

VERIFIKACIJA REZULTATA EMS PRORAČUNA KROZ IZMENU MODELA**VERIFICATION OF EMS FUNCTIONS' RESULTS THROUGH MODEL MODIFICATION**Nemanja Zukorlić, Savo Đukić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je izvršena verifikacija rezultata nekoliko funkcija softvera za upravljanje prenosnim mrežama kroz izmenu modela. Ukratko su opisane najvažnije funkcije softvera za upravljanje prenosnim mrežama. Nakon toga, kroz nekoliko primera izmena modela prenosne mreže, izvršena je analiza rezultata funkcija i dati su osnovni zaključci rada.

Abstract – The paper provides verification of EMS functions' results through network model modifications. The most important EMS functions are briefly described. Through several examples of network model modifications, function results are analyzed and main conclusions are given.

Ključne reči: softver za upravljanje prenosnom mrežom, model prenosne mreže.

1. UVOD

Elektroenergetski sistem se sastoji od skupa generatora, transformatora i vodova koji deluju kao jedinstvena celina a čiji je osnovni zadatak obezbeđenje pouzdanog, kvalitetnog i racionalnog napajanja električnom energijom različitih vrsta potrošača [1]. Elektroenergetski sistem čine četiri podsistema: proizvodnja, prenos, distribucija i neposredna potrošnja. Cilj ova četiri podsistema je da se ostvari najveći mogući promet i profit, što je dovelo do potrebe korišćenja sofisticiranih alata za njihovo upravljanje.

Podsystem prenosa čini prenosna mreža, koja se sastoji pre svega od vodova i transformatora. Prenosnom mrežom se električna energija, proizvedena u elektranama, prenosi do distributivnih mreža [2]. Softver za upravljanje prenosnim mrežama (EMS softver) pomaže preduzeću za prenos električne mreže da što kvalitetnije prenese električnu energiju do potrošačkih područja, uz što manje troškova. Funkcije EMS softvera se koriste u cilju smanjenja gubitaka i operativnih troškova uz dodatno poboljšanje kvaliteta prenosa energije. Osnova svih funkcija je mrežni model koji sadrži podatke o mreži, uključujući i odgovarajuće matematičke prezentacije elemenata i topologiju mreže.

Cilj ovog rada je da se izvrši verifikacija rezultata EMS funkcija kroz izmene mrežnog modela. U drugoj glavi rada opisane su osnovne karakteristike EMS softvera, osnovne funkcije EMS softvera, način njihovog korišćenja i pogodnosti koje se njima dobijaju.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Savo Đukić, doc.

Treća glava sadrži konkretne postavke primera koji će biti razmatrani u radu u svrhu verifikacije rezultata EMS funkcija. U istoj glavi prikazani su rezultati dobijeni korišćenjem EMS softvera i dati odgovarajući komentari. U četvrtoj i petoj glavi rada dati su osnovni zaključci i literatura korišćena prilikom izrade rada, respektivno.

2. EMS SOFTVER

U okviru ove glave opisana je uloga softvera za upravljanje prenosnom mrežom u funkcionisanju modernih prenosnih mreža. Objašnjen je značaj korišćenja EMS softvera, kao i osnovne karakteristike i funkcije EMS softvera.

2.1 Značaj EMS softvera

EMS softver obezbeđuje, operatorima u preduzećima za prenos električne energije, alate za dinamičku vizuelizaciju, monitoring i kontrolu prenosne mreže, zajedno sa širokim setom aplikacija za operativnu analizu, planiranje i optimizaciju. EMS softver može da poveća sigurnost sistema tako što omogućava operatorima da predvide da li će neki nepredviđeni događaj dovesti do problema u prenosnoj mreži, poput preopterećenja opreme, novih ispada, pada frekvencije, niskih napona ili do nestabilnosti sistema. Bilo koja od navedenih situacija može isključiti iz pogona značajan broj elemenata i ostaviti bez napajanja veliki broj potrošača, pri čemu troškovi u vidu izgubljenih prihoda, odštete potrošača i oštećenja opreme mogu biti ekstremno veliki.

EMS softver, preduzećima za prenos električne energije, obezbeđuje pogodnosti kao što su nadzor i kontrola prenosne mreže, pristup izveštajima sa podacima za svaki element i za celu mrežu, pomoć u održavanju prenosne mreže, smanjenje gubitaka električne energije, eliminisanje preopterećenja na vodovima, efikasno iskorišćenje postojeće opreme i odlaganje novih investicija, kao i bolju obuka inženjera i dispečera [3].

Na kraju treba naglasiti da je EMS softver visoko profitabilna i relativno mala investicija u poređenju sa troškovima izgradnje, rekonstrukcije i održavanja prenosne mreže.

2.2 Karakteristike EMS softvera

EMS softver se razvija u kombinaciji sa SCADA sistemom koji se koristi za nadgledanje i kontrolu rasklopne i druge opreme u prenosnim transformatorskim stanicama. Softver koristi kolekcije podataka koji su podeljene u dve kategorije:

- statički, i
- dinamički.

Statičkim podacima opisana je topologija elektroenergetskog sistema. Tipični statički podaci koji opisuju prenosnu mrežu su podaci o vodovima, transformatorima i transformatorskim stanicama. Dinamički podaci su vrednosti koje vraćaju merni uređaji, podaci o položaju prekidača, podaci o položaju regulacione sklopke regulacionih transformatora i slično. Ova kategorija podataka predstavlja stanje elemenata elektroenergetskog sistema u datom trenutku.

EMS softver je izgrađen na konceptu *Smart Grid* rešenja i odgovara na mnoge savremene zahteve potrošača kao što su: integracija i dvosmerna komunikacija sa SCADA-om, praćenje i kontrola mreže u realnom vremenu, automatska restauracija napajanja u slučaju kvarova, smanjenje prosečnog trajanja prekida napajanja sistema, validacija promene topologije mreže, smanjenje gubitaka i troškova rada, fleksibilan pristup bazi podataka i slično.

2.3 Funkcije EMS softvera

Funkcije EMS softvera se koriste u cilju smanjenja gubitaka i operativnih troškova rada prenosne mreže, kao i poboljšanja kvaliteta i kvantiteta snabdevanja potrošača električnom energijom. Neke od najvažnijih funkcija EMS softvera su:

1. Estimacija stanja - funkcija koja na osnovu telemetrijskih podataka u realnom vremenu određuje operativno stanje mreže. Estimacija stanja je jedna od najvažnijih funkcija jer se njeni rezultati koriste kao početna tačka za druge EMS funkcije [4].
2. Tokovi snaga - funkcija koja za datu topologiju i specificiranu proizvodnju i potrošnju određuje stacionarno stanje prenosne mreže. Ova funkcija se koristi u okviru proračuna velikog broja drugih EMS funkcija, ali i za različite vrste analiza i simulacija.
3. Naponska stabilnost - funkcija koja se koristi za procenu naponske sigurnosti prenosne mreže.
4. Optimalni tokovi snaga - funkcija koja proračunava stacionarno stanje prenosne mreže uz optimizaciju tokova snaga na prenosnim vodovima.
5. Analiza ispada - funkcija koja proverava da li je stanje prenosne mreže ostalo u normalnim granicama funkcionisanja prilikom ispada jednog ili više elemenata [5].
6. Optimalna promena topologije - funkcija koja analizira koje izmene u topologiji prenosne mreže mogu dovesti do eliminisanja opasnih pogonskih stanja u mreži i/ili smanjenja gubitaka aktivne snage.
7. Proračun kratkih spojeva - funkcija koja proračunava stacionarno stanje pri kratkom spoju. Rezultati proračuna kratkih spojeva se koriste pri izboru zaštitne, prekidačke i druge opreme u prenosnoj mreži.
8. Provera kapaciteta rasklopne opreme - funkcija koja proverava prekidačka svojstva rasklopnih uređaja za zadatu topologiju i razmatrano stanje mreže sa kratkim spojem.
9. Provera podešenja relejne zaštite - funkcija koja služi za analizu efikasnosti (osetljivosti i selektivnosti) relejne zaštite.
10. Nadgledanje rezervi reaktivnih snaga - funkcija koja nadgleda individualne i ukupne rezerve reaktivne snage u prenosnoj mreži.

3. PRIMERI UTICAJA PROMENE MREŽNOG MODELA NA EMS FUNKCIJE

Zajednički ulazni parametar svih EMS funkcija je mrežni model. Za svaku funkciju, određene izmene u mreži mogu da dovedu do promene njihovih rezultata. U ovom radu, na prenosnoj mreži čije su karakteristike date u tabeli 1, proverene su određene funkcionalnosti kroz izmenu mrežnog modela, korišćenjem EMS softvera.

Tabela 1 - Karakteristike prenosne test mreže

| Karakteristika | Vrednost |
|---------------------------------|----------|
| Broj transformatorskih stanica | 30 |
| Broj generatora | 17 |
| Broj potrošača | 10 |
| Broj vodova | 68 |
| Ukupna dužina vodova [m] | 870 016 |
| Broj čvorova | 119 |
| Broj kondenzatora | 11 |
| Broj statičkih VAR kompenzatora | 2 |
| Broj transformatora | 34 |

Za funkciju tokova snaga obrađen je primer dve paralelne sekcije, istih dužina i kataloških parametara. Pre izmena u modelu, tokovi snaga obe sekcije su približno istih vrednosti, što je prikazano u tabeli 2. Aktivne snage su date u [MW], reaktivne u [MVar], a vrednosti struje u [A].

Tabela 2 - Inicijalne vrednosti tokova snaga dve paralelne sekcije

| Sekcija | Relativno opterećenje | Čvor 1 | | | Čvor 2 | | | Pg | Qg |
|---------|-----------------------|--------|-----|-------|--------|-----|-------|-----|-----|
| | | P | Q | I | P | Q | I | | |
| 1 | 85,6 | 90,9 | 1,4 | 392,2 | 88,4 | 3,8 | 392,1 | 2,5 | 5,2 |
| 2 | 85,7 | 91,0 | 1,4 | 392,5 | 88,5 | 3,8 | 392,4 | 2,5 | 5,2 |

Vrednosti tokova snaga nakon smanjenja vrednosti dužine druge sekcije sa 37780 m na 32000 m, nalaze se u tabeli 3.

Tabela 3 - Vrednosti tokova snaga dve paralelne sekcije nakon smanjenja dužine druge sekcije

| Sekcija | Relativno opterećenje | Čvor 1 | | | Čvor 2 | | | Pg | Qg |
|---------|-----------------------|--------|-----|-------|--------|-----|-------|-----|-----|
| | | P | Q | I | P | Q | I | | |
| 1 | 78,3 | 83,2 | 0,6 | 359,5 | 81,1 | 3,3 | 359,4 | 2,1 | 4,0 |
| 2 | 92,5 | 98,7 | 1,1 | 425,1 | 95,8 | 4,3 | 425,0 | 2,9 | 5,4 |

Kao što se i očekivalo, kako bi se održale ukupne injektirane aktivne i reaktivne snage u čvorovima, opterećenje, aktivna snaga i struja na krajevima druge sekcije se povećavaju, dok se vrednosti istih veličina na krajevima prve sekcije smanjuju.

Kao što se očekivalo, kada dve sekcije rade u paraleli, promena dužine jedne sekcije značajno utiče na raspodelu tokova snaga duž istih.

Za funkciju naponske stabilnosti obrađen je primer uticaja dodavanja sekcije na veličinu rezerve aktivne snage (Prez). Sekcija se dodaje paralelno sekciji koja predstavlja usko grlo mreže sa aspekta naponske stabilnosti (rezerve aktivne snage). Kritičan limit ispod kojeg rezerva aktivne snage u razmatranoj test mreži ne sme da padne je 100 MW. Pre dodavanja paralelne sekcije, rezerva aktivne snage je ispod limita u prevojnoj tački, vidi tabelu 4. Aktivne snage su date u [MW], a vrednosti napona u [%].

Tabela 4 – Inicijalni rezultati funkcije naponske stabilnosti u prevojnoj i kritičnoj tački

| Prevojna tačka sistema | | | Kritična tačka sistema | | |
|------------------------|-------|------|------------------------|-------|-------|
| Napon | Ptok | Prez | Napon | Ptok | Prez |
| 90,5 | 247,8 | 58,5 | 85,9 | 311,1 | 121,8 |

Nakon dodavanja paralelne sekcije sa istim parametrima, opterećenje se raspoređuje na obe sekcije. Rezultati funkcije naponske stabilnosti, nakon dodavanja sekcije dati su u tabeli 5.

Tabela 5 – Rezultati funkcije naponske stabilnosti u prevojnoj i kritičnoj tački nakon dodavanja paralelne sekcije

| Prevojna tačka sistema | | | Kritična tačka sistema | | |
|------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|
| Napon | Ptok | Prez | Napon | Ptok | Prez |
| 88,8 | 486,1 | 302,8 | 87,1 | 525,4 | 342,2 |

Očekivano, tok (Ptok) i rezerva aktivne snage su se povećali i za prevojnu i za kritičnu tačku. Rezerva aktivne snage više nije ispod limita.

Za funkciju optimalnih tokova snaga obrađen je primer izmene krive troškova proizvodnje aktivne snage generatora.

U primeru se razmatra kako smanjenje koeficijenta krive troškova proizvodnje generatora utiče na proračunatu optimalnu vrednost proizvodnje aktivne snage tog generatora. Optimalne vrednosti proizvodnje aktivne snage i odgovarajućih troškova generatora, pre smanjenja koeficijenta, prikazane su u tabeli 6.

Tabela 6 - Optimalne vrednosti proizvodnje i troškova generatora pre izmene koeficijenta krive troškova

| P [MW] | Q [MVar] | Troškovi [\$] |
|--------|----------|---------------|
| 1,7 | -1,3 | 113,12 |

Nakon smanjenja koeficijenta krive troškova generatora, promenile su se i optimalne vrednosti proizvodnje aktivne snage i troškova generatora, vidi sliku 7.

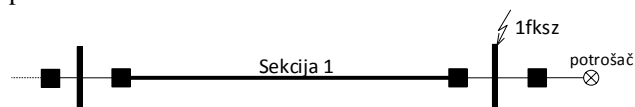
Tabela 7 - Optimalne vrednosti proizvodnje i troškova generatora nakon smanjenja koeficijenta krive troškova

| P [MW] | Q [MVar] | Troškovi [\$] |
|--------|----------|---------------|
| 4,5 | -1,4 | 107,47 |

Kao što je i očekivano, nakon smanjenja koeficijenta odgovarajuće krive troškova, povećava se optimalna vrednost proizvodnje aktivne snage generatora, naravno pod uslovom da prethodno nije dostignuta maksimalna vrednost proizvodnje.

Za funkciju proračuna kratkih spojeva obrađen je primer uticaja promene parametara sekcije na struju kratkog spoja.

Simuliran je jednofazni kratak spoj sa zemljom u fazi L1 na radialno napajanom čvoru prenosne stanice 132, prikazanom na slici 1.



Slika 1 - Deo mreže na kojem se vrši analiza proračuna kratkih spojeva

Vrednosti struje i napona kratkog spoja u razmatranom čvoru, pre izmene parametara sekcije koja napaja predmetnu prenosnu stanicu, prikazane su u tabeli 8.

Tabela 8 - Inicijalne vrednosti struje i napona jednofaznog kratkog spoja sa zemljom

| I [A] | | | V [kV] | | |
|----------|-----|-----|--------|------|------|
| L1 | L2 | L3 | L1 | L2 | L3 |
| 16 944,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 92,0 | 91,1 |

Vrednosti istih veličina, nakon povećanja podužne otpornosti gore pomenute sekcije sa 0,118 Ω /km na 0,3 Ω /km, nalaze se u tabeli 9.

Tabela 9 - Vrednosti struje i napona jednofaznog kratkog spoja sa zemljom nakon povećanja podužne otpornosti sekcije

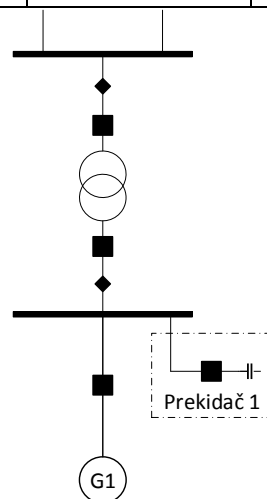
| I [A] | | | V [kV] | | |
|----------|-----|-----|--------|------|------|
| L1 | L2 | L3 | L1 | L2 | L3 |
| 16 814,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 92,8 | 89,7 |

Kao što je i očekivano, povećanjem podužne otpornosti sekcije, raste vrednost impedanse kratkog spoja, pa samim tim struja kratkog spoja opada.

Za funkciju nadgledanja rezerve reaktivnih snaga obrađen je primer dodavanja kondenzatora reaktivne snage 1 MVar u prenosnoj transformatorskoj stanici (slika 2). U tabeli 10 prikazane su vrednosti rezervi po tipu i njihov procentualni udeo u ukupnoj rezervi reaktivne snage u toj transformatorskoj stanici pre gore pomenute izmene mrežnog modela.

Tabela 10 - Vrednosti rezervi reaktivnih snaga pre dodavanja kondenzatora

| Tip rezerve | Rezerva [MVar] | Rezerva [%] |
|--------------|----------------|-------------|
| Rotirajuća | 203,90 | 100,00 |
| Brzo startna | 0,00 | 0,00 |
| Operativna | 203,90 | 100,00 |



Slika 2 - Deo mreže sa novododatim kondenzatorom
Kada je Prekidač 1 zatvoren, kondenzator je povezan na mrežu, čime se oslobađa 1 MVar reaktivne snage na generatoru (1 MVar rotirajuće rezerve). Vrednosti rezervi po tipu i njihov procentualni udeo u ukupnoj rezervi reaktivne snage, za ovaj slučaj, prikazani su u tabeli 11.

Tabela 11 – Vrednosti rezerve reaktivne snage nakon dodavanja kondenzatora (Prekidač 1 zatvoren)

| Tip rezerve | Rezerva [MVar] | Rezerva [%] |
|--------------|----------------|-------------|
| Rotirajuća | 205,00 | 100,00 |
| Brzo startna | 0,00 | 0,00 |
| Operativna | 205,00 | 100,00 |

U slučaju kada je Prekidač 1 otvoren, kondenzator može brzo da se priključi na mrežu, pa predstavlja brzo startnu rezervu. Vrednosti rezervi po tipu i njihov procentualni udeo u ukupnoj rezervi reaktivne snage, za ovaj slučaj, prikazani su u tabeli 12.

Tabela 12 – Vrednosti rezerve reaktivne snage nakon dodavanja kondenzatora (Prekidač 1 otvoren)

| Tip rezerve | Rezerva [MVar] | Rezerva [%] |
|--------------|----------------|-------------|
| Rotirajuća | 203,90 | 99,51 |
| Brzo startna | 1,00 | 0,49 |
| Operativna | 204,90 | 100,00 |

Kao što je očekivano, dodavanjem kondenzatora reaktivne snage 1 MVar u mrežu, rezerva (rotirajuća u slučaju kada je kondenzator povezan na mrežu, odnosno brzo startna u slučaju kada kondenzator nije povezan na mrežu) se povećala za tu vrednost.

4. ZAKLJUČAK

Prenosna mreža, kao jedan od najvažnijih delova elektroenergetskog sistema, mora da obezbedi kontinualan i pouzdan prenos električne energije od proizvodnih jedinica do potrošača. Usled težnje za što kvalitetnijim prenosom električne energije, razvila se potreba za korišćenjem EMS softvera. EMS funkcije imaju za cilj smanjenje gubitaka i operativnih troškova u prenosnoj mreži, uz poboljšanje kvaliteta i kvantiteta snabdevanja potrošača.

Radom je dat predlog verifikacije rezultata EMS funkcija kroz promenu modela prenosne mreže. Kroz nekoliko primera obrađeni su različiti aspekti uticaja izmena mrežnog modela na rezultate funkcija. Na osnovu razmatranih primera može se zaključiti da izmene modela mreže mogu biti efikasan način za proveru kvaliteta rezultata EMS funkcija.

5. LITERATURA

- [1] Duško Bekut, *Relejna zaštita*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009.
- [2] Vladimir Strezoski, *Analiza elektroenergetskih sistema*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2011.
- [3] https://web.stanford.edu/class/archive/ee/ee392n/ee392n.1116/Lectures/EE392n_Lecture5GE.pdf
- [4] A. Monticelli, *State estimation in electric power systems: A generalized approach*, University of Campinas, Unicamp, 1999.
- [5] V. Mishra, M. Khardevnis, *Contingency analysis of power systems*, Electrical, Electronics and Computer Science Conference, Bhopal, 2012.

Kratka biografija:



Nemanja Zukorlić rođen je 1991. godine u Zrenjaninu. Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu upisao je školske 2010/2011, smer energetika, elektronika i telekomunikacije. Na osnovnim studijama diplomirao je 2015. godine, smer elektroenergetski sistemi. Diplomski – master rad iz oblasti Elektrotehnike i računarstva odbranio je 2018. godine.



Savo Đukić rođen je u Novom Sadu 1983. godine. Diplomirao je i doktorirao na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva, smer Elektroenergetski sistemi 2007. i 2014. godine, respektivno.