Broj rada: R1-01
DOI:10.46793/CIRED2026.R1-01_112

PRORAČUN ELEKTRODINAMIČKIH SILA TOKOM KRATKOG SPOJA U AKTIVNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

CALCULATION OF ELECTRO-DYNAMIC FORCES DURING SHORT CIRCUITS IN ACTIVE DISTRIBUTION NETWORKS

Vladica MIJAILOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak, Srbija*
Aleksandar RANKOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak, Srbija
Predrag PETROVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Tokom kratkih spojeva na provodnike trofaznog kola deluju sile koje se menjaju u vremenu na složeni način. Najveća naprezanja se javljaju tokom trofaznog kratkog spoja. Kada su u pitanju elementi „tradicionalnih“ distributivnih mreža, proračun sila je izvršen pod pretpostavkom jednoznačnog toka struje i da od napojne mreže do mesta kvara postoji ista struja kvara. Međutim, nakon priključenja malih elektrana (distribuiranih generatora) na sistem situacija se bitno menja, tako da po pojedinim deonicama postoje struje kvara različitih vrednosti. Takođe, treba imati u vidu da se odzivi napojne mreže i pojedinih tipova distribuiranih generatora bitno razlikuju. U ovom radu su analizirane sile koje se javljaju tokom metalnog trofaznog kratkog spoja na pojedinim deonicama srednjenaponskog izvoda aktivne distributivne mreže, na koji su priključeni sinhroni (SG) i indukcioni (IG) generatori. Za kvar na naznačenom mestu, metodom superpozicije su izračunate struje koje nastaju iz pojedinih izvora, pod pretpostavkom da je kvar nastao u kritičnom trenutku. Zatim su izračunate sile koje deluju na pojedine deonice voda za slučaj da su provodnici voda postavljeni u istoj ravni.

Ključne reči: Aktivna distributivna mreža, elektromagnetna sila, kratak spoj

ABSTRACT

During short-circuit faults, conductors of a three-phase circuit are exposed to electro-dynamic forces that vary over time in a complex manner. The highest mechanical stresses occur during three-phase short circuits. For high-voltage components of “traditional” electrical distribution networks, the calculation of forces has been performed under the assumption of a unidirectional current flow, i.e., that the same fault current flows from the supplying network to the fault location. However, after the connection of small power plants (distributed generators) to the system, the situation changes significantly, so that fault currents of different magnitudes flow through particular sections of the feeder. Also, it should be taken into account that the responses of the supplying network and different types of distributed generators differ significantly. This paper analyzes the forces occurring during a bolted three-phase short circuit on particular sections of a medium-voltage feeder of an active distribution network to which synchronous (SG) and induction (IG) generators are connected. For a fault at the indicated point, the currents flowing from individual sources were calculated using the superposition method, assuming that

* Vladica Mijailović vladica.mijailovic@ftn.kg.ac.rs

the fault occurred at a critical moment. Then, the forces acting on particular line sections were calculated for the case where the line conductors are arranged in the same plane.

Keywords: Active distribution network, electromagnetic force, short circuit

UVOD

Svrha mehaničkog dimenzionisanja opreme u postrojenjima, na nadzemnim i podzemnim vodovima je poznata, a metodologija proračuna sila je standardizovana za slučaj tradicionalnih prenosnih i distributivnih mreža. U ovom radu se bavimo proračunom sile tokom trofaznog kratkog spoja u distributivnoj mreži na koju su priključeni različiti tipovi distribuiranih generatora, sa ciljem da utvrdimo kako priključeni generatori utiču na vrednost naprezanja. Koristićemo poznate obrasce i modele i analiziraćemo realan primer konfiguracije, koji je kritičan sa stanovišta vrednosti ukupne struje kvara, a time i vrednosti sile.
Posmatraćemo podzemni vod 10 kV. (Na nadzemnom vodu približno istog naznačenog strujnog opterećenja struja kvara bi bila znatno manja.)
Na izvod može biti priključen sinhroni (SG) ili indukcioni generator (IG) ili oba. Sa stanovišta vrednosti struje kvara kritično je kada su oba generatora priključena na iste sabirnice. Snaga generatora je određena tako da se u tački priključenja ni u jednom trenutku ne pojavi napon koji je viši od maksimalno dozvoljenog radnog napona za dati naponski nivo, niti da dođe do preopterećenja bilo koje deonice voda.
Biće uzeti u obzir različiti odzivi mreže i generatora na trofazni kratki spoj.
Proračun elektrodinamičkih sila biće urađen za slučaj kada su fazni provodnici sabirnica postavljeni u istoj ravni u zatvorenom prostoru, što znači da će srednja faza biti izložena najvećem naprezanju.

LISTA SIMBOLA

l_{MF} - rastojanje između sabirnica (tačka M) i tačke F u kojoj se dogodio kvar; t -vreme; α_0 - fazni ugao napona u trenutku nastanka kvara; $\omega_s = 2\pi \cdot f_n$ - sinhrona ugaona brzina obrtanja, $f_n = 50Hz$; $i(t)$ - 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; $Z_n = \sqrt{(\omega \cdot L_n)^2 + R_n^2}$, $\varphi_n = arctg\left(\frac{\omega \cdot L_n}{R_n}\right)$, $T_{as} = \frac{L_n}{R_n}$; $S_{n,IG}$, $U_{ns,IG}$, r_s, r_r, $x_{\sigma s}$, $x_{\sigma r}$, 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: $X_s' = X_{\sigma s} + X_m \| X_{\sigma r}$; 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: $T_r^{'} = \frac{1}{\omega_s}\frac{X_r^{'}}{R_r}$; $X_r^{'} = X_{\sigma r} + X_m \| X_{\sigma s}$; 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;

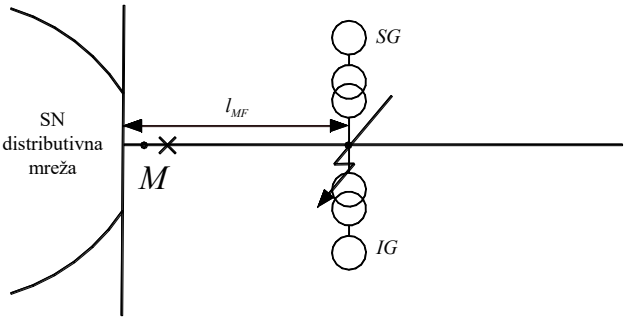
$X_d^{''}$, $X_d^{'}$, X_d - subtranzijentna, tranzijentna i sinhrona reaktansa po *d*-osi SG-a, respektivno;

$T_d^{''}$, $T_d^{'}$, 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 induktivnost voda; F - opšta oznaka za silu; F_l - opšta oznaka za silu po jedinici dužine provodnika; k_{ud} - udarni koeficijent; i_{ud} - udarna struja.

1. ANALIZIRANA KONFIGURACIJA AKTIVNE DISTRIBUTIVNE MREŽE

Na Slici 1 je data jednopolna šema dela distributivnog sistema koji će biti analiziran. Vod se napaja iz srednjenaponske (SN-) mreže, a tačka priključenja generatora može biti na bilo kom rastojanju l_{MF} od napojnih sabirnica. Kao što je već pomenuto, sa stanovišta vrednosti struje kritičan je kvar u tački priključenja.



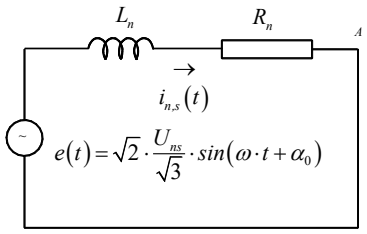
Slika 1 – Šema analiziranog dela distributivnog sistema

2. MATEMATIČKI MODELI NAPOJNE MREŽE, IG-a I SG-a

2.1 Model napojne mreže

Za slučaj simetričnog kvara u tački M na Slici 1 električna mreža se može predstaviti rednim $R-L$ kolom koje se napaja iz izvora elektromotorne sile $e(t) = E_m \cdot sin(\omega \cdot t + \alpha_0)$, Slika 2. Struja $i_{n,s}(t)$ čiji je smer ka mestu kvara može se izračunati preko izraza (1), [1, 2, 3]:

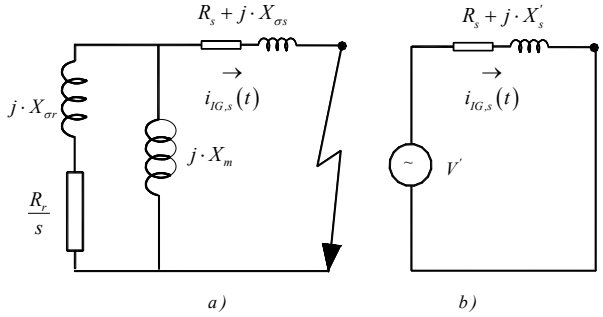
$$i_{n,s}(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3}} \frac{1}{Z_n} \cdot sin(\omega_s \cdot t + \alpha_0 - \varphi_n) - \sqrt{2} \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3}} \frac{1}{Z_n} \cdot sin(\alpha_0 - \varphi_n) \cdot exp\left(-\frac{t}{T_{as}}\right). \quad (1)$$



Slika 2 – Zamenska šema mreže za slučaj kratkog spoja u tački A prema Slici 1

2.2 Model indukcionog generatora

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, Slika 3.



Slika 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 Slici 3 je:

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

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 ima smer od IG-a ka mestu kvara računa se iz izraza (3), [1, 2, 3]:

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

2.3 Model sinhronog generatora

Za slučaj metalnog trofaznog kratkog spoja na krajevima SG-a struja $i_{SG,s}(t)$ koja ima smer od SG-a ka mestu kvara može se izračunati prema izrazu (4), [1, 2, 3]:

$$i_{SG,s}(t) = -\sqrt{2}\cdot\frac{U_{ns}}{\sqrt{3}}\cdot\left(\frac{1}{Z_d''}-\frac{1}{Z_d'}\right)\cdot exp\left(-\frac{t}{T_d''}\right)\cdot cos\left(\omega_s\cdot t+\frac{\pi}{2}-\varphi_{SG}\right)$$
$$-\sqrt{2}\cdot\frac{U_{ns}}{\sqrt{3}}\cdot\left[\left(\frac{1}{Z_d'}-\frac{1}{Z_d}\right)\cdot exp\left(-\frac{t}{T_d'}\right)+\frac{1}{Z_d}\right]\cdot cos\left(\omega_s\cdot t+\frac{\pi}{2}-\varphi_{SG}\right) \quad . \qquad (4)$$
$$+\sqrt{2}\cdot\frac{U_{ns}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{1}{Z_d''}\cdot exp\left(-\frac{t}{T_a}\right)\cdot sin\,\varphi_{SG}$$

3. PRORAČUN SILA IZMEĐU PARALELNIH PROVODNIKA

U slučaju kada u dva paralelna provodnika postavljena u vazduhu na rastojanju a postoje struje $i_1(t)$ i $i_2(t)$, ako su provodnici istih dužina l sila koja deluje na svaki od provodnika može se izračunati po formuli (5) , prema [4, 5, 6]:

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{i_1(t)\cdot i_2(t)}{a}\cdot\left(\sqrt{l^2+a^2}-a\right) . \qquad (5)$$

gde je: μ_0 - magnetna permeabilnost vakuuma, $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}\ \frac{H}{m}$.

Sila po jedinici dužine provodnika jednaka je, prema [6]:

$$F_l(t) = \frac{F(t)}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{i_1(t)\cdot i_2(t)}{a}\cdot\frac{\left(\sqrt{l^2+a^2}-a\right)}{l} . \qquad (6)$$

Imajući u vidu da je $\frac{\left(\sqrt{l^2+a^2}-a\right)}{l}\approx 1$ prethodni izraz postaje, prema [6]:

$$F_l(t) = \frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{i_1(t)\cdot i_2(t)}{a} . \qquad (7)$$

Kada zamenimo $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}\ \frac{H}{m}$ i vrednosti struja $i_1(t)$ i $i_2(t)$ uvrstimo u $[kA]$, izraz (7) dobija oblik podesan za praktičnu primenu, [6]:

$$F_l(t) = 0{,}2\cdot\frac{i_1(t)\cdot i_2(t)}{a} \quad , \quad a[m] . \qquad (8)$$

4. PRORAČUN SILA ZA SLUČAJ TROFAZNOG KRATKOG SPOJA

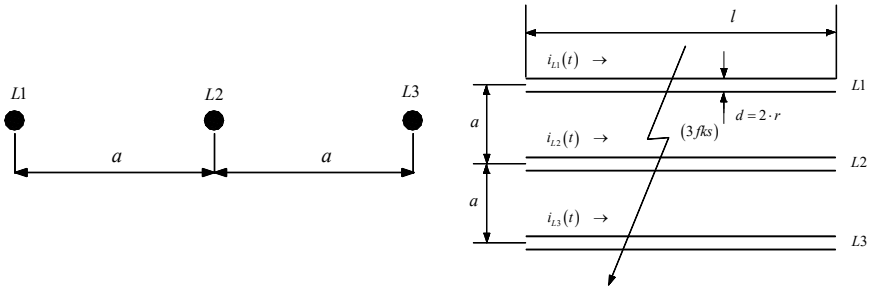
Posmatraćemo trofazno kolo u kome su provodnici položeni u istoj ravni, što je najčešći slučaj, Slika 4.
Za slučaj trofaznog kratkog spoja amplituda sile po jedinici dužine koja deluje na središnji

provodnik razlikuje se od amplituda sila koje deluju na ivične provodnike, [6]:

$$F_{L1,l}(t)=\frac{2}{a}\cdot 10^{-7}\cdot\left[i_{L1}(t)\cdot i_{L2}(t)+\frac{1}{2}\cdot i_{L1}(t)\cdot i_{L3}(t)\right], \tag{9}$$

$$F_{L2,l}(t)=\frac{2}{a}\cdot 10^{-7}\cdot\left[i_{L2}(t)\cdot i_{L3}(t)-i_{L2}(t)\cdot i_{L1}(t)\right], \tag{10}$$

$$F_{L3,l}(t)=-\frac{2}{a}\cdot 10^{-7}\cdot\left[i_{L3}(t)\cdot i_{L2}(t)+\frac{1}{2}\cdot i_{L3}(t)\cdot i_{L1}(t)\right]. \tag{11}$$



a) b)

Slika 4 – a) Provodnici trofaznog kola u istoj ravni
b) Trofazni kratki spoj u kolu sa provodnicima postavljenim u istoj ravni

Najveća naprezanja će se javiti tokom subtranzijentnog perioda metalnog trofaznog kratkog spoja. Ako se kvar dogodi u najnepovoljnijem trenutku, radi pojednostavljenja i proračuna na stranu sigurnosti, maksimalnu vrednost podužne sile možemo izračunati ako u izraze (9)÷(11) uvrstimo udarnu vrednost struja kvara, $i_{ud}\ [\mathrm{kA}]$:

$$F_{max,l}=max\left\{F_{L2,l}(t)\right\}=0{,}173\cdot\frac{i_{ud}^2}{a}=0{,}173\cdot\frac{\left(k_{ud}\cdot\sqrt{2}\cdot I_k''\right)^2}{a}\quad\left[\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}\right]. \tag{12}$$

Tradicionalni izraz za proračun udarnog koeficijenta je:

$$k_{ud}=1+exp\left(-\frac{0{,}01}{T_{ae}}\right), \tag{13}$$

a prema IEC-u:

$$k_{ud}=1{,}02+0{,}98\cdot exp\left(-\frac{3\cdot R}{X}\right). \tag{14}$$

Ako se mesto kvara napaja iz više nezavisnih radijalnih grana, a u pitanju je metalni kratki spoj, ukupna vrednost udarne struje jednaka je zbiru udarnih struja za svaku granu pojedinačno. U nastavku će biti pokazano da ovo pojednostavljenje daje rezultate koji značajno podižu stepen sigurnosti proračuna kada su na izvod priključene male elektrane.

5. PRIMER PRORAČUNA

Za šemu distributivnog dela sistema sa Slike 1 biće urađen proračun sile koja deluje na provodnike tokom metalnog trofaznog kratkog spoja. Podaci za proračun su dati u Tabeli I. Proračuni su urađeni za sledeće slučajeve:
- Slučaj S-1): kvar na bilo kom mestu na izvodu bez priključenih IG i SG;
- Slučaj S-2): kvar u tački u kojoj su priključeni IG i SG.

Pre nego što izložimo ključne rezultate analiza, ukazaćemo na neke bitne zaključke iz prethodnih analiza [2]:
- pri nastanku kvara na izvodu dominantna je struja koja ima smer iz mreže ka mestu kvara;
- struja kvara koja ima smer iz mreže svoj maksimum dostiže u fazi *L1*, a struje koje imaju smer od indukcionog i sinhronog generatora svoje maksimume dostižu u fazi *L3* , pre nego što svoj maksimum dostigne struja iz mreže.

Tabela I – Parametri za proračun dela sistema prikazanog na Slici 1

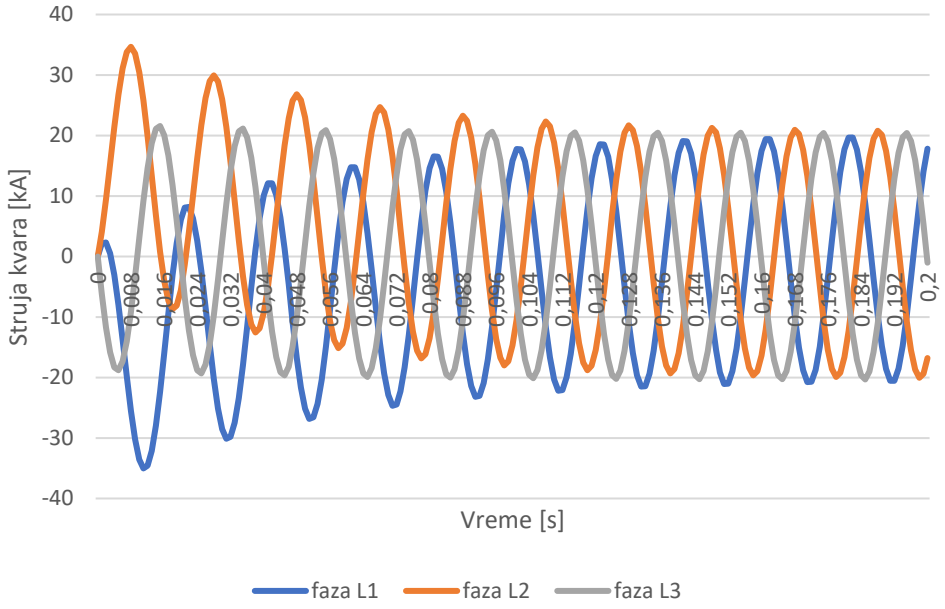
	Podaci
Dužina voda	$d = 5$ km
Rastojanje između faznih provodnika sabirnica	$a = 0,4$ m (provodnici sabirnica su montirani u zatvorenom prostoru)
Podzemni vod	- Tri jednofazna kabla, bakarni provodnici, poprečni presek jednog kabla 150 mm^2 , naznačena struja $I_{n,cabl} = 350$ A; - $r_{Feeder} = 0,12 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $l_{Feeder} = 0,32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{H}}{\text{km}}$.
Mreža SN	- Za $S_s'' = 250$ MVA i $T_{as} = 0,05$ s : $R_n = 0,025\ \Omega$, $L_n = 1,27 \cdot 10^{-3}$ H;
IG	$S_{n,IG} = 2,5$ MVA, $U_{ns,IG} = 0,69$ kV, $r_s = 0,004843$, $r_r = 0,004347$, $x_{\sigma s} = 0,1248$, $x_{\sigma r} = 0,1791$, $x_m = 6,77$
Energetski transformator uz IG	$m_{T,IG} = \frac{10}{0,69} \frac{\text{kV}}{\text{kV}}$, $S_{nT,IG} = 4$ MVA, $x_{T,IG} = 0,05$, $r_{T,IG} = 0,01$
SG	$S_{n,SG} = 2,5$ MVA, $U_{n,SG} = 0,48$ kV, $x_{n,SG}'' = 0,125$, $x_{n,SG}' = 0,227$, $x_{n,SG} = 3,064$, $T_{d0}'' = 0,0132$ s, $T_{d0}' = 4,965$ s, $T_{aG} = 0,0262$ s
Energetski transformator uz SG	$m_{T,SG} = \frac{10}{0,48} \frac{\text{kV}}{\text{kV}}$, $S_{nT,SG} = 4$ MVA, $x_{T,SG} = 0,05$, $r_{T,SG} = 0,01$

Slučaj S-1) Analizu ćemo najpre uraditi za izvod na kome nema priključenih distribuiranih generatora. Za slučaj kvara na sabirnicama postoji struja koja u trenutku $t = 0,011$s dostiže vršnu vrednost od $35,034$ kA, prema (1), Slika 5.
Prema izrazu (12), maksimalna vrednost sile po jedinici dužine na srednju fazu iznosi:

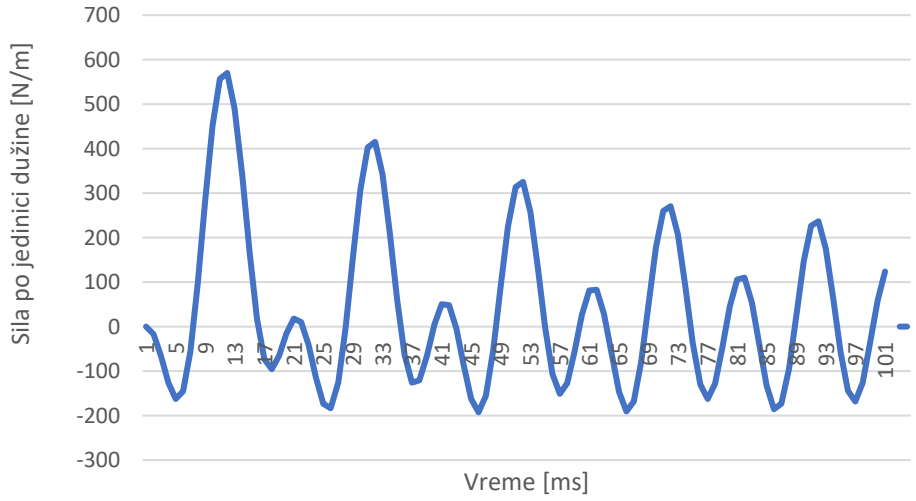
$$F_{max,l} = 0,173 \cdot \frac{i_{ud}^2}{a} = 0,173 \cdot \frac{35,034^2}{0,4} = 530,84 \frac{\text{N}}{\text{m}}.$$

Kada se podužna sila izračuna prema izrazu (10), maksimalna vrednost iznosi $556,82 \frac{\text{N}}{\text{m}}$, Slika 6. U odnosu na vrednost dobijenu prema (12), ova vrednost je veća za 4,89%.

Sa udaljavanjem mesta kvara od sabirnica opada i vrednost sile. Na Slici 7 dat je uporedni pregled rezultata kada se sila računa prema izrazu (10) i prema izrazu (12), pri čemu je udarni koeficijent računat prema (14) (vrednosti prema (14) su nešto veće od vrednosti prema izrazu (13)). Očito je da su razlike u granicama prihvatljivog.



Slika 5 – Vremenska promena struje kvara iz mreže za kvar na sabirnicama bez priključenih IG i SG

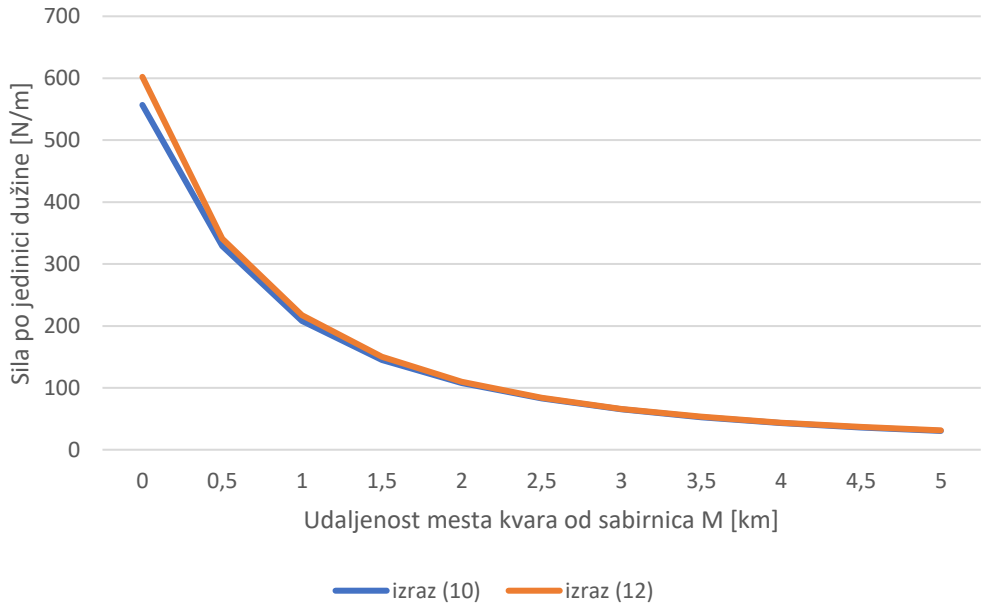


Slika 6 – Vremenska promena podužne sile na srednju fazu sabirnica sa slučaj S-1)

Slučaj S-2) Ako su na sabirnice priključeni indukcioni i sinhroni generatori, kroz mesto kvara postoji struja čija je vršna vrednost $36,04\,\mathrm{kA}$, Slika 8.

Za datu vršnu vrednost struje podužna sila ima vrednost $561,77\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$. Ako silu izračunamo prema izrazu (10), maksimalna vrednost iznosi $592,97\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$, Slika 9.

Zavisno od načina proračuna, ovde postoji izvesno neslaganje. Naime, struja kvara koja ima smer iz mreže svoj maksimum dostiže u fazi *L1*, a struje koje imaju smer iz indukcionog i sinhronog generatora svoje maksimume dostižu u fazi *L3* , pre nego što svoj maksimum dostigne struja iz mreže. Ako bismo ove tri struje sabrali algebarski, vršna vrednost struje kroz mesto kvara bi bila $38,06\,\mathrm{kA}$, a sila po jedinici dužine, prema (12), $626,50\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$. Najmanja računska vrednost, $561,77\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$, i najveća računska vrednost, $626,50\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$, razlikuju se za oko 11,5%.

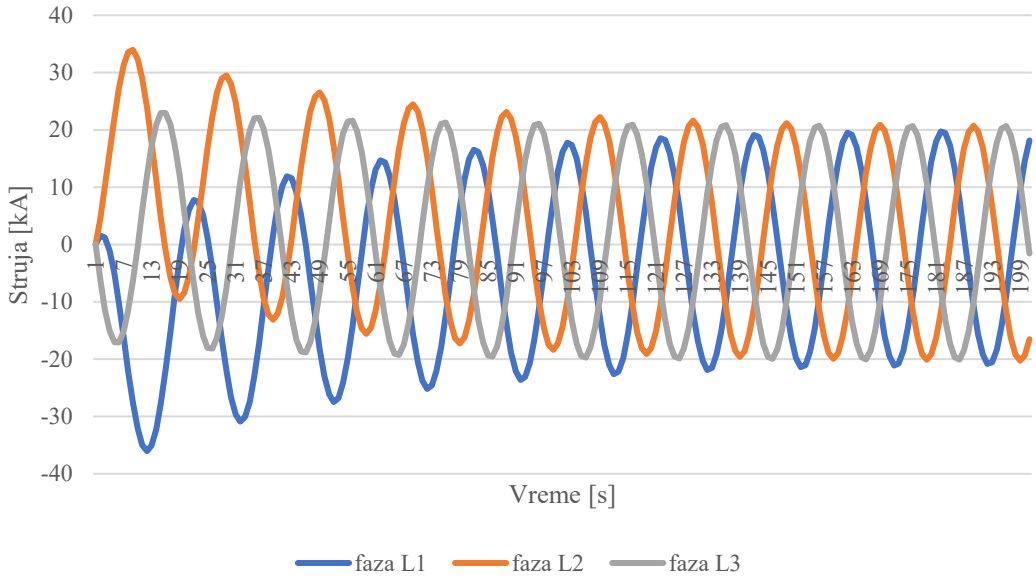


Slika 7 – Zavisnost maksimalne vrednosti podužne sile od udaljenosti mesta kvara od sabirnica, slučaj S-1)

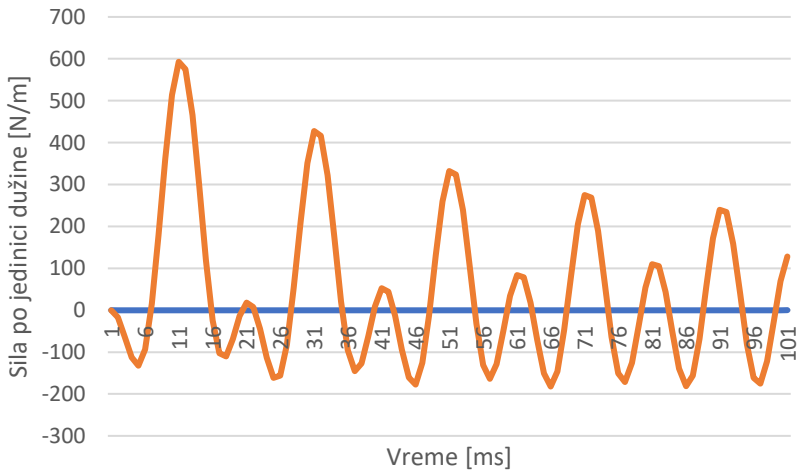
S obzirom da je u pitanju metalni kvar, postojeća mreža, IG i SG nezavisni su izvori. Ako izračunamo struje koje imaju smer iz svakog od izvora prema IEC metodologiji [4-6] (udarni koeficijent je računat prema (14)) dobijamo da su:
- udarna struja iz mreže 37,314 kA;
- udarna struja iz indukcionog generatora 1,2 kA;
- udarna struja iz sinhronog generatora 2,267 kA.

Dakle, ukupna udarna struja bi bila 40,781 kA, odnosno sila po jedinici dužine:

$F_{max,l} = 0,173 \cdot \frac{i_{ud}^2}{a} = 0,173 \cdot \frac{40,781^2}{0,4} = 719,29\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$. Ova vrednost je veća za 14,8% u odnosu na $626,50\ \frac{N}{m}$, a 28% u odnosu na $561,77\ \frac{N}{m}$.



Slika 8 – Vremenska promena ukupne struje kvara za kvar na sabirnicama i kada su na sabirnice priključeni IG i SG, slučaj S-2)



Slika 9 – Vremenska promena podužne sile na srednju fazu sabirnica sa slučaj S-2)

6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak proračuna sila koje deluju na elemente kola tokom trofaznog kratkog spoja na jednom podzemnom vodu 10 kV na koji su priključeni indukcioni i sinhroni generatori. Korišćeni su poznati izrazi i modeli. Deo sistema koji je analiziran je realan, sa stanovišta parametara elemenata kola, napojne mreže i priključenih distribuiranih izvora. Analize su sprovedene za slučaj kada su IG i SG priključeni na iste sabirnice, što sa stanovišta vrednosti ukupne struje kvara predstavlja kritičnu situaciju. Radi upoređenja, za izvod bez priključenih malih elektrana, izračunate su maksimalne vrednosti sila, prema izrazu (10), zavisno od udaljenosti mesta kvara od napojnih sabirnica i maksimalne vrednosti sila prema praktičnom izrazu (12) koji u izvesnoj meri daje rezultate na strani sigurnosti. Ove vrednosti su

poređene sa vrednostima sila koje se javljaju tokom kvara kada su na izvod priključeni IG i DG. Odstupanja u dobijenim rezultatima su posledica dve činjenice:
- struje koje imaju smer ka mestu kvara od pojedinih izvora ne dostižu vršne vrednosti u istom trenutku;
- vršne vrednosti struja iz pojedinih izvora se ne postižu u istim fazama.

Zanemarivanje ovih činjenica pri proračunu udarne struje daje rezultat čija vrednost je bitno na strani sigurnosti.
Izloženi postupak je primenljiv na mrežu SN bilo kog naponskog nivoa.
Ako se prikazani postupak primeni na nadzemni izvod iste naznačene strujne opteretivosti dobijaju se nešto manje vrednosti struje kvara iz mreže, zbog drugačijih podužnih parametara.

LITERATURA

[1] 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
[2] V. Mijailović, D. Klimenta, A. Ranković, P. Petrović, M. Milovanović, "Calculation of three-phase bolted short-circuit currents in a MV distribution feeder with induction and synchronous generators", *Electr Eng* (2024). https://doi.org/10.1007/s00202-023-02004-0
[3] N. Tleis, "Power Systems Modelling and Fault Analysis- Theory and Practice", Second Edition, Academic Press, Elsevier Ltd, 2019.
[4] *The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations*, CIGRE Working Group 02 (Effects of high currents) of Study committee 23 (Substations), 1987.
[5] *The Mechanical effects of short-circuit currents in open-air substations (rigid and flexible busbars)* (volume 1 and 2), Brochure N° 105, April 1996. CIGREcentral Office, Paris
[6] J. Nahman, V. Mijailović, „Razvodna postrojenja –drugo izdanje", Akademska misao, Beograd, 2015.

Zahvalnica
Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-33/2026-03/ 200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu.

Acknowledgement
This study was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia, and these results are parts of the Grant No. 451-03-33/2026-03/ 200132 with University of Kragujevac - Faculty of Technical Sciences Čačak.