

# Metodologija za kompenzaciju reaktivne snage dugih slabo opterećenih visokonaponskih dalekovoda

Dragan Đorđević, Nikola Šušnica, Nikola Sučević, Nada Vrcelj, Miloš Anđelković, Saša Minić

Centar za elektroenergetske sisteme

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija

[dragan.djordjevic@ieent.org](mailto:dragan.djordjevic@ieent.org)

*Sažetak* — U ovom radu prikazana je metodologija za kompenzaciju reaktivne snage visokonaponskih dalekovoda, generisane u parazitnim kapacitivnostima dalekovoda. Dat je prikaz uobičajenih rešenja kompenzacije reaktivne snage visokonaponskih dalekovoda. Način za odabir odgovarajuće opreme za kompenzaciju predstavljen je kroz niz koraka, uzimajući u obzir željene karakteristike opreme i uobičajene tehničke zahteve sa gledišta sigurnosti prenosnog sistema.

*Ključne riječi* – kompenzacija reaktivne snage; metodologija; dalekovod; visokonaponska prigušnica; linijska prigušnica; sabirnička prigušnica, prigušnica varijabilne snage

## I. UVOD

Visokonaponski dalekovodi koji su opterećeni značajno ispod prirodne snage prenosa, predstavljaju značajan izvor kapacitivne reaktivne snage, usled parazitnih kapacitivnosti između faznih provodnika i faznih provodnika prema zemlji. Poznato je da kapacitivna reaktivna snaga dalekovoda raste linearno sa povećanjem dužine dalekovoda, kao i sa kvadratom nominalnog naponskog nivoa, odnosno primenjenog napona. U slučaju dalekovoda koji povezuju geografski udaljene tačke prenosnog sistema, kao i u slučaju interkonektivnih dalekovoda, generisana reaktivna snaga pri slabom opterećenju dalekovoda može da bude toliko velika, da ne samo da nije moguće održati napone u propisanim naponskim granicama, već dolazi do nemogućnosti stabilnog rada sistema ispod određenog nivoa opterećenja. Pored toga, ukoliko se u blizini takvih dalekovoda nalaze generatorske jedinice, opisana situacija može da dovede do samopobuđivanja generatora i nekontrolisanog ubrzanog rasta napona, koji može dovesti do oštećenja izolacije generatora, obližnjih elemenata, pa i samog dalekovoda koji uzrokuje problem. Takođe, puštanje u rad ovakvog jednog dalekovoda predstavlja još veći problem, budući da se pored velike generisane reaktivne snage javlja i Ferantijev efekat na otvorenom kraju dalekovoda.

Kao rešenje opisanih problema koriste se uređaji koji imaju suprotan efekat u odnosu na parazitne kapacitivnosti dalekovoda, odnosno visokonaponske otočne prigušnice (reaktori). Kako su prigušnice su po svojoj prirodi induktivni potrošači, koji konzumiraju reaktivnu snagu, pogodnim odabirom snage prigušnice postiže se efekat "upijanja" viška reaktivne snage generisane u dalekovodu.

## II. PREGLED VRSTA PRIGUŠNICA I NAČINA ZA NJIHOVO PRIKLJUČENJE

Visokonaponske prigušnice se mogu razvrstati prema:

- konstrukciji
  - broj faza
    - monofazne prigušnice
    - trofazne prigušnice
  - vrsta jezgra
    - vazdušno jezgro
    - feromagnetno jezgro
- mogućnosti promene snage
  - nepromenljive (fiksne) prigušnice
    - bez pridruženog prekidača
    - sa pridruženim prekidačem
  - varijabilne prigušnice
    - promena snage u beznaponskom stanju
    - promena snage pod opterećenjem
- načinu priključenja na mrežu
  - linijske prigušnice
  - sabirničke prigušnice
  - prigušnice priključene na tercijar tronamotajnog transformatora
  - prigušnice priključene u neutralnu tačku.

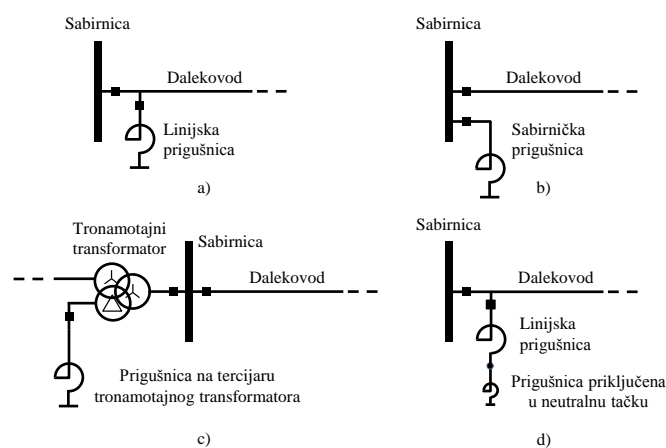
Visokonaponske prigušnice po konstrukciji mogu da budu monofazne ili trofazne jedinice. Kod mreža ekstra visokih napona ( $\geq 500$  kV), zbog povećanja pouzdanosti pogona obično se upotrebljava trofazna sprega monofaznih jedinica, sa četvrtom jedinicom u rezervi. Takođe, konstrukciono prigušnice mogu da budu sa vazdušnim jezgrom i sa feromagnetnim jezgrom. Prigušnice sa vazdušnim jezgrom su se primenjivale po pravilu na srednjenaponskim nivoima, dok se na visokom naponu koriste isključivo prigušnice sa feromagnetnim jezgrom. Zbog izraženog rasipanja elektromagnetnog polja u postrojenju, prigušnice sa vazdušnim jezgrom se u novije vreme zamenjuju prigušnicama sa feromagnetnim jezgrom i na nivou srednjeg napona.

U pogledu mogućnosti za promenu snage, prigušnice se dele na prigušnice nepromenljive snage (fiksne prigušnice) i prigušnice koje imaju mogućnost promene snage (varijabilne prigušnice). Fiksne prigušnice predstavljaju najjednostavniju, a samim tim i najekonomičniju vrstu prigušnica koja se koristi u

praksi. Tipična primena je u tačkama sistema u kojima je potreba za kompenzacijom trajna. Ova vrsta prigušnica se može naći u pogonu sa i bez pridruženog prekidača. Naravno, u oba slučaja rastavljač je prisutan. Ukoliko se uspostave sezonski pogonski uslovi koji ne zahtevaju upotrebu prigušnice, ona se može isključiti uz pomoć pridruženog prekidača.

Sa druge strane, varijabilne prigušnice imaju mogućnost promene snage sa promenom broja aktivnih navojaka. Ovo je moguće postići uz pomoć sklopke za promenu broja navojaka, koja može biti predviđena za rad pod opterećenjem (OLTC-*On-Load Tap Changer*) ili samo za rad u beznaponskom stanju. Varijabilne prigušnice koje mogu da vrše promenu snage pod opterećenjem su veoma korisne, budući da omogućavaju fino podešavanje snage i na taj način kvalitetno upravljanje naponskim prilikama.

Što se tiče načina, odnosno lokacije priključenja visokonaponske prigušnice, razlikuju se pristupi koji su prikazani šematski na Slika 1.



Slika 1. Podela visokonaponskih prigušnica prema lokaciji i načinu priključenja na mrežu: a) linijska prigušnica; b) sabirnička prigušnica; c) prigušnica priključena na tercijar tronomotajnog transformatora; d) prigušnica priključena u neutralnu tačku linijske prigušnice

Na Slika 1a) prikazano je priključenje prigušnice na sam dalekovod, pri njegovom terminalnom priključku na sabirnicu. Ovako priključena prigušnica se naziva linijska prigušnica, od engleskog naziva *Line Reactor*. Ova konfiguracija ima prednosti u tome što direktno kompenzira dalekovod i pri puštanju u rad održava napon na otvorenom kraju dalekovoda u okviru dozvoljenih vrednosti. U praksi se može sresti sa i bez pridruženog prekidača. Na Slika 1b) prikazana je konfiguracija koja podrazumeva priključenje prigušnice direktno na sabirnicu visokog napona. Ova konfiguracija omogućava kompenzaciju više vodova koji se stiču u posmatranoj sabirnici. Po pravilu, prigušnica se na sabirnicu priključuje uvek sa pridruženim prekidačem. Na Slika 1c) prikazana je konfiguracija gde se prigušnica priključuje na tercijar tronomotajnog transformatora. Ovaj način se često koristio u prošlosti jer je omogućavao korišćenje prigušnica za srednji napon. U novije vreme ovo rešenje se polako napušta, budući da uzrokuje smanjenje pouzdanosti transformatora. Na posletku, Slika 1d) prikazuje priključenje prigušnice u neutralnu tačku linijske reaktora.

Ova konfiguracija se upotrebljava tamo gde se koristi jednofazno automatsko ponovno uključivanje dugih dalekovoda, sa ciljem da se spreči pojava sekundarnog luka.

U praksi nije retkost da se za kompenzaciju jednog dalekovoda istovremeno koristi više rešenja prikazanih na Slika 1. U nastavku je izložen metodološki pristup kompenzacije generisane reaktivne snage dalekovoda pomoću adekvatnog odabira visokonaponskih prigušnica i njihove optimalne konfiguracije.

### III. METODOLOGIJA

Metodologija za kompenzaciju reaktivne snage dalekovoda treba da pruži odgovore na pitanja koliko prigušnica, koje snage, koje vrste i na kojim lokacijama treba ugraditi da bi se osigurao rad prenosnog sistema u tehnički prihvatljivim granicama. Prema tome, polazi se od opšteg pristupa, koji je šematski prikazan pomoću algoritma na Slika 2 i Slika 3. Na početku je pretpostavljena potreba za linijskim i sabirničkim prigušnicama, dok dalji tok algoritma rezultuje odabirom adekvatne kompenzacije.

Algoritam za kompenzaciju reaktivne snage dalekovoda, koji je prikazan na Slika 2 i Slika 3 je sačinjen iz nekoliko celina. Te celine su priprema modela prenosne mreže, procena potrebe i izbor linijskih prigušnica i naposljetku izbor sabirničkih prigušnica.

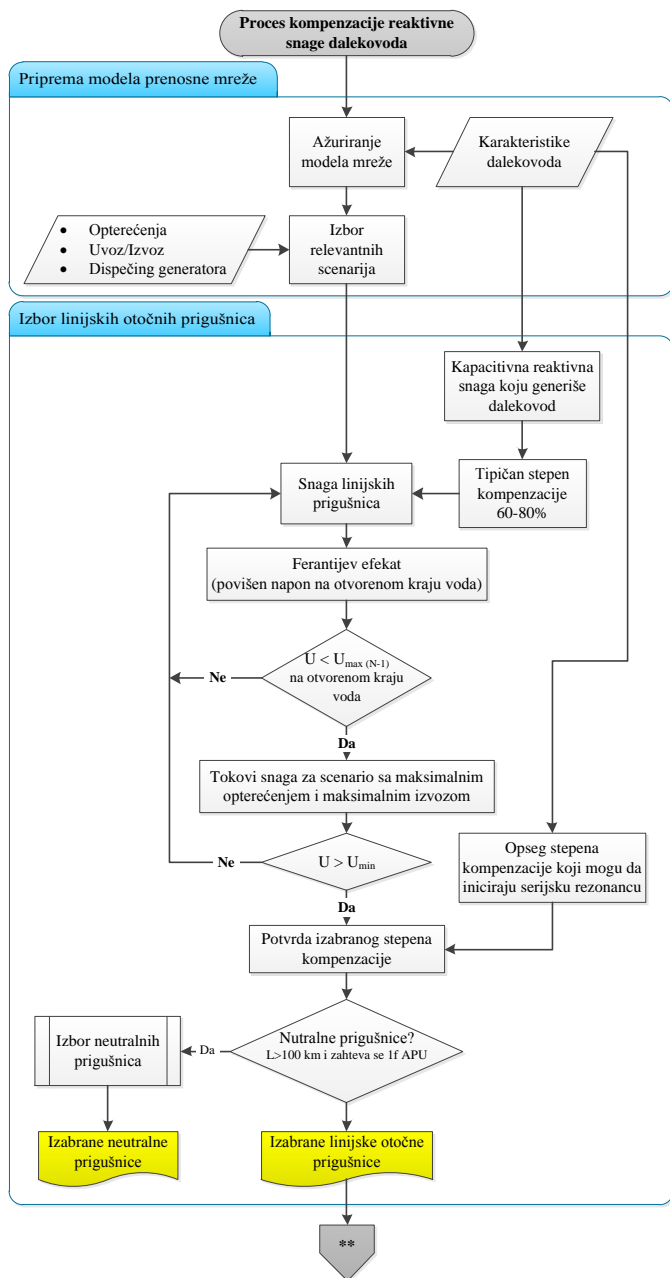
#### A. Priprema modela prenosne mreže

Na samom početku potrebno je formirati model prenosne mreže uz pomoć koga će se sagledavati uticaj dalekovoda i odabrane kompenzacije na postojeći prenosni sistem. Ovo uključuje aktivnosti ažuriranja modela, na osnovu podataka o karakteristikama dalekovoda od interesa, i definisanja relevantnih pogonskih scenarija, na osnovu očekivanih opterećenja, planiranog tranzita električne energije, kao i adekvatnog dispečinga generatorskih jedinica.

#### B. Izbor linijskih prigušnica

Naredni korak predstavlja procenu potrebe za ugradnjom linijskih prigušnica. Uopšteno uzevši, kompenzaciju reaktivne snage je potrebno vršiti kod dugih i veoma dugih dalekovoda, koji su opterećeni značajno ispod prirodne snage prenosa. Na prvi pogled se čini da je kompenzaciju moguće izvesti koristeći isključivo sabirničke prigušnice. Zapravo, u slučaju kraćih vodova, koji se uvek puštaju u pogon sa jedne, prethodno definisane strane, rešenje sa sabirničkim reaktorom bi bilo zadovoljavajuće. Ponekad potreba za prigušnicom izostaje u potpunosti. Međutim, u slučaju dalekovoda srednje i veće dužine, sledeći aspekti govore u prilog potrebe za ugradnjom linijskih prigušnica:

- *Ferantijev efekat* – porast napona na otvorenom kraju dalekovoda, kao posledica toka kapacitivne struje kroz dominantno induktivnu reaktansu dalekovoda, usled rada dalekovoda u praznom hodu ili režimu slabog opterećenja,
- *Zahtev za mogućnošću obavljanja metode jednofaznog automatskog ponovnog uključivanja (1f APU)* – metod za eliminaciju jednofaznih zemljospoja.



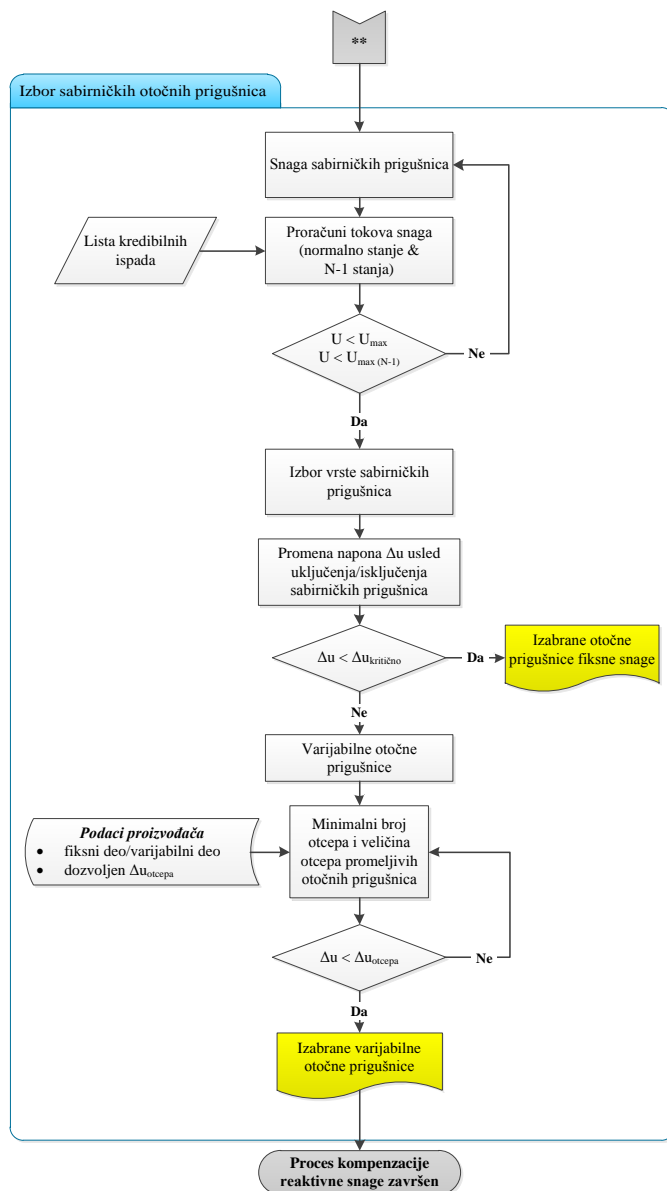
Slika 2. Algoritam za kompenzaciju reaktivne snage dalekovoda

Prema tome, odgovor na pitanje da li je potrebno koristiti linijske prigušnice zavisi od dužine dalekovoda, Ferrantijevog efekta i zahteva za mogućnošću obavljanja 1f APU.

Najpre je potrebno utvrditi vrednost kapacitivne reaktivne snage koju generiše dalekovod pri radu pod nominalnim naponom. U cilju kompenzovanja ove snage u što većoj meri, međunarodna praksa preporučuje da se koristi stepen kompenzacije iz opsega 60-80% [1]. Kada se tok snage po dalekovodu očekuje u oba smera, preporuka je da se dve identične prigušnice priključe na svaki od krajeva dalekovoda.

Dalje je potrebno proceniti uticaj Ferrantijevog efekta pri režimu rada dalekovoda u praznom hodu. Snaga linijskih reaktora treba da bude dovoljna da se napon na otvorenom

kraju održi ispod najvišeg dozvoljenog napona opreme, odnosno ispod tipično  $1.1 \cdot U_n$ .



Slika 3. Algoritam za kompenzaciju reaktivne snage dalekovoda (nastavak)

Snaga linijskih prigušnica ne sme da bude prevelika da bi se u scenarijima sa visokim opterećenjem naponi održali iznad donjih granica. Sa druge strane, ukoliko snaga linijskih prigušnica rezultuje stepenom kompenzacije iznad neke kritične vrednosti, dolazi do mogućnosti nastanka rezonantnih prenapona u slučaju nesimetričnog radnog režima prouzrokovanog nesimetričnim kvarom. Rezonantni prenaponi mogu da nastanu tokom nesimetričnog pogona uzrokovanog isključenjem faze u kvaru u toku procesa odrađivanja 1f APU, kao i u slučajevima kada jedan ili dva pola prekidača ostanu zaglavljani tokom sklopne operacije. Ovaj fenomen može da uzrokuje ozbiljna oštećenja opreme, pa je stoga opseg stepena kompenzacije, sklonih rednoj rezonanci, neophodno po svaku cenu izbeći.

Stepen kompenzacije dalekovoda se određuje pomoću izraza (1), [1]:

$$K = \frac{Q_L}{Q_C} = \frac{B_L}{B_C} = \frac{1/(\omega L)}{(\omega C_1)} \quad (1)$$

gde su:

- $Q_L$  – reaktivna snaga prigušnice (Mvar);
- $Q_C$  – kapacitivna reaktivna snaga dalekovoda (Mvar);
- $B_L$  – susceptansa prigušnice (S);
- $B_C$  – susceptansa dalekovoda (S);
- $L$  – induktivnost prigušnice (H);
- $C_1$  – pogonska kapacitivnost dalekovoda (F);
- $\omega$  – kružna učestanost (rad/s);

Kritičan stepen kompenzacije, iznad kojeg je moguća pojava fenomena redne rezonanse, određuje se pomoću izraza (2), [1]:

$$K_{kr} = \frac{1+2m}{1+3m}; \quad m = \frac{C'}{C_0}; \quad C' = \frac{C_1 - C_0}{3} \quad (2)$$

gde su:

- $K_{kr}$  – kritičan stepen kompenzacije dalekovoda;
- $C_0$  – nulta kapacitivnost dalekovoda (F).

Kada se Pravilima o radu prenosnog sistema zahteva mogućnost obavljanja 1f APU, tada je neophodno izvršiti procenu potrebe za priključenjem prigušnica u neutralnu tačku linijskih prigušnica. Kao koristan vodič, za pojedine naponske nivoe Tabela I [1] daje opsege dužina dalekovoda gde jeste i gde nije potrebna ugradnja linijskih prigušnica sa dodatnom prigušnicom u neutralnoj tački pri zahtevanom 1f APU.

TABELA I. VODIČ ZA PROCENU POTREBE ZA UGRADNJOM PRIGUŠNICE U NEUTRALNOJ TAČKI LINIJSKE PRIGUŠNICE

Nominalni napon (kV)	Dozvoljena dužina dalekovoda bez neutralne prigušnice (km)	Dužine dalekovoda pri kojima je neutralna prigušnica obavezna (km)
765	0 – 80	80 – 130
500	0 – 100	100 – 160
345	0 – 230	230 – 420
230	0 – 430	430 – 800

Ukoliko postoji potreba za ugradnjom prigušnice u neutralnu tačku linijske prigušnice, reaktansa potrebne prigušnice se može odrediti uz pomoć izraza (3), [2]-[4]:

$$X_N = \frac{B_1 - B_0}{3KB_1(B_0 - (1-K)B_1)} \quad (3)$$

gde su:

- $X_N$  – reaktansa prigušnice u neutralnoj tački ( $\Omega$ );

$K$  – stepen kompenzacije dalekovoda;

$B_1$  – pogonska susceptansa dalekovoda (njena polovina ukoliko se ugrađuju dve linijske prigušnice) (S);

$B_0$  – nulta susceptansa dalekovoda (njena polovina ukoliko se ugrađuju dve linijske prigušnice) (S).

Ovim se završava proces procene potrebe za ugradnjom linijskih prigušnica i izbor njihove snage. Sledeći korak predstavlja odabir sabirničkih prigušnica.

### C. Izbor sabirničkih prigušnica

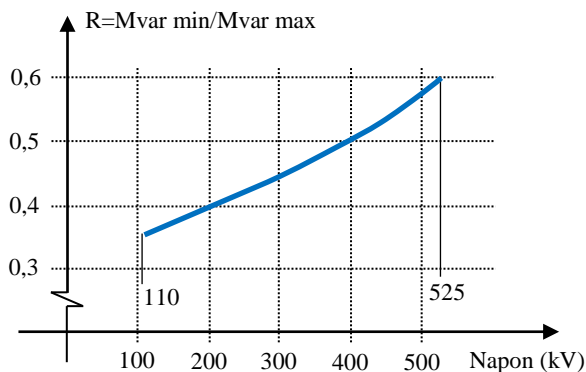
Procena snage sabirničkih prigušnica, potrebna da bi se naponi u neposrednom okruženju posmatranog dalekovoda održavali u propisanim naponskim granicama, utvrđuje se na osnovu proračuna tokova snaga za sve relevantne pogonske scenarije, kako u normalnom stanju tako i pri stanjima po ispadu jednog elementa mreže (N-1 stanje). Imajući u vidu da najveći uticaj na naponski profil u određenom delu mreže nastaje kao posledica ispada električno bliskih elemenata, kredibilna lista N-1 ispada treba da sadrži elemente incidentne posmatranom dalekovodu. Treba napomenuti da to uključuje prethodno definisane linijske prigušnice, kao i same sabirničke prigušnice čiju je snagu potrebno odrediti.

Nakon određivanja potrebne snage sabirničkih prigušnica potrebno je utvrditi vrstu prigušnice koja će zadovoljiti zahteve posmatrane pozicije u mreži. Drugim rečima, potrebno je proveriti da li prigušnica fiksne snage, kao najekonomičnije rešenje, zadovoljava usvojeni kriterijum promene napona u tački priključenja prigušnice, izazvan sklopnom operacijom prigušnice. Kao kriterijum promene napona usled sklopne operacije prigušnice usvaja se vrednost od 3% kod visoko elektrifikovanih zemalja, dok je ta vrednost relaksirana na 4-5% u slučaju zemalja u razvoju [5]. Sa druge strane, pored ispunjenja kriterijuma promene napona, takođe je poželjna mogućnost fleksibilnog upravljanja naponskim profilom. Prema tome, u slučaju neispunjavanja kriterijuma promene napona i/ili kada operator prenosnog sistema zahteva fleksibilnost u upravljanju naponom, rešenje u vidu prigušnice fiksne snage treba napustiti i potražiti alternativu. Kao dostupna alternativa može se navesti upotreba više manjih prigušnica fiksne snage, ugradnja sabirničke prigušnice varijabilne snage i ugradnja SVC uređaja. Uzevši u obzir troškove investiranja u navedenu opremu i troškove njenog održavanja, sa jedne strane, i benefite u pogledu kvaliteta upravljanja naponima, sa druge strane, može se doći do zaključka da sabirničke prigušnice varijabilne snage predstavljaju optimalno rešenje.

Prigušnice varijabilne snage se obično prave pomoću dva namotaja, jednog glavnog i drugog regulacionog. Usled tehničkih ograničenja u uređajima za promenu broja aktivnih navojaka, izvodljiv odnos minimalne i maksimalne snage prigušnice je ograničen. Slika 4 prikazuje graničnu liniju tehnički izvodljivog odnosa minimalne i maksimalne snage (R) varijabilne prigušnice u zavisnosti od naznačenog napona prigušnice [6].

Prigušnice varijabilne snage imaju mogućnost promene snage u opsegu od R·100 – 100%. Prema tome, uticaj sklopne operacije priključenja ovakve prigušnice može da se ublaži tako što se pred sklopnu operaciju uključenja/isključenja

prigušnica podesi na minimalnu snagu. Nakon priključenja prigušnice sa minimalnom snagom, što odgovara ukupnom broju navojaka glavnog i regulacionog namotaja, snaga prigušnice se može podesiti na željenu, odnosno zahtevanu vrednost uz pomoć uređaja za promenu broja aktivnih navojaka (*Tap Changer*). Preporuka je da taj uređaj poseduje mogućnost rada pod opterećenjem (*OLTC*).



Slika 4. Tipičan odnos minimalne i maksimalne snage varijabilne prigušnice u zavisnosti od naponskog nivoa

Naredni korak predstavlja određivanje minimalnog broja koraka OLTC uređaja i saglasno tome maksimalne promene snage u Mvar. Sa tačke gledišta prenosnog sistema zahtev je da promena otepa OLTC uređaja ne prouzrokuje neprihvatljiv naponski skok. Sličan zahtev se nameće i pred regulacione transformatore, a glasi da promena otepa OLTC uređaja ne sme da uzrokuje naponski skok veći od 1%. Ova kriterijumska vrednost se može usvojiti i kod prigušnica varijabilne snage.

Sa druge strane, proizvođači visokonaponskih prigušnica varijabilne snage nameću još strožije zahteve u pogledu potrebnog broja koraka OLTC uređaja, usled maksimalne naznačene promene napona na samom OLTC uređaju. Ovaj korak u procesu specifikacije prigušnice varijabilne snage proizvođač obično radi samostalno. Uprkos tome, da bi se makar orijentaciono odredio minimalan broj koraka OLTC uređaja, može se koristiti sledeći pristup. Na osnovu kataloga renomiranih proizvođača OLTC uređaja, kao maksimalne naznačene promene napona na samom OLTC uređaju, pronađene su vrednosti  $\Delta_{utap}=3300$  V i  $\Delta_{utap}=3500$  V [5]. Prema tome, koraci promene snage prigušnice u Mvar se postepeno smanjuju (broj koraka OLTC uređaja se povećava) sve dok promena napona usled promene OLTC otepa ne ispuni uslov  $\Delta_u < \Delta_{utap}$ . Konzervativni pristup je da se usvoji vrednost  $\Delta_{utap}=3300$  V.

Kao rezultat opisanog postupka dobija se odabir i specifikacija visokonaponske prigušnice varijabilne snage. Istovremeno se završava i celokupan proces izbora opreme za kompenzaciju viška reaktivne snage generisane u parazitnim kapacitivnostima dalekovoda.

#### IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak za kompenzaciju reaktivne snage generisane u dalekovodima opterećenim ispod nivoa

prenosa prirodne snage. Postupak je dat u vidu algoritma u obliku blok dijagrama, kao i dodatnih obrazloženja u više prikladno definisanih koraka. Prikazani postupak na početku podrazumeva opšti slučaj kompenzacije dalekovoda, koji pretpostavlja potrebu za ugradnjom linijskih prigušnica, sabirničkih prigušnica, kao i prigušnice priključene u neutralnu tačku linijskih prigušnica. Dalji tok algoritma omogućava odabir konkretne vrste, načina i lokacije ugradnje uređaja za kompenzaciju reaktivne snage, prilagođenih posmatranom delu prenosne mreže.

Imajući u vidu savremeni trend elektrifikacije zemalja u razvoju, koje zauzimaju velika geografska prostranstva i pritom raspoložu prirodnim resursima za proizvodnju električne energije, kompenzacija reaktivne snage dugih dalekovoda će sve više dobijati na značaju.

#### LITERATURA

- [1] M. Ramold, G. Idarraga, J. Jager, "Transient shunt reactor dimensioning for bulk power transmission systems during normal and faulty network conditions", 2006 International Conference on Power System Technology, 2006.
- [2] Peyman Jafarian, "Application of universal neutral reactor in shunt compensated transmission lines feasibility study", IET Generation, Transmission & Distribution(2018), 12 (9):2181.
- [3] Mohammad Reza Dadash Zadeh, "Investigation of Neutral Reactor Performance in Reducing Secondary Arc Current", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 23, No. 4, October 2008.
- [4] Anikesh D. Mathane, "Selection of Neutral Grounding Reactor for Line to Ground Fault", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 4 Issue 05, May-2015.
- [5] G. Bertagnolli, et. al., "Design and Application of Variable Mvar Output Shunt Reactors With On Load Tap-Changer. Operation Experience in Africa", CIGRE paper 12-308 of 1998 Session.
- [6] Shunt Reactors, Application and buyer's guide (Published 2008, Revision August 2009), ABB, Power Transformers, SE-770 80, Ludvika, Sweden.
- [7] Technical guideline, Variable Shunt Reactor, ABB, August 22, 2012.

#### ABSTRACT

This paper presents the methodology for the compensation of excess reactive power in high-voltage transmission lines, generated in its parasitic capacitances. The usual solutions for compensation of reactive power of high-voltage transmission lines are presented. The method for selecting the appropriate compensation equipment is presented through a series of steps, taking into account the desired characteristics of the equipment and the usual technical requirements from the transmission system security point of view.

**Keywords** – reactive power compensation; methodology; long distance power line; high voltage reactor; line reactor; busbar reactor; variable shunt reactor

#### THE METHODOLOGY FOR REACTIVE POWER COMPENSATION OF LONG LIGHT LOADED POWER LINES

Dragan Đorđević, Nikola Šušnica, Nikola Sučević, Nada Vrcelj, Miloš Anđelković, Saša Minić