

Štefan Ivičić
HEP – ODS d.o.o., Elektra Bjelovar
stefan.ivicic@hep.hr

Dejan Čulibrk
HEP – ODS d.o.o., Elektra Bjelovar
dejan.culibrk@hep.hr

Igor Bujan
HEP – ODS d.o.o., Elektra Bjelovar
igor.bujan@hep.hr

Zvonimir Popović
HEP – ODS d.o.o., Elektra Bjelovar
zvonimir.popovic@hep.hr

LOCIRANJE VIŠEPOLNIH KVAROVA PRORAČUNOM STRUJA KRATKIH SPOJEVA

SAŽETAK

Pri otklanjanju kvara potrebno je prvo odrediti gdje se kvar nalazi. U radu je prikazana metoda koja može brzo suziti moguće područje kvara. Ukoliko je moguće saznati vrijednost struje kvara koja se pojavila za vrijeme kratkog spoja, opisano je kako iz nje odrediti lokaciju kvara. Na taj se način olakšava posao interventnih ekipa na terenu te smanjuje broj iteracija probnog uključivanja dalekovoda pri izoliranju kvarne dionice.

Struja tijekom dvopolnih i trolnih kvarova niža je što je mjesto kvara udaljenije od pojne točke. Lokacija kvara se može odrediti mrežnim proračunima u programskom paketu na temelju očitanih vrijednosti struja koje je relej zabilježio u trenutku isklopa dalekovoda u kvaru. Ova metoda pridonijela je bržem otklanjanju na desetke kvarova na distribucijskom području Elektro Bjelovar.

Ključne riječi: kvarovi, struja kratkog spoja, relejna zaštita, mrežni proračuni

LOKATING MULTIPOLE FAULTS BY CALCULATING SHORT CIRCUIT CURRENTS

SUMMARY

When removing a fault, it is necessary to first determine where the fault is located. The paper presents a method that can quickly narrow down the possible fault area. If it is possible to find out the value of the fault current that occurred during the short circuit, it is described how to determine the location of the fault from it. This method facilitates the work of field intervention teams and reduces the number of iterations of trial switching of the power line when isolating the faulty section.

The current during two-pole and three-pole faults is lower the further the fault location is from the feeding point. The fault location can be determined using network calculations in a software package based on the current values recorded by the relay at the moment the power line is switched off due to the fault. This method contributed to the faster elimination of dozens of faults in the distribution area of Elektra Bjelovar.

Key words: faults, fault current, relay protection, network calculations

1. UVOD

Zemljospoj je nemoguće locirati pomoću struje kvara jer ona duž cijelog dalekovoda ima slične vrijednosti. Međutim, struja dvopolnog i trolnog kvara opada sa udaljenošću čime je moguće suziti potencijalno područje kvara i prije nego interventna ekipa krene na pogođeni teren. Takvi se kvarovi često dešavaju za vrijeme nepovoljnih vremenskim uvjetima kao što su olujno nevrijeme ili snijeg te je stoga otežan pregled cijele trase dalekovoda.

Ukoliko zaštitni relej ima mogućnosti daljinskog slanja mjerene veličine za vrijeme isklopa, na taj se način u SCADA sustavu može prikazati struja kvara. Ukoliko je mreža već unaprijed modelirana u proračunskom alatu, mogu se zatim proračunati struje kvarova u svim točkama kvarnog dalekovoda. Mjerena veličina struje kvara zatim se može usporediti sa izračunatim veličinama kako bi se odredilo moguće područje kvara. To olakšava odabir rastavljača kojega je potrebno otvoriti prije izoliranja kvarne dionice mreže kao i samu lokaciju kvara. Pravilnim odabirom rastavljača smanjuje se broj pokušaja probnog uključivanja dalekovoda kako bi se izolirala kvarna dionica, a time se smanjuje i naprezanje opreme.



Slika 1. Primjer kvara nakon nevremena koji može prouzrokovati višepolni kratki spoj

Ovom je metodom moguće znatno skratiti neplanirane prekide napajanja i olakšati posao ekipama na terenu. Elektra Bjelovar na ovaj je način uspješno ubrzala lociranje na desetke većih kvarova u mreži srednjeg napona. Proračunavaju se i lokacije prolaznih kvarova uključenih APU-om kako bi se pratilo ponavljaju li se na istom dijelu dalekovoda u svrhu planiranja preventivnih radnji.

2. PRORAČUN LOKACIJE KVARA

2.1. Očitavanje struje iz SCADA sustava

Ukoliko tip zaštitnog numeričkog releja na vodnom polju koje je u kvaru i komunikacijski protokol omogućuju dojavu struje kvara, ona može ostati zapisana u SCADA sustavu. Na distribucijskom području Elektre Bjelovar ta mogućnost postoji na vodnim poljima opremljenima numeričkim relejima prošle generacije dok noviji ne dojavljuju struju kvara daljinski. Ukoliko se struja kvara ne može očitati daljinski, ona se, ovisno o tipu releja, može očitati direktno sa releja što najčešće ipak nije praktično jer zahtjeva odlazak u trafostanicu.

Na (slici 2.) prikazan je primjer struje kvara očitane sa 10 kV zračnog dalekovoda Bolč koji se napaja iz TS 35/10(20) kV Žabno. Kvar se desio 2.1.2025. godine. Vod je uspješno vraćen u pogon odmah pomoću automatskog ponovnog uklopa (APU), ali iznos struje je ostao zabilježen za naknadnu analizu. Iz iznosa struje je vidljivo kako se radi o dvopolnom kratkom spoju između druge i treće faze struje kratkog spoja od oko 813 A. Zdrava prva faza ima znatno niži iznos struje. Ukoliko su očitane struje po fazama nepravilnog iznosa, primjerice ukoliko se pojavi visoka struja u sve tri faze, ali međusobno vrlo različitih vrijednosti, to može ukazivati na atmosferska pražnjenja ili kvar same relejne zaštite.



Slika 2. Prikaz alarma TS 35/10(20) kV Žabno u SCADA sustavu nakon APU-a na DV Bolč

Većina kvarova je prolaznog karaktera kao na gornjem primjeru, ali i oni se podvrgavaju proračunima kako bi se pratilo ponavljanje li se na istom dijelu dalekovoda. Ukoliko se ustanovi da se kvarovi ponavljaju na istoj dionici, mogu se vršiti preventivne radnje uklanjanja tehničkih nedostataka, proširenje šumske prosjeke i slično.

2.2. Proračun struje kratkog spoja prema IEC60909

Za proračune se koristi programski paket NEPLAN v5. Model mreže sadrži sve vodove i postrojenja srednjeg napona na distribucijskom području Elektre Bjelovar i može se brzo prilagoditi trenutnom uklopnom stanju i statusu proizvodnih postrojenja na mreži. Model se redovno ažurira novim elementima mreže kao primjerice nakon zamjene presjeka vodova na određenoj trasi dalekovoda što utječe i na proračun kratkog spoja.

Proračun se izvodi na način da se računaju struje kratkog spoja u svim točkama zahvaćenog dalekovoda za tip kratkog spoja kakav se desio, a uobičajeno je to dvopolni kratki spoj. Prikazom rezultata

na shemi mreže vrši se usporedba sa očitanom strujom iz SCADA sustava kako bi se odredila približna lokacija kvara.

Proračuni se rade sukladno normi IEC60909 prema kojoj se razlikuje maksimalna i minimalna struja kratkog spoja. Minimalna struja je relevantnija pri određivanju podešenja zaštite jer ona mora biti osjetljiva na najmanju moguću struju kvara koja se može pojaviti. Maksimalna struja je relevantnija pri projektiranju mreža i postrojenja, tj. odabira opreme. Uz nazivni linijski napon u izrazu za proračun struje trofaznog kratkog spoja, dodaje se faktor c čiji iznos ovisi o naponskom nivou na kojemu se računa kratki spoj te namjeni proračuna (minimalna ili maksimalna struja kvara):

$$I_{K3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d} \quad (1)$$

Gdje je U_n nazivni linijski napon, a Z_d direktna impedancija mreže od mjesta napajanja (pojne točke) do mjesta kvara. Prema propisima IEC909, iznosi faktora c dani su u slijedećoj tablici [2].

Tablica I. Naponski faktor c prema propisima IEC909 [2]

Nazivni napon (U_n)	c_{max} (za proračun $I_{k_{max}}$)	c_{min} (za proračun $I_{k_{min}}$)
100-1000 V	1,05* 1,10**	0,95 0,95
Iznad 1 kV	1,10	1,00

* za niskonaponske mreže sa tolerancijom napona +6%

** za niskonaponske mreže sa tolerancijom napona +10%

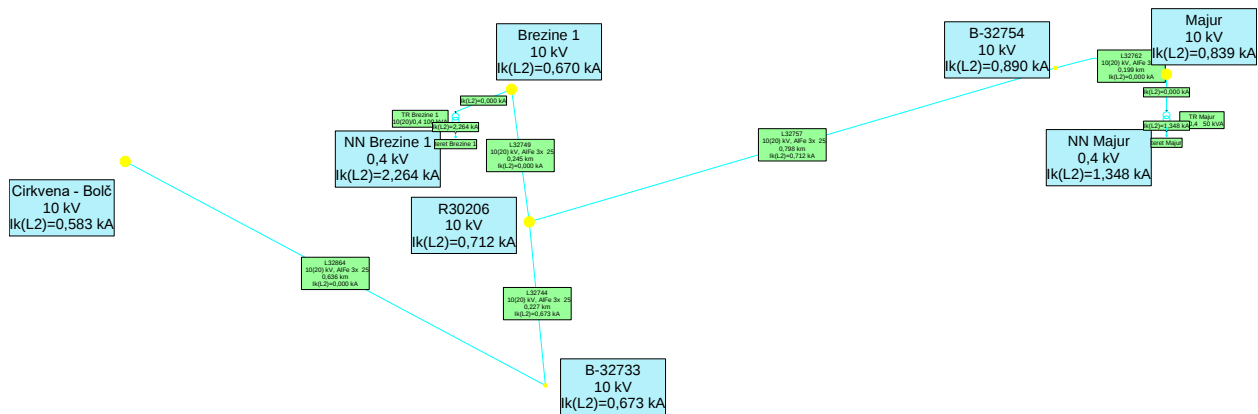
Naime, struja kratkog spoja se može razlikovati čak i ako se kvar ponovi na istom mjestu, ali i zbog same nesavršenosti modela, nepreciznosti mjerenja, nepoznavanja točnog napona u trenutku kvara, impedancije kvara i slično. Sigurnije je pretpostaviti raspon trase unutar kojega se kvar desio umjesto određenih točaka. U parametrima proračuna kratkog spoja u NEPLAN-u određuje se računamo li minimalnu ili maksimalnu struju kratkog spoja te se može podesiti faktor c prema (tablici I.). Proračun se vrši za obje struje, a praksa je pokazala kako se kvar u pravilu nalazi između tih dvaju ekstrema, tj. unutar područja omeđenog njima.

Struja kvara opada sa otporom što indirektno ukazuje na udaljenost kvara od napojne trafostanice. Ona će opadati najbrže kod vodova visokog otpora, tj. onih najtanjih stoga se upravo na njima ona najpreciznije može i odrediti. Raspon između minimalne i maksimalne proračunate struje kvara će isto tako biti manji na vodovima manjih presjeka što će rezultirati manjim područjem unutar kojeg se kvar može nalaziti.

Kako iznos struje kratkog spoja ukazuje samo na udaljenost kvara od napojne trafostanice, ukoliko se vod grana na više odcjeka ispred ili blizu mjesta kvara, tada se umnožava i broj mogućih lokacija kvara. Međutim, mjesto kvara se može nadalje suziti integracijom indikatora kvarova na početke pojedinih odcjeka što je i praksa u Elektri Bjelovar. Izuzev dojava indikatora, preklapanjem trase voda na kartografskoj podlozi (SCADA, GIS...) može se procijeniti na kojim odcjepima je kvar vjerojatniji primjerice jer trasa voda prolazi šumom.

2.3. Primjer proračuna struje kratkog spoja u NEPLAN-u

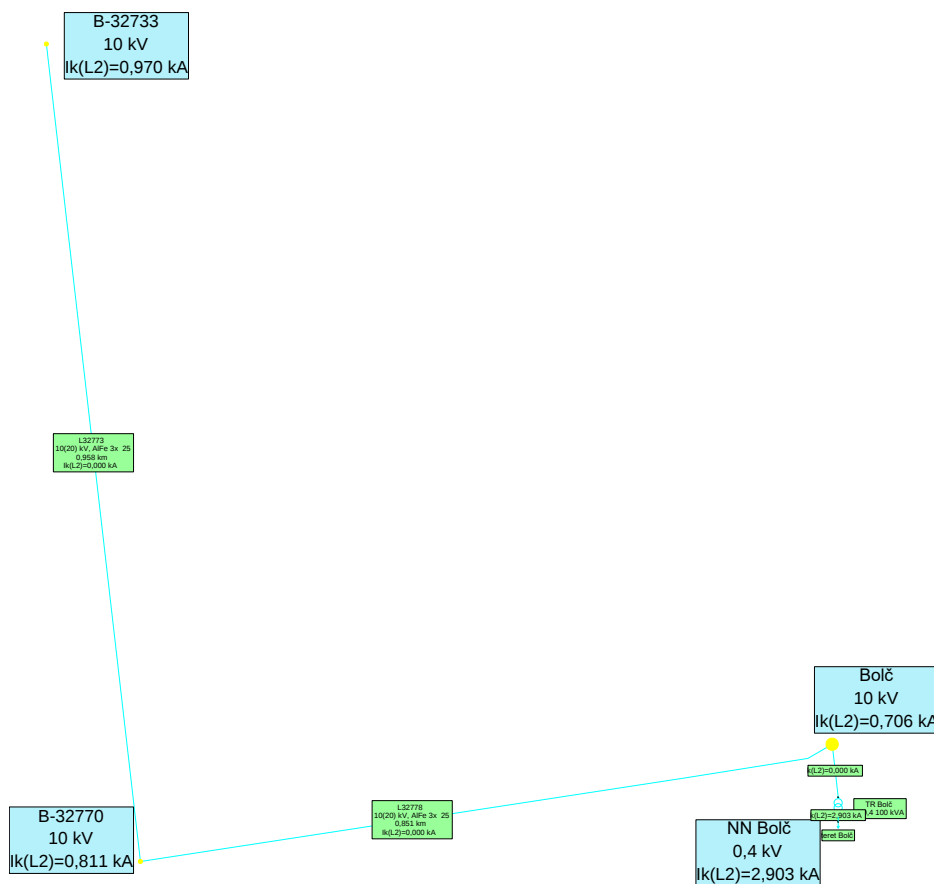
Za primjer proračuna kratkog spoja može se uzeti prolazni kvar na 10 kV dalekovodu Bolč iz prijašnjeg poglavlja. Zabilježena struja po fazama iznosila je 15 A, 814 A i 815 A. U postavkama proračuna kratkog spoja odabran je dvopolni kratki spoj i metoda proračuna IEC60909. Kao kvarne točke (Faulted nodes) odabrane su sve točke 10 kV dalekovoda Bolč, tj. u NEPLAN modelu sve točke napajane iz mrežnog feedera Bolč. Prvo će se izračunati minimalni kratki spoj, stoga je potrebno isključiti opciju „Ik" max calculation“. Zbog preglednosti, rezultati su prikazani samo za drugu fazu.



Slika 3. Segment DV Bolč u NEPLAN-u na kojem minimalna struja kratkog spoja odgovara očitanoj

Na gornjoj slici je vidljivo kako struja dvopolnog kratkog spoja na početku odcjeka za TS 10/0,4 kV Majur iznosi 890 A (točka vidljiva na slici koja je najbliža pojnoj točki), a struja na početku odcjeka za TS 10/0,4 kV Brezine 1 iznosi 712 A. Struja kvara od 813 A javila bi se između tih dviju točaka na segmentu voda koji ih spaja.

Sada ponovimo proračun za maksimalnu struju kratkog spoja uz uključenu opciju „Ik" max calculation“. Faktor c je postavljen na iznos 1,1 prema (tablici I.).



Slika 4. Segment DV Bolč u NEPLAN-u na kojem maksimalna struja kratkog spoja odgovara očitanoj

U proračunu maksimalne struje kratkog spoja, očitana struja kvara javit će se odmah ispred odcjeka za TS 10/0,4 kV Bolč. Na početku odcjeka struja kratkog spoja iznosi 811 A što je vrlo blizu očitane struje.

Kombinirajući rezultate minimalnog i maksimalnog proračuna kratkog spoja, možemo sada dobiti raspon trase unutar kojega se prema proračunu mogao javiti kvar koji je izazvao APU na dalekovodu. Na sljedećoj slici je prikaz DV Bolč u SCADA sustavu sa zaokruženim segmentom unutar kojeg se, prema

Najčešće se radi o dvopolnim kvarovima na 10 kV dalekovodima, ali pojavili su se i drugi kvarovi riješeni ovom metodom. Tako se na datum 9.12.2020. u 20:30 sati dogodio ispad 35 kV vodnog polja u TS 35/20 kV Bjelovar 2 koje je napajalo TS 35/10 kV Bulinac i TS 35/10 kV Veliki Grđevac na signal I>. Vod je uključen u 20:33 i privremeno je držao, međutim kvar se ponovio i mreža je prespojena na način da 35 kV vod Bjelovar 2 – Bulinac ostane isključen. Slijedeći dan, probno je vod uključen u prazan hod iz TS 35/10 kV Bulinac pri čemu je odmah došlo do prorade zaštite na vodnom polju. Ovaj je relej zabilježio struje kvara 2738 A u prvoj fazi, 3166 A u drugoj fazi i 2855 A u trećoj fazi. Iako je trolini kvar neuobičajen i struje su pomalo nepravilne, napravljen je proračun kratkog spoja koji je ukazao na kvar unutar prvih 20% voda počevši od TS 35/10 kV Bulinac. Na trasi dalekovoda nije pronađeno ništa sumnjivo, no kvar je

pronađen na izlaznom rastavljaču u TS 35/10 kV Bulinac koji je saniran. Dakle, kvar se desio na početku dalekovoda kako je proračun i pokazao.



Slika 6. Kvar na izlaznom rastavljaču 35 kV vodnog polja u TS 35/10 kV Bulinac

4. ZAKLJUČAK

Procjena lokacije kvara proračunom struje kratkog spoja može vrlo brzo ograničiti potencijalna mjesta dvopolnog ili trolnog kvara vrlo dugačkih dalekovoda na relativno maleno područje. To olakšava pronalazak kvara ekipama na terenu koje tada ne trebaju pregledavati cijelu trasu što bi bilo dugotrajno i mukotrpno posebice u teškim vremenskim uvjetima kada se takvi kvarovi najčešće i događaju. Isto tako, odabir rastavljača kojim bi se izolirao kvar je olakšan što rezultira manjim brojem probnih ukapčanja čime se smanjuje naprezanje opreme te bržim uklapanjem što većeg dijela zdrave trase dalekovoda kako bi korisnici koji se nalaze ispred kvarne dionice što brže bili spojeni natrag na mrežu. Proračunsko određivanje lokacije kvara pridonosi smanjenju faktora SAIDI. Proračunskim određivanjem lokacija prolaznih kvarova nakon prorade APU-a može se pratiti ponavljaju li se kvarovi na istim lokacijama te tako prevenirati pojavu trajnih kvarova.

Kvar je nešto teže pronaći na razgranatim vodovima ako se kvar dogodio iza mjesta odcjepanja jer tada se umnožava broj mogućih lokacija. Kvar je lakše pronaći na vodovima manjih presjeka zbog većeg otpora voda što uzrokuje brže opadanje iznosa struje sa udaljenošću od pojne točke. Indikatori kvarova na zračnim dalekovodima pokazali su se korisni u kombinaciji sa mrežnim proračunima jer se tako područje kvara može dodatno suziti. Tako se pokazalo korisnim indikatore postaviti na početke dugačkih odcjepa, pogotovo ako se dalekovod grana već blizu svog početka.

Za proračun lokacije višepolnih kvarova prvenstveno je potrebno da relejna zaštita ima mogućnost bilježenja struje u trenutku iskapčanja kvara i po mogućnosti njezinu daljinsku dojavu u SCADA sustav. Stoga bi bilo poželjno da se takve funkcionalnosti razmatraju prilikom razvoja novih rješenja numeričke relejne zaštite. Nadalje, potrebno je razvijati i obnavljati model elektroenergetske mreže u nekom od programskih paketa koji omogućuju proračun kratkog spoja. Sve ovo zahtjeva angažman i komunikaciju različitih službi i odjela unutar pojedine elektre, ali posljedično rezultira uspješnijim poslovanjem.

5. LITERATURA

- [1] I. Kuzle, H. Pandžić, T. Capuder, M. Zidar, N. Holjevac, „Razvoj distribucijske mreže Elektre Bjelovar u razdoblju 2013-2033. godine“, Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, travanj 2014.
- [2] R. Goić, D. Jakus, I. Penović "Distribucija električne energije", interna skripta, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 2008.
- [3] Z. Matišić, M. Bolfek, G. Pakasin, "Metoda detekcije lokacija višepolnih kratkih spojeva u razdjelnoj mreži pomoću struje kvara“, 6. (12.) savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, Opatija, 13. – 16. svibnja 2018.