

DOI: [10.46793/CIGRE37.C2.13](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C2.13)

C2.13

**OPTIMIZACIJA I POBOLJŠANJE NAPONSKIH PRILIKA U EES SRBIJE
KORIŠĆENJEM VARIJABILNIH ŠANT REAKTORA****OPTIMIZATION AND IMPROVEMENT OF VOLTAGE CONDITIONS IN THE SERBIAN
POWER SYSTEM USING VARIABLE SHUNT REACTORS****Pavle Gorašević *, Nebojša Jović, Nemanja Miljanić, Milan Ivanović, Ognjen
Pantović, Nikola Savić, Nemanja Vukojičić**

Kratak sadržaj: Dugotrajna izloženost naponima višim od dozvoljenih dovodi do skraćenja životnog veka elektroenergetske opreme, pri čemu su najviše ugroženi energetske i merni transformatori. Rad u režimu napona viših od dozvoljenih dovodi do dodatnog naprezanja opreme, a posledice mogu biti pojedinačni ispadi celih postrojenja i trajni kvarovi energetskih transformatora. Ova tematika je istraživana u sklopu različitih naučnih organizacija (IEEE, CIGRE) sa zaključcima da se nazivni naponi opreme moraju poštovati kako bi se izbeglo skraćenje životnog veka i smanjila učestanost kvarova u prenosnom sistemu. Cilj ovog rada je određivanje optimalnih lokacija za ugradnju kompenzacionih uređaja, njihovih instalisanih kapaciteta, kao i tehničkih karakteristika samih uređaja za regulaciju napona u visokonaponskoj mreži u vlasništvu EMS AD, pre svega sa ciljem sniženja napona u prenosnom sistemu tokom kritičnih perioda godine, ali i poboljšanjem sposobnosti upravljanja naponskim prilikama u celom sistemu. Dat je primer procene isplativosti ugradnje varijabilne prigušnice u slučaju izloženosti visokonaponske opreme ubrzanom starenju.

Ključne reči: naponske prilike, varijabilni šant reaktori, naponska regulacija, gubici u prenosnom sistemu, kontrola napona

Abstract: Prolonged exposure to voltages exceeding permissible levels leads to a reduction in the lifespan of power system equipment, with power and measurement transformers being the most affected. Operating under excessive voltage conditions imposes additional stress on the equipment, which can result in individual outages of entire substations and permanent failures of power transformers. This issue has been extensively researched within various scientific organizations (IEEE, CIGRE), with conclusions emphasizing that nominal equipment voltage ratings must be strictly adhered to in order to prevent a reduction in lifespan and minimize the

* Pavle Gorašević, Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o, gorasevic.pavle@gmail.com

Nikola Savić, Elektromreža Srbije - EMS AD, nikola.savic@ems.rs

Nemanja Vukojičić, Elektromreža Srbije - EMS AD, Nemanja.Vukojiacic@ems.rs

Nebojša Jović, Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o, nebojsa.jovic@ekc-ltd.com

Nemanja Miljanić, Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o, nemanja.miljanic@ekc-ltd.com

Milan Ivanović, Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o, milan.ivanovic@ekc-ltd.com

Ognjen Pantović, Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o, ognjen.pantovic@ekc-ltd.com

frequency of failures in the transmission system. The objective of this study is to determine the optimal locations for installing compensation devices, their installed capacities, and the technical characteristics of the voltage regulation equipment in the high-voltage network owned by EMS JSC. The primary goal is to reduce voltage levels in the transmission system during critical periods of the year while also improving the overall capability of voltage control across the system. An example of a feasibility assessment for the installation of a variable reactor in the event of high-voltage equipment being exposed to accelerated aging has been presented.

Key words: *voltage profile, variable shunt reactors, voltage regulation, voltage control, power system losses*

1 UVOD

Tokom prethodnih nekoliko godina dolazi do drastičnog povećanja radnih napona u čitavom prenosnom sistemu (400, 220 i 110 kV) Jugoistočne Evrope, naročito u operativnim režimima sa nižim konzumom (sezonski tokom proleća i jeseni) kao i tokom noćnih režima u toku skoro čitave godine.

Dugotrajna izloženost naponima višim od dozvoljenih dovodi do skraćanja životnog veka elektroenergetske opreme, pri čemu su najviše ugroženi energetske i merni transformatori. Rad u režimu napona viših od dozvoljenih dovodi do dodatnog naprežanja opreme, a posledice mogu biti pojedinačni ispadi celih postrojenja i trajni kvarovi energetskih transformatora.

U periodu od 2021. godine do danas dolazi do značajnijeg širenja problema sa regulacijom napona u pomenutim režimima na čitav prenosni sistem R. Srbije usled izgradnje novih 400 kV postrojenja i dalekovoda, kao i usled smanjenja potrošnje na distributivnom nivou i preraspodele tokova snaga u regionu i po naponskim nivoima usled sve veće integracije obnovljivih izvora.

Usled pojave operativnih problema sa previsokim naponima kao i usled očekivane veće integracije obnovljivih izvora u narednih 3-5 godina, realno je očekivati da će se uočeni problemi povećavati, usled dodatne izgradnje prenosne infrastrukture, te je zaključeno da je neophodno odrediti nove optimalne lokacije i veličine kompenzacionih uređaja koji bi bili ugrađeni u planirana i postojeća postrojenja prenosne mreže R. Srbije.

Cilj ovog rada je određivanje optimalnih lokacija za ugradnju kompenzacionih uređaja, njihovih instaliranih kapaciteta, kao i tehničkih karakteristika samih uređaja za regulaciju napona u visokonaponskoj mreži u vlasništvu EMS AD, pre svega sa ciljem sniženja napona u prenosnom sistemu tokom kritičnih perioda godine, ali i poboljšanjem sposobnosti upravljanja naponskim prilikama u celom sistemu.

Same lokacije ugradnje su analizirane iz tehno-ekonomske perspektive uz uvažavanje mogućnosti ugradnje u već postojeća postrojenja (ili u postrojenja koja su u fazi planiranja i izgradnje) u vlasništvu EMS AD.

Za identifikaciju novih kapaciteta za upravljanje naponskim profilom EES-a izvršena je analiza naponskog profila elektroenergetskog sistema na osnovu:

1. Podataka o trenutnom stanju EES Srbije i modelima koji reprezentuju trenutno stanje,
2. Modela koji reprezentuju planirano stanje za petogodišnji period saglasno aktuelnom Planu razvoja.

U okviru analiza trenutnog stanja razmotreni su kritični intervali tokom godine (pre svega u proleće i jesen), kao i različita hidrometeorološka stanja (niski i visoki dotoci na Dunavu i Drinsko - Limskom slivu, scenariji visoke i niske proizvodnje električne energije iz vetroelektrana itd.). Takođe su uvažene realne mogućnosti i ograničenja trenutnih kapaciteta za regulaciju napona u prenosnom sistemu Srbije (realna ograničenja pogonskih dijagrama generatora, ograničenja po ugrađenoj opremi u pojedinim elektranama; kao što je ograničenje VE Čibuk po strujnom opterećenju niže-naponskih kablova u samoj elektrani, blok transformator TENT B G1, itd.).

Rad je podeljen na dva dela:

- Određivanje optimalnih lokacija za ugradnju kompenzacionih uređaja i određivanje njihovih instalisanih kapaciteta i tehničkih karakteristika uvažavajući tehno-ekonomske principe i mogućnost ugradnje u postojeća postrojenja (ili postrojenja koja su u fazi planiranja i izgradnje).
- Analiza načina eksploatacije i određivanje opsega regulacije prethodno predloženih uređaja.

2 ANALIZA OPTIMALNIH LOKACIJA I KAPACITETA

U ovom poglavlju je opisana metodologija kojom se došlo do optimalnih rešenja u cilju poboljšanja naponskih prilika u prenosnoj mreži.

2.1 Analiza naponskih prilika u EES Srbije

Izvršena je statistička analiza dostavljenih srednje satnih merenja napona u tri godine (2021, 2022 i 2023) kako bi bile utvrđene maksimalne vrednosti napona po čvorištima koje se javljaju u 99%, 99.5% i 99.9% operativnih sati. Nakon određivanja ovih statističkih pokazatelja, usvojene su vrednosti za 99.5% operativnih sati.

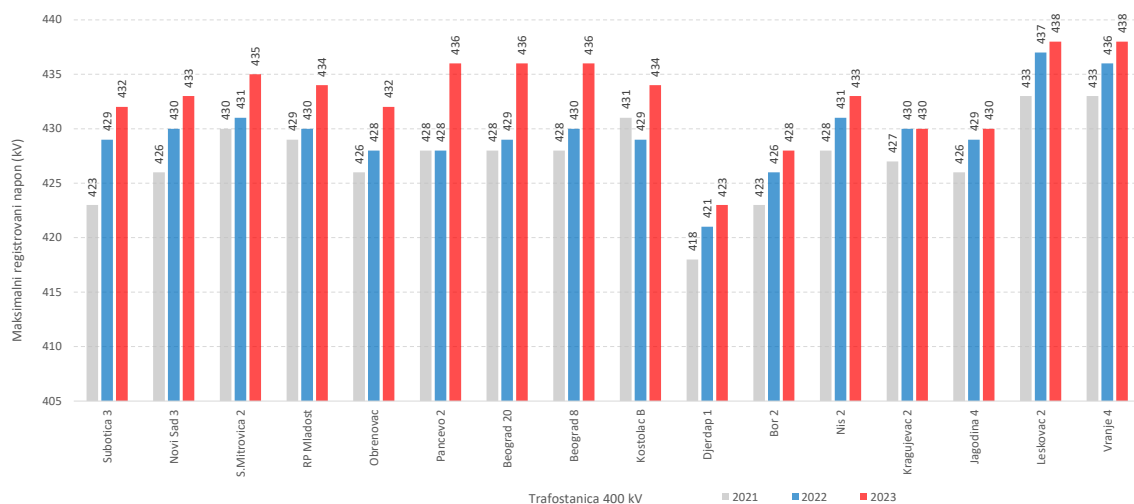
Na osnovu analize satnih vrednosti profila napona po godinama, uočava se očigledan trend porasta broja operativnih režima sa naponima iznad dozvoljenih vrednosti. Najkritičnija situacija je u TS Vranje 4, 4 500 sati za 2021. godinu, malo više od 7 000 sati za 2022. godinu i oko 7 500 sati za 2023. godinu, dok je situacija u RP Đerdap na granici dozvoljenih vrednosti sa manjim brojem sati u kojima je napon bio iznad dozvoljenih vrednosti za sve tri godine.

Pored pomenutih postrojenja uočene su vrednosti napona van dozvoljenih granica u interkonektivnim transformatorskim stanicama TS Niš 2 (oko 4 000 sati naponi preko dozvoljene granice) i TS Subotica 3 (oko 1 100 sati).

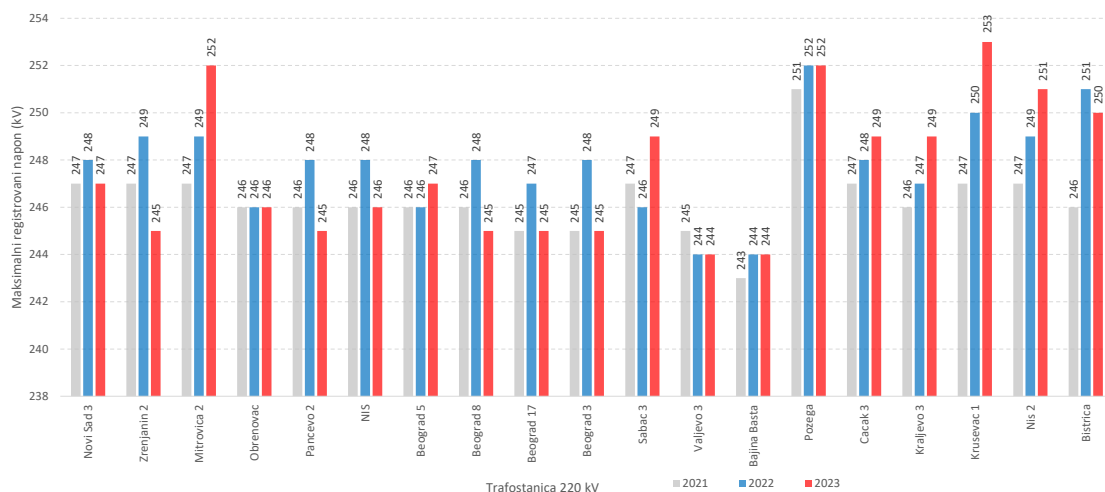
Naponske prilike u TS Sremska Mitrovica 2 su takođe alarmantne kao posledica povišenih napona u čitavom EES Srbije i ograničenih mogućnosti za upravljanje naponima uz pomoć generatorskih jedinica ali i veoma visokih napona u susednoj mreži Bosne i Hercegovine.

U 220 kV mreži, najkritičnija situacija je u TS Požega sa preko 1000 sati sa naponima van granica u toku 2023. godine.

Maksimalne vrednosti napona koje se javljaju u 99.5 % po analiziranim godinama su prikazane na narednim slikama.



Sl. 2-1: Maksimalni registrovani naponi po godinama (99.5%) na 400 kV naponskom nivou



Sl. 2-2: Maksimalni registrovani naponi po godinama (99.5%) na 220 kV naponskom nivou

Metodom minimizacije jednovremenih odstupanja od dobijenih maksimalnih vrednosti napona po čvorovima koji se javljaju u 99.5% operativnih sati, odabran je reprezentativni režim 05/05/2023 u 03h30 za analizu optimalnih lokacija i optimalnog kapaciteta kompenzacionih uređaja¹.

Na osnovu rezultata izrađen je model stanja (*snapshot* model) za 05/05/2023 u 03h30 na osnovu dostavljenih podataka iz odgovarajućeg *UCTE* modela sa pratećim fajlovima. Kao osnova za izradu modela za 05/05/2023 u 03h30, korišćen je referentni spojeni model EES-a Republike Srbije sa susedima za 2024. godinu (letnji minimum).

2.2 Opis metodologije odabira optimalnih lokacija

Uzimajući u obzir da su EMS AD i CGES započeli projekte ugradnje varijabilnih otočnih reaktora u TS Vranje 4 i TS Lastva, uvažava se postojanje varijabilnih reaktora u sledećim postrojenjima:

¹ Ovakav režim je odabran kako bi se uvažile maksimalne potrebe za kompenzacijom viška reaktivne snage u sistemu Srbije dok bi se u malom broju operativnih sati (oko 45 sati) dozvolila kratkotrajna odstupanja u cilju tehnno-ekonomske efikasnosti predloženog rešenja.

- 400/110 kV TS Lastva - 250 MVar (420 kV)
- 400/110 kV TS Vranje 4 - 200 MVar (420 kV)

Na osnovu analize prostornih mogućnosti za ugradnju prigušnica u objektima EMS AD, odabrana su sledeća postrojenja-kandidati za analizu novih optimalnih lokacija:

- 400 kV postrojenja: TS Beograd 8, TS Beograd 20, TS Novi Sad 3, TS Srbobran, TS Subotica 3, TS Sombor 3, TS Niš 2, TS Kraljevo 3, TS Kragujevac 2
- 220 kV postrojenja: TS Šabac 3, TS Valjevo 3, TS Čačak, TS Požega, TS Bistrica

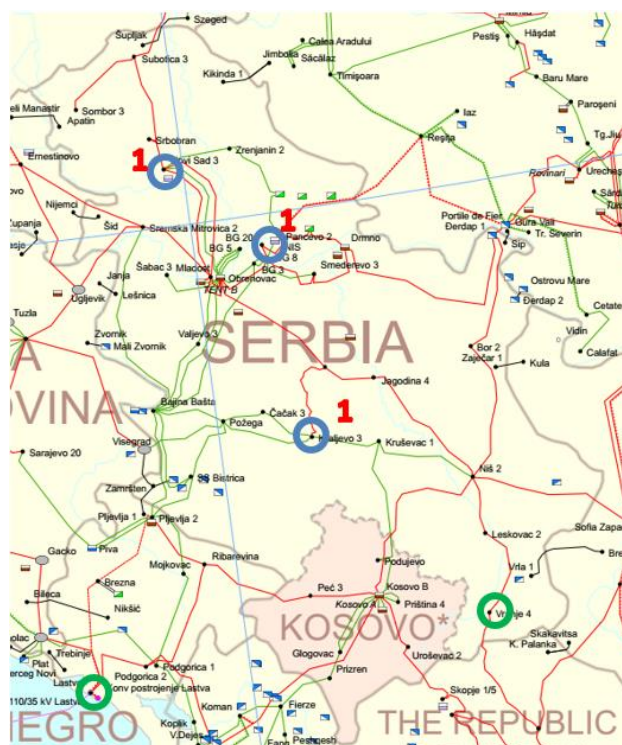
Za odabir optimalnih lokacija usvojena je sledeća metodologija za analize "postojećeg stanja" (za automatizaciju proračuna korišćen je *Python* kod):

1. U svakoj iteraciji proračuna analizira se uticaj izgradnje prigušnice u postrojenjima-kandidatima na ukupan kumulativ odstupanja napona od željene (ciljne) vrednosti
2. Nakon svake iteracije ostaje priključena prigušnica sa najvećim doprinosom u minimizaciji odstupanja od maksimalno dozvoljenih vrednosti
3. Dimenzionisanje prigušnica je tipsko prema raspoloživim tehničkim karakteristikama proizvođača (200 MVar ili 250 MVar)
4. Usvojene željene vrednosti napona nakon ugradnje kompenzacije:
 - 420/246 kV (bez margine sigurnosti)
 - 418/242 kV (sa marginom sigurnosti)

2.3 Predlog optimalnog rešenja

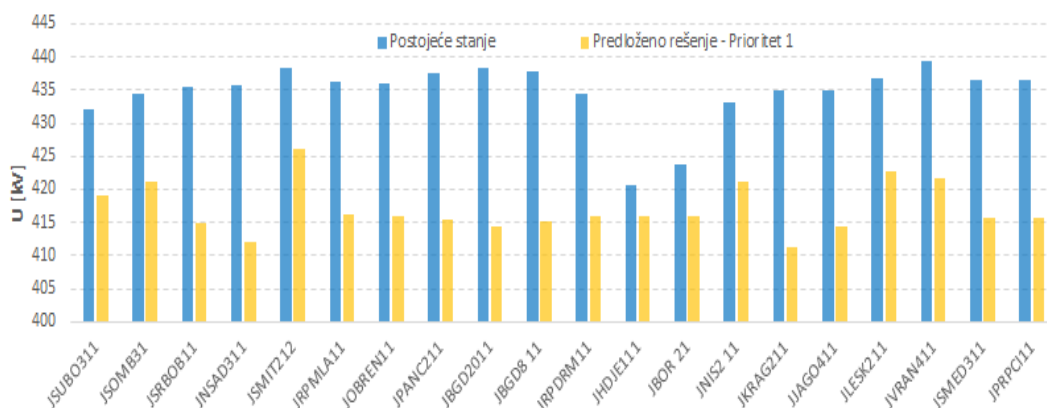
Na osnovu izvršenih analiza i dobijenih rezultata proračuna izvedeni su sledeći zaključci i preporuke o optimalnim lokacijama za ugradnju prigušnica:

- Ugradnja kompenzacionih uređaja (varijabilnih prigušnica od 250 MVar) u 400 kV postrojenja na objektima u TS Novi Sad 3, TS Beograd 20 i TS Kraljevo 3

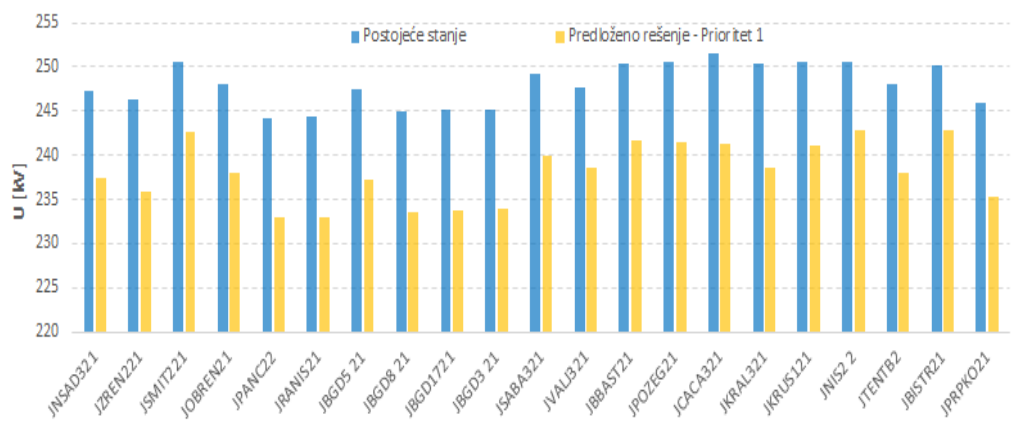


Sl. 2-3: Predlog rešenja ugradnje kompenzacionih uređaja na postojećoj šemi sistema

Naponi u prenosnoj mreži pre i posle ugradnje predloženog rešenja su prikazani na narednim slikama.



Sl. 2-4: Naponi u postojećim čvorovima 400 kV mreže pre i posle implementacije predloženog rešenja



Sl. 2-5: Naponi u postojećim čvorovima 220 kV mreže pre i posle implementacije predloženog rešenja

3 ODREĐIVANJE NAČINA EKSPLOATACIJE

U ovom poglavlju biće prikazana analiza načina eksploatacije koja direktno utiče na naponske prilike i eksploataciju sistema.

3.1 Analiza eksploatacionih karakteristika

Posmatrana su četiri karakteristična dana za analize eksploatacionih karakteristika:

- 5. maj 2023. – dan sa najvećim zabeleženim vrednostima napona u toku 2023. godine
- 13. septembar 2023. – dan sa najvećom zabeleženom razlikom između satnih vrednosti maksimalnog i minimalnog napona po čvorovima u toku dana
- 12. januar 2024. – dan u kojem je zabeležena maksimalna potrošnja u toku zimskog perioda 2024. godine
- 17. jul 2024. – dan u kojem je zabeležena maksimalna potrošnja u toku letnjeg perioda 2024. godine

Za izradu modela mreže su korišćeni regionalni DACF modeli. Regionalni modeli su podešavani i verifikovani poređenjem napona po čvorovima dobijenim iz simulacija tokova snaga sa izmerenim vrednostima napona u analiziranim karakterističnim danima.

Za svaki sat u navedenim karakterističnim danima izvršena je analiza zahtevanih položaja na regulacionim sklopkama predloženih kompenzacionih uređaja u cilju održavanja naponskih prilika unutar dozvoljenih granica i optimizaciji gubitaka u prenosnom sistemu. Analizirane su sledeće tehničke karakteristike predloženih kompenzacionih uređaja:

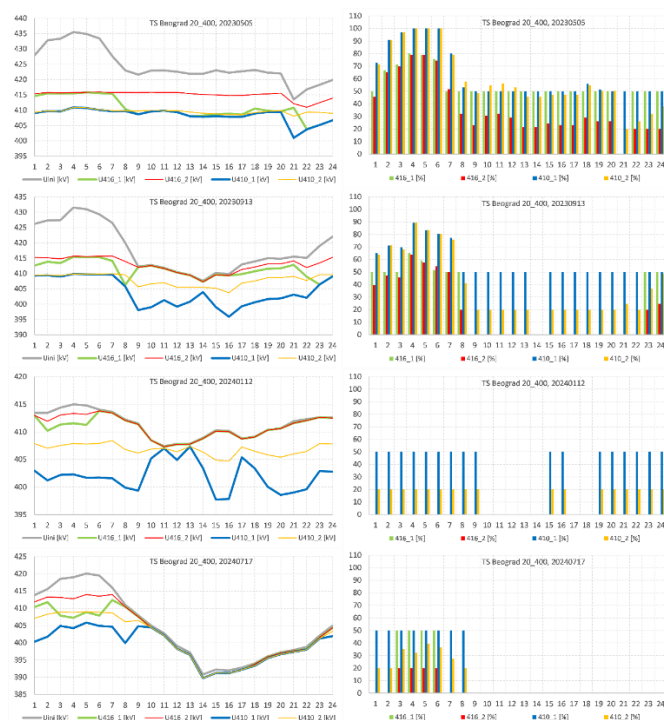
Tipiska varijabilna prigušnica – Tip 1 od 250 MVar (420 kV) :

- Regulacioni opseg: 50 - 100%
- Zadata vrednost napona: 416 kV i 410 kV
- Broj otepa: 33 (-3.43575 Mvar / otepa)
- Lokacija: TS Novi Sad 3, TS Beograd 20, TS Kraljevo 3

Tipiska varijabilna prigušnica – Tip 2 od 250 MVar (420 kV) :

- Regulacioni opseg: 20 - 100%
- Zadata vrednost napona: 416 kV i 410 kV
- Broj otepa: 53 (-3.4228 Mvar / otepa)
- Lokacija: TS Novi Sad 3, TS Beograd 20, TS Kraljevo 3

Analizom eksploatacionih karakteristika za Tip1 i Tip 2 prigušnice dobijaju se sledeći grafici (TS Beograd 20 je uzeta kao reprezentativni primer promena naponskih prilika kao posledica ugradnje prigušnica) za karakteristične dane. Grafici na levoj strani označavaju promenu napona posle uvođenja kompenzacije prigušnice, dok grafici na desnoj strani pokazuju aktiviranost raspoloživog opsega regulacije tokom jednog dana.



Sl. 3-1: Eksploatacione karakteristike za prigušnicu priključenu u TS Beograd 20 za obe varijante regulacionog opsega i setpointa napona za 4 karakteristična dana

Analizom rezultata prikazanih na Sl. 3-1 zaključuje se:

- Za TS Beograd 20 potrebno je da prigušnica bude u pogonu sezonski (jesen, proleće)
- Za Tip 1 prigušnice potrebna je angažovanost opsega regulacije od 60% do 100% tokom noćnih režima i 50% tokom dnevnih režima.
- Za tip 2 prigušnice potrebna je angažovanost opsega regulacije od 50% do 100% tokom noćnih režima i 20% do 50% tokom dnevnih režima.

Na Sl. 3-2 prikazani su tokovi snaga i naponske prilike u mreži R. Srbije oko TS Beograd 20 kako bi se dobio uvid u način eksploatacije prigušnice priključene na TS Beograd 20.



Sl. 3-2: Tokovi snaga i naponske prilike u prenosnoj mreži RS – centar

4 TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

Stalna izloženost prekomernim naponskim vrednostima negativno utiče na dugoročni rad i pouzdanost elektroenergetske opreme. Kada su njeni delovi trajno izloženi naponskim vrednostima većim od dozvoljenih, dolazi do magnetnog i dielektričnog stresa, što na kraju skraćuje njen očekivani životni vek. Ovo dovodi do smanjenja efikasnosti i povećanja operativnih troškova. Ugradnja kompenzacionog uređaja može biti efikasno rešenje, jer omogućava stabilizaciju i smanjenje napona tokom kritičnih radnih režima. S'obzirom na sve učestaliji problem visokih napona i njihov očekivani dalji porast, sprovedena je analiza isplativosti ugradnje uređaja za kompenzaciju reaktivne snage.

Za procenu opravdanosti ulaganja u kompenzacioni uređaj, sprovedena je tehno-ekonomska analiza. Cilj analize je da pokaže da je ulaganje u kompenzacioni uređaj opravdano ukoliko troškovi njegove ugradnje ne premašuju značajne uštede ostvarene procenjenim produženjem životnog veka opreme koja izložena visokim naponima.

Ključni koraci tehno-ekonomske analize obuhvataju sledeće aspekte:

- Utvrđivanje troškova u slučaju da se kompenzacioni uređaj ne ugradi, uključujući povećane operativne troškove i skraćenje životnog veka visokonaponske opreme.
- Procenu troškova vezanih za instalaciju kompenzacionog uređaja, koja uključuje inicijalne troškove nabavke kao i izbegavanje troškove vezanih za skraćenje životnog veka opreme.

Na nivou čitavog sistema EMS posmatrajući TS u 400 kV mreži, izloženosti pojedinih trafo stanica naponima većim od dozvoljenih su prikazane u sledećoj tabeli:

Tab. 4-1: Kumulativna procena napona van dozvoljenih granica - Godišnji tehnički izveštaj EMS-a iz 2023

Napon van dozvoljenih granica	Kumulativni procenat
TS	2023
Vranje 4	87.8%
Leskovac 2	73.1%
Sremska Mitrovica 2	54.7%
Cibuk	49.0%
Nis 2	48.0%
Beograd 8	44.3%
Drmno	40.7%
Beograd 20	40.2%
Pancevo 2	39.0%
Novi sad 3	31.6%
Kraljevo 3	30.9%
Jagodina	25.5%
Obrenovac	25.2%
Kragujevac 2	23.1%
Mladost	22.0%
Subotica 3	15.8%
Bor 2	12.0%

U nastavku je za potrebe analize isplativosti uzet primer elektroenergetske opreme za određeni region koja je direktno izložena visokim naponima, i za koju važe sledeće ulazne pretpostavke:

- Ukupna vrednost visokonaponske opreme u području izloženom nepovoljnim naponskim prilikama je 17.9 miliona evra, (analizirano je puštanje u rad sa u 2015. godini).
- Projektovani vek života većine visokonaponske opreme obično je 40 godina pod uslovom da se koristi u standardnim operativnim uslovima i da se redovno održava. Projektovani vek može biti značajno skraćen ako ne postoje adekvatni uslovi održavanja, stabilan napon ili izloženost drugim nepovoljnim uslovima.
- Pretpostavljeni očekivani životni vek kompenzacionog uređaja je 40 godina².
- Realizacija investicije u kompenzacioni uređaj je pretpostavljena u 2025. godini.

² Mrežni elementi projektovani su za životni vek od 40-50 godina u skladu sa IEC standardima koji uzimaju u obzir veliki broj testova.

- Period analize je 30 godina uz diskontnu stopu od 4%³.
- Nakon pregleda literature i analize karakterističnih kriva starenja opreme u zavisnosti od napona i broja sati pri kojima je izložena povišenim naponima - pretpostavljeno je skraćenje životnog veka za 40% i 25% od ukupnog eksploatacionog perioda (skraćenje sa 40 godina na 24 godine u prvom slučaju i 30 godina u drugom slučaju).
- Nabavka kompenzacionog uređaja značajno smanjuje broj sati sa naponskim prilikama većim od dozvoljenih i omogućava nastavak operativnog rada bez skraćenja eksploatacionog veka.

U narednim tabelama su prikazani maksimalni iznos inicijalne investicije u kompenzacioni uređaj (inicijalni Capex), koji omogućava postizanje nulte tačke rentabilnosti (break-even point), u slučaju pretpostavljenog smanjenja očekivanog životnog veka za 40% i 25%. Ova analiza će pomoći u određivanju maksimalnog iznosa investicije koja bi omogućila kompenzaciju svih troškova, s obzirom na pretpostavljeno skraćenje životnog veka, što može značajno uticati na ukupnu isplativost projekta.

Tab. 4-2: Rezultat analize isplativosti za pretpostavljeno skraćenje od 40%

Godina	Sa Kompenzacionim uređajem	Bez komp. Uredjaja	Razlika (Sa/Bez)	Diskontovana razlika
2025	15,000,230	13,425,000	13,425,000	15,000,230
2026	375,006	447,500	958,929	-136,423
2027	375,006	447,500	958,929	-136,423
2028	375,006	447,500	958,929	-136,423
2029	375,006	447,500	958,929	-136,423
2030	375,006	447,500	958,929	-136,423
2031	375,006	447,500	958,929	-136,423
2032	375,006	447,500	958,929	-136,423
2033	375,006	447,500	958,929	-136,423
2034	375,006	447,500	958,929	-136,423
2035	375,006	447,500	958,929	-136,423
2036	375,006	447,500	958,929	-136,423
2037	375,006	447,500	958,929	-136,423
2038	375,006	447,500	958,929	-136,423
2039	375,006	447,500	958,929	-136,423
2040	375,006	447,500	23,500,000	-22,677,494
2041	375,006	447,500	979,167	-156,661
2042	375,006	447,500	979,167	-156,661
2043	375,006	447,500	979,167	-156,661
2044	375,006	447,500	979,167	-156,661
2045	375,006	447,500	979,167	-156,661
2046	375,006	447,500	979,167	-156,661
2047	375,006	447,500	979,167	-156,661
2048	375,006	447,500	979,167	-156,661
2049	375,006	447,500	979,167	-156,661
2050	375,006	447,500	979,167	-156,661
2051	375,006	447,500	979,167	-156,661
2052	375,006	447,500	979,167	-156,661
2053	375,006	447,500	979,167	-156,661
2054	375,006	447,500	979,167	-156,661
2055	375,006	447,500	979,167	-156,661
Rezultat				0

³ U skladu sa ENTSO-E preporukama za analize isplativosti izgradnje elemenata mreže. Period od 30 godina je uzet da bi se analiza uklopila u očekivani životni vek TS

Tab. 4-3: Rezultat analize isplativosti za pretpostavljeno skraćenje od 25%

Godina	Sa Kompenzacionim uređajem		Bez komp. Uređaja	Razlika (Sa/Bez)	Diskontovana razlika
2025	9,951,002	13,425,000	13,425,000	9,951,002	-9,951,002
2026	248,775	447,500	671,250	25,025	-24,063
2027	248,775	447,500	671,250	25,025	-23,137
2028	248,775	447,500	671,250	25,025	-22,247
2029	248,775	447,500	671,250	25,025	-21,392
2030	248,775	447,500	671,250	25,025	-20,569
2031	248,775	447,500	671,250	25,025	-19,778
2032	248,775	447,500	671,250	25,025	-19,017
2033	248,775	447,500	671,250	25,025	-18,286
2034	248,775	447,500	671,250	25,025	-17,582
2035	248,775	447,500	671,250	25,025	-16,906
2036	248,775	447,500	671,250	25,025	-16,256
2037	248,775	447,500	671,250	25,025	-15,631
2038	248,775	447,500	671,250	25,025	-15,029
2039	248,775	447,500	671,250	25,025	-14,451
2040	248,775	447,500	671,250	25,025	-13,896
2041	248,775	447,500	671,250	25,025	-13,361
2042	248,775	447,500	671,250	25,025	-12,847
2043	248,775	447,500	671,250	25,025	-12,353
2044	248,775	447,500	671,250	25,025	-11,878
2045	248,775	447,500	671,250	25,025	-11,421
2046	248,775	447,500	23,500,000	-22,803,725	10,007,041
2047	248,775	447,500	783,333	-87,058	36,735
2048	248,775	447,500	783,333	-87,058	35,322
2049	248,775	447,500	783,333	-87,058	33,963
2050	248,775	447,500	783,333	-87,058	32,657
2051	248,775	447,500	783,333	-87,058	31,401
2052	248,775	447,500	783,333	-87,058	30,193
2053	248,775	447,500	783,333	-87,058	29,032
2054	248,775	447,500	783,333	-87,058	27,915
2055	248,775	447,500	783,333	-87,058	26,842
Rezultat					0

U tabeli su prikazani ukupni procenjeni godišnji troškovi u dva različita scenarija, koji ilustruju promene u troškovima u zavisnosti od primene kompenzacionog uređaja.

Prva i druga kolona prikazuju ukupne troškove kada visokonaponska oprema funkcioniše u uslovima normalnih naponskih prilika, tj. kada su naponi u mreži stabilni i unutar dozvoljenih granica. U ovom slučaju, oprema radi u optimalnim uslovima bez skraćenja životnog veka i bez ikakvih dodatnih ulaganja u kompenzacioni uređaj. Uzimajući u obzir usvojenu inicijalnu cenu od 17.9 miliona EUR i očekivani životni vek od 40 godina, godišnja amortizacija iznosi 447.500 EUR. Sa njenom ugradnjom se smanjuje izloženost stresu opreme, koja od tog trenutka nastavlja da se amortizuje po ‘regularnoj’ stopi. U ovom slučaju se izbegavaju dodatni troškovi nastali usled skraćenja životnog veka.

Treća kolona prikazuje troškove u uslovima nepovoljnih naponskih prilika, bez ugradnje kompenzacionog uređaja tokom čitavog eksploatacionog veka. Kao što je već opisano u prethodnim poglavljima, očekivani životni vek se značajno smanjuje i ovom scenariju je pretpostavljeno smanjenje ukupnog životnog veka od 40% i 25%.

Pretpostavljena vrednost opreme koja je ugrožena, a koja obuhvata trafo stanicu i ostalu rasklopnu opremu u trafostanici sa ugrađenim kompenzacionim uređajem, je 23.5 miliona EUR u razmatranom slučaju.

Analiza pokazuje da za skraćenje životnog veka od 40% (Tab. 4-2), investicija u kompenzacioni uređaj donosi godišnju uštedu u rasponu od 136.423 do 156.661 EUR, što rezultira smanjenjem habanja opreme, tj. njene amortizacije. Diskontovanjem godišnjih ušteda tokom analiziranog perioda, sadašnja vrednost ukupnih ušteda iznosi 15 miliona EUR, što odgovara maksimalnoj visini kapitalne investicije (CAPEX) u ovom scenariju. Dakle, investicija od 15 miliona EUR u kompenzacioni uređaj u potpunosti se isplaćuje kroz ostvarene uštede pri smanjenju životnog veka visokonaponske opreme koja je izložena nepovoljnim uslovima za 40%.

U slučaju smanjenja životnog veka od 25% (

Tab. 4-3), investicija u kompenzacioni uređaj donosi godišnju uštedu u iznosu od -25.025 do 87.058 EUR. Diskontovanjem tih ušteda, sadašnja vrednost ukupne uštede iznosi 9,951 miliona EUR, što odgovara maksimalnoj visini kapitalne investicije (CAPEX) u ovom scenariju. Takođe, investicija od 9,951 miliona EUR u kompenzacioni uređaj potpuno se isplaćuje kroz ostvarene uštede pri smanjenju životnog veka opreme za 25%.

U oba analizirana slučaja izračunati iznosi reflektuju samo diskontovane uštede i ne uzimaju u obzir rezidualnu vrednost kompenzacionog uređaja kao ni ostale opreme na kraju obračunskog perioda.

5 ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih rezultata i poređenja sprovedenih simulacija za različite opsege regulacije varijabilnih prigušnica mogu se izvesti sledeći opšti zaključci vezano za način eksploatacije i opseg regulacije predloženih prigušnica:

- Analize naponskih profila u 400 i 220 kV mreži jasno ukazuju na neophodnost ugradnje dodatnih kompenzacionih uređaja u prenosni sistem Srbije pored projekta ugradnje varijabilnog reaktora u TS Vranje 4 čija je realizacija u toku
- Sprovedene analize postojećeg stanja, odnosno očekivanog stanja u naredne dve godine (nakon očekivanog ulaska u pogon varijabilnih reaktora u TS Vranje 4 i TS Lastva u Crnoj Gori) pokazuju da je u prenosnom sistemu Srbije neophodno ugraditi minimum dodatnih 750 MVar u cilju rešavanja postojećih problema. Eksploatacija varijabilne prigušnice u TS Beograd 20 pri postojećoj topologiji sistema se očekuje sezonski u toku prolećnih i jesenjih režima i to preko čitavog dana kao i u zimskim i letnjim režimima sa smanjenom potrošnjom. U toku noćnih režima sa smanjenom potrošnjom očekivana je angažovanost prigušnice blizu maksimalne raspoložive snage dok je preko dana zahtevana manja angažovanost prigušnice u zavisnosti od naponskih prilika u prenosnoj mreži u okolini Beograda kao i uticaju na smanjenje gubitaka u prenosnoj mreži. Primena varijabilne prigušnice sa širim regulacionim opsegom omogućila bi ravnomerniji dnevni dijagram napona pri upravljanju naponskim prilikama u EES Srbije
- Izloženost mrežne opreme naponima većim od trajno dozvoljenih u velikom broju operativnih režima u proteklim godinama značajno utiče na nivo stresa na opremu, što dovodi do smanjenja njenog projektovanog životnog veka. Uzimajući u obzir postojeću literaturu koja analizira uticaj izloženosti naponima višim od dozvoljenih, kao i karakteristične krive starenja u zavisnosti od napona i broja sati izloženosti, analizirana je isplativost ugradnje prigušnice.

Analiza je sprovedena uz pretpostavku postojećeg nivoa stresa na mrežnu opremu kao i situaciju sa investicijom u kompenzacioni uređaj. Rezultati su sledeći:

- Za procenjeno skraćanje životnog veka opreme od 40%, diskontovana ušteda u analiziranom periodu (maksimalni iznos CAPEX-a za ugradnju kompenzacionog uređaja) iznosi 15 miliona EUR
- U slučaju procenjenog skraćanja životnog veka opreme od 25%, maksimalni iznos CAPEX-a za ugradnju kompenzacionog uređaja, koji odgovara diskontovanoj uštedi iznosi 9,951 miliona EUR

6 LITERATURA

- [1] ENTSO-E Technology Factsheets, www.entsoe.eu
- [2] Application Fields and Control Principles of Variable Shunt Reactors with Tap-Changer, Mohammad Khorami
- [3] Variable Shunt Reactors: Applications and System Aspects, C. Bengtsson 1 , K.Ryen 2, O.A. Rui2 , T.Olsson ABB AB, Ludvika, Sweden Statnett SF, Oslo, Norway, CIGRE 2014.
- [4] Zbirka rešenih zadataka iz proizvodnje, prenosa i upotrebe električne energije, Jovan Štarklj, 2015
- [5] Analyse und Bewertung der Anforderungen an dasLeistungsvermögen der Betriebsmittel im Falle von temporären Netzzuständen mit Spannungen oberhalb von Um, VDE FNN, Oktobar 2019
- [6] <https://ems.rs/wp-content/uploads/2023/11/Pravila-o-radu-prenosnog-sistema-07.11.2023-1.pdf> [Online].