Broj rada: I1-05
DOI:10.46793/CIRED2026.I1-05_146

UTICAJ PROŠIRENJA SREDNJENAPONSKE DISTRIBUTIVNE MREŽE KABLOVSKIM VODOVIMA NA RAD DISTRIBUTIVNOG SISTEMA ELEKTRIČNE ENERGIJE

THE INFLUENCE OF THE EXPANSION OF THE MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK WITH CABLE LINES ON THE OPERATION OF THE ELECTRICAL ENERGY DISTRIBUTION SYSTEM

Srbislav SARIĆ Elektrodistribucija Srbije Beograd, Ogranak Elektrodistribucija Sremska Mitrovica, Republika Srbija*
Biljana SARIĆ, Elektrodistribucija Srbije Beograd, Ogranak Elektrodistribucija Sremska Mitrovica, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Intenzivan industrijski razvoj i potreba za stvaranjem tehničkih uslova za priključenje sve većeg broja objekata za proizvodnju električne energije, zahteva značajno proširenje srednjenaponske distributivne mreže. Zbog znatno manjeg klimatskog uticaja, a i zbog jednostavnijeg rešavanja imovinsko-pravnih odnosa prilikom izgradnje, poslednjih decenija, u Elektrodistribuciji Srbije se sve više grade podzemni, kablovski vodovi naponskog nivoa 10 kV i 20 kV. Poznato je da kablovski vodovi velikih dužina, prilikom zemljospoja, generišu kapacitivne struje zbog kojih se povećava ukupna struja kvara na mestu kvara. Ona svojim intenzitetom značajno utiče na dozvoljene vrednosti ukupne otpornosti združenog uzemljenja na elektroenergetskim objektima (EEO), a sve to može izazvati probleme u radu distributivnog sistema električne energije (DSEE). Analizirajući konzumno područje transformatorske stanice (TS) 110/20 kV „Šid", na kojem je poslednjih nekoliko godina planirano proširenje kablovske mreže 20 kV za više od 35 km, autori rada će ukazati na probleme koji se mogu pojaviti u radu DSEE. Analizom dozvoljenih vrednosti napona dodira i koraka na EEO kao i uklopnog stanja na posmatranoj TS, predložiće niz aktivnosti za prevazilaženje uočenih problema.

Ključne reči: kablovski vod, kapacitivna struja, napon dodira, napon koraka, struja kvara

ABSTRACT

Intensive industrial development and the need to create technical conditions for connecting an increasing number of electricity generation facilities require significant expansion of the medium-voltage distribution network. Due to considerably lower climatic impact, as well as simpler resolution of property-legal issues during construction, underground cable lines at voltage levels of 10 kV and 20 kV have increasingly been built within the Electric Power Distribution of Serbia in recent decades. It is well known that long cable lines, during a single-phase earth fault, generate capacitive currents, which increase the total fault current at the fault location. By their magnitude, these currents significantly affect the permissible values of total resistance of the combined earthing at power system facilities, which may cause operational

* Srbislav Sarić Srbislav.Saric@es.rs; Biljana Sarić biljana.saric@es.rs

problems in the electric power distribution system. By analyzing the supply area of the 110/20 kV substation „Šid", where the expansion of the 20 kV cable network by more than 35 km has been planned in recent years, the authors point out the problems that may arise in the operation of the electric power distribution system. Through the analysis of permissible touch and step voltage values at power system facilities, as well as the switching configuration of the observed substation, a set of activities aimed at overcoming the identified problems is proposed.

Keywords: cable line, capacitive current, fault current, step voltage, touch voltage

UVOD

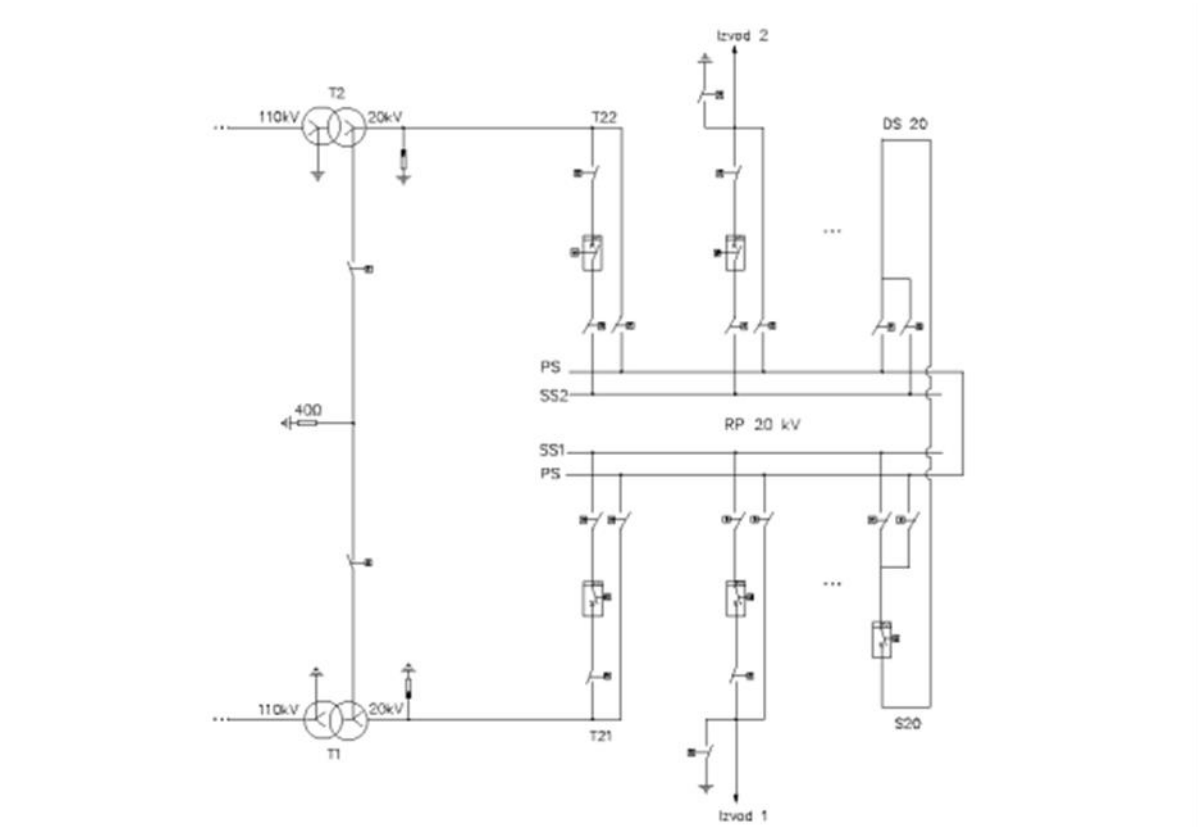
U današnjem vremenu se industrijski razvoj jedne države podrazumeva i bez njega ni jedna država ne može da opstane ako razmišlja o svojoj budućnosti. Izgradnjom industrijskih zona ali i sve većeg broja objekata za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora javlja se potreba za proširenjem srednjenaponske mreže. U Elektrodistribuciji Srbije se više grade podzemni, kablovski vodovi naponskog nivoa 10 kV i 20 kV, zbog jednostavnijeg rešavanja imovinsko – pravnih odnosa ali i manjeg klimatskog uticaja na kablovske vodove u odnosu na nadzemne vodove. Na taj način se u poslednjoj deceniji procenat učešća podzemnih, kablovskih vodova u srednjenaponskoj distributivnoj mreži značajno povećao. Uvažavajući konstrukciju kablova, a sa tim i njihovu sposobnost da generišu kapacitivne struje pri nesimetriji napona kao posledici zemljospoja, mogu se pojaviti problemi u radu distributivnog sistema električne energije (DSEE).

Ovaj rad ima za cilj da ukaže na probleme koje će izazvati kapacitivne struje proširenjem srednjenaponske mreže kablovskim vodovima kao i moguće aktivnosti za njihovo prevazilaženje. Analizirano je konzumno područje transformatorske stanice (TS) 110/20 kV „Šid" uz uvažavanje povećanja dužine kablovske mreže za potrebe priključenja budućih korisnika distributivnog sistema na srednjem naponu.

1 SADAŠNJE I BUDUĆE STANJE KONZUMNOG PODRUČJA TS 110/20 kV „ŠID"

Konzumno područje TS 110/20 kV „Šid" se napaja preko dva energetska transformatora prenosnog odnosa 110/20 kV i instalisane snage 31,5 MVA + 20 MVA. Razvodno postrojenje (RP) 20 kV ima dve sekcije jednostrukih glavnih sabirnica sa pomoćnim sabirnicama. Na sekciju sabirnica 1 (SS 1) povezano je šest izvoda 20 kV sa ukupno 56,92 km kablovskih vodova i 78,193 km vazdušnih vodova [1]. Na SS 2 povezano je sedam izvoda 20 kV sa ukupno 28,006 km kablovskih vodova i 45,109 km vazdušnih vodova [1]. Znači, dužina kablovskih vodova povezanih na SS 1 dva puta je veća od dužine kablovskih vodova povezanih na SS 2.

Zvezdišta oba transformatora su na sekundarnoj strani galvanski povezana i uzemljena preko niskoomskog otpornika 40 Ω (Slika 1). Kada su počele da se projektuju i grade TS 110/20 kV na konzumnom području tadašnje Elektrovojvodine, doneta je odluka da se koristi tzv. „siromašna varijanta" za uzemljivanje zvezdišta dva transformatora na sekundarnoj strani. To je podrazumevalo da se zvezdišta oba transformatora na sekundarnoj strani galvanski povežu i uzemlje preko jednog niskoomskog otpornika. Ova odlika je bila jednostavnije i jeftinije rešenje od rešenja da je svako zvezdište uzemljeno preko svog niskoomskog otpornika, a pravdalo se činjenicom da su dužine kablovskih i vazdušnih vodova, u to vreme, bile znatno manje nego danas. Na taj način imamo konfiguraciju zvezdišta kao što je prikazano na Slici 1.



Slika 1 – Zvezdište sekundarnih namotaja transformatora i RP 20 kV

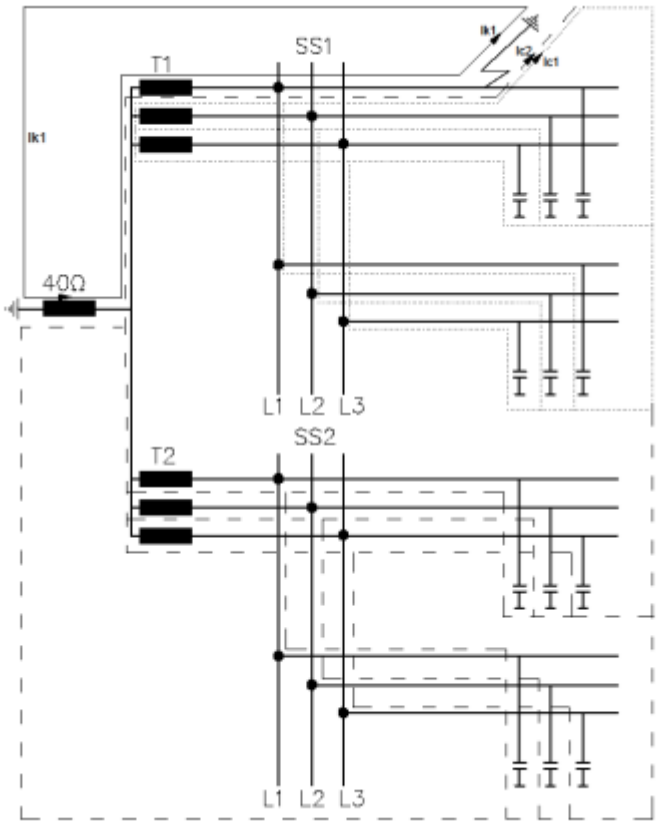
Zbog niskoomskog otpornika od 40 Ω u zvezdištima transformatora, struja kvara usled zemljospoja kroz otpornik je ograničena na cca 300 A. Međutim, u prethodne tri decenije struja kvara na mestu kvara bila je veća od 300 A, a sa proširenjem mreže postala je značajno veća. Detaljnom analizom konstatovano je da se razlika ogleda u velikoj kapacitivnoj komponenti struje zemljospoja koju generišu polietilenski jednožilni kablovi. Po nekim analizama vrednosti kapacitivne struje iznose 4,8 - 5 A/km [2], a po nekim drugim analizama iznose 2,771 A/km [3]. Naime, za grubo izračunavanje kapacitivnih struja može se koristiti obrazac (1), [3]:

$$I_c = 3 \cdot \omega \cdot C_o \cdot U_r \cdot \sum l \tag{1}$$

gde je $\omega \cdot C_o$ pogonska kapacitivna odvodnost, koja za 20 kV vazdušne vodove iznosi 3,3 μS/km [4], a za kablovske vodove 80 μS/km [4], U_r je fazni napon mreže, a $\sum l$ je ukupna dužina voda. Znači, približna kapacitivna struja za vazdušne vodove iznosi 0,114 A/km, a za kablovske vodove iznosi 2,771 A/km. Ova vrednost je korišćena u analizama rađenim prethodnih decenija za konzumno područje sadašnjeg Distributivnog područja (DP) Novi Sad. S obzirom na ove vrednosti potpuno je jasno da problem stvaraju kablovski vodovi.

Na Slici 2 prikazane su struje koje prolaze na mestu zemljospoja (kvara) i struja koja prolazi kroz otpornik [4, 5]. Struja koja prolazi kroz otpornik je struja kvara (I_{k1}) koja se napaja od transformatora koji je u direktnoj galvanskoj vezi sa izvodom na kojem je kvar i ograničena je na cca 300 A. Međutim, na mestu kvara, pored ove struje kvara, prolaze i kapacitivne struje (I_{c1}) koje se za vreme zemljospoja u srednjenaponskoj mreži sa kvarom zatvaraju preko dozemnih kapaciteta zdravih faza izvoda na kom je kvar, dozemnih kapaciteta na ostalim

izvodima sa SS1 i sekundarnih namotaja transformatora pogođenog kvarom (T1). Takođe, kroz mesto kvara prolaze još i kapacitivne struje (I_{c2}) srednjenaponske mreže bez kvara koje se zatvaraju preko svojih dozemnih kapaciteta izvoda sa SS2, sekundarnih namotaja susednog transformatora (T2), galvanske veze zvezdišta sekundarnih namotaja oba transformatora, sekundarnih namotaja transformatora pogođenog kvarom i mesta kvara. Znači, na mestu kvara dolazi do superponiranja svih ovih struja pa je ukupna struja kvara na mestu kvara veća od struje kvara koja prolazi kroz otpornik i koja se praktično ne menja. Prema tome, putevi kojima se zatvaraju kapacitivne komponente struje kvara iste su kao i u slučaju kada je zvezdište sekundarnih namotaja transformatora izolovano.
Ukupna struja kvara na mestu kvara merodavna je za izračunavanje ukupne otpornosti združenog uzemljenja (R_{zdr}), uključujući i uticaj kablova kao uzemljivača, kao i uticaj uzemljivača susednih transformatorskih stanica i objekata (zgrada) koji su vezani za neutralni provodnik niskonaponske mreže [6].



Slika 2 – Ukupna struja kvara na mestu kvara

Ako se uzme u obzir da će se u narednom periodu, na ovom konzumnom području, povećati dužina kablovskih vodova za oko 49 km i to zbog priključenja četiri solarne elektrane i jedne industrijske zone na srednjem naponu, onda se dolazi do zaključka da će se učešće kablovskih vodova u srednjenaponskoj distributivnoj mreži posmatranog konzumnog područja povećati sa 40,8% na 52,1%. Uvažavajući moguću promenu u budućnosti kao potpuno realnu, mora se povesti računa o R_{zdr}, a sa tim i o vrednosti dozvoljenog napona dodira (U_{doz}), novoj konfiguraciji zvezdišta kao i vrednosti otpornika u zvezdištu transformatora.

2 ANALIZA KAPACITIVNIH STRUJA KONZUMA TS 110/20 kV „ŠID”

Na osnovu podataka datih u prvom poglavlju kao i približno izračunatih kapacitivnih struja po dužnom kilometru voda, u Tabeli I prikazane su ukupne kapacitivne struje po izvodu 20 kV, po sekciji sabirnica i za celu transformatorsku stanicu, za sadašnje i buduće stanje.

Tabela I – Pregled kapacitivnih struja na TS 110/20 kV „Šid" (sadašnje i buduće stanje)

TS	sekcija sabirnica	Izvod	L [km] kabl,vod	Ickv [A] kabl,vod	L [km] vaz,vod	Icvv [A] vazd,vod	Σ Ic [A]
ŠID	SS 1	Šik	11,124	30,825	1,902	0,219	31,044
		Morović	29,787	82,54	35,414	4,037	86,577
		Hladnjača	1,687	4,675	0	0	4,675
		Industrija	3,484	9,654	1,559	0,178	9,832
		Kukujevci	8,054	22,318	39,318	4,482	26,8
		Park	2,784	7,714	0	0	7,714
Σ sadašnje stanje na SS 1			**56,92**	**157,726**	**78,193**	**8,916**	**166,642**
ŠID	SS 1	Novi izvod 1	10,5	29,1	0	0	29,1
		Novi izvod 2	4,1	11,361	0	0	11,361
		Dodato na izvod Kukujevci	11,5	31,867	0	0	31,867
Σ dodato na SS 1			26,1	72,328	0	0	72,328
Σ buduće stanje na SS 1			**83,02**	**230,054**	**78,193**	**8,916**	**238,97**
ŠID	SS 2	Ciglana	7,607	21,079	0	0	21,079
		Adaševci	3,508	9,721	33,953	3,871	13,592
		Žiroset	1,811	5,018	0	0	5,018
		Gibarac	4,152	11,505	10,211	1,164	12,669
		Uljara	7,026	19,469	0,945	0,108	19,577
		Istok	3,902	10,812	0	0	10,812
		TS 20/35/10 kV Šid	0	0	0	0	0
Σ sadašnje stanje na SS 2			**28,006**	**77,604**	**45,109**	**5,143**	**82,747**
ŠID	SS 2	Novi izvod 3	18,7	51,818	0	0	51,818
		Dodato na izvod Adaševci	1,3	3,602	0	0	3,602
		Dodato na izvod Gibarac	3	8,313	0	0	8,313
Σ dodato na SS 2			23	63,733	0	0	63,733
Σ buduće stanje na SS 2			**51,006**	**141,337**	**45,109**	**5,143**	**146,48**
TS 110/20 kV "ŠID"							
Σ sadašnje stanje			**84,926**	**235,33**	**123,302**	**14,059**	**249,389**
Σ buduće stanje			**134,026**	**371,391**	**123,302**	**14,059**	**385,45**

Analizom Tabele I može se primetiti da je kapacitivna komponenta struje kvara usled zemljospoja, a nakon povećanja kablovskih vodova (buduće stanje) za 136,061 A veća u odnosu na postojeće stanje i iznosi 385,45 A. Ovo nikako nije zanemariva vrednost u odnosu na struju kvara kroz otpornik koja iznosi cca 300 A. Znači, ukupna struja zemljospoja koja će se koristiti za izračunavanje R_{zdr} je 390,122 A (za sadašnje stanje) i 488,438 A (za buduće stanje).

3 DOZVOLJENA VREDNOST OTPORNOSTI R_{zdr} NA TS 20/0,4 kV

U prethodnim poglavljima moglo se primetiti da je, nakon povećanja dužina kablovskih vodova zbog priključivanja industrijskih zona i solarnih elektrana, ukupna struja kvara na mestu zemljospoja znatno veća od one koja prolazi kroz otpornik. Nameće se pitanje kolika je dozvoljena vrednost otpornosti R_{zdr}, uključujući i uticaj kablova kao uzemljivača i uticaj uzemljivača susednih TS i objekata (zgrada) koji su vezani za neutralni provodnik niskonaponske mreže, i da li su izmerene vrednosti uzemljenja na postojećim TS 20/0,4 kV u granicama dozvoljenih.

Na konzumnom području TS 110/20 kV „Šid" pojedinačno vreme trajanja zemljospoja je 0,3 s, a beznaponska pauza između ponovnih uspostavljanja struja, tj. brzo automatsko ponovno uključenje (BAPU) je 300 ms. Ako se ovo uzme u obzir onda se vreme trajanja zemljospoja t u sekundama dobija kao zbir pojedinačnih vremena trajanja zemljospoja. Uvažavajući ova podešenja na predmetnoj TS, dozvoljeni napon dodira (U_{doz}) se računa prema sledećem izrazu (2), [6]:

$$U_{doz} = \frac{75}{t}\ V, za\ 0{,}075\ s < t < 1{,}153\ s \tag{2}$$

a R_{zdr} u slučaju kada je neutralna tačka visokonaponske mreže na koju je priključena transformatorska stanica uzemljena preko male otpornosti, računa se prema izrazu (3), [6]:

$$R_{zdr} \leq \frac{(k_d \cdot U_{doz})}{(r \cdot I_k)} \tag{3}$$

gde je:

- U_{doz}= dozvoljeni napon dodira u V;
- r = redukcioni faktor visokonaponskog voda koji napaja TS, za kabl je 0,5;
- I_k = ukupna struja zemljospoja u A,
  (za sadašnje stanje: I_k =390,122 A, a za buduće stanje: I_k = 488,438 A);
- k_d = sačinilac koji određuje odnos napona uzemljenja TS i napona dodira na mestu dodira i ima vrednost 2.

Na osnovu gore navedenog dobijamo da je:

$$U_{doz} = 125\ \text{V}$$

$R_{zdr} \leq 1{,}28\ \Omega$, za sadašnje stanje i $R_{zdr} \leq 1{,}02\ \Omega$, za buduće stanje.

4 ANALIZA KONZUMNOG PODRUČJA I REŠAVANJE MOGUĆIH PROBLEMA

Na kompletnom konzumnom području TS 110/20 kV „Šid" nalazi se 207 transformatorskih stanica 20/0,4 kV. U narednom periodu očekuje se povećanje broja TS za bar 10. Analizom ćemo obuhvatiti postojećih 207 transformatorskih stanica 20/0,4 kV i vrednosti R_{zdr} koje su specijalizovane ekipe Ogranka Elektrodistribucija Sremska Mitrovica izmerile pri njihovim redovnim preventivnim revizijama.

Analizom izmerenih veličina, na konzumnom području TS 110/20 kV „Šid" ima 78 (38%) transformatorskih stanica 20/0,4 kV čije vrednosti R_{zdr} nemaju zadovoljavajuću vrednost za buduće stanje mreže i 16 (7,7%) transformatorskih stanica 20/0,4 kV koje po istom kriterijumu ne zadovoljavaju u sadašnjem stanju mreže. Transformatorske stanice 20/0,4 kV koje imaju nedozvoljene vrednosti R_{zdr} uglavnom su tipa stubna i nalaze se u ruralnim sredinama. Ovo nije zanemariv broj transformatorskih stanica 20/0,4 kV, pogotovo ako se uzme u obzir da je

vrednost potrebnih radova na zaštitnom, radnom i združenom uzemljenju po transformatorskoj stanici (rad i materijal) oko 2.000,00 €. Znači ukupna vrednost ovih radova sa materijalom na 78 transformatorskih stanica bila bi oko 156.000,00 €. S obzirom da to nije zanemariv iznos, nameće se pitanje da li postoje druga rešenja koja će izmereno R_{zdr} dovesti u granice dozvoljenih vrednosti. Neka od tih rešenja mogla bi biti ona koja su navedena u nastavku.

1. Ako bi se na TS 110/20 kV „Šid" npr. vreme trajanja zemljospoja smanjilo sa 0,3 s na 0,2 s, imali bismo povećanje U_{doz} sa 125 V na 187,5 V, a sa tim bi povećali vrednost R_{zdr} na oko 2 Ω za sadašnje stanje i R_{zdr} na oko 1,5 Ω za buduće stanje. Na taj način bismo imali, u sadašnjem stanju, jednu TS sa nedozvoljenom vrednošću R_{zdr}, a u budućem stanju tri TS sa nedozvoljenom vrednošću R_{zdr}.
2. U slučaju kada bi vreme trajanja zemljospoja ostalo na 0,3 s, a beznaponska pauza između ponovnog uspostavljanja struje (BAPU) povećana iznad 500 ms imali bismo povećanje U_{doz} sa 125 V na 250 V, a sa tim bismo povećali vrednost R_{zdr} na oko 2,5 Ω za sadašnje stanje i R_{zdr} na oko 2 Ω za buduće stanje. Na taj način, u sadašnjem stanju, ne bismo imali nijednu TS sa nedozvoljenom vrednošću R_{zdr}, i samo jednu TS sa nedozvoljenom vrednošću R_{zdr}, u budućem stanju.
3. Ako gornja rešenja nisu moguća zbog npr. velikog broja tzv. prolaznih kvarova onda bismo se mogli opredeliti za pomeranje tačke razdelnice tj. „međe" između izvoda 20 kV uz razdvajanje zvezdišta sekundarnih namotaja transformatora 110/20 kV tj. da svaki transformator ima svoj niskoomski otpornik od 40 Ω. Na taj način bi u slučaju zemljospoja postojale samo kapacitivne komponente struje kvara od sistema sabirnica koje su pogođene kvarom. Znači, one bi se skoro prepolovile pa bi R_{zdr} imalo veću vrednost, a sa tim bi se broj TS 20/0,4 kV sa nedozvoljenim vrednostima R_{zdr} značajno smanjio ili sveo na nulu.
4. Ukoliko bi se trend povećanja dužine kablova na konzumnom području nastavio i to tako da kapacitivna komponenta struje kvara postaje dominantna u ukupnoj struji kvara na mestu kvara, trebalo bi razmišljati o promeni niskoomskih otpornika sa 40 Ω na 13 Ω tj. o ograničavanju struje kvara kroz otpornik na cca 900 A. Na taj način, kapacitivna komponenta struje kvara ne bi bila dominantna u ukupnoj struji kvara na mestu kvara.

5 ZAKLJUČAK

U slučaju kada imamo značajno povećavanje dužine kablovskih vodova na konzumnom području TS 110/20 kV neophodno je uraditi detaljnu analizu uticaja kapacitivnih struja na $\boldsymbol{R_{zdr}}$ i $\boldsymbol{U_{doz}}$ i primeniti neka od rešenja koja su navedena u četvrtom poglavlju ovog rada, a koja će biti optimalna tj. dovoljno brza, dovoljno efikasna i dovoljno ekonomski opravdana.

LITERATURA

[1] Elektrodistribucija Sremska Mitrovica, Fizički obim elektroenergetskih objekata, Sremska Mitrovica 31.12.2025
[2] Vladimir I. Balkovoj, „Teškoće sa kapacitivnim strujama koje se očekuju u 20 kV uzemljenoj mreži i mogućnost njihovog prevazilaženja", Drugi susret inženjera Elektrovojvodine, Iriški Venac 1999
[3] Mr Zoran Ristanović, „Uticaj kapacitivnih struja na rad zemljospojne zaštite izvoda 20 kV u TS 110/20 kV", „Elektrodistribucija" 1995

[4] Mr Zoran Ristanović i Željko Kuvač, „Primena usmerene zemljospojne zaštite izvoda 20 kV u transformatorskim stanicama 110/20 kV“, 23. savetovanje JUKO CIGRE, Herceg Novi 1997
[5] Srbislav Sarić i Đorđe Faor, „Prednosti uvođenja prekostrujne zaštite na dugim vodovima“, 25. savetovanje JUKO CIGRE, Herceg Novi 2001
[6] Mr Gojko Dotlić, Elektroenergetika kroz standarde, zakone, pravilnike i tehničke propise, SMEITS, Beograd 2013