

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

Prof. dr. sc. Vitomir Komen, dipl.ing.el.
HEP ODS, Elektroprimorje Rijeka
vitomir.komen@hep.hr

PRIJEDLOG RJEŠENJA SMANJENJA POVIŠENIH NAPONA UZROKOVANIH KABLIRANJEM MREŽE I MALOM POTROŠNJOM

SAŽETAK

U distribucijskoj elektroenergetskoj mreži na području Gorskog kotara prisutan je problem previsokih napona. Relativno mala potrošnja, kao i ugradnja sve većeg broja kabela, dovele su do problema prisutnosti kapacitivne reaktivne energije, pa i previsokih napona. Predmet analize u ovom radu je ugradnja četiri prigušnice u elektroenergetsku mrežu Gorskog kotara, i to u trafostanicama TS 20/0,4 kV mHE Curak 1, TS 35/20 kV Kupjak, TS 35/20 kV Gerovo i TS 35/20 kV Vrata. U sklopu GreenSwitch projekta planirana je ugradnja prigušnica u trafostanice TS Curak 1, TS Kupjak i TS Gerovo. Cilj proračuna provedenog u radu je odabrati odgovarajuće prigušnice za spomenute trafostanice.

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

SOLUTION PROPOSAL TO REDUCE HIGH VOLTAGE CAUSED BY NETWORK CABLING AND LOW CONSUMPTIONSUMMARY

There is a problem of too high voltages in the power distribution network in the area of Gorski kotar. Relatively low consumption, as well as the installation of an increasing number of cables, led to the problem of the presence of capacitive reactive energy, and even too high voltages. The subject of the analysis in this paper is the installation of four ballasts in the power grid of Gorski kotar, namely in substations TS 20/0.4 kV mHE Curak 1, TS 35/20 kV Kupjak, TS 35/20 kV Gerovo and TS 35/20 kV Vrata. As part of the GreenSwitch project, it is planned to install ballasts in TS Curak 1, TS Kupjak and TS Gerovo substations. The goal of the calculation carried out in the work is to select the appropriate ballasts for the mentioned substations.

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

1. UVOD

Područje Gorskog kotara u Primorsko-goranskoj županiji karakterizira veliki prostor s malim brojem stanovnika. Zbog toga prisutna je izrazito mala potrošnja električne energije. Donedavno je elektroenergetska mreža na razini distribucije bila induktivnog karaktera, mreža se sastojala od velikog udjela nadzemnih vodova. Nakon ledoloma 2014. godine i urušenja većeg dijela nadzemne mreže, ugradnjom velikog broja kabela došlo je do pojave kapacitivne jalove energije velikog iznosa. Također, jedan od problema postali su i previsoki naponi, kao rezultat kapaciteta u vrlo malo opterećenoj mreži. To se najizraženije vidi na krajevima dugačkih kablskih vodova zbog pojave „Ferantijevog“ efekta.

Razmatrana su rješenja kako popraviti stanje napona u mreži. Rješenje koje se nametnulo je ugradnja prigušnica radi kompenzacije jalove energije na 20 kV razini.

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

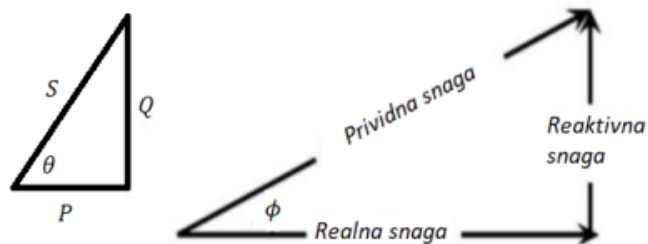
$$S = P + jQ. \quad (3)$$

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 ($\alpha > \beta$).

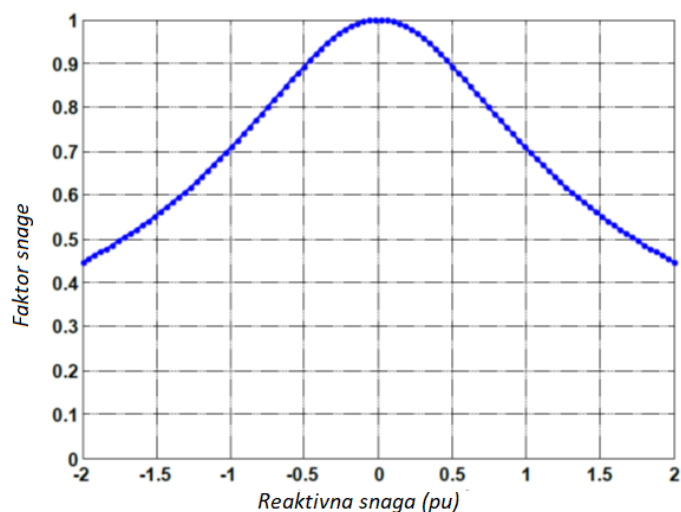
S , P i Q se mogu prikazati u obliku trokuta, poznatog kao trokut snage (slika 1.). Iz trokuta snage se može zaključiti:

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: $Q = \operatorname{Im}(S) = S \sin \theta$;
4. faktor snage: $\frac{P}{S} = \cos \theta$.



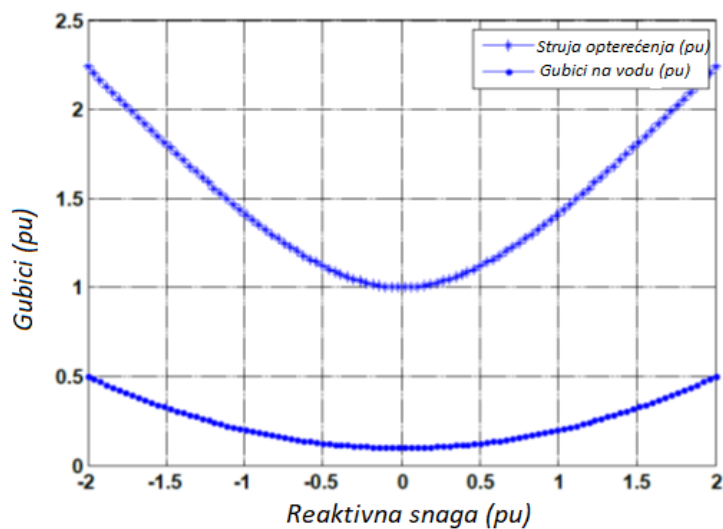
Slika 1. Trokut snage

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. NADZEMNI VODOVI I KABELI

Nadzemni 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 nadzemni vod ili kabel ponaša se kao kondenzator jer uzima kapacitivnu, a proizvodi induktivnu jalovu snagu:

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

Opterećeni nadzemni vod ili kabel troši induktivnu jalovu snagu:

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

Kad je vod opterećen svojom prirodnom snagom, vrijedi

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

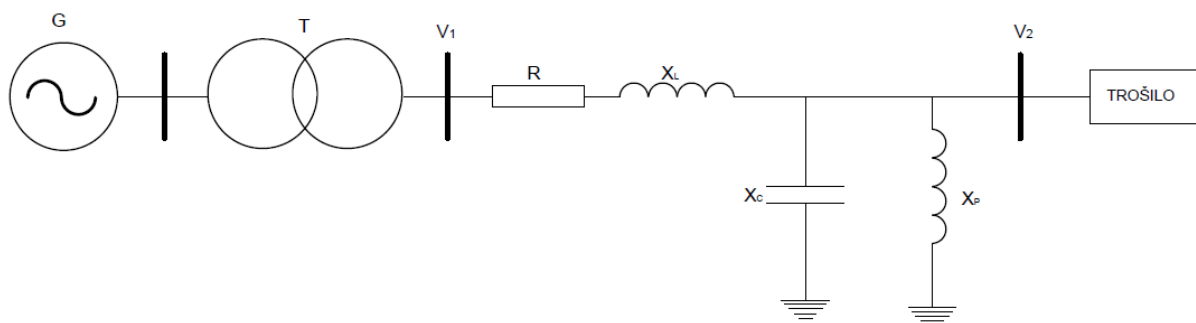
odnosno

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

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



Slika 4. Shema – spoj prigušnice

Kako bi se riješili problemi previsokih napona u distribucijskoj elektroenergetskoj mreži na području Gorskog kotara, u ovom radu razmatra se ugradnja kompenzacijskih prigušnica u četiri trafostanice:

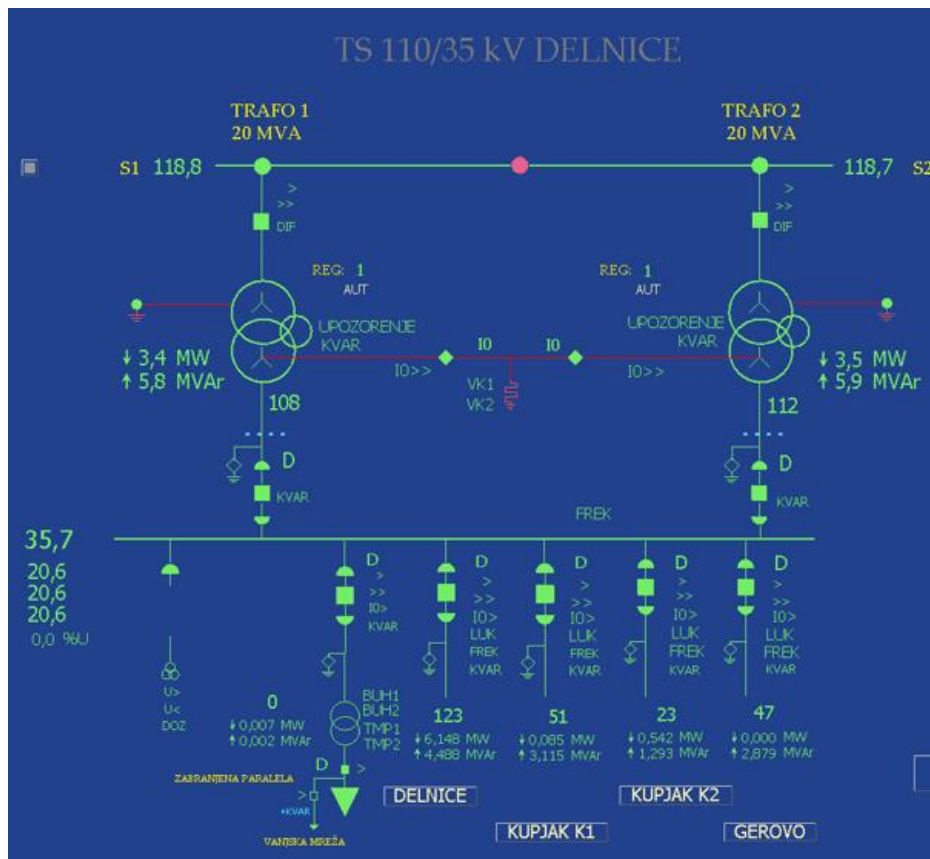
- TS 35/20 kV Kupjak,
- TS 35/20 kV Gerovo,
- TS 20/0,4 kV mHE Curak 1,
- TS 35/20 kV Vrata.

5. ANALIZA U NEPLAN-U

Za potrebe proračuna, u programskom paketu NEPLAN napravljen je model elektroenergetskog sustava dijela Gorskog kotara koji se napaja iz TS 110/35 kV Delnice. U razmatranje je uzeto pet trafostanica: TS 35/20 kV Kupjak, TS 35/20 kV Gerovo, TS 20/0,4 kV mHE Curak 1, TS 35/20 kV Vrata i TS 35/20 kV Delnice. Daljnjom analizom odabrane su četiri trafostanice za koje se predlaže ugradnja prigušnica:

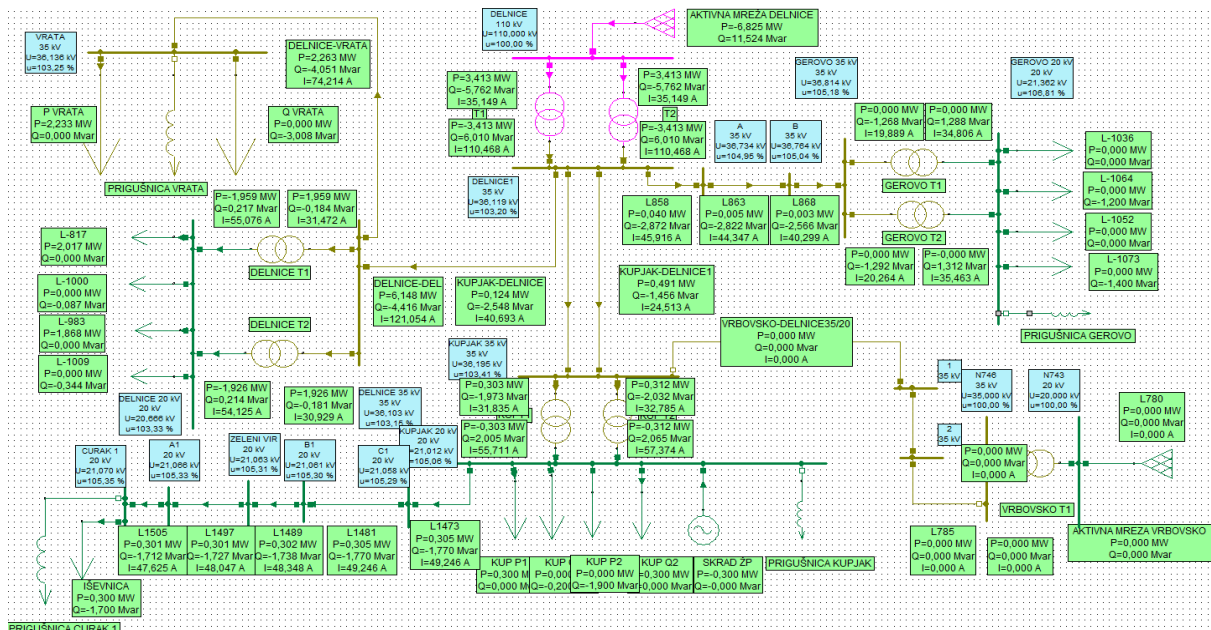
- TS 35/20 kV Kupjak,
- TS 35/20 kV Gerovo,
- TS 20/0,4 kV mHE Curak 1,
- TS 35/20 kV Vrata.

Model u NEPLAN-u napravljen je na osnovu podataka uzetih iz WS500 za minimalno opterećenje sustava. Slika 3 prikazuje shemu TS Delnice u kojoj su vidljive snage (P i Q) za minimalno opterećenje sustava.



Slika 5. Shema TS Delnice

Može se vidjeti da je radna komponenta snage 6,9 MW, dok je reaktivna komponenta snage 11,7 MVA. Taj iznos reaktivne komponente snage vrlo je nepovoljan za naponske prilike u mreži. Može se zaključiti da se prijenosni sustav ponaša kao prigušnica – uzima induktivnu reaktivnu snagu iz distribucijskog sustava, a daje kapacitivnu reaktivnu snagu u sustav. Zbog toga se jalova snaga prenosi cijelim sustavom te dodatno opterećuje vodove i smanjuje samu prijenosnu moć vodova. Na slici 6. nalazi se model elektroenergetskog sustava dijela Gorskog kotara u NEPLAN-u.



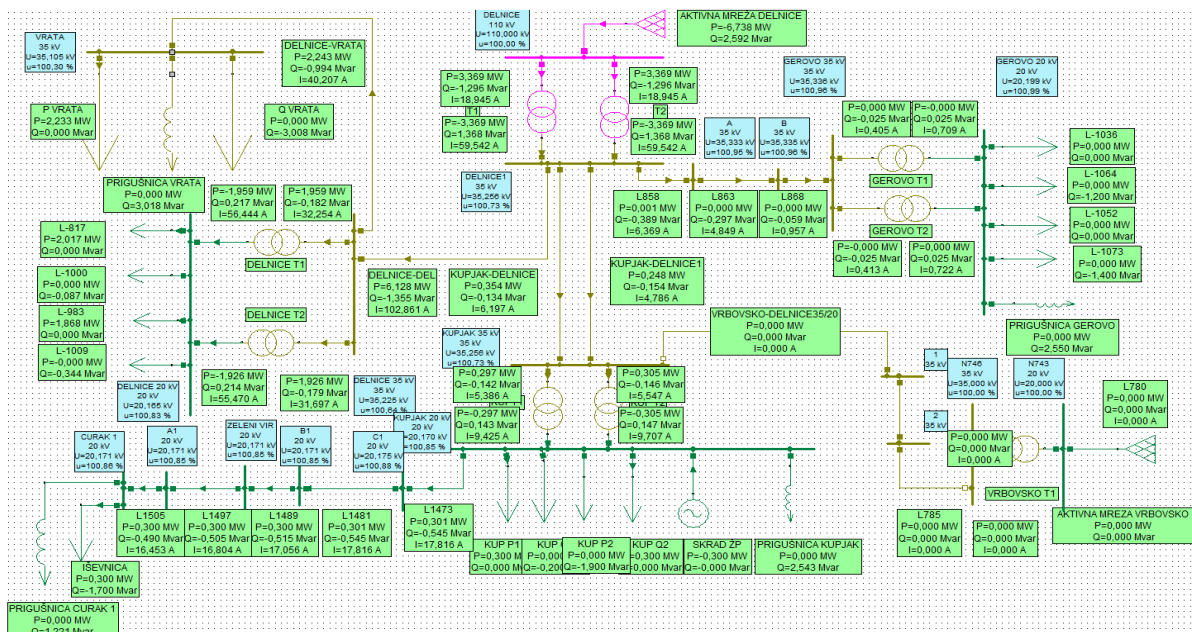
Slika 6. Model elektroenergetskog sustava dijela Gorskog kotara u NEPLAN-u

Na temelju rezultata dobivenih u NEPLAN-u, i u usporedbi s podacima iz WS500, za postavljanje prigušnica odabrane su prethodno spomenute četiri trafostanice i vrijednosti prigušnica. Podaci su navedeni u tablici I.

Tablica I. Snage odabranih prigušnica

Trafostanica	Snaga prigušnice
TS 35/20 kV Kupjak	3 MVar
TS 35/20 kV Gerovo	3 MVar
TS 20/0,4 kV mHE Curak 1	1.2 MVar
TS 35/20 kV Vrata	3 MVar

Slika 7. prikazuje elektroenergetski sustav dijela Gorskog kotara s ugrađenim prigušnicama.



Slika 7. Model elektroenergetskog sustava dijela Gorskog kotara s ugrađenim prigušnicama

Tablica II. prikazuje strujna opterećenja prije i nakon ugradnje prigušnica.

Tablica II. Strujna opterećenja prije i nakon ugradnje prigušnica

35 kV VODOVI	Struja bez prigušnica	Struja s prigušnicama
TS 35/20 kV Delnice - TS 35/20 kV Vrata	74 A	40 A
TS 110/35 kV Delnice - TS 35/20 kV Delnice	121 A	102 A
TS 35/20 kV Kupjak - TS 110/35 kV Delnice	40.639 A	6.197 A
TS 35/20 kV Kupjak - TS 110/35 kV Delnice	24.513 A	4.786 A
TS 110/35 kV Delnice - TS 35/20 kV Gerovo	45.916 A	6.369 A

Tablica III. prikazuje iznos aktivne i reaktivne komponente snage TS 110/35 kV Delnice prije i poslije ugradnje kompenzacijskih prigušnica.

Tablica III. Aktivna i reaktivna komponenta snage prije i nakon ugradnje prigušnica

	Aktivna snaga	Reaktivna snaga
Bez prigušnica	6,825 MW	11,524 MVar
S prigušnicama	6,738 MW	2,592 MVar

Iz tablice III. može se zaključiti da je reaktivna snaga koja se razmjenjuje s prijenosnom mrežom znatno manja s prigušnicama, u odnosu na slučaj bez prigušnica. Također, iz tablice je vidljivo da je prije ugradnje prigušnica kapacitivno opterećenje transformatora iznosilo 11,524 MVar, što za posljedicu ima povećanje napona na sekundarnoj strani na TS 110/35 kV Delnice. To povećanje napona transformator pokušava kompenzirati spuštanjem regulacijske preklopke, što često nije moguće jer se preklopka već nalazi na najnižoj poziciji.

Nakon ugradnje prigušnica, kapacitivno opterećenje transformatora znatno se smanjilo. Također, ugradnjom prigušnica došlo je do znatnog poboljšanja naponskih prilika u sustavu i povećanja strujne opteretivosti vodova te smanjenja gubitaka u sustavu.

6. ZAKLJUČAK

Jedan od izazova provedenog proračuna bio je napraviti statički model koji će što vjernije služiti u analizi mreže. Na osnovu dobivenih rezultata odabrane su prigušnice navedenih vrijednosti. Osim što popravljaju naponske prilike u mreži, prigušnice imaju pozitivan učinak na automatsku regulaciju u TS Delnice. Na temelju proračuna prikazanog u ovom radu predlaže se ugradnja četiri prigušnice na 20 kV sabirnicama. Jedna bi bila smještena u TS 20/0,4 kV mHE Curak 1, snage 1.2 MVar, druga u TS 35/20 kV Kupjak, snage 3 MVar, treća u TS 35/20 kV Gerovo, snage 3 MVar i četvrta u TS 35/20 kV Vrata, snage 3 MVar.

Elektroprimorje Rijeka – HEP ODS, u suradnji s partnerima iz Slovenije, Hrvatske i Austrije prijavilo je na CEF (eng. Connecting Europe Facilities) fond Europske komisije GreenSwitch projekt. Projekt GreenSwitch opsežan je 6-godišnji projekt kojeg karakterizira inovativna i učinkovita inkorporacija novih tehnologija i naprednih funkcionalnosti za međusektorsko i prekogranično poboljšanje infrastrukture elektroenergetskog sustava, što rezultira većim kapacitetom mrežnog hostinga, učinkovitom integracijom novih tipova korisnika mreže, optimizacijom budućih ulaganja te poboljšanjem sigurnosti opskrbe i kvalitete usluge u Austriji, Hrvatskoj i Sloveniji. Prijavom projekta na CEF fond zatraženo je sufinanciranje troškova navedenih u projektu. Odlukom Europske komisije od 08. prosinca 2022. godine, odobreno je sufinanciranje GreenSwitch projekta u maksimalno traženom iznosu od 50%. Dio GreenSwitch projekta je

i ugradnja prigušnica u tri trafostanice: TS 20/0,4 kV mHE Curak 1, snage 1.2 MVar, TS 35/20 kV Kupjak, snage 3 MVar i TS 35/20 kV Gerovo, snage 3 MVar. Rok za završetak radova za TS Kupjak i TS Gerovo je 2024. godina, a za TS Curak 1 2026. godina.

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