

Detekcija i otklanjanje uzroka nestabilnog rada sistema

Detection and Elimination of the Causes of Unstable System Operation

Bojan Ivanović

Elektro distribucija Srbije, Beograd

Rezime - Stabilnost na male poremećaje, koja se još naziva statička stabilnost ili modalna analiza, se bavi stabilnošću sistema u slučaju malih poremećaja kao što su promene u potrošnji ili proizvodnji na satnom i dnevnom nivou. Prednost ove vrste analize je njegov globalni karakter jer daje sve sopstvene vrednosti matrice stanja sistema, odnosno polove, u okviru jednog sistemskog proračuna. Postojanje samo jednog pola sistema sa pozitivnim realnim delom ukazuje na nestabilan sistem. Mera relativnog učešća određene promenljive stanja, vezane za određeni generator, i određenog pola sistema dobija se računanjem faktora učešća. Sortiranjem faktora učešća za sve polove sistema u opadajući redosled i uspostavljanje korelacije sa tačno određenom promenljivom stanja nekog generatora dobija se povratna sprege do generatora koji su dominantni uzročnici postojanja polova sistema sa pozitivnim realnim delom. U radu se prikazuje izračunavanje sopstvenih vrednosti sistema i uspostavljanje korisničke povratne sprege do generatora uzročnika pojave nestabilnog pola. Uspostavljanje ove povratne sprege i eliminacija nestabilnog pola sistema promenom parametara generatora je demonstrirana na primeru realnog distributivnog sistema ogranka Leskovac sa preko 2500 čvorova i priključenih više od 40 sinhronih generatora.

Glavne reči - Stabilnost na male poremećaje, Sopstvena vrednost, Pol sistema, Faktori učešća, Povratna sprege

Abstract - Small-signal stability, which is also called static stability or modal analysis, deals with system stability in case of small disturbances such as consumption and production variations on hourly and daily basis. Advantage of this type of analysis is its global character because it provides all system state matrix eigenvalues, i.e. system poles, within single system calculation. Existence of single system pole with positive real part indicates unstable system. Measure of relative participation of a particular state variable, which is correlated to particular generator, and particular system pole is provided by calculating participation factors. Sorting of participation factors for all system poles in descending order and establishing a correlation to certain state variable of particular generator provides feedback to generators that are dominant causes of existence of system poles with positive real part. The paper presents calculation of system eigenvalues and establishment of user feedback to generator causing appearance of unstable pole. The establishment of this feedback and elimination of unstable system pole by

changing generator parameters is demonstrated on the example of the real distribution system of Leskovac branch with over 2500 nodes and more than 40 synchronous generators connected.

Index Terms - Small-signal stability, Eigenvalue, System pole, Participation factors, Feedback

I UVOD

Stabilnost na male poremećaje ili statička stabilnost spada u grupu ugaone stabilnosti. Predstavlja sposobnost sistema da ostane u sinhronom radu kod pojave malih poremećaja. Pod malim poremećajima se podrazumevaju oni poremećaji kod čije pojave se sistem može linearizovati u okolini mirne radne tačke tako što se jednačine sistema razvijaju u Tejlorov red pri čemu se zanemaruju svi njegovi viši članovi. Primer ovakvih malih poremećaja su: 1) dnevne promene angažovanja generatora u skladu sa voznim redovima; 2) uključivanja opterećenja manjih snaga, na primer manjih od jednog promila snage sistema; 3) isključenja slaboopterećenih vodova i transformatora; 4) sinhronizacija generatorskih jedinica, itd. Ova vrsta stabilnosti je detaljno obrađena u literaturi [1-4] i značajna je jer daje informacije o svojstvenim osobinama sistema koje su ključne za njegovo planiranje i dimenzionisanje. Operatori sistema u svojim planovima razvoja često ne analiziraju sistem na male poremećaje iako se na taj način dobija uvid u statičku stabilnost sistema kao celine.

Analiza stabilnosti na male poremećaje se svodi na određivanje sopstvenih vrednosti ili polova sistema. Sistem se predstavlja matricom stanja čiji se polovi određuju. Matrica stanja sistema se naziva još i pogonska matrica dok se analiza sistema na male poremećaje naziva još i modalna analiza.

Uzroci nastanka nestabilnih polova mogu biti: a) pojedini parametri generatora i njegovih regulacionih sistema, b) položaj mirne radne tačke generatora, c) konfiguracija mreže, d) položaji otepa transformatora, itd.

Matrica stanja je matrica realnih brojeva ali njeni polovi mogu biti realni ili kompleksni. Kompleksni polovi se uvek javljaju kao konjugovano-kompleksni parovi. Mnogi komercijalni softveri za analizu sistema svode proračun stabilnosti na male poremećaje isključivo na proračun polova sistema. Međutim, izračunavanje polova sistema je polovina posla. Ukoliko postoje polovi sistema sa pozitivnim realnim delovima, odnosno ako je sistem

nestabilan, neophodno je identifikovati uzroke pojave ovih nestabilnih polova, odnosno one generatore koji izazivaju pojavu ovakvih polova. Često više generatora utiče na vrednost jednog pola različitim težinskim koeficijentima koji se nazivaju participacioni faktori.

Detekciona šema uzroka nastanka nestabilnih polova sastoji se u izračunavanju participacionih faktora za sve polove sistema, njihovom sortiranju u opadajući redosled i povezivanju sa određenim veličinama svakog generatora. U radu je prikazana implementacija ove detekcione šeme u okviru softvera CASE koja direktno povezuje svaki participacioni faktor jednog pola sa odgovarajućim generatorom.

II MODEL SISTEMA U PROSTORU STANJA

EES se može predstaviti sa n diferencijalnih jednačina prvog reda u sledećoj formi:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1)$$

Gde je x vektor promenljivih stanja čiji je broj n , dok je u vektor sistemskih ulaznih promenljivih čiji je broj r . Pri tome se podrazumeva da je sistem autonoman, odnosno da izvodi promenljivih stanja nisu eksplicitna funkcija vremena.

Od interesa su izlazne promenljive koje se mogu izraziti u funkciji promenljivih stanja i ulaznih promenljivih:

$$y = g(x, u) \quad (2)$$

gde je y vektor sistemskih izlaznih promenljivih čiji je broj m .

Linearizacijom prethodna dva sistema jednačine dobija se:

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (3)$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u \quad (4)$$

gde je:

$$A = \partial f / \partial x - \text{matrica stanja dimenzija } n \times n$$

$$B = \partial f / \partial u - \text{ulazna ili upravljačka matrica stanja dimenzija } n \times r$$

$$C = \partial g / \partial x - \text{izlazna matrica dimenzija } m \times n$$

$$D = \partial g / \partial u - \text{matrica uticaja ulaza direktno na izlaz } m \times r$$

Laplasovom transformacijom jednačina (3) i (4) dobijaju se oblici ovih jednačina u frekventnom domenu.

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = A\Delta x(s) + B\Delta u(s) \quad (5)$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s) + D\Delta u(s) \quad (6)$$

Nakon sređivanja dobijaju se rešenja prethodna dva sistema jednačina po Δx i Δy su:

$$\Delta x(s) = \frac{\text{adj}(A - \lambda I)}{\det(A - \lambda I)} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] \quad (7)$$

$$\Delta y(s) = C \frac{\text{adj}(A - \lambda I)}{\det(A - \lambda I)} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] + D\Delta u(s) \quad (8)$$

Polovi prethodna dva sistema jednačina su rešenja jednačine:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (9)$$

Vrednosti λ za koje je zadovoljena prethodna jednačina se nazivaju sopstvene vrednosti matrice A .

Prema prvom metodu Ljapunova stabilnost u malom ili lokalna stabilnost nelinearnog sistema je određena korenima jednačine (9), odnosno polovima matrice A na sledeći način: 1) ukoliko svi polovi imaju negativne realne delove, sistem je asimptotski stabilan; 2) kada postoji samo jedan pol koji ima pozitivan realni deo, sistem je nestabilan; 3) ukoliko postoje polovi sa realnim delovima jednakim nuli, nije moguće izvesti zaključak o stabilnosti sistema.

Elementi matrice stanja sistema A su parcijalni izvodi linearizovanih diferencijalnih jednačina generatora po promenljivama stanja Δx u mirnoj radnoj tački sistema za koju se analizira mali poremećaj. Promenljive stanja su promene generatorskih promenljivih: 1) $\Delta\delta$ - promena ugla rotora; 2) $\Delta\omega$ - promena brzine rotora; 3) $\Delta E_q'$ - promena tranzijentne elektromotorne sile (EMS) u q osi 4) $\Delta E_d'$ - promena tranzijentne EMS-e u d osi 5) $\Delta E_q''$ - promena suptranzijentne EMS-e u q osi 6) $\Delta E_d''$ - promena suptranzijentne EMS-e u d osi, itd. Dakle, svakom generatoru se pridružuje najmanje 6 promenljivih stanja. Treba napomenuti da izbor promenljivih stanja nije jedinstven u literaturi. Ono što je isto kod svih autora su promena ugla ($\Delta\delta$) i brzine rotora ($\Delta\omega$). Promenljive stanja u [1] su onakve kakve su prethodno navedene uz nekoliko pomoćnih promenljivih modela pobudnog sistema, s tim da je izuzeta promena tranzijentne EMS-e u d osi. U [4] su promenljive stanja, osim $\Delta\delta$ i $\Delta\omega$, promene flukseva od kojih je jedna od promenljivih stanja promena pobudnog fluksa ($\Delta\psi_{fd}$).

III SOPSTVENI VEKTORI I PARTICIPACIONI FAKTORI

Svakom polu sistema λ_i ($i=1, \dots, n$) odgovara jedan kolonalni vektor w_i dimenzije n , koji se naziva desni sopstveni vektor jer množi matricu A sa desne strane, tako da je zadovoljena relacija:

$$Aw_i = \lambda_i w_i \quad (10)$$

odnosno:

$$(A - \lambda_i I)w_i = 0 \quad (11)$$

Analogno, svakom polu sistema λ_i odgovara jedan redni vektor u_i dimenzije n , koji se naziva levi sopstveni vektor, tako da je zadovoljena relacija:

$$u_i A = \lambda_i u_i \quad (12)$$

odnosno:

$$u_i (A - \lambda_i I) = 0 \quad (13)$$

Članovi vektora u_i i w_i se dobijaju rešavanjem matricnih jednačina (11) i (13). Pri čemu važi relacija $u_i w_i = 1$. Množenjem relacije (12) vektorom w_i sa desne strane dobija se:

$$\lambda_i = u_i A w_i \quad (14)$$

Nakon primene parcijalnog izvoda po dijagonalnom elementu a_{kk} matrice A na relaciju (14) i njenog sređivanja dobija se:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} = u_{ik} w_{ki} \quad (15)$$

Koeficijenti $p_{ki} = u_{ik} w_{ki}$ se nazivaju *participacioni faktori*. Svaki participacioni faktor je proizvod k -tog elementa i -tog levog i i -tog desnog vektora sopstvenih vrednosti. Participacioni faktor p_{ki}

kvantifikuje osetljivost i -tog pola λ_i na k -ti dijagonalni element matrice stanja A .

IV IMPLEMENTACIJA U SOFTVERU CASE

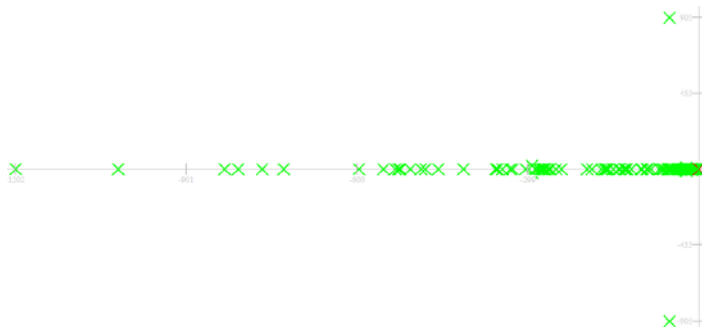
Softverska implementacija participacionih faktora za detekciju uzroka nastajanja nestabilnih polova biće prikazana na simulacionom modelu realnog prenosno-distributivnog sistema koji sadrži kompletan distributivni ogranak Leskovac i deo prenosne 400 kV mreže: TS „Vranje 4“ - TS „Leskovac 2“ - TS „Niš 2“ - TS „Bor 2“ - HE „Đerdap 1“ - TE „Drmno“. Pri tom su u potpunosti modelovane sve male MHE na teritoriji ED „Leskovac“, HE „Vrla 1 - 4“, HE „Đerdap 1“ i i TE „Drmno“. Osnovne karakteristike simulacionog modela su date u narednoj tabeli.

Tabela 1. Karakteristike simulacionog modela

Broj čvorova	Broj vodova	Broj generatora	Broj transformatora
2537	2558	52	117

Potrebno je napomenuti da je prethodno navedeni simulacioni model zapravo model sistema u režimu maksimalnog opterećenja. Osim toga, ovaj model je veoma netipičan jer obuhvata naponske nivoe od 10 kV do 400 kV i elektrana čije su instalisane snage reda 100 kW do onih čije su instalisane snage 1000 MW.

Na slici 1. su prikazani svi polovi sistema. Zeleno su obeleženi stabilni, a crveno nestabilni polovi koji se nalaze uz desnu ivicu slike.

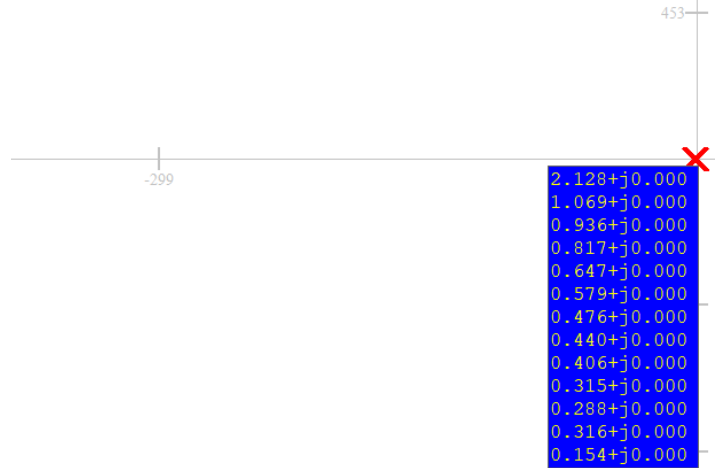


Slika 1. Polovi sistema

Imajući u vidu da u modelu ima 52 generatora i da je broj promenljivih stanja po generatoru 7, ukupan broj polova je $52 \times 7 = 364$.

Pošto je od interesa eliminacija nestabilnih polova, odnosno njihovo prevođenje u stabilne, CASE ima mogućnost prikaza samo nestabilnih polova. Kada korisnik nanese miš iznad skupa nestabilnih polova pojavljuje se prozor u kom su prikazani ovi polovi sortirani u opadajućem redosledu kao što je prikazano na slici 2. Sa slike se vidi da postoji 13 nestabilnih polova i prvi pol ima najveći realni deo čija je vrednost 2,128. U ovom konkretnom slučaju svi nestabilni polovi imaju imaginarni deo jednak nuli.

Kada korisnik nanese miš na prvi pol na listi otvara se drugi prozor u kom su sortirani u opadajući redosled participacioni faktori tog pola kao što je prikazano na slici 3.



Slika 2. Nestabilni polovi sistema



Slika 3. Participacioni faktori pola sistema

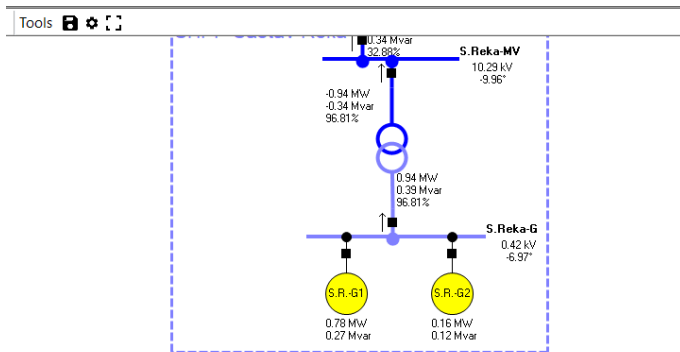
V OTKLANJANJE NESTABILNIH POLOVA

U ovom delu je prikazano kako se redom otklanjaju nestabilni polovi počevši od pola sa najvećom realnom vrednošću. Biće otklonjena prva tri nestabilna pola sa najvećim vrednostima realnog dela.

Svi participacioni faktori su povezani sa određenim generatorima, odnosno veličinama tog generatora. Tako se, na primer, prvi participacioni faktor odnosi na generator S.R.-G2, što je skraćeni naziv od generatora broj 2 u MHE „Suva Reka“. Kada korisnik nanese miš na ovaj participacioni faktor pojavljuje se hiperlink na čiji se klik korisnik dovodi do generatora na interaktivnoj jednodolnoj šemi kao što je prikazano na slici 4.

Generator S.R.-G2 je angažovan snagom 0,16/0,12 MW/MVar. Duplim klikom na generator na jednodolnoj šemi otvara se dijalog prozor sa njegovim parametrima. Već na prvoj kartici, na kojoj su parametri za proračun tokova snaga i naponskih prilika, kao što je prikazano na slici 5, vidi se da se je angažovanje

generatora po reaktivnoj snazi na njegovoj gornjoj granici za zadati napon od 0,42 kV. Da bi se angažovanje generatora po reaktivnoj snazi snizilo, potrebno je sniziti zadati napon generatora na, na primer, 0,41 kV. Pošto su generatori S.R.-G1 i S.R.-G2 priključeni na isti sistem sabirnica moraju imati iste zadate napone. Stoga je potrebno smanjiti zadati napon i generatoru S.R.-G1 na istu vrednost od 0,41 kV.



Slika 4. Generator S.R.-G2 koji je glavni uzročnik pola sa najvećim pozitivnim realnim delom

Generator/Motor Data

Load Flow | Short Circuits | Stability | SLD Properties | Figures

Node Code: S.Reka-G

IoP: 1

Unique #: 43

Name: S.R.-G2

Description: S.Reka G2

Type: Synchronous

System Swing: System Swing

Connected: Connected

Equivalent: Equivalent

Electric Parameters

Rated S [MVA]	Rated P [MW]
0.201	0.161

P [MW]	Pmin [MW]	Qmin [MVar]
0.161	0.000	-0.080

Initial voltage [kV]	Pmax [MW]	Qmax [MVar]
0.420	0.161	0.121

Remote Voltage Control (RVC)

RVC Node:

RVC [kV]: 0.00

RVC Lower [kV]: 0.00

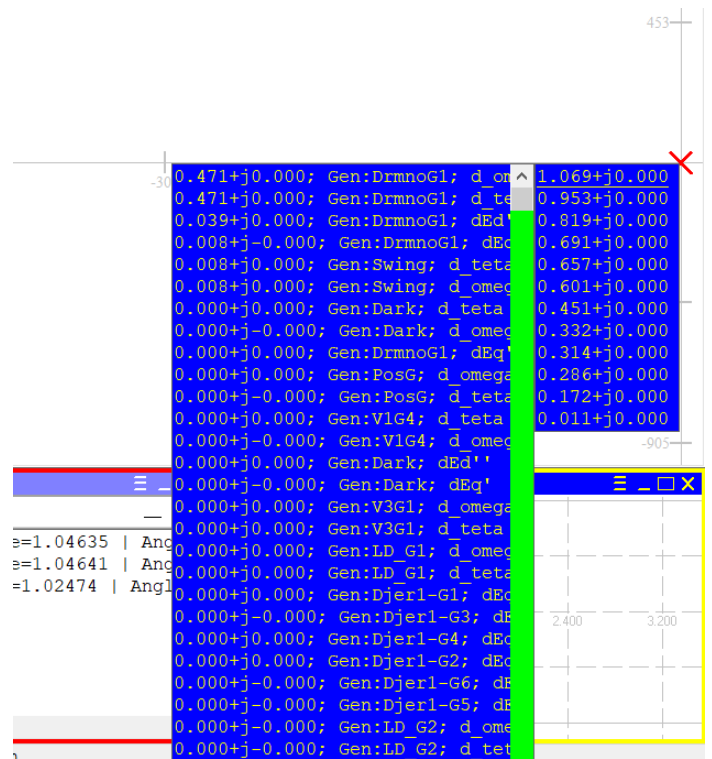
RVC Upper [kV]: 0.00

OK Cancel

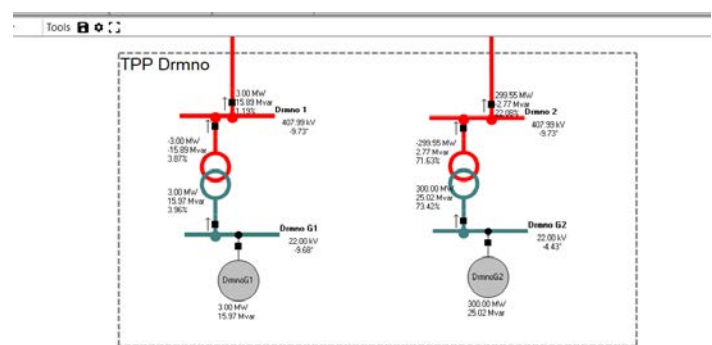
Slika 5. Parametri generatora S.R.-G2 za proračun tokova snaga i naponskih prilika

Nakon promene zadatog napona angažovanje generatora S.R.-G2 po reaktivnoj snazi se smanjuje na 0,01 MVar. Drugim rečima, generator S.R.-G2 se značajno udaljava od gornje granične vrednosti po reaktivnoj snazi. Nakon ponovo urađenog proračuna stabilnosti na male poremećaje polovi sistema su prikazani na slici 6.

Sa prethodne slike se vidi da sada postoji 12 nestabilnih polova, odnosno da je nestabilni pol sa najvećom vrednošću realnog dela, koja je bila 2.128, eliminisan i da je sada na prvom mestu pol sa vrednošću realnog dela od 1.069. Glavni uzročnik ovog pola je generator DrmnoG1. Klikom na hiperlink, kao i u prethodnom slučaju, aplikacija vodi korisnika na mesto na jednodolnoj šemi gde je generator DrmnoG1, kao što je prikazana na slici 7.



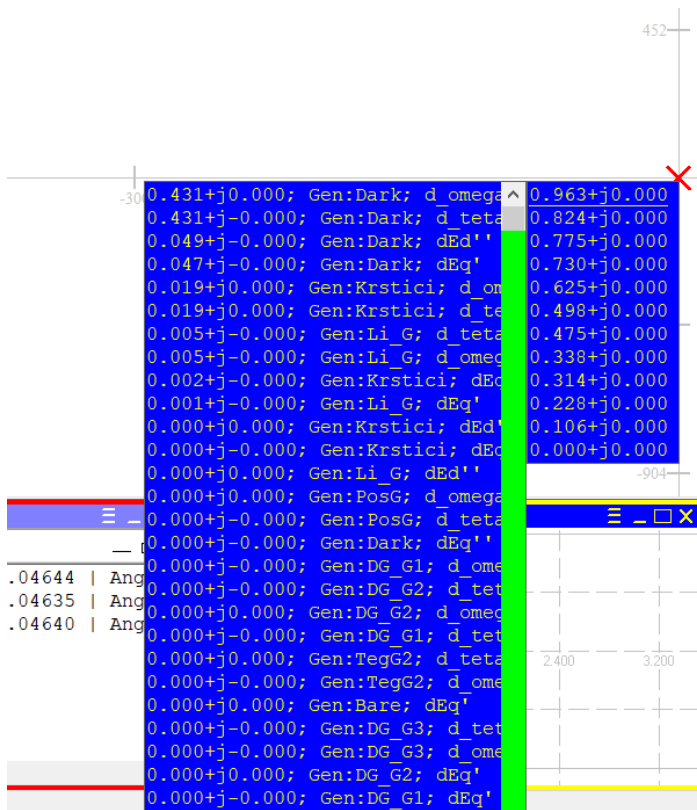
Slika 6. Lista nestabilnih polova sistema nakon promene zadatog napona generatora G1 i G2 u MHE „Suva Reka“



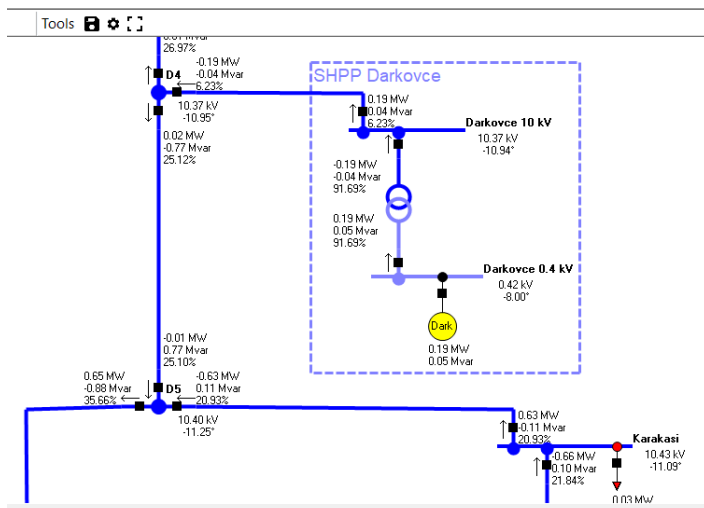
Slika 7. Generator G1 u TE Drmno koji je glavni uzročnik pola sa najvećim realnim delom

Sa slike se vidi da je aktivna snaga angažovanja generatora G1 u TE „Drmno“ samo 3 MW, što je greška u unosu parametara jer ova mašina ne može raditi sa tako malom snagom. Dovoljno je da se snaga angažovanja ovog generatora podigne na 300 MW, kao i kod G2, i ovaj nestabilni pol će biti otklonjen. Nova lista nestabilnih polova je prikazana na slici 7.

Sledeći nestabilni pol po veličini realnog dela ima vrednost 0,963 i ovo je poslednji pol koji se otklanja. Najveći participacioni faktor ovog pola vezan za generator u MHE „Darkovce“ koja je prikazana na slici 8. Ovo je MHE male instalisane snage od 190 kW.



Slika 7. Lista nestabilnih polova sistema posle promene angažovanja generatora G1 u TE „Drmmo“



Slika 8. MHE „Darkovce“ - elektrana koja izaziva nestabilni pol

Proverom parametara generatora u MHE „Darkovce“ ustanovljeno je da uneta konstanta inercije ima vrednost 0.3 s, što je nerealno mala vrednost. Povećanjem ove vrednosti na 0.6 s i nakon ponovnog proračuna stabilnosti na male poremećaje

otklanja se ovaj nestabilni pol sistema kao što je prikazano na narednoj slici. Sa slike se vidi da je prvi naredni nestabilni pol za otklanjanje onaj sa vrednošću realnog dela od 0.824 koji je izazvan generatorom u MHE „Poštica“. On je na prethodnoj slici bio drugi po veličini realnog dela. Međutim, u ovom radu se ne prikazuje njegova eliminacija.



Slika 9. Lista nestabilnih polova nakon eliminacije pola izazvanog generatorom u MHE „Darkovce“

Da bi se eliminisali nestabilni polovi potrebno je ići od generatora do generatora čiji su participacioni faktori najveći za određeni nestabilni pol i izvršiti promenu njihovih parametara. Međutim, ovo ne znači da će biti moguće eliminisati baš sve nestabilne polove na ovaj način. Kao što je ranije napomenuto uzroci nekih nestabilnih polova mogu biti položaji otepa na transformatorima bilo da su u pitanju blok ili mrežni transformatori, topologija mreže pa i položaj mirne radne tačke nekih elemenata sistema. Zbog toga je u nekim slučajevima potrebno izvršiti intervenciju na sistemu u električnoj blizini generatora a ne na parametrima samog generatoru.

VIII ZAKLJUČAK

U prvom delu rada su ukratko prikazane teorijske osnove stabilnosti na male poremećaje. Ova vrsta stabilnosti se često zanemaruje od strane operatora sistema u dugoročnim planovima razvoja iako se na osnovu rezultata jednog proračuna stiče uvid u stabilnost kompletnog sistema.

Objašnjen je način detekcije uzroka nestabilnih polova preko participacionih faktora i prikazana implementacija veze participacionog faktora sa odgovarajućim generatorima. Demonstrirano je kako se postupno, idući od nestabilnog pola do nestabilnog pola, promenom parametara generatora otklanja taj nestabilni pol. Demonstracija je urađena na realnom prenosno-distributivnom modelu koji obuhvata kompletan distributivni

ogranak ED Leskovac, kao ogranak sa najvećim brojem MHE u Srbiji, i deo 400 kV prenosne mreže u istočnoj Srbiji na koju su priključene velike elektrane HE „Đerdap 1“ i TE „Drmno“.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Machowski, J., Lubosny Z., Bialek J.W., Bumby J.R. *Power System Dynamics Stability and Control*, Wiley, Hoboken - New Jersey, USA, 2020.
- [2] Vittal V., McCalley J.D., Anderson P.M., Fouad A.A. *Power System Control and Stability*, Hoboken - New Jersey, USA, 2020.

- [3] Sauer P.W., Pai M.A. *Power System Dynamics and Stability*, Wiley, Prentice Hall, Upper Saddle River - New Jersey, USA, 1998.
- [4] Kundur P. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, USA, 2009.

AUTORI/AUTHORS

dr Bojan Ivanović, Elektrodistribucija Srbije,
bojanivanovicrs@gmail.com, ORCID [0009-0008-4743-8559](https://orcid.org/0009-0008-4743-8559)