

Optimalno pozicioniranje prigušnica u prenosnoj mreži Bosne i Hercegovine

Jovana Tuševljak¹, Željko Đurišić²

¹“Elektroprenos-Elektroprijenos BiH“ a.d. Banja Luka, Bosna i Hercegovina

²Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

jovana.tusevljak@elprenos.ba, djurisic@etf.rs

Sažetak— Podopterećena prenosna mreža, odnosno vodovi opterećeni ispod prirodne snage, što je česta pojava na 400 kV i 220 kV vodovima u Bosni i Hercegovini ali i susjednim sistemima, značajan su izvor reaktivne snage sa posljedicom povećanja napona iznad maksimalno dozvoljenih vrijednosti, što se u najvećem broju slučajeva ne može uspješno kompenzovati bez dodatnih kompenzacionih uređaja ili rada generatora u potpobudi.

Rad generatora u potpobudi često nije prihvatljiv zbog problema stabilnosti i efekta pregrijavanja dijelova rotorskog gvožđa kod starijih generatora. Otočne prigušnice su elementi koji omogućavaju apsorpciju reaktivnih snaga u elektroenergetskom sistemu i njihovo pozicioniranje može biti optimizovano tako da pružaju najbolji efekat.

U ovom radu analizirane su naponske prilike i tokovi reaktivne snage unutar elektroenergetskog sistema Bosne i Hercegovine, te je dat prijedlog optimalnog pozicioniranja otočnih prigušnica u cilju eliminisanja pojave visokih napona u prenosnoj mreži i postizanja željenog naponskog profila. U analize su uključene i vjetroelektrane čija je izgradnja u toku ili planirana u skorju budućnosti, a koje dodatno mijenjaju tokove snaga u sistemu i mogu bitno uticati na napone u priključnoj mreži.

Ključne riječi— Podopterećena prenosna mreža, otočne prigušnice, naponske prilike, reaktivne snage.

I. UVOD

Jedan od glavnih faktora koji utiču na stabilan rad elektroenergetskog sistema je održavanje napona u dozvoljenim granicama. Naponi iznad dozvoljenih granica nepovoljno utiču na izolacione karakteristike opreme smanjujući vijek trajanja izolacije, a pored dielektričnih naprežanja, povećanje napona može izazvati dodatne gubitke usljed korone, kao i povećane gubitke u gvožđu transformatora. Naponi ispod graničnih vrijednosti povećavaju gubitke uz opasnost od naponskog sloma i prekida napajanja potrošača.

Podopterećena prenosna mreža, odnosno vodovi opterećeni ispod prirodne snage, što je česta pojava na 400 kV i 220 kV vodovima u Bosni i Hercegovini, ali i susjednim elektroenergetskim sistemima, su značajan izvor reaktivne snage sa posljedicom povećanja napona iznad maksimalno dozvoljenih vrijednosti [1]. Ovo povećanje napona se u najvećem broju slučajeva ne može kompenzovati bez dodatnih kompenzacionih uređaja ili rada generatora u potpobudi. U

tabeli I [1] su navedene prirodne snage i proizvodnja reaktivne snage za tipične nadzemne vodove naponskog nivoa 110 kV, 220 kV i 400 kV. Proizvodnja reaktivne snage se odnosi na nominalne naponske uslove kada je vod u praznom hodu.

TABELA I. PRIRODNE SNAGE I PROIZVODNJA REAKTIVNE ENERGIJE ZA TIPIČNE NADZEMNE VODOVE U PRENOSNOJ MREŽI BiH

Naponski nivo [kV]	Tip provodnika i poprečni presjek [mm ² /mm ²]	Maksimalna snaga [MVA]	Prirodna snaga [MW]	Proizvodnja Q [Mvar/km]
110	AlFe 240/40	122	30	0,05
220	AlFe 360/57	300	130	0,14
400	AlFe 2x490/65	1328	550	0,6

Naponsko-reaktivne prilike na prenosnim mrežama uzrokovane su režimima rada generatora, vodovima i kablovima, rotacionim kompenzatorima i savremenim statičkim VAR kompenzatorima. Dok su generatori i kompenzatori regulacioni elementi sa kontinuiranom regulacijom i mogu po potrebi biti izvori i potrošači reaktivne snage, visokonaponski vodovi nisu regulacioni elementi, ali mogu biti značajni proizvođači, odnosno potrošači reaktivne snage, što zavisi samo od njihovog opterećenja. Rad generatora u potpobudi često nije prihvatljiv zbog problema stabilnosti i efekta pregrijavanja dijelova rotorskog gvožđa. Otočne prigušnice su elementi koji omogućavaju apsorpciju reaktivnih snaga u elektroenergetskom sistemu i njihovo pozicioniranje može biti optimizovano tako da pružaju najbolji efekat.

Cilj ovog rada je analiza mogućnosti regulacije napona prenosne mreže Bosne i Hercegovine ugradnjom otočnih kompenzacionih prigušnica i prijedlog njihove optimalne snage i alokacije u prenosnoj mreži. Primjena paralelno priključenih prigušnica već dugi niz godina aktualna je u svim susjednim elektroenergetskim sistemima, koji imaju slabo opterećene dugačke vodove visokog napona.

II. OTOČNE PRIGUŠNICE

Otočne prigušnice su elementi koji omogućavaju apsorpciju reaktivne snage u elektroenergetskom sistemu. Prigušnice se koriste za kompenzaciju/apsorpciju viškova

reaktivne snage u pojedinim čvorištima mreže, pri čemu se održava željeni naponski profil u EES-u. Grade se kao monofazne ili trofazne jedinice, a s obzirom na regulaciju snage, mogu biti prigušnice fiksne snage ili regulacione prigušnice (prigušnice promjenjive snage).

Fiksne prigušnice su pogodnije za konstantna opterećenja i slabo promjenjive uslove u mreži [2]. Promjenjive prigušnice su fleksibilne na promjene u mreži, mogu se prilagoditi zadatom opterećenju i uslovima u mreži.

Na mrežu koju treba kompenzovati priključuju se direktno (na sabirnice visokonaponskih postrojenja preko sklopnih aparata) ili preko tercijera mrežnih transformatora. U periodima visokih opterećenja u EES-u i povećanog prenosa dugačkim visokonaponskim vodovima, prigušnice je najčešće potrebno isključiti s mreže.

III. OPTIMALNO POZICIONIRANJE PRIGUŠNICA U PRENOSNOJ MREŽI BIH

Na simulacionom modelu prenosnog sistema Bosne i Hercegovine analizirane su naponske prilike u 400 kV i 220 kV prenosnoj mreži za realno stanje minimalnog opterećenja sistema, koje predstavlja kritični režim u pogledu visokih napona. Model predstavlja trenutno stanje kompletnog elektroenergetskog sistema BiH za režim ljetnog minimuma. Pored toga, modelovana je i novoizgrađena vjetroelektrana Mesihovina i perspektivna vjetroelektrana Trusina, koje će dodatno promijeniti tokove snaga u sistemu i uticati na napone u okolnoj prenosnoj mreži.

Za režim minimalnog opterećenja EES-a vrijednosti napona na pojedinim sabirnicama 400 kV i 220 kV prevazilaze vrijednosti napona definisane Mrežnim kodeksom, tabela II [3].

TABELA II. OPSEG NAPONA U NORMALNOM POGONU U PRENOSNOJ MREŽI

Nazivni napon [kV]	Naponski opseg	Naponski opseg (j.v.)
400	360-420	0,9-1,05
220	198-245	0,9-1,114
110	99-123	0,9-1,118

Kako bi se smanjile vrijednosti napona u periodima niskog opterećenja, razrađena su različita varijantna rješenja sa prijedlozima lokacija za ugradnju otočnih prigušnica.

Da bi se postiglo značajno poboljšanje napona, prigušnice se trebaju postaviti u one čvorove koji imaju probleme s naponom, [5]. Da bi se identifikovali takvi čvorovi i procijenio stepen problema sa naponom, svaki čvor se može opisati tzv. indeksom napona, koji se definiše na sljedeći način:

$$V_{index\ i} = \begin{cases} 1 - \frac{V_{max} - V_i}{V_{max} - 1}, & V_i > 1 \\ 1 - \frac{V_i - V_{min}}{1 - V_{min}}, & V_i \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

gdje je:

V_{max} - maksimalni dozvoljeni napon mreže, definisan u tabeli II,

V_{min} - minimalni dozvoljeni napon mreže, definisan u tabeli II,

V_i - napon čvora i .

Pomoću indeksa napona može se procijeniti ozbiljnost narušenosti naponskih granica svakog čvora. Kada napon čvora više odstupa od dozvoljenog opsega, indeks napona tog čvora je veći, i za probleme podnapona i prenapona. Kada vrijednost napona čvora prevaziđe dozvoljenu vrijednost, indeks napona će dati rezultat veći od 1.

Na osnovu ove analize, proračunati su indeksi napona svih čvorova prenosne mreže 400 kV i 220 kV za bazni kritični slučaj minimalnog opterećenja mreže. Pretpostavljeno je da u ljetnom režimu date vjetroelektrane proizvode 30% instalisane snage. Generatori u termoelektranama Tuzla, Ugljevik i Kakanj i hidroelektranama Višegrad, Bočac, Jablanica, Jajce u okviru proračuna rade u induktivnom režimu da bi dostigli zadati napon na pragu prenosa.

Najkritičniji rezultati, odnosno čvorovi sa najvećim indeksom napona su prikazani u tabeli III.

TABELA III. ČVOROVİ SA NAJVEĆİM INDEKSİM NAPONA ZA REALNO STANJE MINIMALNOG OPTEREĆENJA SISTEMA

Čvor	Maksimalni dozvoljeni napon [kV]	Napon čvora [kV]	Indeks napona prema izrazu (1)
TS Banja Luka 6	420	430,32	1,024
TS Sarajevo 20	420	429,51	1,023
RP Trebinje	420	431,86	1,028
TS Ugljevik	420	428,4	1,02
TS Sarajevo 10	420	429,48	1,022
HE Višegrad	420	426,29	1,015
TS Gacko	420	427,1	1,016
RP Stanari	420	428,92	1,021
TS Višegrad	420	426,4	1,015
TS Tuzla 4	420	427,88	1,019
TS Mostar 4	420	428,58	1,020
TS Sarajevo 20	245	247,22	1,009
TS Višegrad	245	245,3	1,001

Na osnovu prikazanih naponskih prilika u tabeli III, može se zaključiti da su zbog visokih napona ugrožene skoro sve TS u sjevernom (TS Tuzla, TS Banja Luka 6), središnjem (TS Sarajevo 10 i TS Sarajevo 20) i južnom (TS Mostar 4, TS Trebinje) dijelu prenosne mreže BiH. To znači da problem visokih napona nije usko lokalizovan i uzrokovan generisanjem reaktivne snage jednog slabo opterećenog voda 400 kV, već je proširen po čitavom EES-u, pa i rješenje tog problema treba tražiti na sistemskom, a ne na lokalnom nivou, [4]. Analizirajući pojedinačne naponske nivoe moguće je primijetiti da su najugroženija čvorišta 400 kV mreže, zatim slijede čvorišta 220 kV mreže. To upućuje na osnovni uzrok problema, odnosno slabo opterećene 400 kV vodove koji generišu visoke iznose reaktivne snage.

Pozicioniranje otočnih prigušnica u mreži potrebno je optimizovati kako bi pružale najbolji efekat. Na osnovu prikazanih čvorova sa najvećim indeksima napona iz tabele III, odabaran je pet najugroženijih čvorova 400 kV, koji predstavljaju potencijalne lokacije za ugradnju prigušnica, uzimajući u obzir i njihov geografski raspored: TS Banja Luka 6, RP Stanari, TS Tuzla 4, TS Sarajevo 20 i TS Mostar 4. Nakon što su odabrane potencijalne lokacije za ugradnju prigušnica, razrađena su varijantna rješenja sa različitim kombinacijama snaga prigušnica i lokacija njihove ugradnje, a potom je svako varijantno rješenje analizirano u programskom paketu PSS-E. Analiza i odabir najpogodnije varijante su izvršeni prema kriterijumu najvećeg faktora rasterećenja napona, pri čemu mora biti zadovoljen uslov da naponi u svim čvorovima budu ispod maksimalno dozvoljenih gornjih granica propisanih Mrežnim kodeksom, tabela II.

Faktor rasterećenja napona predstavlja srednje relativno sniženje napona u odnosu na bazni slučaj i definiše se kao:

$$FR = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_{iB}) / V_n}{n} \cdot 100, \quad (2)$$

gdje je:

V_i – napon čvora i za određenu varijantu ugradnje prigušnice,

V_{iB} – napon čvora i u baznom slučaju minimalnog opterećenja mreže,

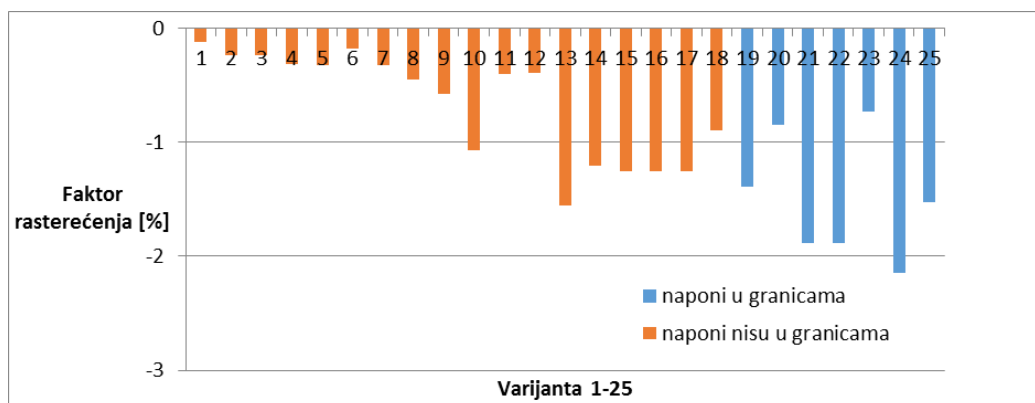
V_n – nominalni napon čvora,

n – ukupan broj čvorova za koje naponi u baznom slučaju minimalnog opterećenja u mreži prevazilaze granice definisane Mrežnim kodeksom.

Prikaz različitih analiziranih varijantnih rješenja je dat u tabeli IV i na sl. 1.

TABELA IV. VARIJANTNA RJEŠENJA UGRADNJE PRIGUŠNICA I ODGOVARAJUĆI FAKTORI RASTEREĆENJA NAPONA

Varijanta broj	Qinst [Mvar]	Lokacija TS	Faktor rasterećenja napona [%]
1	20	Banja Luka 6	0,122
2	20	Banja Luka 6 i Sarajevo 20	0,232
3	20	Banja Luka 6, Sarajevo 20 i Trebinje,	0,232
4	20	Banja Luka 6, Sarajevo 20, Trebinje i Tuzla 4	0,315
5	50	Banja Luka 6	0,320
6	50	Banja Luka 6 i Sarajevo 20	0,180
7	50	Banja Luka 6, Sarajevo 20 i Trebinje	0,326
8	50	Banja Luka 6, Sarajevo 20, Trebinje i Tuzla 4	0,446
9	50	svih 5 kritičnih čvorova	0,574
10	60	svih 5 kritičnih čvorova	1,067
11	80	Sarajevo i Trebinje	0,404
12	80	Mostar i Tuzla	0,387
13	80	svih 5 kritičnih čvorova	1,558
14	100	Banja Luka 6 i Mostar 4	1,204
15	100	Banja Luka 6 i Trebinje	1,249
16	100	Banja Luka 6, Mostar i Tuzla 4	1,258
17	100	Banja Luka 6 i Sarajevo 20	1,258
18	100	Banja Luka 6 i Tuzla 4	0,891
19	150	Banja Luka 6 i Mostar 4	1,385
20	150	Sarajevo 20 i Mostar 4	0,850
21	150	Sarajevo 20 i Tuzla 4	1,888
22	150	Banja Luka 6 i Trebinje	1,888
23	150	Mostar 4 i Tuzla 4	0,728
24	150	Banja Luka 6 i Sarajevo 20	2,148
25	150	Banja Luka 6 i Tuzla 4	1,523



Sl. 1. Faktori rasterećenja za različita varijantna rješenja (25) ugradnje prigušnica, opisana u tabeli IV

Na osnovu prikazanih rezultata, vidi se da za analizirane varijante ugradnje prigušnica 1-18 naponi u 400 kV i 220 kV prenosnoj mreži nisu unutar dozvoljenih granica definisanih Mrežnim kodeksom. Može se zaključiti da je prema kriterijumu maksimalnog ukupnog rasterećenja napona na svim unaprijed definisanim kritičnim čvorovima, optimalno rješenje ugradnja dvije prigušnice od po 150 Mvar, prve u TS Banja Luka 6 i druge u TS Sarajevo 20. U ovom slučaju je ukupno relativno smanjenje napona u odnosu na bazni slučaj 2,148%, a pri tome su svi naponi u 400 kV i 220 kV prenosnoj mreži ispod gornje granice definisane Mrežnim kodeksom.

Naponi u kritičnim čvorovima za bazni slučaj minimalnog opterećenja sistema i nakon ugradnje dvije prigušnice po 150 Mvar u TS Banja Luka 6 i TS Sarajevo 20 su prikazani u tabeli V.

TABELA V. NAPONI NA KRITIČNIM ČVOROVIMA PRIJE I NAKON UGRADNJE PRIGUŠNICE 150 MVAR U TS BANJA LUKA 6 I TS SARAJEVO 20

Čvor	Napon čvora [kV] za bazni slučaj minimalnog opterećenja u sistemu	Napon čvora [kV] nakon ugradnje prigušnice 150 Mvar u TS Banja Luka 6 i TS Sarajevo 20
TS Banja Luka 6	430,32	413,8
TS Sarajevo 20	429,51	415,72
RP Trebinje	431,86	419,19
TS Ugljevik	428,4	419,22
TS Sarajevo 10	429,48	418,56
HE Višegrad	426,29	419,6
TS Gacko	427,1	419,7
RP Stanari	428,92	417,89
TS Visegrad	426,4	418,61
TS Tuzla 4	427,88	419,08
TS Mostar 4	428,58	418,02
TS Sarajevo 20	247,22	240,9
TS Višegrad	245,3	242,91

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu su analizirane naponske prilike u prenosnoj mreži Bosne i Hercegovine za režim minimalnog opterećenja, koji je kritičan sa aspekta napona. Analizirano je trenutno stanje sa modelovanim vjetroelektranama Trusina i Mesihovina. U baznom slučaju prenosne mreže bez ojačanja za režim ljetnog minimuma naponi u većini čvorišta 400 kV mreže su povišeni.

Na osnovu analize naponskih prilika u baznom slučaju i proračunatog indeksa napona za kritične tačke u mreži, kreirana su varijantna rješenja za regulaciju napona kompenzacijom reaktivne snage pomoću jedne ili više prigušnica. Za analiziranih 25 varijanti određen je faktor rasterećenja napona prema kriterijumu ukupnog relativnog sniženja napona u odnosu na bazni slučaj, uz uslov da naponi u svim čvorovima budu ispod maksimalno dozvoljenih vrijednosti propisanih Mrežnim kodeksom za odgovarajući naponski nivo. Ovaj kriterijum izdvaja varijantu za ugradnju prigušnica kapaciteta 150 Mvar-a u TS Banja Luka 6 i u TS Sarajevo, pri čemu je ukupno relativno smanjenje napona u odnosu na bazni slučaj 2,148%.

Treba napomenuti da je analiziran samo kritični režim minimalnog opterećenja, te da je svakako potrebno analizirati tipično trajanje ovakvih i drugih kritičnih naponskih prilika na godišnjem nivou i na osnovu toga odrediti optimalne lokacije i kapacitet kompenzacionih prigušnica.

Kako se sezonske varijacije bitno odražavaju na prilike u mreži stvarajući značajne razlike između režima maksimalnog i minimalnog opterećenja, preporučuje se ugradnja regulacionih prigušnica, koje se mogu prilagoditi uslovima opterećenja, jer je jasno da ovakve naponske prilike zavise od opterećenja u mreži i nisu konzistentne tokom godine.

Vjetroelektrane čija se proizvodnja mora prihvatiti kada je dostupna zbog feed-in tarife se smatraju otežavajućim faktorom, ali je potrebno razmotriti njihovo učešće u regulaciji napona gdje mogu ponuditi usluge kompenzacije radom u kapacitivnom režimu.

Kako je jedan od glavnih faktora koji utiču na stabilan rad elektroenergetskog sistema održavanje napona u dozvoljenim granicama, ugradnja prigušnica itekako utiče na poboljšanje efikasnosti prenosne mreže i kvalitet napona u pojedinim njenim čvorištima, u toj mjeri da su svi naponi u granicama definisanim Mrežnim kodeksom. Osim ugrožavanja opreme, previsoki naponi generalno mogu dovesti do povećanja gubitaka u 400 kV mreži usljed pojave opšte korone, takođe i povećanih gubitaka u gvožđu interkonektivnih transformatora.

Investicija u mehanički uklopive prigušnice na dvije predložene lokacije se procjenjuje na oko 7 miliona KM. Preliminarna ekonomska analiza ukazuje na ekonomsku opravdanost u početnom periodu ugradnje mehanički ukloplivih prigušnica, ali uz smanjenu dobit od ugradnje u budućnosti zavisno o ostvarenju ostalih uticajnih faktora, kao što su: mogućnost i motivacija rada generatora u kapacitivnom području, izgradnja novih termoblokova i njihov priključak na 400 kV mrežu, ugradnja prigušnice u EES RH, porast opterećenja konzuma u BiH, te povećanje tranzita 400 kV mrežom prvenstveno kao posljedica HVDC veze Crna Gora – Italija. Ostvarenje bilo kojeg od tih faktora smanjilo bi profitabilnost izgradnje kompenzacijskog postrojenja u BiH.

LITERATURA

- [1] Nezavisni operator sistema, Identifikacija nedozvoljenih napona na prenosnoj mreži BiH, Sarajevo, oktobar 2010,
- [2] Siemens AG, Variable Shunt Reactors, 2018,
- [3] Nezavisni operator sistema, Mrežni kodeks, januar 2019,
- [4] Energetski institut Hrvoje Požar, Tehnoekonomski aspekti regulacije napona kao pomocne (sistemske) usluge – identifikacija i sanacija nedozvoljenih napona na prenosnoj mreži BiH, Zagreb, maj 2012,
- [5] Muhammad Nurdin, Fathin Saifur Rahman, Rizky Rahmani, Nanang Hariyanto, Placement of Shunt VAR Compensator Based on Sensitivity Analysis, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Volume 6, Jun 2014.

ABSTRACT

Underloaded transmission network (lines loaded below the natural power, which often occurs on 400 kV and 220 kV lines in Bosnia and Herzegovina and adjacent systems) is a

significant source of reactive power with a consequence of increasing the voltage above the maximum permissible values. In most cases, this cannot be successfully compensated without additional compensating devices or with the underexcited generators.

The underexcited regime of generators is often unacceptable due to the stability problems and the effect of overheating rotor parts in older generators. Shunt reactors are elements that enable absorption of reactive power in the power system and their positioning can be optimized to provide the best effect.

This paper analyzes voltage conditions and reactive power flows within Bosnia and Herzegovina's power system and provides a proposal for optimum positioning of shunt reactors

in order to eliminate high voltage phenomena in the transmission network and to achieve the desired voltage profile. The analysis includes wind farms which are under construction or perspective wind farms, which additionally modify the power flows in the system and can significantly affect the voltages in the connection network.

OPTIMAL POSITIONING OF SHUNT REACTORS IN TRANSMISSION NETWORK OF BOSNIA AND HERZEGOVINA

Jovana Tuševljak, Željko Đurišić