

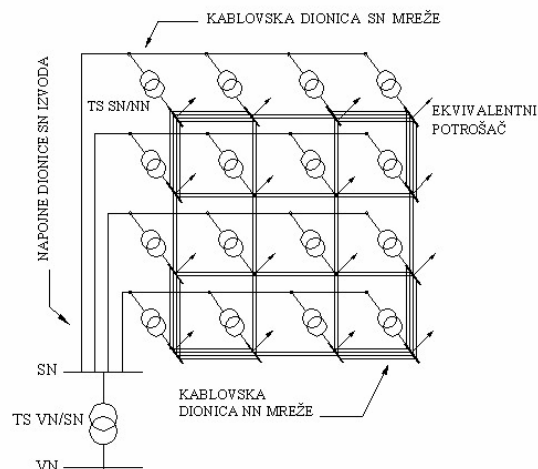
UTICAJ VELIČINE SP NN MREŽE NA STRUJE KRATKIH SPOJEVA

J. Radović, Elektrotehnički fakultet-Podgorica
M.Vujčić, Elektroprivreda Crne Gore

1. UVOD

Složenopetljaste niskonaponske distributivne mreže (SP NN mreže) našle su primjenu u gradskim distributivnim konzumima sa relativno velikom površinskom gustom potrošnje i povećanim zahtjevima potrošača za pouzdanim napajanjem električnom energijom.

Na slici 1 je prikazana šema idealizovane SP NN mreže. SP NN mreža se sastoji od međusobno isprepletenih i povezanih (učvorenih) kablova niskog napona (NN – 0.4 kV kablovi), koji se napajaju preko distributivnih transformatora (SN/NN – 10/0.4 kV/kV transformatori) i sredjenaponskih napojnih vodova (SN – 10 kV kablovi), naičešće, radijalne konfiguracije. Veliki broj učvorenih kablovskih dionica na niskom naponu obezbjeđuje da se potrošači napajaju sa više strana. Ova osobina je povoljna sa aspekta pouzdanosti napajanja potrošača električnom energijom, ali ovako veliki broj putanja kojima može da se napaja potrošač nije povoljan u slučaju nastanka kratkog spoja. Struje kratkog spoja mogu da poprime veoma velike vrijednosti i praktično ograniče primjenu SP NN mreža u konfiguracijama koje su optimalne sa aspekta pouzdanosti napajanja i kvaliteta naponskih prilika.



Slika 1. Distributivna mreža sa SP konfiguracijom na NN-u

Kod definisanja parametara SP NN mreža treba poći od površinske gustom potrošnje električne energije. Na osnovu ovog podatka se definiše niskonaponski dio mreže tj. definišu se presjeci NN kablova i snaga transformatora SN/NN. Sljedeći bitan podatak je površina sa pomenutom površinskom gustom

potrošnje. Ova dva podataka određuju ukupnu snagu na nivou SP NN mreže. Ova snaga je mjerodavna za definisanje SN napojnih vodova kao i transformatora VN/SN koji napaja čitavu SP NN mrežu.

2. MATEMATIČKI MODELI ZA PRORAČUN REŽIMA SP NN MREŽA

Kod analize stacionarnih režima SP NN mreže koristiće se matematički model baziran na metodi napona čvorova. Ovaj model čini sistem sljedećih matričnih jednačina:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_n &= \mathbf{V}_0 + \mathbf{Z}_n [\mathbf{J}_n + \mathbf{A}(\mathbf{J}_b - \mathbf{Y}_b \mathbf{E}_b)], \\ \mathbf{U}_b &= \mathbf{A}^t (\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_0), \\ \mathbf{I}_b &= \mathbf{Y}_b (\mathbf{U}_b - \mathbf{E}_b). \end{aligned} \quad (1)$$

gdje su:

N-broj nezavisnih čvorova

b-broj grana

\mathbf{V}_n (Nx1)– matrica napona nezavisnih čvorova

\mathbf{U}_b (bx1)- matrica napona grana

\mathbf{I}_b (bx1)- matrica struja u granama

\mathbf{V}_0 (Nx1)-matrica čiji su svi elementi jednaki naponu referentnog čvora

\mathbf{Z}_n (NxN)-matrica impedansi nezavisnih čvorova , koja se dobija inverzijom matrice admitansi nezavisnih čvorova \mathbf{Y}_n (NxN), $\mathbf{Y}_n = \mathbf{A} \mathbf{Y}_b \mathbf{A}^t$

\mathbf{J}_b (bx1)-matrica struja strujnih generatora

\mathbf{J}_n (Nx1)-matrica injektiranih struja u čvorovima

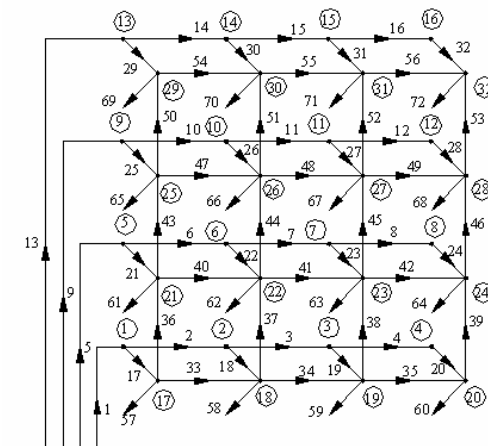
\mathbf{E}_b (bx1)-matrica napona naponskih izvora

\mathbf{Z}_b (bxb)-matrica impedansi kola.

U slučaju modelovanja izvora napajanja idealnim naponskim generatorima sa ems-lom jednakom naponu na sabirnicama SN napojne TS VN/SN i modelovanjem potrošnje sa $\underline{Z}_p = ct.$, jednačine (1) poprimaju oblik:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_n &= -\mathbf{Z}_n \mathbf{A} \mathbf{Y}_b \mathbf{E}_b, \\ \mathbf{U}_b &= \mathbf{A}^t \mathbf{V}_n, \\ \mathbf{I}_b &= \mathbf{Y}_b (\mathbf{U}_b - \mathbf{E}_b). \end{aligned} \quad (2)$$

Na slici 2 je prikazan oblik grafa zamjenske šeme za SP NN mrežu i koristiće se za analizu stacionarnih režima.



Slika 2. Graf zamjenske šeme SP NN mreže

U slučaju trolnog kratkog spoja dovoljno je posmatrati samo jednu fazu sistema pozitivnog redosljeda. U mjestu kvara, struja trolnog kratkog spoja, određena je relacijom [L.4]

$$I_m = \frac{E}{Z_{mm}} \quad (3)$$

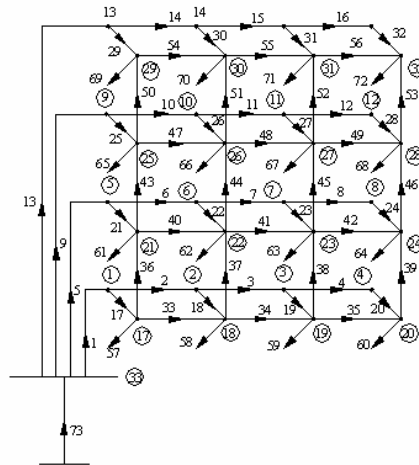
gdje je:

I_m -struja troleznog kratkog spoja u čvoru m

E -napon u čvoru m neposredno prije nastanka kratkog spoja

Z_{mm} -impedansa kratkog spoja u čvoru m

Slika 3 prikazuje oblik grafa zamjenske šeme direktnog redoslijeda koji će se koristiti u proračunu troleznog kratkog spoja.



Slika 3. Graf zamjenske šeme mreže direktnog redoslijeda

3. ANALIZA VRIJEDNOSTI STRUJA TROPOLNOG KRATKOG SPOJA U SP NN MREŽAMA

3.1. Vrijednosti struja KS u SP NN mrežama

Na slici 4 su prikazane vrijednosti struja troleznog kratkog spoja simulirane u čvorovima mreže sa slike 3. Površina SP NN mreže je 1 km^2 , a površinska gustina opterećenja 11.28 km^2 . Najveća vrijednost struje troleznog kratkog spoja na SN-u je u čvoru 1 i iznosi 9.8 kA . Na NN-u dostiže se maksimalna vrijednost od 44.6 kA u čvoru 22.

Prema [L.7] u SP NN mrežama maksimalna dozvoljena gustina opterećenja je oko 12 MVA/km^2 . Kriterijumi koji se ovdje postavljaju je dozvoljena udarna struja kratkog spoja na NN-u koja iznosi 100 kA za stanice odnosno 65 kA za razvodne ormare, zatim snaga transformatora $10/0.4 \text{ kV}$ od 630 kVA . Prema [L.5] i [L.6] na SN-u je dozvoljena snaga kratkog spoja od 250 MVA odnosno struja od 13.1 kA , a na NN-u je dozvoljena struja kratkog spoja od 46 kA .

3.2. Uticaj dimenzija SP NN mreže na vrijednost struja troleznog kratkog spoja

Radi određivanja uticaja veličine površine konzuma na vrijednosti struja u režimima troleznog kratkog spoja, razmatrane su SP NN mreže koje napajaju konzume različitih površina, konkretno: Varijanta 1A - 0.5625 km^2 , Varijanta 1B - 1 km^2 , Varijanta 1C - 2.25 km^2 i Varijanta 1D - 4 km^2 . Površinska gustina opterećenja u svim varijantama je ista i iznosi 11.28 kW/km^2 .

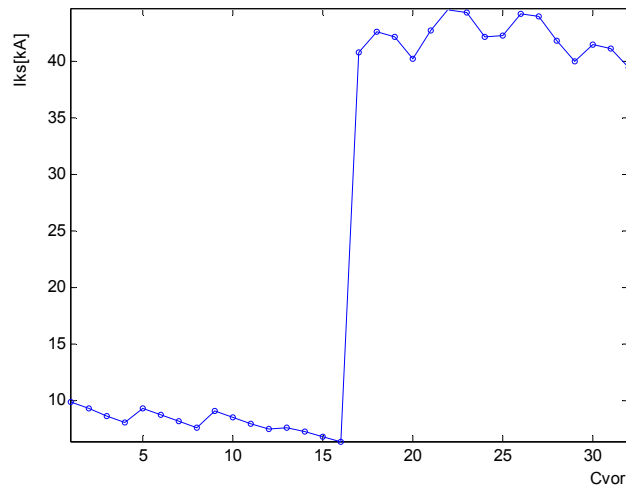
U svim varijantama kablovi NN dionica, kao i distributivni transformatori SN/NN su istih karakteristika: $Z_{NN} = (0.122 + j0.079) \Omega/\text{km}$, fazi, $10/0.4 \text{ kV}$, snage 1000 kVA , $u_k = 6\%$, $Z_{TR 0.4 \text{ kV}} = (0.00216 + j0.00935) \Omega/\text{fazi}$. SN kablovi i napojni TS VN/SN su odabrani u skladu sa ukupnom snagom konzuma i najkritičnijim posthvarijskim režimom.

Parametri napojnog transformatora VN/SN i SN kablova u pojedinim varijantama su:

Varijanta 1A i 1B: 110/10 kV, 20 MVA, $u_k=12\%$, $Z_{TR10kV}=j06 \Omega/\text{fazi}$, $Z_{SN}=(0.202+j0.099) \Omega/\text{km,fazi}$;

Varijanta 1C: 110/10 kV, 40 MVA, $u_k=11\%$, $Z_{TR10kV}=j0.275 \Omega/\text{fazi}$, $Z_{SN}=(0.075+j0.093) \Omega/\text{km,fazi}$;

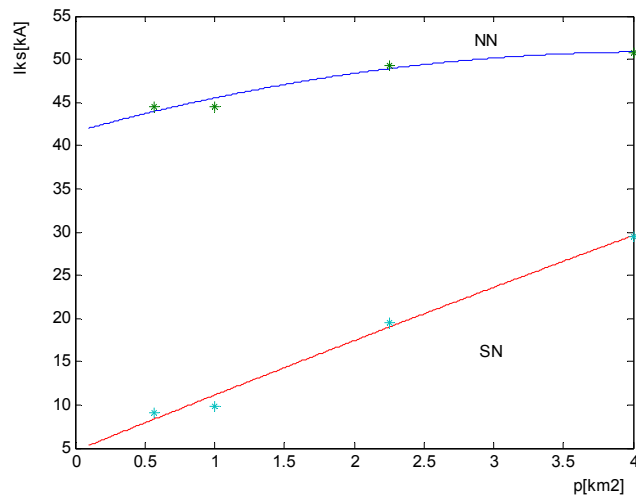
Varijanta 1D: 110/10 kV, 63 MVA, $u_k=11\%$, $Z_{TR10kV}=j0.175 \Omega/\text{fazi}$.



Slika 4. Struje trolnog kratkog spoja simulirane u čvorovima SP NN mreže površine 1 km^2 , pri površinskoj gustini opterećenja od $11,28 \text{ MW}/\text{km}^2$

Na slici 5 su prikazane najveće vrijednosti struja trolnog kratkog spoja u razmatranim varijantama SP NN mreže.

Vidi se da je sa povećanjem površine konzuma SP NN mreže povećanje struja kratkog spoja intenzivnije na SN nivou i kreće se od 9.1 kA za mrežu površine 0.5625 km^2 do 29.5 kA u mreži površine 4 km^2 . Na NN nivou su maksimalne struje trolnog kratkog spoja znatno veće i kreću se u rasponu od 44.5 kA za površine 0.5625 km^2 do 50.8 kA za površine od 4 km^2 .



Slika 5. Promjena struje trolnog kratkog spoja u SP NN mrežama sa povećanjem površine konzuma, pri konstantnoj površinskoj gustini opterećenja

Grafičnim vrijednostima struje kratkog spoja na SN-u od 13.1 kA odgovara površina od 1.3 km^2 , a na NN-u od 46 kA odgovara površina od od 1.5 km^2 (dijagrami na slici 5). Posmatrajmo povećanje struje kratkog spoja sa promjenom površine SP NN mreže od 0.5625 km^2 do vrijednosti koje odgovaraju grafičnim vrijednostima struja kratkog spoja na SN-u i NN-u.

Na SN nivou, pri povećanju površine konzuma koji napaja SP NN mreža od 0.5625 km² do 1.3 km² struja trolnog kratkog spoja se povećava za 44 %. Na NN nivou, pri povećanju površine konzuma koji napaja SP NN mreža od 0.5625 km² do 1.5 km² struja trolnog kratkog spoja se povećava za 4.5 %.

3.3. Uticaj površinske gustine opterećenja na vrijednost struja trolnog kratkog spoja

Radi određivanja uticaja veličine površinske gustine potrošnje na vrijednosti struja u režimima trolnog kratkog spoja, razmatrane su SP NN mreže površine konzuma 1 km² i različitih površinskih gustina opterećenja, konkretno: Varijanta 2A - 4750 kW/km², Varijanta 2B - 9500 kW/km², Varijanta 2C - 14250 kW/km², i Varijanta 2D - 19000 kW/km². U svim varijantama, elementi zadovoljavaju uslove opterećenja u stacionarnim režimima, a njihove karakteristike su:

Varijanta 2A: TR110/10 kV, 10 MVA, $u_k=10\%$, $Z_{TR\ 10\ kV}=j1\ \Omega/\text{fazi}$; SN kabal $Z_{SN}=(0.641+j0.115)\ \Omega/\text{km,fazi}$; TR10/0.4 kV, 630 kVA, $u_k=6\%$, $Z_{TR\ 0.4\ kV}=(0.0026+j0.01)\ \Omega/\text{fazi}$; NN kabal $Z_{NN}=(0.443+j0.082)\ \Omega/\text{km,fazi}$;

Varijanta 2B: TR110/10 kV, 20 MVA, $u_k=12\%$, $Z_{TR\ 10\ kV}=j0.6\ \Omega/\text{fazi}$; SN kabal $Z_{SN}=(0.202+j0.099)\ \Omega/\text{km,fazi}$; TR10/0.4 kV, 1000 kVA, $u_k=6\%$, $Z_{TR\ 0.4\ kV}=(0.00216+j0.0093)\ \Omega/\text{fazi}$; NN kabal $Z_{NN}=(0.075+j0.079)\ \Omega/\text{km,fazi}$;

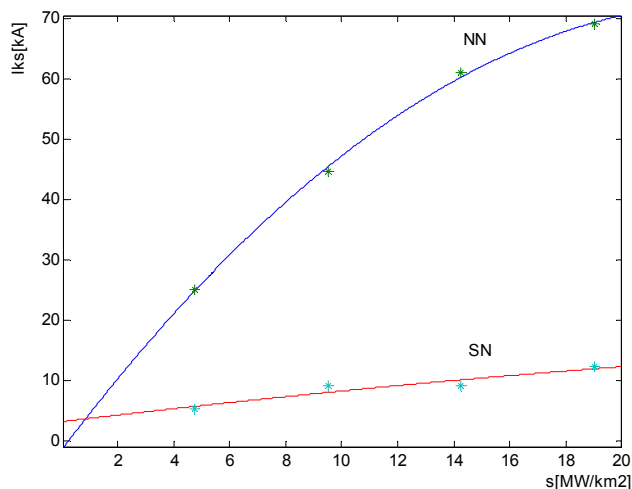
Varijanta 2C: TR110/10 kV, 20 MVA, $u_k=12\%$, $Z_{TR\ 10\ kV}=j0.6\ \Omega/\text{fazi}$; SN kabal $Z_{SN}=(0.1+j0.091)\ \Omega/\text{km,fazi}$; TR10/0.4 kV, 1600 kVA, $u_k=6\%$, $Z_{TR\ 0.4\ kV}=(0.001+j0.0058)\ \Omega/\text{fazi}$; NN kabal $Z_{NN}=(0.075+j0.079)\ \Omega/\text{km,fazi}$;

Varijanta 2D: TR110/10 kV, 31.5 MVA, $u_k=14\%$, $Z_{TR\ 10\ kV}=j0.44\ \Omega/\text{fazi}$; SN kabal $Z_{SN}=(0.06+j0.091)\ \Omega/\text{km,fazi}$; TR10/0.4 kV, 1600 kVA, $u_k=6\%$, $Z_{TR\ 0.4\ kV}=(0.001+j0.0058)\ \Omega/\text{fazi}$; NN kabal $Z_{NN}=(0.06+j0.072)\ \Omega/\text{km,fazi}$.

Na slici 6 su prikazane vrijednosti najvećih struja trolnog kratkog spoja u razmatranim varijantama SP NN mreža različitih površinskih gustina opterećenja.

Pri porastu površinske gustine opterećenja, porast struja kratkog spoja je intenzivniji na NN nivou, gdje struja trolnog kratkog spoja za mrežu sa površinskom gustinom opterećenja 4750 kW/km² iznosi 25 kA, a za mrežu sa površinskom gustinom opterećenja od 19000 kW/km² iznosi 69 kA. Na SN nivou se struje kreću u rasponu od 5.5 kA za površinsku gustinu opterećenja od 4750 kW/km² do 12.4 kA kod SP NN mreže sa površinskom gustinom opterećenja od 19000 kW/km².

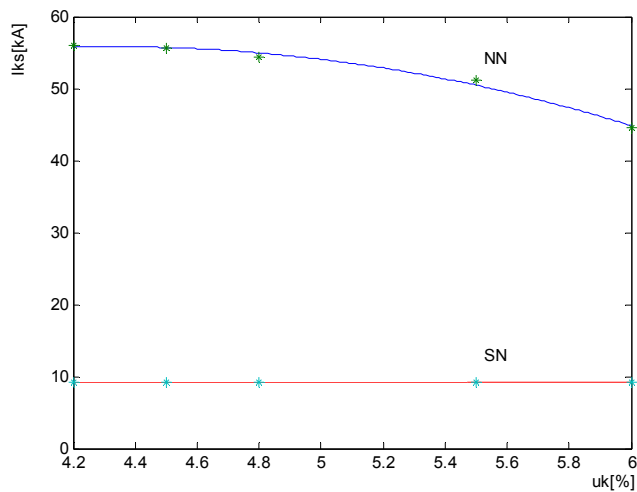
Na SN nivou, pri povećanju površinske gustine opterećenja konzuma koji napaja SP NN mreža od 4750 kW/km² do 21000 kW/km² (odgovara graničnoj struji na SN-u) struja trolnog kratkog spoja se poveća 2.4 puta. Na NN nivou, pri povećanju površinske gustine opterećenja konzuma koji napaja SP NN mreža od 4750 kW/km² do 9000 kW/km² (koja odgovara graničnoj struji od 46 kA) struja trolnog kratkog spoja se povećava za 84 %.



Slika 6. Promjena struje trolnog kratkog spoja u SP NN mrežama sa povećanjem površinske gustine opterećenja, pri površini konzuma 1 km²

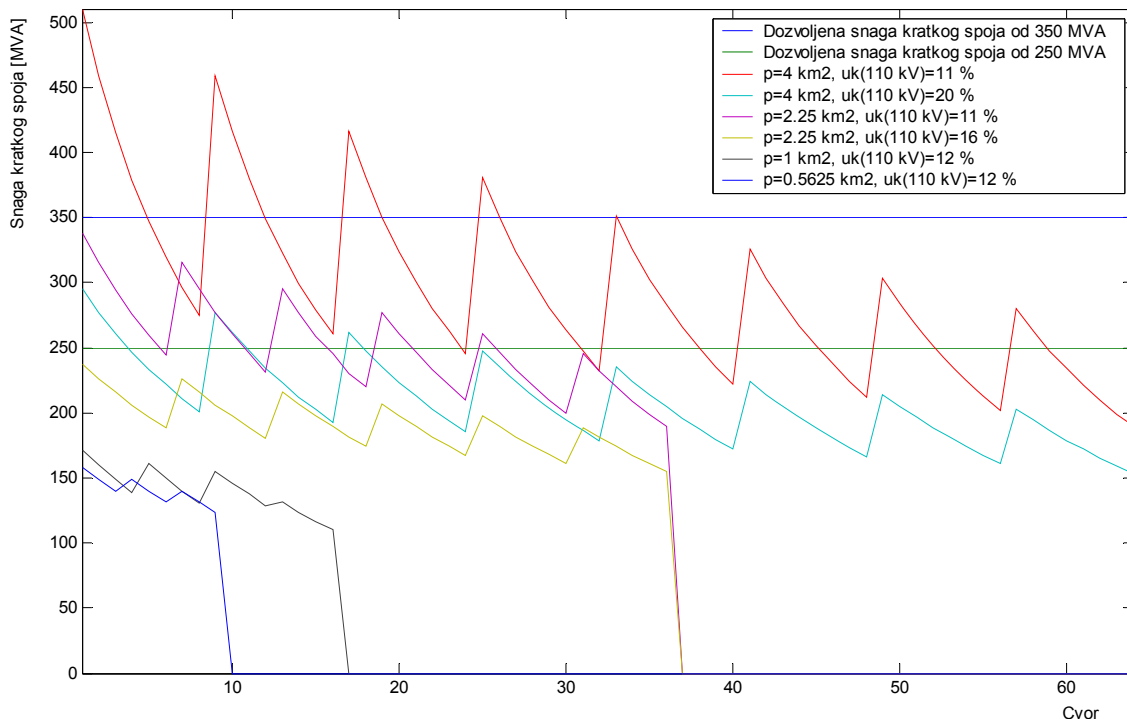
3.4. Uticaj vrijednosti napona kratkog spoja transformatora na vrijednost struja troleznog kratkog spoja

Radi određivanja uticaja vrijednosti napona kratkog spoja distributivnih transformatora na vrijednost struja troleznog kratkog spoja, razmatrane su varijante SP NN mreža sa distributivnim transformatorima vrijednosti relativnog napona kratkog spoja: 6, 5.5, 4.8, 4.5 i 4.2 %. U svim varijantama SP NN mreža napaja konzum površine 1 km² sa površinskom gustinom opterećenja od 9,5 MW/km² i elementima odabranim po kriterijuma obezbjeđenja normalnog funkcionisanja i u najkritičnijem posthavarijskom režimu.



Slika 7. Struje troleznog kratkog spoja u zavisnosti od napona kratkog spoja transformatora 10/0,4 kV

Napon kratkog spoja distributivnih transformatora utiče na struje troleznog kratkog spoja na NN nivou. Pri povećanju napona kratkog spoja sa 4.2 % na 6%, vrijednost struje troleznog kratkog spoja se smanjuje sa 55 kA na 44.5 kA (slika 7).



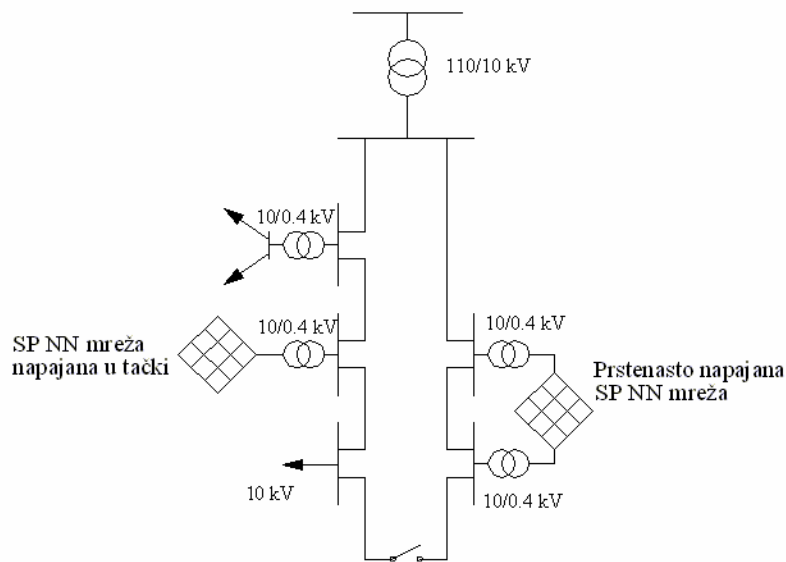
Slika 8. Snage kratkog spoja na 10 kV-nom naponskom nivou

Promjena napona kratkog spoja napojnog transformatora 110/10 kV ima značajan uticaj na promjenu struja kratkog spoja na SN nivou dok je taj uticaj na struje kratkog spoja na NN nivou neznatan.

Za SP NN mrežu koja napaja konzum površine 2.25 km², pri površinskoj gustini opterećenja od 11.28 kW/km², u slučaju primjene napojnog transformatora snage 40 MVA i $u_k=11\%$ najveća vrijednost struje troleznog kratkog spoja na NN nivou je 49.2 kA, a najveća vrijednost struje troleznog kratkog spoja na SN nivou je 19.5 kA. U slučaju primjene napojnog transformatora snage 40 MVA i $u_k=16\%$ najveća vrijednost struje troleznog kratkog spoja na NN nivou je 47.5 kA, a najveća vrijednost struje troleznog kratkog spoja na SN nivou je 13.7 kA.

Na slici 8 su prikazane vrijednosti snaga troleznog kratkog spoja na SN za slučajeve transformatora 110/10 kV različite snage i napona kratkog spoja.

Kada sa porastom površinske gustine opterećenja struja kratkih spojeva u SP NN mrežama dostignu granične vrijednosti neophodno je pristupiti njihovoj rekonfiguraciji, npr. prelaskom na konfiguracije prikazane na slici 9. Prelaskom na ove konfiguracije, praktično se gube osnovne povoljnosti SP NN konfiguracije.



Slika 9. Varijante napajanja SP NN mreža

4. ZAKLJUČAK

Distributivne mreže sa SP NN konfiguracijom obezbjeđuju veoma visok nivo pouzdanosti napajanja, praktično neprekidno napajanje u slučaju ispada na SN nivou i ispada distributivnih transformatora, povoljne naponske prilike, minimalne gubitke električne energije, povoljnosti pri uključenju jačih potrošača električne energije, kao i veće vrijednosti iskorišćenja elemenata u odnosu npr. na prstenasto napajane radijalne NN mreže.

Osnovni nedostatak SP NN mreža su velike vrijednosti struja kratkih spojeva. Često su one ograničavajući faktor primjene ovih konfiguracija i pri površinskim gustinama opterećenja koje su optimalne s ekonomskog stanovišta.

U radu su na osnovu razvijenih modela i programa analizirane vrijednosti struja troleznog kratkog spoja za SP NN mreže različitih dimenzija, pri različitim površinskim gustinama opterećenja i pri primjeni transformatora različitih karakteristika.

Računajući sa snagom kratkog spoja na 10 kV naponskom nivou od 250 MVA, granična vrijednost struje kratkog spoja postiže se već kod površinske gustine opterećenja od 21.2 kW/km² (kod mreže površine 1 km²), ako je napojni transformator snage 31.5 MVA sa relativnim naponom kratkog spoja 14 %. Ako se SP

NN mreža napaja preko napojnog transformatora snage 31.5 MVA relativnog napona kratkog spoja od 16%, granična površinska gustina opterećenja je 24.4 kW/km^2 . U slučaju konstantne površinske gustine potrošnje od 11.28 kW/km^2 u mrežama površina 0.5625 km^2 , 1 km^2 , 2.25 km^2 (sa napojnim transformatorom snage 40 MVA i napona kratkog spoja od 16 %) struje kratkog spoja na SN-u ne prelaze granične vrijednosti. Za snage komutacijskih uređaja od 350 MVA, granična vrijednost struje kratkog spoja se postiže u mreži površinske gustine opterećenja od 11.28 kW/km^2 i površine 4 km^2 , pri upotrebi napojnog transformatora 63 MVA sa naponom kratkog spoja od 11 %. Visoke vrijednosti struja kratkih spojeva u SP NN mrežama često nameću neophodnost njihove transfiguracije u oblike jednostrukog napajanja ili napajanja u tački (slika 9). Prelazkom na ove konfiguracije gube se osnovne pozitivnosti SP NN konfiguracija.

LITERATURA

1. William H. Kersting, 2002, Distribution System Modeling and Analysis, CRC Press LLC.
2. E.Lakervi and E.J.Holmes, 1995, Electricity distribution network design, Peter Peregrinus Ltd.
3. S.Despotović, 1962, Osnovi analize elektroenergetskih sistema, Zajednica Jugoslovenske elektroprivrede.
4. S.Despotović, 1965, Matematički modeli u analizi elektroenergetskih sistema, Zajednica Jugoslovenske elektroprivrede.
5. California Energy Commission, 2006, California Electric Rule 21, Interconnection of Distributed Resources on Secondary Network Distribution Systems.
6. An EPRI White Paper, 2005, Interconnection of Distributed Energy Resources in Secondary Distribution Network Systems.
7. G. Kretschmann, P. Panzlaff, J. Stenzel, P. Tatsopoulos, Ermittlung und Begrenzung von Kurzschlußströmen in Niederspannungsmaschennetzen, EW, H.11, 1979.

Ključne riječi: SP NN mreža(složenopetljasta niskonaponska mreža), kratak spoj, površinska gustina opterećenja

