

C6 06**PRORAČUN STRUJE METALNOG TROFAZNOG KRATKOG SPOJA NA SN-IZVODU SA PRIKLJUČENIM INDUKCIONIM I SINHRONIM GENERATORIMA
–REZULTATI PRORAČUNA–**

VLADICA MIJAILOVIĆ, ALEKSANDAR RANKOVIĆ
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
ČAČAK
SRBIJA

Kratak sadržaj - U radu su izloženi rezultati proračuna struje trofaznog kratkog spoja na SN-izvodu na kome su priključeni indukcioni (IG) i sinhroni generatori (SG) primenom metode superpozicije. Analize su urađene za jedan 10 kV kablovski izvod. Pokazan je međusobni uticaj priključenih generatora i distributivne mreže, kada su u pitanju karakteristične vrednosti struje kvara, u periodima višeg i nižeg opterećenja. Naznačene snage generatora (*hosting capacity*) su određene uz uslov da se u tački priključenja ne premaši vrednost dozvoljenog radnog napona za dati naponski nivo.

Ključne reči - Kratak spoj- Vreme- Indukcioni generator- Sinhroni generator- Distributivna mreža- Maksimalna vrednost.

1 ANALIZIRANI SLUČAJEVI I PODACI ZA PRORAČUN

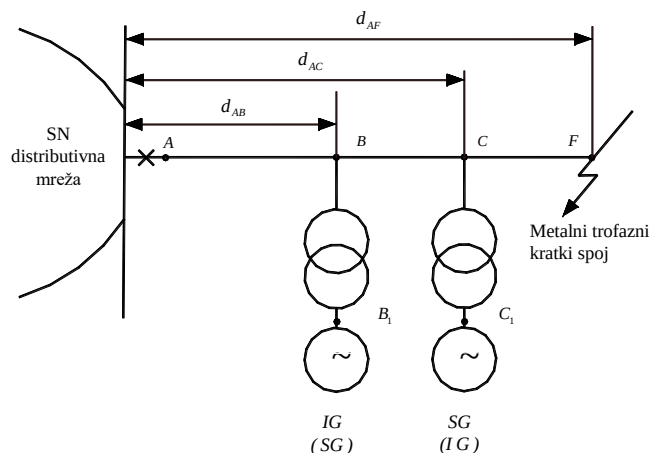
Proračun struja kvara primenom metode superpozicije je urađen za deo aktivne distributivne mreže naznačenog napona 10 kV, čija je jednopolna šema data na sl.1. Vod se napaja iz SN-mreže, a u tačkama B i C mogu priključeni različiti tipovi DG-a (ako je u tački B priključen IG, onda je u tački C - SG i 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.

Sekcije kablovskog voda i energetski transformatori uz IG i SG su modelovani rednim parametrima (otočni su zanemareni). U većini praktičnih situacija, bez bitnijeg uticaja na tačnost proračuna, mogle bi da se zanemare i aktivne otpornosti elemenata sistema. Istraživanja stranih autora pokazuju da je to moguće uraditi za sve izvode koji nisu duži od 45 km.

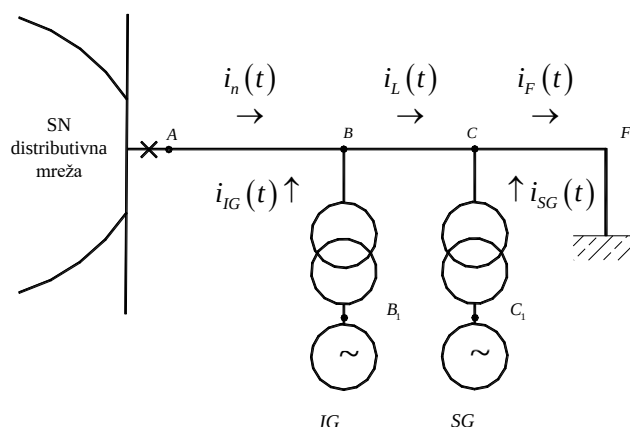
Analize su sprovedene za sledeće slučajeve:

- Slučaj E0,IG-B: Ostrvski rad IG-a, IG priključen u tački B,
- Slučaj E0,SG-B: Ostrvski rad SG-a, SG priključen u tački B,
- Slučaj E1: radijalni pogon, nema priključenih DG-a na izvodu
- Slučaj E2: izvod se napaja iz SN-mreže + IG priključen u tački B,
- Slučaj E3: izvod se napaja iz SN-mreže + IG priključen u tački C,

- Slučaj E4: izvod se napaja iz SN-mreže + SG priključen u tački B ,
 - Slučaj E5: izvod se napaja iz SN-mreže + SG priključen u tački C ,
 - Slučaj E6: izvod se napaja iz SN-mreže + IG priključen u tački B +SG priključen u tački C ,
 - Slučaj E7: izvod se napaja iz SN-mreže + SG priključen u tački B +IG priključen u tački C .
- Raspodela struja iz pojedinih izvora za jednu od mogućih konfiguracija prikazana je na sl.2. Parametri potrebni za proračun su navedeni u Tabeli 1.



Sl.1 Šema analiziranog dela distributivnog sistema



Sl.2 Raspodela struja za slučaj kvara na datom mestu

2 REZULTATI PRORAČUNA

Najpre je određen najnepovoljniji trenutak nastanka kvara, odnosno vrednost ugla α_0 . Najveći uticaj na naprezanje elemenata ima struja $i_n(t)$ koja teče iz mreže. Ako se kvar dogodi u trenutku kada je $\alpha_0 = 0.84 \cdot \pi$ pomenuta struja će imati najveću vrednost. Za sve analizirane slučajeve proračuni su urađeni za period kada je mreža jaka i za period kada je mreža slaba.

2.1 Jaka mreža

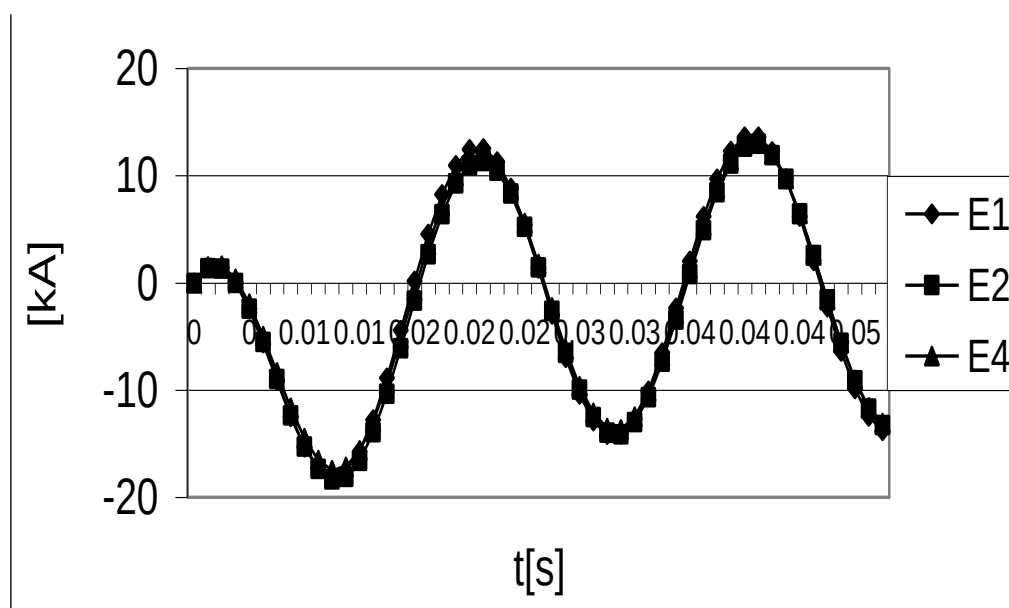
Struja $i_n(t)$ koja teče iz mreže za slučaj radijalnog napajanja je upoređena sa strujom koja teče iz mreže za slučaj kada je u tački B priključen IG i za slučaj kada je u tački B priključen SG, sl.3. Označimo sa $i_{x,max}|_{EY}$ maksimalnu vrednost struje $i_x(t)$ za slučaj (konfiguraciju) EY. Sa sl.3 se može

zaoključiti sledeće: $i_{n,max}|_{E2} > i_{n,max}|_{E1} > i_{n,max}|_{E4}$, $\frac{i_{n,max}|_{E2}}{i_{n,max}|_{E1}} = 1.0187$ i $\frac{i_{n,max}|_{E4}}{i_{n,max}|_{E1}} = 0.97$. Promena vrednosti struja $i_{n,max}|_{E2}$ i $i_{n,max}|_{E4}$ opada sa povećanjem udaljenosti tačke priključenja DG-a od napojnih

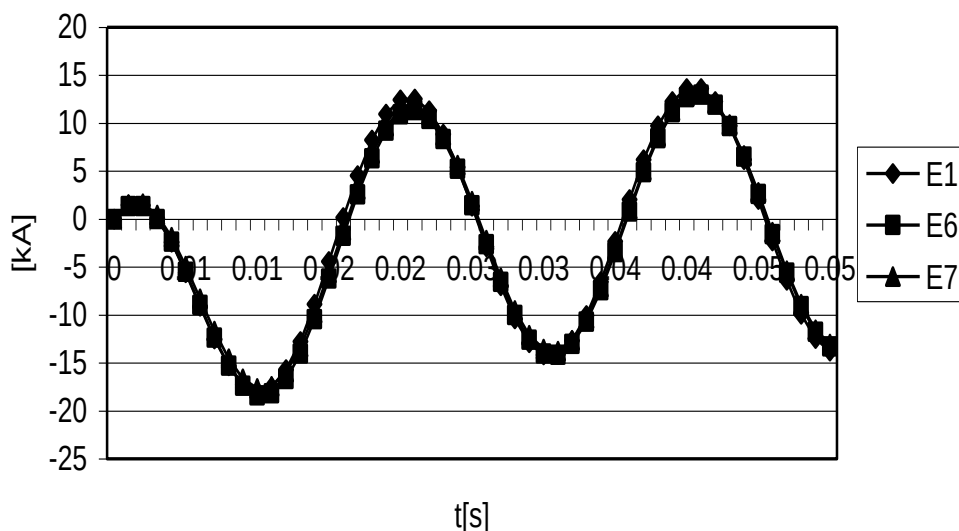
sabirnica. U sva tri slučaja maksimum stuje $i_n(t)$ nastupa u trenutku $t = 0.01\text{ s}$.

Tabela 1 Parametri za proračun dela sistema prikazanog na sl.1

	Podaci
Dužine sekcija voda	$d_{AB} = 0.5\text{ km}$, $d_{AC} = 1.0\text{ km}$, $d_{AF} = 1.5\text{ km}$
Kablovski vod	- Tri jednofazna kablova, bakarni provodnici, poprečni presek jednog kablova 150 mm^2 , naznačena struja $I_{n, cabl} = 350\text{ A}$; - $r_{Feeder} = 0.12 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $l_{Feeder} = 0.32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{H}}{\text{km}}$.
SN-mreža	- Za $S_s'' = 250\text{ MVA}$ i $T_{as} = 0.05\text{ s}$ (jaka mreža): $R_n = 0.025\ \Omega$, $L_n = 1.27 \cdot 10^{-3}\text{ H}$; - Za $S_s'' = 130\text{ MVA}$ i $T_{as} = 0.05\text{ s}$ (slaba mreža): $R_n = 0.048\ \Omega$, $L_n = 2.44 \cdot 10^{-3}\text{ H}$.
IG	$S_{n,IG} = 2.5\text{ MVA}$, $U_{ns,IG} = 0.69\text{ kV}$, $r_s = 0.004843$, $r_r = 0.004347$, $x_{\sigma s} = 0.1248$, $x_{\sigma r} = 0.1791$, $x_m = 6.77$
Energetski transformator uz IG	$m_{T,IG} = \frac{10\text{ kV}}{0.69\text{ kV}}$, $S_{nT,IG} = 4\text{ MVA}$, $x_{T,IG} = 0.05$, $r_{T,IG} = 0.01$
SG	$S_{n,SG} = 2.5\text{ MVA}$, $U_{n,SG} = 0.48\text{ kV}$, $x_{n,SG}'' = 0.125$, $x_{n,SG}' = 0.227$, $x_{n,SG} = 3.064$, $T_{d0}'' = 0.0132\text{ s}$, $T_{d0}' = 4.965\text{ s}$, $T_{aG} = 0.0262\text{ s}$.
Energetski transformator uz SG	$m_{T,SG} = \frac{10\text{ kV}}{0.48\text{ kV}}$, $S_{nT,SG} = 4\text{ MVA}$, $x_{T,SG} = 0.05$, $r_{T,SG} = 0.01$
Početni uslovi	Pre nastanka kvara, SN-mreža i priključeni distribuirani generatori su bili u režimu praznog hoda

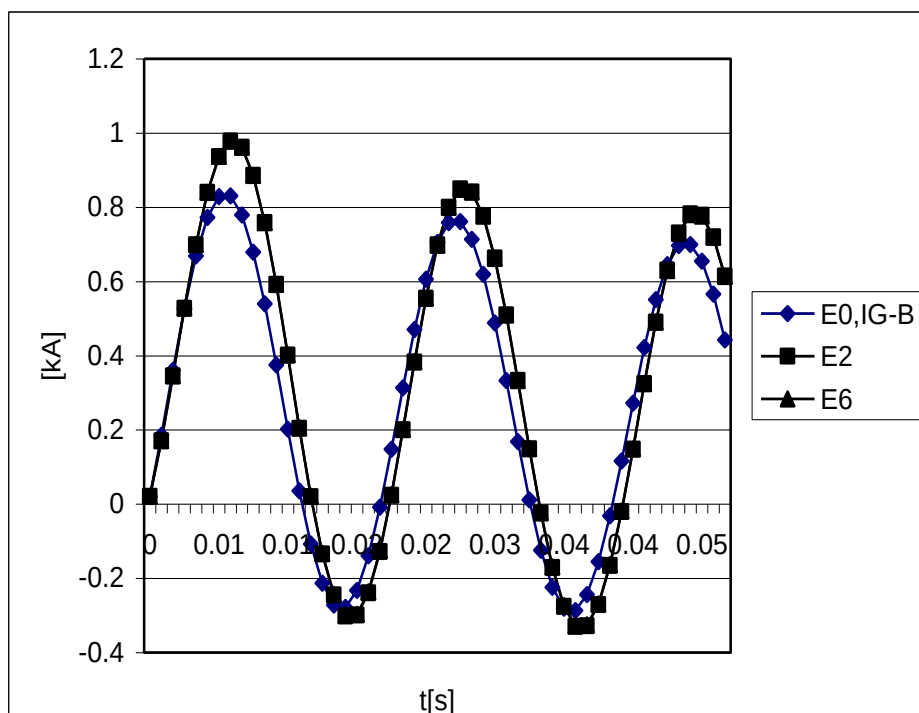


Sl.3 Uporedni pregled vrednosti struje $i_n(t)$ za slučajeve E1, E2 i E4 kada je mreža jaka



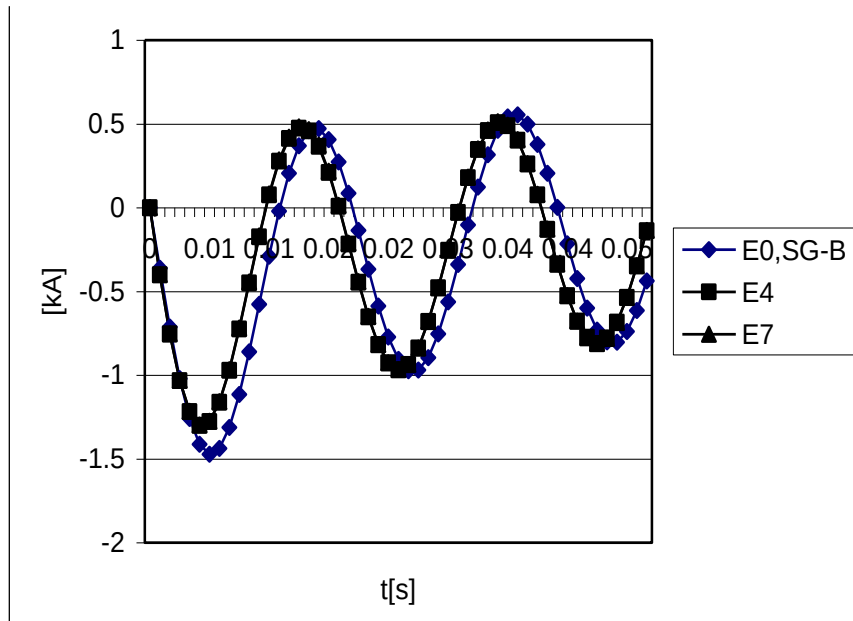
Sl.4 Uporedni pregled vrednosti struje $i_n(t)$ za slućajeve E1, E6 i E7 kada je mreža jaka

Uporedni pregled rezultata proraćuna struje $i_{IG}(t)$ za slućajeve E0,IG-B, E2 i E6 dati su na sl.5. Uticaj prikljućenog SG-a na struju koja teće iz IG-a je zanemarljiv i obratno. U sva tri slućaja struja $i_{IG}(t)$ dostiće maksimum u trenutku $t = 0.007$ s .



Sl.5 Uporedni pregled rezultata proraćuna struje $i_{IG}(t)$ za slućajeve E0,IG-B, E2 i E6 kada je mreža jaka

Uporedni pregled rezultata analiza koji se odnose na struju $i_{SG}(t)$ koja teće iz SG-a dat je na sl.6. Sa sl.6 zaključujemo da je $i_{SG,max}|_{E0,SG-B} > i_{SG,max}|_{E4}$. Uticaj prikljućenog IG-a na struju koja teće iz SG-a je zanemarljiv i obratno. U slućaju ostrvskog rada maksimalna vrednost $i_{SG,max}|_{E0,SG-B}$ se dostiće u trenutku $t = 0.005$ s , dok se maksimum $i_{SG,max}|_{E4}$ dostiće u trenutku $t = 0.006$ s .

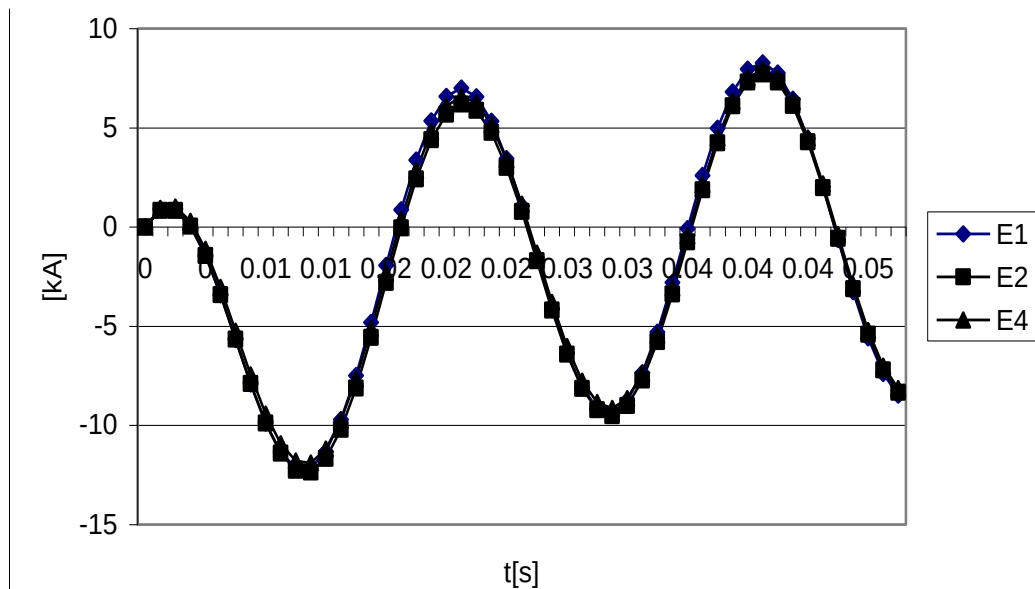


Sl.6 Uporedni pregled rezultata proračuna struje $i_{sg}(t)$ za slučajeve E0,SG-B, E4 i E7 kada je mreža jaka

2.2 Slaba mreža

Vrednosti struja $i_n(t)$ s udate na sl.7, sa koje zaključujemo: $\frac{i_{n,max}|_{E2}}{i_{n,max}|_{E1}} = 1.0182$ i $\frac{i_{n,max}|_{E4}}{i_{n,max}|_{E1}} = 0.98$.

Maksimalna vrednost $i_{n,max}|_{E1}$ se dostiže u trenutku $t = 0.01$ s, a maksimumi $i_{n,max}|_{E2}$ i $i_{n,max}|_{E4}$ u trenutku $t = 0.011$ s.

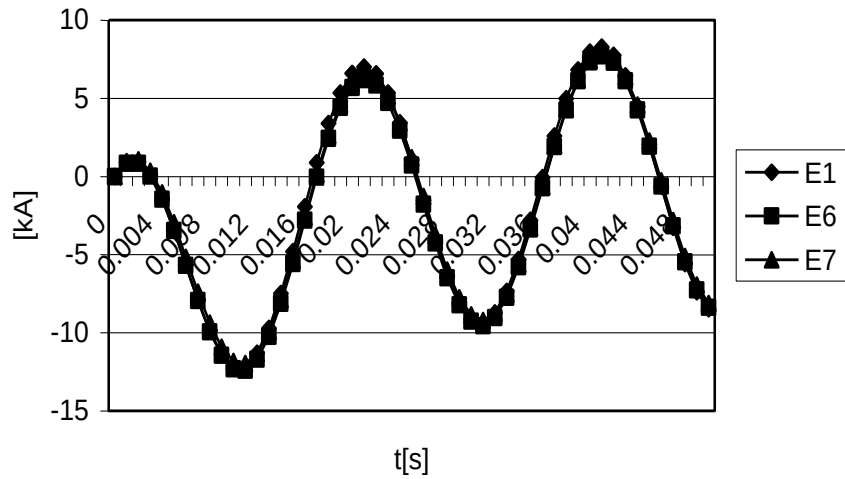


Sl.7 Uporedni pregled vrednosti struje $i_n(t)$ za slučajeve E1, E2 i E4 kada je mreža slaba

Vrednosti struje $i_n(t)$ za slučajeve kada su na izvod priključeni IG i SG prikazane su na sl.8. Proračun

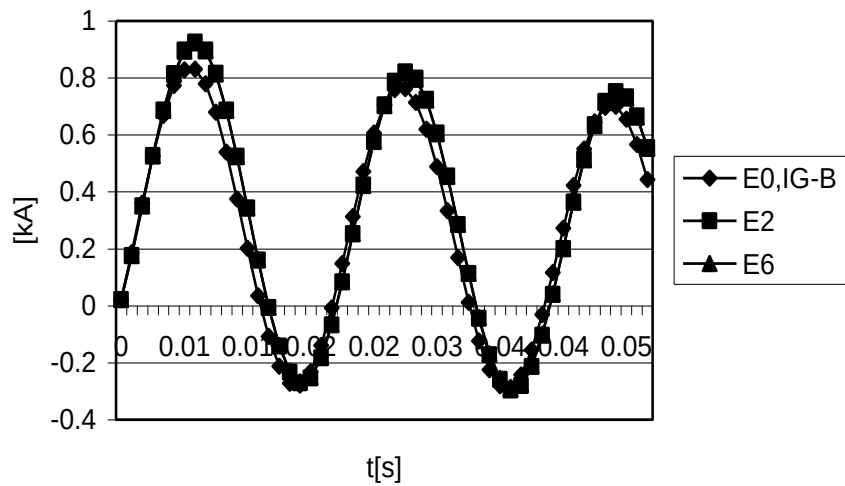
pokazuje da je $\frac{i_{n,max}|_{E6}}{i_{n,max}|_{E1}} = 1.0226$ i $\frac{i_{n,max}|_{E7}}{i_{n,max}|_{E1}} = 0.9868$. Upoređenjem rezultata sa sl.7 i sl.8

zaključujemo da je $i_{n,max}|_{E6} > i_{n,max}|_{E2}$ i $i_{n,max}|_{E7} > i_{n,max}|_{E4}$.

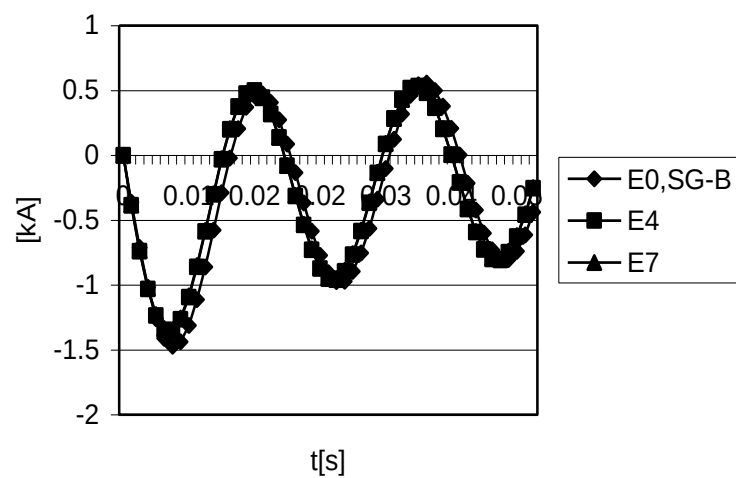


Sl.8 Uporedni pregled vrednosti struje $i_n(t)$ za slućajeve E1, E6 i E7 kada je mreža slaba

Rezultati proraćuna struje $i_{IG}(t)$ su dati na sl.9, a struje $i_{SG}(t)$ - na sl.10.



Sl.9 Uporedni pregled vrednosti struje $i_{IG}(t)$ za slućajeve E0,IG-B, E2 i E6 kada je mreža slaba



Sl.10 Uporedni pregled rezultata proraćuna struje $i_{SG}(t)$ za slućajeve E0,SG-B, E4 i E7 kada je mreža slaba

Prema sl. 9: $\frac{i_{IG,max}|_{E2}}{i_{IG,max}|_{E0,IG-B}} = 1.1143$. Maksimalna vrednost struje $i_{IG}(t)$ u svim analiziranim slučajevima nastupa u trenutku $t = 0.007$ s.

Prema sl.10: $i_{SG,max}|_{E0,SG-B} > i_{SG,max}|_{E4}$. Maksimalna vrednost struje $i_{SG}(t)$ u svim analiziranim slučajevima se ima u trenutku $t = 0.006$ s.

3 ZAKLJUČAK

Proračun struja koje za slučaj kvara na proizvoljnom mestu u mreži teku iz različitih tipova distribuiranih generatora je od suštinskog značaja u analizama aktivnih distributivnih sistema. Različiti tipovi izvora imaju različite odzive kada se kvar dogodi. Suštinski, odziv svakog od njih zavisi od vrste kvara i od toga koji izvori se nalaze sa iste strane mesta kvara.

Postupak izložen u radu omogućava detaljan proračun struja koje teku iz svih izvora i po svim deonicama mreže za slučaj trofaznog kratkog spoja na SN-izvodu na koji su priključeni različiti tipovi distribuiranih izvora, koji su mogu biti u paralelnom radu sa SN-mrežom ili u ostrvskom režimu rada. Za pogonsko stanje u kome na zadato mesto kvara struje dotiču iz tri izvora (SN-mreža, IG i SG), izvršene su sledeće analize i poređenja:

- Uticaj SN-mreže na maksimalne vrednosti struja koje, za kvar na datom mestu, teku iz IG-a i SG-a u slučaju paralelnog rada i upoređenje sa slučajem ostrvskog rada DG-a: Maksimalna vrednost struje $i_{IG}(t)$ koja teče iz IG-a za slučaj paralelnog rada je veća od maksimalne vrednosti struje koja teče iz IG-a za slučaj ostrvskog rada. Na drugoj strani, maksimalna vrednost struje $i_{SG}(t)$ koja teče iz SG-a za slučaj paralelnog rada je manja od maksimalne vrednosti ove struje koja iz SG-a teče za slučaj ostrvskog pogona. Struje $i_{IG}(t)$ i $i_{SG}(t)$ dostižu maksimalne vrednosti u različitim trenucima, bez obzira da li je mreža jaka ili slaba.

- Uticaj priključenog indukcionog generatora na struju $i_n(t)$ koja teče iz mreže za slučaj kvara na datom mestu i upoređenje sa strujom koja iz mreže teče za slučaj radijalnog pogona: Ako su IG i SN-mreža sa iste strane mesta kvara maksimalna vrednost struje koja teče iz mreže je veća od maksimalne vrednosti struje koja teče iz mreže za slučaj radijalnog pogona.

- Uticaj priključenog sinhronog generatora na struju $i_n(t)$ koja teče iz mreže za slučaj kvara na datom mestu i upoređenje sa strujom koja iz mreže teče za slučaj radijalnog pogona: Ako su SG i SN-mreža sa iste strane mesta kvara maksimalna vrednost struje koja teče iz mreže je manja od maksimalne vrednosti struje koja teče iz mreže za slučaj radijalnog pogona.

- Međusobni uticaj sinhronog generatora i indukcionog generatora. Ako su SG i IG sa iste strane mesta kvara, uticaj SG-a na vrednost struje $i_{IG}(t)$ je zanemarljiv, kao i uticaj IG-a na vrednost struje $i_{SG}(t)$.

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. V. Mijailović, A. Ranković "Proračun struje metalnog trofaznog kratkog spoja na SN-izvodu sa priključenim indukcionim i sinhronim generatorima –predlog modela-", rad prihvaćen i podnet za 35. savetovanje CIGRE Srbija, 2021.

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

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

Abstract— The paper presents calculation results of the three phase short circuit current on the MV feeder with connected induction (IG) and synchronous (SG) generator using the theorem of superposition. Analyses were performed for 10 kV cable feeder. Mutual influences of connected distributed generators and distribution network were analyzed, with regards to the characteristic values of short circuit current during the periods of higher and lower loads. Rated powers of connected distributed generators were determined under condition that maximum value of operating voltage must not be exceeded at the connection points.

Key words — Short circuit- Time- Induction generator- Synchronous generator- Distribution network- Maximum value