

Darko Kruljac, ing.el.
HEP ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
darko.kruljac@hep.hr

Anamarija Antonić, mag.ing.el.
HEP ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
anamarija.antonc@hep.hr

RAZMATRANJE RJEŠENJA SMANJENJA VISOKIH NAPONA UZROKOVANIH KABLIRANJEM MREŽE I MALOM POTROŠNJOM

SAŽETAK

U distribucijskoj elektroenergetskoj mreži na području Gorskog kotara prisutan je problem previsokih napona. Naime, uz malu potrošnju i ugradnju sve većeg broja kabela došlo je do problema prisutnosti kapacitivne jalove energije te posljedično i previsokih napona. Pojavom obnovljivih izvora energije u Gorskom kotaru prilike se pogoršavaju jer elektrane prema sadašnjim Mrežnim pravilima smiju raditi u režimu 0,85 do 1 induktivno i time samo proizvoditi jalovu energiju.

Predmet analize je izvod 20 kV ŽP Skrad iz TS 35/20 kV Kupjak, koja je napajana iz TS 110/35 Delnice.

Cilj je vidjeti da li rješenje u kojem se koriste prigušnica ili nekoliko prigušnica poboljšava uvjete u mreži te da li je takvo rješenje opravdano. Kakve su karakteristike prigušnica te da li je opravdano ugrađivati kondenzatore u malim TS na NN bloku.

Ključne riječi: kapacitivna jalova energija, prigušnica, regulacija napona, visoki naponi, smanjena potrošnja

FINDING THE SOLUTION FOR REDUCING RAISED VOLTAGE CAUSED BY LARGE NUMBER OF CABLES AND LOW LOAD

SUMMARY

There is a problem with raised voltage in distribution network in county Gorski kotar. The problem has appeared because of large number of cables and low load. The problem has been getting worse because of renewable energy sources.

The subject of analysis is the 20 kV line called ŽP Skrad from TS 35/20 kV Kupjak which is powered from TS 110/35 kV Delnice.

The purpose is to see if the solution with shunt reactor improves system voltage. Is the shunt reactor justifiably? What are the characteristics of shunt reactors?

Key words: capacitive reactive power, shunt reactor, voltage regulation, raised voltages, low load

1. UVOD

Područje Gorskog kotra u Primorsko-goranskoj županiji karakterizira veliki prostor s malim brojem stanovnika. Zbog toga prisutna je izrazito mala potrošnja električne energije. Industrija je nerazvijena, a prisutan je i sve veći odljev stanovništva. Donedavno, elektroenergetska mreža na razini distribucije bila je induktivnog karaktera, mreža se sastojala od velikog udjela nadzemnih vodova. Međutim, 2014. godine dogodio se ledolom. Veći dio nadzemne mreže se urušio, a Gorski kotar je ostao bez napajanja električnom energijom. U tom trenutku bilo je potrebno u najkraćem roku osigurati opskrbu električnom energijom. Ugrađivali su se kabeli na najvećem dijelu devastirane mreže. Nakon normalizacije stanja pojavio se novi problem. Uslijed ugradnje velikog broja kabela došlo je do pojave kapacitivne jalove energije velikog iznosa. Naime, kabeli imaju kapacitet puno veći od induktiviteta tako da proizvode jalovu energiju. Novi problemi koji su se pojavili su previsoki naponi kao rezultat kapaciteta u vrlo malo opterećenoj mreži. To se najizraženije vidi na krajevima dugačkih kabelskih vodova zbog pojave „Ferantijevog“ efekta. Pojavom obnovljivih izvora energije, prilike se još više pogoršavaju. Naime, elektrane prema danas važećim mrežnim pravilima smiju raditi u režimu 0,85 do 1 induktivno i time samo proizvoditi jalovu energiju. Počela su se razmatrati rješenja kako popraviti stanje napona u mreži. Već sad se vođenjem mreže snižava napon, npr. iako je dovoljan jedan transformator u TS Kupjak, oba transformatora se drže u radu u paraleli jer se na taj način napon na 20 kV sabirnicama smanji za gotovo 2%. Rješenje koje se nametnulo je ugradnja prigušnica radi kompenzacije jalove energije na 20 kV razini.

2. ANALIZA U NEPLAN-U

Svaki statički model je podložen kritikama, a kako bi dobili što realniji model za proračun pristupili smo modeliranju na sljedeći način. Analizirali smo najkritičniji izvod u mreži, to je izvod 20 kV SKRAD ŽP iz TS 35/20 kV Kupjak, koja je napajana iz TS 110/35 kV Delnice.

Potrošači i proizvođači na izvodu su modelirani prema EOTRP-u za MHE Zeleni vir. Preko faktora smanjivanja dodatno smo prilagodili opterećenja kako bi odgovarala podacima o stvarno izmjerenom stanju u WS500. Regulacijske preklopke su na svim transformatorima 20/0,42 u položaju da snižavaju napon za 10%. Napon na 35 kV sabirnici u Delnicama fiksiran je na 37,3 kV (106.6%). Teret preostalih 20 kV polja u TS Kupjak te ostalih 35 kV polja u TS Delnice zbrojen je prema podacima iz WS500. Na predmetnom izvodu postoje prethodne suglasnosti za dvije hidroelektrane, jedna je snage 2600 kW, a druga 300 kW. Za priključenje te dvije elektrane nije potrebno stvarati dodatne uvjete u mreži. Navedene elektrane su se također modelirale.

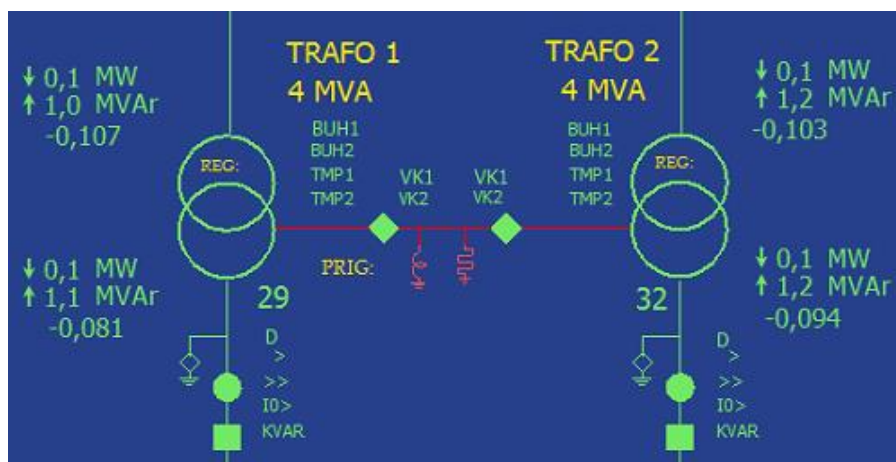
Proračun smo napravili za 9 stanja. Od tih 9 stanja, najzanimljivija su prikazana u Tablici 1.

Uz Korisnike mreže (proizvođače i potrošače), potrošači i proizvođači jalove energije u našem modelu mreže su transformatori, zračni vodovi i kabeli.

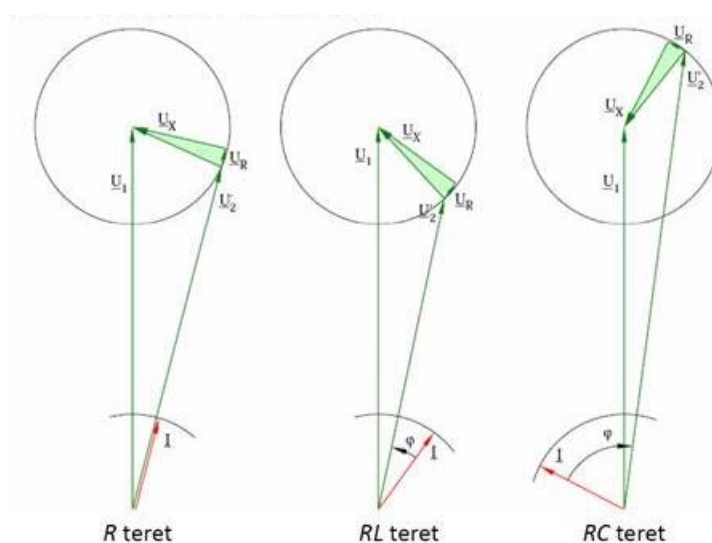
2.1. Transformatori

Transformatore karakterizira induktivna impedancija, pa su oni potrošači jalove snage. U praznom hodu potrošnja jalove snage se kreće oko 1% nazivne snage i koristi se za magnetizaciju jezgre. Pri nazivnom opterećenju potrošnja naraste na oko 10% nazivne snage, a uzrokovana je gubicima u rasipnim induktivitetima transformatora. Problem potroška jalove snage u transformatorima vrlo je značajan, uzimajući u obzir da put energije od mjesta proizvodnje do potrošača zahtijeva nekoliko transformacija, pa se potrošnje transformatora zbrajaju. [3]

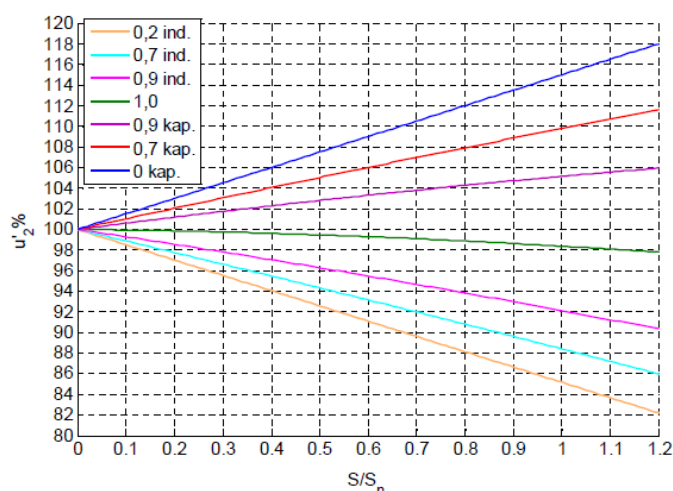
No i uz svu tu potrošnju jalove snage na samim transformatorima još uvijek zbog utjecaja kabela imamo pretežno kapacitivno opterećenje. Tako u noćnim satima imamo veoma loš faktor snage na transformatoru od svega 0.2 kapacitivno. Slika 1 prikazuje stvarno stanje opterećenja transformatora tijekom noćnih sati na području Gorskog kotra. Iz slika 2 i 3 vidljivo je da takvo opterećenje uzrokuje dodatni porast napona na sekundaru transformatora što dodatno pogoršava naponske prilike.



Slika 1, primjer kapacitivnog opterećenja transformatora na području Gorskog kotra u noćnim satima, TS Gerovo, izvor WS500



Slika 2, prikaz kako sekundarni napon ovisi o faktoru snage tereta primjenom Kappovog trokuta (u_r , u_x i u_k) [6]



Slika 3, načelni prikaz ovisnosti napona sekundara o opterećenju pri različitim konstantnim faktorima snage [6]

2.2. Zračni vodovi i kabeli

Zračne vodove i kabele karakterizira induktivitet i kapacitet. Induktivitet je zaslužan za potrošak jalove snage, dok ju kapacitet proizvodi. Jalova snaga koju troši vod ili kabel ovisna je o struji opterećenja dok je jalova snaga koju proizvodi ovisna o narinutom naponu.

Potrošak jalove snage u vodu ili kabelu Q_L iznosi:

$$Q_L = 3I^2 L \omega$$

Gdje je I linijska struja kroz vod ili kabel, L vlastiti induktivitet voda ili kabela, a ω kružna frekvencija.

Jalova snaga proizvedena u vodu ili kabelu Q_C je:

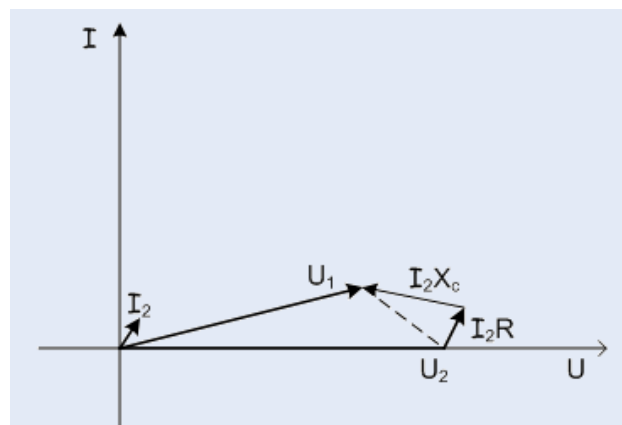
$$Q_C = U^2 C \omega$$

Gdje je U linijski napon mreže, C pogonski kapacitet voda, a ω kružna frekvencija. Ukupna jalova snaga voda ili kondenzatora Q jednaka je razlici između potrošene i proizvedene jalove snage:

$$Q = Q_L - Q_C = 3I^2 L \omega - U^2 C \omega$$

Za kabele je karakteristično da im je kapacitet puno veći od induktiviteta, tako da oni uglavnom proizvode jalovu snagu. [3]

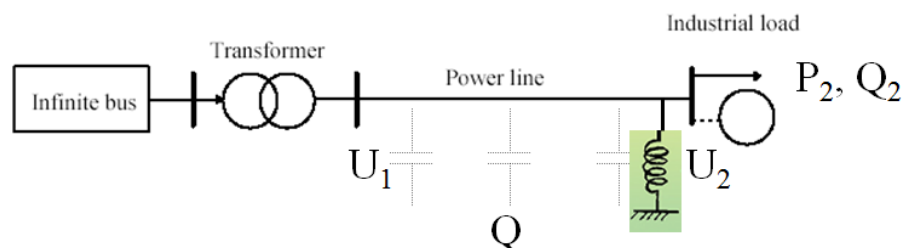
Kako se radi o relativno dugačkim dionicama kabelskih vodova kapacitet tih vodova uzrokuje porast napona od izvora prema kraju kabela zbog pojave Ferrantijevog efekta što je ilustrirano slikom 4.



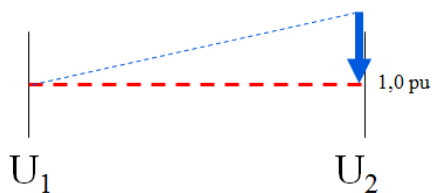
Slika 4, fazorski dijagram kad je struja kapacitivnog karaktera, prikaz Ferrantijevog efekta [7]

2.3. Prigušnice

Funkcija prigušnica je da troši višak jalove snage proizvedene uslijed malog opterećenja vodova i kabela te na taj način stabilizira napon sustava.



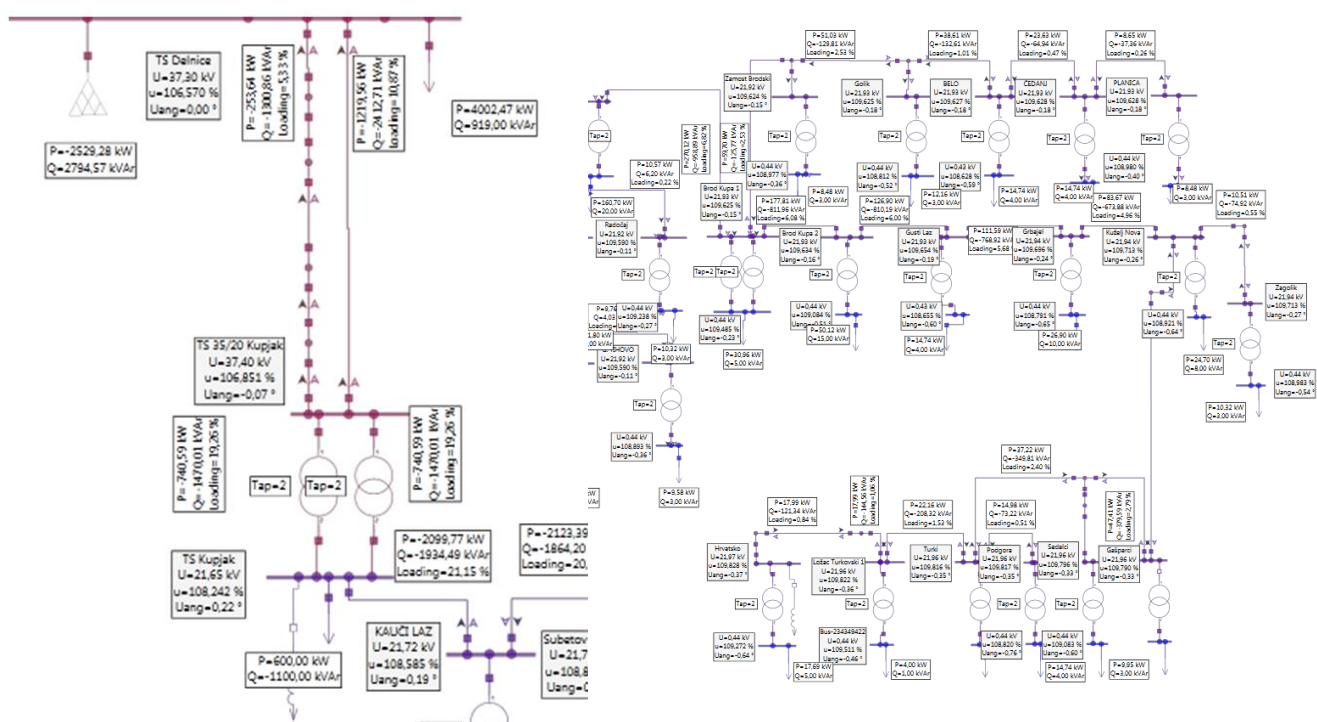
Slika 5, načelna shema koja prikazuje spoj shunt reaktora (prigušnice) [8]



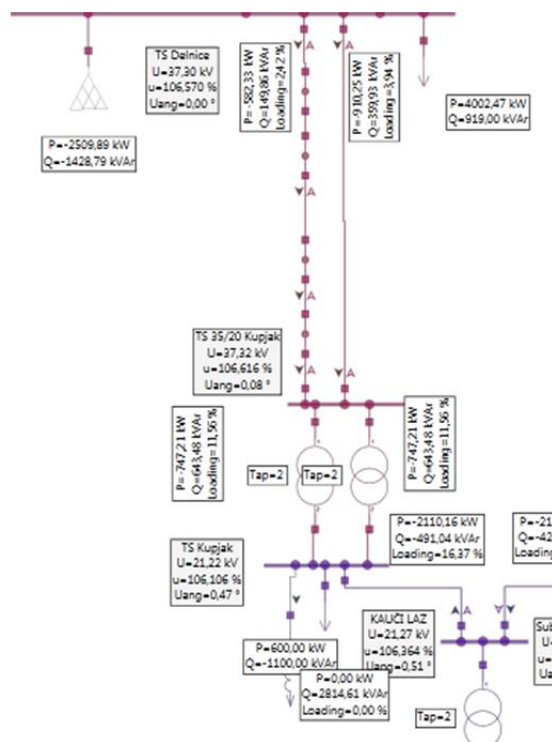
Slika 6, shunt reactor (prigušnica) uzrokuje smanjenje napona na vodu [8]

U ovom modelu prigušnice su postavljene na 20 kV sabirnice u TS 35/20 kV Kupjak i TS 20/0,4 mHE Curak 1, ovisno za koje stanje se radi proračun. Prigušnica se modelirala na način da samo troši jalovu energiju, obzirom na visoke vrijednosti napona, program je povećao potrošnju jalove energije od nazivne vrijednosti prigušnice. To nije smetalo da napravimo zaključke.

2.4. Rezultati proračuna



Slika 7, stanje 3., napona u TS Kupjak je 108,242% U_n (analiza u programu NEPLAN)



Slika 8, stanje 6., napon u TS Kupjak je 106,106%; ugrađene su dvije prigušnice, jedna u TS Kupjak i druga u TS mHE Curak 1 (analiza u programu NEPLAN)

Tablica 1, analiza proračuna za minimalno opterećenje sustava

Stanje	Stanje 0	Stanje 3	Stanje 4	Stanje 5 – samo teoretski	Stanje 6
HE Zeleni vir	x	2600 kW 100 kVar	2600 kW 100 kVar	2600 kW 100 kVar	2600 kW 100 kVar
mHE Curak 1	x	300 kW	300 kW	300 kW	300 kW
Prigušnica u Kupjaku	x	x	x	x	2500 kVar (2814,61)
Prigušnica u TS mHe Curak 1	x	x	1200 kVar (1412,91)	3000 kVar (3434,17)	1200 kVar (1376,37)
U _{Kupjak20kV} (%)	107,887	108,242	107,531	106,486	106,106
U _{Hrvatsko20kV} (%)	108,215	109,828	108,799	107,265	107,371
P _{izvod_ŽP_Skrad} (kW)	780,21	-2099,77	-2110,39	-2094,76	-2110,16
Q _{izvod_ŽP_Skrad} (kVar)	-1804,13	-1934,49	-497,04	1574,44	-491,04
P _{izvodi_Kupjak} (kW)	1405,74	-1473,2	-1490,59	-1478,13	-1492,58
Q _{izvodi_Kupjak} (kVar)	-3586,7	-3713,57	-2306,37	-244,74	509,79

U vrijeme kad su maksimalna opterećenja, prigušnice ne bi trebale raditi probleme.

4. PRIGUŠNICE

Obzirom na izračun tražile su se ponude s upitom za savjete i preporuke proizvođača. Upit je zatražen prema dobavljačima nekoliko proizvođača. Povratno su dostavljene samo dvije ponude. Naime, primjena prigušnica u svrhu regulacije napona na srednjem naponu u Hrvatskoj je nepoznata. Tržište ne poznaje dovoljno proizvod te njegovu primjenu u pogonu.

U vezi tehničkih podataka prigušnice uspjeli smo surađivati s jednim talijanskim proizvođačem. Norma koja obrađuje prigušnice je HRN EN 60076-6 (Energetski transformatori – 6. Dio: Prigušnice). U toj normi su definirani svi potrebni parametri prigušnice kao i tipovi prigušnica. Tip prigušnice koji je potreban u našoj primjeni je SHUNT REACTOR. Shunt reactor je prigušnica koja služi za kompenziranje kapacitivne struje u elektroenergetskoj mreži.

SHUNT prigušnica prema izvedbi može biti:

- jednofazna ili trofazna,
- uljna ili suha,
- zračna jezgra ili jezgra s rasporom,
- s ili bez magnetskog štita,
- za unutarnju ili vanjsku ugradnju,
- prigušnica s linearnom krivuljom reaktancije ili s krivuljom koja vodi u zasićenje,

U normi su definirani i potrebni podaci prigušnice, u ovom slučaju navedeni su podaci za D spoj prigušnice:

- nazivni napon (U_r),
- max. napon za rad (U_{max}) – najveći napon, nazivne frekvencije pri kojoj prigušnica može raditi normalno,
- nazivna snaga,
- nazivna struja (I_r)
- nazivna reaktancija (X_r)
- razina uklopne struje – omjer maksimalne vrijednosti struje koja se može pojaviti tijekom energiziranja prigušnice i $\sqrt{2}$ nazivne struje,
- linearnost prigušnice do određene granice napona,
- granica povećanja temperature,
- klasa izolacije.

Problemi prilikom uklopa i isklopa prigušnice. Uklop i isklop prigušnice može se odvijati često, uključanje tijekom male potrošnje te isključenje tijekom velike potrošnje u mreži se može događati svakodnevno. Naprezanja koja se događaju na prekidaču i na izolaciji prigušnice tijekom sklapanja su složena i ozbiljna. Prekidanje struje pomoću prekidača napreza prigušnicu prenaponom, razina otpornosti na impuls prekidanja prigušnice treba biti usklađena s prenaponom. Ukoliko je razina zaštite od impulsa sklapanja pomoću odvodnika prenapona za 30% manja od razine otpornosti na impuls prekidanja prigušnice, prigušnica bi se trebala štititi pomoću odvodnika napona. Za nazivne napona do 52 kV je u većini slučajeva dovoljna zaštita korištenje odvodnika prenapona. Ovaj aspekt u primjeni je potrebno dodatno proučiti. [4]



Slika 9, prigušnica uljna, trofazna [5]

Izvedbe prigušnica koje se trenutno razmatraju za primjenu na mjestima obrađenim u ovom radu su: trofazna, uljna, nazivnog napona 21 kV, najviši napon mreže 24 kV, 3-stupna jezgra sa zračnim rasporedima, namoti od aluminija, grupe spoja D, bez regulacije, linearna i jedna snage 2500 kVA, a druga snage 1200 kVA.

5. ZAKLJUČAK

Veliki problem proračuna, a pogotovo statičkih proračuna je modelirati što točniji model koji će služiti u analizi mreže. Prikazani rezultati proračuna služili su kao podloga za daljnje radnje kako bi se nabavile prigušnice.

Prigušnice bi pomogle u rješavanju problema na predmetnom vodu te je njena ugradnja opravdana. Prigušnice ne samo da pomažu u smanjenju kretanja jalove energije mrežom već i imaju blagotvoran učinak na automatsku regulaciju u TS Delnice.

Veliko kapacitivno opterećenje koje imamo na transformatorima 35/20 kV prenosi se i dalje na transformatore 110/35 kV u TS Delnice. Posljedica velikog kapacitivnog opterećenja transformatora 35/20 kV kao i 110/35 kV je znatno povećanje napona na sekundarnoj strani. Transformator 110/35 kV s automatskom regulacijom napona to povećanje napona zbog kapacitivnog opterećenja pokušava kompenzirati spuštanjem regulacijske preklopke, ali često to nije moguće jer se preklopka već nalazi na najnižoj poziciji. Isto nije moguće prikazati proračunom jer se pretpostavilo da je u aktivnoj mreži fiksiran napon u TS Delnice i to na razini 37,3 kV.

Postoje tri ključne pozitivne stvari koje se postižu prigušnicom, a to su:

- smanjenje napona,
- poboljšani rad automatske regulacije napona u TS 110/35 kV Delnice,
- smanjenje opterećenja vodova jalovom snagom, a time se povećava mogućnost većeg prijenosa radne snage.

U budućnosti bi trebalo uvjetovati sinkronim generatorima, koje koriste hidroelektrane na predmetnom izvodu, rad u kapacitivnom režimu kako bi na taj način trošili jalovinu. Nažalost, trenutno

nije predviđen i dopušten takav način rada Mrežnim pravilima. Također, proračun pokazuje da nije opravdano ugrađivati kondenzatore u malim TS kao tipsko rješenje za sve TS 20/0,4 kV.

Primjena prigušnica u svrhu regulacije napona na srednjem naponu u Hrvatskoj je nepoznata. Tržište ne poznaje dovoljno proizvod te njegovu primjenu u pogonu.

Na temelju proračuna prikazanog u ovom članku predlaže se ugradnja dviju prigušnica na 20 kV sabirnice. Jedna bi bila smještena u TS 20/0,4 kV mHE Curak 1, snage 1200 kva(r), a druga u TS 35/20 kV Kupjak, snage 2500 kva(r). Također, razmatra se prijedlog ugradnje prigušnice snage 2500 kva(r) u TS 35/20 kV Gerovo, što nije vidljivo iz ovog proračuna.

5. LITERATURA

- [1] Igor Kuzle, "Kompenzacija jalove snage", Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, Zavod za visoki napon i energetiku, skripta
- [2] ELABORAT OPTIMALNOG TEHNIČKOG RJEŠENJA PRIKLJUČENJA ELEKTRANE NA DISTRIBUCIJSKU ELEKTROENERGETSKU MREŽU, Hidroelektrana HE Zeleni Vir (2564 kW), Fakultet elektrotehnike i računarstva, Institut za elektroprivredu i energetiku d.d.
- [3] CIGRE WG B5.37, Protection, Monitoring and Control of Shunt Reactors, kolovoz 2012.
- [4] HRN EN 60076-6 (Energetski transformatori – 6. Dio:Prigušnice), lipanj 2009.
- [5] Tehnički list prigušnice za kompenzaciju 2500 kvar, S.E.A.
- [6] Damir Žarko, „Osnovna teorija transformatora“, Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, Teorija električnih strojeva i transformatora
- [7] Module 6: Measurement of High Test Voltages,
http://nptel.ac.in/courses/108104048/NEW_lecture30/slide1.htm