

Danijel Znika, mag. ing. el. inf. teh.
HEP ODS d.o.o.
danijel.znika@hep.hr

PROBLEMATIKA POGONA 20 KV MREŽE UZEMLJENE PREKO PETERSEN PRIGUŠNICE U TS 110/20 KV KRAPINA

SAŽETAK

Opisana je TS 110/20 kV Krapina, 2x20 MVA te pojašnjenje razloga izvođenja uzemljenja neutralne točke 20 kV mreže preko Petersenove prigušnice. Zbog spoja sekundarnog namota transformatora 110/20 kV u trokut, Petersenove prigušnice spojene su na primar transformatora za vlastitu potrošnju 20/0,4 kV ($S_n=250$ kVA). Obrađena je problematika pogona i isključivanja vodnih polja djelovanjem zaštite kod nastanka jednopolnih kvarova te je analiziran neselektivni ispad transformatora 110/20 kV, 20 MVA zbog kvara na 20 kV vodnom polju.

Glavne riječi: Petersen prigušnica, zaštita od nesimetričnog opterećenja, umjetno zvjezdište, prekid vodiča

PROBLEMS OF OPERATING 20 KV NETWORK GROUNDED VIA PETERSEN COILS IN STATION 110/20 KV KRAPINA

SUMMARY

In this paper substation 110/20 kV Krapina, 2x20 MVA is described and reasons for neutral point grounding via Petersen coils. Because of delta (Δ) on the secondary side of power transformer 110/20 kV, Petersen coils are connected to the primary side on transformers 20/0,4 kV ($S_n=250$ kVA). Problems of operating and disconnecting one phase faults are also described as well as non selective disconnection of power transformer 110/20 kV, 20 MVA caused by faulty 20 kV line.

Key words: Petersen coils, unbalance protection, alternative neutral point, phase discontinuity

1. UVOD

TS 110/20 kV Krapina izgrađena je 2006. godine u sklopu izgradnje autoceste Zagreb – Macelj. To je bio početak 20 kV pogonskog napon na području Elektre Zabok. Do izgradnje spomenute stanice 10 kV mreža Elektre Zabok napajala se preko tercijara transformatora 110/35/10 kV grupe spoja YNyn0d5 ili preko 35 kV mreže do transformatora 35/10 kV grupe spoja YNd5. Kako su već tada neki transformatori bili preklopivi 35/10(20) kV grupe spoja YNd5 odlučeno je zadržati postojeće grupe spojeva transformatora 35/10(20) kV. Kako bi se zadržala mogućnost prespajanja vodova bez prekida opskrbe električnom energijom iz postojećih stanica i TS 110/20 kV Krapina prilikom postepenog prijelaza mreže na 20 kV pogonski napon energetske transformatori 110/20 kV moraju imati također grupu spoja 5. Zbog prakse Operatora prijenosnog sustava za direktno uzemljenje nultoelektre energetskih transformatora 110/x kV odabrana je grupa spoja Ynd5 sa zvjezdištem na primarnoj strani. Sekundar transformatora je u spoju trokut i nema izvedeno zvjezdište te je 20 kV mreža u tom slučaju izolirana.

1.1. Uzemljenje zvjezdišta srednjonaponskih distribucijskih transformatora

Prema [4] pogon srednjonaponskih distribucijskih mreža s izoliranim zvjezdištem u pojnim transformatorskim stanicama dopušten je uz uvjet da kapacitivne struje zemljospoja ne prijeđu granične iznose prikazane u tablici I. Ako kapacitivne struje prijeđu navedene vrijednosti preporuča se provesti razdvajanje mreža ili uzemljenje zvjezdišta.

Tablica I. Granične vrijednosti kapacitivnih struja u mrežama s izoliranim zvjezdištem

Nazivni napon mreže U_n [kV]	I_c [A]
35	10
20	15
10	20

Osim izoliranog zvjezdišta transformatora, uzemljenje zvjezdište transformatora može biti i:

- direktno (kruto),
- preko maloomskog otpornika,
- preko prigušnice
 - s automatskom regulacijom
 - ručno stupnjevano
 - fiksne
- kombinacijom prigušnice i maloomskog otpornika

Kriteriji za izbor vrste uzemljenja su prema [1] sljedeći:

- iznos (kapacitivne komponente) struje kvara,
- naponska razina,
- iznosi unutarnjih prenapona,
- efikasnost i jednostavnost relejne zaštite,
- mogućnost smanjenja izolacijske razine opreme,
- stanje uzemljenja elemenata mreže,
- specifični otpor tla,
- pouzdanost opskrbe.

Tablica II. prikazuje prednosti i nedostatke pojedinih vrsta uzemljenja [1] koji se najčešće koriste u distribucijskim mrežama.

Tablica II. Prednosti i nedostaci pojedinih vrsta uzemljenja

	Prednosti	Nedostaci
Izolirano	U slučaju zemljospoja za relativno male kapacitivne struje može doći do samogašenja luka ako se radi o prolaznom kvaru. Kod malih struja zemljospoja jednostavna izvedba uzemljivača. Jednostavna i ekonomična izvedba.	Pri pojavi većih kapacitivnih struja ne dolazi do samogašenja luka. Moguća pojava intermitirajućih prenapona koji mogu uzrokovati dvostruki zemljospoj. Viši unutarnji prenaponi nego kod uzemljenih mreža. Otežana detekcija kvarova nego kod uzemljenih mreža.
Mali otpor	Jednostavna i pouzdana zaštita u odnosu na sustav s izoliranim zvjezdištem. Nemogućnost pojave dvostrukog zemljospoja. Niži unutrašnji prenaponi. Jeftiniji prelazak mreže na višu naponsku razinu.	Svaki kvar uključujući i prolazni uzrokuje ispad što smanjuje kvalitetu opskrbe električnom energijom. Veća struja kvara u odnosu na izolirano zvjezdište dovodi do otežanih uvjeta za uzemljivače transformatorskih stanica sa stajališta nepoželjnih napona dodira.
Prigušnica	Opasnost od previsokih potencijala na uzemljivačima transformatorskih stanica svedena na minimum te nema potrebe za sanacijom uzemljenja. Mala struja kvara omogućuje samogašenje luka pa svaki kvar ne uzrokuje ispad voda i time se pridonosi povećanju kvalitete opskrbe električnom energijom. Manji broj jednopolnih kvarova koji se razviju u višepolne nego pri izoliranom zvjezdištu. [1]	Slaba osjetljivost na visokoohmske kvarove. Veliki investicijski trošak za prigušnicu s automatskom regulacijom

Kod uzemljenja neutralne točke preko malog otpornika u 10(20) kV mrežama uobičajene su vrijednosti otpora koje ograničavaju struju zemljospoja na 300 A (kabelska mreža) ili 150 A (ostale). Kod odabira optimalnog otpornika treba zadovoljiti i kriterij $I_R:I_C \geq 3:1$, odnosno $I_R:I_C \geq 1,5:1$ ako su troškovi rekonstrukcije uzemljivača neprihvatljivi. Prijelazom 10 kV mreže na 20 kV naponski razinu kapacitivna struja se udvostručuje.

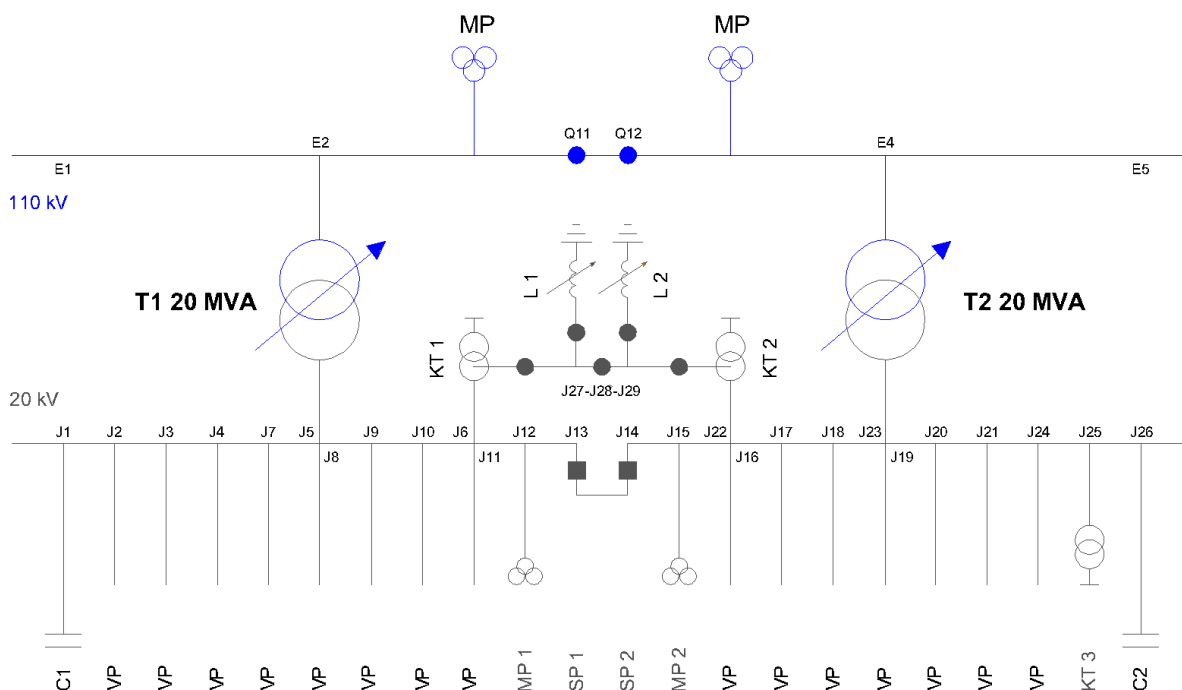
Kapacitivna struja se povećava i kabliranjem mreže, a iz kriterija maloohmskog uzemljenja zvjezdišta $I_R:I_C \geq 1,5:1$ uz otpornik od 150 A, maksimalna dopuštena kapacitivna struja zemljospoja iznosi 100 A. Ako kapacitivna struja premaši vrijednost od 100 A moguće je kompenzirati kapacitivnu struju pomoću ručno stupnjevane prigušnice koja se spaja paralelno postojećem maloohmskom otporniku. Takvim rješenjem postiže se djelomična kompenzacija i preostala jalova struja svodi se na vrijednost do 50 A. Kombinacija uzemljenja preko maloohmskog otpornika i ručno stupnjevane prigušnice ima iste prednosti i nedostatke kao i uzemljenje preko maloohmskog otpornika.

2. TEHNIČKI OPIS TS 110/20 KV KRAPINA

TS 110/20 kV Krapina u počeku je napajala električnom energijom svega nekoliko transformatorskih stanica 20/0,4 kV. Rekonstrukcijom postojeće mreže pogonskog napona 10 kV i prebacivanjem na pogonski napon 20 kV napajana mreža se sve više širila. TS 110/20 kV Krapina projektirana je i građena da zadovolji konačno stanje nakon prelaska čitave mreže na 20 kV pogonski napon. Danas se u osnovnom uklopnom stanju iz TS 110/20 kV napajaju 152 transformatorske stanice 20/0,4 kV maksimalne potrošnje 12,17 MVA. Srednjenaponsku mrežu čini 135 km nadzemnih vodova i 143 km kabelskih dionica. Uz najveći udio kabela XHE 49-A 3x1x150 mm², kapacitivne struje od 2,8 A/km na 20 kV naponskoj razini, preporučeno je uzemljiti zvijezdište transformatora. Zbog važnosti (nije potrebno isključenje prolaznih jednopolnih kvarova, veća kvaliteta opskrbe električnom energijom) i veličine područja (velike kapacitivne struje jednopolnih kvarova) koje napaja TS 110/20 Krapina odabrano je uzemljenje preko prigušnice s automatskom regulacijom – Petersen prigušnice. Kako je sekundar energetskog transformatora u spoju trokut i nema izvedenu nultočku, ona je izvedeno preko umjetnog zvjezdišta.

2.1. 20 kV postrojenje i vođenje pogona

20 kV postrojenje u TS 110/20 kV Krapina ima dvije sekcije s ukupno 26 polja. Svaka sekcija ima po jedno polje za kompenzaciju (koja nikad nisu bila u pogonu), mjerno polje, spojno polje, transformatorsko polje, polje za kućni transformator, koji je ujedno i umjetno zvjezdište, te uz to sekcija 1 ima osam vodnih polja, a sekcija 2 sedam vodnih polja i polje za vlastitu potrošnju Operatora prijenosnog sustava. Pojednostavljena shema prikazana je na slici 1.



Slika 1. Pojednostavljena shema TS 110/20 kV Krapina

Kućni transformator snage 250 kVA grupe spoja ZNyn5, koji je ujedno i umjetno zvjezdište 20 kV mreže, je specijalne izvedbe. Pod pojmom specijalne izvedbe misli se na strujno opterećenje primarnog namota koje može biti 330A/60s odnosno 15A/trajno. U zvjezdište kućnih transformatora preko jednopolnih rastavljača spojene su Petersen prigušnice za kompenzaciju struje zemljospoja 30–302A/2h.

Pogon TS 110/20 kV Krapina predviđa rad jednog energetskog transformatora i pripadajućeg kućnog transformatora na istoj sekciji kojem je u zvjezdište spojena prigušnica. Kako bi takav pogon bio omogućen sa što manjim brojem grešaka kod pogonskih manipulacija izvedene su blokade:

- Uklop energetskog transformatora nije dozvoljen ako nije uključen kućni transformator na istoj sekciji
- Uklop kućnog transformatora nije dozvoljen ako nije uključena Petersen prigušnica,
- Iskllop kućnog transformatora isključuje i pripadajući energetski transformator,
- Manipulacije jednopolnih rastavljača u poljima J27, J28 i J29 nisu dozvoljene ako je uključen kućni transformator.

Projektom zadatkom bio je predviđen porast kapacitivnih struja zemljospoja do približno 250 A. Već danas ta je brojka premašena pa je trenutno pogonsko stanje sljedeće:

- Uključen jedan energetski transformator,
- Uključena oba kućna transformatora i u zvjezdištu spojena njemu pripadajuća Petersen prigušnica,
- Regulator Petersen prigušnice koja je spojena preko kućnog transformatora na sekciji gdje je uključen energetski transformator je u automatskom načinu rada,
- Drugi regulator Petersen prigušnice je u ručnom načinu rada,
- Petersen prigušnica pozicionirane u što sličnijim položajima tako da injektiraju podjednaku struju za vrijeme zemljospoja.

2.1.1. Zaštita od jednopolnih kvarova

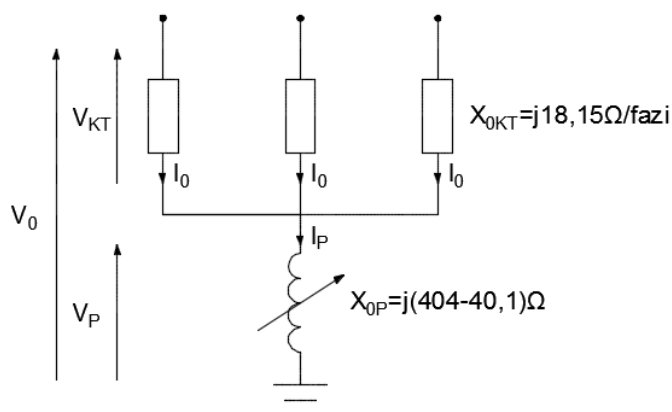
Zahvaljujući maloj struji kvara kod uzemljenja preko Petersen prigušnice omogućeno je samogašenje prolaznih kvarova te za to vrijeme zaštita ne isključuje prolazni kvar. Ako je kvar trajan kao primarna zaštita od zemljospoja na vodnim poljima koristi se usmjerena vatemetrička zaštita u $\cos \varphi$ spoju unutar terminala polja MiCOM P139. Podešenja zaštite su $I_0 > 1,8$ A, odnosno 0,03 A uz vremensko zatezanje od 7 s. Najslabiji element mreže za vrijeme jednopolnih kvarova je kućni transformator, odnosno njegov primarni namot (15A/trajno) preko kojeg je izvedeno umjetno zvjezdište. Dopušteno trajanje pogona pri zemljospoju je kratkotrajno i određuje ga mogućnost terećenja primara transformatora vlastite potrošnje i njegova zvjezdišta injektiranom induktivnom strujom Petersen prigušnice. Zbog toga je u zvjezdište ugrađena rezervna zaštita od jednopolnih kvarova koja ga štiti od pregrijavanja, a podešenje iznosi 15A/16s. Rezervna zaštita djeluje na isključivanje energetskog transformatora jer nije dozvoljen izoliran pogon mreže. Za slučaj uklopnog stanja kada jedan energetski transformator napaja čitavu mrežu, a u slučaju prorade rezervne zaštite, cijelo područje TS 110/20 kV Krapina ostaje bez napajanja.

2.2. Struja Petersen prigušnice spojene preko umjetnog zvjezdišta

Kod srednjenaponskih mreža koje se napajaju preko transformatora X/10(20) kV čiji je sekundarni namot spojen u zvijezdu (yn) Petersen prigušnica se spaja izravno na zvjezdište pa je pri zemljospoju napon na Petersen prigušnici jednak naponu zvjezdišta. Za slučaj spoja Petersen prigušnice na umjetno zvjezdište kućnog transformatora napon na Petersen prigušnici je za vrijeme jednopolnih kvarova manji zbog pada napona na kućnom transformatoru. Maksimalna struja zemljospoja koju Petersen prigušnica može kompenzirati kada je spojena u zvjezdište kućnog transformatora manja je od nazivne vrijednosti proizvođača. Nazivni podaci postojeće opreme dani su sljedećoj tablici:

Tablica III. Nazivi podaci postojeće opreme

Kućni transformator		Petersen prigušnica	
Tip	TBN 450/24	Tip	ASR3.2
Prijenosni omjer	21/0,4 kV $\pm 2 \times 2,5\%$	Nazivni napon	12,12 kV
Nazivna snaga	250 kVA	Nazivna snaga	3,661 kVAr/2h
Nazivna struja primara	330A/60s, 15A/trajno	Nazivna struja	30-302 A/2h
Grupa spoja	ZNyn5	Impedancija	404-40,1 Ω
Napon kratkog spoja	3,6%	Otpor uljnog otpornika	2 Ω
Nulta impedancija	18,15 Ω /fazi	Nazivna struja uljnog otpornika	250 A/90s
Hlađenje	ONAN	Nazivni napon uljnog otpornika	500 V
Masa ulja	320 kG		
Ukupna masa	1640 kG		



Slika 2. Nadomjesna shema opreme za uzemljenje

Prema nadomjesnoj shemi nulti napon mreže iznosi:

$$V_0 = V_P + V_{KT} \cong I_P \cdot X_{0P} + I_0 \cdot X_{0KT} \cong I_P \cdot X_{0P} + \frac{I_P}{3} \cdot X_{0KT} \quad (1)$$

Iz čega slijedi da je struja prigušnice:

$$I_P \cong \frac{V_0}{X_{0P} + \frac{X_{0KT}}{3}} \cong \frac{\frac{21}{\sqrt{3}} \text{ kV}}{X_{0P} + \frac{18,15 \Omega}{3}} \quad (2)$$

Minimalna struja kompenzacije iznosi:

$$I_{Pmin} \cong \frac{V_0}{X_{0Pmin} + \frac{X_{0KT}}{3}} \cong \frac{\frac{21}{\sqrt{3}} \text{ kV}}{404 \Omega + \frac{18,15 \Omega}{3}} = 29,56 \text{ A} \quad (3)$$

Maksimalna struja kompenzacije iznosi:

$$I_{Pmax} \cong \frac{V_0}{X_{0Pmax} + \frac{X_{0KT}}{3}} = \frac{\frac{21}{\sqrt{3}} \text{ kV}}{40,1 \Omega + \frac{18,15 \Omega}{3}} = 262,71 \text{ A} \quad (4)$$

Pri čemu je:

- V_0 – maksimalni nulti napon mreže
- Z_{0KT} – nulta impedancija transformatora
- Z_{0Pmax} – maksimalna impedancija Petersen prigušnice
- Z_{0Pmin} – minimalna impedancija Petersen prigušnice
- I_P – struja Petersen prigušnice

Iz proračuna je vidljivo da uzemljenje preko umjetnog zvjezdišta kućnog transformatora zbog dodatne impedancije namota kućnog transformatora omogućuje manju struju kompenzacije koju može kompenzirati Petersen prigušnica od nazivnih vrijednosti opreme propisane od proizvođača. Ovakav spoj omogućuje maksimalnu kompenzaciju struje zemljospoja od 262,71 A odnosno 86,7 % nazivne vrijednosti.

Primjer iz prakse koji to potvrđuje je prebacivanje jednog pretežno kablenskog izvoda iz osnovnog uklopnog stanja napajanja iz TS 110/20 kV Krapina prebaci na napajanje iz TS 35/20 kV Krapina koja ima spoenu Petersen prigušnicu u zvjezdište energetskog transformatora. Ukupne struje kompenzacije Petersen prigušnice koje prikazuje regulator prigušnice u osnovnom uklopnom stanju u obje stanice iznose 484 A, a nakon prebacivanja napajanja jednog izvoda na TS 35/20 kV Krapina ukupno iznose 460 A. Ako iz izraza (5) izračunamo nultu impedanciju Petersen prigušnice, te izračunatu vrijednost uvrstimo u izraz (2) dobijemo stvarnu struju zemljospoja. Nakon preračunatih vrijednosti struja Petersen prigušnica koje su spojene preko zvjezdišta kućnih transformatora dobivamo točnije rezultate (do male pogreške dolazi zbog različitih pogonskih napona 20 kV).

$$X_{0P} = \frac{V_0}{I_P} \quad (5)$$

Tablica IV. Struje Petersen prigušnice

	TS 110/20 kV Krapina		TS 35/20 kV Krapina	Ukupno
	Prig1	Prig2	Prig	
Struja na regulatoru u osnovnom uklopnom stanju / izračunata impedancija Petersen prigušnice	175 A / 69,28 Ω	175 A / 69,28 Ω	124 A	484 A
Struja na regulatoru nakon prebacivanja izvoda / izračunata impedancija Petersen prigušnice	175 A / 69,28 Ω	85 A / 142,64 Ω	200 A	460 A
Stvarna struja kompenzacije u osnovnom uklopnom stanju	160,95 A	160,95 A	124 A	445,9 A
Stvarna struja kompenzacije nakon prebacivanja izvoda	160,95 A	81,55 A	200 A	442,6 A

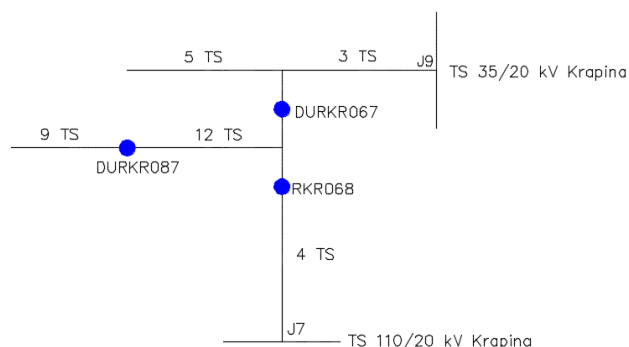
3. ANALIZA KVARA KOJI JE UZROK NESELEKTIVNOG ISPADA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Pogon i opskrba kupaca koji se napajaju iz TS 110/20 kV Krapina skoro čitavu godinu prođe u redu. Međutim, u prosjeku jednom do dva puta godišnje dođe do jednopolnog kvara na vodnom polju kojeg primarna zaštita vodnog polja ne uspije registrirati i isključiti. Taj kvar registrira rezervna zaštita u zvjezdištu kućnog transformatora te isključuje energetski transformator i cijelo područje napajano iz TS 110/20 kV Krapina ostaje bez napajanja električnom energijom. TS trenutno napaja 152 transformatorske stanice 20/0,4 kV preko 12 vodnih polja te takav neselektivni ispad za posljedicu ima ispad 152 TS umjesto u prosjeku 13 TS. Ispadom cijele TS smanjuju se pokazatelji kvalitete opskrbe električnom energijom SAIDI i SAIFI. Takvi neselektivni ispadi većinom se pojavljuju kod većih nevremena praćenih kišom, jakim vjetrom i grmljavinom odnosno kod padanja veće količine teškog i mokrog snijega.

Jedan takav jednopolni kvar na vodnom polju dogodio se uslijed padanja teškog i mokrog snijega. U tablici V. opisana je kronološka lista događaja s najvažnijim događajima koji su izvučeni iz SCADA sustava i razgovora s dežurnim dispečerom. Shema dijela mreže koji je pogođen kvarom prikazan je na slici 3. U osnovnom uklopnom stanju (prije kvara) uključeni su svi aparati sa slike 3 osim VP J09 u TS 35/20 kV Krapina.

Tablica V. Lista događaja

Vrijeme	Događaj	Aparat	Napomena
00:51:22	ISK - I>>>	VP J07	
00:55:38	ISK – dispečer	DURKR087	u beznaponskom stanju
00:56:40	UK – dispečer	VP J07	
00:56:47	ISK – I ₀ >	VP J07	Kvar 1
01:01:50	ISK – dispečer	DURKR067	u beznaponskom stanju
01:03:08	UK – dispečer	VP J07	uključeno i drži ali kvar postoji
01:04:57	ISK – dispečer	VP J07	kako bi se uključio DURKR087
01:05:20	UK – dispečer	DURKR087	u beznaponskom stanju
01:05:47	UK – dispečer	VP J07	
01:05:54	ISK – I ₀ >	VP J07	Kvar 2
01:06:51	ISK – dispečer	DURKR087	u beznaponskom stanju
01:07:12	UK – dispečer	VP J07	
			Nije poznato da li je bilo poganskih manevara od strane dežurnog montera na terenu
01:26:18	ISK – I>	TP J05	I> - rezervna zaštita 15A/16s
01:27:59	ISK – dispečer	VP J07	vjerojatno je kvar na VP J07 uzrok ispada transformatora pa je VP isključeno
01:31:06	UK – dispečer	TP J05	
02:09:57	UK – dispečer	VP J09	U TS 35/20 kV Krapina
03:24:20	UK – dispečer	DURKR067	
03:27:08	ISK – dispečer	VP J09	
	UK – monter	RKR068	
03:28:53	UK – dispečer	VP J09	
03:29:04	ISK – I ₀ >	VP J09	Kvar 3
Rađeni pogonski manevri na terenu i u TS 110/20 kV Krapina i TS 35/20 kV Krapina kako bi se locirao kvar i što većem broju potrošača vratilo napajanje električnom energijom (manevri i vrijeme nisu poznati ali nije bilo ispada nijednog elementa). U 06:00:00 uključeni su aparati (J07, J09, DURKR067 i DURKR087) osim rastavljača RKR068 te nije bilo kvara.			
06:02:00	ISK – dispečer	VP J07 i VP J09	isključeno J07 i J09 kako bi se vratilo osnovno uklopno stanje (kao prije prvog kvara)
06:03:00	UK – monter	RKR068	
06:03:46	UK – dispečer	VP J07	
06:03:53	ISK – I ₀ >	VP J07	Kvar 4
06:04:00	ISK – monter	RKR068	
06:05:27	UK – dispečer	VP J07	
06:05:56	UK – dispečer	VPJ09	



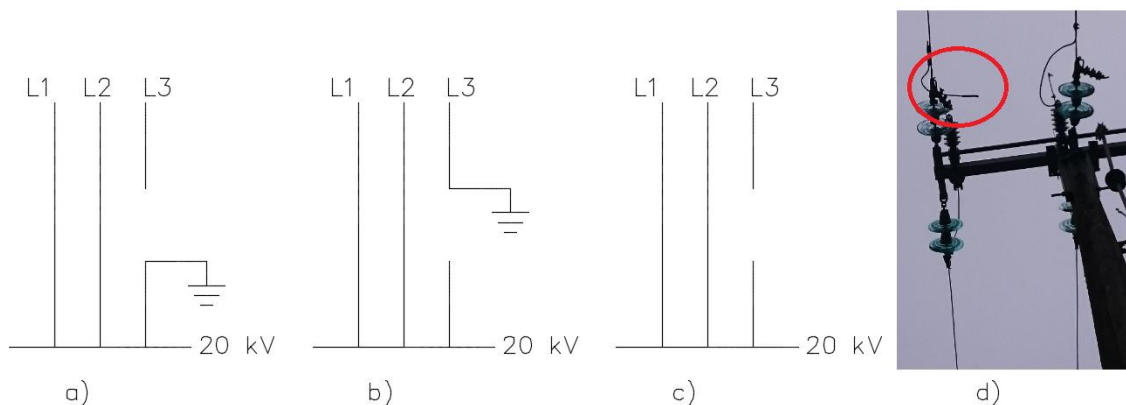
Slika 3. Pojednostavljena shema napajane mreže

Nakon 06:05:56 uklopno stanje je bilo isto kao i u 06:00:00 (uključeni aparati J07, J09, DURKR067 i DURKR087, a isključen RKR068). Spajanjem na terminal polja i pregledom zapisa kvarova u tablici VI. zapisane su efektivne vrijednosti struja i napona na vodnom polju na kojem je djelovala zaštita 100 ms prije isklopa prekidača. Naponi i struje za vrijeme trajanja kvara su približno konstantnog iznosa.

Tablica VI. Struje i naponi za vrijeme kvara

	I_a [A]	I_b [A]	I_c [A]	I_0 [A]	U_a [kV]	U_b [kV]	U_c [kV]	U_0 [kV]	Isključeno TS
Kvar 1	5,09	19,6	18,9	2,47	14,1	9,63	11,8	2,62	24 (4+20)
Kvar 2	7,3	35,3	35,4	2,2	13,5	9,54	12,3	2,29	25 (4+21)
Kvar 3	13	17,2	14,8	4,63	14,3	8,74	14,13	3,39	24 (20+4)
Kvar 4	5,72	36,3	38,2	4,37	16	7,95	12,6	4,72	33 (4+29)

Na slici 4 a) i b) prikazani su češći jednopolni kvarovi, a pod slučajem c) rjeđi kvarovi, no upravo se takav kvar dogodio na rastavljaču RKR068 (Slika 4. d)) zbog kojeg je došlo do neselektivnog ispada energetskog transformatora. Kvar možemo opisati kao prekid vodiča bez dodira sa zemljom. Na slici je rastavljač RKR068 u otvorenom položaju pri čemu se vidi puknut spoj od vodiča do pola rastavljača pri čemu je spoj u zraku s obje strane.



Slika 4. Kvarovi - prekid vodiča

3.1. Zaštita od nesimetričnog opterećenja

U radu [2] opisano je kako zaštita od nesimetričnog opterećenja otkriva kvarove koji su prikazani na slici 4 a) i b) te su je uspoređivali s djelovanjem zemljospojne zaštite $I_0 >$. Autori su uspoređivali sljedeće scenarije:

- kvar sa slike 4 a i b
- kvar na početku i na kraju dalekovoda
- minimalno i maksimalno opterećenje dalekovoda

- različita impedancija kvara

U radu su došli do zaključka da zaštita od nesimetričnog opterećenja relativno dobro registrira kvarove koje zemljospojna zaštita ne registrira. Nedostatak joj je što ne može raspoznati radi li se o slučaju c) sa slike 4 ili o jednopolnom isključenju. Kako se na području Elektre Zabok ne koristi jednopolno isključenje možemo provjeriti kako bi zaštita od nesimetričnog opterećenja registrirala opisane kvarove. Zaštita od nesimetričnog opterećenja definirana je:

$$\Delta I = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}} \cdot 100 \% \quad (6)$$

Pri čemu je:

I_{max} – maksimalna struja faze koja se mjeri na vodu

I_{min} – minimalna struja faze koja se mjeri na vodu

Uvrštavajući podatke iz tablice 6 u izraz (6) dobivamo:

Tablica VII. Nesimetrija struja

	Kvar 1	Kvar 2	Kvar 3	Kvar 4
ΔI [%]	74,03	79,37	24,4	85,03

Ako usporedimo podatke o nesimetriji iz tablice VII: i podatke o isključenim TS iz tablice VI: (pri čemu 4+20 označava da se 4 TS nalazi prije mjesta kvara, a 20 TS nakon mjesta kvara) možemo zaključiti da što je veći broj TS napajan nakon mjesta kvara nesimetrija je veća te zaštita od nesimetrije lakše registrira kvar. Za slučaj ispada energetskog transformatora na kvarnom vodnom polju bilo je priključeno ukupno 16 TS (4 TS prije kvara i 12 TS nakon kvara) što možemo usporediti s kvarovima 1 i 2. Za vrijeme kvara 1 i 2 nulte struje (2,47 A i 2,2 A) malo su veće od prorađane vrijednosti zaštite $I_0 > (1,8 \text{ A})$, a kod ispada energetskog transformatora nije bilo zapisa kvara pa se može pretpostaviti da je nulta struja manja od 1,8 A. Uz pretpostavku da je za slučaj ispada energetskog transformatora nesimetrija na VP J07 manja nego kod kvara 1 i 2, a veća nego kod kvara 3 (prema broju TS prije i poslije kvara), može se pretpostaviti da je nesimetrija u granicama od 25% do 75%. U [2] navodi se da je u normalnom pogonu izmjerena nesimetrija struje vodnog polja od 10% te se preporuča podešenje zaštite $\Delta I > \text{od } 20\%$ ili veće. Na vodnom polju na kojem se pojavio ovakav kvar u normalnom pogonskom stanju izmjerene su struje u fazama 30A, 32A i 37A (struje očitane s terminala polja u slučajno odabranom trenutku) iz čega slijedi da nesimetrija opterećenja iznosi 18,9%.

Također postoje i zapisi istog tipa kvara (prekid vodiča bez dodira sa zemljom) gdje se dogodio neselektivni ispad energetskog transformatora. Prvo je zaštita $I_0 >$ vodnog polja isključila kvar. Nakon toga isključen je dio voda s ciljem lociranja mjesta kvara pa ponovno uključen prekidač u vodnom polju. Kod ponovnog uklopa prekidača u vodnom polju postoji zapis kvara zbog struje uključenja. Zaštita $I_0 >$ opet isključuje prekidač u vodnom polju. Zbog dugog vremenskog zatezanja zaštite $I_0 >$ ne postoji zapis kvara za cijelo vrijeme trajanja kvara. Usporedbom faznih struja i nulte struje kod uklopa vodnog polja i kod isklopa zbog djelovanja zaštite $I_0 >$ vidi se da su struje istih iznosa.

Nakon još jednog uključenja s isključenjem vodnog polja, ponovno je isključen neki dio voda, pa uključen prekidač u vodnom polja, ali ovaj put zaštita $I_0 >$ ne isključuje kvarni vod nego rezervna zaštita isključuje energetski transformator. Kako postoji zapis struja kod uklopa voda (zbog starta zaštite $I >$ u VP) možemo izračunati nesimetriju struja. Kod neselektivnog ispada energetskog transformatora nesimetrija struje iznosi 41,7 % $[(28,93\text{A} - 16,87\text{A})/28,93\text{A}, \text{ a } I_0=1,5\text{A})$, što znači da uz podešenje zaštite $\Delta I > \text{od } 20\%$ ili više ne bi došlo do neselektivnog ispada.

4. ZAKLJUČAK

Pogon uzemljene mreža preko umjetnog zvjezdista primarnog namota kućnog transformatora u kojeg se spaja Petersen prigušnica kompliciraniji je nego kada se Petersen prigušnica spaja u zvjezdiste sekundara energetskog transformatora zbog niza blokada i uvjeta za paralelan rad. Kod tako izvedenog spoja uzemljenja smanjuje se stvarna struja koju Petersen prigušnica može kompenzirati. Za vrijeme trajanja jednopolnih kratkih spojeva kućni transformator s pojačanim primarnim namotom (300A/16s) je najslabiji element zbog čijeg šticećenja u slučaju neregistriranja kvara na vodnom polju dolazi do ispada

energetskog transformatora. Kao rješenje problema umjetnog zvjezdišta kućnog transformatora (najslabiji element) može se ugraditi umjetno zvjezdište za struju 300A/2h, isto kao i Petersen prigušnica. Kada se Petersen prigušnica spaja u zvjezdište sekundara energetskog transformatora koje je dimenzionirano za trajnu struju jednofaznih kvarova pogon mreže i zaštita sustava su jednostavniji i pouzdaniji.

Zaštita od nesimetričnog opterećenja registrirala bi kvarove prekida vodiča koje je isključila i zemljospojna zaštita $I_0 >$. Zbog toga što nema zapisa kvara na vodnom polju ne možemo sa sigurnošću zaključiti bi li zaštita od nesimetričnog opterećenja registrirala kvar kada je neselektivno isključen energetski transformator. Zbog nesimetrije opterećenja vodnog polja od 18,9% u normalnom pogonskom stanju trebalo bi razmotriti i rješenje kao što je samo signalizacija nesimetrije u dispečerski centar kako bi uz analizu ostalih parametara dispečer isključio vod u kvaru. Ovakvo rješenje može se primijeniti jedino kod sustava sa zvjezdištem dimenzioniranim za trajnu struju jer 16 s, koliko iznosi rezervna zaštita, nije dovoljno vremena za odluku osim ako se unutar sustava zaštite odredi više kriterija za zaštitu od nesimetrije na temelju provedenih mjerenja. Izradom modela mreže koji bi potvrdio zapisane kvarove mogao bi se simulirati neselektivni ispad te analizirati kako bi zaštita od nesimetričnog opterećenja registrirala neselektivni ispad. Također bi se mogli analizirati i slučajevi za različite načine uzemljenja zvjezdišta transformatora.

5. LITERATURA

- [1] S. Ravlić, „Uzemljenje zvjezdišta transformatora mreža srednjeg napona“
- [2] S. Papathanassiou, M. Tsili, G. Georgantzis, G. Antonopoulos, „Enhanced earth fault detection on MV feeders using current unbalance protection“, CIREN 2007, 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, svibanj 2007, 0623.
- [3] S. Hutter, G. Šagovac, „Provjera stanja uzemljivačkih sustava distribucijskih stanica TS 10(20)/0,4 kV u rezonantno uzemljenim SN mrežama, *Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO Cired*, 2. (8.) savjetovanje, Umag, svibanj 2010.
- [4] V. Komen, R. Čučić, V. Sirotnjak, „Pristup uzemljenju zvjezdišta srednjenaponskih mreža“, *Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO Cired*, 1. Savjetovanje, Šibenik, svibanj 2008.