

Josip Žutolija, univ.mag.ing.el.
HEP ODS d.o.o. – Elektroprimorje Rijeka
josip.zutolija@hep.hr

ANALIZA NAPONSKIH PRILIKA U 20KV MREŽI TS 35/20KV GEROVO I TS 20/0,4KV MHE CURAK 1

SAŽETAK

U distribucijskoj elektroenergetskoj mreži na području Gorskog kotara prisutan je problem previsokih napona. Relativno mala potrošnja, kao i ugradnja sve većeg broja kabela, doveli su do povećane prisutnosti kapacitivne reaktivne energije, što je rezultiralo previsokim naponima. Ovaj problem posebno dolazi do izražaja u razdobljima niske potrošnje električne energije, kada višak kapacitivne reaktivne energije uzrokuje dodatno podizanje napona iznad dopuštenih granica.

Predmet analize u ovom radu je ugradnja kompenzacijskih prigušnica u transformatorskim stanicama TS 35/20 kV Gerovo i TS 20/0,4 kV mHE Curak 1. Cilj rada je analizirati rezultate nakon njihove ugradnje te ocijeniti njihov utjecaj na regulaciju napona u mreži. Kroz analizu prije i poslije implementacije predmetnih prigušnica, ispitat će se učinkovitost smanjenja kapacitivne reaktivne energije i stabilizacije naponskih prilika. Također, posebna pažnja posvetit će se utvrđivanju mogućih nuspojava i daljnjih optimizacija sustava. Utjecaj prigušnice u TS mHE Curak 1 vidljiv je u tokovima jalove snage kroz vodna polja Kupjak K1 i Kupjak K2 u TS 110/35 kV Delnice.

Ključne riječi: kapacitivna jalova energija, prigušnica, regulacija napona, povišeni napon

ANALYSIS OF VOLTAGE CONDITIONS IN THE 20 KV NETWORK OF TS 35/20 KV GEROVO AND TS 20/0.4 KV MHE CURAK 1

In the distribution power network in the Gorski Kotar area, the problem of excessively high voltages is present. Relatively low consumption, along with the increasing installation of cables, has led to an increase in capacitive reactive power, resulting in high voltage levels. This issue becomes particularly pronounced during periods of low electricity consumption when excess capacitive reactive power causes additional voltage rises beyond permissible limits.

The subject of analysis in this paper is the installation of compensation reactors in the transformer stations TS 35/20 kV Gerovo and TS 20/0.4 kV mHE Curak 1. The aim of the study is to analyze the results after their installation and assess their impact on voltage regulation in the network. Through an analysis of the system before and after the implementation of these reactors, the effectiveness of reducing capacitive reactive power and stabilizing voltage conditions will be examined. Additionally, special attention will be given to identifying possible side effects and further system optimizations. The impact of the reactor at the mHE Curak 1 substation is visible in the reactive power flows through the Kupjak K1 and Kupjak K2 feeder bays at the 110/35 kV Delnice substation.

Key words: capacitive reactive power, shunt reactor, voltage regulation, overvoltage

1. UVOD

U distribucijskoj elektroenergetskoj mreži na području Gorskog kotara prisutan je problem previsokih napona. Relativno mala potrošnja električne energije, zajedno s ugradnjom sve većeg broja kabela, dovela je do povećane kapacitivne reaktivne energije i posljedično previsokih napona. Ovaj rad analizira rezultate dobivene nakon ugradnje kompenzacijske prigušnice u TS 35/20kV Gerovo, uz usporedbu s modelom izrađenim u programskom paketu Neplan.

Prije 2014. godine, distribucijska mreža imala je dominantno induktivni karakter, budući da se sastojala pretežno od nadzemnih vodova. Međutim, nakon velikog ledoloma 2014. godine, urušen je znatan dio nadzemne mreže, što je dovelo do masovne zamjene nadzemnih vodova podzemnim kabelima. Ova promjena uzrokovala je povećanje kapacitivne jalove energije, što je rezultiralo povećanjem napona, posebno na krajevima dugih kabelskih vodova zbog pojave "Ferantijevog efekta".

Povećani naponi u mreži predstavljaju ozbiljan problem za stabilnost sustava i kvalitetu napajanja krajnjih potrošača. Stoga su analizirana moguća rješenja kako bi se stanje u mreži poboljšalo. Jedno od najefikasnijih rješenja pokazalo se ugradnja kompenzacijskih prigušnica na 20 kV razini radi smanjenja viška kapacitivne reaktivne energije i stabilizacije napona.

2. REAKTIVNA SNAGA

Reaktivna snaga je prisutna u sustavu kada napon i struja nisu u fazi. Proizvodi se kada trenutni valni oblik struje prethodi naponu (faktor snage - kapacitivni) i troši se kada trenutni valni oblik struje kasni za naponom (faktor snage - induktivni). Ako su napon i struja za određeno opterećenje ili dijelu mreže izraženi sa:

$$V = |V|\angle\alpha, \quad I = |I|\angle\beta, \quad (1)$$

tada se prividna snaga S definira prema izrazu:

$$S = VI^* = |V||I|\angle(\alpha - \beta) = |V||I| \cos(\alpha - \beta) + j|V||I| \sin(\alpha - \beta). \quad (2)$$

Budući da je $\theta = \alpha - \beta$ fazni kut između napona i struje, prividna snaga S je

$$S = P + jQ. \quad (3)$$

Kao što elementi za skladištenje energije razmjenjuju energiju s ostatkom mreže (punjenje, pražnjenje), na isti način reaktivna snaga oscilira između opterećenja i izvora. Iz jednadžbe (2) može se vidjeti da je:

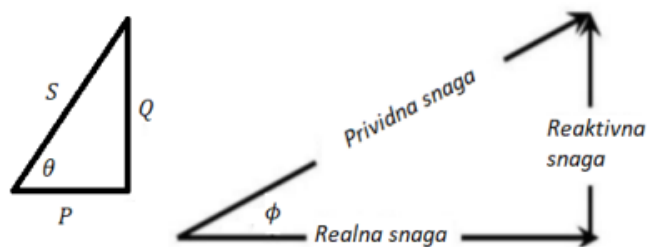
1. $Q = 0$ za radno opterećenje ($\alpha = \beta$);
2. $Q < 0$ za kapacitivno opterećenje ($\alpha < \beta$);
3. $Q > 0$ za induktivno opterećenje ($\alpha > \beta$).

S , P i Q se mogu prikazati u obliku trokuta, poznatog kao trokut snage (slika 1.). Iz trokuta snage se može zaključiti:

1. $|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$, gdje je S prividna snaga;
2. aktivna snaga: $P = \operatorname{Re}(S) = S \cos \theta$;

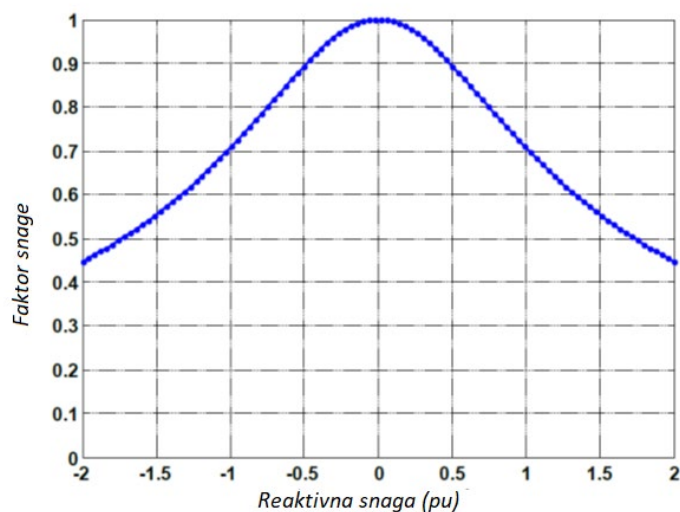
3. reaktivna snaga: $Q = \text{Im}(S) = S \sin \theta$;

4. faktor snage: $\frac{P}{S} = \cos \theta$.



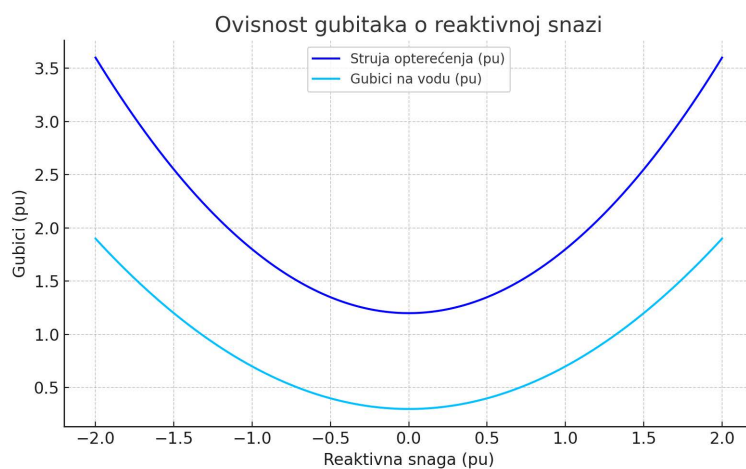
Slika 1. Trokut snage

Slika 2. prikazuje varijaciju snage opterećenja u ovisnosti o jalovoj snazi (induktivnoj ili kapacitivnoj). Također, slika pokazuje da faktor snage uvelike ovisi o tokovima jalove snage.



Slika 2. Faktor snage u odnosu na reaktivnu snagu

Protok jalove snage rezultira neekonomičnim radom elektroenergetskog sustava jer povećava trenutnu vrijednost struje, a time i aktivne i reaktivne gubitke u distribucijskoj mreži, što je prikazano na slici 3.



Slika 3. Struja opterećenja (gore) i gubici voda (dolje) u odnosu na reaktivnu snagu

Slika 3. pokazuje da se trenutni gubici povećavaju s povećanjem jalove snage (kapacitivne ili induktivne).

3. ZRAČNI VODOVI I KABELI

Zračni vodovi i kabeli mogu biti i potrošači i proizvođači jalove energije, ovisno o opterećenju. Induktivitet je zaslužan za potrošnju jalove snage, a kapacitet za proizvodnju. Neopterećeni zračni vod ili kabel ponaša se kao kondenzator jer uzima kapacitivnu, a proizvodi induktivnu jalovu snagu:

$$Q_C = -j\omega CU^2. \quad (4)$$

Opterećeni zračni vod ili kabel troši induktivnu jalovu snagu:

$$Q_L = 3I^2\omega L. \quad (5)$$

Kad je vod opterećen svojom prirodnom snagom, vrijedi

$$\begin{aligned} Q_C &= Q_L \\ \omega CU^2 &= I^2\omega L, \end{aligned} \quad (6)$$

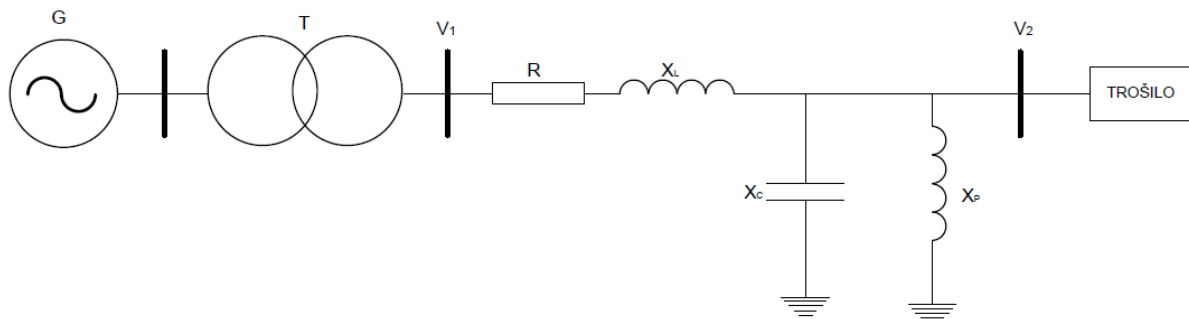
odnosno

$$Z_V = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (7)$$

Kod prirodne snage, naponi i struje su u fazi. Kad je vod opterećen ispod prirodne snage, ponaša se kao kondenzator, a kad je opterećen preko prirodne snage, ponaša se kao induktivitet.

4. PRIGUŠNICE

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



Slika 4. Shema koja prikazuje spoj prigušnice

5. DIMENZIONIRANJE KOMPENZACIJSKIH PRIGUŠNICA

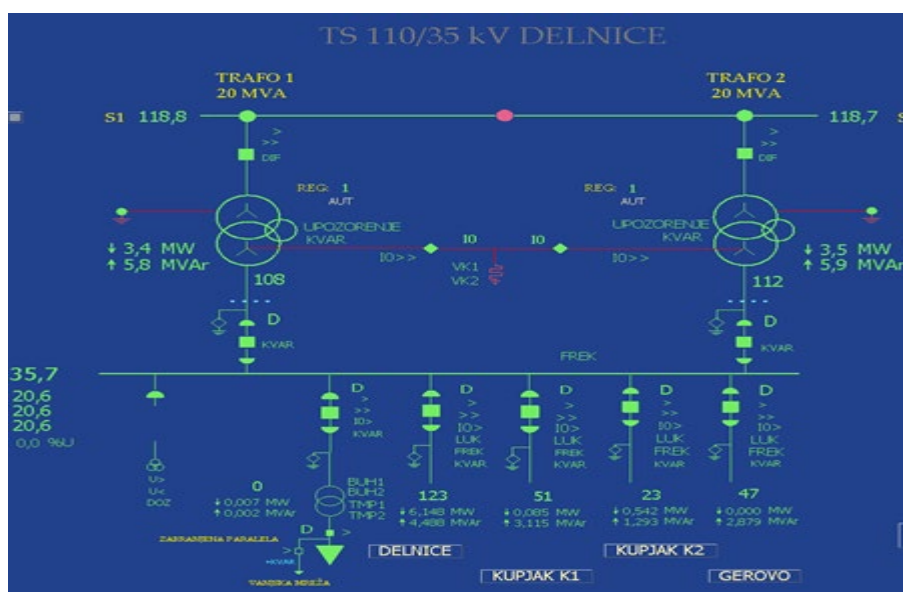
Pri samom dimenzioniranju kompenzacijskih prigušnica trebalo je uzeti nekoliko bitnih čimbenika u obzir. 20 kV vodovi su u ovom slučaju najveći proizvođači jalove energije. Ta jalova energija prelazi preko energetskog transformatora 35/20kV u 35kV mrežu, gdje se sumira s jalovom energijom 35 kV mreže te dalje ide preko energetskih transformatora u TS 110/35kV Delnice u 110kV mrežu, koja se u ovom slučaju ponaša kao prigušnica. Ova kapacitivna jalova energija dodatno kapacitivno opterećuje transformatore, što rezultira povišenim naponima na 20 kV i 35 kV sabirnicama predmetnih trafostanica.

Budući da je trafostanica TS 110/35kV napojna i ključna trafostanica za napajanje područja Gorskog Kotara, glavni zadatak bio je kapacitivno rasteretiti transformatore. Trenutna situacija je takva da je regulacijska preklopka u najnižem položaju, zbog čega naponska regulacija nije moguća. Nakon rasterećenja TS Delnice, glavni prioritet je bio kapacitivno rasteretiti i trafostanice TS 35/20kV Gerovo i TS 20/0,42kV mHE Curak 1.

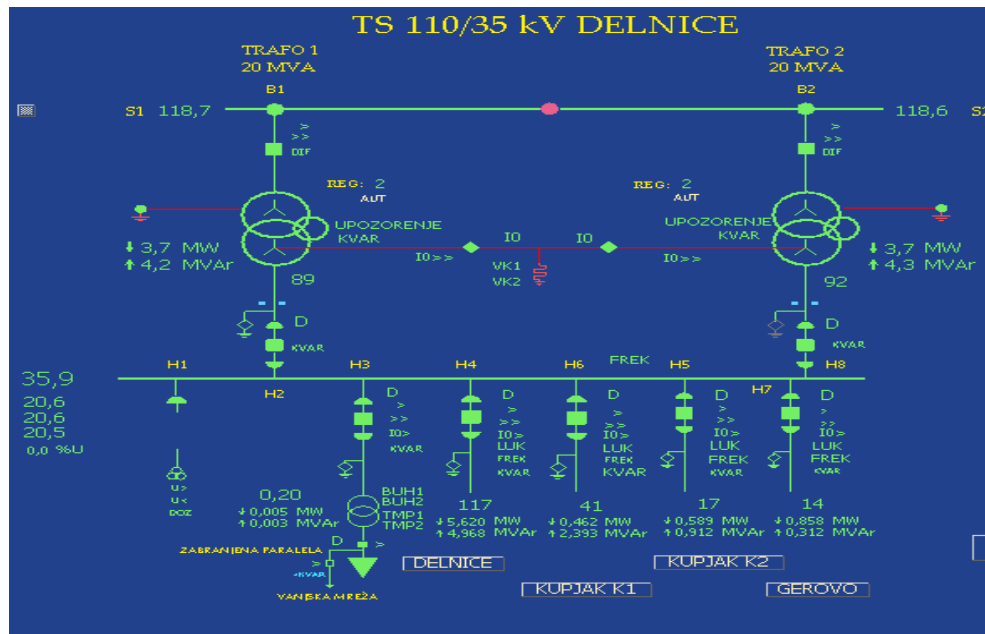
Analiza provedena u programskom paketu Neplan, kao i rezultati mjerenja na terenu, ukazali su na potrebu za instalacijom prigušnica snage:

- TS 35/20 kV Gerovo: cca. 2500 kVAr
- TS 20/0,4 kV mHE Curak: 1700 kVAr

Zbog ograničenog prostora u TS mHE Curak 1, odabrana je prigušnica od 1200 kVAr, dok je za TS Gerovo odabrana prigušnica od 3 MVar, umjesto 2.5 MVar koje proizvodi 20kV mreža. Odluka o većoj prigušnici donesena je s ciljem maksimalnog rasterećenja TS Delnica, budući da 35 kV vodovi koji povezuju TS Delnice s TS Gerovo proizvode oko 0,5 MVar.



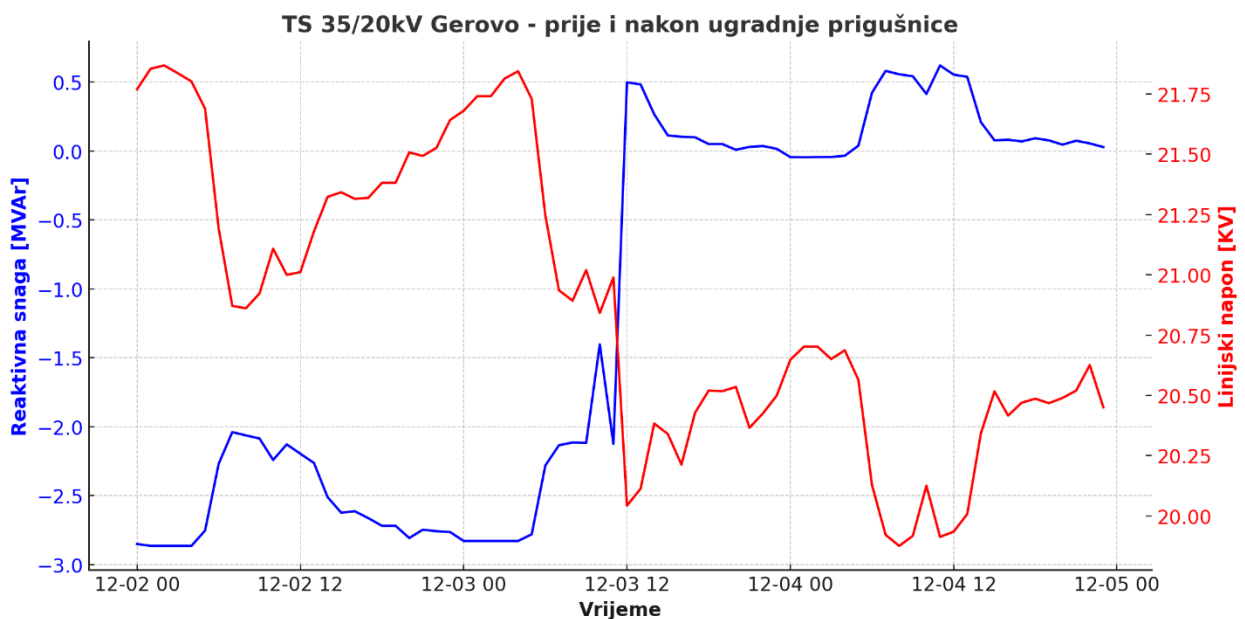
Slika 5. Shema TS Delnice prije ugradnje kompenzacijskih prigušnica



Slika 6. Shema TS Delnice nakon ugradnje kompenzacijskih prigušnica

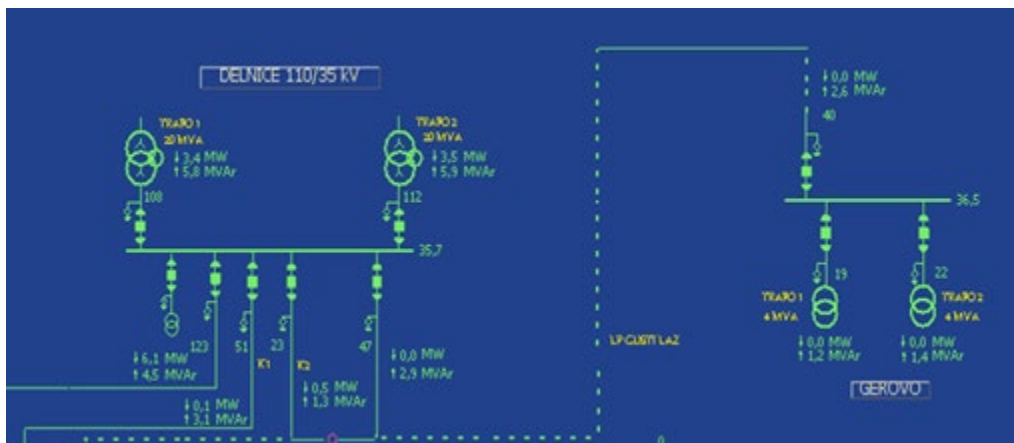
Na slici 5. vidi se da je u jednom trenutku ukupna radna snaga $P = 6,9$ MW, dok je reaktivna snaga $Q = 11,7$ MVar. Visoka vrijednost reaktivne snage (11,7 MVar) izrazito negativno utječe na naponske prilike u mreži te povećava gubitke kako u transformatoru, tako i u elektroenergetskom sustavu.

Nakon ugradnje kompenzacijskih prigušnica dolazi do osjetnog rasterećenja energetskih transformatora, što rezultira smanjenjem napona na 35 kV sabirnicama i smanjenjem gubitaka, kako u transformatorima, tako i u mreži. Također, važno je primijetiti da je regulacijska preklopka nakon uključivanja kompenzacijskih prigušnica prešla iz položaja 1 u položaj 2, čime se postiže veća fleksibilnost i poboljšana naponska regulacija na predmetnim transformatorima.

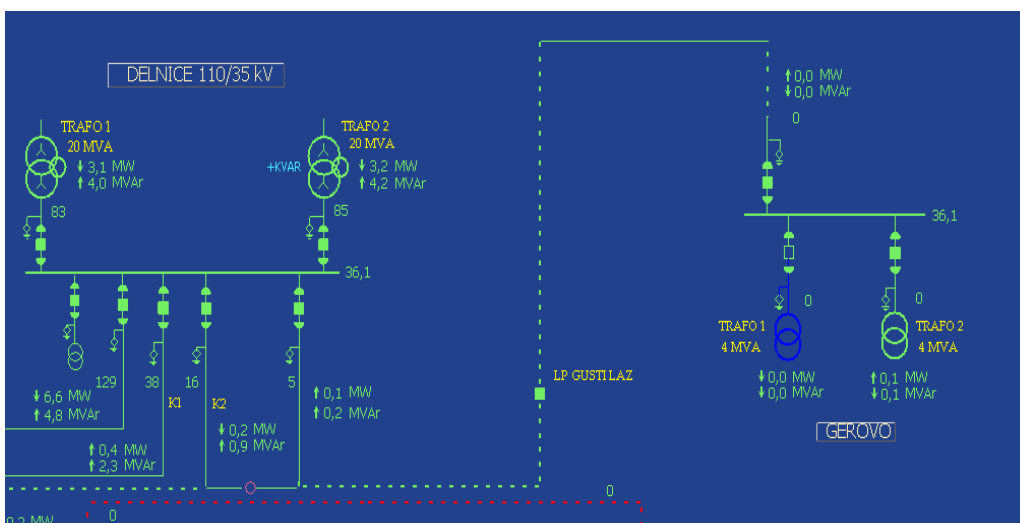


Slika 7. Grafički prikaz ponašanja napona i jalove snage na 20kV sabirnicama u TS 35/20kV Gerovo

Grafički prikaz na slici 7. prikazuje ovisnost jalove snage i napona. Na grafu je prikazano stanje napona i jalove snage prije i nakon ugradnje kompenzacijske prigušnice. Dana 3.12.2024. u TS Gerovo uključena je kompenzacijska prigušnica nazivne snage 3000 kVAr. Iz grafa jasno vidimo da je u trenutku uključivanja kompenzacijske prigušnice došlo do naglog pada napona, kao i smanjenja jalove snage, odnosno, u vrijeme pika, promjena iz -2.8 do +0.5 MVar. Kao što je već navedeno, idealno bi bilo da jalova snaga ide do 0 MVar, međutim 0.5 MVar je rezultat jalove snage koju proizvode 35kV vodovi, kao što je prije spomenuto. Iz grafa se jasno vidi kako promjena jalove snage prati promjenu napona.



Slika 8. Podaci iz WS500, stanje prije ugradnje kompenzacijske prigušnice



Slika 9. Podaci iz WS500, stanje nakon ugradnje kompenzacijske prigušnice

Na slici 8. prikazana je jednopolna shema napojne trafostanice TS 110/35 kV Delnice i trafostanice TS 35/20 kV Gerovo. Shema prikazuje pogonsko stanje prije puštanja kompenzacijske prigušnice u pogon. Iz slike je vidljivo da je u trenutku minimalne potrošnje ($t = 00:00$ h) radna komponenta snage iznosila 0,1 MW, dok je reaktivna komponenta snage bila 2,9 MVar. Takvo pogonsko stanje izrazito je nepovoljno za naponske prilike i stabilnost elektroenergetske mreže, budući da visoka razina jalove snage može uzrokovati povećanje napona te povećati gubitke u prijenosnoj mreži.

Na slici 9. prikazana je jednopolna shema napojne trafostanice TS 110/35 kV Delnice i trafostanice TS 35/20 kV Gerovo. Shema prikazuje pogonsko stanje nakon puštanja kompenzacijske prigušnice u pogon. Iz slike je vidljivo da je u trenutku minimalne potrošnje ($t = 00:00$ h) radna komponenta snage iznosila 0,1 MW, dok je reaktivna komponenta snage bila približno 0,2 MVar.

Usporedbom tokova reaktivne snage na slikama 8. i 9. jasno se vidi ključna razlika u pogonskom stanju prije i nakon puštanja kompenzacijske prigušnice u pogon. Pogonsko stanje s uključenom kompenzacijskom prigušnicom pokazuje da je postignuto rasterećenje 35 kV vodova, pri čemu reaktivnu snagu koju zahtijeva elektroenergetski sustav više ne osigurava prijenosna mreža, već izravno kompenzacijska prigušnica. Na taj način rasterećen je transformator u TS 110/35 kV Delnice, kao i distribucijski vodovi do trafostanice TS 35/20 kV Gerovo, čime se postiže učinkovitije upravljanje naponskim prilikama i smanjenje gubitaka u mreži.



Slika 10. Podaci iz WS500, ispad transformatora T2 u TS 110/35kV Delnice

Slika 10. prikazuje pogonsko stanje u kojem je jedan od transformatora u TS 110/35 kV Delnice ispao iz pogona. Prije ugradnje kompenzacijske prigušnice, regulator napona bio je u položaju 1, zbog čega naponska regulacija više nije bila moguća. Nakon puštanja kompenzacijske prigušnice u pogon, regulator se pomaknuo u položaj 3, čime je omogućena stabilizacija napona. Iz slike je vidljivo da u trenutku ispada transformatora dolazi do naglog povećanja napona. To se događa jer se kapacitivno opterećenje u tom trenutku povećava otprilike dvostruko, što uzrokuje nagli porast napona. Da u ovom slučaju nije bilo kompenzacijske prigušnice, došlo bi do naponskog kolapsa i vjerojatno do ispada i drugog transformatora, što bi moglo ugroziti stabilnost elektroenergetskog sustava.

6. ZAKLJUČAK

Ugradnja kompenzacijskih prigušnica u TS 35/20kV Gerovo i TS 20/0,4kV mHE Curak 1 pokazala se kao efikasna mjera za smanjenje previsokih napona u distribucijskoj mreži Gorskog kotara. Primjenom ove tehnologije uspješno je smanjena kapacitivna reaktivna energija te su stabilizirani naponi, što je dovelo do poboljšanja kvalitete napajanja i pouzdanosti elektroenergetskog sustava.

Osim što je postignuta stabilizacija napona, smanjenjem kapacitivne jalove snage rasterećeni su energetske transformatori, čime je omogućeno bolje iskorištenje njihove snage i smanjenje gubitaka u mreži. Nadalje, dugoročno se ovakvom strategijom može pridonijeti većoj energetskej učinkovitosti distribucijskog sustava, smanjenju operativnih troškova te povećanju sigurnosti napajanja krajnjih potrošača.

Ovo rezultati i primjena kompenzacijskih prigušnica mogu poslužiti kao model za slične problematične mreže u drugim regijama, posebno onima s velikim udjelom kabelačkih vodova i malim opterećenjem. Daljnja istraživanja mogu se usmjeriti na optimizaciju kapaciteta prigušnica te njihovu integraciju s naprednim sustavima upravljanja reaktivnom snagom.

7. LITERATURA

- [1] AbdElhafez, A.A.; Alruways, S.H.; Alsaif Y.A. et al.: „Reactive Power Problem and Solutions: An Overview“, Journal of Power and Energy Engineering, 2017., <https://doi.org/10.4236/jpee.2017.55004>
- [2] Chowdhury, R.R.; Chowdhury, R.; Mondal, S. et al.: „Comparative Analysis of STATCOM and SVC Operation in Electric Transmission Line“, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETA), 2015., ISSN 2250-2459