



STATIČKO I DINAMIČKO PONAŠANJE TROFAZNIH ASINHRONIH MOTORA SA KAVEZNYM ROTOROM U SLUČAJEVIMA IZNENADNOG PREKIDA DOVODA JEDNE FAZE

Jožef Varga, Ištvan Kiralj

Polytechnical Engineering College, 24000 Subotica, Marka Oreskovića 16, Serbia & Montenegro
Phone: +38124552501, jvarga@vts.su.ac.yu, king@vts.su.ac.yu

Sadržaj: U radu su analizirane statičke i dinamičke pojave koje se javljaju kod trofaznih kaveznih asinhronih motora u slučajevima iznenadnog prekida dovoda jedne faze.

Ključne reči: Kavezni, asinhroni, motori, asimetrije, tranzijenti.

1. UVOD

Trofazni asinhroni motori su normalno predviđeni za rad u simetričnom režimu. U toku eksploatacije međutim usled kvara mogu nastupiti i različiti slučajevi nesimetričnih režima koji štetno deluju na motor. Ovi nesimetrični režimi najčešće nastaju usled:

- napajanja sa nesimetričnim naponima
- prekida dovoda jedne faze
- prekida faznih namotaja u spregama zvezda ili trougao.
- pogrešne veze faznih namotaja

Od navedenih ili sličnih vrsta nesimetrije svaka prouzrokuje različite pojave sa različitim posledicama, pa ih moramo posebno razmotriti. Poznavanje statičkih i dinamičkih karakteristika asinhronih motora u različitim slučajevima nesimetričnih režima omogućuje projektantima izbor efikasne zaštite u toku eksploatacije.

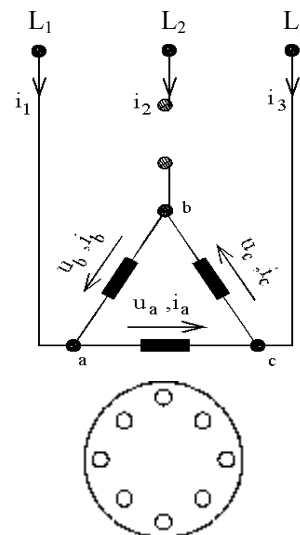
2. OPIS POGONA

U radu će se razmotriti pogon mešalice u sklopu sa trofaznim kaveznyim asinhronim motorom u simetričnom trofaznom režimu i u nesimetričnom jednofaznom režimu, koji nastaje usled iznenadnog prekida dovoda jedne faze.

2.1 Principijelna šema spajanja

Radi obezbeđenja upuštanja uz pomoć prekidača zvezda/trougao, za pogon se mora odabrati takav trofazni asinhroni motor, koji se u normalnom režimu priključe na mrežu u sprezi trougao.

Principijelna šema spajanja motora na mrežu prikazan je na slici 1.



Sl.1. Principijelna šema spajanja motora na mrežu.

U datoj sprezi pri normalnom simetričnom trofaznom radu, trenutne vrednosti faznih napona na motoru (u_a , u_b , u_c) jednake su trenutnim vrednostima linijskih napona u mreži. Između trenutnih vrednosti struja po fazama (i_a , i_b , i_c) i linijskih struja (i_1 , i_2 , i_3) postoji sledeća veza:

$$i_1 = i_a - i_b ; i_2 = i_b - i_c ; i_3 = i_c - i_a \quad (1)$$

Na slici 1. simbolički je prikazan i nesimetričan jednofazni rad usled iznenadnog prekida dovoda jedne faze (L_2) mreže. Usled ovog prekida u ovom nesimetrično režimu biće ispunjen uslov $i_b = i_c$ odnosno:

$$i_1 = i_a - i_b = -i_3 ; i_2 = i_b - i_c = 0 \quad (2)$$

2.2 Tehnički podaci motora i radne mašine:

- Tip motora: 1ZK160L-6
- Proizvođač: "Sever"-Subotica

- Broj faza statora: $m_s=3$
- Broj polova: $2p=6$
- Nazivna snaga: $P=11\text{kW}$
- Nazivni napon: $U=380/660\text{V}$
- Frekvencija: 50 Hz
- Sprega: D/Y
- Nazivna struja: $I=25.72/14.85\text{ A}$
- Faktor snage: $\cos\varphi=0.78$
- Nazivna brzina obrtanja: $n=957\text{ min}^{-1}$
- Moment trenja i ventilacije: $m_{fv}=0.0088\omega[\text{Nm}]$
- Radna mašina je mešalica sa otpornim momentom koji u dobroj apoksimaciji u analitičkoj formi možemo predstaviti sledećom jednačinom:

$$m_f=30+0.89\cdot 10^{-3}\omega^2[\text{Nm}]$$

- Moment inercije mešalice: $J_f=1.1\text{kgm}^2$
- Zbir momenta inercije motora i mešalice: $J_2=J_n+J_f=0.07+1.1=1.17\text{kgm}^2$

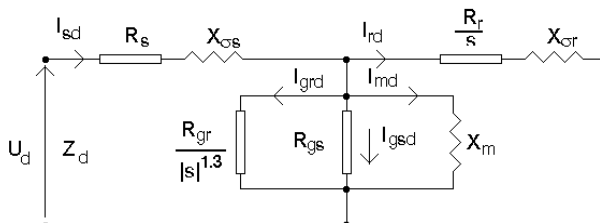
3. ODREĐIVANJE STATIČKIH KARAKTERISTIKA

U cilju poređenja karakteristika ponašanja motora pre i posle kvara, proračun ćemo obaviti u oba slučaja.

Kod razmatranja simetričnog i nesimetričnog režima koristićemo klasične metode uz pomoć ekvivalentne šeme. Pri tom nesimetrični režim ćemo tretirati metodom trofaznih simetričnih komponenti.

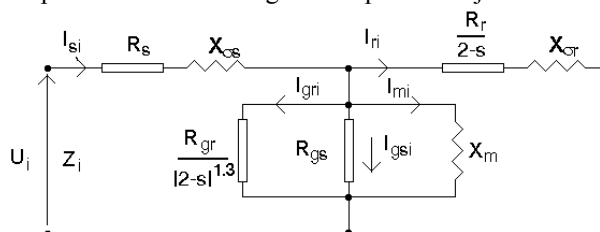
Pošto nastala asimetrija usled prekida dovoda kod jedne faze ne sadrži nulte komponente razmatranje možemo sprovesti sa dve ekvivalentne šeme.

Ekvivalentna šema koja služi za razmatranje simetričnog rada i za razmatranje direktnih komponenti u nesimetričnom radu prikazana je na slici 2.



S1.2. Ekvivalentna šema za razmatranje simetričnog režima i direktnih komponenti nesimetričnog režima.

Ekvivalentna šema koja služi za razmatranje inverznih komponenti nesimetričnog režima prikazana je na slici 3.



S1.3. Ekvivalentna šema za razmatranje inverznih komponenti nesimetričnog režima.

Ove ekvivalentne šeme razlikuju se od klasičnih ekvivalentnih šema u tome što smo u njima pored otpornosti gubitaka u gvožđu statora (R_{gs}) uvrstili i otpornosti gubitaka u gvožđu rotora (R_{gr}). Pošto su gubici u gvožđu rotora srazmerni i sa kvadratom magnetne

indukcije i sa rotorskom frekvencijom na 1,3-ti stepen, ovaj uticaj prema L[5] uzimamo u obzir tako što otpornost R_{gr} , koja je određena uz fiktivnu pretpostavku gubitaka rotora uz statorsku frekvenciju, korigujemo sa odgovarajućim klizanjem na 1,3-ti stepen.

Ostali parametri u ekvivalentnim šemama imaju sledeće značenje:

R_s -Otpornost statorskih namotaja po fazama.

R_r -Svedena otpornost rotorskog kaveza na stator.

X_{cs} -Reaktansa rasipanja statorskih namotaja

X_{cr} -Svedena vrednost rasipanja rotorskog kaveza na stator

X_m -Reaktansa magnećenja.

s -klizanje rotora u direktnom sistemu.

Naznačeni parametri u ekvivalentnim šemama kod razmatranog pogonskog motora imaju sledeće vrednosti:

$$R_s = 1.2\Omega \quad , \quad R_{gs} = 445.478\Omega$$

$$R_r = 1.3\Omega \quad , \quad R_{gr} = 668.217\Omega$$

$$X_{cs} = 2.4\Omega \quad , \quad X_{cr} = 2.001\Omega$$

$$X_m = 44.548\Omega$$

3.1 Jednačine za razmatranje karakteristika simetričnog režima

Kod razmatranja simetričnog režima koristimo ekvivalentnu šemu sa slike 2. Uz pretpostavku da efektivna vrednost linijskog napona mreže (U_s) odgovara direktnom naponu, pri klizanju s_l koje odgovara statičkoj radnoj tački "A" u preseku momentne karakteristike motora i radne mašine, po poznatom postupku izračunavamo odgovarajuće struje u svim granama. Pri tom kod struja ($I_s, I_r, I_m, I_{gs}, I_{gr}$) izostavljamo index "d" sa ciljem da ih razlikujemo od direktnih komponenti u nesimetričnom režimu.

Na osnovu vrednosti struja određuju se i odgovarajuća snaga, gubici snage i momenti:

Primljena snaga:

$$P_1 = m_s Re(\bar{U}_s \bar{I}_s^*) \quad (3)$$

Elektromagnetna snaga u vazдушnom procepu:

$$P_\delta = m_s I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (4)$$

Proizvedena mehanička snaga:

$$P_2 = m_s I_r^2 \frac{R_r}{s} (1-s) = P_\delta (1-s) \quad (5)$$

Predata mehanička snaga na vratilu:

$$P_m = P_2 - P_{trv} \quad (6)$$

Pri tom P_{trv} predstavlja gubitak snage usled trenja i ventilacije.:

Gubici u bakru statora su:

$$P_{cu1} = m_s I_s^2 R_s \quad (7)$$

Gubici u kaveza rotora su:

$$P_{cu2} = m_s I_r^2 R_r \quad (8)$$

Gubici u gvožđu statora su:

$$P_{Fes} = m_s I_{gs}^2 R_{gs} \quad (9)$$

Gubici u gvožđu rotora su:

$$P_{Fer} = m_s I_{gr}^2 \frac{R_{gr}}{|s|^{1.3}} \quad (10)$$

Proizvedeni moment:

$$M = \frac{pP_\delta}{\omega_s} = \frac{p}{\omega_s} m_s I_r^2 \frac{Rr}{s} \quad (11)$$

gde je $\omega_s = 2\pi f$ - kružna učestanost mreže

Korisni mehanički moment na vratilu:

$$M_m = M - M_{fv} \quad (12)$$

gde je m_{fv} moment trenja i ventilacije.

3.2. Jednačine za razmatranje karakteristika nesimetričnog režima

Kod razmatranja nesimetričnog režima napone i struje razlažemo na simetrične komponente. Pri tom koristimo ekvivalentne šeme direktnog i inverznog sistema prema slikama 2. i 3.

Pretpostavimo da su linijski naponi mreže simetrični i da se mogu predstaviti sledećim jednačinama:

$$\bar{U}_a = \bar{U}_s, \quad \bar{U}_b = a^2 \bar{U}_s, \quad \bar{U}_c = a \bar{U}_s \quad (13)$$

gde je "a" kompleksni operator ($a = e^{j120^\circ}$).

Bez nultih komponenti simetrične komponente struje (\bar{I}_d, \bar{I}_i) i napona (\bar{U}_d, \bar{U}_i) su:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{sd} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_a + a\bar{I}_b + a^2\bar{I}_c) \\ \bar{I}_{si} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_a + a^2\bar{I}_b + a\bar{I}_c) \\ \bar{U}_{sd} &= \frac{1}{3}(\bar{U}_a + a\bar{U}_b + a^2\bar{U}_c) = \bar{I}_{sd} Z_d \\ \bar{U}_{si} &= \frac{1}{3}(\bar{U}_a + a^2\bar{U}_b + a\bar{U}_c) = \bar{I}_{si} Z_i \end{aligned} \quad (14)$$

Način raspoređivanja simetričnih komponenti u fazne vrednosti:

$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= \bar{I}_{sd} + \bar{I}_{si}, & \bar{U}_a &= \bar{U}_{sd} + \bar{U}_{si} \\ \bar{I}_b &= a^2 \bar{I}_{sd} + a \bar{I}_{si}, & \bar{U}_b &= a^2 \bar{U}_{sd} + a \bar{U}_{si} \\ \bar{I}_c &= a \bar{I}_{sd} + a^2 \bar{I}_{si}, & \bar{U}_c &= a \bar{U}_{sd} + a^2 \bar{U}_{si} \end{aligned} \quad (15)$$

U razmatranom slučaju zbog prekida dovodnog kabla L_2 struja \bar{I}_2 jednaka je nuli. Zbog toga ispunjen je uslov:

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_b - \bar{I}_c = a^2 \bar{I}_{sd} + a \bar{I}_{si} - a \bar{I}_{sd} - a^2 \bar{I}_{si} = 0 \quad (16)$$

Iz toga proizilazi:

$$\bar{I}_{sd} = \bar{I}_{si} \quad (17)$$

S obzirom da je na krajeve faznog namotaja a priključen napon mreže možemo napisati:

$$\bar{U}_s = \bar{U}_a = \bar{U}_{sd} + \bar{U}_{si} = \bar{I}_{sd} Z_d + \bar{I}_{si} Z_i \quad (18)$$

Iz toga proizilazi:

$$\bar{I}_{sd} = \bar{I}_{si} = \frac{\bar{U}_s}{Z_d + Z_i} \quad (19)$$

Polazeći od jednačine (19), pri klizanju s_2 koje odgovara statičkoj radnoj tački "B" u preseku momentne karakteristike motora i radne mašine, u nesimetričnom režimu određuju se vrednosti simetričnih komponenti

struja ($\bar{I}_{sd}, \bar{I}_{si}$) u statoru. Na osnovu njih i ostalih simetričnih komponenti struja rotora ($\bar{I}_{rd}, \bar{I}_{ri}$), struja magnećenja ($\bar{I}_{md}, \bar{I}_{mi}$), struja gubitaka u gvožđu statora ($\bar{I}_{gsd}, \bar{I}_{gsi}$) i struja gubitaka u gvožđu rotora ($\bar{I}_{grd}, \bar{I}_{gri}$).

Na osnovu navedenih jednačina vrednosti struja po fazama su:

$$\bar{I}_a = 2\bar{I}_{sd} = \frac{2\bar{U}_s}{Z_d + Z_i} \quad (20)$$

$$\bar{I}_b = \bar{I}_c = -\bar{I}_{sd} = -\frac{\bar{U}_s}{Z_d + Z_i} = -\frac{\bar{I}_a}{2} \quad (21)$$

Struja koju motor uzima iz mreže je:

$$\bar{I}_1 = -\bar{I}_3 = \bar{I}_a - \bar{I}_b = \frac{3\bar{U}_s}{Z_d + Z_i} \quad (22)$$

Snaga koju motor uzima iz mreže je:

$$P_1 = Re(\bar{U}_s \bar{I}_1^*) \quad (23)$$

Elektromagnetna snaga:

$$P_\delta = P_{\delta d} + P_{\delta i} = m_s R_r \left[\frac{I_{rd}^2}{s} + \frac{I_{ri}^2}{2-s} \right] \quad (24)$$

Proizvedena mehanička snaga:

$$P_2 = P_{2d} + P_{2i} = m_s R_r \left[\frac{I_{rd}^2}{s} - \frac{I_{ri}^2}{2-s} \right] (1-s) \quad (25)$$

Gubici snage u bakru statora:

$$P_{cu} = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) R_s \quad (26)$$

Gubici snage u gvožđu statora:

$$P_{Fes} = m_s R_{gs} \left[I_{gsd}^2 + I_{gsi}^2 \right] \quad (27)$$

Gubici snage u gvožđu rotora:

$$P_{Fer} = m_s R_{gr} \left[\frac{I_{grd}^2}{|s|^{1.3}} + \frac{I_{gri}^2}{|2-s|^{1.3}} \right] \quad (28)$$

Proizvedeni mehanički moment:

$$M = M_d - M_i = \frac{m_s p}{\omega_s} R_r \left[\frac{I_{rd}^2}{s} - \frac{I_{ri}^2}{2-s} \right] \quad (29)$$

4. SIMULACIJA DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA

S obzirom da poremećaj u vidu prekida kod dovoda jedne faze nastupa na statorskoj strani, skalarni sistem diferencijalnih jednačina za simulaciju rada biće predstavljene u nepokretnom statorskom (α, β - ose) koordinatnom sistemu.

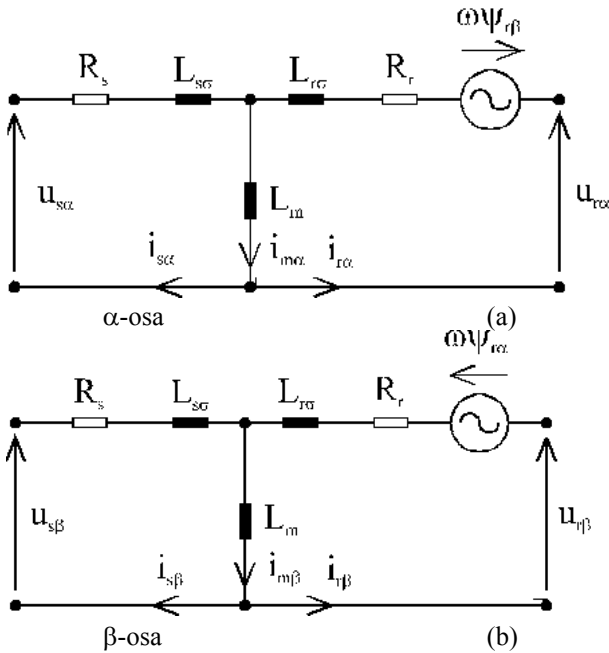
U radu će biti simulirane sledeće prelazne pojave:

- Dinamički zalet u sklopu radne mašine pri trofaznom napajanju
- Pojave, koje se javljaju kada u toku trofaznog zaleta dolazi da prekida dovoda jedne faze.
- Pojave, koje se javljaju nakon trofaznog zaleta u slučaju prekida dovoda jedne faze.

S obzirom da poremećaj usled prekida dovoda jedne faze ne povlači sa sobom i pojavu nultih komponenti, skalarni sistem diferencijalnih jednačina koji smo koristili

kod razmatranja simetričnog režima može se primeniti i za razmatranje prelaznih pojava nastalog nesimetričnog jednofaznog režima uz dodatne uslove.

Ekvivalentne šeme za analizu prelaznih pojava u nepokretnom koordinatnom sistemu L[1] za α, β ose prikazane su na slici 4.



S1.4. Ekvivalentne šeme za analizu prelaznih pojava asinhronih motora u nepokretnom koordinatnom sistemu. U ovim ekvivalentnim šemama:

$L_{s\sigma}$ - trofazna rasipna induktivnost statora

$L_{r\sigma}$ - svedena vrednost trofazne rasipne induktivnosti rotora.

L_m - trofazna induktivnost magnećenja.

U razmatranom slučaju njihove vrednosti su:

$$L_{s\sigma} = 6.37mH, L_{r\sigma} = 7.64mH, L_m = 141.8mH$$

Ukupna trofazna induktivnost satatorskih namotaja po fazi (L_s) i svedena vrednost ukupne trofazne induktivnosti rotora (L_r) po fazi su:

$$L_s = L_{s\sigma} + L_m = 6.31 + 141.8 = 148.17mH$$

$$L_r = L_{r\sigma} + L_m = 7.68 + 141.8 = 149.44mH$$

Ostale oznake koje će biti primenjene kod skalarnih komponenti različitih vektorskih promenljivih su:

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ - skalarne komponente prostornog vektora statorskih napona

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ - skalarne komponente prostornog vektora statorskih struja

$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ - skalarne komponente prostornog vektora rotorskih struja

$i_{m\alpha}, i_{m\beta}$ - skalarne komponente prostornog vektora struja magnećenja

$\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$ - skalarne komponente prostornog vektora statorskih fluksnih obuhvata

$\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ - skalarne komponente prostornog vektora rotorskih fluksnih obuhvata

$\psi_{m\alpha}, \psi_{m\beta}$ - skalarne komponente prostornog vektora fluksnih obuhvata magnećenja

Prilikom simulacija prelaznih pojava polaziće se od pretpostavke da su trenutne vrednosti linijskih napona mreže, odnosno faznih napona na motoru (u_a, u_b, u_c) sinusoidalnog oblika i da mogu biti predstavljene u analitičkoj formi sa sledećim jednačinama.

$$u_a = \sqrt{2}U_s \cos(\omega_s t + \varphi)$$

$$u_b = \sqrt{2}U_s \cos(\omega_s t + \varphi - 120^\circ)$$

$$u_c = \sqrt{2}U_s \cos(\omega_s t + \varphi - 240^\circ)$$

u jednačinama (30) t je vremenska promenljiva, a φ početni fazni stav.

4.1 Jednačine za simulaciju prelaznih pojava u simetričnom režimu

Skalarne komponente vektora statorskih napona su:

$$u_{s\alpha} = \frac{2}{3} \left[u_a - \frac{1}{2}(u_b + u_c) \right] = \sqrt{2}U_s \cos(\omega_s t + \varphi)$$

$$u_{s\beta} = \frac{\sqrt{3}}{3} [u_b - u_c] = \sqrt{2}U_s \sin(\omega_s t + \varphi)$$

Skalarni sistem diferencijalnih jednačina za razmatranje prelaznih pojava pri simetričnom napajanju su:

$$\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}, \quad \psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}$$

$$\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}, \quad \psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -\omega \psi_{r\beta} - R_r i_{r\alpha}, \quad \psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha}$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \omega \psi_{r\alpha} - R_r i_{r\beta}, \quad \psi_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta}$$

Sistem (32) treba dopuniti sa Njutnovom diferencijalnom jednačinom za obrtno kretanje:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p(m_M - m_T)}{J_\Sigma} = \frac{p}{J_\Sigma} (m_e - 0.0088\omega - 30 - 0.89 \cdot 10^{-3} \omega^2)$$

Pošto u toku razmatranja sistem diferencijalnih jednačina želimo rešiti uzimanjem fluksnih obuhvata kao promenljivih stanja, trenutne vrednosti struje u sistemu (32) i trenutne vrednosti proizvedenog momenta (m_e) u jednačini (33) moramo izraziti korišćenjem fluksnih obuhvata:

$$i_{s\alpha} = \frac{\psi_{s\alpha} - k_r \psi_{r\alpha}}{L_s (1 - k_r k_s)}, \quad i_{s\beta} = \frac{\psi_{s\beta} - k_r \psi_{r\beta}}{L_s (1 - k_r k_s)}$$

$$i_{r\alpha} = \frac{\psi_{r\alpha} - k_s \psi_{s\alpha}}{L_r (1 - k_r k_s)}, \quad i_{r\beta} = \frac{\psi_{r\beta} - k_s \psi_{s\beta}}{L_r (1 - k_r k_s)}$$

U jednačinama (34) $k_s = L_m / L_s$ i $k_r = L_m / L_r$ označavaju faktor rasipanja statora i rotora.

Trenutna vrednost prozvedenog momenta je:

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{k_s k_r (\psi_{s\beta} \psi_{r\alpha} - \psi_{r\alpha} \psi_{s\beta})}{L_m (1 - k_s k_r)} \quad (35)$$

Do trenutnih vrednosti komponenti statorskih i rotorskih fluksnih obuhvata dolazimo rešavanjem sistema skalarnih diferencijalnih jednačina (32) i (33). Na osnovu njihovih vrednosti, na bazi jednačine (34) određujemo i skalarnu komponentu struja na statorskoj ($i_{s\alpha}, i_{s\beta}$) i na rotorskoj ($i_{r\alpha}, i_{r\beta}$) strani.

Raspredanjem komponenti vektora statorskih struja dolazimo do trenutnih vrednosti struja po fazama:

$$i_a = i_{s\alpha} \quad , \quad i_b = -\frac{i_{s\alpha}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta} \quad , \quad i_c = -\frac{i_{s\alpha}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta} \quad (36)$$

4.2. Jednačine za simulaciju prelaznih pojava u nesimetričnom režimu

Pošto nastali nesimetrični spoj usled prekida dovoda druge faze ne poseduje nulte komponente, jednačine koje su definisane kod simetričnog spoja uz dodatne uslove mogu se koristiti i za razmatranje prelaznih pojava nesimetričnog režima.

Pošto između faznih napona i nakon prekida dovoda postoji ravnoteža ($u_a + u_b + u_c = 0$), skalarna komponenta napona $u_{s\alpha}$ ostaje nepromenjena.

$$u_{s\alpha} = \frac{2}{3} \left[u_a - \frac{1}{2} (u_b + u_c) \right] = \frac{2}{3} \left(u_a + \frac{u_a}{2} \right) = u_a = \sqrt{2} U_s \cos(\omega_s t + \varphi) \quad (37)$$

Znamo takođe da je usled prekida u dovodu druge faze $i_2 = i_b - i_c = 0$ ispunjen uslov:

$$i_b = i_c \quad , \quad -\frac{i_{s\alpha}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta} = -\frac{i_{s\alpha}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta} \quad (38)$$

Iz toga proizlazi da: $i_{s\beta} = 0$

Uvažavajući uslove (37) i (38), skalarni sistem diferencijalnih jednačina za razmatranje prelaznih pojava pri nesimetričnom režimu sadrži samo tri jednačine:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} \quad , \quad \psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \\ \psi_{s\beta} &= L_m i_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= -\omega \psi_{r\beta} - R_r i_{r\alpha} \quad , \quad \psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= \omega \psi_{r\alpha} - R_r i_{r\beta} \quad , \quad \psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} \end{aligned} \quad (39)$$

Ostale jednačine su identične sa jednačinama koje su definisane kod razmatranja simetričnog režima. Pri tom je uzeto u obzir da u razmatranom nesimetričnom režimu važi:

$$\psi_{s\beta} = \psi_{r\beta} k_r \quad (40)$$

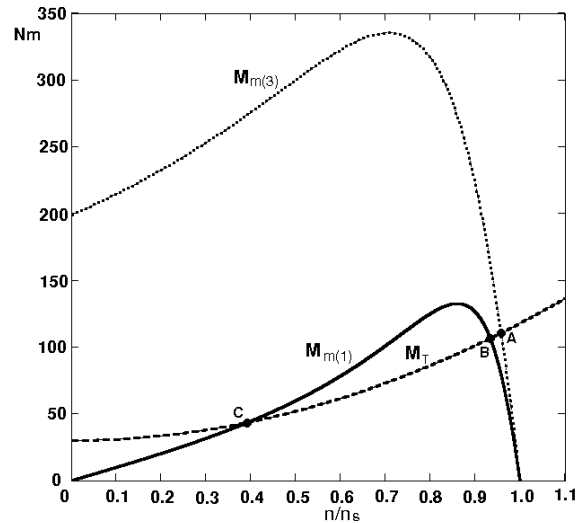
5. REZULTATI PRORAČUNA I SIMULACIJA

U cilju utvrđivanja razlika u ponašanju motora pri normalnom trofaznom radu i u abnormalnom

jednofaznom radu, karakteristike koje su dobijene na osnovu jednačina u prethodnim poglavljama biće uporedo prikazane posebno pri ustaljenim i pri prelaznim režimima rada.

5.1. Porodenje karakteristika u statičkom režimu

Dobijene krive momenta motora u simetričnom trofaznom radu [$M_{m(3)}$] i u razmatranom nesimetričnom jednofaznom radu [$M_{m(1)}$] zajedno sa krivom otpornog momenta radne mašine (M_T), uporedo su prikazane na slici 5. Može se primetiti da motor u jednofaznom radu ne poseduje polazni moment. Prevalni moment u jednofaznom radu iznosi oko 40% u odnosu na vrednost prevalnog momenta u trofaznom radu.



Slika 5.1. Statičke krive momenta motora u trofaznom, jednofaznom radu i otpornog momenta radne mašine.

Kriva momenta radne mašine preseca trofaznu krivu momenta motora u tački "A", a jednofaznu krivu momenta u tačkama "B" i "C". Pri tom statičke radne tačke "A" i "B" su stabilne radne tačke a radna tačka "C" je labilna.

Ukoliko u toku zaleta prekid dovodnog kabla nastaje na ugaonoj brzini koja je manja od ugaone brzine rotora, koja pripada radnoj tački "C", rotor motora će se zaustaviti. U suprotnom slučaju zalet će se nastaviti sve dok rotor ne dostigne ugaonu brzinu u radnoj tački "B".

Ukoliko prekid jednog dovodnog kabla nastupa nakon dostizanja radne tačke "A", rotor će smanjiti svoju ugaonu brzinu sve dok se ne nađe u radnoj tački "B".

Uporedne vrednosti struja u trofaznom i u jedno faznom režimu u radnim tačkama "A" i "B" prikazane su u tabeli 1.

Tabela 1. Promena efektivne vrednosti struje

Režim	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)	I_1 (A)	I_2 (A)	I_3 (A)
3~	14.67	14.67	14.67	25.41	25.41	25.41
1~	33.12	16.56	16.56	49.69	0	49.69

Može se primetiti da se u jednofaznom radu struje u faznim namotajima povećavaju. Najveći porast je kod

faze "a" kod koje je procentualna povećanje 225%. Linijske struje u neprekinutim dovodima se takođe povećavaju na 195% u odnosu na trofazni režim.

Uporedne vrednosti brzine obrtanja (n), momenta opterećenja (M_m), polaznih (M_p) i prevalnih (M_{max}) momenata, vrednosti primljene i korisne snage prikazane su u tabeli 2.

Tabela 2. Promena brzina obrtaja, momenata i snaga

Re-žim	n (min^{-1})	M_n Nm	M_p Nm	M_{max} Nm	P_1 KW	P_m KW
3~	957.6	110.6	199	335	13.1	11.1
1~	933.2	106.5	0	132	14.5	10.4

Uporedne vrednosti gubitaka u bakru statora, u bakru rotora, u gvožđu statora, u gvožđu rotora i ukupni gubici snage u gvožđu prikazane su u tabeli 3.

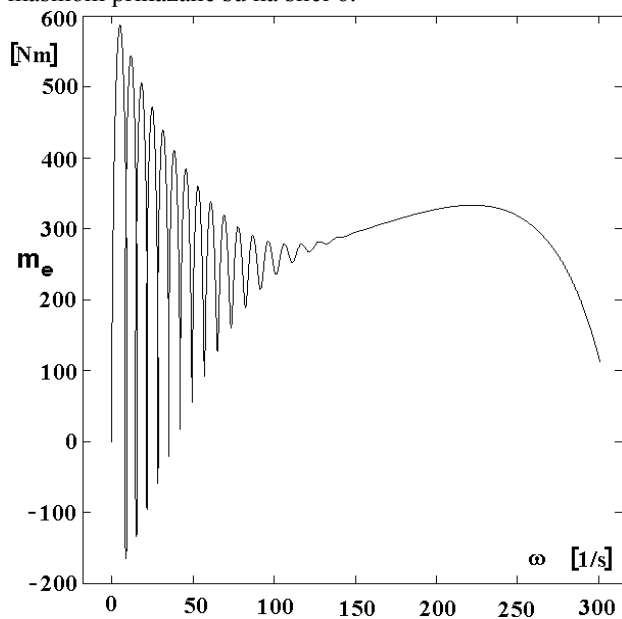
Tabela 3. Promena gubitaka snage

Režim	P_{cus} W	P_{cur} W	P_{Fe} W	P_{Fes} W	P_{Fer} W
3~	775.19	491.22	809.55	800.78	8.77
1~	1976	1752	544.31	522.37	21.94

Može se primetiti da su se u nesimetričnom jednofaznom režimu u odnosu na trofazni režim, gubici u gvožđu statora su smanjili, a gubici u gvožđu rotora povećali. Usled većeg procentualnog smanjenja gubitaka na statorskoj strani u odnosu na neznatno povećanje na rotorskoj strani, ukupni gubici snage u gvožđu u jednofaznom režimu su se takođe smanjili.

5.2. Upoređenje karakteristika u dinamičkom režimu

Promene trenutnih vrednosti prizvedenog momenta (m_e) pri normalnom trofaznom zaletu u sklopu sa radnom mašinom prikazane su na slici 6.



Sl.6. Promena trenutne vrednosti proizvedenog momenta pri trofaznom zaletu u funkciji električne ugaone brzine rotora.

Može se primetiti da dinamički prevalni moment usled relativno sporog zaleta u neznatnoj meri ima manju vrednost u odnosu na prevalni momenat koji je dobijen u statičkom režimu.

Prilikom simulacije dinamičkih karakteristika motora u jednofaznim režimima pretpostavili smo da je u trenutku prekida dovoda, početni fazni stav priključenih napona ima vrednost nula ($\varphi=0$). To je onaj trenutak kada kod prve faze priključni napon upravo dostiže maksimalnu vrednost.

Pored trofaznog zaleta simuliran je i jednofazni dinamički zalet u sklopu sa radnom mašinom. Podrazumeva se da ukoliko dođe da prekida u dovodu jedne faze tokom trofaznog zaleta, u zavisnosti od električne ugaone brzine rotora (ω) mogu nastupati dva slučaja i to:

$$0 < \omega < \omega_C \quad (\text{jednofazno zaustavljanje})$$

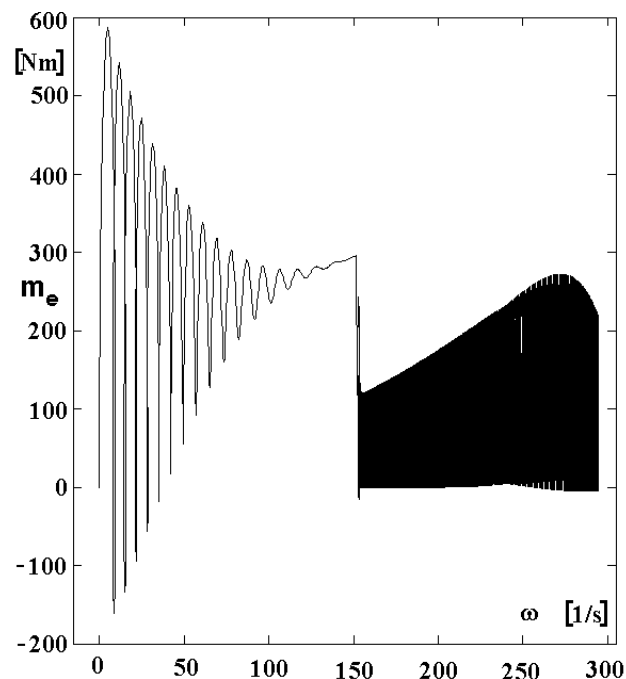
$$\omega_C < \omega < \omega_B \quad (\text{jednofazni zalet})$$

gde su ω_C , ω_B električne ugaone brzine rotora koje odgovaraju radnim tačkama "B" i "C".

U prvom slučaju otporni moment radne mašine ima veću vrednost od srednjeg momenta koju motor može da razvije u jednofaznom režimu. Zbog toga neposredno posle prekida električna ugaona brzina rotora se smanjuje sve dok motor u jednofaznom režimu ne dođe u režim kratkog spoja.

U drugom slučaju otporni moment radne mašine ima manju vrednost od srednjeg momenta koju motor može da razvija u jednofaznom radu. Zbog toga započet trofazni zalet se nastavlja kao jednofazni zalet. Električna ugaona brzina rotora se povećava sve dok radna mašina ne dostigne ugaonu brzinu ω_B .

Takav zalet ilustrovan je slikom 7.



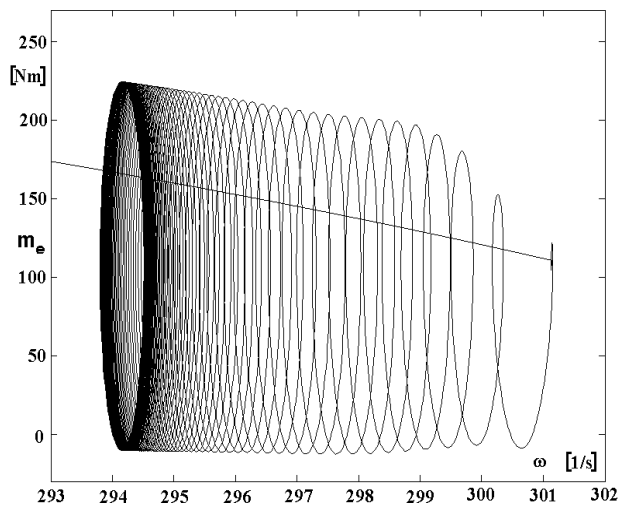
Sl. 7. Promena trenutne vrednosti proizvedenog momenta kada u toku zaleta nastaje prekid kod dovoda jedne faze

Kod ovog slučaja prelazak iz trofaznog zaleta u jednofazni zalet nastaje u trenutku neposredno posle prevazilaženja ugaone brzine ω_C .

Može se primetiti da u jednofaznom delu zaleta, trenutne vrednosti proizvedenih momenata pored jednosmerne komponente poseduju i nepoželjene pulsacione komponente. Inače maksimalna vrednost jednosmerne komponente u toku jednofaznog dinamičkog zaleta usled sporog jednofaznog zaleta praktično ima istu vrednost koju smo kod jednofaznog režima dobili prilikom razmatranja statičkog režima.

Ostale simulacije dinamičkog ponašanja motora odnose se za slučaj kada prekid dovoda nastaje nakon završetka trofaznog zaleta, kada motor goni radnu mašinu u statičkoj radnoj tački "A". Pri tom se pretpostavljalo da iznenadni prekid u dovodu druge faze nastaje u trenutku $t=1.5s$ u odnosu na trenutak uključenja motora na mrežu. U ovim slučajevima neposredno posle prekida, električna ugaona brzina rotora se smanjuje sve dok ne dostigne vrednost ugaone brzine u novoj stabilnoj radnoj tački "B".

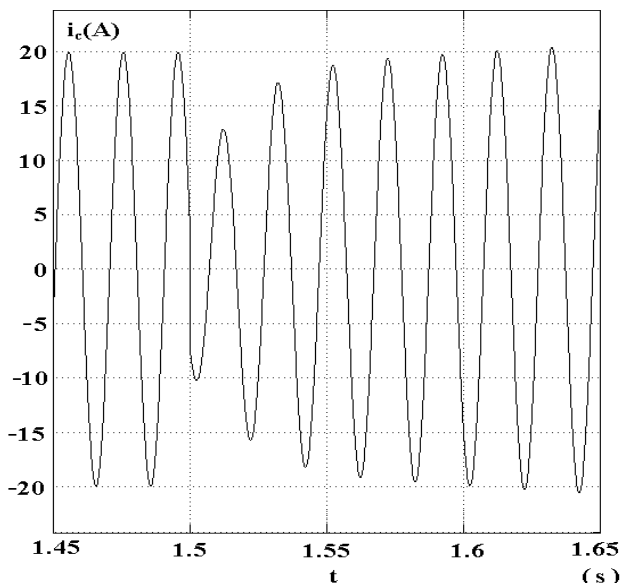
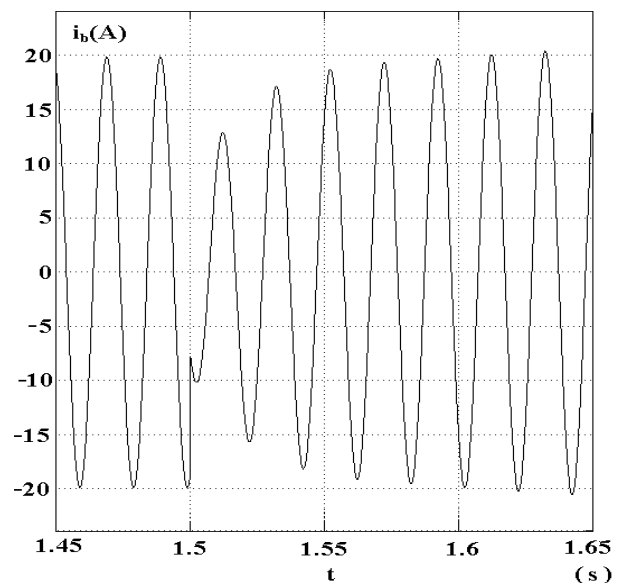
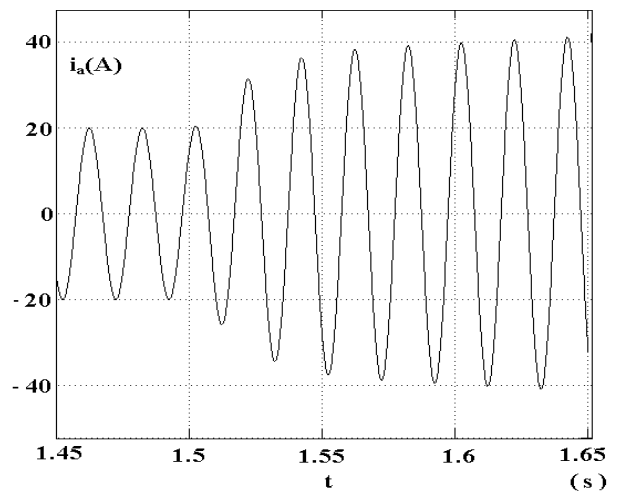
Trenutna vrednost proizvedenog momenta prilikom prelaska iz radne tačke "A" u radnu tačku "B" u zavisnosti od električne ugaone brzine rotora prikazana je na slici 8.



Slika 8. Promena trenutne vrednosti momenta tokom prelaska iz 3~ režima u 1~ režim.

Može se primetiti da u novoj statičkoj radnoj tački "B" usled pulsacionog momenta motora u jednofaznom ustaljenom radu i električne ugaona brzina rotora pulsira i oni opisuju elipsu.

Prelazne pojave koje se javljaju kod trenutnih vrednosti struje po fazama (i_a , i_b , i_c) i u dovodnim provodnicima (i_1 , i_2 , i_3) prilikom prelaska motora iz trofaznog ustaljenog rada (Radna tačka "A") u jednofazni ustaljeni rad (Radna tačka "B"), prikazane su na slikama 9 i 10.



Slika 9. Promena trenutnih vrednosti struja po fazama prilikom prelaska iz 3~ režima u 1~ režim.

7. ZAKLJUČAK

Trofazni asinhroni motori u slučajevima iznenadnog prekida jedne faze u određenim uslovima iz trofaznog režima mogu nastaviti rad u nesimetričnom jednofaznom režimu.

Na osnovu sprovedene analize i poređenja trofaznog i jednofaznog pogona ustanovljeno je da se struje po fazama u jednofaznom režimu znatno povećavaju.

Kod razmatranog motora, čiji su statorski namotaji pri nazivnom naponu mreže predviđeni za rad u sprezi trougao, nakon prekida dovodne linije (L_2) naročito veliko povećanje vrednosti nastupa kod namotaja prve faze ($I_{a(1)} = 2.35I_{a(3)}$). Povećanje struja po fazama prouzrokuje povećanje gubitaka snage u bakru statora i u kavezu rotora. To se ispoljava u vidu pregrevavanja namotaja. Ukoliko izvođači pogona protiv nastupanja nesimetričnih režima ne preduzimaju nikakve mere zaštite, u krajnjem slučaju može da nastupi i pregorevanje namotaja.

Ukupni gubici snage u gvožđu u jednofaznim režimima su se smanjili u odnosu na trofazni režim, ali njihovo smanjivanje ne kompenzuje intenzivno povećanje gubitaka snage u bakru namotaja statora i rotora.

Simulacije dinamičkih karakteristika motora u jednofaznom radu su pokazale da u ovom režimu pored jednosmernih komponenti momenta, se pojavljuju i pulsirajuće komponente, koje ne isčezavaju ni u ustaljenim režimima. Usled ove pulsacione komponente, ugaona brzina rotora u jednofaznom režimu nije ravnomerna. Ona pulsira oko novo nastale statičke radne tačke "B" u ritmu sa dvostrukom mrežnom frekvencijom.

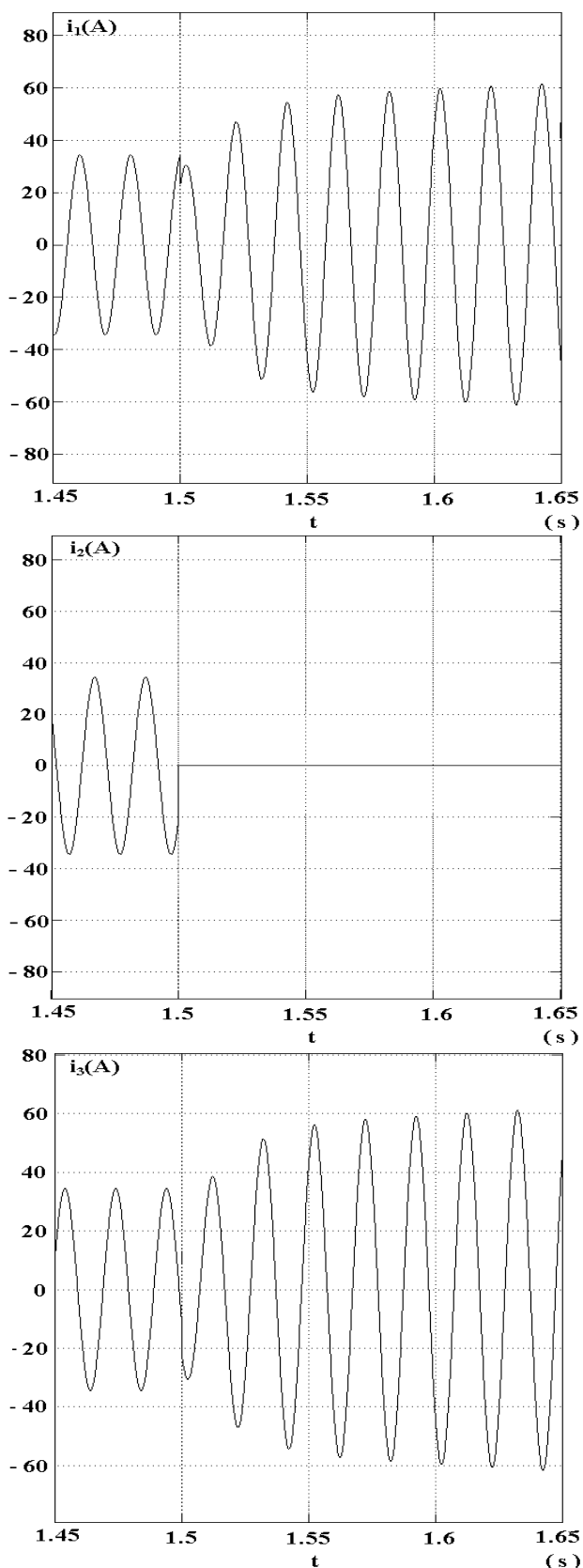
8. LITERATURA

- [1] Jožef Varga, "Električne Mašine", Teorija prostornih vektora. Skripta, Viša Tehnička škola Subotica 2002.
- [2] Vladan Vučković, "Opšta Teorija Električnih Mašina", Nauka, Beograd 1992.
- [3] Branko Mitraković, "Asinhronne Mašine", Naučna knjiga, Beograd 1975.
- [4] K.P. Kovacs, "Transient Phenomena in Electrical Machines", Akadémiai Könyvkiadó, Budapest 1984.
- [5] Jožef Varga, "Posledice rada asinhronih motora u asimetričnim režimima", SIZ za naučni rad SAP Vojvodine, Novi Sad 1989.

STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CAGED ROTOR THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTORS IN CASE OF SUDDEN BREAK IN PHASE INPUT

Abstract: In this paper static and dynamic three-phase squirrel caged induction motors are analyzed in the case of a sudden break in one phase input.

Key Words: Squirrel caged, induction, motors, asymmetries, transient



Sl. 10. Promena trenutnih vrednosti linijskih struja prilikom prelaska iz 3~ režima u 1~ režim.