenska), moment inercije zamajnih masa sistema i minimalno zahtijevano vrijeme trajanja pobude prekidača za priključenje AM-a na sabirnice.

Poznavajući sve ove faktore, mogu se, na osnovu vremenskih dijagrama odgovarajućih napona (to su dijagrami na slikama 6.5 i 6.11 za konkretan AM-r i konkretne pogonske uslove), optimalno odabrati granični uglovi za fazni komparator.

Pogodnost ove zaštite je što se za nju mogu iskoristiti naponski transformatori koji su u sklopu drugih zaštita, što znatno utiče na cijenu ove zaštite. Ukoliko je elektromotorni pogon, u okviru kojeg se nalazi posmatrani AM, opremljen sa mikroprocesorskom multifunkcionalnom zaštitom, onda se zaštita od nesinhronog ponovnog priključenja AM-a na napojne sabirnice može, pomoću relativno jednostavnog softvera, implementirati u tu opštu digitalnu zaštitu. Za ovako realizovanu zaštitu moguće je obezbijediti automatsko prepodešavanje njenog opsega reagovanja u zavisnosti od pogonskih uslova rada. U tu svrhu bi se mogao, uz određene modifikacije upotrijebiti program AMOS. Modifikacije bi se uglavnom odnosile na uključivanje informacija o podešenosti podnaponske zaštite i minimalnog zahtijevanog vremena trajanja pobude prekidača u ovaj postojeći program.

Princip blokiranja kontrolnog sistema prekidača, na kojem se bazira predložena zaštita, ima i nedostataka. Jedan od njih je smanjenje pouzdanosti rada prekidača.

L I T E R A T U R A

- [1] B. K. BOSE, “ *Power Electronics and AC Drives* ”, Prentice – Hall, Enlewood cliffs, New Jersey 07632, 1986.
- [2] V. VUČKOVIĆ, “ *Električni pogoni* ”, “ ETF Beograd “, Beograd, 1997.
- [3] П. Г. НИКОЛАЕВИЧ, “ *Электрические машины* ”, ч.2, “ Госэнергоиздат ”, Москва, 1963.
- [4] M. ĐURIĆ, “ *Tehnika zaštite u elektroenergetici* “, “ ETF Beograd “, Beograd, 1997.
- [5] L. ČALASAN, M. PETKOVSKA, “ *MATLAB* ”, Mikro knjiga, Beograd, 1996.