

**UVAŽAVANJE PETERSENOVE PRIGUŠNICE U RESTAURACIJI NAPAJANJA
VELIKOG PODRUČJA****CONSIDERATION OF PETERSEN COIL IN LARGE AREA RESTORATION**Nikola Nešković, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu predstavljen je problem restauracije napajanja velikog područja. Prikazana su opasna pogonska stanja mreže u slučaju kratkih spojeva. Dat je algoritam za skoro optimalnu restauraciju napajanja velikog područja koji uvažava ograničenje Petersenove prigušnice. Sprovedena je verifikacija ovog algoritma sa uvaženim ograničenjem Petersenove prigušnice na jednostavnoj test mreži sa različitim dužinama srednjenaponskih (SN) kablovskih izvoda.

Ključne reči: Restauracija napajanja, Kratki spojevi, Petersenova prigušnica

Abstract – This paper presents Large Area Restoration of Distribution Systems. A dangerous network condition is presented in case of short circuits. An algorithm for near optimal Large Area Restoration with respect of Petersen coil constraint is given. Verification of this algorithm was carried out with acknowledged Petersen coil constraint on the test network with different lengths of MV cable lines.

Keywords: Supply Restoration, Short Circuits, Petersen coil

1. UVOD

Nagli razvoj računarskih tehnologija je u velikoj meri uticao na razvoj elektroenergetskih sistema. Uz pomoć složenih softverskih alata, koji predstavljaju ključni deo „Smart Grid“ rešenja, distributivne mreže (DM) su znatno stabilnije, sigurnije i pouzdanije. Restauracija napajanja velikog područja predstavlja jednu od osnovnih funkcionalnosti takvih složenih softverskih alata, kako za planiranje tako i za optimalno upravljanje DM [1].

U DM većina kvarova su posledica kratkih spojeva [2]. Zbog toga su tehnologije procesiranja kvarova u DM od velikog značaja za poboljšanje pouzdanosti. Jedna od tehnologija procesiranja kvarova je i restauracija napajanja velikog područja [3].

Restauracija napajanja velikog područja je funkcija koja se koristi za određivanje optimalnog plana kreiranja prekidačkih manipulacija koje dovode do restauracije napajanja delu mreže koji je ostao bez napajanja, bilo da je to usled neplaniranih ispada, bilo da se radi o planiranom održavanju mreže [2].

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor bio dr Goran Švenda, red. prof.

2. JEDNOPOLNI KRATAK SPOJ SA ZEMLJOM

U ovoj glavi dati su neki osnovni statistički podaci vezani za jednopolni kratak spoj u mreži. Nabrojane su prilike koje se javljaju u mreži tokom tih kratkih spojeva.

2.1. Prilike u mreži za vreme zemljospoja

Kvarovi u DM su pojave koje se događaju i teško se mogu svesti na relativno zanemarljiv broj. Oni su uzrokovani električnim i mehaničkim uzrocima. Na mehaničke uzroke kvarova je vrlo teško i skupo uticati, dok se na električne uzroke mora uticati zbog potencijalno velikih šteta i opasnosti za ljude i materijalna dobra.

Statistički podaci pokazuju da se u mešovitim DM najčešće pojavljuju jednopolni dozemni kratki spojevi [3]. Znatno uticaj na iznose napona i struja u poremećenom stanju ima tretman neutralne tačke, odnosno uzemljenje neutralne tačke elektroenergetske mreže. U zavisnosti od tretmana zvezdišta, dozemni kvar predstavlja zemljospoj ili jednopolni kratak spoj. Jednopolni kratak spoj sa zemljom ima značenje kratkog spoja samo onda ako je zvezdište DM direktno uzemljeno. U tom slučaju iznos veličine struje kratkog spoja reda je veličine iznosa struje trolnog kratkog spoja. Jednopolni kratak spoj u mreži sa izolovanim zvezdištem naziva se zemljospoj. Struje zemljospoja su kapacitivne i teku kroz dozemne kapacitete.

Nezavisno od načina tretmana neutralne tačke SN DM, jednopolni dozemni spoj u mreži karakterišu sledeće pojave [3]:

- [1] Pad napona u fazi koja je zahvaćena zemljospojem i pojava nesimetrije napona u sistemu.
- [2] Pojava napona u zvezdištu, odnosno u neutralnoj tački mreže, čiji iznos zavisi od vrednosti prelaznog otpora na mestu kvara.
- [3] Novi tok kapacitivnih struja kvara u mreži koje teku od zdravih vodova prema mestu kvara, nezavisno od načina uzemljenja neutralne tačke.
- [4] Kapacitivne struje na zdravim vodovima imaju suprotan smer u odnosu na kapacitivnu struju voda koji je u zemljospoj.
- [5] Pojava nulte komponente struje kao posledica nesimetrije struja, odnosno kvara u mreži, bez obzira da li se radi samo o kapacitivnoj struji u izolovanim mrežama ili i aktivnoj komponenti struje kroz otpornik u slučaju mreže uzemljene preko niskoomskog otpornika.

3. NAČINI UZEMLJENJA ZVEZDIŠTA TRANSFORMATORA DISTRIBUTIVNIH MREŽA

Na kvalitet snabdevanja električnom energijom značajno utiče formirana struktura mreže, odnosno dužina i tip mreže (kablovska, nadzemna ili mešovita mreža), gustina i priroda opterećenja kao i način uzemljenja zvezdišta [3].

Način uzemljenja neutralne tačke utiče na pogonske uslove mreže, stalnost napajanja, sigurnost ljudi, vrstu i cenu ugrađene opreme, zaštite i automatike. Ne postoji jedinstveni koncept uzemljenja zvezdišta SN mreža, jer postoje mnogi faktori koji utiču na izbor koji se ne mogu istovremeno zadovoljiti. Prilikom izbora vrste uzemljenja zvezdišta, osim tehničkog, važan je i ekonomski pristup, s obzirom na to da se pojedina rešenja mogu značajno razlikovati.

Razlozi za uzemljenje zvezdišta [3]:

1. Prelazak na viši naponski nivo (niže dopuštene vrednosti kapacitivne struje kvara).
2. Porast struje jednopolnog kratkog spoja (opasni naponi dodira i koraka).
3. Kabliranje (veći iznos kapacitivne vrednosti struje kvara te se luk ne može sam ugasiti).
4. Širenje mreže (posledice kao i kod kabliranja).
5. Zahtev za većim kvalitetom snabdevanja električnom energijom.

Koncepti uzemljenja neutralne tačke biraju se prema konkretnim specifičnostima određene DM, kako bi se zadovoljili svi neophodni tehnički kriterijumi za normalan i bezbedan rad.

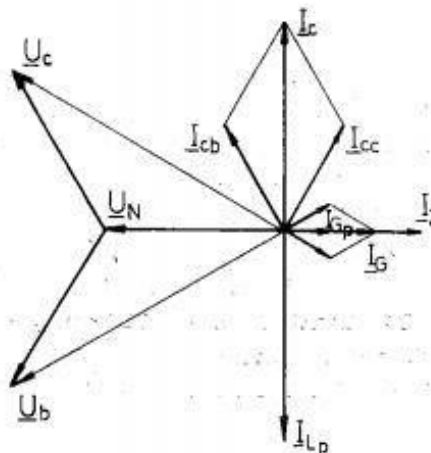
Sledeći koncepti koriste se za uzemljenje zvezdišta SN mreža u Evropi [3]:

1. Izolovano zvezdište.
2. Zvezdište uzemljeno preko male impedanse.
3. Rezonantno uzemljenje (uzemljenje preko Petersenove prigušnice).
4. Delimična kompenzacija (zvezdište uzemljeno pomoću niskoomskog otpornika i prigušnice).
5. Direktno uzemljeno zvezdište.
6. Transformatori za uzemljenje.

Mreža sa rezonantnim uzemljenjem zvezdišta energetskih transformatora spojena je sa zemljom preko induktivne reaktanse, u praksi poznate kao Petersenova prigušnica. Osnovni razlog za ugradnju automatskih kompenzacionih prigušnica za uzemljenje je povećanje kvaliteta snabdevanja električnom energijom sa stanovišta pouzdanosti napajanja. Pomenuta prigušnica smanjuje kapacitivnu komponentu struje zemljospoja jer kroz mesto kvara proizvodi induktivnu komponentu struje koja se superponira na kapacitivnu komponentu struje kvara i poništava je delimično ili u potpunosti, u zavisnosti od podešenja prigušnice.

Princip rada kompenzacione prigušnice je jednostavan. U slučaju zemljospoja jedne faze, ukupna kapacitivnost mreže prema zemlji i induktivnost prigušnice stvaraju jedan rezonantni krug čija je impedansa teoretski beskonačna. U ovakvoj situaciji reaktivna komponenta struje na mestu kvara, nezavisno od prelaznog otpora između faze i zemlje, se poništava, odnosno induktivna struja kompenzuje kapacitivnu struju zemljospoja.

Da bi se dobila jasnija slika o prilikama pri jednopolnom kratkom spoju u mrežama u kojima je ugrađena prigušnica za kompenzaciju kapacitivne komponente struje zemljospoja, na slici 1 prikazan je vektorski dijagram napona i struja. Ukupna kapacitivna struja mreže dobija se kao vektorska suma svih kapacitivnih struja zdravih faza. Ova struja prednjači naponu u zvezdištu za 90° . Za razliku od nje, induktivna komponenta struje kroz prigušnicu I_L kasni za pomenutim naponom za 90° , dok mu aktivna komponenta struje kroz prigušnicu I_Z stoji u opoziciji.



Slika 1. Vektorski dijagram napona i struja u rezonantno uzemljenoj mreži za vreme zemljospoja [3]

4. RESTAURACIJA NAPAJANJA VELIKOG PODRUČJA

Restauracija napajanja velikog područja je postupak koji prema određenom kriterijumu omogućava određivanje optimalnog plana prekidačkih akcija za obnavljanje napajanja delu mreže koji je ostao bez napajanja nakon izolacije kvara. Velika dimenzionalnost SN DM čini problem restaruracije napajanja znatno složenijim. Zbog toga se zadnjih decenija razvilo dosta funkcija koje imaju cilj da za što kraći vremenski period, uz minimalne troškove, što većem broju potrošača koji su ostali bez napajanja obnove napajanje.

Rezultat funkcija za restauraciju napajanja velikog područja je predlog svih varijanti alternativnog napajanja koje su rangirane u skladu sa korisnički specificiranim kriterijumom, koji zavise od osobina razmatrane DM kao i tipa problema koji se rešava restauracijom napajanja [4].

4.1 Problem optimizacije

Restauracija napajanja velikog područja pripada klasi mešovito-celobrojnih nelinearnih optimizacionih problema sa ograničenjima. Pored toga, u praktičnoj primeni ovaj problem je izuzetno velike dimenzionalnosti, što ga dodatno usložnjava. Naime, konfiguracija DM određena je statusom prekidača (otvoren/zatvoren) koji se modeluje binarnim (0/1) promenljivim. Sa druge strane, režim DM (tokovi snaga, gubici aktivne snage, itd.) modeluju se nelinearnim algebarskim jednačinama u kojima figurišu kontinualne promenljive (moduli i fazni stavovi fazora napona u čvorovima DM). Optimizacione metode koje se koriste za rešavanje navedenog problema mogu se podeliti na [2]:

1. Heurističke metode.
2. Meta-heurističke metode.
3. Matematički zasnovane metode.

Cilj heurističkih metoda jeste da znajući fiziku određenog problema u što kraćem roku dođe do kvalitetnih praktičnih, ali suboptimalnih rešenja. Ove metode su razvijene na bazi maksimalnog poznavanja karakteristika DM. Meta-heurističke metode su zasnovane na stohastičkom pretraživanju, analogiji sa prirodnim procesima kao i na modelima veštačke inteligencije. Matematički zasnovane metode, koje u potpunosti odgovaraju prirodi navedenog problema, pokazale su se nepraktičnim za primenu u realnim DM. Naime, usled velike dimenzionalnosti realnih DM, odgovarajući optimizacioni modeli za rešavanje problema restauracije napajanja velikog područja su veoma velikih dimenzija i za njihovo rešavanje su potrebni značajni računarski resursi.

4.2 Višekriterijumski algoritam za restauraciju

U [4] predložena je metoda za (skoro) optimalnu restauraciju napajanja velikog područja nakon velikih poremećaja. Metoda je osmišljena tako da obezbedi minimalan trošak usled prekida napajanja uzimajući u obzir strujna, naponska, sistemska i druga ograničenja.

Efikasna restauracija opterećenja postiže se korišćenjem SN sabirnice u VN/SN transformatorskim stanicama koje olakšavaju prenos opterećenja između transformatora i SN izvoda, uz istovremeno smanjenje broja uklopnih operacija. Optimalne varijante za snabdevanje potrošačkih čvorova koji su ostali bez napajanja generišu se na osnovu najkraćih puteva između delova mreže koji su ostali bez napajanja i dela mreže koji i dalje ima napajanje, što značajno skraćuje vreme potrebno za restauraciju. Globalni tok algoritma:

1. Određivanje dela mreže od interesa.
2. Selekcija rezervnih varijanti napajanja.
3. Rangiranje varijanti.

4.2.1 Određivanje dela mreže od interesa

Potrebno je odrediti elemente koji su zahvaćeni kvarom ili na kojima se vrši plansko održavanje, i te elemente upisati u listu elemenata kojima se ne sme vratiti napajanje. Nakon ovog koraka potrebno je u drugu listu elemenata upisati sve elemente koji ostaju bez napajanja, a nisu zahvaćeni kvarom, ili se na njima ne vrši plansko održavanje.

4.2.2 Selekcija rezervnih varijanti napajanja

Restauracija napajanja velikog područja koristi se za velike strukturalne poremećaje, kada je zahvaćen veliki broj potrošača (npr. kvar na VNvodu i/ili TS VN/SN). Kako je TS VN/SN prelaz između prenosnog i distributivnog dela mreže, područje operativnog delovanja ove funkcije je i prenos i distribucija. Topološka varijanta je varijanta koja posmatra samo električnu povezanost elemenata u mreži (kako prenosnoj, tako distributivnoj). Od svih elemenata iz listi koje su dobijene u prethodnom koraku vrši se topološka pretraga u svim pravcima do normalno otvorenih (NO) rasklopnih uređaja. Ako je jedan kraj NO uređaja pod napajanjem, a drugi ne, njegovim zatvaranjem dobija se rezervna varijanta napajanja. Ovako dobijena rezervna varijanta restauracije napajanja naziva se jednostavna varijanta, zato što se osim topoloških ne gledaju nikakva druga ograničenja. Simulacijom primene

svake jednostavne varijante dobija se režim i proveravaju se ograničenja (strujna, naponska, ograničenja relejne zaštite, ograničenje Petersenove prigušnice, itd.). Pored ovih jednostavnih postoje i složene varijante za restauraciju u kojima se odseca jedan deo potrošnje kako bi se zadovoljila ograničenja. Cepanje opterećenja podrazumeva restauraciju sa dva različita izvora.

4.2.3 Rangiranje varijanti

Pri rangiranju varijanti rezervnog napajanja razmatraju se sve jednostavne varijante i unapred korisnički definisan broj složenih varijanti. Rangiranje varijanti vrši se na osnovu jednog od korisnički specificiranih kriterijuma ili nekoj od njihovih kombinacija. Ti kriterijumi su [2]:

1. Iznos snaga nerestauriranog opterećenja.
2. Troškovi manipulacija.
3. Kritična rezerva snage napojnog transformatora.
4. Kritična strujna rezerva izvoda.
5. Kritičan pad napona.

Gore navedeni kriterijumi se pojavljuju kao sabirnici u integralnoj funkciji uz dodatak težinskih faktora kojima se definiše koji od kriterijuma je važniji za korisnika.

5. MODEL PETERSENOVE PRIGUŠNICE U RESTAURACIJI NAPAJANJA VELIKOG PODRUČJA

Vrednost reaktanse Petersenove prigušnice koja je potrebna da bi se kompenzovala ukupna kapacitivnost napojne mreže može se dobiti iz struje na mestu kvara. Struja nultog redosleda na mestu kvara je:

$$I_0 = I_{C0} + I_{L0} = j \left(\omega C_0 - \frac{1}{3\omega L} \right) V_0. \quad (1)$$

Kako je ideja korišćenja Petersenove prigušnice da se kompenzuje kapacitivna komponenta struje kvara, idealna kompenzacija bila bi opisana relacijom $I_{C0} + I_{L0} = 0$. Sa druge strane u slučaju da nemamo idealnu kompenzaciju, ukupna kompenzacija se može se opisati sa koeficijentom kompenzacije α tako da bi relacija 1 glasila:

$$\omega C_0 - \frac{1}{3\omega L} = (1 - \alpha) \omega C_0. \quad (2)$$

Odnosno minimalna i maksimalna vrednost koeficijenta kompenzacije može se iskazati u terminima reaktanse Petersenove prigušnice i ukupne otočne reaktanse mreže.

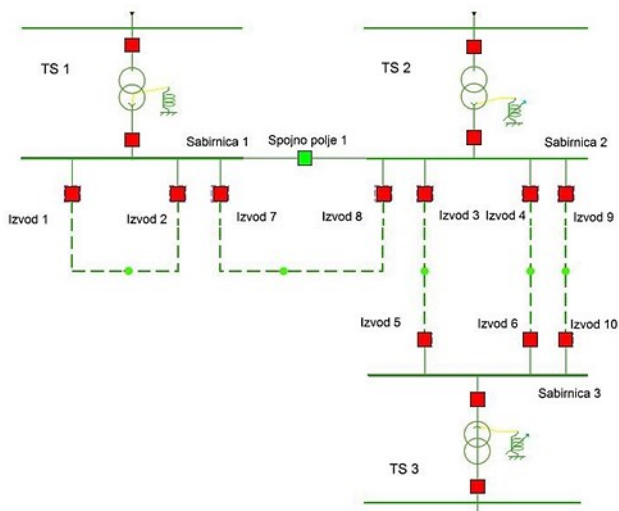
$$\alpha_{min} X_L \leq \frac{X_{C0}}{3} \leq \alpha_{max} X_L. \quad (3)$$

Menjanje topološke strukture mreže prilikom restauracije mora da zadovolji jednačinu 3 kako se ne bi desilo da prilikom primenjene varijante za restauraciju ukupna reaktansa mreže X_{C0} prekorači gornje ograničenje.

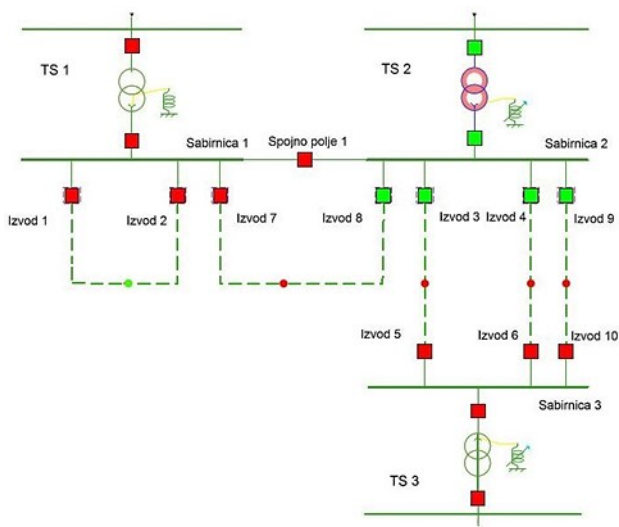
6. NUMERIČKA VERIFIKACIJA MODELA

U okviru ove glave prikazan je primer restauracije napajanja velikog područja gde se kvar desio u TS 2, sve dužine SN izvoda jednake su i iznose 20 km. Svi transformatori na sekundarnoj strani imaju priključenu Petersenovu prigušnicu. Na slici 2 prikazana je osnovna topološka struktura mreže pre kvara. Crvenom bojom prikazani su zatvoreni, dok su zelenom bojom prikazani otvoreni rasklopnih uređaji.

Nakon što relejna zaštita detektuje kvar na TS 2 i otvori prekidač na VN strani transformatora, potrebno je otvoriti prekidač na SN strani kako bi se kvar izolovao. Tada izvod 8, 3, 4 i 9 ostaju bez napajanja i potrebno im je vratiti napajanje sa susjednih transformatorskih stanica. Nakon simulacije zatvaranja rastavljača snaga koji se nalaze između izvoda proverava se ukupno X_{C0} i ako tako dobijeno X_{C0} zadovoljava jednačinu 3 ta varijanta se prihvata, to se radi sve dok svi izvodi ne budu restaurisani. Konačna topološka struktura mreže nakon primenjenih manipulacija prikazana je na slici 3.



Slika 2. Inicijalna topološka struktura mreže



Slika 3. Konačna topološka struktura mreže

Na slici 3 se jasno vidi da su svi SN izvodi restaurisani preko izvoda iz susjednih stanica, kao i da je SN sabirnica restaurisana zatvaranjem prekidača u spojnem polju. Rezultati proračuna kao i vrednost X_{C0} prikazani su i tabelarno u tabeli 1.

Prva kolona tabele predstavlja redni broj izvoda koji se restauriše. Ti izvodi su sortirani prema prioritetu izvoda. Prioritet izvoda definisan je korisničkim kriterijumima (broj potrošača, broj daljinski kontrolisanih prekidačkih uređaja, itd.). U drugoj koloni označen je izvod koji je ostao bez napajanja i kome se treba vratiti napajanje. Treća kolona predstavlja izvod preko koga se restauriše izvod iz prethodne kolone. U četvrtoj koloni nalazi se

ukupna nulta vrednost reaktanse napojne mreže koja se izračunava nakon što se varijanta primeni. Četvrta kolona je indikator da li je varijanta zadovoljila kriterijum opisan relacijom 3 ili ne, odnosno da li će biti primenjena.

Tabela 1. Primer restauracije za dužinu izvoda 20 km

Redni br.	Za restauraciju	Restauriše se preko	$X_{C0}[\Omega]$	Varijanta prihvaćena
1	Izvod 9	Izvod 10	230.52	Da
2	Izvod 8	Izvod 7	208.01	Da
3	Izvod 4	Izvod 6	175.30	Da
4	Izvod 3	Izvod 5	149.38	Da
5	Sabirnica 2	Sabirnica 1	208.01	Da

U tabeli 2 prikazan je rezultat proračuna za dužinu SN izvoda 25 km. Tu je potrebno primetiti da izvodi 8 i 3 kao i sabirnica 2 ostaju bez napajanja jer ukoliko bi se zatvorili NO rasklopni uređaji doveli bi do narušavanja ograničenja Petersenove prigušnice.

Tabela 2. Primer restauracije za dužinu izvoda 25 km

Redni br.	Za restauraciju	Restauriše se preko	$X_{C0}[\Omega]$	Varijanta prihvaćena
1	Izvod 9	Izvod 10	138.31	Da
2	Izvod 4	Izvod 6	124.80	Da
3	Izvod 8	Izvod 7	105.18	Ne
4	Izvod 3	Izvod 5	89.63	Ne
5	Sabirnica 2	Sabirnica 1	103.49	Ne

7. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada prikazana je restauracija napajanja velikog područja nakon velikih sistemskih poremećaja. Kako ova funkcija menja topološku strukturu mreže, potrebno je uvažiti ograničenje Petersenove prigušnice prilikom kreiranja rezervnih varijanti za restauraciju, kako se primenom tih varijanti ne bi izgubilo pozitivno dejstvo koje bi prigušnica imala kada bi se desili novi kratki spojevi u mreži.

8. LITERATURA

- [1] N.Katić: *Menadžment sistemi u elektroenergetici - DMS*; skripta sa predavanja, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, novembar 2013.
- [2] D.Popović, D.Bekut, V.Treskanica: *Specijalizovani DMS algoritmi*; Prosveta, Novi Sad, 2011.
- [3] J.Nahman: *Uzemljenje neutralne tačke distributivnih transformatora*; Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [4] J.Nahman, G.Štrbac: *A new algorithm for service restoration in large-scale urban distribution systems*; EPSR, Vol. 29, 1994, str. 181-192.

Kratka biografija:



Nikola Nešković rođen je u Kragujevcu, Srbija, 1994. god. Osnovne studije završio je na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi 2017. god. i iste godine upisao master studije.