

# UNAPREĐENJE KONCEPCIJSKIH REŠENJA KABLOVSKE DISTRIBUTIVNE MREŽE 10 I 35 KV U ED BEOGRAD

S. Minić, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Srbija  
N. Obradović, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Srbija

## 1. UVOD

Rezultati prikazani u ovom radu proistekli su iz istraživanja realizovanih u okviru studije [1]. Osnovni zadatak koji se nametnuo u ovoj studiji je bio da se reši problem preuzimanja funkcije dotrajale kablovske mreže 35 kV (a delom i 110 kV) u narednom dvadesetogodišnjem periodu u delu mreže ED Beograd na desnoj obali Save i Dunava (šumadijskom delu mreže). Naravno, nova mreža je trebalo da zadovolji zadate tehničke kriterijume (pre svega termičke granice opteretljivosti elemenata u normalnim i havarijskim stanjima) za opterećenje koje je u horizontnoj 2025. godini za 30-ak procenata veće od opterećenja u početnoj 2005/2006. godini (33% u nižoj varijanti prognoze, a 37% u višoj varijanti prognoze usvojenoj u studiji [1]).

Da bi se efikasno planirao budući razvoj mreže, a imajući u vidu broj elemenata mreže u opticaju i broj etapa u kojima ti elementi figuriraju, bilo je potrebno izvršiti predselekciju nekih rešenja, odnosno, odabrati optimalne koncepcije napajanja u mreži 35 kV (a delom i 10 kV), a zatim za pojedinačne delove konzuma izabrane koncepcije varirati kao moguća rešenja i odabrati optimalno. U radu će biti prikazane dve koncepcije koje su omogućili efikasan izbor rešenja u budućoj mreži na području EDB.

Prvi deo rada posvećen je novom načinu napajanja postojećih TS 35/10 kV za koje se u perspektivnom periodu očekuje izlazak iz pogona zbog dotrajalosti njihove napojne kablovske mreže. U gradskoj kablovske mreži 35 kV je na osnovu [2] definisano da se kablovi opterećuju po principu "jedan vod - jedan energetski transformator 35/10 kV". Ova koncepcija je posledica primene IPZO kablova 35 kV sa provodnikom preseka Al 150 mm<sup>2</sup>, ili Cu 95 mm<sup>2</sup> čija je prenosna moć (270 A, odnosno, 16.4 MVA pri nominalnom naponu - [1]) nešto veća od prenosne moći transformatora 35/10 kV snage 12.5 MVA. Imajući u vidu činjenicu da u gradskom području dotični kabl obično napaja transformator 35/10 kV snage 12.5 MVA, najčešće je bilo neophodno obezbediti i rezervni kabl 35 kV koji bi služio kao rezervni za dva transformatora. U ne malom broju slučajeva mreža je predimenzionisana, tako da svaki transformator ima svoj rezervni kabl. Međutim, zbog karakteristika i znatno veće prenosne moći kablova tipa XHE (u prednosti su u odnosu na kablove tipa IPZO), a naročito kablova sa provodnikom preseka Al 240 mm<sup>2</sup> čija je prenosna moć (460 A, odnosno, 27.9 MVA pri nominalnom naponu) dovoljna za napajanje dva transformatora 35/10 kV snage 12.5 MVA usvojeno je da se za napajanje TS 35/10 kV snage 4x12.5 MVA koriste ukupno tri 35 kV kabla sa XHE izolacijom i provodnikom preseka Al 240 mm<sup>2</sup>. Tri kabla omogućuju sigurno napajanje TS 35/10 kV, a u posebnom poglavlju ovog rada opisano je uklapanje ova tri kabla u različite tipove postrojenja 35 kV na području ED Beograd tako da se zadovolje zahtevi sigurnosti (princip sigurnosti "n-1").

Drugi deo rada posvećen je definisanju optimalnog načina napajanja konzuma TS 35/10 kV koja u periodu koji se razmatra ostaje bez svoje napojne mreže 35 kV. Imajući u vidu tehničke karakteristike i

usvojene cene 10 kV i 35 kV kablova i eventualno postojanje TS 110/10 kV sa slobodnim kapacitetima u transformaciji 110/10 kV i dovoljnim brojem ćelija 10 kV za nove kablove, koja bi mogla da prihvati napajanje konzuma TS 35/10 kV posredstvom nove mreže 10 kV, kao supstitucija napojne kablovske mreže 35 kV, formiran je kriterijum koji omogućuje brzu i, u velikom broju slučajeva, preciznu procenu koje je rešenje ekonomičnije. Kriterijum je formiran na osnovu specifičnih troškova prenosa snage vodovima 35 i 10 kV imajući u vidu prenosne mogućnosti određenog broja kablova jednog i drugog naponskog nivoa.

## **2. JEDINIČNE CENE ELEMENATA MREŽE I GUBITAKA I PRENOSNE MOGUĆNOSTI 35 KV VODOVA**

Za potrebe analiza prikazanih u ovom radu važne su tehničke karakteristike kablova 10 i 35 kV i transformatora 35/10 kV (podužna rezistansa, reaktansa i termička granica opterećenja), jedinične cene ovih elemenata mreže kao i ćelija 10 i 35 kV i jedinične cene građevinskih radova za polaganje kablova. Za potrebe ekonomskih analiza neophodni su i cena maksimalnih gubitaka snage i godišnje stope pojedinih elemenata mreže. Sve vrednosti cena elemenata korišćenih u analizama proistekle su iz detaljnih analiza izvedenih projekata izgradnje kao i utvrđenih cena različitih tipova radova i opreme u ED Beograd. Ove cene korišćene su i za analize u [1].

Treba napomenuti da je za građevinske radove za polaganje većeg broja kablova u isti rov računato sa povećanjem jedinične cene polaganja kablova za 20% za svaki sledeći kabl u rovu.

Na osnovu usvojenih vrednosti svih parametara koji utiču na njeno formiranje, na način opisan u [3], formirana je cena 1 MW vršnih gubitaka aktivne snage na nivou TS 110/X kV od približno 200000 € za gubitke usled opterećenja i oko 375000 €, za gubitke u gvožđu. Sve analize su realizovane sa modelovanim opterećenjem na nivou transformacije 110/X kV, a opterećenja elemenata nižih naponskih nivoa uzeta su obzir kroz faktore jednovremenosti kojima se redukuje njihovo vršno opterećenje pri svođenju na maksimalno opterećenje napojne TS 110/X kV. Zato je prenosna moć vodova 35 kV redukovana u odnosu na stvarne termičke granice opterećenja pojedinih tipova vodova.

## **3. IZMENJENA KONCEPCIJSKA REŠENJA MREŽE 35 KV**

### **3.1. Ekonomske osnove za izmenu koncepcije napajanja TS 35/10 kV u užem gradskom jezgri Beograda**

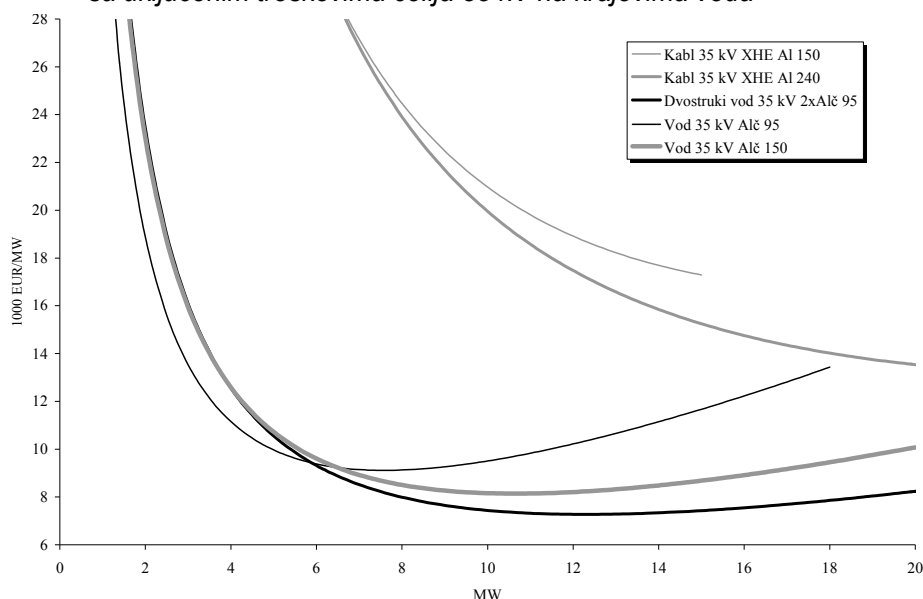
Specifični troškovi prenosa snage nekim elementom mreže se određuju kada se ukupni troškovi prenosa određene snage podele tom snagom. Ukupni troškovi prenosa određene snage su zbir troškova gubitaka i troškova kapitala uloženog u posmatrani element mreže. Troškovi gubitaka se izračunavaju kada se iznos gubitaka aktivne snage pri prenosu određene vrednosti snage množi sa cenom gubitaka usled opterećenja pojedinih elemenata (200000 €/MW). Troškovi kapitala za pojedine elemente izračunavaju se kao proizvod cene elementa i njegove stope godišnjih troškova. Vodovi su modelovani na osnovu svojih podužnih parametara  $r$ ,  $x$  i  $b$  ( $\Omega/\text{km}$ ). Opterećenje je modelovano na jednom kraju elementa, pri čemu je faktor snage 0.97 (uobičajen za područje EDB), a napojna tačka je modelovana kao da radi na približno nominalnom naponu na suprotnom kraju elementa.

Pri poređenju ekonomičnosti prenosa vodovima 35 kV razmatrani su vodovi dužine 10 km. Promena faktora isporučene snage utiče na ukupne troškove prenosa snage (što je veći faktor snage niži su gubici, pa su niži i troškovi prenosa), ali se beznačajno menjaju međusobni položaji krivih za različite tipove i preseke vodova, tako da zaključci važe za širok opseg vrednosti faktora snage. S druge strane, dužine vodova za koje se vrši analiza značajno utiču na cenu prenosa (uvećavaju se približno onoliko puta koliko puta je povećana dužina voda). Međutim, i u ovoj situaciji se zadržavaju međusobni položaji krivih troškova prenosa po jedinici snage. Zbog toga zaključci koji važe za vodove dužine 10 km, važe i za vodove većih dužina. Nešto je izmenjena situacija kada se u troškove prenosa snage uključe i troškovi terminalnih vodnih ćelija ili polja (uticaj na ukupne troškove je manji ukoliko je vod duži).

S obzirom da način kako će biti izvršeno pojačanje mreže (novi ili rekonstruisani vod, promena naponskog nivoa prenosa itd.) ne diktira samo nivo opterećenja već i njegov raspored, konfiguracija mreže, raspored napojnih TS i mnogi drugi faktori, zaključke koji su izloženi u ovom delu rada treba shvatiti načelno. Takođe, treba imati na umu da su na narednoj slici prikazane statičke krive specifičnih troškova, dakle, nije uzeto u obzir da se opterećenje menja (uglavnom raste). Prema tome prikazane krive su orijentacija planeru, a konkretna rešenja zavise od niza okolnosti.

Rezultati poređenja ekonomičnosti prenosa snage nadzemnim i kablovskim vodovima 35 kV su prikazani na sl. 1. Treba napomenuti da su za poređenje uzeti kablovski vodovi 35 kV tipa XHE Al 150 i 240 mm<sup>2</sup>, jer imaju približno iste karakteristike (podužnu otpornost i reaktansu) kao uljni (IPZO) kablovi istog preseka, a značajno veću prenosnu moć i niže troškove održavanja.

sl. 1: Poređenje ekonomičnosti prenosa snage kablovskim i nadzemnim vodovima 35 kV dužine 10 km sa uključenim troškovima čelija 35 kV na krajevima voda



Kao što može da se vidi na sl. 1, nadzemni vodovi 35 kV su, bez obzira na presek, što se tiče ekonomičnosti prenosa električne energije, uvek u prednosti u odnosu na kablove 35 kV (troškovi polaganja kablova u gradskoj sredini su dominantni u njihovoj ukupnoj ceni). Što se samih kablova tiče, zahvaljući uticaju investija u polaganje kablova, prema specifičnim troškovima prenosa, kabl XHE preseka Al 240 mm<sup>2</sup> je u najvećem delu opsega vrednosti prenetih snaga u prednosti u odnosu na kabl XHE preseka Al 150 mm<sup>2</sup>. Činjenica da je dozvoljeno opterećenje kabla preseka Al 240 mm<sup>2</sup> za trećinu veće od dozvoljenog opterećenja kabla Al 150 mm<sup>2</sup>, uslovila je da ovaj kabl treba da bude osnova buduće koncepcije napajanja u kablovskoj mreži 35 kV, a samu koncepciju određuje činjenica da prenosna moć ovog kabla odgovara prenosnoj moći dva transformatora 35/10 kV snage 12.5 MVA.

### 3.2. Tehnička i ekonomska analiza predloga izmene koncepcije napajanja TS 35/10 kV

U gradskoj kablovskoj mreži 35 kV je Internim standardima [2] definisano da se kablovi opterećuju po principu "jedan vod - jedan energetski transformator 35/10 kV". Imajući u vidu činjenicu da u gradskom području dotični kabl obično napaja transformator 35/10 kV snage 12.5 MVA, najčešće je bilo neophodno obezbediti i rezervni kabl 35 kV koji bi služio kao rezervni za dva transformatora. U ne malom broju slučajeva mreža je predimenzionisana, tako da svaki transformator ima svoj rezervni kabl. Međutim, zbog karakteristika i znatno veće prenosne moći kablova tipa XHE (u prednosti su u odnosu na kablove tipa IPZO) u izmenjenoj koncepciji napajanja u okviru [1] je usvojeno da se za novu TS 35/10 kV sa instalisanom snagom 2x12.5 MVA osnovno napajanje realizuje jednim kablovskim vodom 35 kV, a da se kao rezervni položi drugi kablovski vod 35 kV istog tipa i preseka. Za TS 35/10 kV sa instalisanom snagom 4x12.5 MVA, što je i najčešći slučaj u gradskoj mreži 35 kV ED Beograd, bi se, u principu, osnovno napajanje realizovalo sa dva kablovska voda 35 kV, dok bi se treći kabl 35 kV polagao kao rezervni. Primena ove koncepcije omogućuje smanjenje broja izvodnih čelija 35 kV u TS 35/10 kV (umesto šest do osam, dovoljne su tri) i u njihovim napojnim TS 110/35 kV, a samim tim i uprošćenje postrojenja. Naravno, imajući u vidu dozvoljene granice opteretljivosti kablova tipa XHE pojedinih preseka, jasno je da se za napajanje dva nominalno opterećena transformatora 35/10 kV snage 12.5 MVA moraju koristiti kablovi preseka Al 185 mm<sup>2</sup> ili Al 240 mm<sup>2</sup>. Imajući u vidu malu razliku u ceni ovih kablova i analize ekonomičnosti prenosa snage koje su vršene za vodove 35 kV, kao koncepcijsko rešenje izabrani su kablovi Al 240 mm<sup>2</sup>. Dozvoljeno opterećenje ovog kabla (oko 27.9 MVA na nivou transformacije 35/10 kV) garantuje napajanje dva nominalno opterećena transformatora 35/10 kV snage 12.5 MVA. Da bi se obezbedilo zadovoljavajuće hlađenje paralelno vođenih kablova u kritičnoj situaciji kada dva kabla nose po dva nominalno opterećena transformatora 35/10 kV snage 12.5 MVA, neophodno je da kablovi budu položeni na rastojanju od bar 30 cm u rovu, a toplotnim proračunom bi se definisali tačni uslovi polaganja pomenuta tri kabla.

U narednoj tabeli prikazano je poređenje tehničkih mogućnosti u pogledu prenosa snage između dva kabla XHE Al 240 mm<sup>2</sup> položena u istom rovu i četiri kabla IPZO Al 150 mm<sup>2</sup> položena u istom rovu, pri čemu je računato sa rastojanjem od po 20 cm između kablova. Korišćeni podaci o mogućnostima opterećenja kablova su dobijeni na bazi [2] i [4]. U istoj tabeli prikazana su i potrebna ulaganja za kablove dužine 1 km i njihove ćelije 35 kV u TS 110/35 kV i TS 35/10 kV, pri čemu je računato sa jednim rezervnim kablom u slučaju da se primenjuje kabl XHE Al 240 mm<sup>2</sup> i dva rezervna kabla ukoliko se primenjuje kabl IPZO Al 150 mm<sup>2</sup>. Konačno, poređenje je prikazano i za slučaj TS 35/10 kV 2x12.5 MVA koja se u postojećoj koncepciji napaja sa dva napojna i jednim rezervnim kablom IPZO Al 150 mm<sup>2</sup>, a u novoj bi rešenje bilo sa jednim napojnim i jednim rezervnim kablom XHE Al 240 mm<sup>2</sup>.

**TABELA 1: Poređenje tehničkih i ekonomskih karakteristika postojeće i nove koncepcije kablovske mreže 35 kV u gradu za napajanje TS 35/10 kV 4x12.5 MVA**

	Koncepcija sa 2+1 kablom XHE Al 240 mm <sup>2</sup> koji napajaju TS 35/10 kV 4x12.5 MVA	Koncepcija sa 4+2 kabla IPZO Al 150 mm <sup>2</sup> koji napajaju TS 35/10 kV 4x12.5 MVA
Dozvoljeno opterećenje jednog kabla u zimskim uslovima (A)	460	270
Broj kablova u pogonu položenih u istom rovu	2	4
Sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja zbog polaganja više kablova u isti rov (računato je sa rastojanjem od 20 cm između kablova)	0.86	0.73
Ukupno dozvoljeno jednovremeno opterećenje grupe kablova u pogonu koja napaja TS 35/10 kV (A)	791.2	788.4
Ukupno dozvoljeno jednovremeno opterećenje grupe kablova u pogonu koja napaja TS 35/10 kV pri nominalnom naponu 35 kV (MVA)	47.96	47.79
Nivo opterećenja TS 35/10 kV 4x12.5 MVA koji je moguće jednovremeno napajati pri nominalnom naponu (%)	95.9	95.6
Vrednost kablova dužine 1 km i građevinskih radova za njihovo polaganje (€)	202000	374000 <sup>1</sup>
Vrednost priključnih ćelija 35 kV u TS 35/10 kV i napojnim TS 110/35 kV (€)	132000	264000
Ukupna vrednost napojnih kablova dužine 1 km i priključnih ćelija (€)	334000	638000
Vrednost ulaganja u kablovsku mrežu po 1 MVA isporučene snage za kablove dužine 1 km koji su opterećeni do dozvoljene granice (1000 €/MVA)	6.96	13.35

**TABELA 2: Poređenje tehničkih i ekonomskih karakteristika postojeće i nove koncepcije kablovske mreže 35 kV u gradu za napajanje TS 35/10 kV 2x12.5 MVA**

	Koncepcija sa 1+1 kablom XHE Al 240 mm <sup>2</sup> koji napajaju TS 35/10 kV 2x12.5 MVA	Koncepcija sa 2+1 kablom IPZO Al 150 mm <sup>2</sup> koji napajaju TS 35/10 kV 2x12.5 MVA
Dozvoljeno opterećenje jednog kabla u zimskim uslovima (A)	460	270
Broj kablova u pogonu položenih u istom rovu	1	2
Sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja zbog polaganja više kablova u isti rov (računato je sa rastojanjem od 20 cm između kablova)	1	0.86
Ukupno dozvoljeno jednovremeno opterećenje grupe kablova u pogonu koja napaja TS 35/10 kV (A)	460	464.4
Ukupno dozvoljeno jednovremeno opterećenje grupe kablova u pogonu koja napaja TS 35/10 kV pri nominalnom naponu 35 kV (MVA)	27.89	28.15
Nivo opterećenja TS 35/10 kV 2x12.5 MVA koji je moguće jednovremeno napajati pri nominalnom naponu (%)	111.6	112.6
Vrednost kablova dužine 1 km i građevinskih radova za njihovo polaganje (€)	156000	187000
Vrednost priključnih ćelija 35 kV u TS 35/10 kV i napojnim TS 110/35 kV (€)	88000	132000
Ukupna vrednost napojnih kablova dužine 1 km i priključnih ćelija (€)	244000	319000
Vrednost ulaganja u kablovsku mrežu po 1 MVA isporučene snage za kablove dužine 1 km koji su opterećeni do dozvoljene granice (1000 €/MVA)	8.75	11.33

<sup>1</sup> Računato je da se četiri napojna kabla polažu u jednom rovu, a dva rezervna u drugom rovu

Pažljivom analizom priloženih tabela uočava se da su prenosne mogućnosti oba predložena rešenja približno iste (u slučaju napajanja TS 35/10 kV 4x12.5 MVA nešto je bolje rešenje sa kablovima XHE Al 240 mm<sup>2</sup>, a u slučaju napajanja TS 35/10 kV 2x12.5 MVA rešenje sa kablovima IPZO Al 150 mm<sup>2</sup>, ali je i rešenje sa XHE Al 240 mm<sup>2</sup> zadovoljavajuće). S ekonomske tačke gledišta rešenje sa kablovima XHE Al 240 mm<sup>2</sup> je u slučaju napajanja TS 35/10 kV 4x12.5 MVA skoro dvostruko jeftinije, a u slučaju napajanja TS 35/10 kV 2x12.5 MVA rešenje sa kablovima XHE Al 240 mm<sup>2</sup> dužine 1 km je jeftinije za četvrtinu. Jasna je ekonomska prednost nove koncepcije.

Sa gledišta havarijskih situacija ukoliko se primeni nova koncepcija, u slučaju kvara na kabl u pogonu, ispala snaga je dvostruko veća, ali je vreme bez napajanja isto jer je potrebna samo jedna manipulacija da se uspostavi normalno napajanje (potrebno je samo uključiti rezervni kabl). S obzirom na kratko vreme potrebno za obnovu pogona u ovakvim situacijama (koje je obezbeđeno daljinskim upravljanjem mrežom 35 kV) opravdano je uvođenje nove koncepcije. Pri analizi ispale snage treba imati u vidu da polaganje drugog ili trećeg kabla kao rezervnog ne znači da se on ne bi opterećivao u normalnom pogonu, već samo ukazuje na ukupan potrebni kapacitet 35 kV kablova. Ukoliko bi se, dakle, koristila sva tri (odnosno, oba) kabla u normalnom pogonu, u slučaju havarije na jednom od dva manje opterećena kabla ispala snaga bi mogla biti svedena na ispalu snagu u slučaju primene postojeće koncepcije.

U slučaju TS 35/10 kV snage 4x12.5 MVA priključak tri napojna kabla i četiri transformatora na (uobičajene u ED Beograd) četiri sekcije sabirnica koje su povezane u krug zavisi od okruženja te TS i funkcije tih kablova u ostatku mreže. Naime, ukoliko je TS 35/10 kV jedina napajana TS iz TS 110/35 kV u tom pravcu, onda je prirodno da se svaki od kablova veže na jednu sekciju sabirnica 35 kV, a transformatori 35/10 kV upare na jednoj sekciji, a na druge dve veže po jedan, pri čemu bi se potpuno rasteretila jedna sekcija 35 kV i omogućila njena demontaža. Na taj način bi se postrojenje moglo značajno smanjiti po obimu.

Ukoliko je na pravcu napajane TS 35/10 kV još neka TS 35/10 kV rezervni kabl bi mogao da ima tu funkciju za obe TS i na taj način bi se značajno smanjio obim 35 kV mreže. Naravno, u toj situaciji najbolje rešenje za brzo uspostavljanje napajanja nakon havarijskih situacija bi bilo da se na dve sekcije sabirnica vezuju po jedan napojni kabl i dva transformatora, a da se na treću veže rezervni kabl po principu "ulaz-izlaz", pri čemu "ulaz" podrazumeva rezervni kabl iz pravca napojne TS 110/35 kV, a "izlaz" podrazumeva rezervni kabl u pravcu sledeće TS 35/10 kV. Oprema iz četvrte sekcije 35 kV bi se mogla u potpunosti demontirati.

Ukoliko je kod TS 35/10 kV u pitanju postrojenje sa dvostrukim sabirnicama 35 kV, za prvi slučaj, izolovano napajane TS 35/10 kV, dvostruke sabirnice 35 kV ne moraju biti sekcionisane, s tim što bi u tom slučaju rezervni kabl mogao da bude van pogona da ne bi radio u paraleli sa nekim od osnovnih napojnih kablova. S druge strane, kod TS 35/10 kV iz koje dalje obezbeđuje rezerva za neku TS 35/10 kV neophodno je obezbediti sekcionisanje dvostrukih sabirnica 35 kV da bi se mogla ostvariti situacija da jedna od četiri sekcije 35 kV sabirnica služi kao prolazna u slučaju potrebe da se preko rezervnog kabla obezbedi napajanje TS 35/10 kV u produžetku mreže.

Modifikacije predloženih principskih rešenja su za svaki karakterističan slučaj posebno elaborirane u [1] i njihova pojava je moguća zbog činjenice da opterećenje pojedinih TS 35/10 kV neće dostići nominalno opterećenje pre ulaska u pogon TS 110/10 kV koje ih drastično rasterećuju, te da se iz tog razloga sigurno napajanje može realizovati i sa manjim obimom 35 kV mreže.

Može se zaključiti da predloženo uvođenje kablova 35 kV većeg preseka i veće prenosne moći u upotrebu doprinosi smanjenju ukupnog obima kablovske mreže (teoretski se ukupna dužina položenih kablova smanjuje na 50% u odnosu na postojeću koncepciju kod TS 35/10 kV sa 4x12.5 MVA jer je potrebno položiti tri umesto šest napojnih 35 kV kablova), smanjenju obima postrojenja 35 kV (umesto dvanaest priključnih ćelija za šest kablova 35 kV neophodno je opremiti šest ćelija za tri kabla 35 kV), a uz isti nivo sigurnosti napajanja posmatrane TS 35/10 kV. Nova koncepcija ne uvodi nove probleme u eksploataciju mreže 35 kV jer se rezervno napajanje obezbeđuje na jednostavan i očigledan način.

Internim standardima [2] su instalisane snage TS 35/10 kV ograničene na 2x8 MVA ili 2x12.5 MVA u konačnoj fazi izgradnje. Međutim, kako u gradskom delu mreže 35 kV ED Beograd već postoje TS sa četiri jedinice snage 12.5 MVA, pri planiranju daljeg razvoja mreže u okviru [1] se išlo sa povećanjem kapaciteta postojećih TS 35/10 kV do 4x12.5 MVA, naravno, uz odgovarajuće pojačanje kablovske mreže 35 kV. Principska šema postrojenja u takvoj TS koja bi bila napajana primenom nove koncepcije kablovske mreže 35 kV podrazumeva primenu sistema dvostrukih glavnih sabirnica 35 kV koje su sekcionisane rastavljačima tako da jednu sekciju dvostrukih sabirnica napaja par kablova 35 kV, a drugu jedan kabl 35 kV, pri čemu se sa svake sekcije napajaju po dva transformatora 35/10 kV. Treba istaći činjenicu da se nova koncepcija 35 kV gradske kablovske mreže može jednostavno uklopiti i u postojeća postrojenja 35 kV, pri čemu je za svaki karakterističan slučaj uklapanja u okviru [1] data uklopna šema u normalnom pogonu i pri karakterističnim havarijskim situacijama.

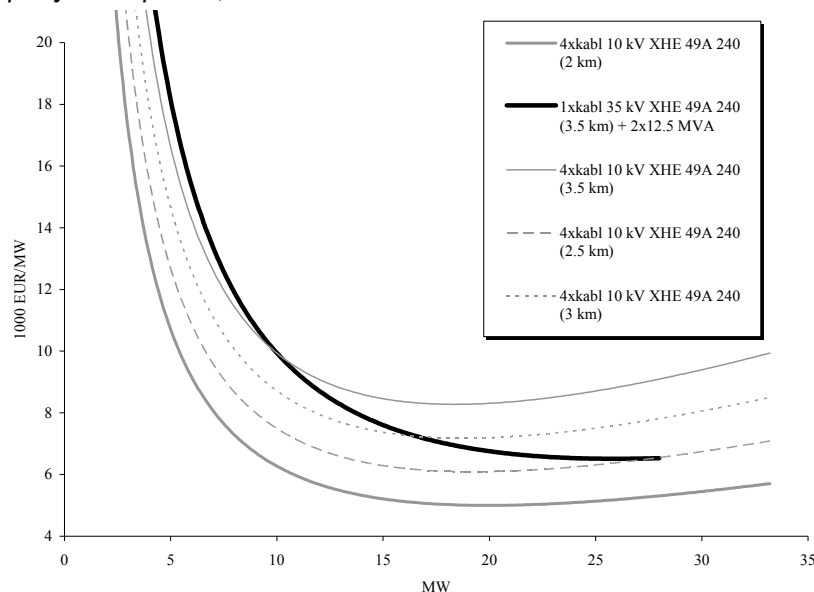
## 4. IZBOR NAČINA NAPAJANJA KONZUMA TS 35/10 KV ČIJA NAPOJNA MREŽA 35 KV DOTRAJAVA

### 4.1. Ekonomske osnove za formiranje preliminarnog izbora načina napajanja

S obzirom na starost postojećih kablovskih vodova 35 kV, kao i opreme u pojedinim TS 35/10 kV na gradskom području ED Beograd koja je bila predmet razmatranja u [1], jedno od važnih pitanja koje se nametnulo pri planiranju razvoja kablovske mreže 35 kV je bilo da li je ekonomičnije da se pojedine gradske TS 35/10 kV gase i da se njihov konzum napaja preko mreže 10 kV, ili da se na odgovarajući način obnavlja mreža 35 kV (u obe situacije se podrazumeva da se ima napojna tačka 110/X kV). Iz tog razloga je od posebnog značaja bilo da se izvrši preliminarno poređenje ekonomičnosti prenosa snage kablovskim vodovima 35 i 10 kV.

S obzirom na karakteristike i na veličinu konzuma koji bi trebalo da napajaju, za poređenje su izabrani kablovi 10 kV tipa XHE Al 240 mm<sup>2</sup>, a za mrežu 35 kV XHE Al 240 mm<sup>2</sup> (kabl preseka Al 150 mm<sup>2</sup> za isti tip kablova nije razmatran zbog male razlike u ceni u odnosu na presek Al 240 mm<sup>2</sup>). Imajući u vidu dotrajalost razmatrane gradske kablovske mreže 35 kV i prosečne dužine kablova od oko 3.5 km, najpre je izvršeno poređenje troškova prenosa snage jednim kablovskim vodom 35 kV koji na svom kraju napaja dva nova transformatora 35/10 kV snage 2x12.5 MVA (vod je dužine 3.5 km, sa uračunatim troškovima opremanja čelija 35 kV na krajevima voda i transformatorskih čelija 35 i 10 kV) i troškova prenosa snage ako se imaju četiri kabla 10 kV različitih dužina sa uračunatim troškovima opremanja čelija 10 kV na krajevima vodova (sl. 2). Naime, analizirano je koliko jedna TS 35/10 kV sa instalisanom snagom 2x12.5 MVA treba da bude udaljena od napojne TS, da bi bilo ekonomičnije da se umesto obnavljanja mreže 35 kV (polaganje novih kablova 35 kV i nabavka novih transformatora 35/10 kV snage 12.5 MVA i odgovarajuće opreme 35 i 10 kV) odgovarajući konzum napaja pod naponom 10 kV (pri analizama se smatralo da napojna tačka 10 kV već postoji).

sl. 2: Poređenje ekonomičnosti prenosa snage kablovima 35 i 10 kV različitih dužina sa uračunatim troškovima priključne opreme, a za kabl 35 kV i sa dva transformatora 35/10 kV 2x12.5 MVA



Kao što može da se vidi na sl. 2, u situacijama kada se razmatra da li da se za napajanje konzuma veličine oko 25 MW obnavlja mreža 35 kV ili da se polažu kablovi 10 kV, za sve dužine napojnih vodova do oko 2.6 km je ekonomičnije da se napajanje vrši pod naponom 10 kV. Treba istaći da četiri kabla 10 kV garantuju sigurno napajanje analiziranog konzuma, dok jedan kabl 35 kV ne garantuje sigurno napajanje.

S obzirom da se u razmatranoj gradskoj kablovskoj mreži 35 kV u okviru [1] imaju dosta stari kablovi 35 kV, kao i postrojenja TS 35/10 kV (oprema i transformatori) od posebnog značaja za planiranje razvoja mreže 110 i 35 kV na ovom području, do kraja 2025. godine, je bila analiza ekonomičnosti prenosa snage sa tri kabla 35 kV (dva za osnovno i trećim kablom za rezervno napajanje) i četiri transformatora snage 4x12.5 MVA sa uračunatim troškovima čelija 35 kV na krajevima vodova i troškovima transformatora i transformatorskih čelija 35 i 10 kV, i ako se ista snaga distribuira preko osam kablova 10 kV iste dužine sa uračunatim troškovima čelija 10 kV na krajevima vodova (odnosno, ekonomsko poređenje nove koncepcije napajanja TS 35/10 kV kablovskom mrežom 35 kV i rešenja

napajanja istog konzuma pod naponom 10 kV). Pri analizi je računato da se sva tri kabla 35 kV polažu u istom rovu, a da se kablovi 10 kV polažu u dva rova (u svakom po četiri kabla).

Rezultati poređenja ekonomičnosti prenosa u opisanom slučaju su u okviru [1] obrađeni grafički na isti način kao na prethodnoj slici, pri čemu se u proračunima računalo da postoji napojna tačka 35 kV, odnosno 10 kV.

Na osnovu obavljenih analiza, u slučajevima gde se ima "puna" TS 35/10 kV snage 4x12.5 MVA (konzum TS je veličine oko 50 MW) koja je od napojne tačke 35 kV udaljena oko 3.5 km (ova dužina je karakteristična za niz TS 35/10 kV na gradskom području u okviru [1]) i gde se postavlja pitanje da li da se napajanje posmatranog konzuma reši obnavljanjem postojeće mreže 35 kV (polaganje tri kabla 35 kV dužine 3.5 km i preseka Al 240 mm<sup>2</sup>, nabavka četiri transformatora snage 12.5 MVA i opremanje odgovarajućih priključnih ćelija 35 i 10 kV) ili pojačanjem mreže 10 kV (polaganje osam kablova 10 kV preseka Al 240 mm<sup>2</sup> i opremanje odgovarajućih priključnih ćelija 10 kV), ekonomičnije bi bilo da se posmatrani konzum napaja preko mreže 10 kV, samo ako bi napojni kablovi 10 kV bili kraći od 2.6 km.

Pokazuje se i da, za TS 35/10 kV koje su niže opterećene, napojni kablovi 10 kV, kojima bi se preuzelo napajanje njihovog konzuma, mogu da budu i duži od 2.6 km. Analize pokazuju da za opterećenje TS od oko 20 MW dužina napojnih kablova 10 kV može da bude i 3.5 km (za veće dužine je ekonomičnije da se obnavlja mreža 35 kV).

Takođe, imajući u vidu da su ulaganja u transformatore 35/10 kV snage 12.5 MVA fiksna bez obzira na dužine kablova, ukoliko su kablovi 35 kV kraći, raste odnos dužine kablova 10 kV i kablova 35 kV za koje je ekonomičnije pojačati mrežu 10 kV.

S obzirom da gašenje transformacije 35/10 kV ima uticaja kako na razvoj mreže 35 kV, tako i na razvoj mreže 110 kV, to se pri planiranju daljeg razvoja mreže, uz uvažavanje odgovarajućih tehničkih kriterijuma, mora voditi računa o ukupnim troškovima nekog rešenja i, stoga, opisane analize treba shvatiti samo kao smernice u sagledavanju potencijalnih pravaca razvoja pojedinih segmenata mreže.

#### **4.2. Napajanje udaljenog RP 10 kV iz TS 110/10 kV kao posledica dotrajavanja kablova 35 kV**

Kako je u prethodnom odeljku prikazano, za neke TS 35/10 kV kod kojih se očekuje dotrajavanje napojne kablovske mreže 35 kV, a u njihovoj blizini se nalaze TS 110/10 kV sa slobodnim kapacitetima u transformaciji, kao ekonomično rešenje može se pokazati preuzimanje njihovog napajanja pod naponom 10 kV. Pojačanje 10 kV mreže iz susedne TS 110/10 kV kako bi preuzela napajanje mreže 10 kV iz TS 35/10 kV čiji napojni kablovi dotrajavaju može se realizovati na dva načina. Prvi način je oblikovanje mreže 10 kV tako da se pojedini izvodi iz TS 35/10 kV preuzimaju novim izvodima iz TS 110/10 kV. U način realizacije ovog rešenja nije se detaljno ulazilo u [1], osim što je istaknuto koji deo mreže se na taj način preuzima i koji se eventualni novi prstenovi ili međupovezni vodovi na ovaj način obrazuju. Drugi način je napajanje postrojenja 10 kV direktnim kablovima 10 kV iz pravca TS 110/10 kV. U analizama u [1] je računato sa polaganjem jednog kabla koji preuzima jednu sekciju sabirnica 10 kV od jednog transformatora 35/10 kV snage 12.5 MVA (pretpostavlja se polaganje 10 kV XHE kablova preseka Al 240 mm<sup>2</sup>).

Primena ovakvog rešenja očekuje se uglavnom u TS 35/10 kV u kojima postoje četiri transformatora 35/10 kV i koje su jako čvorište za 10 kV mrežu. U ovakvim TS su na strani 10 kV obično dvostruke sabirnice 10 kV koje daju velike manipulativne mogućnosti u pogledu raspodele opterećenja među napojnim kablovima. Naravno, nivo opterećenja postrojenja 10 kV pre realizacije njegovog napajanja pod naponom 10 kV iz susedne TS 110/10 kV mora da bude sveden prvim načinom preuzimanja 10 kV mreže (direktnim preuzimanjem pojedinačnih izvoda) na vrednost koja garantuje sigurno napajanje sa odgovarajućim brojem 10 kV kablova. Tako, ukoliko se postrojenje napaja sa četiri XHE kabla 10 kV preseka Al 240 mm<sup>2</sup> i ako se su kablovi položeni u istom rovu na rastojanju od 7 cm, njegovo ukupno opterećenje ne bi smelo da pređe 22 MVA ([2] i [4]) i to ukoliko se obezbedi mogućnost ravnomerne raspodele ovog opterećenja po napojnim izvodima u normalnom režimu (sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja je u tom slučaju 0.66 prema Tehničkoj preporuci br. 3 ED Srbije - [4]). Ukoliko se kablovi polažu na rastojanju 20 cm, ukupno opterećenje u normalnom režimu bi moglo da iznosi oko 24.4 MVA (sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja je 0.73). U havarijskom režimu, pri ispadu jednog od napojnih kablova za razvodno postrojenje preostala tri napojna kabla moguće je maksimalno opteretiti sa ukupno oko 18 MVA, ako su položeni na rastojanju 7 cm (sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja je 0.72), što znači da je neophodno maksimalno rasterećenje RP 10 kV za oko 4 MVA. Ukoliko su kablovi položeni na rastojanju od 20 cm, tri kabla u pogonu moguće je opteretiti do 19.3 MVA (sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja je 0.77), tako da je za RP 10 kV koje je opterećeno sa maksimalno dozvoljenih 24.4 MVA neophodno rasterećenje za oko 5.1 MVA preko mreže 10 kV. U rešenjima predloženim u [1] računato

je sa opterećenjima ovih razvodnih postrojenja do oko 20 MVA, čime su ispunjeni uslovi njihovog rada u normalnom pogonu, a smanjeni su potrebni nivoi rasterećenja u havarijskim situacijama.

U pogledu eksploatacije koncept ovakvih razvodnih postrojenja donosi i određena olakšanja jer se upravlja manjim brojem elemenata mreže (nema transformatora 35/10 kV kao međuelementa između napojnog kabla i sabirnica 10 kV u postrojenju).

Do precizne ekonomske evaluacije razvodnih postrojenja 10 kV koja se napajaju iz susednih TS 110/10 kV u pogledu smanjenja obima 10 kV mreže i broja priključnih ćelija 10 kV može da se dođe tek nakon detaljnog sagledavanja funkcionisanja i daljeg razvoja mreže 10 kV. Dakle, da li će ili neće biti RP 10 kV pri gašenju određene TS 35/10 kV je pitanje koje mora posebno da se elaborira kroz precizno sagledavanje razvoja mreže 10 kV.

Principska šema RP 10 kV napajanog sa 4 kabla 10 kV iz susedne TS 110/10 kV podrazumeva primenu sistema dvostrukih glavnih sabirnica 10 kV koje su sekcionisane tako da svaku sekciju dvostrukih sabirnica napaja par kablova 10 kV. Moguće je primeniti i uprošćenu šemu, ako je potencijalni konzum RP 10 kV manji (ako se u RP 10 kV prevodi TS 35/10 kV 2x12.5 MVA), odnosno kada je broj napojnih kablova manji od četiri. Tada nije neophodno da sabirnice 10 kV budu sekcionisane. Ukoliko je RP 10 kV sa dva napojna kabla, onda nije neophodna primena dvostrukog sistema sabirnica, već je dovoljno da postoji jedan sistem sabirnica 10 kV koje su sekcionisane.

Analize obavljene u okviru [1] ukazale su na čitav niz mesta u mreži gde je ekonomičnije da funkciju dotrajale kablovske mreže 35 kV koja napaja neku TS 35/10 kV sa dotrajalim transformatorima 35/10 kV preuzme mreža 10 kV napajana iz obližnje TS 110/10 kV sa zadovoljavajućim kapacitetima u transformaciji 110/10 kV i sa dovoljnim brojem izvodnih ćelija 10 kV.

## 5. ZAKLJUČCI

Detaljne tehničke i ekonomske analize prikazane u ovom radu pokazale su opravdanost izmena koncepcija napajanja TS 35/10 kV na gradskom području čija sadašnja napojna kablovska mreža dotrajava i u kojima eventualno dotrajavaju i transformatori 35/10 kV.

Ukoliko se zadržava napajanje TS 35/10 kV pod naponom 35 kV, predložena je koncepcija sa dva 35 kV kabla XHE Al 240 mm<sup>2</sup> za napajanje TS 35/10 kV 2x12.5 MVA, odnosno, tri 35 kV kabla XHE Al 240 mm<sup>2</sup> za napajanje TS 35/10 kV 4x12.5 MVA. Izmenjena koncepcija je, kako je to detaljno pokazano u posebnom poglavlju ovog rada, značajno jeftinija, a sa sličnim tehničkim karakteristikama kao i dosadašnja koncepcija "jedan kabl - jedan transformator", koja se zasniva na primeni 35 kV kablova IPZO Al 150 mm<sup>2</sup>. Prednost nove koncepcije je u manjem broju kablova i priključnih ćelija, a mogućnost primene nove koncepcije je posledica usklađenosti prenosne moći 35 kV kabla XHE Al 240 mm<sup>2</sup> i dva transformatora snage 12.5 MVA. Detaljne analize obavljene u okviru [1] i prikazane u ovom radu pokazuju da se nova koncepcija lako može uklopiti u sve varijante postrojenja 35 kV koje su primenjene u delu mreže ED Beograd razmatranom u okviru [1].

Posebna pažnja u okviru ovog rada posvećena je mogućnosti da funkciju dotrajale kablovske mreže 35 kV i posredstvom nje napajanih dotrajalih transformatora 35/10 kV preuzme 10 kV kablovska mreža napajana iz obližnje TS 110/10 kV. Naravno, u tom slučaju neophodno je da se u dotičnoj TS 110/10 kV raspolaže dovoljnim kapacitetima u transformaciji 110/10 kV i dovoljnim prostorom za opremanje novih izvodnih ćelija 10 kV. Mogućnost preuzimanja napajanja mrežom 10 kV može preliminarno da se ispita na bazi kriterijuma koji su prikazani u ovom radu. Detaljan način realizacije napajanja konzuma dotrajale TS 35/10 kV mrežom 10 kV mora da se analizira po pojedinačnim slučajevima kroz elaborate (ili studijske analize) koje će sagledati kompletnu mrežu 10-110 kV u razmatranoj zoni. Kao jedno od tehnički zadovoljavajućih rešenja, a koje se u određenim situacijama može pokazati i ekonomičnim, u ovom radu prikazano je rešenje sa RP 10 kV, proizašlim iz dotrajale TS 35/10 kV, koje se napaja iz obližnje TS 110/10 kV sa odgovarajućim brojem kablova 10 kV (ne većim od četiri). Tehničke karakteristike ovog rešenja su razmotrene u ovom radu.

## 6. LITERATURA

- [1] Studija "Plan dugoročnog razvoja elektrodistributivne mreže PD "Elektrodistribucija Beograd" DOO (osnivač JP EPS) na širem gradskom području do 2025. godine", 2007, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd
- [2] Interni standardni EDB
- [3] S. Minić, M. Turković, G. Radović, I. Jovanović, 2001, "Proračun cene gubitaka električne energije i analiza osetljivosti", XLV konferencija ETRAN, Bukovička Banja, Zbornik radova, str. 307-310.
- [4] Zbirka tehničkih preporuka ED Srbije