

C6 08

PRORAČUN STRUJE METALNOG TROFAZNOG KRATKOG SPOJA NA SN-IZVODU SA PRIKLJUČENIM INDUKCIONIM I SINHRONIM GENERATORIMA -PREDLOG MODELA-

VLADICA MIJAILOVIĆ, ALEKSANDAR RANKOVIĆ
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
ČAČAK
SRBIJA

Kratak sadržaj - U radu je izložen postupak proračuna struje metalnog trofaznog kratkog spoja na proizvoljnom mestu na SN-izvodu na kome su priključeni indukcioni i sinhroni generatori. Pojedinačni odzivi distributivne mreže i pomenutih tipova distribuiranih generatora za slučaj kvara su poznati i oni se međusobno bitno razlikuju. Analiza kvarova u aktivnim distributivnim mrežama se, zbog složenosti postupka, obično sprovodi primenom komercijalno dostupnih programskih paketa. Korišćenjem pomenutih modela i teoreme superpozicije objašnjeno je kako se izračunavaju struje kvara u vremenskom domenu po svim elementima i deonicama izvoda, uz elementarnu upotrebu računara. Pokazano je da se, bez uticaja na tačnost, neki parametri elemenata sistema mogu zanemariti.

Ključne reči - Kratak spoj- Distribuirani izvori- Indukcioni generator- Sinhroni generator- Distributivna mreža- Superpozicija.

1 LISTA SIMBOLA

d_{XY} - rastojanje između tačke X i tačke Y ; t - vreme; α_0 - fazni ugao napona u trenutku nastanka kvara; $\omega_s = 2\pi \cdot f_n$ - sinhrona ugaona brzina obrtanja, $f_n = 50\text{Hz}$;

$i(t)$ - opšta oznaka za struju u vremenskom domenu;

U_{ns}, S_s'', T_{as} - parametri napojne mreže (naznačeni napon, subtranzijentna snaga kratkog spoja, vremenska konstanta prigušenja jednosmerne komponente struje kvara, respektivno);

R - aktivna otpornost, L - induktivnost;

indeksi n , IG i SG označavaju Napojnu mrežu, Indukcioni Generator i Sinhroni Generator, respektivno;

$$Z_n = \sqrt{(\omega \cdot L_n)^2 + R_n^2}, \quad \varphi_n = \arctg\left(\frac{\omega \cdot L_n}{R_n}\right), \quad T_n = \frac{L_n}{R_n};$$

$S_{n,IG}, U_{ns,IG}, r_s, r_r, x_{os}, x_{or}, x_m$ - parametri indukcionog generatora;

R_r , $X_{\sigma r}$ - aktivna otpornost i reaktansa rasipanja namotaja rotora, respektivno;

R_s , $X_{\sigma s}$ - aktivna otpornost i reaktansa rasipanja namotaja statora, respektivno;

X_m - reaktansa magnećenja; s - klizanje;

$Z'_s = \sqrt{R_s^2 + X_s'^2}$ - tranzijentna impedansa indukcione mašine;

X'_s - tranzijentna reaktansa indukcione mašine: $X'_s = X_{\sigma s} + X_m \parallel X_{\sigma r}$;

T'_s - vremenska konstanta prigušenja jednosmerne komponente struje kvara u namotajima statora:

$$T'_s = \frac{1}{\omega_s} \frac{X'_s}{R_s};$$

T'_r - vremenska konstanta prigušenja jednosmerne komponente struje kvara u namotajima rotora:

$$T'_r = \frac{1}{\omega_s} \frac{X'_r}{R_r}; \quad X'_r = X_{\sigma r} + X_m \parallel X_{\sigma s};$$

σ - faktor rasipanja generatora: $\sigma = 1 - \frac{X_m^2}{(X_{\sigma s} + X_m) \cdot (X_{\sigma r} + X_m)}$;

$S_{n,SG}$, $U_{n,SG}$, $x''_{n,SG}$, $x'_{n,SG}$, $x_{n,SG}$, T''_{d0} , T'_{d0} , T_a - parametri sinhronog generatora;

Z''_d , Z'_d , Z_d - subtranzijentna, tranzijentna i sinhrona impedansa po d -osi SG-a, respektivno;

X''_d , X'_d , X_d - subtranzijentna, tranzijentna i sinhrona reaktansa po d -osi SG-a, respektivno;

T''_d , T'_d , T_a - vremenske konstante SG-a (subtranzijentna, tranzijentna i vremenska konstanta prigušenja jednosmerne komponente struje kvara);

R_G - aktivna otpornost SG-a; $\varphi_{SG} = \arctg \left\{ \frac{X''_d}{R_G} \right\}$;

$m_{T,IG}$, $S_{nT,IG}$, $x_{T,IG}$, $r_{T,IG}$ - parametri energetskog transformatora preko koga se IG priključuje na mrežu;

$m_{T,SG}$, $S_{nT,SG}$, $x_{T,SG}$, $r_{T,SG}$ - parametri energetskog transformatora preko koga se SG priključuje na mrežu;

r_{feeder} - podužna aktivna otpornost voda; l_{feeder} - podužna iduktivnost voda;

2 UVOD

U aktivnim distributivnim mrežama postoje različiti tipovi distribuiranih izvora koji u manjoj ili većoj meri doprinose vrednosti struje kvara u slučaju nastanka kratkog spoja na proizvoljnom mestu. Pomenuti izvori se baziraju na korišćenju sinhronih (SG) i indukcionih (IG) generatora, sinhronih i indukcionih motora i generatora priključenih na mrežu preko uređaja energetske elektronike. Dakle, kada se dogodi kvar, struja će na mesto kvara doticati iz SN-mreže i svih distribuiranih generatora (DG) priključenih na izvod pogođen kvarom. Pasivni elementi mreže (nadzemni i kablovski vodovi, energetski transformatori i dr.), koji se nalaze između mesta kvara i različitih izvora, dovešće do smanjenja amplitude struje koja protiče kroz mesto kvara, pojačaće prigušenje njene naizmenične komponente a, zavisno od konfiguracije, pojačaće ili će ublažiti prigušenje jss komponenti. "Tradicionalne" distributivne mreže su projektovane za jednoznačni tok struje, tako da je priključenje DG-a bitno promenilo eksploatacione aspekte. Generalno, povećane su vrednosti struja koje teku kroz pojedine elemente u slučaju kvara, došlo je do promene podešenja uređaja relejne zaštite, promenjen je naponski profil duž voda na kome su priključeni DG i dr. [1-4]

Oblik struje kvara, između ostalog, zavisi od broja i vrste priključenih DG-a, od toga da li je napojna mreža jaka ili slaba, uklopnog stanja u trenutku nastanka kvara, vrste kvara, mesta kvara itd. Vreme reagovanja uređaja relejne zaštite je podešeno pod pretpostavkom da se glavni izvor struje kvara bazira na sinhronim generatorima. [4-8]

Ponašanje IG-a tokom kvara se bitno razlikuje od odziva SG-a. Za sve tipove IG-a pojedinačno i za SG-a razvijeni su i publikovani modeli kojima se opisuje njihovo ponašanje za slučaj nastanka kratkog

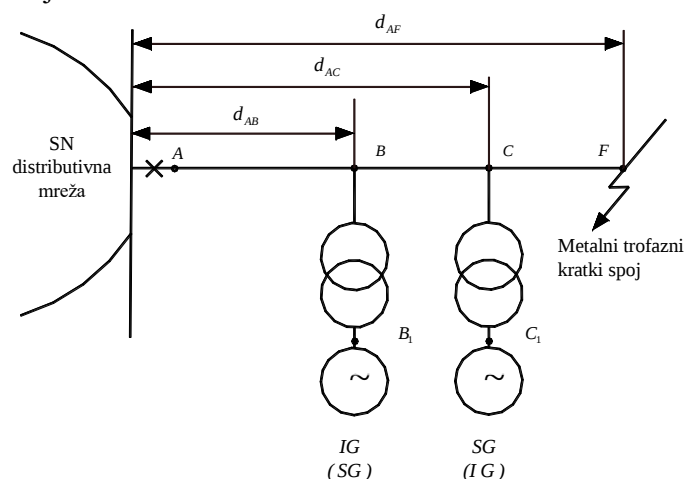
spoja. Iz raspoložive obimne literature, koja pokriva duži vremenski period i skoro sve značajnije autore i izdavače, očito je da su analizirani slučajevi kada su na izvodu distributivne mreže priključeni samo IG ili samo SG. Provera dobijenih rezultata je vršena njihovim upoređivanjem sa rezultatima koje daju razni komercijalno dostupni simulacioni paketi za proračun struja kratkih spojeva. [5-11]

Tema ovog rada je proračun struje metalnog trofaznog kratkog spoja u vremenskom domenu za slučaj kada su na izvod priključeni jedan IG i jedan SG. Izložena procedura se bazira na pojedinačnim ekvivalentnim modelima SN-mreže, SG-a i IG-a, primeni Kirhofovih zakona i teoremi superpozicije. Pomenuti kvar je analiziran kao najnepovoljniji sa stanovišta amplitude struje kvara, ali nema ograničenja da se dati postupak primeni i u slučaju kada na mestu kvara gori luk i/ili u slučaju nesimetričnih kratkih spojeva.

U nastavku izlaganja je izložena konfiguracija dela sistema na kome će biti demonstrirana ideja rada, a zatim su navedeni modeli distributivne mreže, IG-a i SG-a. Energetski transformatori i distributivni vod su modelovani svojim rednim parametrima. Na kraju je pokazana praktična primena teoreme superpozicije.

3 ANALIZIRANA KONFIGURACIJA AKTIVNE DISTRIBUTIVNE MREŽE

Na sl.1 je data jednopolna šema dela distributivnog sistema koji će biti analiziran. Vod se napaja iz SN-mreže, a u tačkama B i C mogu biti priključeni različiti tipovi DG-a (ako je u tački B priključen IG, onda je u tački C - SG i obratno). Snage IG-a i SG-a su određene tako da ni u jednom trenutku normalnog pogona ni u jednoj tački ne dođe do nedozvoljenog povišenja napona niti da dođe do preopterećenja bilo koje deonice voda.



Sl.1 Šema analiziranog dela distributivnog sistema

4 MATEMATIČKI MODELI NAPOJNE MREŽE, IG-a I SG-a

4.1 Model napojne mreže [6, 10, 12]

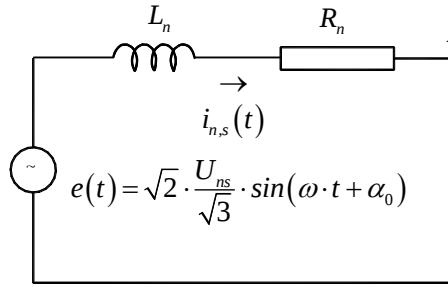
Za slučaj simetričnog kvara u tački A električna mreža se može predstaviti rednim $R-L$ kolom koje se napaja iz izvora elektromotorne sile $e(t) = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha_0)$, sl.2.

Struja $i_{n,s}(t)$ koja teče ka mestu kvara može se izračunati preko izraza:

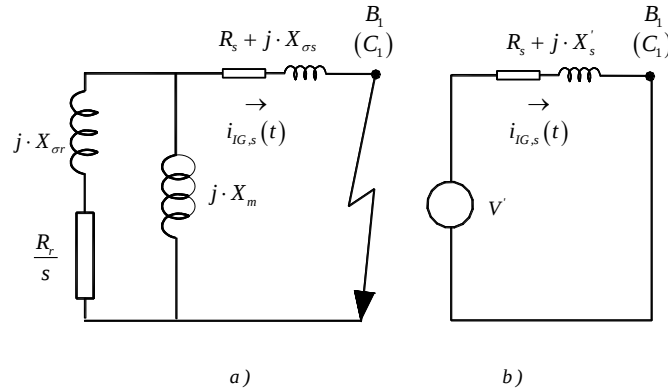
$$i_{n,s}(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3} Z_n} \cdot \sin(\omega_s \cdot t + \alpha_0 - \varphi_n) - \sqrt{2} \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3} Z_n} \cdot \sin(\alpha_0 - \varphi_n) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_n}\right) \quad (1)$$

4.2 Model indukcionog generatora [6, 10, 12]

U slučaju trofaznog kratkog spoja na krajevima generatora dovoljno je tačan model sa naponskim izvorom koji je redno vezan sa tranzijentnom impedansom direktnog redosleda indukcionog generatora, sl.3.



Sl. 2 Zamenska šema mreže za slučaj kratkog spoja u tački A prema sl.1



Sl.3 a) Zamenska šema indukcionog generatora sa kaveznim rotorom za određivanje impedanse direktnog redosleda

b) Model sa naponskim izvorom koji je redno vezan sa tranzijentnom impedansom direktnog redosleda IG-a

Na sl.3 je:

$$V' = \left| U_{s,0} + (R_s + j \cdot X'_s) \cdot I_{-s,0} \right| \quad (2)$$

gde su:

$U_{s,0}$, $I_{s,0}$ - napon na krajevima statora i struja IG-a pre nastanka kvara, respektivno.

Struja $i_{IG,s}(t)$ koja iz IG-a teče mestu kvara računa se iz izraza:

$$i_{IG,s}(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z'_s} \cdot \left[\exp\left(-\frac{t}{T'_s}\right) \cdot \sin \alpha_0 - (1 - \sigma) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T'_r}\right) \cdot \sin(\omega_s \cdot t + \alpha_0) \right] \quad (3)$$

4.3 Model sinhronog generatora [6, 10, 12]

Za slučaj metalnog trofaznog kratkog spoja na krajevima SG-a struja $i_{SG,s}(t)$ koja teče iz SG-a ka mestu kvara može se izračunati prema izrazu:

$$\begin{aligned} i_{SG,s}(t) = & -\sqrt{2} \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{Z'_d} - \frac{1}{Z_d} \right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t + \frac{\pi}{2} - \varphi_{SG}\right) \\ & -\sqrt{2} \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3}} \cdot \left[\left(\frac{1}{Z'_d} - \frac{1}{Z_d} \right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) + \frac{1}{Z_d} \right] \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t + \frac{\pi}{2} - \varphi_{SG}\right) \\ & +\sqrt{2} \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z''_d} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) \cdot \sin \varphi_{SG} \end{aligned} \quad (4)$$

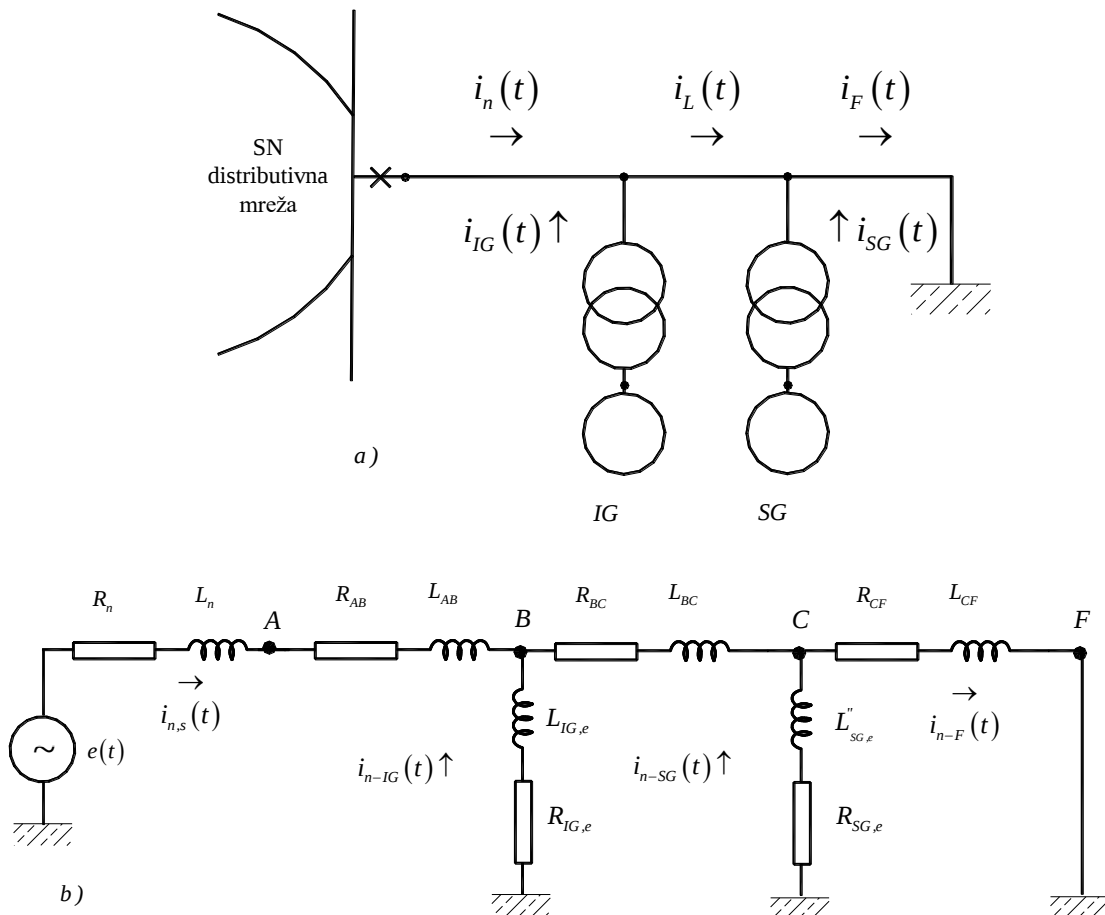
5 PRIMENA TEOREME SUPERPOZICIJE [12]

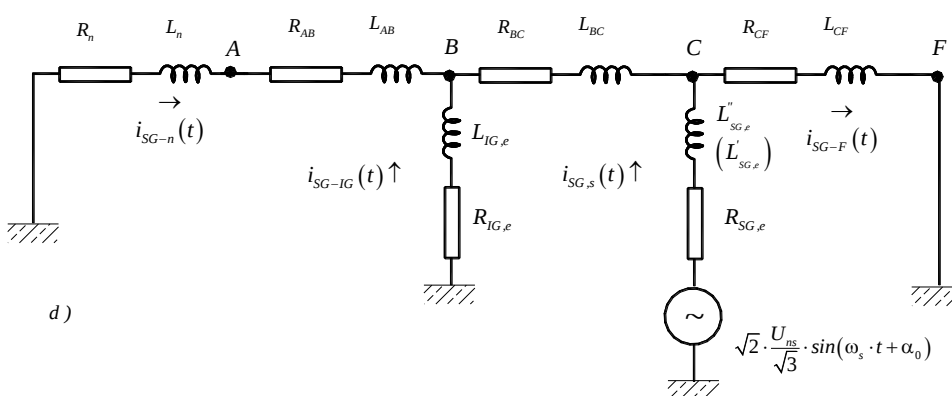
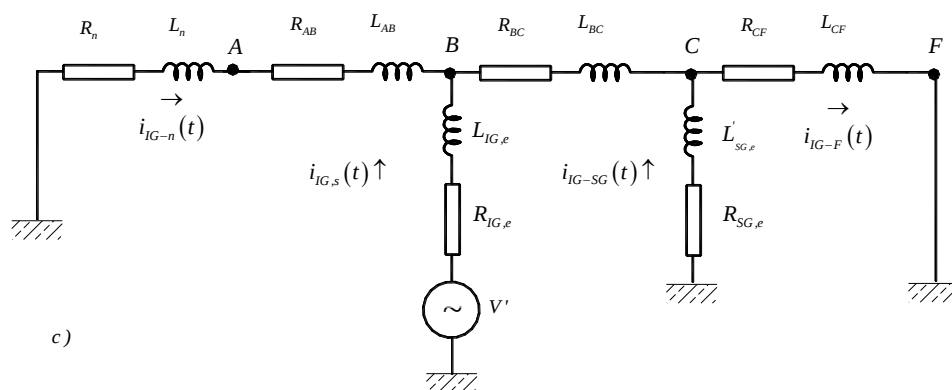
Prema teoremi superpozicije, odziv linearnog kola na više nezavisnih pobuda jednak je zbiru odziva na svaku od tih pobuda pojedinačno. U našem slučaju to znači sledeće: ako se u sistemu prikazanom na sl.1 dogodio trofazni kratki spoj doprinos svakog od tri izvora (SN-mreža, IG i SG) struji kvara biti izračunat zasebno, dok će ostali izvori biti modelovani kratkim spojem. Konkretno, neka je u tački *B* priključen IG, u tački *C* - SG, a u tački *F* se dogodio metalni trofazni kratki spoj, sl. 4-a). Sa slike je očito da postoje tri nezavisne pobude (tri izvora) i pet izlaznih veličina- struje $i_n(t)$, $i_{IG}(t)$, $i_L(t)$, $i_{SG}(t)$ i $i_F(t)$. Primenom teoreme superpozicije, prema šemama sa sl.4-a), 4-b), 4-c) i 4-d), za ove struje možemo da napišemo:

$$\begin{aligned} i_n(t) &= i_{n,s}(t) + i_{IG-n}(t) + i_{SG-n}(t) \\ i_{IG}(t) &= i_{IG,s}(t) + i_{n-IG}(t) + i_{SG-IG}(t) \\ i_{SG}(t) &= i_{SG,s}(t) + i_{n-SG}(t) + i_{IG-SG}(t) \\ i_L(t) &= i_n(t) + i_{IG}(t) \\ i_F(t) &= i_L(t) + i_{SG}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Struja $i_{n,s}(t)$, koja predstavlja sopstveno učešće SN-mreže, se računa prema izrazu (1) i sl.4-b), struja $i_{IG,s}(t)$ - prema izrazu (3) and sl. 4-c) i struja $i_{SG,s}(t)$ - prema jednačini (4) and sl. 4-d). Ove tri struje ćemo posmatrati kao elemente skupa $i_{source}(t)$:

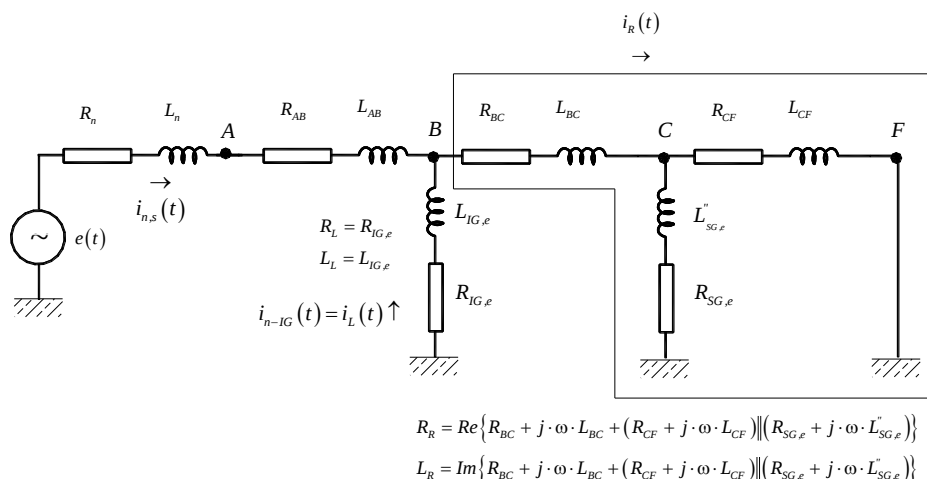
$$i_{source}(t) = \{i_{n,s}(t); i_{IG,s}(t); i_{SG,s}(t)\} \quad (6)$$



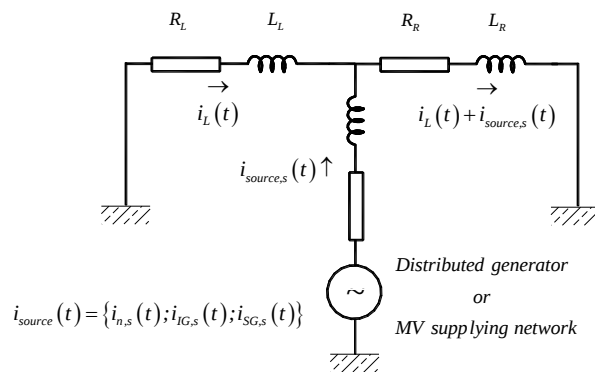


- Sl.4 a) SN-izvod sa IG priključenim u tački B , SG priključenim u tački C i metalnim trofaznim kratkim spojem u tački F
b) SN-mreža kao nezavisni naponski izvor (preostala dva izvora su modelovana kratkim spojem)
c) IG kao nezavisni naponski izvor (preostala dva izvora su modelovana kratkim spojem)
d) SG kao nezavisni naponski izvor (preostala dva izvora su modelovana kratkim spojem)

Tačke B i C u kojima su priključeni DG predstavljaju tačke granjanja struja, tako da za svaki od tri izvora, radi određivanja struja po svim deonicama i elementima, treba sprovesti proračun koji ima dva koraka. Pošto aktivne otpornosti elemenata nisu zanemarene, radi određivanja svih struja, u obe tačke granjanja biće potrebno rešavanje diferencijalnih jednačina. Na primer, da bismo odredili raspodelu struje $i_{n,s}(t)$ zamenska šema za tačku B je data na sl.5-a). Deo mreže po kome će se granati ova struja može se predstaviti sa dve grane, sa parametrima R_L, L_L i R_R, L_R . Isti postupak se sprovodi radi određivanja raspodele struja $i_{IG,s}(t)$ i $i_{SG,s}(t)$. Za sva tri slučaja zamenska šema je data na sl.6.



Sl.5 Zamenska šema za određivanje raspodele struje $i_{n,s}(t)$ u tački B



Sl.6 Opšta zamenska šema za proračun raspodele struja iz nezavisnih izvora

Za šemu sa sl.6, prema I i II Kirhofovom zakonu, možemo da napišemo:

$$-\left(R_L \cdot i_L(t) + L_L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}\right) = R_R \cdot (i_L(t) + i_{source,s}(t)) + L_R \cdot \frac{d}{dt}(i_L(t) + i_{source,s}(t)) \quad (7)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} \cdot (L_L + L_R) + (R_L + R_R) \cdot i_L(t) = -R_R \cdot i_{source,s}(t) - L_R \cdot \frac{di_{source,s}(t)}{dt} \Rightarrow \quad (8)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} + \underbrace{\frac{R_L + R_R}{L_L + L_R}}_{p(t)=p} \cdot i_L(t) = - \underbrace{\frac{R_R}{L_L + L_R} \cdot i_{source,s}(t) - \frac{L_R}{L_L + L_R} \cdot \frac{di_{source,s}(t)}{dt}}_{q(t)} \quad (9)$$

Za diferencijalnu jednačinu (9) generalno rešenje ima oblik:

$$i_L(t) = e^{-\int p(t) \cdot dt} \cdot \left(\int q(t) \cdot e^{\int p(t) \cdot dt} \cdot dt + C \right) \quad (10)$$

gde je C- konstanta. Partikularno rešenje se dobija na osnovu početnih uslova, odnosno vrednosti radne struje pre nastanka kvara, $i_L(0) = i_{L0}$:

$$i_L(t) - i_{L0} = e^{-\int_0^t p(t) \cdot dt} \cdot \left(\int_0^t q(t) \cdot e^{\int_0^t p(t) \cdot dt} \cdot dt + C \right) \quad (11)$$

Identična procedura se sprovodi radi određivanja raspodele struje u drugoj tački granjanja, a prema šemi na sl.5.

6 ZAKLJUČAK

U radu je izložen postupak koji omogućava proračun struja kvara u aktivnim distributivnim mrežama bez korišćenja simulacionih paketa. Primena je pokazana na delu realne mreže. Procedura se bazira da korišćenju već razvijenih modela elemenata mreže, Kirhofovih zakona, teoreme superpozicije i diferencijalnog računa.

ZAHVALNICA

Rad je rezultat rada na projektu No. III-42009 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije. Autori se najiskrenije zahvaljuju na podršci.

LITERATURA

1. F. Sulla, "Fault Behavior of Wind Turbines", Doctoral Dissertation, Dep. of Measurement Technology and Industrial Electrical Engineering, Lund university, 2012, Sweden
2. D. F. Howard, "Short-circuit currents in wind-turbine generator networks", PhD Thesis,

- Georgia Institute of Technology, December 2013
3. A.K. Elnaggar et al, "Comparison of Short-circuit Current Contribution of Doubly-Fed Induction Generator based Wind Turbines and Synchronous Generator", Power Tech, 2013 IEEE Grenoble, DOI: [10.1109/PTC.2013.6652307](https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652307)
 4. D.F. Howard et al., "Short Circuit Analysis of Induction Machines-Wind Power Application", Trans. and Distr. Conf. and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES, DOI: [10.1109/TDC.2012.6281643](https://doi.org/10.1109/TDC.2012.6281643)
 5. F. Sulla, "Island Operation with Induction Generators- Fault Analysis and Protection", Licentiate Thesis, Department of Measurement Technology and Industrial Electrical Engineering, Lund University, 2009, Sweden
 6. V. Gevorgian, E. Muljadi, "Wind Power Plant Short-Circuit Current Contribution for Different Fault and Wind Turbine Topologies", 9th Annual Int. Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems, Québec, Canada October 18-19, 2010
 7. N. Zhou et al., "Short-Circuit Calculation in Distribution Networks with Distributed Induction Generators", Energies 2016, 9, 277; doi:10.3390/en 9040277
 8. Joint Working Group , "Fault Current Contributions from Wind Plants ", 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, 2015.
 9. A.K. Elnaggar et al., "Comparison of short-circuit current contribution of doubly-fed induction generator based wind turbines and synchronous generator", IEEE Grenoble Conference, 16-20 June 2013, DOI: [10.1109/PTC.2013.6652307](https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652307)
 10. P. Karaliolios et al., "Overview of short-circuit contribution of various distributed generators on the distribution network", In Proc. of the 43rd International Universities Power Eng. Conf. 2008, 1-4 September 2008, Padova, Italy . <https://doi.org/10.1109/UPEC.2008.4651553>
 11. Bollen M., Hassan F., *Integration of distributed generation in the power systems*, Wiley and IEEE Press, 2011.
 12. N. Tleis "Power Systems Modelling and Fault Analysis- Theory and Practice", Second Edition, Academic Press, Elsevier Ltd, 2019.

**CALCULATION OF THREE PHASE SHORT-CIRCUIT CURRENT ON A MV
DISTRIBUTION FEEDER WITH INDUCTION GENERATOR AND
SYNCHRONOUS GENERATOR
- model proposal-**

**VLADICA MIJAILOVIĆ, ALEKSANDAR RANKOVIĆ
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES**

ČAČAK

SERBIA

Abstract— The main aim of this paper is to calculate three-phase bolted short-circuit currents in the time domain for a radial medium voltage (MV) feeder, which has one induction generator (IG) and one synchronous generator (SG) at different locations. Individual responses of distribution network, IG and SG in case of fault are well known and they differ significantly from each other. In active distribution network short-circuit analysis is usually performing using commercially available software packages due to the complexity of the procedure. By using the mentioned models and the theorem of superposition, fault currents calculation in time domain, for all elements and feeder sections, is demonstrated, with the elementary use of computer. It is shown that, without affecting accuracy some parameters of the elements can be neglected.

Key words — Short circuit- Distributed source- Induction generator- Synchronous generator- Distribution network- Superposition