

Filip Relić, mag.ing.el.  
HEP – ODS d.o.o.  
[filip.relic@hep.hr](mailto:filip.relic@hep.hr)

Krešimir Špicnagel, mag.ing.el.techn.inf.  
HEP – ODS d.o.o.  
[kresimir.spicnagel@hep.hr](mailto:kresimir.spicnagel@hep.hr)

Mladen Vuksanić, dipl.ing.el.  
HEP – ODS d.o.o.  
[mladen.vuksanic@hep.hr](mailto:mladen.vuksanic@hep.hr)

Tin Tomašić, mag.ing.el.  
[tomasictin1@gmail.com](mailto:tomasictin1@gmail.com)

Dino Briševac, mag.ing.el.  
HEP – ODS d.o.o.  
[dino.brisevac@hep.hr](mailto:dino.brisevac@hep.hr)

## ZAVRŠETAK PRIJELAZA 10 KV MREŽE ELEKTRE SISAK NA 20 KV POGONSKI NAPON

### SAŽETAK

Prijelaz s pogonskog napona 10 kV na 20 kV jedan je od važnijih strateških ciljeva HEP ODS-a. Brojne studije pokazale su isplativost prijelaza s trirazinskog 110/35/10 kV na dvorazinski 110/20 kV pogonski napon ako se oprema istovremeno mijenja zbog dotrajalosti i pripreme za prijelaz na 20 kV pogonski napon. Prijelazom na 20 kV pogonski napon prijenosna moć voda se udvostručuje, dok se radni gubici smanjuju na četverostruku manju vrijednost. Prvi dio rada kratko obrađuje prijelaz testnog sustava na 20 kV pogonski napon uz prikaz prednosti i nedostataka. Sustav se simulira u programskom paketu NEPLAN i promatra se utjecaj prijelaza na tokove snaga, gubitke i kapacitivne struje. Drugi dio rada obrađuje specifičnosti distribucijskog elektroenergetskog sustava Elektre Sisak. Dan je povijesni pregled prijelaza s 10 kV na 20 kV pogonski napon, financijskih ulaganja, korištenih metodologija i problema prilikom ostvarenja postavljenih ciljeva.

**Ključne riječi:** 20 kV, NEPLAN, Elektra Sisak, srednji napon, gubici

## TRANSITION FROM 10 KV TO 20 KV IN THE ELEKTRA SISAK MEDIUM VOLTAGE NETWORK

### SUMMARY

Transition from 10 kV to 20 kV is one of the most important strategic goals of the HEP DSO. Numerous studies have shown the cost-effectiveness of switching from a three-level 110/35/10 kV to a two-level 110/20 kV voltage transformation if equipment is replaced when its natural life span is ending. By transitioning to 20 kV operating voltage, the transmission power of a line doubles, while losses are reduced by a factor of four. The first part of the paper will briefly address a generic system's transition to a 20 kV level, showing the advantages and disadvantages. The system is simulated in the NEPLAN software package and the effect of transition on power flows, losses and capacitive currents is observed. The second part of the paper deals with the specifics of the distribution system of Elektra Sisak. A historical overview of the transition from 10 kV to 20 kV level, financial investments, methodologies used and problems in the implementation of set goals are given.

**Key words:** 20 kV, NEPLAN, Elektra Sisak, medium voltage, losses

## 1. UVOD

Studije razvoja izrađene od 1970-ih godina do danas potvrdile su isplativost ulaganja u prijelaz s trorazinskog 110/35/10 kV na dvorazinski 110/20 kV pogonski napon, one izrađene do 80-tih godina poslužile su kao temelj za postavljanje jednog od važnijih strateških ciljeva HEP ODS-a, prijelaz distribucijske mreže na 20 kV. Prijelazom na 20 kV pogonski napon, uz smanjenje broja transformatora te učinkovitije korištenje prostornih resursa, izražena je i sanacija naponskih prilika pa se tako bez veće izgradnje dvostruko povećavaju prijenosni kapaciteti i četverostruko smanjuju gubici radne snage. Početkom 1980-ih elektrodistribucijske tvrtke u Republici Hrvatskoj počinju intenzivnije graditi vodove i postrojenja konstruirana za prihvat 20 kV napona te ugrađivati transformatore s preklopivim ili prespojivim 10(20) kV namotom. Spomenuto može biti povoljnije rješenje samo ako je postupno, odnosno ako slijedi zamjenu dotrajale postojeće mreže. [1] – [4]

## 2. PROMJENE PARAMETARA SREDNJE NAPONSKE MREŽE TIJEKOM PRIJELAZA NA 20 kV

Pozitivni učinci prijelaza na 20 kV pogonski napon su povećanje prijenosne moći vodova, smanjenje gubitaka, smanjenje padova napona i smanjenje potrebnih pojnih točaka srednjenaponske mreže. Prednosti primjene 20 kV napona u srednjenaponskoj distribucijskoj mreži su komplementirane određenim nedostacima koji se moraju uzeti u obzir prilikom razmatranja prelaska na 20 kV.

Ozbiljnim pristupom procesu prelaska na 20 kV može se iskoristiti puni potencijal svih prednosti koje viši distribucijski napon nudi uz minimizaciju nepovoljnih posljedica. Prijenosna moć vodova linearno je vezana uz nazivni napon. Temeljem navedene činjenice, dvostruko povećanje napona distribucijske mreže (s 10 na 20 kV) rezultira dvostrukim povećanjem prijenosne moći. Značajnija prednost prelaska na 20 kV je smanjenje gubitaka uslijed smanjenja iznosa struje koja treba protjecati vodom za napajanje istog konzuma. Povećanjem napona se proporcionalno smanjuje struja tereta, a sa smanjenjem struje tereta dolazi do kvadratnog smanjenja gubitaka. Budući da je vrijednost impedancije konstantna (neovisna od pogonskog napona), smanjenjem struje koja protječe vodičima konstantne impedancije smanjuju se i gubici te u slučaju udvostručenja napona radni gubici vodova se četverostruko smanjuju. Sukladno prethodnoj opservaciji može se utvrditi i da će u slučaju smanjenja struje koja teče vodovima (uslijed povećanja napona i konstantnosti opterećenja) padovi napona po dubini mreže također biti manji. Osim navedenih pozitivnih učinaka na pogonske prilike u distribucijskoj mreži, prelazak na 20 kV praćen je i određenim izazovima. Najveći izazov je povećanje kapacitivnih struja koje su uzrokovane kapacitetom koji svi vodovi imaju prema zemlji. Iako svi vodovi (kabeli i dalekovodi) sudjeluju u kapacitivnoj struji pripadne mreže, kabelski vodovi, zbog svoje konstrukcije, imaju znatno veći doprinos zbog naročito velikog kapaciteta prema zemlji. Jednadžba (1) prikazuje linearnu ovisnost kapaciteta o narinutom naponu te povećanjem narinutog napona dolazi do proporcionalnog povećanja kapacitivnih struja u mreži. [5]

$$I_c = \sqrt{3} \cdot 2\pi f \cdot C_p \cdot U \cdot l \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

gdje su:

$C_p$  – pogonski kapacitet kabela [ $\mu\text{F}/\text{km}$ ],

$U$  – nazivni napon [kV],

$l$  – duljina kabela [km].

Porastom duljine mreže te pogotovo povećanjem udjela kabelskih dionica u srednjenaponskoj mreži povećava se i kapacitivna struja mreže zbog čega je potrebno revidirati pristup uzemljenju nultočke energetskog transformatora.

## 3. PRIJELAZ NA 20 kV U ELEKTRI SISAK

Osamdesetih godina dvadesetog stoljeća u Elektri Sisak se počela nabavljati oprema za rad na 20 kV naponu; preklopivi ili prespojivi transformatori, 20 kV izolatori i kabeli nazivnog napona 20 kV (tip EHP 48-A i XHP 48-A). Specifičnosti područja koje pokriva Elektra Sisak, a zbog kojih se uvođenjem 20 kV napona eliminiraju neki nepovoljni aspekti su:

- Velika površina i rijetka naseljenost (neisplativ daljnji razvoj 35 kV mreže)

- Velike duljine magistralnih vodova (prelaskom na 20 kV se smanjuje pad napona i povećava prijenosna moć)
- Radijalno napajanje velikog dijela DP-a (prelaskom na 20 kV potreban manji broj pojmih TS za zatvaranje petlji)
- Otprilike 80% površine je bilo okupirano, a oprema u ratu djelomično oštećena (intenzivna obnova i ugradnja opreme za rad na 20 kV naponu).

Metodologija prijelaza područja na 20 kV pogonski napon ovisi o tipu objekta, odnosno dijelu elektroenergetskog sustava čiju je opremu potrebno zamijeniti. Objekti koji se promatraju su dalekovodi, kabeli i transformatorske stanice.

Nakon što se definira područje s kojim se prelazi na 20 kV napon slijedi sastavljanje popisa svih elektroenergetskih objekata i potrebnih zahvata na njima. Zatim se definira minimalan opseg opreme koja se mora zamijeniti prije konačnog prijelaza na 20 kV napon. Za prijelaz dalekovoda na 20 kV pogonski napon potrebno je ugraditi odcjepne linijske rastavljače, zamijeniti dotrajale stupove i zamijeniti izolatore. U slučaju povećanja naponske razine s 10 na 20 kV, kada za isti prijenos snage trebamo upola manju vrijednost struje, vodiči se mijenjaju samo na zastarjelim i oštećenim dionicama. Na distribucijskim transformatorskim stanicama se mijenjaju nepreklopivi transformatori, određeni srednjenaponski blokovi, odvodnici prenapona i ugrađuju se 20 kV osigurači i podnožja. Također je potrebno izmjeriti uzemljenja svih distributivnih TS i po potrebi ista popraviti ili u potpunosti zamijeniti. Značajnu ulogu pritom predstavlja odluka o vrsti uzemljenja nultočke energetskeg transformatora. Naime, s gledišta postojeće tehničke regulative u Hrvatskoj zabranjen je pogon srednjenaponskih mreža s izoliranim zvjezdištem energetskeg transformatora ukoliko kapacitivne struje zemljospoja nisu manje od 20 A u 10 kV mrežama, odnosno 15 A u 20 kV mrežama. Često prethodni uvjeti nisu zadovoljeni te se treba pristupiti uzemljenju nultočke energetskeg transformatora preko malooskog otpornika čime se radna komponenta struje zemljospoja ograničava na predvidljivi iznos (150 A, 300 A, 700 A ili 1000 A). Pritom treba uzeti u obzir činjenicu da se odabirom otpornika većeg otpora (manje nazivne struje) smanjuje iznos opasnog napona koji se može pojaviti na sustavu uzemljenja budući da je struja kvara ograničena na manju vrijednost. Nadalje odabirom otpornika većeg otpora smanjuje se i broj uzemljenja koje je potrebno popraviti/zamijeniti sukladno kriteriju (2.),

$$R_{zdr} \leq \frac{X \cdot U_{dd}}{r \cdot I_{1p}} \quad (2)$$

gdje su:

$R_{zdr}$  – združeno zaštitno i radno uzemljenje [ $\Omega$ ],

$X$  – faktor udjela dodirnog napona u potencijalu uzemljivača,

$U_{dd}$  – dopušteni dodirni napon [V],

$I_{1p}$  – struja jednopolnog kratkog spoja,

$r$  – redukcijски faktor.

Ukoliko se prethodni kriterij ne može zadovoljiti, treba razdvojiti zaštitno od radnog uzemljenja te pritom primijeniti zasebne kriterije za razdvojena uzemljenja. Međutim, usprkos poduzetim mjerama, otpor uzemljivača može biti i dalje nezadovoljavajući te je potrebno provesti popravke ili zamjenu uzemljenja objekta.

Prilikom izrade projekta uzemljenja treba paziti na omjer radne ( $I_R$ ) i kapacitivne ( $I_C$ ) komponente struje jednopolnog kvara te se potrebno pridržavati kriterija (3):

$$I_R > 3 \cdot I_C \quad (3)$$

U slučaju neprihvatljivih troškova rekonstrukcije uzemljivača nužno je ispunjavanje barem kriterija (4):

$$1,5 \cdot I_C < I_R < 3 \cdot I_C \quad (4)$$

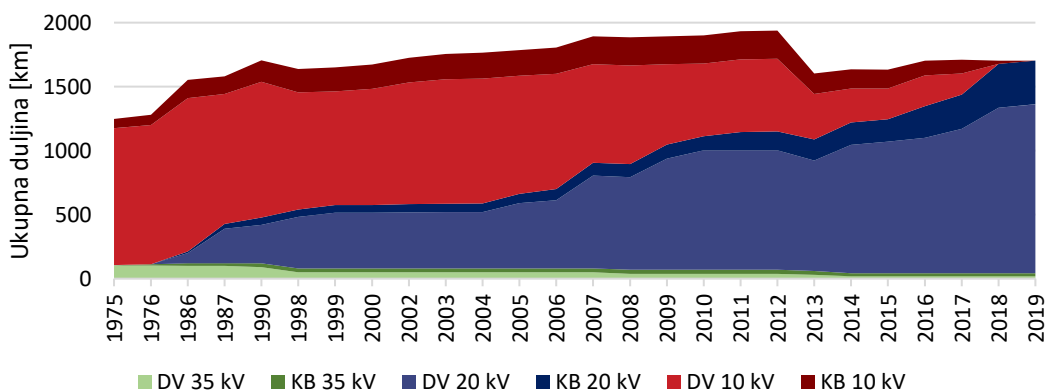
Ako se nijedan od navedenih kriterija omjera radne i kapacitivne komponente struje jednopolnog kvara ne može zadovoljiti kapacitivna komponenta se može djelomično kompenzirati prigušnicom koja se dodaje paralelno postojećem otporniku. U slučaju TS 110/20 kV Petrinja elaboratom uzemljenja nultočke predviđena je paralelna kombinacija malooskog otpornika (150 A) i ručno podesive prigušnice (150 A) budući da je kapacitivna struja na 10 kV naponskoj razini iznosila 76,57 A te se ista udvostručila prelaskom na 20 kV.

Za prijelaz kabela na 20 kV pogonski napon potrebno je ispitati kabele tipa EHP 48-A 12/20 (24) kV i XHP 48/0-A kako bi se provjerila mogućnost rada na 20 kV pogonskom naponu, dok se kabeli tipa IPO

13 i IPO 13-A mijenjaju. Dodatno se optimiziraju kabelske petlje u cilju povećanja pouzdanosti napajanja. U slučaju opravdanog rizika se smanjuje pouzdanost na određeno vrijeme dok nije realiziran i prijelaz rezervnog napajanja na 20 kV pogonski napon.

U svim pojnim transformatorskim stanicama x/10(20) kV Elektre Sisak su ugrađena dva transformatora. Uobičajena praksa u Elektri Sisak podrazumijeva prespajanje jednog od energetskih transformatora na 20 kV, dok drugi ostaje na 10 kV. Budući da se takvim pogonom smanjuje pouzdanost napajanja (neispunjenje n-1 kriterija) često se koristi 20/10 kV energetski transformator u prijelaznom razdoblju. U tu svrhu su stari transformatori 35/10 premotavani za 20/10 kV transformaciju i korišteni u svim transformatorskim stanicama za vrijeme prijelaza na 20 kV, a potom transportirani u sljedeću stanicu. Bitno je napomenuti da se kod većine kabela radilo na zamjeni u postojećoj trasi, što je ubrzalo planove i realizaciju prijelaza na 20 kV.

Smanjenje pouzdanosti napajanja zabilježeno je prilikom prijelaza južnog dijela grada Siska na 20 kV pogonski napon, koji se napaja iz TS 35/20 kV Sisak 2. U TS 35/20(10) kV Sisak 2 su bila ugrađena dva ne prespojiva transformatora 35/10 kV te su nabavljeni novi transformatori 35/20 kV. U prvoj fazi demontiran je stari transformator 2, te je na njegovo mjesto postavljen novi transformator 35/20 kV. Prije zamjene su svi kabelski izlazi sa sekcije na koju je spojen transformator 2 prebačeni na prazna polja u druge dvije sekcije koje su spojene na transformator 1. Spajanjem novog transformatora na sabirnice u transformatorskoj stanici i puštanjem u pogon transformatora, jedna od tri sekcija je prebačena na 20 kV pogonski napon. Kako na navedenoj sekciji nije bilo kabelskih izlaza, sva polja su bila prazna te se moglo krenuti u pripremu za prebacivanje istih na 20 kV pogonski napon. Svaki kabelski izlaz ima mogućnost dvostranog napajanja pa su sve transformatorske stanice prebačene na jedan izlaz. Drugi kabelski izlaz prebačen je na sekciju koja je na 20 kV pogonskom naponu. Nakon završetka priprema u pojnoj transformatorskoj stanici počinje prebacivanje malih transformatorskih stanica 10(20)/0,4 kV na 20 kV pogonski napon. Prijelaz se vrši pojedinačno po stanici, a kreće se od prve stanice koja je spojena na kabelski izlaz sa sekcije 20 kV. Trajanje prebacivanja transformatorske stanice na 20 kV je u prosjeku 30 minuta, te obuhvaća isključivanje kabelskih dolaza i odlaza, prespajanje transformatora, ispitivanje zaštite i mjerenje napona nakon puštanja transformatora u prazni hod. Neke od nepredviđenih situacija su zakočenje (otkazivanje) mehanizma u srednjenaponskim blokovima, što onemogućuje upravljanje blokom dok se mehanizam ne popravi. Također je moguće zakočenje 10-20 kV preklopke transformatora. Nakon prijelaza svih transformatorskih stanica na 20 kV izlaz, kabelski izlaz koji je ostao na 10 kV sekciji ostao je spojen na istu dok sve stanice nisu prebačene na 20 kV pogonski napon. Tada se mijenja i drugi transformator s novim 35/20 kV transformatorom i prijelaz s 10 kV na 20 kV pogonski napon je završen. Na slici 1 može se vidjeti postupna dinamika prijelaza 10 kV mreže Elektre Sisak na 20 kV, od 1976. pa sve do 2019., kada je završen prijelaz kompletnog distribucijskog područja Elektre Sisak na 20 kV pogonski napon.



Slika 1. Udjeli SN vodova prema pogonskom naponu [6]

Prijelazom na 20 kV pogonski napon, Elektra Sisak se susreće s prvim izazovima. Zbog tvorničke greške na srednjenaponskim blokovima kod provodnih izolatora na transformatorskom polju dolazilo je do proboja. Od prijelaza na 20 kV svaki mjesec je iz određene serije proizvodnje izgorio po jedan blok, te se morao zamijeniti. Nakon kvarova na 5 blokova donesena je odluka da se mijenjaju svi srednjenaponski blokovi iz te serije, tako da je zamijenjeno 30 SN blokova. U suradnji sa proizvođačem uspješno su izvršeni popravci na kritičnim srednjenaponskim blokovima i potom su ugrađivani u iduću transformatorsku stanicu

koja ima srednjenaponski blok iz te serije. Na slici 2 se vidi proboj na provodnom izolatoru. Dodatni izazovi su se pokazali na postojećim kabelima. Pokazalo se da i mala oštećenja na izolaciji kabela uzrokuju proboje nakon prijelaza na 20 kV pogonski napon. Najveći zahvat je bio na kabelskom izlazu „Brzaj 5“ iz TS Sisak 2. Svi kabele su prethodni ispitani, ali nakon višestrukih proboda nakon prelaska na 20 kV pogonski napon je donesena odluka o zamijeni kritične dionice.



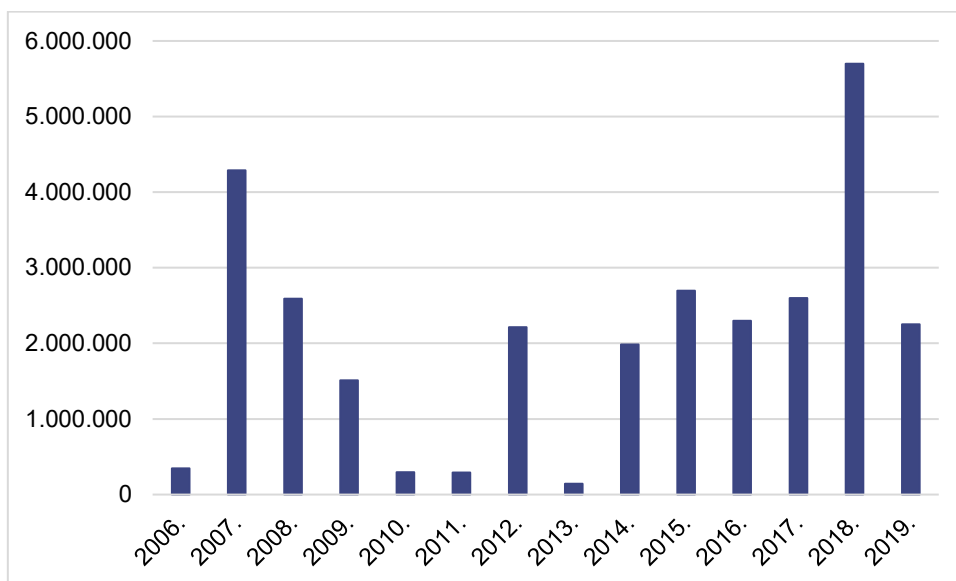
Slika 2. Proboj na provodnom izolatoru

### 3.1. Financijski aspekt prijelaza na 20 kV

Pripremljenost, a potom i sam pogon mreže na 20 kV, na razini cijelog distribucijskog područja Elektre Sisak posljedica je velikog broja ulaganja iz različitih izvora, odnosno programa ulaganja iz plana investicija. Kao najznačajnija ulaganja u doprinosu ostvarenja pogona na 20 kV ističu se ulaganja u sanaciju i obnovu distribucijske srednjenaponske mreže nakon Domovinskog rata, ulaganja u izgradnju novih i obnovu postojećih pojnih točaka te ulaganja iz investicijskog programa „Prijelaz srednjenaponske mreže na 20 kV – završna faza“.

Tijekom Domovinskog rata veći dio područja Elektre Sisak je bio pod okupacijom te su nakon oslobođenja i uspostave normalnog stanja uložena znatna sredstva iz programa sanacije i obnove ratom devastirane distribucijske mreže čime je znatan dio mreže ubrzano rekonstruiran opremom za pogon na 20 kV. Izgradnja novih ili rekonstrukcija postojećih postrojenja pojnih točaka i značajnih rasklopišta u SN mreži ključan su preduvjet za ulazak u završnu fazu pripreme i prebacivanja pogona 10 kV mreže na 20 kV napon obzirom da se radi o vrlo opsežnim ulaganjima s dinamikom realizacije kroz nekoliko godina. Posebno se može istaknuti izgradnja TS 110/10(20) kV Siscia koja je dovršena 2007., primarno u svrhu osiguranja dovoljno prijenosne moći u transformaciji 110/x i povećanja pouzdanosti napajanja sjevernog dijela Siska s okolicom. Vrijednost izgradnje TS Siscia s pripadajućim raspletom KB 10(20) kV je na razini 40 milijuna kuna.

U posljednjih 13 godina (2006. do 2019.) u Elektri Sisak je iz različitih investicijskih programa uloženo gotovo 30 milijuna kuna za završnu pripremu postrojenja i vodova 10 kV mreže za rad na 20 kV pogonskom naponu. Dinamika ulaganja u navedenom razdoblju po godinama prikazana je slikom 3. Od 2014. godine HEP ODS uspostavlja poseban program ulaganja u projekte završetka prijelaza SN mreža na 20 kV pogonski napon na područjima s visokim razinama pripremljenosti mreže i dobrom općom ocjenom koristi od pogona na 20 kV naponu. U razdoblju od 2014. zaključno s 2019. godinom na području Elektre Sisak u tu svrhu uloženo je oko 17,5 milijuna kuna. Ovi iznosi ulaganja odnose se na završna ulaganja u distribucijsku mrežu na području Gvozda, Siska i zaključno Petrinje.



Slika 3. Ukupna ulaganja u HRK (2006. - 2019.)

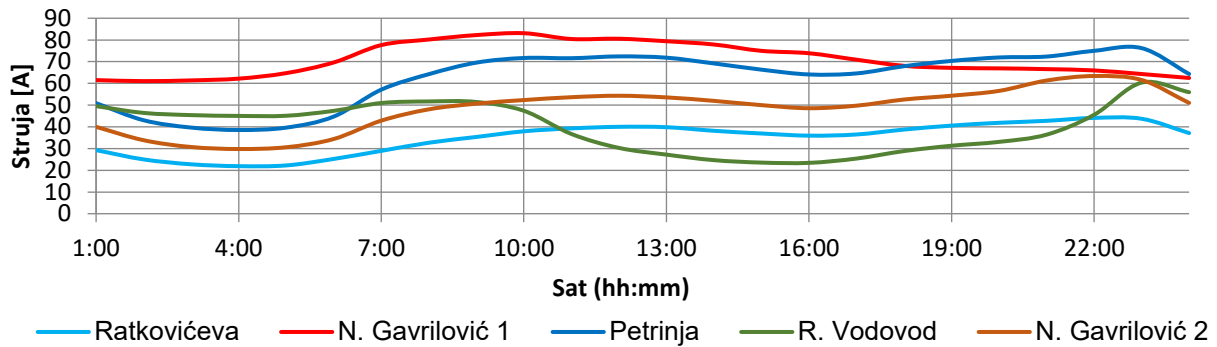
U cilju ubrzanog prijelaza na 20 kV pogonski napon, izvršena je zamjena nužne opreme. U narednih par godina preostaju ulaganja kojim se vodovi rekonstruiraju primarno izolatorima 24 kV razine u ukupnoj vrijednosti oko 3 milijuna kuna. [7]

### 3.2. TS 110/10(20) kV Petrinja

Završna faza prijelaza područja grada Petrinje koje se napaja iz TS 110/10(20) kV Petrinja realizirana je u periodu od 2017. do 2019. godine. Završna faza prijelaza određenog područja na 20 kV podrazumijeva ulaganja u prethodnim godinama i započinje kada je predmetno područje već 80% spremno za prihvatanje 20 kV napona. Prvi transformator 110/10 kV prespojen je na 110/20 kV napon 2018. godine i tom prilikom su na 20 kV napon prebačeni svi zračni dalekovodi i kabelski izlaz kojima se Petrinja spaja sa susjednom TS 35/20 kV Sisak 2, preko koje se, u slučaju potrebe, vrši razmjena energije između ove dvije transformatorske stanice. U tu svrhu je kreiran kabelski izlaz u TS 35/20 kV Sisak 2 (=J20 Petrinjska 3) koji je, nakon modifikacije uklopnog stanja, izravnije nego prije povezivao Petrinju i Sisak. Uspostavljanjem 20 kV veze između navedenih transformatorskih stanica došlo je do udvostručenja prijenosne moći ovog kabelskog voda te se istim sada moglo prenijeti približno 11 MVA (dozvoljeno strujno opterećenje od 319 A). Vršno opterećenje zabilježeno u TS 110/20/10 kV Petrinja 2018. godine je iznosilo 10.937 kVA te je očito da se teoretski cijeli konzum Petrinje može opskrbljivati iz TS 35/20 kV Sisak 2 preko navedenog kabelskog izlaza u slučaju izvanrednih situacija. Ukupno je u tom trenutku na području Petrinje prebačena 131 TS na 20 kV napon. U 2019. godini izvršena je zamjena preostalih kabela i ostale opreme u gradskoj kabelskoj petlji u samom gradu Petrinja, prebačene su preostale 24 TS i time je kompletno područje Elektro Sisak prebačeno na 20 kV napon. Nakon toga je i drugi transformator 110/10 kV prespojen na 110/20 kV napon čime je 10 kV napon i definitivno napušten.

### 3.3. Proračun prilika u SN mreži TS Petrinja

U svrhu teoretske analize promjena strujno-naponskih prilika (gubici, pad napona) uzrokovanih prelaskom na 20 kV naponsku razinu kreirane su dvije varijante (10 i 20 kV) SN mreže TS Petrinja u programskom paketu NEPLAN 360. Srednjenaponska mreža grada Petrinje i okolice se napaja iz TS Petrinja preko 7 kabelskih (Dječji vrtić, Kemoplast, Novi Gavrilović 1, Novi Gavrilović 2, Petrinja, Ratkovićeve i Regionalni vodovod) i 3 zračna izlaza (Bjelnik, Gora i Jabukovac). Navedeni izlazi se kontinuirano prate SCADA sustavom iz dispečerskog centra te su dostupni podaci o njihovim opterećenjima tijekom godine. Temeljem godišnjih izvješća opterećenja TS Petrinja generirana je tablica prosječnih godišnjih satnih opterećenja navedenih izlaza koja su korištena prilikom izračuna kao zadana vrijednost opterećenja (struje) na početku pojedinog izlaza korištenjem modula estimacije opterećenja (eng. *Load Estimation*). Grafički prikaz prosječnog dnevnog opterećenja za određene izlaze vidljiv je na slici 4.



Slika 4. Prosječno dnevno opterećenje za određene izlaze u TS 110/10 kV Petrinja

Raspoređivanje opterećenja uzduž kablskog/zračnog voda se temelji na vrijednostima iz baze podataka potrošnje pojedinih kupaca (zbroj godišnjih potrošnji svih kupaca na pojedinom distribucijskom području podijeljen s brojem sati u godini). Navedena vrijednost se dodjeljuje teretu modeliranom na niskonaponskoj strani  $x/0,4$  kV energetskog transformatora. Potom se provodi skaliranje snage potrošnje pojedine stanice ( $x$ ) u odnosu na sve stanice ( $m$ ) na vodu prema (5).

$$P_{TS\ x} = \frac{P_{TS\ x,avg}}{\sum_{i=1}^m P_{TS\ i,avg}} (P_{vod} - P_{gub,vod}) \quad (5)$$

Gdje su:

$P_{TS\ x}$  – skalirana snaga pojedine (“ $x$ ”) stanice,

$P_{TS\ x,avg}$  – prosječna godišnja snaga pojedine (“ $x$ ”) stanice,

$\sum P_{TS\ i,avg}$  – suma prosječnih godišnjih snaga svih stanica na vodu,

$P_{vod}$  – ukupna snaga angažirana na početku voda,

$P_{gub,vod}$  – snaga angažirana za pokrivanje svih gubitaka voda.

Proračun tokova snaga proveden je proširenom Newton-Raphson metodom te su ostvareni očekivani rezultati, odnosno smanjenja gubitaka uslijed primjene dvostruko većeg nazivnog napona u srednjenaponskoj mreži. Najznačajnije smanjenje gubitaka zabilježeno je na vodovima na kojima je uslijed povećanja napona s 10 na 20 kV prepolovljena struja tereta te su radni gubici jednaki četvrtini gubitaka ostvarenih pri prijenosu iste snage na 10 kV naponskoj razini. Uslijed dvostrukog smanjenja struje tereta i dvostrukog povećanja napona SN mreže povećana je količina jalove snage koju vodovi proizvode prema jednadžbi (6).

$$Q = Q_L - Q_C = \omega(L \cdot I^2 - C \cdot U^2) \quad (6)$$

Gdje su:

$Q$  – jalova snaga,

$Q_L$  – induktivna komponenta jalove snage,

$Q_C$  – kapacitivna komponenta jalove snage.

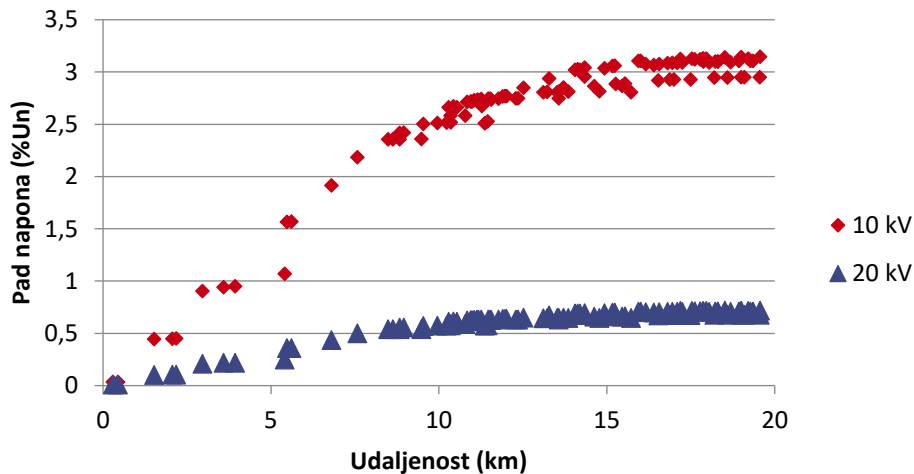
Iz tablice I. se vide gubici radne i jalove snage po vodovima ovisno o naponskoj razini.



Tablica I. Radni i jalovi gubici po izlazima za 10 i 20 kV

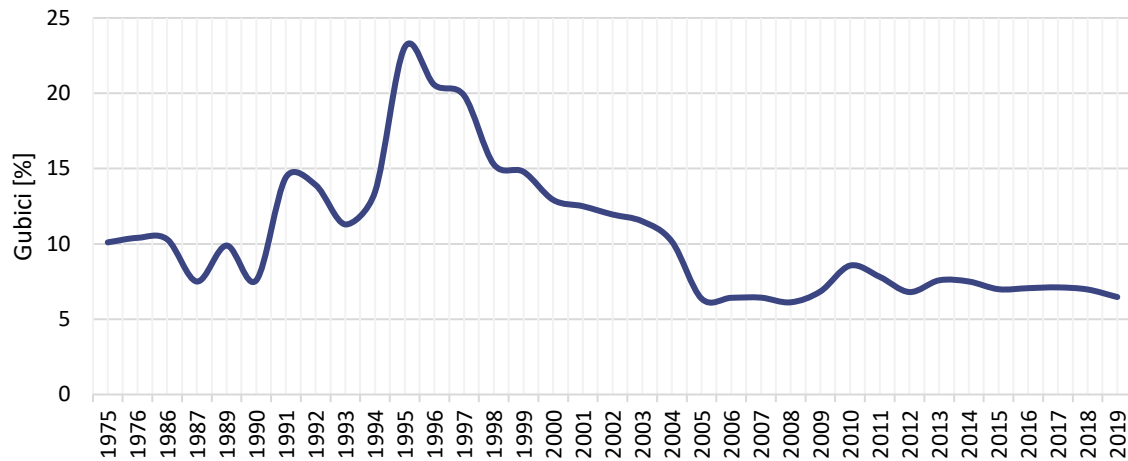
Naziv voda	$P_{gub}$ (kW)		$Q_{gub}$ (kW)	
	10 kV	20 kV	10 kV	20 kV
Bijelnik	2,30	0,58	-14,77	-63,32
D. Vrtić	4,52	1,12	-90,35	-365,75
Gora	3,65	0,93	-14,75	-73,55
Jabukovac	7,99	1,99	-30,71	-139,76
Kemoplast	0	0	-5,93	-23,30
N. Gavrilović 1	9,04	2,29	-44,93	-195,91
N. Gavrilović 2	5,12	1,27	-95,14	-385,88
Petrinja	4,48	1,13	-20,65	-90,50
R. Vodovod	4,27	1,06	-65,00	-264,71
Ratkovićeve	1,40	0,34	-64,40	-255,76
Ukupno	42,77	10,71	-446,63	-1858,44

Gubici u energetskim transformatorima su nepromijenjeni s primjenom 20 kV napona u srednjenaponskoj mreži. Uslijed nepromijenjenih gubitaka u energetskim transformatorima i smanjenih gubitaka na vodovima došlo je do smanjenja gubitaka za 23,8% s prethodnih 3.208,8 kWh po danu na trenutnih 2.444,9 kWh po danu. Na razini godine uslijed prelaska na 20 kV ostvaruju se uštede od 278.823,5 kWh. Treba napomenuti da se u ovom slučaju koriste vrijednosti prosječnog dana te će u slučaju većeg opterećenja od prosječnog (koje u ovom slučaju iznosi 6,4 MW) smanjenje gubitaka biti znatnije. Srednjenaponska mreža koja se napaja iz TS Petrinja se sastoji od 48 kilometara kabela i 148 kilometara zračnih vodova. Prijelazom na 20 kV naponsku razinu, osim smanjenja gubitaka, smanjuje se i pad napona na svim zračnim vodovima, što uzrokuje poboljšanje profila na svim dionicama dugačkih dalekovoda, pogotovo u slučaju dugačkih dalekovoda koji su uobičajeni na području Elektre Sisak. Slika 5 prikazuje pad napona na dalekovodu za slučaj prijena iste količine snage na različitim naponskim razinama s porastom duljine dalekovoda. Pritom je referentni napon na sabirnicama.



Slika 5. Pad napona u ovisnosti o duljini voda - 10 i 20 kV, dalekovod „Jabukovac“





Slika 6. Gubici električne energije Elektre Sisak [8]

### 3.3. Hodogram završnog prijelaza područja na 20 kV pogonski napon

U završnoj fazi prijelaza područja na 20 kV pogonski napon izrađuje se plan kojim se definiraju radnje, timovi i vremenski okviri prebacivanja mreže na 20 kV. Karakteristične radnje koje je potrebno izvršiti prije prijelaza na drugu naponsku razinu su demontaža i spajanje novih strujnih mostova u slučaju promjene topologije srednjenaponske mreže te promjena rasporeda kabela u kabelskim ormariima radi zadržavanja smjera okretnog polja. Prelazak na 20 kV započinje u nadređenoj pojnoj transformatorskoj stanici x/10(20) kV pripremom srednjenaponske sekcije za prihvat 20 kV napona. Ove pripreme obuhvaćaju prije svega rasterećenje sekcije, koje uključuje isključenje izlaza na navedenoj sekciji koji su prethodno spojeni na rezervni smjer napajanja. Kada je sekcija u potpunosti rasterećena (isključeni prekidači i rastavljači svih polja) može se pristupiti ugradnji odgovarajućih ili prespajanju postojećih naponskih mjernih transformatora. Prema potrebi, treba provesti konfiguriranje i parametriranje zaštitnih uređaja u svrhu osiguranja njihovog ispravnog djelovanja na novoj naponskoj razini. Kad se provedu navedene radnje sekcija se stavlja u prazan hod na 20 kV te se može započeti s opterećenjem pojedinih izlaza, odnosno prelaskom distribucijskih transformatorskih stanica na tim izlazima na novu naponsku razinu. Puštanje distribucijskog područja transformatorske stanice 20(10)/0,4 kV na 20 kV naponsku razinu se sastoji od minimalno sljedećih koraka:

1. Isključenje prekidača energetskog transformatora na SN bloku
2. Isključenje niskonaponske sklopke energetskog transformatora na NN bloku
3. Isključenje rastavne sklopke vodnog polja iz kojeg se TS napaja 10 kV naponom na SN bloku
4. Uključenje uzemljenja energetskog transformatora na SN bloku i poduzimanje dodatnih zaštitnih mjera prema potrebi
5. Prebacivanje preklopke energetskog transformatora iz položaja „10 kV“ u „20 kV“
6. Provjera položaja preklopke za regulaciju napona na energetskom transformatoru
7. Prepodešavanje i ispitivanje ispravnosti djelovanja uređaja relejne zaštite energetskog transformatora
8. Isključenje uzemljenja energetskog transformatora na SN bloku i uklanjanje poduzetih dodatnih zaštitnih mjera
9. Uključenje rastavne sklopke vodnog polja iz kojeg će se TS napajati 20 kV naponom na SN bloku
10. Provjera okretnog polja i redosljeda faza
11. Uključenje prekidača energetskog transformatora na SN bloku
12. Mjerenje napona na niskonaponskoj strani transformatora
13. Uključenje niskog napona na niskonaponskoj sklopki.

Kod prijelaza na 20 kV pogonski napon razlikuje se prebacivanje kabelske petlje i dalekovoda. Dalekovod je u većini slučajeva radialno napajan, stoga se mora isključiti u potpunosti kako bi se transformatorske stanice prebacile na 20 kV. Nakon prebacivanja cijeli se dalekovod pušta pod napon ili se rastavljačima snage pušta u segmentima kako prelazi određeni broj stanica koje su obuhvaćene određenim rastavljačem snage. Stoga se prethodno navedeni hodogram ne može primijeniti na stupnim, čelično-rešetkastim ili stanicama tipa toranj, jer su drugačije izvedbe te u njima nisu ugrađeni srednjenaponski blokovi. Nakon isključenja dalekovoda potrebni zahvati u transformatorskoj stanici su

prebacivanje preklopke s 10 kV na 20 kV i zamjena visokonaponskih osigurača. Nakon puštanja dijela dalekovoda pod napon, potrebno je izmjeriti napon i uključiti niskonaponsku sklopku.

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane prednosti i nedostaci prijelaza sredjenaponske mreže Elektre Sisak s tehn-ekonomskog aspekta. Kroz proračun je vidljivo kako ušteda zbog smanjenja gubitaka nije dovoljno značajna da bi prijelaz s 10 na 20 kV pogonski napon bio opravdan samo iz navedenog razloga, ali prateći potrebu za zamjenom stare opreme može se potvrditi isplativost ulaganja u opremu spremnu za rad na 20 kV naponu. Povećanje prijenosne moći, kao i poboljšanje naponskog profila uzduž voda (pogotovo u slučaju dugačkih dalekovoda) samo dodatno opravdava navedena ulaganja.

#### 5. LITERATURA

- [1] R. Schenner: Osnovno rješenje električne mreže 20/10 kV, 110 kV i 220/380 kV na području „Elektroprivrede“ Zagreb i usporedba s koncepcijom električne mreže 10 kV, 35 kV, 110 kV i 220/380 kV, Institut za elektroprivredu – Zagreb, 1975.
- [2] R. Schenner: Osnovno rješenje mreže 10 kV, 35 kV, 110 kV i 220/380 kV i osnovno rješenje mreže 20/10 kV, 110 kV i 220/380 kV na području „Elektroslavonije“ Osijek te usporedba i izbor optimalne koncepcije mreže, Institut za elektroprivredu – Zagreb, 1975.
- [3] Z. Kovačević: Osnovno rješenje električne mreže 20/10 kV, 110 kV i 220/380 kV na području „Elektroprivrede Dalmacije“ Split te usporedba i izbor optimalne koncepcije mreže, Institut za elektroprivredu – Zagreb, 1977.
- [4] Z. Kovačević: Osnovno rješenje električne mreže 20/10 kV, 110 kV i 220/380 kV na području „Elektroprivrede“ Rijeka i usporedba s koncepcijom električne mreže 10 kV, 35 kV, 110 kV i 220/380 kV, Institut za elektroprivredu – Zagreb, 1978.
- [5] Skupina autora, Tehnički priručnik – peto izdanje, Končar Elektroindustrija d.d., 1991.
- [6] G. Biškupović, „Statistički pregled HEP – ODS d.o.o., Elektra Sisak 2017“, Sisak, 2018.
- [7] Desetogodišnji (2019.2028.) plan razvoja distribucijske mreže HEP ODS-a s detaljnom razradom za početno trogodišnje i jednogodišnje razdoblje, HEP ODS, 2018.
- [8] M. Jurić, F. Relić, T. Tomašić: Prijelaz 10 kV mreže Elektre Sisak na 20 kV, HEP ODS, Sisak, 2019.