

Analiza tranzijentne stabilnosti višemašinskog elektroenergetskog sistema u SIMULINK okruženju

Dejan Vraneš

Termoelektrana Pljevlja
Elektroprivreda Crne Gore
Pljevlja, Crna Gora
dejan.vranes@epcg.com

Gojko Joksimović

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet Crne Gore
Podgorica, Crna Gora
Gojko.Joksimovic@ucg.ac.me

Sažetak—U radu je predstavljen i detaljno realizovan model test elektroenergetskog sistema sa četiri generatora u dvije oblasti i jedanaest sabirnica, namijenjen analizi njegove tranzijentne stabilnosti. Modeliran je slučaj ispada voda između dva čvora, i detaljno analiziran uticaj ovoga ispada na tranzijentnu stabilnost sistema. Prezentirani model je primjenljiv na proizvoljan višemašinski elektroenergetski sistem i predstavlja efikasan alat za analizu tranzijentne stabilnosti sistema.

Ključne riječi: *tranzijentna stabilnost; višemašinski elektroenergetski sistem; kritično vrijeme otklanjanja kvara*

I. UVOD

Tranzijentna stabilnost jeste sposobnost elektroenergetskog sistema (EES) da ostane stabilan pri pojavi nagle, krupne promjene u sistemu, bilo u proizvodnji, bilo u potrošnji. Ovaj pojam je u uskoj vezi sa stabilnošću sinhronih generatora u sistemu – njihovoj sposobnosti da pri naglim poremećajima u sistemu ne ispadnu iz sinhronizma tj. sposobnost održavanja i/ili ponovnog uspostavljanja ravnoteže između razvijenog elektromagnetskog momenta i pogonskog momenta na osovini kod svakog sinhronog generatora u sistemu.

Čak i u tradicionalnim, višemašinskim EES koji se odlikuju centralizovanim sistemima proizvodnje i potrošnje, analiza tranzijentne stabilnosti nije jednostavna i zahtijeva cjelovitu studiju koja se zasniva na rješavanju nekoliko vrlo različitih i kompleksnih zadataka. Takva studija podrazumijeva analizu tokova snaga sistema, formiranje matrica incidencije za slučaj prije kvara, za vrijeme trajanja kvara i nakon otklanjanja kvara i paralelno odvijanje numeričke analize, odnosno numeričko rješavanje sistema nelinearnih diferencijalnih jednačina koje opisuju ponašanje svake sinhrono mašine u sistemu. Dodatni problem jeste inkorporiranje karakteristika pobudnih sistema generatora u čitavi proces.

Situacija se protokom vremena, imajući na umu velike promjene u EES koje se dešavaju pred nama, sve više u ovom smislu usložnjava. Distribuirani izvori električne energije, koji su pritom po svojoj prirodi stohastičkog karaktera, HVDC konekcije, sve prisutniji statički konvertori energetske elektronike velikih snaga itd, ionako složen problem analize tranzijentne stabilnosti EES čini još izazovnijim, [1]. Povećanjem udjela obnovljivih izvora električne energije na račun konvencionalnih, sinhronih generatora, koji se odlikuju

značajnim zamajnim masama, savremeni EES se u odnosu na ranije, tradicionalne EES, odlikuju generalno smanjenom inercijom što uslovljava njihovu ograničenu stabilnost, [2].

Metode simulacije dinamičkih modela u vremenskom domenu baziraju se na numeričkom rješavanju sistema diferencijalnih jednačina korišćenjem neke od mnogobrojnih tehnika numeričke integracije, [3]. Jedan od moćnih softverskih alata koji se može koristiti u ove svrhe jeste grafičko Matlab Simulink okruženje, koje se koristi za modeliranje kako linearnih tako i nelinearnih dinamičkih sistema. Ovo okruženje nudi interfejs blok dijagrama izgrađenih na numeričkim, grafičkim i osnovnim Matlab programskim funkcijama. Dodatna mogućnost kreiranja tzv. podsistema olakšava analizu i optimizaciju složenih struktura i kontrolnih algoritama. Osim svoje grafičke snage, alat pruža širok izbor blokova, raspoređenih u nekoliko biblioteka, [5]. U ovom radu je analiziran višemašinski sistem sa četiri generatora i jedanaest sabirnica kako bi se ilustrovale karakteristike i obim modela zasnovanog na Simulinku za analizu tranzijentne stabilnosti. Pretpostavljen je model dvoosne mašine sa IEEE-Type I pobudnikom sa svojim kompletnim detaljima, [6]. Rezultati simulacije u vremenskom domenu potvrđuju efikasnost razvijenog modela za simulaciju tranzijentne stabilnosti u višemašinskom EES pri velikim poremećajima za različite vrijednosti vremena otklanjanja kvara.

II. MATEMATIČKO MODELOVANJE SISTEMA

Matematički model EES čini skup diferencijalnih i algebarskih jednačina. U ovom radu je modelovan dvoosni model mašine sa IEEE-Tip I pobudnikom za nelinearne simulacije u vremenskom domenu. Matematički model višemašinskog EES čine dva osnovna podskupa: sistem diferencijalnih jednačina koje opisuju dinamiku sinhrono mašine i pobudnog sistema i sistem algebarskih jednačina koji opisuje elektroenergetsku mrežu čiji su sastavni dio pomenuti sinhroni generatori, [7].

Sistem diferencijalnih jednačina koji opisuje i -tu sinhronu mašinu, jednog m -mašinskog sistema sa n -sabirnica ($i=1, 2, \dots, m$) je, [2],

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \quad (1)$$

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - \omega_s) \quad (2)$$

$$T'_{doi} \frac{dE'_{qi}}{dt} = -E'_{qi} - (x_{di} - x'_{di})i_{di} + E_{fdi} \quad (3)$$

$$T'_{qoi} \frac{dE'_{di}}{dt} = -E'_{di} - (x_{qi} - x'_{qi})i_{qi} \quad (4)$$

$$T_{Ei} \frac{dE_{fdi}}{dt} = -(K_{Ei} + S(E_{fdi}))E_{fdi} + V_{Ri} \quad (5)$$

$$S(E_{fd}) = A_e e^{B_e E_{fd}} \quad (6)$$

$$T_{Ai} \frac{dV_{Ri}}{dt} = -V_{Ri} + K_{Ai} R_{Fi} - \frac{K_{Ai} K_{Fi}}{T_{Fi}} E_{fdi} + K_{Ai} (V_{refi} - V_i) \quad (7)$$

$$T_{Fi} \frac{dR_{Fi}}{dt} = -R_{Fi} + \frac{K_{Fi}}{T_{Fi}} E_{fdi} \quad (8)$$

pri čemu prve dvije jednakosti opisuju dinamiku rotacije rotora, jednakost (3) opisuje dinamiku magnetskog fluksa pobudnog namotaja, (4) opisuje dinamiku magnetskog fluksa prigušnog namotaja, (6) opisuje funkciju zasićenja pobude, a skup jednačina (5), (7) i (8) opisuju podsistem automatske regulacije napona. Aktivna snaga na izlazu generatora je:

$$P_{ei} = E'_{di} i_{di} + E'_{qi} i_{qi} + (x'_{qi} - x'_{di})i_{di}i_{qi} \quad (9)$$

Naponske jednačine faznog namotaja statora u polarnim koordinatama su, [1],

$$E'_{di} - V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - r_{si} i_{di} + x'_{qi} i_{qi} = 0 \quad (10)$$

$$E'_{qi} - V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - r_{si} i_{qi} - x'_{di} i_{di} = 0 \quad (11)$$

$i=1, 2, \dots, m$.

U ovom radu su potrošači pretpostavljeni kao simetrični, a modelovani su konstantnom vrijednošću impedanse. U EES sa m generatora, jednačina za čvorove (sabirnice) u matičnom obliku je, [7],

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 & \underline{I}_2 & \dots & \underline{I}_m & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T = \underline{\mathbf{Y}}_{bus} \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \dots \\ \underline{V}_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\underline{I}_i = (i_{di} + j i_{qi}) e^{j(\delta_i - \pi/2)} \quad (13)$$

gdje su $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \dots, \underline{I}_m$ kompleksne struje injektiranja u generatorskim čvorovima. Pošto u ostalim čvorovima nema

strujnih injektiranja, oni se mogu eliminisati, pa se matrica admitansi čvorova $\underline{\mathbf{Y}}_{bus}$ može redukovati na sljedeći način,

$$\underline{\mathbf{Y}}_{bus} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_1 & \underline{\mathbf{Y}}_2 \\ \underline{\mathbf{Y}}_3 & \underline{\mathbf{Y}}_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

gdje su dimenzije submatrica: $\underline{\mathbf{Y}}_1(m \times m)$, $\underline{\mathbf{Y}}_2(m \times (n-m))$, $\underline{\mathbf{Y}}_3((n-m) \times m)$ i $\underline{\mathbf{Y}}_4((n-m) \times (n-m))$. Kako nema injektiranja u čvorovima od $m+1$ do n , možemo ih eliminisati i izvršiti redukovanje matrice $\underline{\mathbf{Y}}_{bus}$,

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \dots \\ \underline{I}_m \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{Y}}_{red} \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \dots \\ \underline{V}_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\underline{\mathbf{Y}}_{red} = \underline{\mathbf{Y}}_1 - \underline{\mathbf{Y}}_2 \underline{\mathbf{Y}}_4^{-1} \underline{\mathbf{Y}}_3 \quad (16)$$

gdje je $\underline{\mathbf{Y}}_{red}$ redukovana matrica admitansi čvorova dimenzija $m \times m$. Za analizu tranzijentne stabilnosti potrebno je izračunati redukovane matrice admitansi čvorova za svako stanje mreže, dakle prije nastanka poremećaja, odnosno kvara, za vrijeme trajanja kvara i nakon otklanjanja kvara. Redukovanje mreže ilustrovano jednačinama (12) do (16) je moguće samo u slučaju potrošača koji se modeluju kao konstantne impedanse jer je tada injektiranje u potrošačkim čvorovima jednako nuli.

Značenje svih simbola u prethodnim izrazima je opisano u Indeksu, u Dodatku na kraju rada.

III. POČETNI USLOVI

Početni uslovi promjenljivih stanja za model dvoosne mašine sa IEEE-Tip I pobudom dobijaju se iz proračuna tokova snaga. U stacionarnom stanju, prije nastanka kvara, svi izvodi u diferencijalnim jednačinama (1)-(8) su jednaki nuli. Da bi se pripremili sistemski podaci za studiju tranzijentne stabilnosti, koraci za izračunavanje početnih uslova diferencijalnih jednačina sistema, višemašinskog, dvoosnog modela sinhronih mašina, su dati u nastavku, [7]:

1) Iz rezultata proračuna tokova snaga računaju se struje generatora:

$$I_{Gi0} e^{j\gamma_{i0}} = \frac{P_{Gi} - jQ_{Gi}}{V_{i0} e^{-j\theta_{i0}}} \quad (17)$$

2) Izračunava se početni ugao snage generatora kao argument sljedećeg kompleksnog izraza:

$$\delta_{i0} = \arg(V_{i0} e^{j\theta_{i0}} + (r_{si} + jx_{qi}) I_{Gi0} e^{j\gamma_{i0}}) \quad (18)$$

3) Dolazi se do početnih struja po d i q osi:

$$(i_{d0} + j i_{q0}) = I_{Gi0} e^{j(\gamma_{i0} - \delta_{i0} + \pi/2)} \quad (19)$$

4) Izračunava se indukovana ems po d osi:

$$E'_{di0} = V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) + r_{Si} i_{di0} - x'_{qi} i_{qi0} \quad (20)$$

5) Izračunava se indukovana ems po q osi:

$$E'_{qi0} = V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) + r_{Si} i_{qi0} + x'_{di} i_{di0} \quad (21)$$

6) Izračunava se pobudna ems:

$$E_{fdi0} = E'_{qi0} + (x_{di} - x'_{di}) i_{di0} \quad (22)$$

7) Izračunava se V_{Ri0} :

$$V_{Ri0} = (K_{Ei} + S(E_{fdi0})) E_{fdi0} \quad (23)$$

8) Izračunava se R_{Fi0} :

$$R_{Fi0} = \frac{K_{Fi} E_{fdi0}}{T_{Fi}} \quad (24)$$

9) Izračunava se V_{refi} :

$$V_{refi} = \frac{V_{Ri0}}{K_{Ai}} + V_{i0} \quad (25)$$

10) Izračunava se P_{mi0} :

$$P_{mi0} = E'_{di0} i_{di0} + E'_{qi0} i_{qi0} + (x'_{qi} - x'_{di}) i_{di0} i_{qi0} \quad (26)$$

Indeks 0 u svim prethodnim relacijama se odnosi na početne uslove. Kako se usljed poremećaja konfiguracija mreže mijenja, odgovarajuće vrijednosti će biti uzete u gore navedenim jednakostima. Sistemski uslovi prije nego dođe do poremećaja i konfiguracije mreže tokom i nakon njegovog nastanka moraju biti poznate u bilo kojoj studiji tranzijentne stabilnosti.

IV. ILUSTRATIVNI PRIMJER

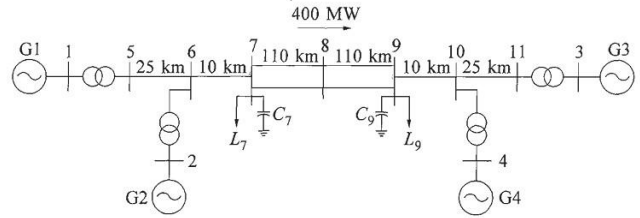
Kao ilustrativni primjer u ovom radu je uzet četvoromašinski sistem sa 11 sabirnica dat u literaturi, [8], slika 1. Sva četiri generatora su identična, nominalne snage 900 MVA i nominalnog napona 20 kV. Generator G_3 je balansni generator analiziranog sistema. Podaci generatora su dati u jediničnim vrijednostima uzimajući za baznu snagu i napon njihove nominalne vrijednosti, Tabela I u Dodatku.

Svi transformatori su istih karakteristika, prenosnog odnosa 20/230 kV, jedinične reaktanse $j \cdot 0.15$.

Svi vodovi su istih električnih karakteristika, nominalnog napona 230 kV, jedinične podužne otpornosti (po kilometru) 0.0001, jedinične podužne induktivne reaktanse 0.001, jedinične podužne kapacitivne susceptanse 0.00175, pri baznoj snazi od 100 MVA.

Karakteristike potrošača u čvoru 7 su: $P=967$ MW, $Q_{ind}=100$ MVar, $Q_{cap}=200$ MVar. Karakteristike potrošača u čvoru 9 su: $P=1767$ MW, $Q_{ind}=100$ MVar, $Q_{cap}=350$ MVar.

Podaci vodova i transformatora su dati Tabelom II, dok su podaci čvorova prikazani u Tabeli III u Dodatku.

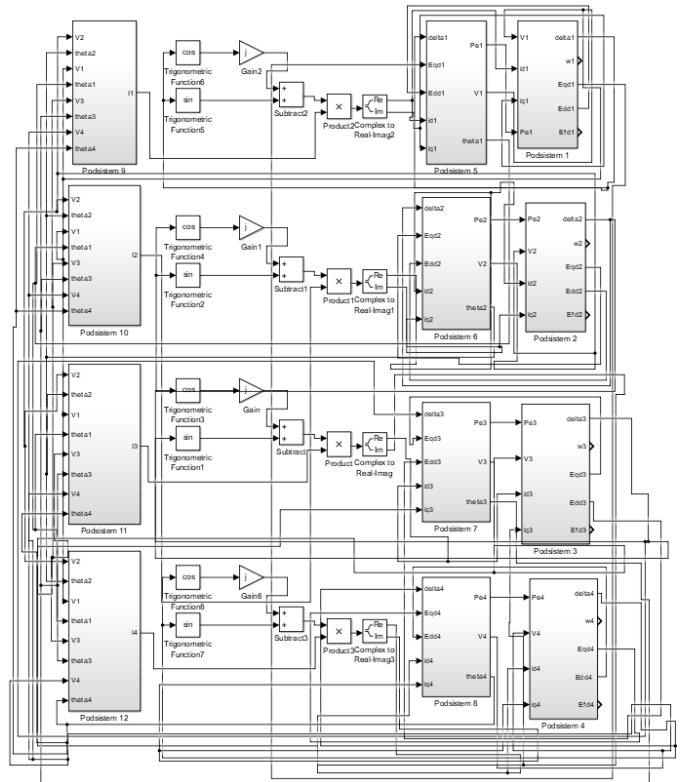


Slika 1. Analizirani četvoromašinski sistem

Proračun tokova snaga je izvršen Njtn-Rafsonovom metodom, a dobijeni rezultati su prikazani u Tabeli V u Dodatku. Početni uslovi su dobijeni u koracima koji su opisani u sekciji III, a prikazani su Tabelom IV u Dodatku.

V. MODEL SISTEMA REALIZOVAN U MATLABU (SIMULINKU)

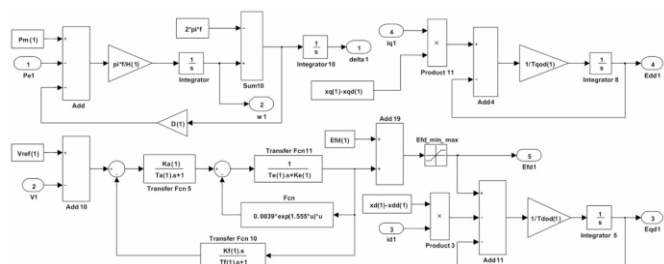
Ovdje je opisano kako je SIMULINK, dobro poznato okruženje za simulaciju dinamičkih sistema, korišćeno za razvoj sveobuhvatnog modela. MATLAB/ SIMULINK model analiziranog EES prikazan slikom 2 je razvijen korišćenjem jednačina (1) do (16) za proučavanje tranzijentne stabilnosti. Kao što se vidi sa slike, kompletan model se sastoji od tri glavna dijela: podsistema koji opisuje diferencijalne jednačine (1)-(8), podsistema statorskih algebarskih jednačina (9)-(11) i podsistema mrežnih jednačina (12)-(16).



Slika 2. Kompletan Simulink model analiziranog sistema

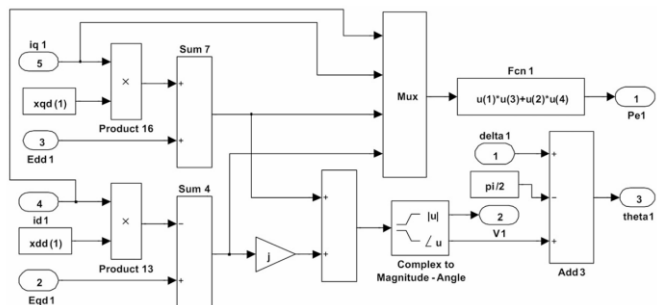
Podsistemi 1, 2, 3 i 4 na slici 3 su prikazani kao SIMULINK podsistemi za proračun diferencijalnih jednačina

za mašine 1, 2, 3 i 4, respektivno. Unutrašnja struktura podsistema 1, za prvu mašinu, prikazan je slikom 3. Ostale tri mašine su modelovane na isti način. U podsistemu diferencijalnih jednačina, ulazi su P_e , V , i_d , i_q , a izlazi su δ , ω , E'_d , E'_q , E'_{fd} .



Slika 3. Podsystem 1.

Podsistemi 5, 6, 7 i 8 na slici 4 su podsistemi za izračunavanje algebarskih jednačina statora za sve četiri mašine. Slika 4 prikazuje samo jedna mašinu, dok su ostale tri mašine modelovane na identičan način. Podsystem algebarskih jednačina statora sadrži pet ulaza (δ , E'_d , E'_q , i_d i i_q) i tri izlaza: P_e , V i θ .

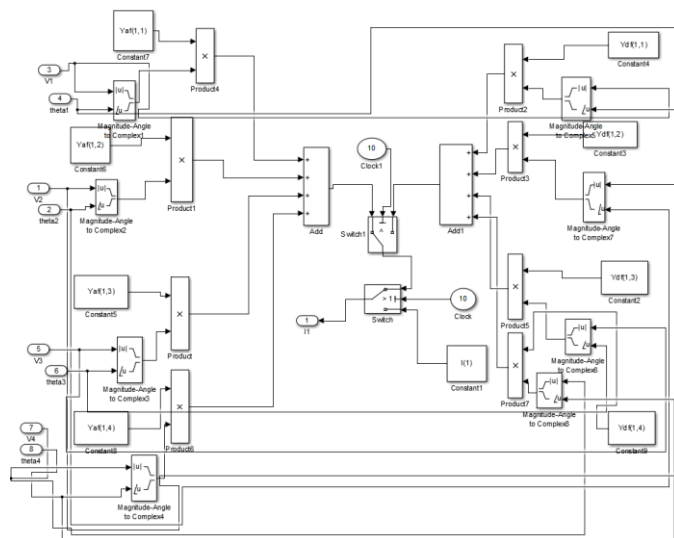


Slika 4. Podsystem 5.

Podsistemi 9, 10, 11 i 12 na se koriste za izračunavanje vrijednosti izlaza električne struje za svaku mašinu. Slika 5 ilustruje izračunavanje izlazne struje prve mašine. Ulazi podsistema mrežnih jednačina su naponi na izvodima generatora, od V_1 od V_4 , njihovi fazni stavovi, θ_1 do θ_4 , a izlazi su električne struje, I_1 do I_4 .

VI. REZULTATI IZ MODELA

Analiza tranzijentne stabilnosti razmatranog sistema izvršena je uz pretpostavku da se desio ispad voda koji povezuje sabirnice 5 i 6, slika 1. Tražio se odgovor na pitanje, koliko dugo taj vod smije biti isključen a da sistem u cjelini ostane tranzijentno stabilan. Pretpostavljeno je da se ispad desio u trenutku $t=1$ s, tako da se grafički moglo prikazati inicijalno stabilno stanje. Opisani problem se svodi na rješavanje sistema diferencijalnih jednačina za četiri generatora.

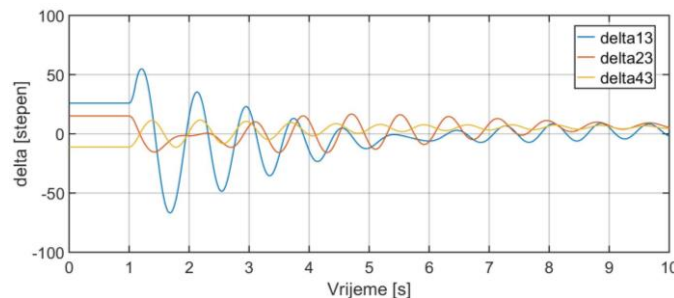


Slika 5. Podsystem 9.

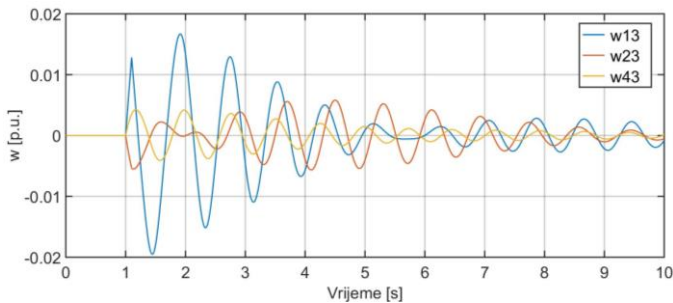
Za rešavanje sistema diferencijalnih jednačina tj. za njihovu numeričku integraciju, upošljen je numerički postupak poznat kao Runge-Kutta metoda četvrtog reda, sa izabranim korakom integracije od $\Delta t=1$ ms. Simulacija traje 10 sekundi. Kritično vrijeme otklanjanja kvara se određivalo uzastopnim simuliranjem režima kvara i povećanjem vremena trajanja kvara za 1 ms sve dok neki od generatora ne ispadne iz sinhronizma. Na ovaj način je utvrđeno da je kritično vrijeme otklanjanja kvara za opisani poremećaj $t_{kr}=166$ ms, kada iz sinhronizma, očekivano, prvi ispada prvi generator, G_1 . Očekivano, jer je mjesto kvara takvo da usled kvara prvi generator postaje potpuno izolovan, neopterećen.

Slike 6 i 7 prikazuju dešavanja za vrijeme trajanja kvara od 100 ms: relativne promjene ugla snage generatora G_1 , G_2 i G_4 u odnosu na G_3 (G_3 je balansni generator) i relativnu promjenu ugaone brzine generatora G_1 , G_2 i G_4 u odnosu na brzinu generatora G_3 , respektivno. Sa ovih slika je očigledno da će sistem ostati stabilan za vrijeme trajanja kvara od 100 ms.

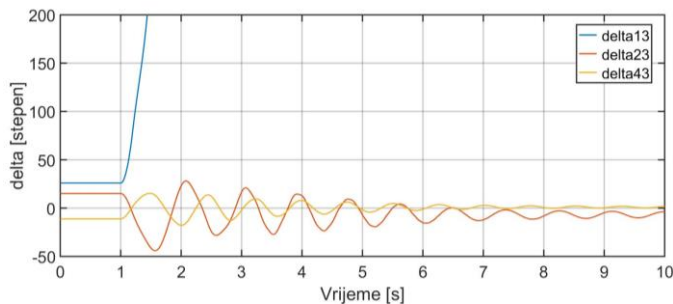
Slično, slike 8, 9 i 10 prikazuju dešavanja za vrijeme trajanja kvara od 200 ms: relativne promjene ugla snage generatora G_1 , G_2 i G_4 u odnosu na generator G_3 , promjene uglova snaga za sva četiri generatora i relativnu promjenu ugaone brzine generatora G_1 , G_2 i G_4 u odnosu na brzinu generatora G_3 , respektivno. Rezultati simulacije dati slikama 8 do 10, za slučaj kada je vrijeme trajanja kvara 200 ms, očigledno pokazuju ispad prvog generatora, G_1 , iz sinhronizma.



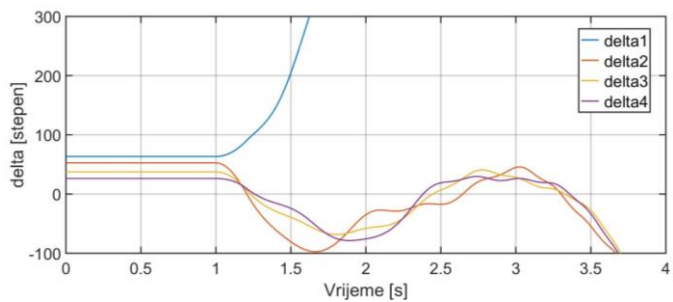
Slika 6. Relativne promjene ugla snage generatora G_1 , G_2 i G_4 u odnosu na generator G_3 za vrijeme trajanja kvara od 100 ms



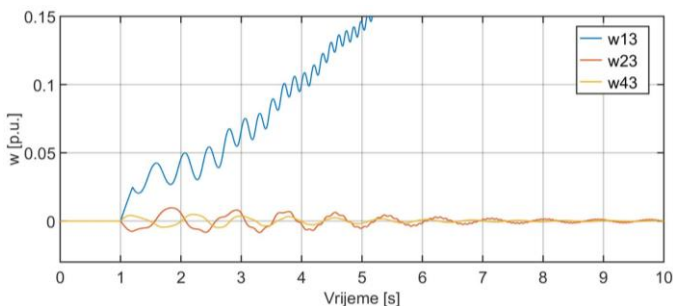
Slika 7. Relativne promjene ugaone brzine rotora generatora G_1 , G_2 i G_4 u odnosu na generator G_3 za vrijeme trajanja kvara od 100 ms



Slika 8. Relativne promjene ugla snage generatora G_1 , G_2 i G_4 u odnosu na generator G_3 za vrijeme trajanja kvara od 200 ms



Slika 9. Vremenske promjene ugla snage sva četiri generatora za vrijeme trajanja kvara od 200 ms



Slika 10. Relativne promjene ugaone brzine rotora generatora G_1 , G_2 i G_4 u odnosu na generator G_3 za vrijeme trajanja kvara od 200 ms

VII. ZAKLJUČAK

U ovom radu je ilustrovana analiza tranzijentne stabilnosti jednog višemašinskog EES sa četiri generatora i jedanaest sabirnica u Matlab Simulink okruženju. Vrlo složen model, koji zahtijeva proračun tokova snaga, numeričku integraciju sistema diferencijalnih jednačina i paralelno promjenu konfiguracije mreže tokom trajanja kvara, predstavljen je korak po korak. Prikazani model je otvorene strukture i svi

podmodeli mogu biti modifikovani ili prošireni korišćenjem različitih Simulink konstrukcija. Prikazani model takođe ima značajan edukativni potencijal, sposoban da ilustruje različite aspekte pojma tranzijentne stabilnosti. Kompletan model se jednostavno modifikuje za sisteme sa različitim brojem mašina i različitim mrežnim konfiguracijama. Pored toga, model zasnovan na Simulinku-u olakšava izbor parametara modela i toka simulacije, uključujući lokaciju kvara, trajanje kvara i vrijeme otklanjanja kvara, vrijeme početka i zaustavljanja simulacije, tipove numeričke procedure za integraciju sistema diferencijalnih jednačina, veličine koraka integracije, tolerancije i izlazne opcije.

DODATAK

TABELA I. PODACI GENERATORA I POBUDNIH SISTEMA

Generator	1	2	3	4
H (s)	6.5	6.5	6.175	6.175
x_d (p.u.)	1.8	1.8	1.8	1.8
x'_d (p.u.)	0.3	0.3	0.3	0.3
x_q (p.u.)	1.7	1.7	1.7	1.7
x'_q (p.u.)	0.55	0.55	0.55	0.55
T'_{d0} (s)	0.4	0.4	0.4	0.4
T_{d0} (s)	8	8	8	8
K_A	20	20	20	20
T_A (s)	0.055	0.055	0.055	0.055
K_E	1	1	1	1
T_E (s)	0.36	0.36	0.36	0.36
K_F	0.125	0.125	0.125	0.125
T_F (s)	1.8	1.8	1.8	1.8
A_e	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056
B_e	1.075	1.075	1.075	1.075
D	0	0	0	0

TABELA II. PODACI O GRANAMA SISTEMA

Od čvora	Ka čvoru	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
1	5	0	0.15	0
2	6	0	0.15	0
4	10	0	0.15	0
5	6	0.0025	0.025	0.04375
10	11	0.0025	0.025	0.04375
6	7	0.001	0.01	0.0175
9	10	0.001	0.01	0.0175
7	8	0.011	0.11	0.1925
7	8	0.011	0.11	0.1925
8	9	0.011	0.11	0.1925
8	9	0.011	0.11	0.1925

TABELA III. PODACI O ČVOROVIMA SISTEMA

Broj čvora	Tip čvora	V (p.u.)	Ugao napon	P_p (p.u.)	Q_p (p.u.)	P_G (p.u.)	Q_G (p.u.)
1	PV	1.03	0°	0	0	0.778	0
2	PV	1.01	0°	0	0	0.778	0
3	Balansni	1.03	-6.8°	0	0	0	0
4	PV	1.01	0°	0	0	0.778	0
5	PQ	1	0°	0	0	0	0
6	PQ	1	0°	0	0	0	0
7	PQ	1	0°	1.074	-0.11	0	0
8	PQ	1	0°	0	0	0	0
9	PQ	1	0°	1.963	-0.27	0	0
10	PQ	1	0°	0	0	0	0
11	PQ	1	0°	0	0	0	0

TABELA IV. POČETNI USLOVI

Generator	1	2	3	4
δ_0 (°)	63.36°	52.58°	37.47°	26.32°
i_{d0} (p.u.)	0.6618	0.7079	0.6773	0.69
i_{q0} (p.u.)	0.4145	0.3982	0.4229	0.4077
E'_{d0} (p.u.)	0.4767	0.4579	0.4863	0.4688
E'_{q0} (p.u.)	0.9497	0.961	0.9407	0.9416
E_{fd0} (p.u.)	1.942	2.0238	1.9567	1.976
V_{R0} (p.u.)	2.0302	2.1237	2.0465	2.0695
R_{F0} (p.u.)	0.1349	0.1405	0.1359	0.1373
V_{ref0} (p.u.)	1.1315	1.1161	1.132	1.1134
P_{m0} (p.u.)	0.7778	0.7778	0.79889	0.7778

TABELA V. REZULTATI PRORAČUNA TOKOVA SNAGA

Broj čvora	V (p.u.)	Ugao napona	P_G (p.u.)	Q_G (p.u.)	P_p (p.u.)	Q_p (p.u.)
1	1.03	20.19°	0.7778	0.199	0	0
2	1.01	10.44°	0.7778	0.245	0	0
3	1.03	-6.79°	0.7985	0.1879	0	0
4	1.01	-16.96°	0.7778	0.206	0	0
5	1.0074	13.74°	0	0	0	0
6	0.98	3.68°	0	0	0	0
7	0.965	-4.68°	0	0	1.074	-0.11
8	0.953	-18.5°	0	0	0	0
9	0.976	-32°	0	0	1.963	-0.27
10	0.986	-23.69°	0	0	0	0
11	1.0094	-13.41°	0	0	0	0

Redukovana matrica admitansi čvorova prije kvara:

$$Y_{bus_prije_kvara} = \begin{bmatrix} 0.24 - j3.75 & 0.22 + j2.28 & 0.11 + j0.77 & 0.14 + j0.89 \\ 0.22 + j2.28 & 0.29 - j4.00 & 0.14 + j0.89 & 0.18 + j1.04 \\ 0.11 + j0.77 & 0.14 + j0.89 & 0.32 - j3.75 & 0.31 + j2.27 \\ 0.14 + j0.89 & 0.18 + j1.04 & 0.31 + j2.27 & 0.40 - j4.01 \end{bmatrix}$$

Redukovana matrica admitansi čvorova tokom kvara:

$$Y_{bus_tokom_kvara} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.65 - j2.66 & 0.29 + j1.34 & 0.36 + j1.56 \\ 0 & 0.29 + j1.34 & 0.37 - j3.60 & 0.38 + j2.45 \\ 0 & 0.36 + j1.56 & 0.38 + j2.45 & 0.48 - j3.81 \end{bmatrix}$$

Redukovana matrica admitansi čvorova poslije kvara:

$$Y_{bus_poslije_kvara} = \begin{bmatrix} 0.24 - j3.75 & 0.22 + j2.28 & 0.12 + j0.77 & 0.15 + j0.89 \\ 0.22 + j2.28 & 0.29 - j4.00 & 0.15 + j0.90 & 0.19 + j1.04 \\ 0.16 + j0.77 & 0.15 + j0.90 & 0.32 - j3.75 & 0.31 + j2.28 \\ 0.15 + j0.90 & 0.19 + j1.04 & 0.31 + j2.27 & 0.40 - j4.00 \end{bmatrix}$$

INDEKS

D	Koeficijent prigušenja
E'_d	Ems po d osi u tranzijentnom periodu
E'_q	Ems po q osi u tranzijentnom periodu
E_{fd}	Napon pobude
H	Inerciona konstanta generatora
i_d	Struja statora po d osi
i_q	Struja statora po q osi
K_A	Pojačanje regulatora pobude
K_E	Pojačanje pobude

K_F	Pojačanje stabilizatora pobude
R_F	Faktor povratne sprege stabilizatora
P_m	Mehanička snaga generatora
r_s	Otpornost faznog namotaja statora
$S(E_{fd})$	Funkcija zasićenja pobude
T'_{d0}	Tranzijentna vremenska konstanta po d osi
T''_{d0}	Tranzijentna vremenska konstanta po q osi
T_E	Vremenska konstanta pobudnog namotaja
T_F	Vremenska konstanta stabilizatora pobude
T_A	Vremenska konstanta regulatora pobude
V	Napon statora generatora
V_{ref}	Referentna vrijednost napona
x'_d	Tranzijentna reaktansa po d osi
x'_q	Tranzijentna reaktansa po q osi
x_d	Sinhrona reaktansa po d osi
x_q	Sinhrona reaktansa po q osi
θ	Fazni stav faznog napona generatora
δ	Ugao snage generatora
ω_s	Sinhrona brzina
ω	Ugaona brzina rotora

LITERATURA

- [1] H. Wang, Z. Li, „A review of power system transient stability analysis and assessment“, 2019 Prognostics & System Health Management Conference, Qingdao, China, , PHM-2019
- [2] M. H. Boubakeur, „Contribution to improving the efficiency of electricity networks through the integration and flexible control of wind energy and FACTS systems“, Ph.D. Thesis, University of Mohamed Khider Biskra, Biskra, Algiers, 2017.
- [3] M. L. Crow, “Computational methods for electric power systems”, CRC Press, 2015.
- [4] S. Ekinci, A. Demiroren, H. L. Zeynelgil, “A didactic procedure for transient stability simulation of a multi-machine power system utilizing SIMULINK”, International Journal of Electrical Engineering Education, August 2015.
- [5] Mathworks, www.mathworks.com
- [6] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Power Engineering Society, IEEE Std 421.5™-2005
- [7] P.W. Sauer, M. A. Pai, Power system dynamics and stability, New Jersey, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998.
- [8] P. Kundur, Power system stability and control, in EPRI power system engineering series, New York, Mc Graw-Hill, 1994.
- [9] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power system control and stability, Stevenage, IEEE Press, 2003.

ABSTRACT

The paper presents and implements in detail a model of a test power system with four generators in two domains and eleven buses, intended for the analysis of its transient stability. A case of line break between two nodes is modeled and the impact of this outage on the transient stability of the system is analyzed in detail. The presented model is applicable to any multi-machine power system and is an effective tool for analyzing the transient stability of the system.

TRANSIENT STABILITY ANALYSIS OF MULTI-MACHINE POWER SYSTEM IN SIMULINK ENVIRONMENT

Dejan Vraneš, Gojko Joksimović