

Krunomir Petric, dipl.ing
HEP – ODS d.o.o., Elektrodalmacija Split
krunomir.petric@hep.hr

Damir Karavidović, dipl.ing
HEP – ODS d.o.o., Zagreb
damir.karavidovic@hep.hr

PRIMJER POGONSKIH UVJETA ZA RAD ZAŠTITE PRI POGONSKIM DOGAĐAJIMA U ELEKTROENERGETSKOJ MREŽI NA PODRUČJU MAKARSKE

SAŽETAK

Predmet ovog rada je traženje objašnjenja djelovanja nadstrujne zaštite ugrađene u TS 110/35/10 kV Makarska u polju 110kV energetskog transformatora 110/35 kV – 2, u uvjetima bez postojanja kvara u području za koju potonja ima ulogu osnovne zaštite transformatora od vanjskih kvarova, kao i u području u kojem ona ima ulogu rezervne zaštite kod kvara u transformatoru, a istodobno u uvjetima postojanja jednopolnog kratkog spoja u 110 kV mreži. Analiziraju se uvjeti djelovanja zaštite u pogonskom događaju koji se zbio tijekom požara na području Makarske u rujnu 2008 godine. Analiza tokova i vrijednosti struja kvara pokazuje kako su zbog niske nulte impedancije energetskog transformatora 110/35 kV i izravno uzemljenog zvjezdista primarnog namota energetskog transformatora, u uvjetima postojanja jednopolnog kratkog spoja u 110 kV mreži, postojali uvjeti za pobudu promatrane nadstrujne zaštite. Analiza djelovanja promatrane nadstrujne zaštite na isključenje transformatora iz pogona, posljedica je pak rada zaštita u okolnoj mreži 110 kV.

Ključne riječi: niska nulta impedancija energetskog transformatora, jednopolni kratki spoj, prorada niskopodesive nadstrujne zaštite.

EXAMPLE OF OPERATING CONDITIONS FOR RELAY PROTECTION DUE TO EVENTS IN ENERGY NETWORK IN REGION OF MAKARSKA

SUMMARY

This paper explains operation of transformer first stage overcurrent protection implemented in 110 kV transformer field in 110/35/10 kV substation Makarska, but in case of one pole short cut circuit on 110 kV network. Conditions of relay protection operations are analyzed in circumstance of fire disaster that took a place on September 2008 on large area of Makarska.

Analyzed values of currents flow shows that due to low zero impedance of 110/35 kV transformer, solid earthed on HV side, and in one pole short cut circuit conditions on 110 kV network, a first stage of overcurrent protection on HV side of transformer 110/35 kV could be activated. Analysis of concerned overcurrent protection operation is consequent of protections operation in related 110kV network.

Key words: low zero impedance of 110/35 kV transformer, one pole short cut circuit, operation of first stage overcurrent protection on transformer 110/35 kV.

Energetski transformator TR2 je tronamotni transformator. Srednjenaponski namot u spoju trokut (tercijar), izveden je kao stabilizacijski namot (bez dodatnih prigušnica). Radi se o transformatoru proizvođača Končar, tip TRN 40000-123J, a njegovi osnovni tehnički podatci su:

Nazivni naponi:	VN namot	$U_{n1} = 110 \text{ kV}$, opseg regulacije $\pm 10 \times 1.5 \%$
	SN namot	$U_{n2} = 36.75 \text{ kV}$
	SN namot (tercijar)	$U_{n3} = 10.5 \text{ kV}$
Nazivne snage:	VN namot	$S_{n1} = 40 \text{ MVA}$
	SN namot	$S_{n2} = 40 \text{ MVA}$
	SN namot (tercijar)	$S_{n3} = 13.3 \text{ MVA}$
Napon kratkog spoja:		$u_k = 11.5 \%$
Grupa spoja:	YNyn0,d5.	

Zvezdište primarnog 110 kV namota TR2 je izravno uzemljeno, dok je zvezdište sekundarnog 35 kV namota uzemljeno niskoomski preko djelatnog otpornika iznosa $R_n = 70 \Omega$. Nadalje, na slici 1. prikazano je uklopno stanje postrojenja 110 i 35 kV u TS 110/35/10 kV Makarska te distribucijske mreže 35 kV priključene na ovo postrojenje tijekom spomenutog požara na makarskom području

3. ZAŠTITA OD KVAROVA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA I DALEKOVODA 110 kV

Osnovna zaštita promatranog transformatora TR2 od unutarnjih kvarova je diferencijalna zaštita, a kao osnovne zaštite od vanjskih kvarova i rezervne zaštite od unutarnjih kvarova transformatora koriste se:

- niskopodesiva nadstrujna zaštita (IEC oznaka; $I>$),
- visokopodesiva nadstrujna zaštita (IEC oznaka; $I>>$).

Navedene zaštite napajaju se mjerenom veličinom iz strujnih mjernih transformatora na strani 110 kV.

Osim navedenih zaštita transformatora, postoje i zaštite postrojenja za uzemljenje SN zvezdišta transformatora. Kako u ovom pogonskom događaju ove zaštite nisu djelovale, za ovu analizu nisu od bitne važnosti.

Primarna vrijednost podešene uzbude mjernog člana nadstrujne zaštite $I>$ u transformatorskom polju 110 kV TR2 iznosi:

$$I_{p>(\text{prim})} = 270 \text{ A}$$

Vrijeme odgode naloga isključenja transformatora iz pogona je:

$$t_{p>} = 2,4 \text{ s}$$

Nadstrujna zaštita $I>>$, je s visokom razinom podešenja uzbude jer mora djelovati isključivo unutar osnovne zone štice, koju ovdje čini impedancija energetskog transformatora TR2. U razmatranom slučaju primarna vrijednost podešene uzbude iznosi:

$$I_{p>>(\text{prim})} = 1800 \text{ A}$$

Vrijeme odgode naloga isključenja transformatora iz pogona ovom zaštitom je:

$$t_{p>>} = 0,2 \text{ s}$$

Temeljna zaštita dalekovoda promatrane prijenosne mreže 110 kV, u kojoj je i TS 110/35/10 kV Makarska, je distantna zaštita ($Z<$). Ona posjeduje zajednički poticajni/pobudni član s mjerenjem impedancije i djelovanjem u tri selektivna vremenska stupnja. S obzirom na mjesto TS 110/35/10 kV Makarska u prijenosnoj mreži, mjerodavne su distantne zaštite u vodnim poljima 110 kV u susjednim trafostanicama i to [3]:

- u TS 110/35 kV Kraljevac - DV 110 kV Kraljevac – Makarska
- u TS 110/35 kV Opuzen - DV 110 kV Opuzen – Makarska

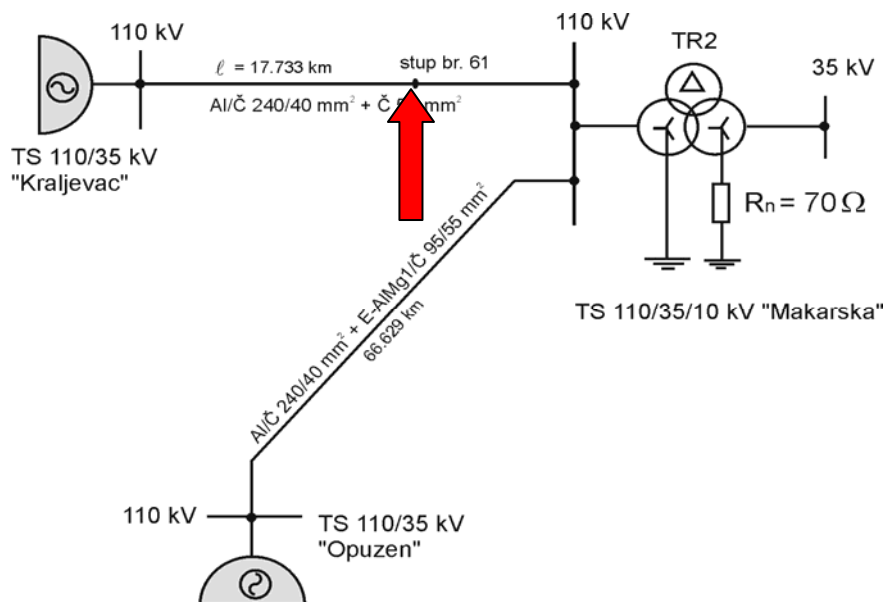
Distantne zaštite u narečenim postrojenjima, dosegom svojih viših impedantnih stupnjeva djelovanja, štite od međufaznih i kvarova prema zemlji postrojenje 110 kV i energetski transformator TR 2 u TS 110/35/10 kV Makarska. Kada zaštite izmjere impedanciju kvara u području II. stupnja, djeluju na isključenje dalekovoda s vremenom odgode $t_{II} = 0.5 \text{ s}$, a kada izmjere impedanciju kvara u području III.

stupnja s vremenom odgode oko vrijednosti $t_{III} = 1,0$ s. Pri tome valja njihovo djelovanje za kvarove u postrojenju TS 110/35/10 kV Makarska smatrati kao djelovanje osnovne zaštite kada se radi o kvarovima na sabirnicama 110 kV, a za kvarove u transformatoru TR 2 kao djelovanje rezervne zaštite.

Distantne zaštite u TS 110/35/10 kV Makarska na dalekovodima 110 kV Makarska – Kraljevac i Makarska – Opuzen su usmjerene od sabirnica prema vodu. Za distantnu zaštitu na dalekovodima 110 kV Makarska – Kraljevac jednofazni kvar na stupu 61. trebao je biti u području podešene impedancije prvog stupnja. Što se tiče odziva i djelovanja ovih zaštita na može biti kvarove u postrojenju TS 110/35/10 kV Makarska, može se očekivati tek s vremenom četvrtog, neusmjerenog impedantnog stupnja.

4. PRORAČUNI NADOMJESNIH IMPEDANCIJA

Pri navedenom događaju dana 19. rujna 2008. godine na DV 110 kV Kraljevac – Makarska, pod opisanim okolnostima na stupu broj 61, dogodio se jednopolni kratki spoj [1]. Mjesto kvara nalazilo se na približno 75 % duljine DV 110 kV Kraljevac - Makarska, gledano od sabirnica 110 kV u TS 110/35 kV "Kraljevac" prema TS 110/35/10 kV "Makarska". U trenutku nastanka jednopolnog kratkog spoja, u TS 110/35/10 kV Makarska u pogonu su bili transformatori TR2 i MT1, dok je energetski transformator TR1 bio isključen (slika 1.). Na slici 2. prikazano je stanje napajanja TS 110/35/10 kV Makarska iz mreže 110 kV, uključenost transformatora TR2 te uzemljenost zvjezdista primarnog i sekundarnog namotaja.



Slika 2. Mjerodavno uklopno stanje u trenutku nastupa jednopolnoga kratkog spoja na DV 110 kV Kraljevac – Makarska.

Za potrebe analize okolnosti pri jednopolnom kratkom spoju na DV 110 kV Kraljevac – Makarska, a koje su od bitne važnosti za razmatranje djelovanja zaštite, potrebno je izračunati nadomjesne impedancije svih elemenata sustava prikazanih na slici 2.

4.1. Nadomjesne impedancije napojne mreže 110 kV

Proračun okolnosti pri jednopolnom kratkom spoju, u skladu s uklopnim stanjem mreže 110 kV prema slici 2., započinjemo nadomještanjem vanjske mreže 110 kV na sabirnice 110 kV u TS 110/35 kV Kraljevac i u TS 110/35 kV Opuzen. Ovaj postupak koristi rezultate proračuna struja trolnog i jednopolnog kratkog spoja u prijenosnoj mreži Operatora prijenosnog sustava [4] do 2010 godine. Proračun se pak odnosi na subtranzijentno razdoblje generatora i odgovara slučaju kada su odgovarajuće mreže direktnog i inverznog redoslijeda međusobno jednake. Za postupak nadomještanja mreže koriste se sljedeći izrazi:

$$\bar{Z}_{md} = \bar{Z}_{mi} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{I}_{K3}}, i \quad (1)$$

$$\bar{Z}_{m0} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{\bar{I}_{K1}''} - \frac{2}{\bar{I}_{K3}''} \right) \quad (2)$$

u kojima su:

$\bar{Z}_{md}, \bar{Z}_{mi}, \bar{Z}_{m0}$ - nadomjesne impedancije spomenutih prijenosnih mreža direktnog, inverznog i nultog redoslijeda,

U_n – nazivni napon mreže ($U_n = 110$ kV)

c – naponski faktor za koga se usvaja vrijednost $c = 1.1$,

$\bar{I}_{K3}'', \bar{I}_{K1}''$ - struje trofaznog i jednofaznog kratkog spoja.

Korištenjem rezultata proračuna struja kratkih spojeva i navedenih izraza, proračunate su nadomjesne impedancije mreže 110 kV (direktnog, inverznog i nultog redoslijeda), svedene na sabirnice 110 kV u TS 110/35 kV Kraljevac (indeks: KR) i TS 110/35 kV TS Opuzen (indeks: OP):

$${}^{KR}\bar{Z}_{md} = {}^{KR}\bar{Z}_{mi} = 1.007 + j5.489 \Omega \quad \text{i} \quad {}^{KR}\bar{Z}_{m0} = 0.810 + j6.275 \Omega$$

$${}^{OP}\bar{Z}_{md} = {}^{OP}\bar{Z}_{mi} = 3.225 + j9.988 \Omega \quad \text{i} \quad {}^{OP}\bar{Z}_{m0} = 3.096 + j16.419 \Omega$$

Izborom, iz navedenih proračuna [4], mjerodavnih struja trofaznog i jednofaznog kratkog spoja, može se, gledano sa strane sabirnica 110 kV u TS 110/35 kV Kraljevac i Opuzen, mijenjati „izdašnost“ prijenosne mreže 110 kV u napajanju mjesta kvara strujom kvara.

4.2. Konstante DV 110 kV Kraljevac–Makarska i DV 110 kV Opuzen–Makarska

Dalekovodi 110 kV Kraljevac–Makarska i Opuzen–Makarska su jednosistemske vodove postavljene na čeličnim rešetkastim stupovima oblika "jela", a geometrija glave nosnog stupa (najzastupljeniji tip stupa u trasi) ovih dalekovoda je jednaka [5]. Pod određivanjem konstanti DV 110 kV podrazumijeva se izračunavanje njegovih jediničnih impedancija direktnog i nultog redoslijeda. Naime, dalekovod je nepomični element mreže, pa su zato njegove jedinične impedancije inverznog i direktnog redoslijeda međusobno jednake ($\bar{Z}_{d1} = \bar{Z}_{d1}$).

Jedinična direktna impedancija odnosi se na direktni sustav struja i napona, jednaka je jediničnoj inverznoj impedanciji i neovisna je o značajkama tla i zaštitnog užeta. Određuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$\bar{Z}_{d1} = R_{f1} + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_m}{r_f'} \quad (3)$$

pri čemu su:

\bar{Z}_{d1} - jedinična direktna impedancija dalekovoda, Ω/km ,

R_{f1} - djelatni otpor faznog vodiča dalekovoda po jedinici njegove duljine, Ω/km ,

d_m - međusobna srednja geometrijska udaljenost između faznih vodiča [1],

r_f' - vlastita srednja geometrijska udaljenost faznog vodiča (tzv. reducirani radijus), m,

μ_0 - permeabilnost slobodnog prostora ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{\text{A} \cdot \text{km}}$).

Uvažavajući vrijednosti navedenih karakterističnih veličina iz podataka o građi dalekovoda, za DV 110 kV Kraljevac–Makarska i za DV 110 kV Opuzen–Makarska izračunala se jedinična direktna impedancija dalekovoda:

$$\bar{Z}_{d1} = 0.1188 + j0.4094 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Jedinična nulta impedancija se odnosi na nulti sustav struja i napona. Povratni put nulte struje jest zemlja i uzemljene metalne mase. Zato je nulta impedancija ovisna i o geofizikalnim svojstvima tla te o elektromagnetskim značajkama zaštitnog užeta. Računa se pomoću sljedećeg izraza [8]:

$$\bar{Z}_{01} = \bar{Z}'_{01} - 3 \cdot \frac{\bar{Z}_{fz1}^2}{\bar{Z}_{z1}} \quad (4)$$

pri čemu su:

\bar{Z}_{01} -jedinična nulta impedancija dalekovoda, Ω/km ,

\bar{Z}'_{01} -jedinična nulta impedancija dalekovoda bez utjecaja zaštitnog užeta, Ω/km , a određuje se sljedećim izrazom:

$$\bar{Z}'_{01} = R_{f1} + \frac{3\omega\mu_0}{8} + j \frac{3\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{658}{\sqrt[3]{r_f' \cdot d_m^2}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \right) \quad (5)$$

U ovom izrazu veličina „ ρ “ predstavlja prosječni specifični električni otpor tla duž trase promatranog dalekovoda u Ωm .

\bar{Z}_{z1} -jedinična impedancija zaštitnog užeta dalekovoda s utjecajem povratnog puta kroz tlo, u Ω/km , a računa se pomoću sljedećeg izraza:

$$\bar{Z}_{z1} = R_{z1} + \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{658}{r_z} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \right) + \frac{\mu_r}{4} \right] \quad (6)$$

gdje su pak novo uvedene veličine:

R_{z1} —djelatni otpor zaštitnog užeta dalekovoda po jedinici njegove duljine, Ω/km ,

r_z —polumjer zaštitnog užeta, u (m). pri čemu je d_z – promjer zaštitnog užeta,

μ_r -relativni permeabilitet zaštitnog užeta.

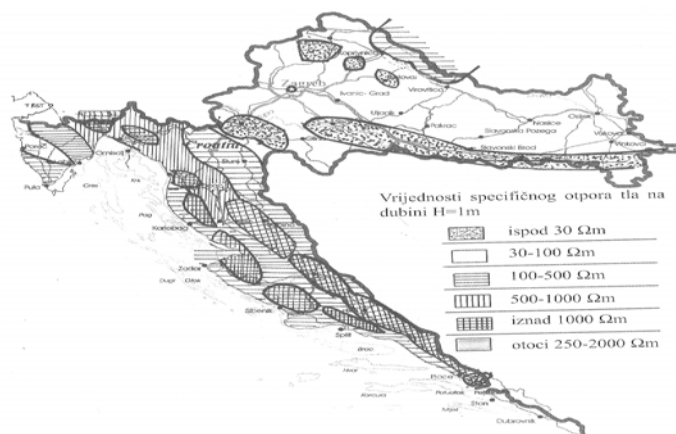
\bar{Z}_{fz1} -jedinična impedancija između faznih vodiča i zaštitnog užeta dalekovoda s utjecajem povratnog puta kroz tlo, u Ω/km , određuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$\bar{Z}_{fz1} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{658}{d_{fz}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \right) \quad (7)$$

gdje je novo uvedena veličina:

d_{fz} —međusobna srednja geometrijska udaljenost između faznih vodiča promatranog dalekovoda i zaštitnog užeta, m.

U popisu literature naveden je izvor vrijednosti činitelja provedenih proračuna koji se odnose na fizičke i električne značajke faznih vodiča i zaštitnog užeta [6] te stupa dalekovoda [5]. Na dalje, na slici 3. prikazane su prosječne vrijednosti specifičnog električnog otpora tla „ ρ “ za RH [9].



Slika 3. Vrijednosti specifičnog električnog otpora tla za Republiku Hrvatsku.

Prema slici 3., za područje kojim se protežu razmatrani dalekovodi DV 110 kV Kraljevac – Makarska i DV 110 kV Opuzen – Makarska može se usvojiti vrijednost specifičnog električnog otpora tla od $\rho \approx 1000 \Omega m$. Tako se izračunom dobije iznos jedinične nulte impedancije promatranih dalekovoda:

- **DV 110 kV Kraljevac – Makarska**

$$\bar{Z}'_{01} = 0.2668 + j1.5776 \frac{\Omega}{km};$$

$$\bar{Z}_{z1} = 3.6493 + j0.8409 \frac{\Omega}{km};$$

$$\bar{Z}_{fz1} = 0.0493 + j0.3988 \frac{\Omega}{km}$$

$$\bar{Z}_{01} = 0.3819 + j1.5187 \frac{\Omega}{km}$$

- **DV 110 kV Opuzen – Makarska**

$$\bar{Z}'_{01} = 0.2668 + j1.5776 \frac{\Omega}{km};$$

$$\bar{Z}_{z1} = 0.3905 + j0.8272 \frac{\Omega}{km};$$

$$\bar{Z}_{fz1} = 0.0493 + j0.3988 \frac{\Omega}{km}$$

$$\bar{Z}_{01} = 0.3694 + j1.0581 \frac{\Omega}{km}$$

Usporedbom iznosa \bar{Z}'_{01} i \bar{Z}_{01} uočava se utjecaj zaštitnog užeta na jediničnu nultu impedanciju dalekovoda. On se očituje u povećanju djelatnog otpora i smanjenju reaktancije kao sastavnica impedancije.

4.3. Konstante transformatora TR2

Energetski transformator je prije svega induktivni element mreže. Za potrebe ove analize valja odrediti njegovu nadomjesnu shemu direktnog, inverznog i nultog redoslijeda. Zato što promatramo transformator u okruženju mreže 110 kV, nadomjesna shema se svodi na naponsku razinu VN namota transformatora, dakle na:

$$U_{n1} = 110 \text{ kV}$$

Kao što je navedeno u točki 2, energetski transformator TR2 je tronamotni transformator kojem je tercijarni namot izveden kao stabilizacijski namot (bez dodatnih prigušnica). U trenutku provedbe analize nisu bili poznati tvornički podatci o naponima kratkog spoja u_{k13} i u_{k23} , već samo podatak o u_{k12} koji ima vrijednost: $u_{k12} = 11.5 \%$. U skladu s [10] za tražene podatke o naponima kratkog spoja u_{k13} i u_{k23} mogu se kao pouzdane usvojiti sljedeće približne vrijednosti: $u_{k13} \approx 5.5 \%$ i $u_{k23} \approx 1.2 \%$.

Reaktancije X_1 , X_2 i X_3 na slici 4. određuju se s izrazima:

$$X_1 = \frac{1}{2} \cdot (X_{12} + X_{13} - X_{23}) \quad (8)$$

$$X_2 = \frac{1}{2} \cdot (X_{12} + X_{23} - X_{13}) \quad (9)$$

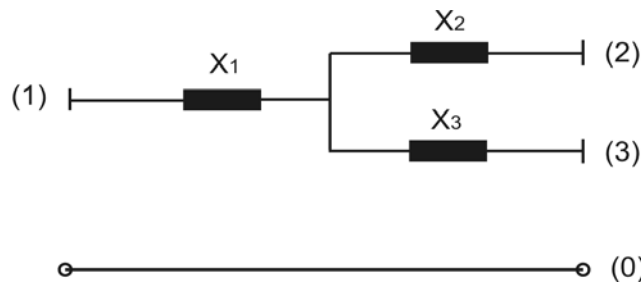
$$X_3 = \frac{1}{2} \cdot (X_{13} + X_{23} - X_{12}) \quad (10)$$

pri čemu su:

$$X_{12} = \frac{u_{k12}}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_{n12}} \quad (11)$$

$$X_{13} = \frac{u_{k13}}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_{n13}} \quad (12)$$

$$X_{23} = \frac{u_{k23}}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_{n23}} \quad (13)$$



Slika 4. Nadomjesna shema direktnog i inverznog redoslijeda tronamotnog transformatora svedena na njegovu VN stranu.

Pritom, novo uvedene veličine S_{n12} , S_{n13} i S_{n23} u izrazima predstavljaju, slijedno, nazivne prolazne snage između VN i SN namota, VN i NN namota i SN i NN namota. One se određuju sljedećim izrazima:

$$S_{n12} = \min \{S_{n1}, S_{n2}\} \quad (14)$$

$$S_{n13} = \min \{S_{n1}, S_{n3}\} \quad (15)$$

$$S_{n23} = \min \{S_{n2}, S_{n3}\} \quad (16)$$

Veličine S_{n1} , S_{n2} i S_{n3} predstavljaju nazivne snage VN, SN i NN namota. Obično je zadovoljen slijedeći odnos vrijednosti:

$$S_{n1} = S_{n2} = 3 \cdot S_{n3} \quad (17)$$

Veličine X_{12} , X_{13} i X_{23} dane izrazima (11), (12) i (13) predstavljaju, rasipne reaktancije tronamotnog transformatora između njihovih VN i SN namota, VN i NN namota i SN i NN namota, a

reducirane na naponsku razinu VN namota. Daljnjim uvrštenjem pojedinih veličina konačno slijede izrazi za reaktancije iz slike 4.:

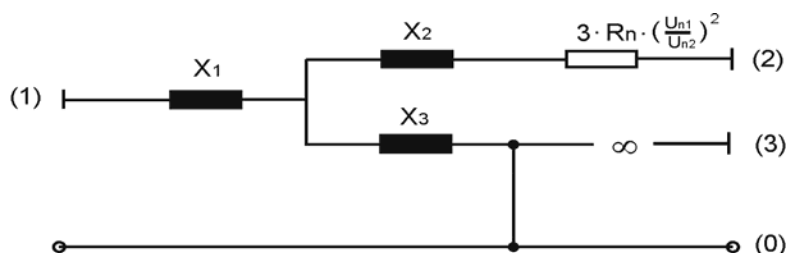
$$X_1 = \left(\frac{u_{k12}}{S_{n12}} + \frac{u_{k13}}{S_{n13}} - \frac{u_{k23}}{S_{n23}} \right) \cdot \frac{U_{n1}^2}{200} \quad (18)$$

$$X_2 = \left(\frac{u_{k12}}{S_{n12}} + \frac{u_{k23}}{S_{n23}} - \frac{u_{k13}}{S_{n13}} \right) \cdot \frac{U_{n1}^2}{200} \quad (19)$$

$$X_3 = \left(\frac{u_{k13}}{S_{n13}} + \frac{u_{k23}}{S_{n23}} - \frac{u_{k12}}{S_{n12}} \right) \cdot \frac{U_{n1}^2}{200} \quad (20)$$

Na temelju iznesenog vidljivo je kako namjesna shema direktnog i inverznog redoslijeda ne ovisi o grupi spoja tronomotnog transformatora, niti o načinu uzemljenja zvjezdišta njegovih namota.

No, o narečenim značajkama transformatora pak ovisi nadomjesna shema nultog redoslijeda tronomotnog transformatora. Primjerice, za tronomotni transformator kojem su VN i SN namot spojeni u zvijezdu, a NN namot u trokut, pri čemu je zvjezdište VN namota izravno uzemljeno dok je zvjezdište SN namota uzemljeno posredno preko djelatnog otpornika R_n , odgovarajuća shema nultog redoslijeda transformatora izgleda prema slici 5. Njene se reaktancije X_1 , X_2 i X_3 određuju također prema izrazima (18), (19) i (20) i one su reducirane na naponsku razinu VN namota. Osim toga, djelatni otpornik R_n u zvjezdištu SN namota energetskog transformatora, kao što se vidi sa slike 5, također je transformiran na naponsku razinu VN namota.



Slika 5. Nadomjesna shema nultog redoslijeda navedenog tronomotnog transformatora svedena na njegovu VN stranu.

Podatci promatranog transformatora TR2, prikazani u točki 2, a uporabljeni u prethodno navedenim izrazima, daju slijedeće vrijednosti rasipnih reaktancija tronomotnog transformatora reduciranih na 110 kV razinu:

$$S_{n12} = 40 \text{ MVA}; S_{n13} = 13.33 \text{ MVA}; S_{n23} = 13.33 \text{ MVA}$$

$$X_1 = \left(\frac{11.5}{40} + \frac{5.5}{13.3} - \frac{1.2}{13.3} \right) \cdot \frac{110^2}{200} = 36.955 \text{ } \Omega$$

$$X_2 = \left(\frac{11.5}{40} + \frac{1.2}{13.3} - \frac{5.5}{13.3} \right) \cdot \frac{110^2}{200} = -2.167 \text{ } \Omega$$

$$X_3 = \left(\frac{5.5}{13.3} + \frac{1.2}{13.3} - \frac{11.5}{40} \right) \cdot \frac{110^2}{200} = 13.084 \text{ } \Omega$$

4.4. Prijelazni otpor na mjestu kvara

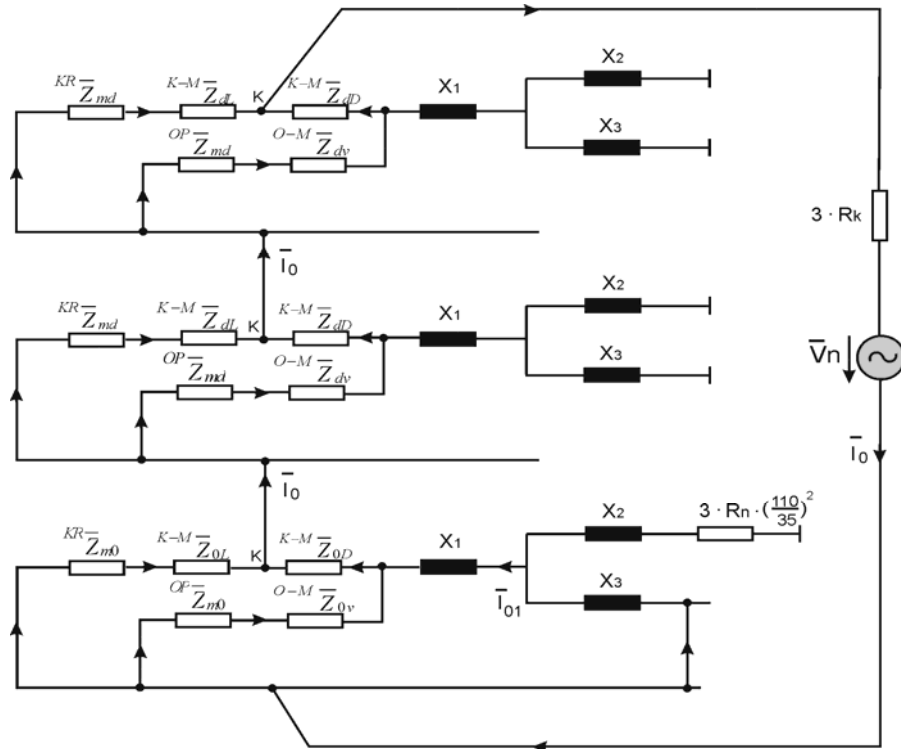
Posebno provedenom analizom može se usvojiti sljedeća vrijednost nadomjesnog otpora na mjestu kvara, ili, kako se uobičajeno kazuje, otpora kvara:

$$R_k \approx 10 \text{ } \Omega$$

5. JEDNOPOLNI KRATKI SPOJ NA DV 110 kV KRALJEVAC - MAKARSKA I UVJETI ZA DJELOVANJE ZAŠTITE

5.1. Analiza toka struje jednopolnoga kratkog spoja

Nadomjesna shema za promatranu pojavu jednopolnoga kratkog spoja na DV 110 kV Kraljevac–Makarska, pri uklopnom stanju sa slike 2., dana je na slici 6. Na promatranoj slici s „K“ je označeno mjesto pojave jednopolnoga kratkog spoja (stup br. 61).



Slika 6. Nadomjesna shema promatranog sustava koja odgovara nastupu jednopolnog kratkog spoja.

S indeksima KR označene su impedancije mreža vezanih za čvor Kraljevac, a s OP za čvor Opuzen. S indeksima K-M pak impedancije voda 110 kV Kraljevica–Makarska, a s O-M impedancije voda 110 kV Opuzen–Makarska.

Na osnovi nadomjesne sheme sa slike 6., te korištenjem teorije o jednopolnom kratkom spoju, slijedi kako je nulta komponenta struje na primarnoj strani (110 kV) energetskog transformatora TR2 tijekom promatranog kvara:

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{V}_n}{3 \cdot R_k + 2 \cdot \bar{Z}_{1ekv} + \bar{Z}_{0ekv}} \quad (21)$$

pri čemu novo uvedene oznake imaju sljedeća značenja:

\bar{Z}_{1ekv} , \bar{Z}_{0ekv} - ukupna nadomjesna impedancija direktnog i nultog sustava, gledana s mjesta nastupa jednopolnoga kratkog spoja i .

V_n – napon zamišljenog generatora ($V_n = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}}$), kojeg tvore napon na mjestu kvara prije nastupa kvara (uzima se U_n mreže) i naponski faktor „c“ (uzima se $c = 1,1$)

Računom, prema [1], dobivaju se vrijednosti ukupne nadomjesne impedancije direktnog i nultog sustava:

$$\bar{Z}_{1ekv} = 2.1357 + j8.5488 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{0ekv} = 2.1967 + j11.1258 \, \Omega$$

Uvrštenjem ovih iznosa, iznosa za otpora kvara (R_k) i podataka o naponu zamišljenog generatora (V_n), u izraz (21) dobiva se ukupna vrijednost struje jednopolnog kratkog spoja:

$$\bar{I}_0 = 1515 \text{ A } \angle -37.7^\circ$$

Od ukupne vrijednosti struje I_0 , samo dio se zatvara kroz zvjezdište primarnog namota (110 kV) transformatora TR2. Ova struja označena je na slici 6. s I_{01} , a može se odrediti pomoću sljedećeg izraza:

$$\bar{I}_{01} = \bar{I}_0 \cdot \frac{KR \bar{Z}_{m0} + K-M \bar{Z}_{0L} - \bar{Z}_{0ekv}}{KR \bar{Z}_{m0} + K-M \bar{Z}_{0L}} \cdot \frac{OP \bar{Z}_{m0} + O-M \bar{Z}_{0v}}{OP \bar{Z}_{m0} + O-M \bar{Z}_{0v} + j(X_1 + X_3)} \quad (22)$$

Uvrštenjem svih veličina u izraz (22) dobiva se vrijednost i kut nulte struje koja se zatvara zvjezdištem namota 110 kV transformatora TR 2:

$$\bar{I}_{01} = 576 \text{ A } \angle -44.9^\circ$$

Struje u fazama primarnog namota (110 kV) energetskog transformatora TR2, na mjestu ugradnje strujnih transformatora na koje je priključena zaštita I>, određuju se pomoću sljedeće matrične jednadžbe:

$$\begin{Bmatrix} {}^{TR2} \bar{I}_{L1} \\ {}^{TR2} \bar{I}_{L2} \\ {}^{TR2} \bar{I}_{L3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} {}^{TR2} \bar{I}_0 \\ {}^{TR2} \bar{I}_d \\ {}^{TR2} \bar{I}_i \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Pritom je:

„a“ - kompleksni operator čija je vrijednost:

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (24)$$

${}^{TR2} \bar{I}_0$, ${}^{TR2} \bar{I}_d$, ${}^{TR2} \bar{I}_i$ -nulta, direktna i inverzna komponenta struje na primarnoj strani (110 kV) energetskog transformatora TR2 tijekom promatranog kvara. One su, u skladu sa slikom 6., jednake sljedećim izrazima:

$${}^{TR} \bar{I}_0 = \bar{I}_{01} \quad (25)$$

$${}^{TR} \bar{I}_d = 0 \quad (26)$$

$${}^{TR} \bar{I}_i = 0 \quad (27)$$

Uvrštenjem vrijednosti (25), (26) i (27), te izraza (24) u matričnu jednadžbu (23) slijede fazne vrijednosti struje jednopolnoga kratkog spoja koje teku na mjestu ugradnje promatrane zaštite I>:

$${}^{TR2} \bar{I}_{L1} = \bar{I}_{01} = 576 \text{ A } \angle -44.9^\circ \quad (28)$$

$${}^{TR2} \bar{I}_{L2} = \bar{I}_{01} = 576 \text{ A } \angle -44.9^\circ \quad (29)$$

$${}^{TR2} \bar{I}_{L3} = \bar{I}_{01} = 576 \text{ A } \angle -44.9^\circ \quad (30)$$

Ističemo važnu spoznaju proisteklu iz proračuna tokova struje jednopolnog kvara: kroz sve faze (L1, L2 i L3) primarnog namota (110 kV) energetskog transformatora TR2 u TS 110/35/10 kV Makarska zatvara se značajan dio ukupne struje jednopolnoga kratkog spoja koju generira mreža priključena na DV 110 kV Kraljevac – Makarska (obostrano). Dakako, njena je vrijednost određena iznosom utjecajnih veličina koje različito ovise o okolnostima na mjestu kvara.

5.2. Analiza uvjeta prorade nadstrujne zaštite I_p na strani 110 kV transformatora TR2

U točki 3. navedene su zaštite na primarnoj strani (110 kV) energetskog transformatora TR2 u TS 110/35/10 kV Makarska prema [3]. Osim diferencijalne zaštite transformatora, u funkciji zaštite transformatora su niskopodesiva (I_p) i viskopodesiva nadstrujna zaštita (I_{p>}). Tijekom promatranog pogonskog događaja niskopodesiva nadstrujna zaštita (I_p) imala je podešenje uzbude:

$$I_{p>(prim)} = 270 \text{ A}$$

Vremensko podešenje djelovanja zaštite I_p, u smislu isključenja transformatora iz pogona, mora zadovoljiti uvjet selektivnosti u odnosu na mjerodavne zaštite I_p u vodnim poljima 35 kV u TS 110/35/10 kV Makarska. Vrijeme odgode djelovanja ove zaštite je t_{p>} = 2,4s.

Valja naglasiti kako je strujno i vremensko podešenje razmatrane nadstrujne zaštite I_p, posve prihvatljivo i u skladu s pravilima struke glede selektivnog djelovanja zaštite na sučelju mreže 110 i 35 kV.

U razmatranom slučaju, prilikom nastupa jednopolnoga kratkog spoja na DV 110 kV Kraljevac–Makarska na primarnoj strani (110 kV) energetskog transformatora TR2 teku fazne struje vrijednosti i faznog kuta prema (28), (29) i (30). Primarna vrijednost razmatranih struja, mjerodavna za pobudu i djelovanje zaštite I_p, ima vrijednost:

$$I_{k(prim)} = 576 \text{ A}$$

Ova vrijednost struje uspoređuje se sa strujom podešenom na mjernom članu nadstrujne zaštite I_p (I_{p>(prim)} = 270A).

Usporedbom navedenih vrijednosti razvidno je kako je struja koja se javlja u svim fazama primarnog namota (110 kV) energetskog transformatora TR2, a koja je pak posljedica jednofaznog kratkog spoja na DV 110 kV Kraljevac – Makarska, veća od struje podešene na mjernom članu nadstrujne zaštite I_p, odnosno, vrijedi:

$$I_{k(prim)} > I_{p>(prim)} \quad (31)$$

Ovaj proračun, za razmatrani pogonski događaj, potvrđuje kao opravdanim stanje uzbude nadstrujne zaštite I_p na primarnoj strani (110 kV) energetskog transformatora TR2 kod nastanka jednofaznog kratkog spoja na DV 110 kV Kraljevac-Makarska. Nakon isteka vremena odgode djelovanja ove zaštite (t_{p>} = 2,4 s) i ako se kvar ne isključi sa strane napojne mreže 110 kV, dolazi do isključenja energetskog transformatora TR2 u TS 110/35/10 kV Makarska iz pogona. Mišljenja smo kako je to prihvatljivo tumačenje stvarnog događaja.

Jednofazni kratki spoj na DV 110 kV Kraljevac – Makarska, sukladno pravilu selektivnosti djelovanja zaštite, mora isključiti distantna zaštita u postrojenju TS 110/35 kV Kraljevac i distantna zaštita u TS 110/35/10 kV Makarska u svom prvom stupnju. Izdvajanjem jednofaznog kratkog spoja na DV 110 kV Kraljevac – Makarska iz mreže u prvom stupnju djelovanja distantne zaštite, znači selektivno izdvajanje onog činitelja mreže koji je u kvaru.

Analiza tokova i vrijednosti struje kvara pri jednofaznom kratkom spoju na DV 110 kV Kraljevac – Makarska pokazuje kako postoje uvjeti za djelovanje nadstrujne zaštite I_p spojene na primarnoj strani (110 kV) energetskog transformatora TR2 u TS 110/35/10 kV Makarska. Uvjeti postoje i pri manjoj izdašnosti napojne mreže 110 kV kao i većoj vrijednosti otpora na mjestu kvara, odnosno, i kod restriktivnijeg pristupa nego li je ovdje izabran.

5.3. Utjecajne veličine na djelovanje distantne zaštite u mreži 110 kV

Kod analiza djelovanja zaštite pojedinih činitelja elektroenergetskog sustava, dijelova ili cijelog elektroenergetskog sustava, potrebno je posebno razmotriti prisutnost veličina ili događaja od bitnog utjecaja na rad zaštite (takozvane utjecajne veličine). Kada analiziramo rad distantne zaštite, uobičajeno promatramo one utjecajne veličine koje su od bitne važnosti za točnost mjerenja udaljenosti kvara, promatramo one koje stvaraju pogrešku mjerenja udaljenosti, jer pogreška uobičajeno uzrokuje promjenu impedantnog doseg, a time i vremenskog djelovanja zaštite.

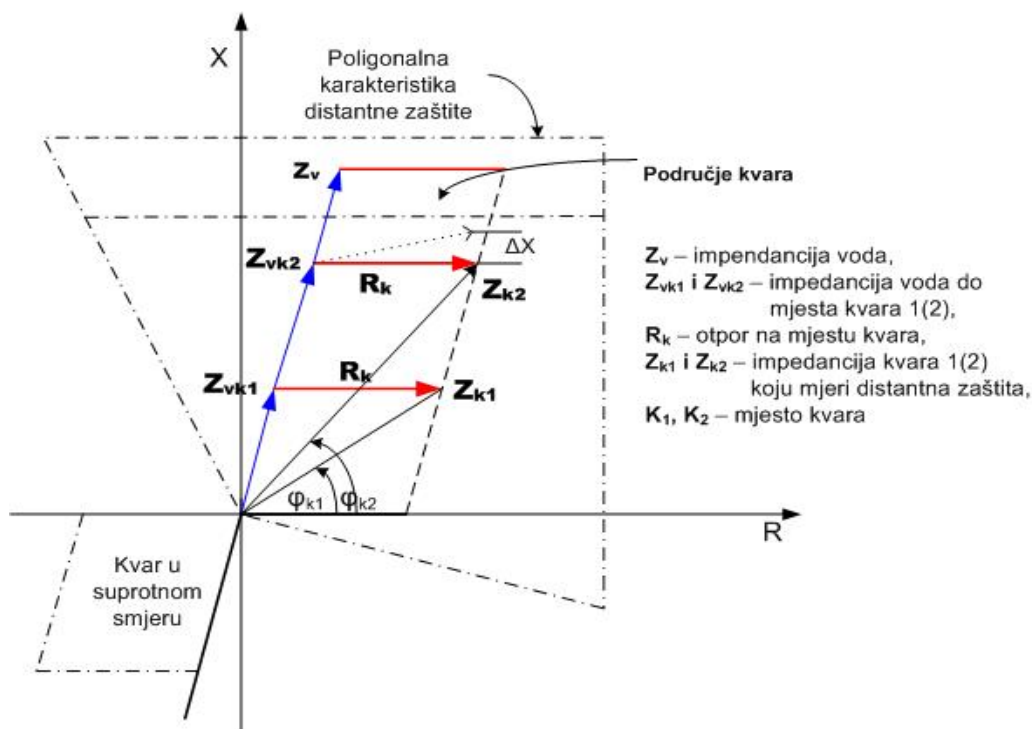
U promatranju pogonskog događaja kojim se bavi ovaj referat važno bi bilo procijeniti utjecajne veličine prilikom jednopolnog kratkog spoja i njihov utjecaj na djelovanje distantne zaštite u mreži 110 kV, a osobito:

- a) distantne zaštite u TS 110/35 kV Kraljevac na DV 110 kV Kraljevac – Makarska i
- b) distantne zaštite u TS 110/35 kV Makarska na DV 110 kV Makarska – Kraljevac.

Držimo kako su u promatranom primjeru postojale neke od poznatih utjecajnih veličina i čiji utjecaj na točnost mjerenja distantne zaštite treba provjeriti. Tu prije svega mislimo na dvije skupine utjecaja:

- a) Otpor kvara
 - prijelazni otpor na mjestu kvara,
 - kvar preko električnog luka,
 - otpor uzemljenja stupa,
 - dvostrano napajanje kvara.
- b) Međunapajanje
 - utjecaj uzemljenog zvjezdišta 110 kV energetskih transformatora.

Nedvojbeno je otpor na mjestu kvara (R_k) veličina koja uvijek utječe na vrijednost impedancije kvara koju mjeri distantna zaštita (Z_k) na vodu s kvarom, a što načelno prikazuje slika 7. Velika vrijednost otpora kvara može izlučiti impedanciju kvara iz okvira karakteristike distantne zaštite ili se može dogoditi induktivna komponenta (ΔX) koja će dovesti vrijednost impedancije kvara koju mjeri distantna zaštita (Z_k) u područje višeg impedantnog stupnja unatoč tome što je kvar stvarno, primjerice, u prvom stupnju.



Slika 7. Točnost mjerenja impedancije kvara distantne zaštite u ovisnosti od nekih utjecajnih veličina.

Svaka od utjecajnih veličina ima svoju utjecajnu vrijednost i smisao utjecaja na pogrešku mjerenja, a neke i na točnost utvrđivanje smjera djelovanja [7]. S učincima nekih utjecajnih veličina može se upravljati pravilnim izborom podešenja, za to predviđenih parametara, distantne zaštite. Ovo se posebno odnosi na mogućnosti podešenja statičkih i digitalnih distantnih zaštita.

Tako primjerice, utjecaj otpora luka na ukupnu vrijednost otpora kvara (R_{kluka}) izračunat prema poznatom „Warrington“ izrazu

$$R_{kluka} = \frac{28700 * L_{luka}}{I_{luka}^{1.4}} \quad (32)$$

može se značajno povećati uz postojanje vjetra i kroz njegovu nepovoljnu dinamiku. Približni iznos ovog utjecaja se može izračunati s izrazom:

$$R_{kluka}^* = R_{kluka} \times \left(1 + \frac{5 * v * t_g}{L_{luka}^*} \right) \quad (33)$$

Pri čemu su:

L_{luka} - dužina luka (m),

L^*_{luka} - početna dužina luka (m)

I_{luka} - struja luka (A)

v – brzina vjetra (m/s)

t_g – vrijeme gorenja luka (s)

R^*_{kluka} - otpor luka uz uvažavanje djelovanje vjetra (Ω)

Glede utjecaja međunapajanja u mreži 110 kV između TS 110/35 kV Kraljevac i TS 110/35 kV Opuzen, treba reći kako nema izvora već postoji samo utjecaj uzemljenog zvjezdišta transformatora 110/35/10 kV u TS Makarska. Taj se utjecaj odnosi na rad distantne zaštite u TS Opuzen, a očituje se kao napajanje u nultom sustavu. Taj izvor struje uzrokuje dodatni pad napona u nultom sustavu, a time i povećanje mjerene impedancije kvara. Utjecaj raste sa snagom transformatora, a ima posljedicu na mjerni doseg distantnih stupnjeva. Pogreška u mjerenju udaljenosti kvara u mreži 110 kV može biti i 30% (distantna zaštita mjeri veću impedanciju kvara nego li je ona stvarno obzirom na mjesto kvara).

Želimo naglasiti kako je za sveobuhvatnu analizu djelovanja zaštite u promatranom pogonskom događaju prijeko potrebno proučiti i utjecaje na djelovanje distantne zaštite u mreži 110 kV, a radi utvrđivanja razloga njenog ponašanja.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirani su uvjeti za pobudu i mogućnost djelovanja niskopodesive nadstrujne zaštite ($I>$), na primarnoj strani (110 kV) energetskog transformatora u TS 110/35/10 kV, na isključenje transformatora iz pogona, a zbog nastupa jednopolnog kratkog spoja u prijenosnoj mreži 110 kV neposredno priključenoj na TS 110/35/10 kV. Već odavno su, stručnjacima za analizu tokova struja kvara i djelovanja zaštite, poznati teoretski uvjeti koji čine stvarno mogućim djelovanje ove zaštite.

Analiza u ovom radu je praktična, primijenjena na konkretnu mrežu i pogonski događaj. Naime, dana 19. rujna 2008. godine došlo je do prorade nadstrujne zaštite ($I>$) na primarnoj strani (110 kV) energetskog transformatora TR2 u TS 110/35/10 kV Makarska i isključenja transformatora iz pogona. Taj se događaj, na temelju raspoloživih signala o pobudi i djelovanju zaštite u napojnim postrojenjima TS 110/35 kV Kraljevac i Opuzen kao i u TS 110/35/10 kV Makarska, opravdano povezuje s postojanjem jednofaznog kratkog spoja na DV Kraljevac – Makarska (stup br. 61).

Ovdje predstavljena analiza tokova struja kvara pokazala je kako je pri kvaru na DV 110 kV Kraljevac – Makarska, nadstrujna zaštita $I>$ na primarnoj strani (110 kV) energetskog transformatora TR2 u TS 110/35/10 kV Makarska imala uvjete za pobudu. Struja koja se javlja u svim fazama na primarnoj strani (110 kV) energetskog transformatora TR2 kod jednofaznog kratkog spoja na DV 110 kV Kraljevac – Makarska znatno je veća od struje podešene na mjernom članu zaštite $I>$. No, zbog podešene vremenske odgode djelovanja nadstrujne zaštite $I>$ ($t_{p>} = 2,4s$), do isključenja energetskog transformatora TR2 iz pogona moglo je doći samo u slučaju kada, iz bilo kojeg razloga, pri jednofaznom kratkom spoju na DV 110 kV Kraljevac – Makarska, distantna zaštita na krajevima ovog voda ne djeluje prema uobičajeno postavljenom planu impedantnog i vremenskog stupnjevanja. Držimo kako tumačenje ponašanja distantne zaštite u opisanom pogonskom događaju treba tražiti u analizi utjecajnih veličina na njenu pobudu, mjerenje impedancije kvara, mjerenje smjera i vremensko zatezanje djelovanja.

Tek zajedno, analize pogonskih uvjeta i djelovanja zaštite u mreži 110 kV s kvarom, u TS 110/35/10 kV Makarska i distribucijskoj mreži 35 kV, s održivim obrazloženjima, mogu odgovoriti na brojna pitanja koja su se pojavila nakon pogonskog događaja. Odgovori na ta pitanja trebaju prije svega služiti našem iskustvu i djelovanju na zaprečavanju budućih događaja koji bi doveli do „mraka“ i neraspoloživosti mreže za korisnike mreže.

LITERATURA

- [1] Sarajčev, P.: Analiza prorade zaštite transformatora TR2 u TS 110/35/10 kV Makarska uslijed kvara u incidentnoj prijenosnoj mreži 110 kV
- [2] Visković, Z.; Mihanović, G.: Jednopolne sheme transformatorskih stanica prijenosnog područja Split, HEP - Operator prijenosnog sustava, Prijenosno područje Split, Split, 2005.
- [3] Sarajčev, I.; Kosor, R.; Petric, K.; Sarajčev, P.; Mučić, D.: Analiza i rješenje problematike usklađenosti sustava relejnih zaštita u TS 110/35/10 kV "Makarska", FESB, Split, 2006.
- [4] Nevečerel, D.: Proračun kratkog spoja u mreži Hrvatske 2005. i 2010. godine, Institut za elektroprivredu i energetiku, Zagreb, 1999.
- [5] Dalekovod: Tipizacija 110 kV dalekovoda u SR Hrvatskoj, Dalekovod, Zagreb, 1986.
- [6] ELKA: Užad za nadzemne vodiče, Kataloški podaci
- [7] Ziegler, G.: Digitaler Distanzschutz – Grundlagen und Anwendung, Erlangen Publicis MCD Verlag, 1999.