

DINAMIKA NEURAVNOTEŽENIH KRATKIH SPOJEVA NA PRIKLJUČCIMA SINHRONOG GENERATORA

THE DYNAMICS OF UNBALANCED SHORT CIRCUITS AT THE TERMINALS OF A SYNCHRONOUS GENERATOR

Mila Radojević, Dejan Jerkan, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – Predmet rada je analiza prelaznih pojava koji se odvijaju u namotajima sinhronne mašine prilikom neuravnoteženog kratkog spoja na statorskim priključcima. Izvršeno je analitičko uopštenje parametara koji karakterišu trofazni (simetrični) kratki spoj na priključcima generatora (vremenske konstante i prelazne reaktanse), tako da se ih je moguće upotrebiti za kvantifikaciju neuravnoteženih kratkih spojeva. Na primeru dvopolnog kratkog spoja izvršen je proračun subtranzijentnih, tranzijentnih i ustaljenih reaktansi, te pripadajućih vremenskih konstanti po uzdužnoj i poprečnoj osi.

Ključne reči: Sinhroni generator, kratki spojevi, tranzijenti

Abstract The subject of the paper is the analysis of transient phenomena that take place in the windings of a synchronous machine during an unbalanced short circuit at the stator terminals. It was performed the analytical generalization of the parameters characterizing the three-pole (symmetric) short circuit at the generator connections (time constants and transient reactances), so that they can be used for the quantification of unbalanced short circuits. On the example of a two-pole short circuit, the calculation of subtransient, transient and steady-state reactances, as well as the corresponding time constants along the longitudinal and transverse axis, was executed.

Keywords: Synchronous generator, short circuits, transients

1. UVOD

Sinhrona mašina na kojoj se bazira predloženo proučavanje je trofazna, ima rotor sa isturenim polovima, jednosmerni naponski izvor pobuđivanja i dodatni prigušni rotorski namotaj. Kako je tema rada ispitivanje dinamičkih procesa u mašini, neophodno je izvršiti transformaciju matematičkog modela mašine opisanog u originalnom domenu u dq domen, čime se tronomotajni model mašine zamenjuje dvonomotajnim.

U osnovi, ova transformacija se vrši kako bi se eliminisala zavisnost matrice induktivnosti induktivnosti od vremena, odnosno položaja rotora koji zbog isturene konstrukcije

dovodi do razlike u širini vazdušnog zazora prilikom obrtanja. Uz zanemarenje nelinearnosti feromagnetskog materijala od kojeg je izrađena mašina, te usvajanja konstantne brzine obrtanja tokom trajanja prelaznih procesa, dobija se linearna forma matematičkog modela, čime su stvoreni uslovi za primenu Laplasove transformacije: $\mathcal{L}[f(t)] = F(p) = p \int_0^\infty f(t)e^{-pt} dt$.

Ovim je model pretočen u algebarsku formu i verna je zamena polaznom nelinearnom diferencijalnom modelu u vremenskom domenu.

Početna forma sistema sastoji se od deset izraza, pri čemu se pet njih tiče jednačina naponske ravnoteže namotaja, a drugih pet jednačina njihovih fluksnih obuhvata, prikazanih na sledeći način:

$$u_d = R_s i_d + p\psi_d - \omega\psi_q \quad (1.1) \quad \psi_d = L_d i_d + M_d i_f + M_d i_D \quad (1.6)$$

$$u_q = R_s i_q + p\psi_q + \omega\psi_d \quad (1.2) \quad \psi_q = L_q i_q + M_q i_f \quad (1.7)$$

$$u_f = R_f i_f + p\psi_f \quad (1.3) \quad \psi_f = M_d i_d + L_f i_f + M_d i_D \quad (1.8)$$

$$0 = R_k i_D + p\psi_D \quad (1.4) \quad \psi_D = M_d i_d + M_d i_f + L_D i_D \quad (1.9)$$

$$0 = R_k i_Q + p\psi_Q \quad (1.5) \quad \psi_Q = M_q i_q + L_Q i_Q \quad (1.10)$$

Simultano rešavanje sistema jednačina (1.1)-(1.10) odvija se iz dve etape. Tokom prve se vrši eliminacija jednačina i veličina koje opisuju pobudni namotaj u oznaci indeksa f : u_f – napon, R_f – aktivna otpornost, i_f – struja, ψ_f – fluksni obuhvat, L_f – sopstvena idnuktivnost. Druga etapa podrazumeva eliminaciju veličina i jednačina vezanih za prigušni rotorski namotaj: R_k – aktivna otpornost, i_D – struja po podužnoj osi, ψ_D – fluksni obuhvat po podužnoj osi, i_Q – struja po poprečnoj osi, ψ_Q – fluksni obuhvat po poprečnoj osi, L_D – sopstvena induktivnost prigušnog namotaja po podužnoj osi, L_Q – sopstvena induktivnost prigušnog namotaja po poprečnoj osi. Osim navedenih, korišćene su i sledeće fizičke veličine za opisivanje statorskog namotaja: u_d – napon po podužnoj osi, u_q – napon po poprečnoj osi, R_s – rezistivnost namotaja, i_d – struja po podužnoj osi, i_q – struja po poprečnoj osi, ψ_d – fluksni obuhvat po podužnoj osi, ψ_q – fluksni obuhvat po poprečnoj osi, L_d – sopstvena induktivnost po podužnoj osi, L_q – sopstvena induktivnost po poprečnoj osi. Oznakama M_d i M_q definisane su međuinuktivnosti namotaja po d osi, odnosno po q osi.

Rezultat ovog postupka uprošćavanja prerasta u sistem jednačina koje opisuju samo statorske namotaje po d i q osi, ali u kojima je kroz izraze operatorskih induktivnosti dobijenih tokom postupka uprošćavanja sistema, ipak sadržan uticaj svih prisutnih namotaja. Ovakav sistem se naziva sistemom Parkovih jednačina i glasi:

$$u_d = R_s i_d + p\psi_d - \omega\psi_q \quad (1.11) \quad \psi_d = L_d(p)i_d + G(p)u_f \quad (1.13)$$

NAPOMENA:

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

$$u_q = R_s i_q + p \psi_q + \omega \psi_d \quad (1.12) \quad \psi_q = L_q(p) i_q \quad (1.14)$$

Pored već poznatih veličina uvedene su i tri nove:

$L_d(p)$ – podužna operatorska induktivnost, $L_q(p)$ – poprečna operatorska induktivnost i $G(p)$ – prenosna funkcija napona pobude.

2. OPERATORSKE INDUKTIVNOSTI

Podužna i poprečna induktivnost, date u zavisnosti od Laplasovog operatora p , produkt su postupka uprošćavanja sistema jednačina (1.1)-(1.10). Induktivnosti se tada izražavaju relacijama u kojima figurišu omski otpor

(R_k, R_f) i rasipni $(\Lambda_D, \Lambda_Q, \Lambda_f)$ parametri prigušnog i pobudnog namotaja, podužna i poprečna rasipna induktivnost statorskog namotaja, Λ_d i Λ_q , međuinduktivnosti M_d i M_q :

$$pL_d(p) = p\Lambda_d + pM_d \parallel (R_k + p\Lambda_D) \parallel (R_f + p\Lambda_f) \quad (2.1)$$

$$pL_q(p) = p\Lambda_q + pM_q \parallel (R_k + p\Lambda_Q) \quad (2.2)$$

Prilikom pojave naglih poremećaja u mašini, poput kratkih spojeva, dinamika odziva mašine je upravo donminatno određena ovim operatorskim induktivnostima.

Vremenski tok struja kratkog spoja karakterišu tri uočljiva stadijuma, koji se na osnovu oblika anvelope struje kvara mogu jasno raščlaniti. To su subtranzijentni, tranzijentni i ustaljeni period. Ovakva podela na intervale uzrokovana je konstrukcionim karakteristikama mašine sa isturenim polovima rotora i prigušnim namotajem. Naime, na samom početku kvara, ukupnoj impedansi mašine aktivno doprinose svi namotaji u mašini. Međutim, zbog izraženije vrednosti aktivne otpornosti prigušnog namotaja u poređenju sa otpornostima ostalih namotaja mašine, doprinos ovog namotaja u impedansi kratkog spoja najpre iščezava. Značajan uticaj prigušnog namotaja najbrže jenjava i time označava kraj subtranzijentnog, a početak tranzijentnog perioda. Aktivna otpornost pobudnog namotaja je i do 50 puta manja od prigušne, što uz ujedno i veliku sopstvenu induktivnost određuje da tranzijentni period vremenog toka struje kvara traje značajno duže od subtranzijentnog. Sopstvena magnetna tromost pomenutih namotaja može se iskazati putem sledećih vremenskih konstanti:

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} = \frac{\Lambda_f + M_d}{R_f} - \text{podužna vremenska konstanta pobudnog namotaja rotora}$$

$$T_D = \frac{L_D}{R_k} = \frac{\Lambda_D + M_d}{R_k} - \text{podužna vremenska konstanta prigušnog namotaja rotora}$$

Kao što je rečeno, strujama kvara statorskih namotaja doprinose svi namotaji mašine usled magnetskog sprežanja. Efekat ovog sprežanja je uvažen putem operatorskih induktivnosti $L_d(p)$ i $L_q(p)$. Stoga je vremenski tok struja kvara određen dinamikom svih međusobno spregnutih namotaja, tako da oni združeno određuju induktivnosti i vremenske konstante pomoću kojih se ta promena karakteriše. Osnov za dobijanje tih induktivnosti i vremenskih konstanti pronalazi se u okvirima teoreme o graničnim uslovima. Teoremom su

obuhvaćena dva slučaja kojima se povezuju veličine u vremenskom i kompleksnom Laplasovom domenu:

- veza početnih vrednosti: $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = \lim_{p \rightarrow 0} g(p)$,
- veza krajnjih vrednosti: $\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} g(p)$,

gde je $F(t)$ – originalna funkcija u vremenskom domenu, a

$g(p)$ – originalna funkcija u kompleksnom Laplasovom domenu.

Operatorske induktivnosti se mogu primenom teoreme o graničnim vrednostima tumačiti kao konstantne veličine tokom trajanja nekog od tri pobrojana segmenta (sub,tr,ust) Prema tome, subtranzijentnom tj. početnom periodu prelaznog procesa odgovara primena prve navedene granične teoreme čime se dobija tzv. subtranzijentna induktivnost L_d'' :

$$L_d^n = L_d(t \rightarrow 0) = L_d(p \rightarrow \infty)$$

$$= \Lambda_d + \left(M_d \parallel \left(\frac{R_k}{p} + \Lambda_D \right) \parallel \left(\frac{R_f}{p} + \Lambda_f \right) \right) = \Lambda_d + (M_d \parallel \Lambda_D \parallel R_f). \quad (2.3)$$

Naredni je tranzijentni period koji za polaznu osnovu uzima izraz sličan prethodnom, ali bez učešća parametara vezanih za prigušni namotaj (Λ_f, R_f) . Ovakav pristup je teorijski opravdan odnosnom vrednosti vremenske konstante prigušnog i pobudnog namotaja za koje važi $T_f \gg T_D$. Izraz za određivanje tranzijentne induktivnosti L_d' , uz pobrojana ograničenja glasi:

$$L_d' = L_d(t \rightarrow 0) = L_d(p \rightarrow \infty) = \Lambda_d + (M_d \parallel \Lambda_f). \quad (2.4)$$

Po vremenskom toku poslednja, ustaljena induktivnost L_d , dobija se korišćenjem drugog graničnog uslova na sledeći način:

$$L_d = L_d(t \rightarrow \infty) = L_d(p \rightarrow 0) = \Lambda_d + \frac{1}{p} (pM_d \parallel R_k \parallel R_f) = \Lambda_d + M_d. \quad (2.5)$$

Analognim postupkom definišu se i poprečne induktivnosti subtranzijentnog i ustaljenog perioda, L_q'' i L_q :

$$L_q'' = L_q(t \rightarrow 0) = L_q(p \rightarrow \infty) = \Lambda_q + \left(M_q \parallel \left(\frac{R_k}{p} + \Lambda_Q \right) \right) = \Lambda_q + (M_q \parallel \Lambda_Q) \quad (2.6)$$

$$L_q = L_q(t \rightarrow \infty) = L_q(p \rightarrow 0) = \Lambda_q + M_q. \quad (2.7)$$

Poprečna operatorska induktivnost nije pod uticajem promene u tranzijentnom periodu zbog odsustva pobudnog namotaja po podužnoj osi, te stoga trivijalno sledi $L_q'' = L_q$.

Vremenske kontante statorskih namotaja se mogu izvesti putem razlaganja na proste činioce izraza za operatorske induktivnosti. Svođenjem veličina u svakoj od jednačina ponaosob (2.6), (2.7) na zajednički imenitelj, kreira se novi oblik operatorskih induktivnosti:

$$L_d(p) = \Lambda_d + \frac{p^2 M_d \Lambda_d \Lambda_f + p(\Lambda_f M_d R_k + R_f M_d \Lambda_D) + M_d R_k R_f}{p^2 (M_d \Lambda_D + \Lambda_f M_d + \Lambda_D \Lambda_f) + p(M_d R_k + R_f M_d + \Lambda_f R_k + R_f \Lambda_D) + R_k R_f} \quad (2.8)$$

$$L_q(p) = \frac{p(\Lambda_q M_q + \Lambda_Q (\Lambda_q + M_q)) + R_k (\Lambda_q + M_q)}{p(M_q + \Lambda_Q) + R_k} \quad (2.9)$$

Oba izraza vidno sadrže polinome u svojim brojiocima i imeniocima, te se mogu razložiti u proizvode binoma, kako bi se ostvario faktorizovani zapis operatorskih induktivnosti:

$$L_d(p) = L_d \frac{(1 + pT'_d)(1 + pT''_d)}{(1 + pT'_{d0})(1 + pT''_{d0})} \quad (2.10)$$

$$L_q(p) = L_q \frac{1 + pT''_q}{1 + pT''_{q0}} \quad (2.11)$$

Ukoliko bi se dodatno definisale prigodne veličine za dalji matematički postupak, zapravo bi se izvršilo uvođenje koeficijentata rasipanja:

$\sigma_{fD} = 1 - \frac{M_d^2}{L_f L_D}$ - koeficijent rasipanja između pobudnog i poduznog

prigušnog rotorskog namotaja

$\sigma_{dF} = 1 - \frac{M_d^2}{L_d L_f}$ - koeficijent rasipanja između pobudnog i poduznog

statorskog namotaja

$\sigma_{dD} = 1 - \frac{M_d^2}{L_d L_D}$ - koeficijent rasipanja između poduznog statorskog

namotaja i poduznog prigušnog namotaja

Upotrebom navedenih koeficijentata rasipanja, jednačina () u sređenom obliku se može izraziti kao:

$$L_d(p) = \frac{L_d + pL_d(\sigma_{dF}T_f + \sigma_{dD}T_D) + p^2L''_{dF}T_fT_D}{1 + p(T_f + T_D) + p^2\sigma_{fD}T_fT_D} \quad (2.12)$$

Upoređivanjem prethodne jednačine sa (2.10), mogu se uspostaviti jednakosti između članova koji se nalaze uz isti stepen polinoma te dve jednačine. Oslanjajući se na primenu objašnjenog uslova $T_f \gg T_D$, dobijaju se izrazi za četiri vremenske konstante:

$$T'_{d0} = T_f + T_D \approx T_f = \frac{\Lambda_f + M_d}{R_f} \quad (2.13)$$

$$T''_{d0} = \frac{\sigma_{fD}T_D}{1 + T_D} \approx \sigma_{fD}T_D = \frac{\Lambda_D + (\Lambda_f \parallel M_d)}{R_k} \quad (2.14)$$

$$T'_d = \sigma_{dF}T_f + \sigma_{dD}T_D \approx \sigma_{dF}T_f = \frac{\Lambda_f + (\Lambda_d \parallel M_d)}{R_f} \quad (2.15)$$

$$T''_d = \frac{\Lambda_D + (\Lambda_d \parallel \Lambda_f \parallel M_d)}{R_k} \quad (2.16)$$

Apostrof ' se odnosi na konstante vezane za tranzijentni period prelaznog procesa, dok je dvosotruki apostrof '' oznaka za subtranzijentni period. Dodatni indeks ''0'' naglašava da je reč o konstantama koje ne uključuju statorske rasipne induktivnost, što asocinara na režim praznog hoda, dok su veličine bez indeksa vezane za režim kratkog spoja. Odsustvo pobudnog namotaja po poprečnoj osi značajno uprošćava određivanje korespondentnih poprečnih vremenskih konstanti: subtranzijentne poprečne vremenske konstante u režimu praznog hoda

$T'_{q0} = \frac{\Lambda_Q + M_q}{R_k}$ (2.17), dok je ista, ali za režim kratkog spoja:

$$T''_q = \frac{\Lambda_Q + (M_q \parallel \Lambda_q)}{R_k} \quad (2.18).$$

3. VREMENSKE KONSTANTE NEURAVNOTEŽENIH KRATKIH SPOJEVA

Vremenske konstante izvedene u prethodnom poglavlju odgovaraju slučaju trolnog kratkog spoja, koji je uravnotežen. Iako složen sa aspekta dinamike unutra sinhronog generatora, pojava trolnog kratkog spoja nenarušava uravnoteženost sistema, pa samim tim ni simetriju. Sa druge strane pri pojavi neuravnoteženih kvarova na priključcima generatora, poput jednopolnog ili dvopolnog kratkog spoja, dolazi do simultane pojave nesimetrije. Svi nesimetrični režimi u sinhronom generatoru izazvani nastankom neuravnoteženih kratkih spojeva su praćeni pojavom simetričnog režima inverznog

redosleda. Dosadašnje induktivnosti su zapravo prećutno opisivale dinamiku mašine isključivo u direktnom redosledu simetrije, što povlači da je za opisivanje dinamike mašine u inverznom redosledu simetrije potrebno definisati nove. Induktivnost inverznog redosleda se tradicionalno obeležava kao L_2 . Ona opisuje uspostavljanje struja u statorskim namotajima usled interakcije mašine sa obrtnim poljem inverznog smera obrtanja koje se prilikom nesimetričnog kvara uspostavlja u mašini. Ipak, situacija se dodatno usložnjava pri isturenem, nesimetričnom, obliku rotora koja uzrokuje pojavu dodatnih viših harmonika u električnim veličinama mašine (fluksevi, struje, indukovani naponi). Na osnovu iznetih promena u odnosu na prilike pri trolnom kratkom spoju nameće se zaključak da i vremenske konstantne moraju biti razičite od do sada izvedenih.

Ukoliko se, primera radi, analiza ograniči na dvopolni kratak spoj između faza b i c bez zemlje, određivanje vremenskih konstanti kvara započinje se od izraza za struju kvara dobijenih uz zanemarenje statorskog aktivnog otpora R_s , koja glasi:

$$i_b = -i_c = \frac{\sqrt{3}E}{L_d(p) + \sqrt{L_d(p)L_q(p)}} \times [\sin \theta - b \sin 3\theta + b^2 \sin 5\theta - b^3 \sin 7\theta + \dots] - \frac{\sqrt{3}E \sin \theta_0}{\sqrt{L_d(p)L_q(p)}} \times \left[\frac{1}{2} - b \cos 2\theta + b^2 \cos 4\theta - b^3 \cos 6\theta + \dots \right] \quad (3.1)$$

U početnim trenucima kvara ovaj izraz se može aproksimirati kao:

$$i_b = -i_c = \frac{\sqrt{3}E}{L_d + \sqrt{L_d L_q}} [\sin \theta - b \sin 3\theta + b^2 \sin 5\theta - b^3 \sin 7\theta + \dots] - \frac{\sqrt{3}E \sin \theta_0}{\sqrt{L_d L_q}} \left[\frac{1}{2} - b \cos 2\theta + b^2 \cos 4\theta - b^3 \cos 6\theta + \dots \right] \quad (3.2)$$

Od posebnog interesa za dalji postupak određivanja vremenskih konstanti je imenilac iz člana obeleženog sa ①. Po uzoru na proračun ove vrste kvara u EES-u, daleko od generatora, uočava se sličan oblik izraza ispred zgrade. Po tom tumačenju je opravdano član $\sqrt{L_d L_q}$ progalsiti inverznom induktivnošću L_2 .

$$\frac{1}{L'_d + L_2} = \frac{1}{L_d(p) + L_i} = \frac{1}{L_d \frac{1 + p(T'_d + T'_d) + p^2 T'_d T'_d}{1 + p(T'_{d0} + T'_{d0}) + p^2 T'_{d0} T'_{d0}} + L_2} = \frac{1 + p(T'_{d0} + T'_{d0}) + p^2 T'_{d0} T'_{d0}}{L_d + pL_d(T'_d + T'_d) + p^2 L_d T'_d T'_d + L_i + pL_2(T'_{d0} + T'_{d0}) + p^2 L_2 T'_{d0} T'_{d0}} \quad (3.3)$$

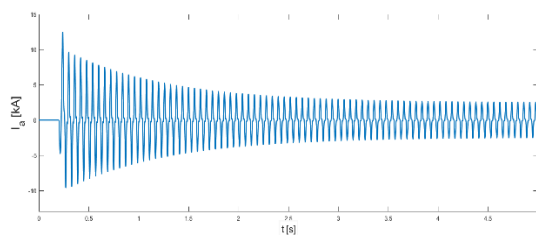
Impedansa, ili admitansa u ovom slučaju, se može tretirati kao prenosna funkcija napona i struje, pa tako važi da su polovi prenosne funkcije povezani sa vremenskim konstantama relacijom: $p = -\frac{1}{T}$. Izraz (3.3) se stoga treba faktorisati, pre svega imenilac u kojem su polovi sadržani. Zbog toga se zbog jednostavnijeg praćenja izdvaja imenilac i podvrgava daljem proračunu.

$$L_d + pL_d(T'_d + T'_d) + p^2 L_d T'_d T'_d + L_2 + pL_2(T'_{d0} + T'_{d0}) + p^2 L_2 T'_{d0} T'_{d0} = p^2 (L_d(T'_d T'_d + L_2 T'_{d0} T'_{d0})) + p(L_d(T'_d + T'_d) + L_2(T'_{d0} + T'_{d0})) + L_d + L_2 = p^2 \left(L_d \cdot T'_{d0} T'_{d0} \frac{L'_d}{L_d} + L_2 T'_{d0} T'_{d0} \right) + p \left(L_d \left(T'_{d0} \frac{L'_d}{L_d} + \frac{T'_{d0} T'_{d0}}{T'_{d0} T'_{d0}} \right) + L_2(T'_{d0} + T'_{d0}) \right) + L_d + L_2 = p^2 T'_{d0} T'_{d0} (L'_d + L_2) + p \left(L_d \left(T'_{d0} \frac{L'_d}{L_d} + T'_{d0} T'_{d0} \right) + L_2(T'_{d0} + T'_{d0}) \right) + L_d + L_2$$

$$\begin{aligned}
&= T'_{d0} T''_{d0} (L'_d + L_2) \left[p^2 + p \frac{L_d \left(T'_{d0} \frac{L'_d}{L_d} + T''_{d0} \frac{L''_d}{L_d} \right) + L_2 (T'_{d0} + T''_{d0})}{T'_{d0} T''_{d0} (L'_d + L_2)} + \frac{L_d + L_2}{L'_d + L_2} \cdot \frac{1}{T'_{d0} T''_{d0}} \right] \\
&= T'_{d0} T''_{d0} (L'_d + L_2) \left[p^2 + p \frac{\frac{T'_{d0} L'_d + T''_{d0} L''_d}{L_d} + L_2 \frac{T'_{d0} + T''_{d0}}{L_d}}{T'_{d0} T''_{d0} (L'_d + L_2)} + \frac{L_d + L_2}{L'_d + L_2} \cdot \frac{1}{T'_{d0} T''_{d0}} \right] \quad (3.4)
\end{aligned}$$

Kako su drugi i četvrti sabirak brojioca uz član polinoma prvog stepena umnošci podužne subtranzijentne vremenske konstante praznog hoda, koja je po svoj prirodi mala brojčana vrednost, oni se u narednim koracima opravdano zanemaruju iz izraza. Pored toga, slobodni član polinoma u uglastoj zagradi se proširuje razlomkom $\frac{L'_d + L_2}{L'_d + L_2}$ kako bi se stvorili uslovi za definisanje

novih vremenskih konstanti. Naime, elementi $\frac{L'_d + L_2}{L'_d + L_2} \cdot \frac{1}{T'_{d0}}$ u slobodnom članu kreiraju novu vremensku konstantu koja se naziva podužna subtranzijentna vremenska konstanta dvopolnog kratkog spoja $T'_{d(l-l)}$ (3.5). Primenjeni indeks (l-l) potiče od engleskog izraza za dvopolni kratak spoj, eng. *line-to-line*, pa će se sve vremenske konstante vezane za opisivanje prirode ovog kvara indeksirati na isti način. Preostali elementi koji figurišu u slobodnom članu polinoma se koriste u svrhu definisanja podužne tranzijentne vremenske konstante dvopolnog kratkog spoja koja glasi: $T''_{d(l-l)} = \frac{L_d + L_2}{L'_d + L_2} \cdot \frac{1}{T''_{d0}}$ (3.6). Izvedene vremenske konstante dokaz su da priroda prigušenog prelaznog procesa važi i pri neuravnoteženom, dvopolnom kratkom spoju bez zemlje, što je interpretirano na primeru struje i_a sinhronog generatora (slika 1). Prikazan odziv dobijen je na osnovu FEM modela sinhronog generatora, dok su rezultati proračuna nad takvim modelom prebačeni u okruženje *Matlab&Simulink* kako bi se ostvario predloženi prikaz sa slike.



Slika 1. Struja faze a pri dvopolnom kratkom spoju bez zemlje na priključcima sinhronog generatora

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak određivanja vremenskih konstanti i induktivnosti neophodnih za opisivanje dinamike prelaznog procesa kakav je uravnoteženi, trolni kratak spoj na priključcima sinhronog generatora. Potom su na osnovu izvedenih parametara karakterističnih za simetričan kvar, analogno određeni i parametri karakteristični za uslove neuravnoteženog dvopolnog kratkog spoja bez zemlje, takođe na priključcima sinhronog generatora. Za potrebe svih navedenih izvođenja matematički model mašine je iz originalnog prebačen u *dq* sistem, a dodatno i u kompleksni Laplasovom domen.

5. LITERATURA

- [1] Concordia, C., 1951. *Synchronous machines, Theory and Performance*. New York: John Wiley & Sons, INC.
- [2] Adkins, B. и Harley, RG., 1975., *The general theory of alternating current machines: Application to Practical Problems*, Chapman and Hall.
- [3] *Transient theory of synchronous generators under unbalanced conditions*, Y.K. Ching and B. Adkins, Volume 101, Issue 7, August 1954, p. 166 – 182.
- [4] *Circuit Analysis of A-C Power Systems, Volume I: Symmetrical and Related Components*, Edith Clarke, General Electric Series, Wiley, 1943
- [5] *Помоћни материјал – Предмет: Моделовање електричних машина*, Факултет техничких наука у Новом саду. 2023.

Kratka biografija:

Mila Radojević rođena je u Beogradu 2000. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranila je 2024.god.

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