

**ANALIZA SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA UZ
PRIMENU KOREKTIVNIH AKCIJA****POWER SYSTEMS' SECURITY ANALYSIS AND REMEDIAL
ACTIONS APPLICATION**

Kristina Janošević, Luka Strezoski, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA i RAČUNARSTVO**Kratak sadržaj – U radu su opisane teorijske osnove**

kriterijuma sigurnosti N-1 i korektivnih akcija koje se

primenjuju u operativnom planiranju u elektroenergetskim sistemima. Predstavljen je opis jedne od procedura operativnog planiranja EES-a. Prikazani su rezultati dva primera primene korektivnih akcija nad mrežnim modelima u softverskom alatu Enterprise Transmission Network Analyzer 2.4 (eTNA).

Ključne reči: *Elektroenergetski sistemi, Kriterijum sigurnosti N-1, Korektivne akcije, Operativno planiranje EES-a*

Abstract – In the paper are described the theoretical basis of safety criteria N-1 and remedial actions applied in operational planning in power systems. A description of one of the operational planning procedures is presented. The results of two examples of applying remedial actions to the grid models in the software tool Enterprise Transmission Network Analyzer 2.4 (eTNA) are presented.

Keywords: *Power systems, Security criterion N-1, Remedial actions, operational planning*

1. UVOD

Osnovna tri načela koja važe za svaki elektroenergetski sistem jesu pouzdanost, sigurnost i ekonomičnost. Sigurnost predstavlja sposobnost elektroenergetskog sistema da i dalje ostane u funkciji nakon svakog verovatnog poremećaja koji se može dogoditi, odnosno da se svi potrošači napajaju električnom energijom. Elektroenergetski sistem (EES) istovremeno mora biti funkcionalan tako da zadovoljava pomenuti uslov, ali i ekonomičan, otuda potreba da se nađe kompromis u sigurnosti tipa N-1, gde N označava broj komponenti sistema. Sistem je siguran tipa N-1 ukoliko posle kvara bilo koje, jedne od N komponenti, on i dalje ostane u normalnom pogonu [1]. Elektroenergetske mreže su prvobitno bile projektovane i konstruisane za ostrvski rad (jedna mreža – jedna država), nakon čega su izgrađeni interkonektivni dalekovodi prvenstveno zbog povezivanja EES-a i ostvarivanja, upravo, veće sigurnosti i pouzdanosti kao i lakše regulacije tako povezanog EES-a. Danas

povezani EES-i omogućavaju veliki broj transakcija električne energije koje je teško u svakom trenutku fizički koordinisati i tehnički ispitati. Rad povezanog sistema se zasniva na principu da je svaki operator prenosnog sistema Rad povezanog sistema se zasniva na principu da je svaki operator prenosnog sistema (eng. *Transmission System Operator - TSO*) odgovoran za vlastitu mrežu, tj. svoju regulacionu oblast. Svaka kontrolna oblast i TSO su odgovorni za procedure kojima se obezbeđuje pouzdani rad sa aspekta rada u realnom vremenu, za ispad i havarijske situacije kao i pripremu iste. Kako bi se rizici što bolje procenili i sa njima se na adekvatan način suočili, a samim tim i osigurala efikasnost operativnih odluka i korektivnih akcija zahteva se bilateralna, multilateral ili regionalna koordinacija između TSO-ova. Koordinacija se odvija i putem saradnje između regionalnog koordinatora sigurnosti (eng. *Regional Security Centre - RSC*) i TSO-a gde je cilj obezbeđivanje sigurnosnih poboljšanja svih uključenih strana odgovornih za sigurnost EES-a.

U ovom radu je akcenat na objašnjenju osnovnog zadatka korektivnih akcija za siguran rad prenosnog sistema i da se razmotri kako bi stanje funkcionisalo kada bi se korektivne akcije uspešno primenjivale. Opisan je primer dve korektivne akcije koje su razmatrane u fazi operativnog planiranja u cilju poboljšanja situacije u mreži na spojenom modelu kontinentalne Evrope. Slučajevi koji su analizirani su rešenja preopterećenja na elemente od većeg značaja u mreži EES-a.

Kako bi se obezbedio siguran rad sistema, potrebno je da se obezbedi zaštita u slučaju pojava koje mogu prouzrokovati velike poremećaje u sistemu ili da iniciraju incidente većih razmera. Te pojave su kaskadni ispadi, propadi napona, odstupanje frekvencije od propisane vrednosti i gubitak sinhronizma. Pomenuti kriterijum N-1 primenjuju svi TSO-ovi i kombinuje se sa određenim izborom proizvodnih i prenosnih postrojenja i određivanjem dovoljne rezerve.

2. KRITERIJUM SIGURNOSTI N-1

U ovoj glavi su detaljno obrađeni prethodno pomenuti kriterijum sigurnosti N-1 kao najznačajniji za sprečavanje mogućih poremećaja u mreži. Kako bi se obezbedio siguran rad sistema, potrebno je da se obezbedi zaštita u slučaju pojava koje mogu prouzrokovati velike poremećaje u sistemu ili da iniciraju incidente većih razmera.

2.1 Osnovni pojmovi kod N-1 sigurnosti

Radno stanje unutar regulacione oblasti TSO-a, nakon bilo

NAPOMENA:

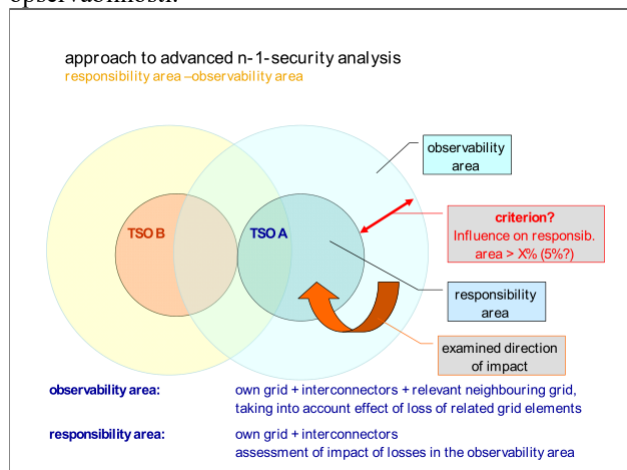
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Luka Strezoski.

kog poremećaja, ne sme izazvati gubitak značajnog dela potrošnje ili nekontrolisane kaskadne ispadne koji se šire i van granica te oblasti ili se pak njihov uticaj oseća u susednim sistemima.

Poremećaj (eng. *Contingency*) predstavlja prekid, odnosno ispad jednog ili više elementa sa mreže koji se ne može unapred predvideti. Planirani ispadi (isključenja) se ne smatraju poremećajem, kao i dugoročni poremećaji koji se svrstavaju u planirane ispadne. U analizi poremećaja (eng. *Contingency Analysis*) poremećaji se na osnovu verovatnoće nastanka dele na normalne (eng. *normal, ordinary*), izuzetne (eng. *exceptional*) i veoma retke (eng. *out-of-range*). Analiza poremećaja obuhvata sve elemente naponskog nivoa 400kV i više, ali se pored ovih razmatraju i elementi nižih naponskih nivoa (220kV, 150kV, 120kV, 110kV) ukoliko je njihov uticaj na siguran rad povezanog sistema značajan.

2.2 Definicija i analiza oblasti opservabilnosti

Definisanje oblasti opservabilnosti, u suštini, predstavlja osnov po kome TSO-ovi zahtevaju i dobijaju merenja određenih veličina u realnom vremenu iz prenosne mreže okolnih TSO-ova, a zatim se ta merenja implementiraju u SCADA sisteme nacionalnih dispečerskih centara. Svaki TSO ima dužnost da proverava uticaj okolnih sistema na svoju regulacionu oblast povremenim analizama. Kao rezultat toga dolaze pojmovi faktor uticaja, „prag“ uticaja poremećaja i lista eksternih poremećaja. Na taj način se obezbeđuju korektne simulacije uticaja prekograničnih ispada na nadležnu oblast. Svi eksterni elementi koji su od uticaja na regulacionu oblast TSO-a sa faktorom opservabilnosti većim od „praga“ opservabilnosti čine eksternu listu opservabilnosti. Oblast opservabilnosti sadrži regulacionu oblast TSO-a kao i eksternu mrežu, tako da je svaki TSO u stanju da konkretno simulira bilo koji poremećaj iz liste eksternih poremećaja tokom provere ispunjenosti kriterijuma sigurnosti N-1. Na slici 2.1 je definisana regulaciona oblast TSO-a i oblast opservabilnosti.



Slika 2.1 Definicija oblasti opservabilnosti [3]

3. KOREKTIVNE AKCIJE

Tokom puštanja N-1 simulacija postoji mogućnost da TSO-ovi detektuju preopterećenja na elementima svoje mreže. Tada je najvažnije rešiti potencijalne opasne situacije po mrežu i to na najefikasniji i najbrži način. U te svrhe se koristi pripremljen i proveren skup korektivnih akcija čiji je cilj da se u potpunosti zadovolji kriterijum

sigurnosti N-1.

3.1 Definicija i osnovne podele

Korektivne akcije (eng. *Remedial actions*) se definišu za dva tipa ograničenja koja se mogu narušiti u mreži: ograničenje usled tokova snaga i naponsko ograničenje.

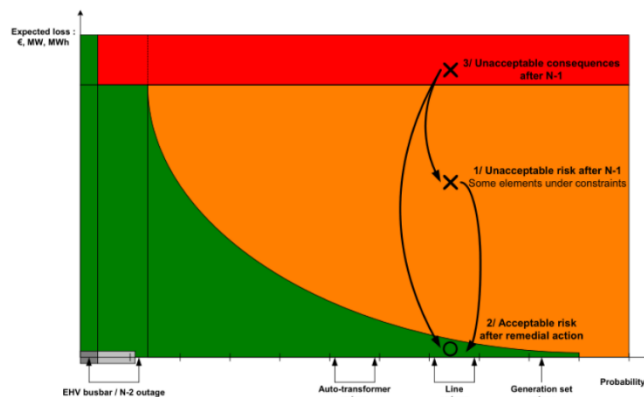
Preventivne akcije (eng. *Preventive remedial actions*) su mere koje se primenjuju pre nastanka poremećaja i imaju za cilj da preduhitre narušenje ograničenja koja usledila, a ne mogu biti ublažena na brz i efikasan način odmah nakon nastanka poremećaja.

Druge su kurativne akcije (eng. *Curative remedial actions*) – mere potrebne za suočavanje i brzo ublažavanje prekograničnih ograničenja, primenjuju se nakon nastanka poremećaja. Primenjene su sa zakašnjenjem postizanja potpune efikasnosti kompatibilne sa privremenim dozvoljenim opterećenjem (eng. *Temporary Admissible Transmission loading - TATL*). S obzirom na troškove koji su potrebni za njihovu aktivaciju dele se na jeftine i skupe.

S obzirom na troškove koji su potrebni za njihovu aktivaciju dele se na jeftine i skupe.

3.2 Primena korektivnih akcija

Kako bi na vreme bio pripremljen, TSO u saradnji sa okolnim TSO-ovima ili sam treba unapred da pripremi moguće korektivne akcije koje bi se u slučaju poremećaja aktivirale. Ovo se obezbeđuje u fazi operativnog planiranja gde pored pripreme treba proveriti efikasnost akcija proračunom N-1 sigurnosti i tokova snaga, a primenjuju se u realnom vremenu. Bilo koje korektivne akcije koje imaju prekogranični uticaj moraju unapred biti dogovorene sa susednim TSO-ovima, takođe, akcije se moraju prilagoditi trenutnom stanju sistema i primeniti u koordinaciji sa okolnim TSO-ovima na koje utiču. Preventivne akcije se definišu i primenjuju pre nastanka poremećaja, dok se kurativne definišu unapred, a primenjuju nakon nastanka poremećaja. Ukoliko kurativne akcije ne postoje za neki tip poremećaja, u tom slučaju se primenjuju preventivne akcije. Na slici 3.1 su prikazane posledice primene korektivnih akcija na krivoj rizika. Vreme za sprovođenje korektivnih akcija je jedan od ključnih faktora, kako bi sistem funkcionisao unutar ograničenja koja su nametnuta tokovima snaga i naponskim prilikama. Regionalna koordinacija ima u ovome veliku ulogu jer se na taj način podstiče kontaktiranje TSO-ova u najkraćem mogućem roku i olakšava se pronalaženje mogućih rešenja problema.



Slika 3.1 Posledice primene korektivnih akcija na krivoj

3.3 Mere koje se primenjuju kao korektivne akcije

Korektivne akcije mogu imati uticaj i na tržište pa se preporučuje da izbor korektivnih akcija bude usmeren tako da se ima najmanji uticaj na tržište. Obično se prvo primenjuju akcije koje se tiču promene topologije mreže. Pri pojavi ograničenja TSO mora prvo da razmatra promene u topologiji sopstvene mreže. Ukoliko se analizom sigurnosti ustanovi da promene u topologiji sopstvene mreže nisu dovoljne za siguran rad sistema, TSO poziva susede kako bi ustanovio kakve su mogućnosti za promenu njihove topologije, a koje će se pozitivno odraziti na ograničenja koja se javljaju u njegovoj mreži. nekim EES-ima u upotrebi su transformatori za promenu ugla (eng. *Phase Shift Transformers*). Predstavljaju posebnu vrstu interkonektivnih transformatora koji služe za upravljanje tokovima snaga po prenosnim i interkonektivnim dalekovodima. Još jedna od mogućih akcija koja se primenjuje je koordinisani redišpečing za ublažavanje internih ograničenja ili onih na granicama. Prioritet je redišpečing domaćih (TSO u kome se primenjuju akcije) proizvodnih jedinica.

4. ANALIZA KOREKTIVNIH AKCIJA

Praktični deo ovog rada je obuhvatio analize tokova snaga i N-1 kriterijum sigurnosti na pojedinim spojenim modelima kontinentalne Evrope.

4.1 Korektivna akcija promena toka po MONITA kabl

Pri analizi sigurnosti N-1 na spojenom modelu kontinentalne Evrope za vremenski horizont dan unapred za datum 18.05.2023. su detektovana preopterećenja interkonektivnog dalekovoda između Crne Gore i Bosne i Hercegovine 220kV Trebinje – HE Perućica pri simuliranom ispadu interkonektivnog dalekovoda 400kV Trebinje – Lastva kao i preopterećenje transformatora prenosnog odnosa 400/220kV u TS Trebinju pri ispadu internog dalekovoda 400kV Trebinje – TE Gacko. Najkritičnija preopterećenja ova dva elementa prognozirana su za 18. maj u jutarnjem satu 06:30. Kritična preopterećenja elemenata se javljaju i za sate 11:30, 18:30 i 21:30. U baznom stanju (N stanje) opterećenje monitorisanih elemenata za najkritičnije vremenske intervale je dato u tabeli 4.1.

Element	Vremenski interval	LOAD [%]
220kV Trebinje – HE Perućica	06:30	60.8
	11:30	44.9
	18:30	54.8
	21:30	57.3
TR 400/220kV Trebinje	06:30	78.8
	11:30	68.9
	18:30	74.5
	21:30	77.9

Tabela 4.1 Opterećenje dalekovoda 220kV Trebinje – HE Perućica i transformatora 400/220kV u Trebinju u Base case stanju

Nakon simulacije ispada dalekovoda 400 kV Trebinje – Lastva, odnosno u razmatranom stanju N-1, pri analizi

sigurnosti vrednosti preopterećenja dalekovoda 220kV Trebinje – HE Perućica su data u tabeli 4.2.

Element	Vremenski interval	LOAD [%]
220kV Trebinje – HE Perućica	06:30	130.7
	11:30	114.3
	18:30	123.4
	21:30	126.8
TR 400/220kV Trebinje	06:30	131.1
	11:30	108.6
	18:30	125.6
	21:30	130.8

Tabela 4.2 Preopterećenje dalekovoda 220kV Trebinje – HE Perućica i transformatora 400/220kV u Trebinju u N-1 stanju

Prema informacijama iz razmena tokova između TSO-ova uočeno je da je tok aktivne snage za sve sate za 18.05. na MONITA kabl (HVDC kabl koji spaja Italiju i Crnu Goru [5]) bio planiran na maksimalnih, 600MW i to tako da je smer planiran ka Italiji.

Nakon dostavljenih rezultata analiza sigurnosti došlo se do zaključka da postoji opasnost od mogućih kaskadnih ispada nakon ovog preopterećenja. Kako bi došlo do rasterećenja dela mreže koji je opterećeniji gde spadaju i razmatrani elementi, predložena je korektivna akcija smanjenja toka aktivne snage po MONITA kabl, ovo je akcija koja zahteva koordinaciju više TSO-a. U ovom slučaju je razmatrano smanjenje aktivne snage na 300MW, odnosno 50% u odnosu na tokove koji su planirani. S obzirom da je ova akcija razmatrana u fazi operativnog planiranja, spada u grupu preventivnih korektivnih akcija. Rezultati ponovljene analize sigurnosti analiziranih elemenata pri simuliranim ispadima koji su identifikovani kao kritični su dati u tabeli 4.3.

Element	Vremenski interval	LOAD [%]
220kV Trebinje – HE Perućica	06:30	114.7
	11:30	95.7
	18:30	106.9
	21:30	110.9
TR 400/220kV Trebinje	06:30	108.3
	11:30	89.8
	18:30	102.2
	21:30	107.1

Tabela 4.3 Preopterećenje dalekovoda 220kV Trebinje – HE Perućica i transformatora 400/220kV u Trebinju u N-1 stanju nakon primene korektivne akcije

Upoređivajući rezultate iz tabela 4.3 i 4.2 po vremenskim intervalima može se primetiti da je za element dalekovod 220kV Trebinje – HE Perućica smanjeno preopterećenje za nekih 15 do 18%, dok je za transformator 400/220kV u Trebinju smanjeno preopterećenje 22-23% nakon modelovane korektivne akcije.

4.2 Korektivna akcija zatvaranje sklopnog uređaja spojnog polja (spajanje sabirnica) u TS 110kV Valjevo 3

Razmatrana je situacija, kao i u prethodnom primeru, u fazi operativnog planiranja, na spojenom mrežnom modelu kontinentalne Evrope za vremenski horizont dan unapred.

Analizirani su rezultati TSO-a Srbije za dan 21.10.2022. godine za sve sate. Jedno od kritičnijih preopterećenja koje je uzeto u razmatranje u ovom radu je element 110kV mreže Valjevo 3 – Valjevo 1. Razmatrane su situacije za dva slučaja: 1) u jednom delu dana (konkretno u ovom primeru samo vremenski interval 09:30) jedan od navedena dva transformatora je bio isključen, dok je spojno polje u uključeno i 2) oba transformatora 220/110 kV su uključena, ali je spojno polje u TS Valjevo 3 na 110kV tada isključeno. Upravo tada se javlja preopterećenje jednog od dalekovoda 110kV Valjevo 3 – Valjevo 1 i to za N-1 stanje sistema, odnosno za simulirani ispad jednog od pomenuta dva transformatora. Cilj korektivne akcije koja je diskutovana u ovom slučaju sa EMS-om je upravo povezivanje sabirnica na 110kV jer bi u tom slučaju bila povezana oba dalekovoda koja su inače u paraleli kao i oba transformatora i došlo bi do bolje raspodele snage. U tabeli 4.4 je prikazano stanje elemenata u baznom stanju. Vremenski interval 09:30 predstavlja slučaj kada je TR 1 220/110kV u Valjevu 3 isključen, a spojno polje u TS Valjevo 3 uključeno, a 12:30 predstavlja obrnut slučaj.

Element	Vremenski interval	LOAD [%]
110kV Valjevo 3 – Valjevo 1	09:30	103.4
	12:30	59.6
TR 2 220/110kV Valjevo 3	09:30	38.8
	12:30	45.4

Tabela 4.4 Opterećenje 110kV Valjevo 3 – Valjevo 1 i transformatora 220/110kV u Valjevu 3 u Base case stanju

Situacija u N-1 stanju koja se prva razmatra je u 09:30 preopterećenje TR 2 220/110kV Valjevo 3 pri simuliranim ispadima dalekovoda u oblasti Beograda, s obzirom da je drugi transformator koji je u paralelnom radu sa njim isključen, ova situacija je relevantna. Najveće preopterećenje je pri ispadu 110kV Beograd 3 – Beograd 16 i iznosi 120% (tabela 4.5).

Ispad elementa	Preopterećen element	Vremenski interval	LOAD [%]
110kV Beograd 3 – Beograd 16	TR 2 220/110kV Valjevo 3	09:30	120.1

Tabela 4.5 Preopterećenje transformatora 220/110kV u Valjevu 3 u N-1 stanju

Drugi slučaj u 12:30, kako je već rečeno spojno polje u TS 110kV Valjevo 3 je isključeno i TR 1 220/110kV je vraćen u pogon, preopterećuje se dalekovod 110kV Valjevo 3 – Valjevo 1 (tabela 4.6). Ovo je logično da se desi pri simulaciji s obzirom da se na istom sistemu sabirnica nalaze ova dva elementa.

Ispad elementa	Preopterećen element	Vremenski interval	LOAD [%]
TR 2 220/110kV Valjevo 3	110kV Valjevo 3 – Valjevo 1	12:30	104.5

Tabela 4.6 Preopterećenje dalekovoda 110kV Valjevo 3 – Valjevo 1 u N-1 stanju

Korektivna akcija koja bi trebala da popravi situaciju preopterećenja navedenog dalekovoda je spajanje sistema sabirnica, odrađena je analiza za 12:30 i utvrđeno da se preopterećenje više ne javlja, tj ispod 90% je.

5. ZAKLJUČAK

Jedan od osnovnih zadataka svakog TSO-a je da obezbedi siguran rad prenosnog sistema. Pojave koje mogu prouzrokovati velike poremećaje su kaskadni ispadi, propadi napona, odstupanje frekvencije od propisane vrednosti i gubitak sinhronizma. Zbog toga je svaki TSO dužan da u svom sistemu ima zadovoljen N-1 kriterijum sigurnosti.

S obzirom da postoji potreba za velikim tranzitom električne energije među susednim ili okolnim TSO-ovima, preopterećenja i zagušenja u mreži su postala sve učestalija pojava. U regionu jugoistočne Evrope korektivne akcije još uvek nisu zaživele na nivou koji je očekivan. Iako je to propisano, retko kada ima planiranja akcija unapred, već se sva zagušenja otklanjaju u realnom vremenu dispečerskim akcijama. Puštanje u pogon kabla između Italije i Crne Gore je bilo značajno za ovaj region ne samo jačanjem elektroenergetskog sistema Zapadnog Balkana već i što je pokrenulo ovu temu.

Generalno, može se reći da u regionu jugoistočne Evrope nije bilo velikih problema i potreba za detaljnijim planiranjem korektivnih akcija, međutim, svedoci smo da se situacija u poslednje vreme menja. Ono na čemu se i dalje mora raditi je pre svega podizanje svesti u regionu jugoistočne Evrope da će uskoro i kod nas biti još većeg udela u proizvodnji iz obnovljivih izvora te da će se menjati i način upravljanja sistemom.

6. LITERATURA

- [1] Osnovni proračuni elektroenergetskih sistema, Tom 1, Vladimir Strezoski, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka
- [3] ENTSO-E Continental Europe Operation Handbook - Policy 3: Operational Security, Final version, 2009.
- [4] ENTSO-E Continental Europe Operation Handbook - Appendix 3: Operational Security, Final version, 2009.
- [5] HVDC LINK CRNA GORA-ITALIJA ISPITIVANJE I PUŠTANJE U POGON, Zbornik radova, Treći dani elektro inženjera, IKCG, 24. - 25. OKTOBAR 2019

Kratka biografija



Kristina Janošević rođena je u Zaječaru 1997. god. Osnovne studije na Fakultetu tehničkih nauka na odelu elektroenergetski sistemi završila je 2020. godine
kontakt: kika.janosevic@gmail.com



dr Luka Strezoski rođen je u Novom Sadu 1990. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2017. god., a od 2020 je izabran za šefa katedre. Oblast interesovanja su elektroenergetski sistemi.