

Komparativna analiza rada modula za ispitivanje naponske stabilnosti CASE a i PowerFactory

Bojan Ivanović*, Tomislav Rajić**

* Elektrodistribucija Srbije, Beograd, Srbija

** Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

Rezime - Proračun naponske stabilnosti na male poremećaje se retko izvodi ili skoro uopšte ne izvodi u dugoročnim planovima i studijama razvoja sistema. Jedan od rezultata ovog proračuna stabilnosti je određivanje maksimalne snage potrošnje u nekom čvoru. To je tačka u kojoj aktivna snaga na tzv. P–V krivi ima maksimalnu vrednost. Ova tačka i čitava P–V kriva se određuju softverski pomoću proračuna tokova snaga i naponskih prilika koji se sprovodi za veliki broj slučajeva pri čemu se u svakom narednom slučaju za određeni iznos povećava snaga potrošnje u analiziranom čvoru ili grupi čvorova. U radu je urađena komparativna analiza modula softvera CASE i DiGILENT PowerFactory za ispitivanje naponske stabilnosti na male poremećaje. U prvom delu rada ukratko su date teorijske postavke naponske stabilnosti na male poremećaje. Nakon toga prikazan je način rada modula za naponsku stabilnost u oba softvera i data komparativna analiza rezultata proračuna na istom, školskom, simulacionom modelu. Na kraju rada prikazani su rezultati proračuna u CASE u na realnom modelu prenosnog sistema Srbije.

Ključne reči - Naponska stabilnost, P–V kriva, CASE, PowerFactory.

I UVOD

Stabilnost elektroenergetskog sistema (EES) definiše se kao sposobnost sistema da nakon dejstva poremećaja povрати prihvatljivo ravnotežno stanje. Zajednička IEEE/CIGRE radna grupa je stabilnost podelila na: i) stabilnost ugla rotora, ii) frekventnu stabilnost i iii) naponsku stabilnost. Ova radna grupa je definisala naponsku stabilnost kao sposobnost sistema da pri dejstvu poremećaja održi prihvatljive vrednosti napona na svim sabirnicama u stacionarnom stanju. Za razliku od stabilnosti ugla rotora, koja je prevashodno vezana za rad generatora, naponska stabilnost se vezuje za veličinu u karakteristiku opterećenja [1]. Problem naponske stabilnosti se obično sreće u visokopterećenim sistemima [2].

Naponska stabilnost se dalje deli na stabilnost na velike i male poremećaje. U ovom radu se ne razmatra naponska stabilnost na velike poremećaje koja je zapravo sposobnost sistema da održi prihvatljive vrednosti napona nakon velikih poremećaja poput kratkih spojeva, ispada generatora i grana mreže (vodova i transformatora), itd. Za ispitivanje naponske stabilnosti na velike poremećaje se koristi dinamička vremenska simulacija, veoma slična onoj koja se koristi za proračune tranzijentne stabilnosti. Rad se bavi naponskom stabilnošću na male poremećaje koja se

još naziva i statička naponska stabilnost. Naponska stabilnost na male poremećaje je sposobnost sistema da održi prihvatljive vrednosti napona pri malim poremećajima kao što su dnevne promene opterećenja u sistemu.

Inženjerima elektroenergetike su poznate tzv. P–V krive kojima je za potrošačke čvorove predstavljena zavisnost aktivne snage potrošnje i napona u tim čvorovima. Sa P–V krivih se može očitati maksimalna snaga potrošnje za određeni čvor. Školski se ove krive obično crtaju za radijalne čvorove. Međutim, čvorovi u prenosnim sistemima u najvećem broju slučajeva nisu radijalni i za određivanje ovih P–V krivih koristi se tzv. kontinualni proračun tokova snaga i naponskih prilika [1-3].

I KONTINUALNI PRORAČUN TOKOVA SNAGA I NAPONSKIH PRILIKA I NJEGOVA IMPLEMENTACIJA U CASE

Postoje različiti pristupi i implementacije kontinualnog proračuna tokova snaga i naponskih prilika. U suštini, kontinualni proračun tokova snaga i naponskih prilika podrazumeva da se tokovi snaga i naponske prilike proračunavaju za veliki broj sukcesivnih slučajeva pri čemu se za svaki naredni slučaj potrošnja u ispitivanom, odabranim, čvorovima povećava za određeni iznos kao što se povećava i proizvodnja u generatorskim čvorovima koji su odabrani za povećavanje proizvodnje. Važno je da povećanje potrošnje u čvorovima ne bude veliko kako ne bi dovelo do divergencije proračuna. U startu se potrošnja samo u odabranim čvorovima pretvori u odgovarajuću potrošnju konstantne admitanse, a onda se definiše da povećanje potrošnje za svaki naredni slučaj bude određeni procenat potrošnje u datom čvoru. Povećanje admitanse u nekom čvoru ima prirodnu karakteristiku da nakon pada napona ispod određene vrednosti snaga potrošnje počinje da pada. To je upravo koleno P–V krive.

Način povećanja snage generatora u sistemu kod određivanja P–V karakteristike potrošačkog čvora nije striktno određen. Tako se u [2] navodi da se aktivna snaga generatora povećava proporcionalno njihovoj veličini. U slučaju implementacije u CASE, aktivna snaga odabranih generatora se povećava proporcionalno rezervi koju oni imaju u odnosu na trenutno angažovanu aktivnu snagu. Ukoliko snaga određenog generatora, koji je od strane korisnika odabran da učestvuje u povećanju snage, ne prelazi njegovu maksimalnu snagu onda se u slučaju „x“ povećava prema sledećoj formuli:

$$P_{ix} = P_{i(x-1)} + \frac{(P_{imax} - P_{i(x-1)})}{\sum_{j=1}^m (P_{jmax} - P_{j(x-1)})} \cdot \sum_{j=1}^t \Delta P_{jx}, \quad (1)$$

gde su:

P_{ix} - angažovana aktivna snaga i -tog generatora u slučaju „ x “,

$P_{i(x-1)}$ - angažovana aktivna snaga i -tog generatora u slučaju „ $x-1$ “, odnosno u prethodnom slučaju,

P_{imax} - maksimalno moguća angažovana aktivna snaga i -tog generatora,

ΔP_{jx} - povećanje aktivne snage potrošnje j -tog čvora u slučaju „ x “,

t - broj odabranih potrošačkih čvorova u kojima se snaga povećava,

m - broj odabranih generatorskih čvorova u kojima se snaga povećava.

Povećanje aktivne snage potrošnje j -tog čvora ΔP_{jx} u slučaju „ x “ se izračunava kao:

$$\Delta P_{jx} = \Delta P_{j0} \cdot \left(\frac{V_{jx}}{V_{j0}} \right)^2, \quad (2)$$

gde su:

ΔP_{j0} - povećanje aktivne snage j -tog čvora koje se određuje kao korisnički zadati procenat promene aktivne snage u osnovnom modelu,

V_{j0} - napon j -tog čvora u nultom, početnom, slučaju,

V_{jx} - napon j -tog čvora u trenutnom slučaju

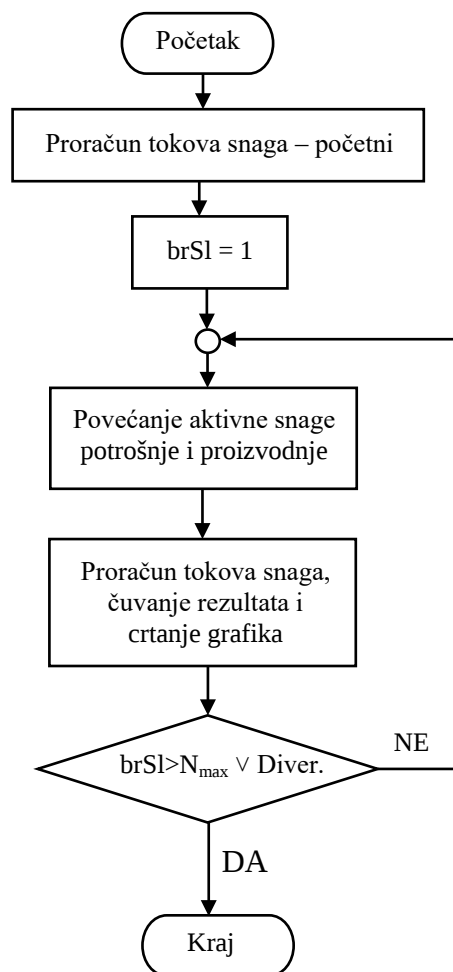
Eventualni manjak u rezervi aktivne snage odabranih generatora se nadomešćuje povećanjem angažovanja balansno-referentnog generatora.

Ako korisnik ne odabere nijedan agregat da učestvuje u povećanju snage onda se sva nedostajuća snaga nadomešćuje povećanjem proizvodnje balansno-referentnog generatora.

Pojednostavljeni algoritam kontinualnog proračuna tokova snaga i naponskih prilika je prikazan na slici 1. Proračun se obavlja za unapred definisani broj slučajeva (promenljiva „ N_{max} “) ili dok proračun ne divergira. Promenljiva „ $brSl$ “ označava trenutni broj slučaja za koji se proračun tokova snaga i naponskih prilika radi.

U literaturi se može pročitati da se pred svaki proračun vrši korekcija napona u čvorovima sistema nekom od metoda poput tangente ili sekant metode [1]. Ovakvu korekciju napona van proračuna tokova snaga i naponskih prilika nije preporučljivo raditi jer u naizmeničnom sistemu tokovi snaga zavise kako od modula napona tako i od njihovih uglova. Korekcija modula napona bez istovremene adekvatne korekcije ugla može za posledicu imati pogrešno pomeranje radne tačke sistema i tzv. promašaj Newton-Raphson iterativnog proračuna. U samom Newton-Raphson postupku moduli napona i njihovi uglovi se koriguju simultano prema proračunatim vrednostima elemenata Jakobijan matrice tako da je mogućnost promašaja, odnosno dolaska u pogrešnu radnu tačku, mala. Zbog toga se u CASE, pre pokretanja proračuna tokova snaga i naponskih prilika, vrši isključivo povećanje aktivne snage potrošnje čvorova i proizvodnje generatora koje su standardne zadate ulazne promenljive za svaki proračun tokova snaga. Zadate vrednosti napona i uglova su rezultat proračuna iz prethodnog slučaja čija je radna tačka bliska radnoj tački slučaja za koji se vrši proračun. Zbog toga se njihova korekcija vrši u okviru samog proračuna tokova snaga i naponskih prilika na osnovu proračunatih elemenata dekomponovane Jakobijan matrice. O tome da je

ovakav pristup ispravan najbolje govori broj iteracija da se dostigne rešenje za neki od slučajeva koji se nalaze na donjem dleu P-V krive za koje neki komercijalni programi, poput PowerFactory i PowerWorld, čak i ne rade proračun. U tekstu koji sledi prikazan je tok konvergencije proračuna za model prenosnog sistema Srbije od oko 500 čvorova. Vidi se da su za konvergenciju proračuna dovoljne 2 iteracije: početna i prva. U tekstu se vidi da je proračun urađen 3 puta. To je zbog toga što se generatori koji naruše svoja reaktivna ograničenja pretvaraju pretvaraju u PQ čvorove sa injektiranjem jednakim zadatoj aktivnoj snazi i reaktivnom ograničenju koje je narušeno, a onda se proračun ponovo radi. Ovo se ponavlja sve dok sve generatori ne budu u okviru svojih reaktivnih ograničenja. To je tzv. algoritam proračun sa pogledom unazad (eng. *backward-looking algorithm*) čiji detalji nisu predmet ovog rada. U ovom konkretnom slučaju bilo je potrebno proračun tokova snaga i naponskih prilika uraditi 3 puta da bi svi generatori bili u okvirima svojih reaktivnih ograničenja.



Slika 1. Algoritam kontinualnog proračuna tokova snaga i naponskih prilika.

Kod povećavanja aktivne snage potrošnje u odabranim čvorovima, reaktivna snaga potrošnje se uvećava za isti procenat svoje početne vrednosti i na isti način kao aktivna snaga,

analogno relaciji (2). Zbog toga, odnos aktivne i reaktivne snage potrošnje, odnosno faktor snage, ostaje isti tokom kompletnog kontinualnog proračuna tokova snaga i naponskih prilika.

Napomena: Kada se proračun tokova snaga i naponskih prilika radi na modelu prenosnog sistema Srbije od oko 500 čvorova regularnom Newton-Raphson metodom, potrebno je 4 ili 5 iteracija da proračun konvergira ako se koristi tzv. flat-start

metoda. Flat-start metoda se uvek koristi kod prvog proračuna tokova snaga i naponskih prilika kada nisu poznati rezultati prethodnog proračuna. Ova metoda polazi od zadatih napona u generatorskim čvorovima i 1 r.j. u potrošačkim čvorovima, s tim da su početni uglovi u svim čvorovima nula. Primer Flat-start proračuna za nekoliko čvorova u EES Srbije, prikazan je na slici 2.

```
iteration=0|Node:JARAND5|Mismatch by P=0.01210|Voltage=0.50513|Angle=-0.65718|Node:JARAND5|Mismatch by Q=0.00248|Voltage=0.50513|Angle=-0.65718
iteration=1|Node:JKOLUB51|Mismatch by P=0.00040|Voltage=0.89384|Angle=-0.19083|Node:JPRPPA21|Mismatch by Q=0.00073|Voltage=1.07225|Angle=-0.00369

iteration=0|Node:JKOLUB51|Mismatch by P=0.00040|Voltage=0.89384|Angle=-0.19083|Node:JTMORA5|Mismatch by Q=0.00572|Voltage=0.92267|Angle=-0.18712
iteration=1|Node:JOBREN12|Mismatch by P=0.00050|Voltage=1.02983|Angle=0.11461|Node:JPRPPA21|Mismatch by Q=0.00049|Voltage=1.07225|Angle=-0.00362

iteration=0|Node:JOBREN12|Mismatch by P=0.00050|Voltage=1.02983|Angle=0.11461|Node:JHVRL25|Mismatch by Q=0.00109|Voltage=1.05827|Angle=-0.15239
iteration=1|Node:JOBREN12|Mismatch by P=0.00043|Voltage=1.02983|Angle=0.11463|Node:JRPMLA11|Mismatch by Q=0.00049|Voltage=1.03028|Angle=0.12110
```

Slika 2. Primer Flat-start proračuna za nekoliko čvorova u EES Srbije realizovan u programu CASE

U CASE je implementiran poseban dijalog prozor u kome se vrši izbor čvorova za koje se crtaju P-V krive kao i izbor generatora koji učestvuju u povećanju aktivne snage. U ovom dijalog prozoru korisnik definiše broj slučajeva u kojima se sukcesivno povećavaju aktivna snaga potrošnje i proizvodnje u izabranim čvorovima i generatorima, procenat povećanja potrošnje u odnosu na inicijalnu snagu u čvoru i opsezi X i Y ose za crtanje grafika.

II IMPLEMENTACIJA NAPONSKE STABILNOSTI U POWERFACTORY

Proračun naponske stabilnosti u PowerFactory, odnosno određivanje P-V krive, obavlja se pokretanjem DPL (DIgSILENT Programming Language) skripta. Korisnik na jednopolnoj šemi označi opterećenja i čvorove za koje će biti određivana P-V kriva i pokrene DPL skript. Pri tom ne postoji mogućnost izbora generatora koji učestvuju u povećavanju snage u sistemu već se sva snaga za koju se potrošnja poveća nadoknađuje iz balansno-referentnog generatora.

U PowerFactory se može naći opis DPL skripta koji se koristi za određivanje P-V krivih. U ovom opisu je naznačeno da se PV krive određuju povećavanjem aktivne snage potrošnje u odabranim čvorovima pri čemu se faktor snage održava konstantnim. Povećanje snage se radi sve dok proračun tokova snaga i naponskih prilika ne prestane da konvergira. Proračunate P-V krive se automatski prikazuju.

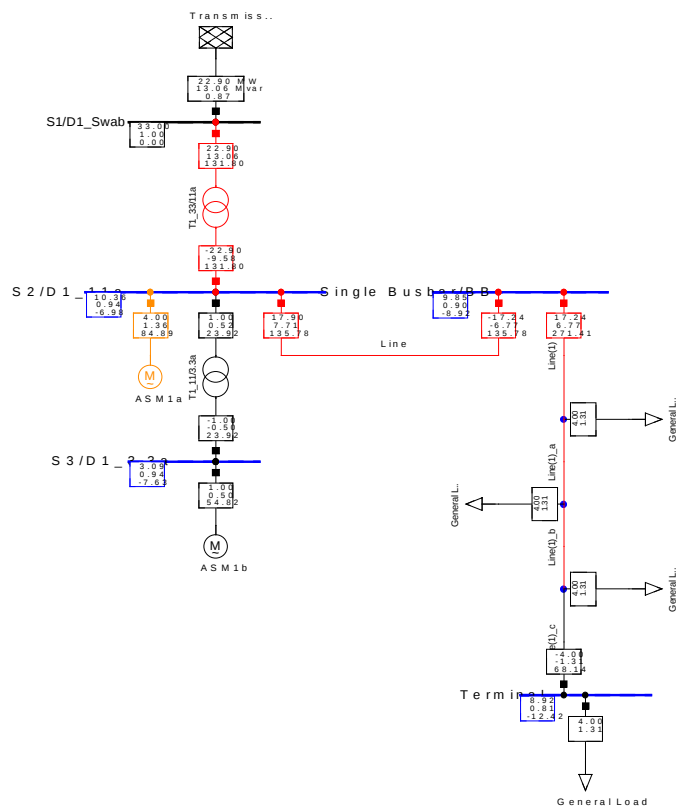
III UPOREDNA ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA NAPONSKE STABILNOSTI U CASE I POWERFACTORY

Jednopolne šeme školskog modela dela distributivnog sistema na kom je izvršeno poređenje rezultata proračuna u CASE i PowerFactory prikazane su na slici 3. Na slikama su prikazani rezultati proračuna tokova snaga i naponskih prilika u osnovnom stanju. U CASE znak minus ispred toka aktivne ili reaktivne snage na vodu ili transformatoru znači da je smer toka ove snage suprotan strelici na elementu. PowerFactory nema pridružene strelice koje označavaju smer toka aktivne snage i smer toka

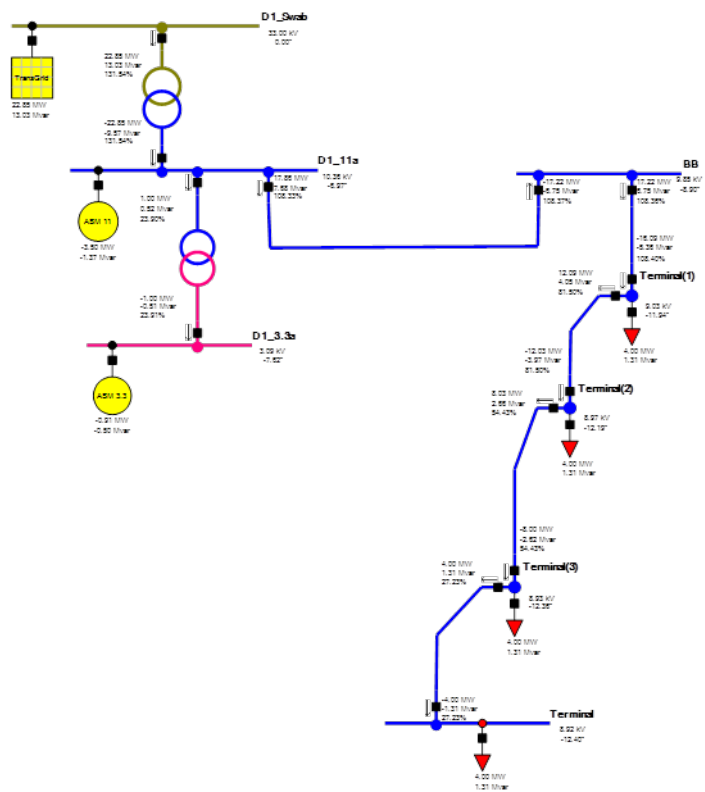
snage, aktivne ili reaktivne, je uvek od pozitivnih ka negativnim vrednostima na vodu ili transformatoru. Za slučaj asinhrona mašine u CASE, znak minus označava da je u pitanju motorni režim rada. U PowerFactory asinhroni motor je označen sa „M“ na samom elementu i nema znaka minus ispred vrednosti za snage. Ovaj model ima 8 čvorova tri naponska nivoa: 1 čvor 35 kV, 7 čvorova 10 kV i 1 čvor 3,3 kV. Balansno-referentni generator je spoljašnji sistem, odnosno element kojim se modeluje uticaj sistema na koji se priključuje model sa slike, i koji je na slici označen sa „TransGrid“. Model sadrži i dva asinhrona motora od kojih je jedan priključen na 10 kV a drugi na 3,3 kV. Na 4 čvora priključena je potrošnja konstantne snage $P+jQ = 4+j1,31$ MW/MVar. Sa slike koje prikazuju tokove snaga i naponske prilike u osnovnom stanju se vidi da je početna radna tačka u oba programa ista. Na primer, vrednost napona na krajnjoj sabirnici koja je označena sa „Terminal“ iznosi 8,92 kV u oba programa, dok je ugao napona u CASE $-12,40^\circ$ a u PowerFactory $-12,42^\circ$. Ukratko, proračunati moduli napona čvora „Terminal“ su isti u oba programa dok je razlika uglova napona je zanemarljiva i iznosi svega $0,02^\circ$.

Na slici 4 su prikazane P-V krive za čvor „Terminal“ koje su dobijene u CASE i u PowerFactory. Vrednosti kolena P-V krive u CASE iznose $P=0,12$ r.j. i $V=0,54$ r.j. U PowerFactory se vrednost aktivne snage daje u MW a vrednost napona u r.j. Sa slike se vidi da je vrednost napona na približno polovini podeoka između 0,5 r.j. i 0,6 r.j. dok je vrednost aktivne snage oko 12 MW. Pošto je bazna snaga sa kojom su rađeni proračuni u CASE 100 MVA, vrednost aktivne snage kolena P-V krive dobijene u CASE je 12 MW. Iz dobijenih rezultata se vidi da programi daju skoro identične rezultate. Razlika u radu programa je u tome što CASE određuje i donji deo P-V karakteristike, dok PowerFactory prestaje da konvergira zaključno sa kolenom karakteristike. Slična je situacija i sa nekim drugim komercijalnim programima poput PowerWorld koji takođe prestaje da konvergira zaključno sa kolenom karakteristike [3]. Matlab EES simulator proračun završava dostizanjem kolena karakteristike, odnosno kritične tačke kako je to nazvano u [4].

a)



b)

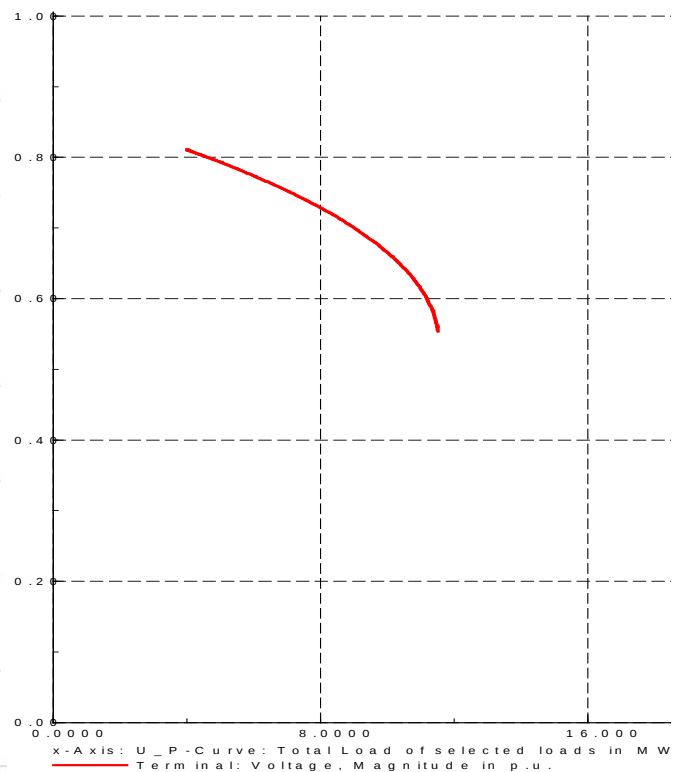


Slika 3. Jednopolne šeme sa rezultatima proračuna tokova snaga i naponskih prilika u osnovnom stanju u a) CASE, b) PowerFactory

a)



b)



Slika 4. P-V krive dobijene u a) CASE i u b) PowerFactory

IV PRORAČUN NAPONSKE STABILNOSTI NA REALNOM PRENOSNOM SISTEMU EES SRBIJE

Rezultati proračuna rađenih u CASE-u korišćenjem realnog modela EES Srbije već su ranije publikovani bilo da se radilo o implementaciji sprežanja CASE-a sa EnergyPlan-om [5] bilo da se radilo o planiranju rada EES Srbije u uslovima velike proizvodnje solarnih elektrana [6]. Tada je modelovan EES Srbije sa delovima susednih sistema od uticaja.

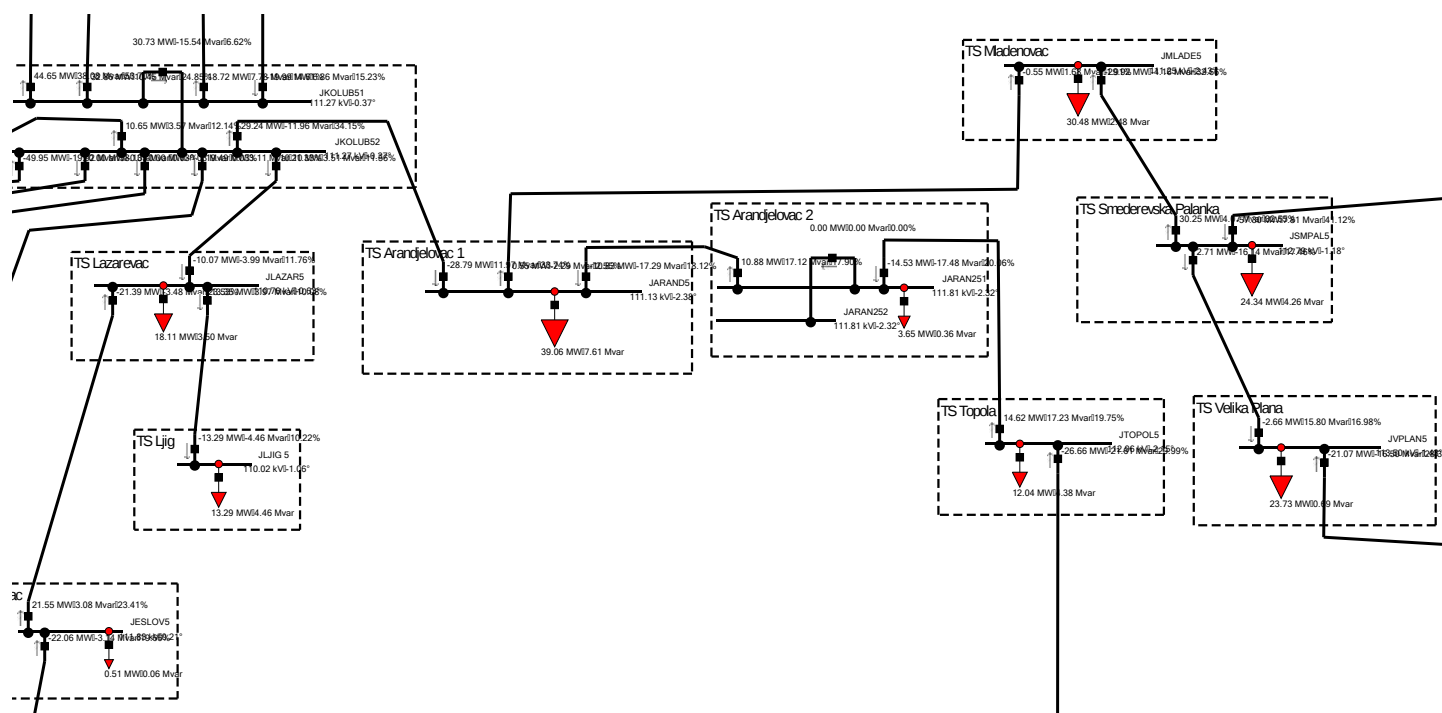
Određivanje P-V krivih za više čvorova istovremeno u prenosnom sistemu Srbije je urađeno na realnom modelu prenosnog sistema Srbije sa oko 523 čvora, 646 vodova, 59 transformatora i 45 generatora. To je model sistema od 13.11.2024. godine u 19:30 u kome je uticaj susednih sistema modelovan kao injektiranja u graničnim, tzv. X čvorovima, osim 400 kV sabirnica Portile De Fier u Rumuniji. Ovakav nivo modelovanja, bez zatvaranja prvih 400 kV i 220 kV prstenova u susednim sistemima, je opravdan imajući u vidu da se analizira mreža 110 kV u centralnoj Srbiji. Ukupan konzum regulacione oblasti Srbije iznosi u ovom modelu iznosi oko 5000 MW, dok je izvoz približno 240 MW. Gubici aktivne snage iznose oko 100 MW što je 2% u odnosu na konzum regulacione oblasti Srbije. Za balansno-referentni generator odabrana je rumunska hidroelektrana (HE) Portile De Fier koja je kratkim interkonektivnim dalekovodom (DV) 400 kV broj 405 vezana sa HE Đerdap 1. Praksa je da balansno-referentni generator uvek bude u velikoj regulacionoj elektrani koja se nalazi električno daleko od analiziranog dela sistema.

Proračuni naponske stabilnosti, odnosno određivanje P-V krivih, nisu rađeni u PowerFactory pošto studentska licenca ima ograničenje do 50 čvorova. Zbog toga su urađeni i prikazani samo rezultati proračuna u CASE. Proračun je rađen za

transformatorske stanice (TS) 110/X kV tzv. centralno-šumadijske transverzale: Lazarevac, Ljig, Aranđelovac 1, Mladenovac, Topola, Velika Plana i Smederevska Palanka. Najveći deo konzuma ovih TS 110/X su domaćinstva. Zbog toga TS Aranđelovac 2 nije stavljen u listu pošto on napaja privredne potrošače u industrijskog zoni Aranđelovca. Analogno tome, ni elektrovučno postrojenje (EVP) Slovac nije stavljen u listu. Jednopolna šema ovog dela 110 kV prenosnog sistema prikazana je na slici 5. Jedina TS 110/X kV koja je radijalno napajana na naponskom nivou 110 kV je TS Ljig. Na slici su prikazani tokovi snaga i naponske prilike u osnovnom stanju. Sa slike se vidi da u osnovnom stanju nema 110 kV sabirnica u ovom delu sistema sa naponom nižim od 110 kV. Najopterećeniji transformatori u modelu su transformatori 220/110 kV u TS Sremska Mitrovica 2 i Kraljevo 3 sa približno 60% svaki, a najopterećeniji DV-i su DV 110 kV Pazova – Indija i DV 110 kV Beograd 3 – Beograd 16 sa oko 82% oba.

Svih 7 prethodno pobrojanih čvorova, odnosno TS, nalaze se direktno ili indirektno priključeni između jakih naponskih čvorišta: i) TS Aranđelovac 1, TS Lazarevac i indirektno TS Ljig preko TS Lazarevac su priključeni na 110 kV razvodno postrojenje Kolubara; ii) TS Smederevska Palanka je priključena na TS 400/220/110 kV Smederevo 3; iii) TS Topola je priključena na TS 400/110 kV Kragujevac 2; iv) TS Velika Plana je preko EVP Markovac priključena na 110 kV postrojenje termoelektrane Morava. Zbog toga, svoje električne povezanosti i prirode konzuma ovih 7 TS su odabrane da budu u grupi u kojoj će se snaga svih njenih TS istovremeno povećavati.

Za elektrane u kojima će se snaga povećavati proporcionalno njihovoj rezervi, kako je to opisano u delu II, odabrane su: HE Đerdap 1, HE Bajina Bašta, RHE Bajina Bašta i HE Bistrica.



Slika 5. Tokovi snaga i naponske prilike centralno-šumadijskog dela prenosne 110 kV mreže

Na slici 6 su prikazane dobijene P-V krive za prethodno pobrojanih 7 čvorova. Snaga potrošnje je kod svih osam čvorova istovremeno povećavana u 840 iteracija, odnosno 840 sukcesivnih slučajeva. Sa slike se vidi da se jedino napon u TS Lazarevac nije spustio ispod 0.15 r.j., dok se u TS Mladenovac spustio na vrednost skoro blisku nuli. TS Arandelovac ima najveću moguću snagu potrošnje od 2.16 r.j., odnosno od 216 MW. To je jednim delom iz razloga što je početna potrošnja ove TS najveća, pa je najveće apsolutno povećanje potrošnje baš u ovom čvoru jer se potrošnja u svakom čvoru uvećava za određeni procenat početne potrošnje. Međutim, ovaj razlog ne mora da bude presudan. Sa slike se vidi da je TS Velika Plana druga TS po redu po veličini maksimalne snage potrošnje iako je njena početna potrošnja manja od početne potrošnje TS Smederevska Palanka i TS Mladenovac.

Veličina maksimalne snage potrošnje nekog čvora zavisi od više faktora:

- umreženosti čvora, odnosno broja vodova kojima je on povezan sa sistemom;
- električne udaljenosti naponski krutih čvorova;
- veličine početne potrošnje čvora;
- veličine i tipa potrošnje električno bliskih čvorova;
- režima rada sistema.

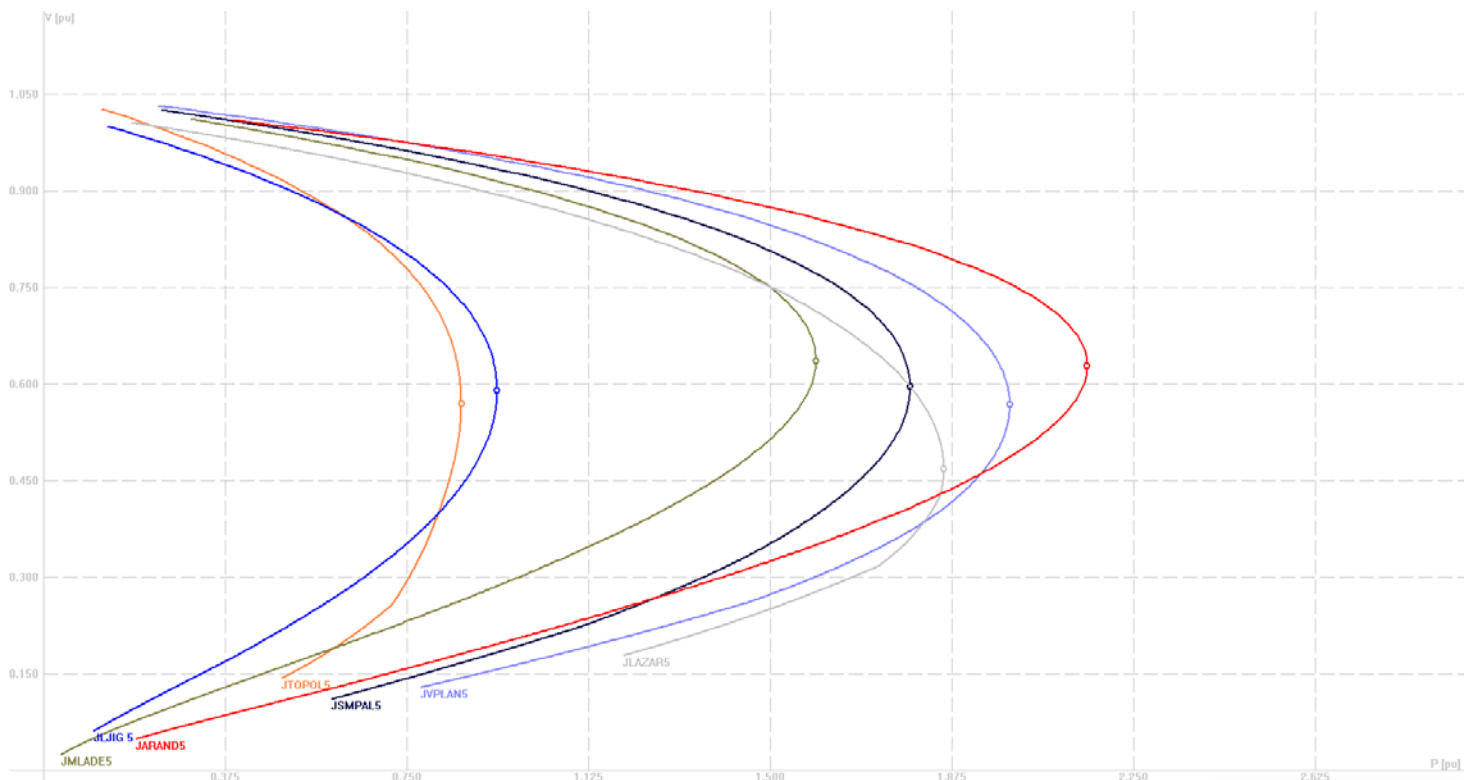
U konkretnom slučaju prikazanom na narednoj slici većina TS svoju maksimalnu potrošnju dostiže za vrednost napona blisku 0.6 r.j. Izuzetak je jedino TS Lazarevac kojoj je napon u kolenu

karakteristike niži od 0.6 r.j., preciznije 0.47 r.j.

Kao što se sa naredne slike može videti, apsolutna vrednost izvoda napona po aktivnoj snazi napona veća je na donjem delu P-V krive nego na gornjem. Drugim rečima, P-V krive imaju veći pad u svom donjem nego u gornjem delu.

Uvek se može postaviti pitanje zbog čega nam je potrebno da odredimo donji deo P-V krive kada znamo da je koleno krive granica stabilnog rada i da u donjem delu P-V krive ne može biti ravnotežna radna tačka. Odgovor na ovo pitanje može se dati slikovito poređenjem gornjeg dela P-V krive sa putem, a donjeg dela sa liticom iznad koje je put izgrađen. Potrebno je da znamo koliko je ta litica opasna, odnosno koliko je strma i duga, iz dva razloga:

- [1] mera zaštite na putu koje se preduzimaju tokom izgradnje puta poput zaštitnih bankina koje sprečavaju da kola skliznu s puta. Ove mere zaštite su analogne merama koje se u EES preduzimaju radi ukrućivanja napona kao što su ugradnja sinhronih kondenzatora, statičkih naponskih regulatora ili automatskih regulatora napona na transformatorima;
- [2] opreza tokom vožnje koji je analogan načinu upravljanja sistemom u smislu isključivanja pojedinih elemenata prenosnog i distributivnog sistema, odnosno vodova i transformatora, tokom remonata ili privremenog prebacivanja napajanja određenog dela potrošnje.



Slika 6. P-V krive određene za 7 čvorova 110 kV istovremeno

Rezultati proračuna kolena P-V krivih prikazani su u tabeli 1. Neophodno je napomenuti da prilikom proračuna P-V krivih i određivanja njihovih kolena u obzir nisu uzimana preopterećenja elemenata mreže, vodova i transformatora, niti narušenja naponskih ograničenja u čvorovima.

Tabela 1. Proračunate maksimalne snage i naponi potrošnje u čvorovima – kolena PV krivih

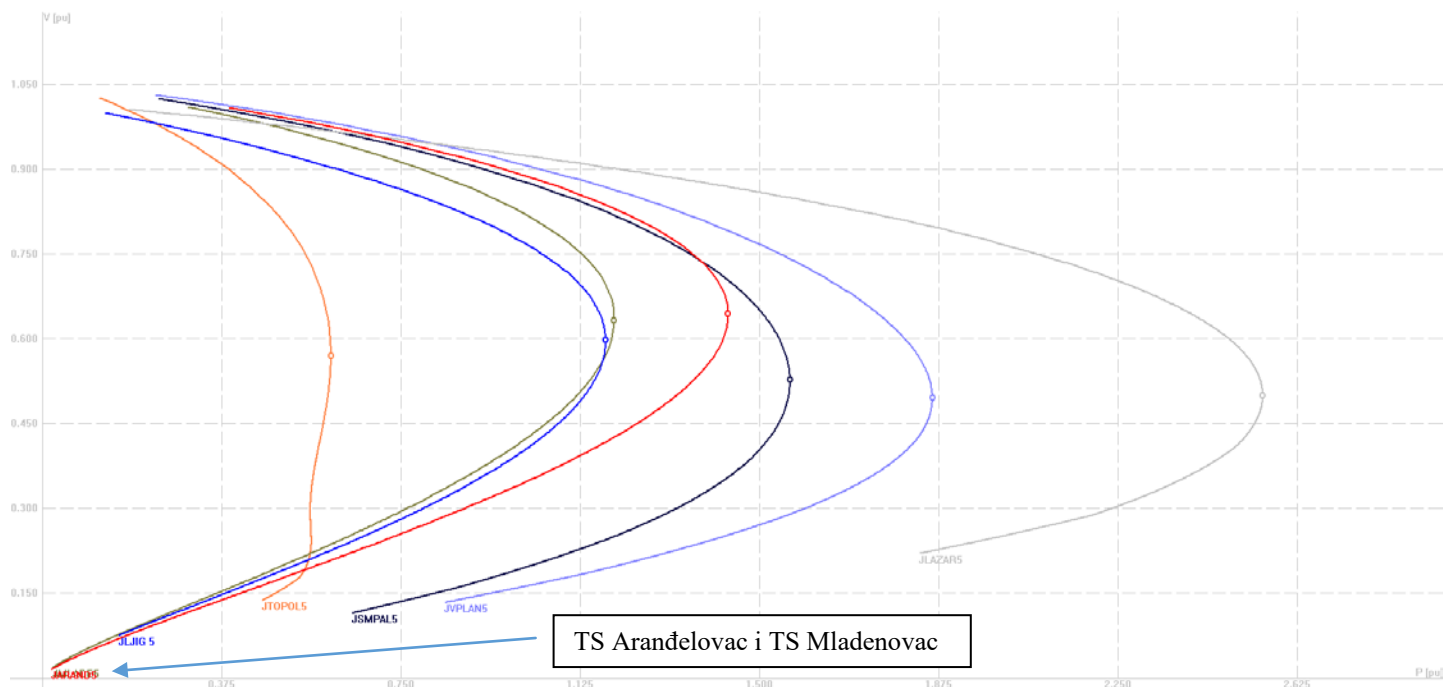
TS	P [r.j.]	V [r.j.]
Arandelovac 1	2,16	0,63
Velika Plana	1,99	0,57
Lazarevac	1,86	0,47
Smederevska Palanka	1,78	0,60
Mladenovac	1,59	0,64
Ljig	0,94	0,59
Topola	0,86	0,57

U nameri da se prikaže uticaj topologije mreže na rezultate proračuna, u TS Arandelovac 1 isključen je DV 110 kV RP Kolubara – TS Arandelovac 1. Na slici 7. prikazani su dobijene P-V krive dok su u narednoj tabeli prikazani su rezultati proračuna kolena P-V krivih za slučaj isključenja ovog DV 110 kV. Proračunata maksimalna snaga potrošnje TS Arandelovac 1 je sada 1,43 r.j., što je 0,73 r.j., odnosno 73 MW,

manje nego u slučaju pre isključenja DV. Smanjenje maksimalne snage potrošnje TS Arandelovac 1 je očekivano s obzirom da je isključen DV 110 kV koji ovu TS spaja sa jakim naponskim čvorom - RP Kolubara. Iz istog razloga su smanjene maksimalne snage potrošnje TS Mladenovac, TS Smederevska Palanka, TS Velika Plana i TS Topola jer su ove TS indirektno na naponskom nivou 110 kV, preko TS Arandelovac 1, bile povezane sa RP Kolubara. Maksimalna snaga potrošnje značajno je povećana u TS Lazarevac, sa 1,86 r.j. na 2,55 r.j., jer se u ovom slučaju snaga potrošnje prenosi sa RP Kolubara samo na TS Lazarevac i TS Ljig kojima se određuje P-V kriva.

Tabela 2. Proračunate maksimalne snage i naponi potrošnje u čvorovima – kolena PV krivih za slučaj isključenja DV RP Kolubara – TS Arandelovac 1

TS	P [r.j.]	V [r.j.]
Arandelovac 1	1,43	0,64
Velika Plana	1,86	0,50
Lazarevac	2,55	0,50
Smederevska Palanka	1,56	0,53
Mladenovac	1,20	0,63
Ljig	1,18	0,60
Topola	0,60	0,57



Slika 7. P-V krive određene za 7 čvorova 110 kV istovremeno kada je DV 110 kV RP Kolubara – TS Arandelovac isključen u TS Arandelovac 1

V ZAKLJUČAK

U radu je razmatrana problematika naponske stabilnosti na male poremećaje. Prikazan je algoritam kontinualnog proračuna tokova snaga i naponskih prilika koji je implementiran u CASE, koji se koristi za određivanje P-V krive, i dat komparativni prikaz rezultata proračuna programa CASE i PowerFactory. Poređenje rezultata proračuna dva programa urađeno na je na

istom, školskom, modelu koji sadrži osam čvorova. Dobijeni rezultati proračuna u oba programa su skoro identični s tim da PowerFactory nema mogućnost određivanja donjeg dela P-V krive.

U drugom delu rada prikazani su rezultati proračuna, odnosno P-V krive, dobijeni na realnom modelu prenosnog sistema Srbije u programu CASE koji sadrži nešto više od 500 čvorova. Ovi

proračuni nisu mogli biti izvedeni u PowerFactory jer studentska licenca, korišćena u ovom radu, ne podržava modele veće od 50 čvorova.

LITERATURA

- [1] Kurbalei F., Abbasi S., Shabani H. R. *Voltage Stability in Electrical Power Systems: Concepts, Assessment, and Methods for Improvement*, IEEE Press, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2023.
- [2] Kundur P. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, USA, 2009.
- [3] Voltage Stability Concepts, <https://www.powerworld.com/files/S06PVCurvesVideo.pdf>
- [4] Anand, U.P., Dharmeshkumar, P. Voltage Stability Assessment Using Continuation Power Flow, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 2, No 8, pp. 4013-4022, 2013.
- [5] Rajaković, N., Ivanović, B., Batas Bjelić, I., Rajić, T. Sprega simulacionog planerskog alata sa alatom za proračun tokova snaga: Studija slučaja Republike Srbije, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 2, pp. 16-21, 2023, <https://doi.org/10.46793/EEE23-2.16R>
- [6] Ivanović, B., Batas Bjelić, I., Rajaković, N., Rajić, T. Planiranje i rad elektroenergetskog sistema u uslovima velike proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 26, No. 3, pp. 43-47, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE23-3.43I>

AUTORI

dr Bojan Ivanović, ODS Elektrodistribucija Srbije, bojan.ivanovic2@es.rs, ORCID [0009-0008-4743-8559](https://orcid.org/0009-0008-4743-8559)
dr Tomislav Rajić, docent, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, rajic@etf.rs, ORCID [0000-0003-4796-4117](https://orcid.org/0000-0003-4796-4117)

Comparative Analysis of CASE and PowerFactory Voltage Stability Modules

Abstract – Small-signal voltage stability calculation is rarely or almost not carried out at all in long term plans and studies of power system development. On of results of this stability calculation is estimation of consumption maximum power at particular node. It is point at which active power at so called P–V curve has a maximum value. This point and entire P–V curve are determined by software using load flow calculation which is carried out for many cases whereby in each subsequent case power consumption of analysed node or group of nodes is increased by a certain value. Comparative analysis of CASE and DIgSILENT PowerFactory modules for small signal voltage analyses is conducted in this paper. Theoretical background of small signal voltage stability is briefly given at the paper beginning. Afterwards, it is presented how voltage stability modules work in both software along with comparative analysis of calculation results using the same, educational, simulation model. CASE calculation results using real model of Serbian transmission system are given at the final chapter of the paper.

Index terms – Voltage stability, P–V Curve, CASE, PowerFactory