

**UTICAJ NAČINA UZEMLJENJA DISTRIBUTIVNE MREŽE NA PRORAČUN
LOKACIJE KVARA****THE IMPACT OF DISTRIBUTION NETWORK GROUNDING ON THE FAULT
LOCATION**Ivan Stanojević, Savo Đukić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratki sadržaj – U ovom radu dati su osnovni pojmovi vezani za upravljanje kvarom. Takođe, teorijski je opisan algoritam za lociranje kvara. Testiran je uticaj načina uzemljenja distributivne mreže na funkciju lokacije kvara na test mreži i izneti su zaključci o dobijenim rezultatima.

Ključne riječi: Lokacija kvara, Uzemljenje, Distributivna mreža.

Abstract – This paper gives basic concepts about the fault management. Also, algorithm for fault location are described theoretically. Influence of the distribution network grounding on the fault location is tested using the simple network and obtained conclusions are provided.

Keywords: Fault location, Grounding, Distribution network.

1. UVOD

Prekid napajanja potrošača je nepoželjno stanje, te je potrebno preduzeti odgovarajuće mere da se ono što pre eliminiše. Zato je prvo neophodno ustanoviti gde se nalazi mesto sa kvarom, zatim ga izolovati od ostalog dela distributivne mreže, da bi se potom, obnovilo napajanje kod potrošača kod kojih je došlo do prekida napajanja, a kod kojih je to moguće izvesti. Skup prethodno navedenih akcija predstavlja upravljanje kvarom [1].

Tradicionalni pristup podrazumeva izlazak ekipe na teren, vizuelni pregled deonice sa kvarom i ručnu manipulaciju rasklopnom opremom. Potrebne informacije o lokaciji kvara se dobijaju telefonskim putem od potrošača [2].

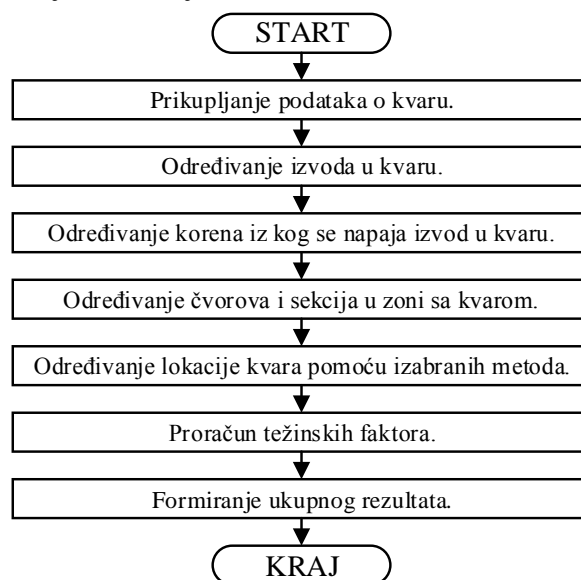
Velika mana tradicionalnog pristupa problemu eliminacije kvara jeste vreme trajanja prekida napajanja potrošača, koje može biti skraćeno efikasnijim upravljanjem kvarom. Višestruko efikasnije upravljanje kvarom se postiže korišćenjem različitih indikatora i rasklopne opreme, koja je povezana sa odgovarajućim softverom u dispečerskom centru, preko nadzorno upravljačkih sistema. Princip rada funkcije za lociranje kvara opisan je u sledećem poglavlju. U trećem poglavlju, izvršeno je ispitivanje uticaja načina uzemljenja distributivne mreže na funkciju za lociranje kvara. Dobijeni rezultati su predstavljeni i prokomentarisani. Na kraju rada dati su odgovarajući zaključci i korišćena literatura.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Savo Đukić, docent.

2. FUNKCIJA ZA LOKACIJU KVARA

Rezultat proračuna funkcije za lokaciju kvara jeste verovatnoća na kojoj sekciji se dogodio kvar, pri čemu to može biti jedna, ali i više sekcija na kojoj se potencijalno nalazi mesto kvara. Uprošćeni algoritam funkcije za lokaciju kvara dat je na slici 2.1.



Slika 2.1. Uprošćeni algoritam funkcije za lokaciju kvara

Prikupljanje ulaznih podataka odvija se u prvom koraku algoritama, a neki od podataka koji su od interesa za ovu funkciju su tip kratkog spoja, broj obuhvaćenih faza, izabrane metode za lokaciju kvara, itd.

Pri pojavi kvara u mreži odreagovaće odgovarajuća relejna zaštita, koja će poslati komandu za otvaranje prekidača na početku izvoda. Iz tog razloga prvo je potrebno odrediti na kom izvodu se dogodio kvar.

Sledeće što je potrebno uraditi jeste određivanje korena distributivne mreže sa kog se napaja izvod sa kvarom. Pod korenom distributivne mreže podrazumeva se jedna od sabirnica u transformatorskoj stanici visoki na srednji napon.

Pošto se proračun lokacije kvara ne vrši nad celom mrežom već samo nad izvodom u kvaru, potrebno je odrediti sve čvorove i sekcije koje se nalaze u zoni sa kvarom.

Postoje različite metode za lociranje kvara i svaka od njih pruža rezultate koji su manje ili više tačni. Zbog toga se koristi više metoda za lociranje kvara. Najpoznatije metode za lociranje kvara su: Fault Detector, Current method, Impedance method i Failure Rate method.

Proračun lokacije kvara pomoću Fault Detector metode odvija se tako što se vrši pretraživanje detektora kroz koje je protekla struja kratkog spoja. U slučaju kada je npr. kroz detektor na početku sekcije protekla struja kvara, a kroz detektor na samom kraju sekcije nije protekla struja kvara, tada je kvar sigurno na toj sekciji.

Current metoda vrši simulaciju kvarova na početku i kraju svake sekcije iz zone kvara. Pomoću izračunatih vrednosti struje kratkog spoja na mestu ugradnje merne opreme i izmerene struje (I_{mereno}) vrši se određivanje broja sekcija koje pripadaju tzv. crvenoj i žutoj zoni. Smisao uvođenja crvene i žute zone jeste uvažavanje grešaka koje se javljaju pri merenju struje.

Kada se vrednost izmerene struje kvara nalazi između izračunatih struja kvara na početku i kraju neke sekcije, to znači da se kvar upravo nalazi na toj sekciji i da ona pripada crvenoj zoni. Treba naglasiti da broj sekcija koje se nalaze u crvenoj može biti veći od jedan.

Za određivanje broja sekcija u žutoj zoni koristi se isti uslov kao za određivanje broja sekcija u crvenoj zoni, ali se umesto I_{mereno} koristi $0.98 I_{mereno}$ odnosno $1.02 I_{mereno}$. Takođe, broj sekcija u žutoj zoni može biti veći od jedan.

Impedance metoda koristi ekvivalentnu merenu impedansu kvara (direktnog redosleda) od mesta merne jedinice do mesta kratkog spoja. Impedansa kvara dobija se kao količnik odgovarajućeg napona i struje izvoda u kvaru. Nakon toga vrši se simuliranje kvarova na početku i kraju svake sekcije pri čemu se proračunavaju impedanse direktnog redosleda.

Kada se dogodi da se vrednost modula merene impedanse (Z_{mereno}) nalazi u opsegu izračunatih vrednosti modula impedansi sa početka i kraja neke sekcije to znači da je upravo na toj sekciji kvar i da se ona nalazi u crvenoj zoni. Treba naglasiti da broj sekcija koje se nalaze u crvenoj zoni može biti veći od jedan. Za određivanje broja sekcija u žutoj zoni se koristi isti uslov kao i za određivanje broja sekcija u crvenoj zoni, ali se umesto Z_{mereno} koristi $0.9 Z_{mereno}$ odnosno $1.1 Z_{mereno}$. Takođe, broj sekcija u žutoj zoni može biti veći od jedan.

Podužni intezitet otkaza trajnih kvarova za sekciju je pokazatelj pouzdanosti, koji predstavlja broj kvarova u toku jedne godine po jedinici dužine. Množenjem tog pokazatelja i dužine sekcija dobija se verovatnoća kvara za svaku sekciju tog izvoda.

U prethodnom koraku izvršen je proračun lokacije kvara za izabrane, koje su se ujedno mogle izvršiti. Rezultati proračuna pojedinačne metode dobijeni su uz pretpostavku da je njihova pouzdanost 100%, pri čemu će ovi rezultati biti korigovani. Pouzdanost metode predstavlja verovatnoću da će ta metoda za svaki tip i mesto kvara u mreži dati kvalitetne rezultate.

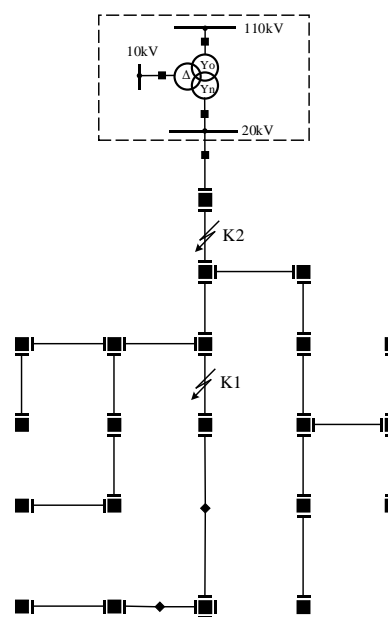
Vrednost pouzdanosti svake ponaosob metode može biti, u opsegu od 0% do 100%, pri čemu 0% znači da je metoda potpuno nepouzdana, a 100% znači da je metoda apsolutno pouzdana. Za strujnu i impedantnu metodu definišu se dve vrednosti pouzdanosti metode (po jedna za crvenu i žutu zonu). Korekcija rezultata proračuna lokacije kvara vrši se pomoću težinskih faktora. Težinski

faktor pojedinačne metode računa se kao količnik pouzdanosti te metode i zbira pouzdanosti svih metoda.

U poslednjem koraku se ukupan rezultat za neku sekciju dobija kao proizvod rezultata proračuna pojedinačnih metoda i izračunatih težinskih faktora.

3. UTICAJ NAČINA UZEMLJENJA MREŽE NA LOKACIJU KVARA

U ovom poglavlju predstavljeni su rezultati ispitivanja uticaja načina uzemljenja napojnog transformatora na rezultate proračuna lokacije kvara strujnom i impedantnom metodom. Ispitivanje je izvršeno za dve različite lokacije kvara (obeležene sa K1 i K2), na test mreži prikazanoj na slici 3.1.



Slika 3.1. – Izgled test mreže

U napojnoj transformatorskoj stanici nalazi se tronamotajni transformator sprege YoYnD. Na sekundarnoj strani napojnog transformatora se nalazi sva potrebna merna oprema sa zaštitnim relejima. Vrednosti otpora otpornika za uzemljenje, koje su korišćene pri ispitivanju, iznose 0Ω , 20Ω , 40Ω i 70Ω .

Iako se sredjenaponska mreža ne uzemljuje direktno, u ovom radu je to urađeno radi poređenja dobijenih rezultata. Što se vrste kvarova tiče obrađeni su kratki spojevi sa zemljom, odnosno jednopolni i dvopolni kratak spoj sa zemljom.

3.1. Dobijeni rezultati proračuna lokacije kvara pomoću strujne metode

U ovom poglavlju, u tabelama 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 i 3.1.4 prikazani su rezultati proračuna lokacije kvara pomoću strujne metode za različite vrednosti otpora otpornika za uzemljenje. U tabelama 3.1.2 i 3.1.4 I_{min} i I_{max} predstavljaju najmanju i najveću vrednost izračunate struje kvara koja protiče kroz sekundar napojnog transformatora dok je sa I označena merena vrednost struje kvara. Tabele 3.1.2 i 3.1.4 se razlikuju samo po

vrednostima merene struje kvara što je posledica različitih lokacija mesta kvara (K1 i K2).

Tabela 3.1.1. – Broj detektovanih sekcija po zonama za lokaciju kvara K1 pomoću strujne metode

R [Ω]	Broj sekcija u crvenoj zoni		Broj sekcija u žutoj zoni	
	1PKS	2PKSZ	1PKS	2PKSZ
0	3	3	3	3
20	3	3	15	7
40	3	3	20	7
70	3	3	20	7

Tabela 3.1.2. – Promena struja kvara za lokaciju kvara K1 pomoću strujne metode

R [Ω]		0	20	40	70
1PKS	I _{min} [A]	3272	576	304	178
	I [A]	4690	605	311	180
	I _{max} [A]	7593	631	318	182
2PKSZ	I _{min} [A]	4326	4054	3991	3962
	I [A]	5314	4648	4575	4543
	I _{max} [A]	7530	5283	5203	5169

Tabela 3.1.3. – Broj detektovanih sekcija po zonama za lokaciju kvara K2 pomoću strujne metode

R [Ω]	Broj sekcija u crvenoj zoni		Broj sekcija u žutoj zoni	
	1PKS	2PKSZ	1PKS	2PKSZ
0	1	1	0	3
20	1	1	12	3
40	1	1	19	3
70	1	1	22	3

Tabela 3.1.4. – Promena struja kvara za lokaciju kvara K2 pomoću strujne metode

R [Ω]		0	20	40	70
1PKS	I _{min} [A]	3272	576	304	178
	I [A]	5393	613	313	181
	I _{max} [A]	7593	631	318	182
2PKSZ	I _{min} [A]	4326	4054	3991	3962
	I [A]	5798	4851	4776	4743
	I _{max} [A]	7530	5283	5203	5169

Ono što je možda na prvi pogled čudno, jeste činjenica da je broj detektovanih sekcija u crvenoj zoni (za obe lokacije kvara) ostao isti bez obzira na promenu R. Iako povećanje R izaziva smanjenje struje kvara (naročito kod 1PKS), njena raspodela unutar test mreže je ostala ista, pa je zbog toga logično zašto je broj sekcija u crvenoj zoni ostao isti.

Broj detektovanih sekcija u crvenoj zoni pri lokaciji kvara K2 je manji zato što je lokacija kvara bliža izvoru napajanja izvoda.

Kada je razmatrana mreža direktno uzemljena, vrednosti I_{min} i I_{max} se dosta razlikuju i zato je broj sekcija u žutoj zoni relativno mali. Pri otporu uzemljenja većim od 20Ω razlika između I_{min} i I_{max}, pri 1PKS gotovo da ne postoji, a to znači da je vrednost struje simuliranog 1PKS u bilo kom čvoru mreže praktično ista.

Upravo iz tog razloga se broj sekcija u žutoj zoni povećao. Ovaj efekat postoji i kod 2PKSZ, ali je mnogo je manje izražen, jer su struje 2PKSZ mnogo veće od struja pri 1PKS. Zato je broj sekcija u žutoj zoni pri 2PKSZ manji nego pri 1PKS.

Iz dobijenih rezultata za lokaciju K2 i dalje se uočava uticaj otpornosti uzemljenja na broj sekcija u žutoj zoni, kao i na vrednosti struje 1PKS na lokaciji K2. Broj detektovanih sekcija u crvenoj zoni je sada manji u odnosu na kvar na lokaciji K1.

To je zbog toga što je kvar K2 bliži izvoru napajanja, u odnosu na kvar K1. Analogno važi i za 2PKSZ na lokaciji K2.

3.2. Dobijeni rezultati proračuna lokacije kvara pomoću impedantne metode

U ovom poglavlju, u tabelama 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 i 3.2.4 prikazani su rezultati proračuna lokacije kvara pomoću impedantne metode za različite vrednosti otpora otpornika za uzemljenje. U tabelama 3.2.2 i 3.2.4 Z_{min} i Z_{max} predstavljaju najmanju i najveću vrednost izračunate impedanse kvara (direktnog redosleda) dok je sa Z označena merena vrednost struje kvara.

Tabele 3.2.2 i 3.2.4 se razlikuju samo po vrednostima merene impedanse kvara što je posledica različitih lokacija mesta kvara (K1 i K2). Vrednost Z_{min} dobija se pri kratkom spoju na početku izvoda i njena vrednost je nula, jer je vrednost napona za tu lokaciju nula.

Za merenje impedanse direktnog redosleda pri 1PKS faze L1 koristi se relacija (3.2.1), a za merenje impedanse direktnog redosleda pri 2PKSZ faza L1 i L2 formula (3.2.2):

$$Z = \frac{U_{L1}}{I_{L1} + 3kI_{L1}}, \quad (3.2.1)$$

$$Z = \frac{U_{L1} - U_{L2}}{I_{L1} - I_{L2}}, \quad (3.2.2)$$

gde su:

U_{L1}, U_{L2} – mereni naponi faza L1 i L2 za vreme kvara,
I_{L1}, I_{L2} – merene struje faza L1 i L2 za vreme kvara,
Z – merena impedansa kvara.

Tabela 3.2.1. – Broj detektovanih sekcija po zonama za lokaciju kvara K1 pomoću impedantne metode

R [Ω]	Broj sekcija u crvenoj zoni		Broj sekcija u žutoj zoni	
	1PKS	2PKSZ	1PKS	2PKSZ
0	3	3	5	6
20	3	3	5	6
40	3	3	3	6
70	3	3	3	6

Tabela 3.2.2. Promena impedanse kvara za lokaciju kvara K1 pomoću impedantne metode

R [Ω]		0	20	40	70
1PKS	Z _{min} [Ω]	0	0	0	0
	Z [Ω]	229.2	232.3	235.3	240
	Z _{max} [Ω]	420.5	433.5	446.5	466.1
2PKSZ	Z _{min} [Ω]	0	0	0	0
	Z [Ω]	229.2	229.2	229.2	229.2
	Z _{max} [Ω]	446.7	446.7	446.7	446.7

Tabela 3.2.3. Broj detektovanih sekcija po zonama za lokaciju kvara K2 impedantne metode

R [Ω]	Broj sekcija u crvenoj zoni		Broj sekcija u žutoj zoni	
	1PKS	2PKSZ	1PKS	2PKSZ
0	1	1	3	3
20	1	1	3	3
40	1	1	3	3
70	1	1	3	3

Tabela 3.2.4. Promena impedanse kvara za lokaciju kvara K2 pomoću impedantne metode

R [Ω]		0	20	40	70
1PKS	Z _{min} [Ω]	0	0	0	0
	Z [Ω]	154.1	154.6	155.2	156
	Z _{max} [Ω]	420.5	433.5	446.5	466.1
2PKSZ	Z _{min} [Ω]	0	0	0	0
	Z [Ω]	154.1	154.1	154.1	154.1
	Z _{max} [Ω]	446.7	446.7	446.7	446.7

Iz tabela 3.2.2 i 3.2.4 se vidi da se pri 1PKS i povećanju impedanse za uzemljenje javlja blago povećanje merene impedanse. Zanimljivo je što se broj sekcija u žutoj zoni smanjuje. U imeniocu relacije (3.2.1) figuriše član $3kI_{L1}$, koji upravo predstavlja merenu nultu komponentu struje 1PKS. Koeficijent k je takozvani koeficijent zemljospoja, koji treba da uzme u obzir koji procenat nulte komponente struje, sa mesta kvara, protiče kroz merne instrumente na sekundaru napojnog transformatora. U razmatranom slučaju, ta "kompenzacija" nulte komponente pomoću koeficijenta zemljospoja nije baš idealna i zato se pojavila promena merene impedanse direktnog redosleda. Broj sekcija u žutoj zoni detektovanih pomoću impedantne metode je višestruko manji u odnosu na broj sekcija u žutoj zoni detektovanih pomoću strujne metode za isto mesto kvara.

Pošto je mesto kvara K2 na samom početku izvoda, detekcija sekcija po zonama je daleko efikasnija u odnosu na kvar K1. To se vidi po broju detektovanih sekcija i u crvenoj i u žutoj zoni koji je sada manji. Može se još primetiti da mnogo veći uticaj na dobijene rezultate ima mesto kvara u odnosu na način uzemljenja mreže.

4. ZAKLJUČAK

Iz priloženih rezultata može se zaključiti da postojanje otpornika za uzemljenje izaziva smanjenje vrednosti struja kvara, ali može proizvesti i značajno povećanje broja detektovanih sekcija (pri korišćenju strujne metode) u okviru žute zone. Ovaj efekat je najizraženiji pri jednopolnim kratkim spojevima koji su relativno udaljeni od izvora napajanja distributivne mreže.

Takođe, zaključeno je da vrednost otpornika za uzemljenje ne utiče na broj detektovanih sekcija u okviru crvene zone. Dominantni efekti koji utiču na broj sekcija u crvenoj zoni su mesto kvara i tačnost merenja struje.

Iako impedantna metoda koristi ekvivalentnu impedansu kvara direktnog redosleda, postoji uticaj uzemljenja mreže na vrednost merene impedanse i broj detektovanih sekcija u okviru žute zone. Za razliku od strujne, kod impedantne metode ovaj efekat postoji samo pri 1PKS koji su udaljeni od izvora napajanja. Štaviše, pri povećanju vrednosti otpornosti otpornika za uzemljenje smanjuje se broj detektovanih sekcija u okviru žute zone. Na broj detektovanih sekcija koje pripadaju crvenoj zoni najviše utiče mesto kvara, dok vrednost otpornika za uzemljenje nema nikakav uticaj.

Poređenjem rezultata dobijenih pomoću impedantne i strujne metode, potvrđena je veća preciznost impedantne metode u svim razmatranim slučajevima.

5. LITERATURA

- [1] Dragan Popović, Duško Bekut, Valentina Dabić: *Specijalizovani DMS algoritmi*, DMS Group, Novi Sad, 2011.
- [2] M. M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski: *Fault Location on Power Networks*, Springer, London, 2010.

Kratka biografija:

Ivan Stanojević rođen je u Valjevu 1993. godine. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranio je 2018. godine.

Savo Đukić rođen je u Novom Sadu 1983. godine. Doktorsku disertaciju odbranio je 2014. godine na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektroenergetski sistemi.