

# Specifičnosti proračuna struje kratkog spoja u mrežama sa različitim tehnologijama OiE

---

Jukić, Anica

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:360977>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-03**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**Specifičnosti proračuna struje kratkog spoja u mrežama sa  
različitim tehnologijama OiE**

**Diplomski rad**

**Anica Jukić**

**Osijek, 2022.**

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	1
<b>2. DOPRINOS STRUJI KRATKOG SPOJA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA ELEKTRANA NA OIE .....</b>	<b>2</b>
<b>3. KRATKI SPOJ .....</b>	<b>4</b>
3.1. Općenito o kratkom spoju .....	4
3.2. Mjerodavne struje kratkog spoja .....	5
<b>4. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA TEMELJENA NA INVERTERU .....</b>	<b>7</b>
4.1. Kratak spoj distribuirane proizvodnje temeljene na inverteru .....	8
4.2. Karakteristika kvara distribuirane proizvodnje temeljene na inverteru .....	9
<b>5. KRATKI SPOJ SINKRONI GENERATORA .....</b>	<b>10</b>
5.1. Kratki spoj daleko od generatora .....	10
5.2. Kratki spoj blizu generatora .....	15
5.2.1. Kratki spoj neopterećenog generatora .....	16
5.2.2. Kratki spoj opterećenog generatora .....	19
<b>6. REZULTATI SIMULACIJE KRATKOG SPOJA U DIGSILENT-U .....</b>	<b>22</b>
6.1. Kratak spoj mreže bez fotonaponskog sustava i bioplinske elektrane .....	24
6.1.1. Trofazni kratki spoj .....	25
6.1.2. Jednofazni kratki spoj .....	26
6.2. Kratak spoj mreže s priključenim fotonaponskim sustavom .....	28
6.2.1. Trofazni kratki spoj .....	29
6.2.2. Jednofazni kratki spoj .....	30
6.3. Kratak spoj mreže s priključenom bioplinskom elektranom .....	32
6.3.1. Trofazni kratki spoj .....	33
6.3.2. Jednofazni kratki spoj .....	34
6.4. Kratak spoj mreže s priključenim fotonaponskim sustavom i bioplinskom elektranom .....	36
6.4.1. Trofazni kratki spoj .....	37
6.4.2. Jednofazni kratki spoj .....	38
6.5. Grafički prikaz rezultata .....	40

<b>6.6. Doprinos struji kratkog spoja .....</b>	<b>43</b>
6.6.1. Doprinos fotonaponskog sustava struji kratkog spoja .....	43
6.6.2. Doprinos bioplinske elektrane struji kratkog spoja .....	45
6.6.3. Doprinos fotonaponskog sustava i bioplinske elektrane struji kratkog spoja .....	48
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>50</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>52</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>54</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>54</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>55</b>
<b>PRILOG .....</b>	<b>56</b>

# 1. UVOD

Zbog sve veće potrebe za električnom energijom te zamjenom konvencionalnih izvora energije koji su štetni za okoliš i iscrpljujući uvode se obnovljivi (distribuirani) izvori energije. Struja kratkog spoja konvencionalnih izvora napajana je sinkronim generatorom, odnosno ovisi o karakteristikama generatora, topologiji i parametrima mreže. Distribuirana proizvodnja temeljena na inverteru za povezivanje na mrežu koristi energetske elektronike koja ograničava struju kratkog spoja. Uvođenjem sve većeg broja distribuirane proizvodnje mijenja se dinamička karakteristika elektroenergetskog sustava. Promjenom fizičke prirode karakteristike kvara utječe se na samu zaštitu u elektroenergetskom sustavu. Kako bi se pravilno podesila zaštita elektroenergetskog sustava i ne bi utjecalo na njen rad potrebno je izvršiti proračun struje kratkog spoja koja izaziva termička i dinamička naprezanja.

Utjecaj i doprinos struji kratkog spoja različitih tehnologija obnovljivih izvora opisan je u drugom poglavlju na osnovu istraživanja na sličnu temu.

Treće poglavlje daje uvid u opću teoriju kratkog spoja kao što je kratak spoj, uzroci, posljedice, vrste te mjerodavne struje kratkog spoja.

Opis, doprinos struji kratkog spoja te karakteristika kvara distribuirane proizvodnje temeljene na inverteru dana je u četvrtom poglavlju.

Peto poglavlje bavi se fizikalnom osnovom kratkog spoja blizu sinkronog generatora i daleko od sinkronog generatora.

U šestom poglavlju dani su rezultati simulacije kratkog spoja za četiri slučaja te je izvršen proračun doprinosa fotonaponskog sustava i bioplinske elektrane struji kratkog spoja.

Na kraju je u sedmom poglavlju donesen zaključak iz rezultata simulacije i proračuna doprinosa struji kratkog spoja.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu je potrebno teorijski obraditi doprinos struji kratkog spoja različitih tehnologija elektrana na OiE: inverterske elektrane (FN i vjetar) i elektrane sa sinkronim strojevima (bioplina i biomasa). Pomoću računalnog programa, izvršiti primjer proračuna struje kratkog spoja u mreži s elektranama na OiE.

## **2. DOPRINOS STRUJI KRATKOG SPOJA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA ELEKTRANA NA OIE**

Udio distribuirane proizvodnje u mreži se povećava. Većina distribuirane proizvodnje je bazirana na inverteru i očekuje se da će taj broj rasti.

U literaturi [1] autori navode: „Kada se centralizirana proizvodnja zamijeni distribuiranom proizvodnjom, mijenja se nekoliko karakteristika sustava: sustav inercija i frekvencijski odziv, snaga kratkog spoja, varijabilnost proizvodnje... Sposobnost doprinosa struje kratkog spoja distribuirane proizvodnje temeljene na inverteru je ograničena. Međutim, pokazalo se da distribuirane jedinice mogu doprinijeti snazi kratkog spoja viših razina napona kako bi se djelomično kompenziralo smanjenje kratkog spoja koje nastaje kada distribuirane jedinice zamjenjuju centraliziranu proizvodnju. Kada distribuirane jedinice bez naponskog nosača zamjenjuju klasičnu proizvodnju, snaga kratkog spoja se smanjuje uglavnom na najvišoj naponskoj razini, a znatno manje na nižim naponskim razinama. Uz podršku napona, snaga kratkog spoja se manje smanjuje, a u nekim slučajevima se snaga kratkog spoja može čak i povećati. Ovo povećanje je uglavnom vidljivo na nižim razinama napona koje su bliže distribucijskim jedinicama, ostale lokalne mreže pod utjecajem su daleko manje.”

„Analizom veze između upravljačkih strategija invertera i karakteristika struje kratkog spoja distribuirane proizvodnje s inverterskim sučeljem otkriveno je da upravljačke strukture invertera i odgovarajući parametri utječu samo na prijelaznu struju kvara, a ne na trajnu struju kratkog spoja. Struje kvara u trajnom stanju usko su povezane s ciljevima sposobnosti prolaska kroz kvar i amperskim ograničenjem invertera” navode autori u literaturi [2].

Prema literaturi [3] „fotonaponski sustavi su jedni od najrasprostranjenih jedinica distribuirane proizvodnje i njihov doprinos radnim uvjetima kratkog spoja ovise o nekoliko čimbenika, kao što su uvjeti okoline, karakteristike upravljanja fotonaponskim sustavom inverterom, sustavi samozaštite te lokacija i vrsta kvara.”

U distribuiranu proizvodnju temeljenu na inverteru, osim fotonaponskih sustava, spadaju i vjetroelektrane za koje autori u literaturi [4] navode: „Važan aspekt istraživanja utjecaja vjetroelektrana je procjena doprinosa struje kratkog spoja u prijenosnoj mreži pod različitim uvjetima kvara kao što su jednofazni, dvofazni i trofazni kvarovi na različitim lokacijama u mreži. Ovaj zadatak može biti izazovan za inženjere zaštite zbog topoloških razlika između različitih tipova generatora vjetroturbina i konvencionalnih proizvodnih jedinica. Doprinos vjetroelektrane

strujama kvara će varirati ovisno o vrsti instaliranih generatora vjetroturbine. Struja kratkog spoja će biti određena fizičkim karakteristikama generatora i konfiguracijama transformatora sustava. Za neke vrste vjetroturbina, struja kratkog spoja će također ovisiti o kontrolnim algoritmima pretvarača snage, koje proizvođači vjetroturbina obično smatraju zaštićenim informacijama.”

Elektrane na biomasu i bioplin imaju sinkroni generator te se njihov doprinos struji kratkog spoja razlikuje od elektrana temeljenih na inverteru. Autori u istraživanju [5] navode da veličina doprinosa struji kratkog spoja ovisi o udaljenosti kvara od izvora (elektrane). Što je kvar dalje od izvora doprinos struji kratkog spoja će biti manji. Također, navode da je najgori slučaj kada su dva izvora (veći broj izvora) spojena na istu sabirnicu. U tom slučaju, ako dođe do kratkog spoja na sabirnici ili u njenoj blizini cijeli se vod mora isključiti.

### 3. KRATKI SPOJ

Ovo poglavlje preuzeto je iz mog završnog rada [6] na temu „Proračun struje kratkog spoja u niskonaponskim mrežama sa fotonaponskim elektranama”:

„Autor u literaturi [7] za kratak spoj navodi: „Kratki spojevi u elektroenergetskim sustavima ne mogu se izbjeći, unatoč detaljnom planiranju i projektiranju, dobrom održavanju i temeljitom radu sustava. To podrazumijeva utjecaje izvan sustava, poput kratkih spojeva uzrokovanih udarom groma u fazni vodič nadzemnog voda, oštećenja nastala pri montaži opreme, kao i unutarnji faktori, poput starenja izolacijskog materijala. Struja kratkog spoja dakle ima vrlo bitan utjecaj na projektiranje i rad opreme i elektroenergetskih sustava.”

#### 3.1. Općenito o kratkom spoju

Stanje kratkog spoja nastaje kada dvije točke postrojenja, koje se u normalnom pogonu nalaze na različitim potencijalima, dolaze u direktnu vodljivu vezu. Prema literaturi [7]: „Kod izbora električnih uređaja treba uzeti u obzir, ne samo kontinuirano naprezanje koje odgovara pogonskoj struji i naponu, već i naprezanje zbog kratkih spojeva. Struje kratkog spoja dosežu višestruku vrijednost nazivnih struja”, osim u slučaju kada je impedancija strujnog kruga velika. Tada je struja kratkog spoja reda veličine pogonske struje. Zbog višestrukih iznosa struje kratkog spoja dolazi do termičkog i mehaničkog naprezanja. Termičko naprezanje izaziva zagrijavanje vodiča, a ono ovisi o vremenu i jačini struje kratkog spoja. Autor u literaturi [8] za mehaničko naprezanje navodi: „Mehaničko naprezanje dovodi do lomova konstrukcijskih dijelova postrojenja, te najviše stradavaju rasklopna postrojenja, namoti transformatora i glave namota generatora.”

Prema [9] uzroci kratkog spoja dijele se na:

- „Uzroke prolazne naravi (unutarnji i vanjski prenaponi, orošenje izolacije zbog električnog luka, dodir kod njihanja vodiča, premoštenjem nekim stranim tijelom koje izgori)
- Uzroke trajne naravi (onečišćenja izolatora, lom izolatora i pad vodiča na konzolu ili drugi vodič, premoštenje stranim tijelom koje ne izgori)”

Kod prolaznog uzroka stvori se na mjestu kratkog spoja električni luk koji se održava i nakon nestanka uzročnika (održava kratak spoj). Tek kad vod isključimo nestane luk, a time i kratak spoj. Kod trajnog uzroka kratkog spoja nema električnog luka, a nakon ponovnog uključivanja voda imat ćemo i dalje kratak spoj.



Prema [9] posljedice kratkog spoja su:

- „Pojava velikih struja, te termičkih i dinamičkih naprezanja vodiča i opreme
- Na mjestu kvara nastaje slom napona (zaustavljanje motora u blizini mjesta kvara i gubitak stabilnosti mreže)
- Smetnje na dojavnim vodovima (indukcijom kod nesimetričnih kvarova)
- Razlike potencijala kod uzemljivača (u slučaju kvara gdje dolazi do spoja sa zemljom) ”

Prema literaturi [10]: „Na mjestu kratkog spoja postoji otpor. To je obično otpor električnog luka. Ako na mjestu kratkog spoja nema otpora, onda takav kratki spoj nazivamo – direktni kratki spoj.”

Prema [9] vrste kratkih spojeva:

- „Trofazni kratki spoj-simetrični (spoj tri faze međusobno i sa zemljom)
- Dvofazni kratki spoj (spoj dve faze međusobno i sa zemljom)
- Dvofazni dozemni kratki spoj (spoj dvije faze sa zemljom u mreži s izoliranim zemljištem)
- Dvofazni zemljospoj (spoj svake od dvije faze sa zemljom zasebno)
- Jednofazni kratki spoj (spoj jedne faze sa zemljom u mreži s uzemljenim zvjezdištem)
- Zemljospoj (spoj jedne faze sa zemljom) ”

### **3.2. Mjerodavne struje kratkog spoja**

Kod proračuna kratkog spoja od najveće važnosti su maksimalna i minimalna struja kratkog spoja.

Autor u literaturi [11] za maksimalnu struju kratkog spoja navodi: „Maksimalna struja kratkog spoja služi za određivanje prekidne i uklopne moći prekidača te elektrodinamičkih naprezanja vodiča i sklopnih aparata. Maksimalna struja kratkog spoja odgovara struji kratkog spoja u neposrednoj blizini izlaznih stezaljki zaštitnog uređaja, pri čemu uz maksimalni doprinos elektrana (u slučaju visokonaponske mreže) ili transformatora (u slučaju niskonaponske mreže), treba odabrati takvu konfiguraciju sustava koja na mjestu kvara daje najveću struju kratkog spoja.”

Prema literaturi [11]: „Minimalna struja kratkog spoja u niskonaponskoj mreži odgovara struji jednofaznog kratkog spoja, odnosno u visokonaponskoj mreži struji dvofaznog kratkog spoja na kraju štice vodova. Pri tome uz minimalni doprinos elektrana (u slučaju visokonaponske mreže) ili transformatora (u slučaju niskonaponske mreže), treba odabrati takvu konfiguraciju sustava, koja na mjestu kvara daje najmanju struju kratkog spoja.” Minimalna struja kratkog spoja služi za podešavanje zaštite u visokonaponskim mrežama.

U distribucijskoj mreži, s obzirom na njenu strukturu, napajanje može biti jednostrano ili dvostrano (s rezervnim napajanjem), pa tako i struju kratkog spoja na mjestu kvara uvijek čini jedna ili dvije komponente i to one koje dolaze iz smjera napajanja.”

## 4. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA TEMELJENA NA INVERTERU

Distribuirana proizvodnja je izvor električne energije koji se nalazi u blizini opterećenja i međusobno se povezuju s električnim distribucijskim sustavom. Uključuje fosilna goriva, obnovljive izvore i tehnologije skladištenja energije. Pojedinačne jedinice distribuirane proizvodnje manje su od 10 MVA i mogu se koristiti pojedinačno ili zajedno. Dodavanjem novih izvora u elektroenergetskom sustavu povećava se količina raspoložive struje kvara, a time i utjecaj na zaštitne uređaje u distribucijskim sustavima. [12]

Energetska elektronika u sustavu distribuirane proizvodnje omogućuje međusobno povezivanje raznovrsnih izvora energije s elektroenergetskim sustavom. Može poboljšati kvalitetu energije poboljšanjem harmonika i pružanjem brzog vremena prebacivanja za osjetljiva opterećenja. Također, na priključnoj točki distribuirane proizvodnje osigurava kontrolu jalove snage i regulaciju napona. Najčešće korišteni sustavi energetske elektronike kod distribuirane proizvodnje su pretvarači. [12]

Uređaji energetske elektronike se uključuju i isključuju na kontroliran način kako bi regulirali tok električne energije. Neki od uređaja sa specifičnim svojstvima su:

- Diode – elementi s dvije elektrode koje provode struju samo u jednom smjeru i blokiraju napon u suprotnom smjeru. Osim za ispravljanje koriste se i za stabilizaciju i ograničavanje napona, uklapanje strujnih krugova, miješanje visokofrekventnih signala...
- Tiristori – jednosmjerni su i koriste se kao sklopke koje reagiraju na prijelomni napon. Imaju najveću mogućnost upravljanja snagom od svih poluvodičkih uređaja i sporiju frekvenciju prebacivanja od ostalih uređaja.
- IGBT tranzistori – sklopke koje kontroliraju tok snage pomoću napona na *gate*-u i mogu se prebacivati na visokim frekvencijama. Ograničena im je sposobnost opskrbe strujama kvara.
- MOSFET – sklopka kojom se kontrolira napon na *gate*-u. Nalaze se u niskonaponskim sustavima i sustavima male snage jer u sustavima veće snage imaju velike gubitke vodljivosti. Sposobni su za najviše frekvencije prebacivanja i imaju visoke ulazne impedancije. [12]

#### **4.1. Kratak spoj distribuirane proizvodnje temeljene na inverteru**

U literaturi [12] autori navode: „Godine 1985. i 1986. New England Electric instalirao je 30,2 kW fotonapona sa statičkim pretvaračima snage na jednoj fazi na kraju 13,8 kV-nog dovoda u Gardneru, Massachusetts. Uslužni program proveo je opsežno testiranje kako bi utvrdio može li statički pretvarač snage pouzdano detektirati očne uvjete i kvarove s i bez uslužnih izvora. Tijekom eksperimenta, pokazalo se da inverteri doprinose maloj, kratkoj strujnoj tranziciji tijekom kvarova. Ovaj prijelazni proces bio je manji od 200% nazivne vršne struje invertera i trajao je manje od 200 $\mu$ s. Inverter se isključio unutar pola ciklusa od kvara i nije utjecao na normalne sustave zaštite napajanja.

U izvješću EPRI-a iz 1990. koje je pokrivalo studiju Gardnera, Massachusetts, nalazi su bili slični. Struja kvara koju osiguravaju inverter bila je ograničena; maksimalna uočena struja kvara nije bila veća od 150% nazivne struje invertera. Konačni zaključak EPRI izvješća bio je da je prodiranje fotonapona od 37% u Gardneru postignuta bez vidljivih problema u bilo kojem od četiri proučavana područja (usporena tranzicija u stabilnom stanju poput prolaznih pojava oblaka; fotonaponski odgovor pod brzim prijelaznim pojavama kao što je nenamjerno otpuštanje, kvarovi i svjetlosni udari, fotonaponski učinci na harmonike sustava i utjecaj na distribucijski sustav visokog prodiranja fotonapona). Na relativno visokim razinama prodiranja fotonaponski sustavi nisu negativno utjecali na rad distribucijskog sustava.

Studija GE-a o kvaliteti distribuiranih generatora, zaštiti i pouzdanosti energije pokazala je da za razine prodiranja distribuirane proizvodnje od 40% regulacija napona može biti ozbiljan problem (GE 2003). Iznenadni gubitak distribuirane proizvodnje može dovesti do neprihvatljivo niskih napona u dijelovima sustava. Budući da je GE pretpostavio da distribuirana proizvodnja bazirana na inverteru nije značajno pridonijela strujama kvara, distribuirana proizvodnja nije negativno utjecala na strategije koordinacije zaštite. Međutim, studije također pokazuju da to možda nije uvijek točno ako je distribuirana proizvodnja spojena na točki gdje je impedancija uslužnog izvora neobično visoka (slab sustav). Ovi rezultati pokazuju da na višim razinama prodiranja može biti korisno imati invertere u uvjetima kvara.”

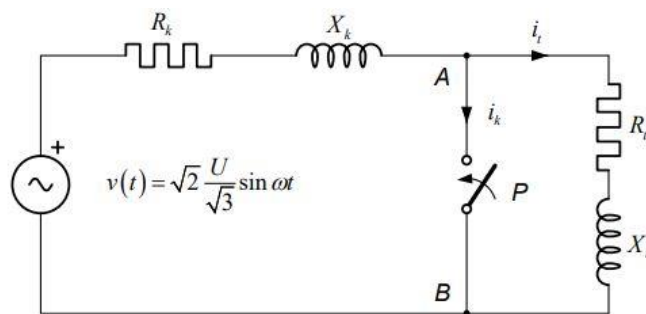
## **4.2. Karakteristika kvara distribuirane proizvodnje temeljene na inverteru**

Inverteri imaju mnogo brže opadanje ovojnice struje kratkog spoja od rotirajući strojeva jer nemaju pretežno induktivnu karakteristiku. Za razliku od rotirajući strojeva, mogu se upravljati jer su programirani da mijenjaju duljinu vremena koje je potrebno da reagiraju na kvar čime se također utječe na karakteristiku kvara. Upravljanje se vrši shemom upravljanja naponom ili shemom upravljanja strujom. Kondenzator istosmjerne veze između invertera i jedinice distribuirane proizvodnje održava napon gotovo konstantnim tijekom prijelaznih uvjeta. Shema regulacije napona ima veće početno prekoračenje struje, dok shema upravljanja strujom ima mnogo sporiji porast i opada natrag na stabilne vrijednosti. Doprinos struji kvara bit će veći tijekom prijelaznog razdoblja ako je distribuirana proizvodnja pod shemom upravljanja naponom. [12]

## 5. KRATKI SPOJ SINKRONI GENERATORA

### 5.1. Kratki spoj daleko od generatora

Kratak spoj najčešće se događa u dijelu mreže gdje nemamo generatore. Distribucijska mreža može se smatrati daleko od generatora. U distribucijskoj mreži mogu se nalaziti elektrane na biomasu i bioplin koje imaju sinkrone generatore ali utjecaj generatora na okolnu distribucijsku mrežu je neznatan, dok pri proračunu takvih postrojenja moramo uzet u obzir generatore.



Sl. 5.1. Nadomjesna shema [13]

Nadomjesna shema sa slike 5.1. služiti će za analizu kratkog spoja, gdje strujni krug lijevo od prekidača predstavlja *Thèvenin*ov naponski izvor. *Thèvenin*ov naponski izvor sastoji se od serijske veze idealnog naponskog izvora efektivne vrijednosti  $\frac{U}{\sqrt{3}}$  i impedancije kvara  $\bar{Z}_k$ . Napon idealnog naponski izvor jednak je naponu praznog hoda između njegovi stezaljki koje predstavljaju točku s krutim naponom. Impedancija  $\bar{Z}_t$  je impedancija potrošača, dok se samim prekidačem simulira kratak spoj u trenutku  $t = 0$ . [13] Prema literaturi [13] „trenutačna fazna vrijednost  $v(t)$  izvora sinusoidalnog napona kružne frekvencije  $\omega = 2\pi f$ , koji reprezentira točku krutog napona, iznosi:

$$v(t) = \sqrt{2} \frac{U}{\sqrt{3}} \sin(\omega t + \psi) \quad (5-1)$$

gdje je  $\psi$  tzv. kut sklapanja napona koji opisuje razliku između trenutka nastupanja kratkog spoja ( $t = 0$ ) i trenutka kad sinusoida napona u uzlaznom smjeru prolazi kroz nulu (tzv. pozitivna nultočka).”

Trenutna vrijednost struje kratkog spoja  $i_k(t)$  se izražava nehomogenom diferencijalnom jednadžbom pomoću *II. Kirchoffovog zakona*:

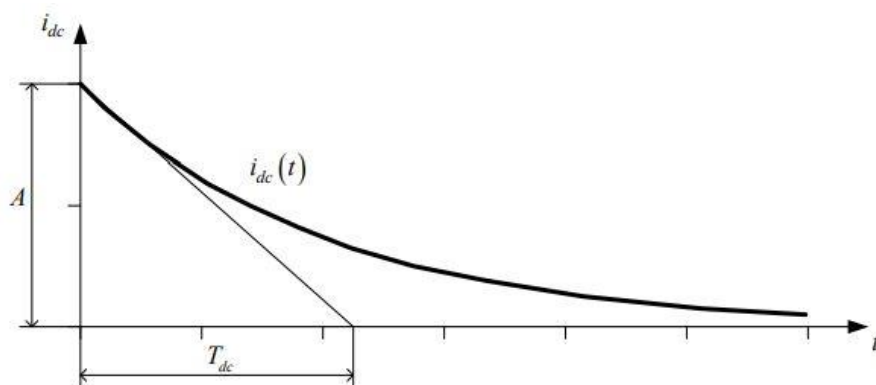
$$R_k i_k(t) + L_k \frac{di_k(t)}{dt} = v(t) = \sqrt{2} \frac{U}{\sqrt{3}} \sin(\omega t + \psi) \quad (5-2)$$

Ova jednađba ima dva rješenja:

1. opće homogeno rješenje koje predstavlja istosmjernu komponentu  $i_{dc}(t)$  struje kratkog spoja

$$R_k i_{dc}(t) + L_k \frac{di_{dc}(t)}{dt} = 0 \quad (5-3)$$

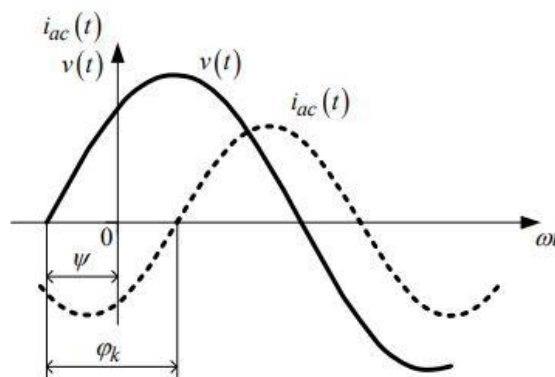
$$i_{dc}(t) = A \cdot e^{-\frac{R_k}{L_k} t} \quad (5-4)$$



Sl. 5.2. Istopmjerna komponenta  $i_{dc}(t)$  [13]

2. partikularno rješenje koje predstavlja izmjeničnu komponentu  $i_{ac}(t)$  struje kratkog spoja.

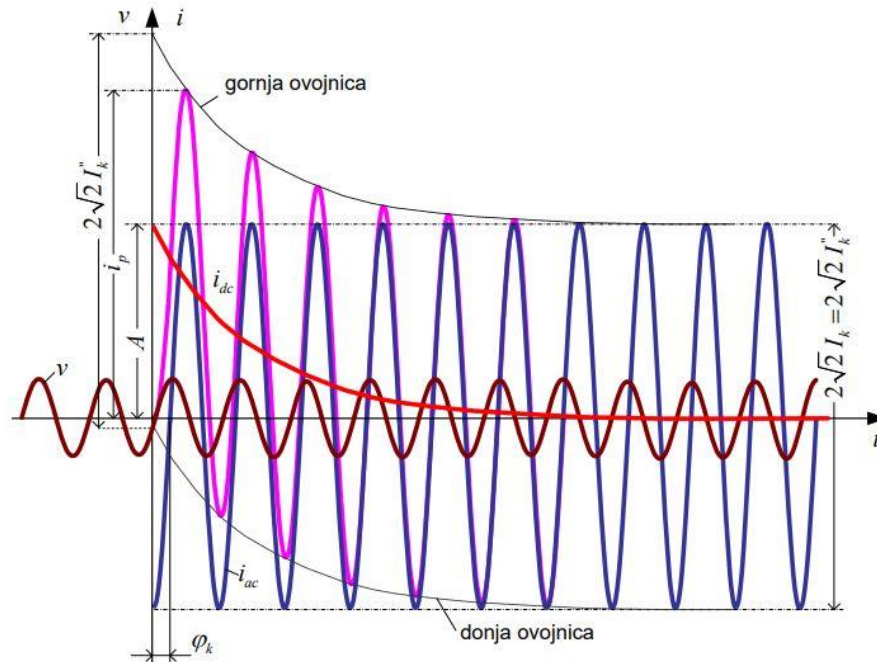
$$i_{ac}(t) = \sqrt{2} \frac{U}{\sqrt{3} Z_k} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) = \sqrt{2} I_{ac} \cdot \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) \quad (5-5)$$



Sl. 5.3. Izmjenična komponenta  $i_{ac}(t)$  [13]

Rješenje nehomogene diferencijalne jednačbe dobije se zbrajanjem prethodna dva rješenja:

$$i_k(t) = i_{dc}(t) + i_{ac}(t) = A \cdot e^{-\frac{R_k}{L_k}t} + \sqrt{2}I_{ac} \cdot \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) \quad (5-6)$$



Sl. 5.4. Tijek struje kratkog spoja  $i_k(t)$  kod kratkog spoja daleko od generatora [13]

Kod integracijske konstante  $A$  kreće se od toga da u strujnom krugu u trenutku  $t = 0$  već postoji trenutna struja opterećenja jer induktivitet  $L_k$  ne dopušta nagli skok akumulirane energije. Prema tome:

$$i_k(t = 0) = i_t(t = 0) \quad (5-7)$$

$$A + \sqrt{2}I_{ac} \cdot \sin(\psi - \varphi_k) = \sqrt{2}I_t \cdot \sin(\psi - \varphi_t) \quad (5-8)$$

$$A = \sqrt{2}[I_t \cdot \sin(\psi - \varphi_t) - I_{ac} \cdot \sin(\psi - \varphi_k)] \quad (5-9)$$

Uvrštavanjem prethodnog izraza u jednačbu struje kratkog spoja, te uzimajući u obzir da je

$\varphi_k = \frac{\omega L_k}{R_k}$ , dobije se:

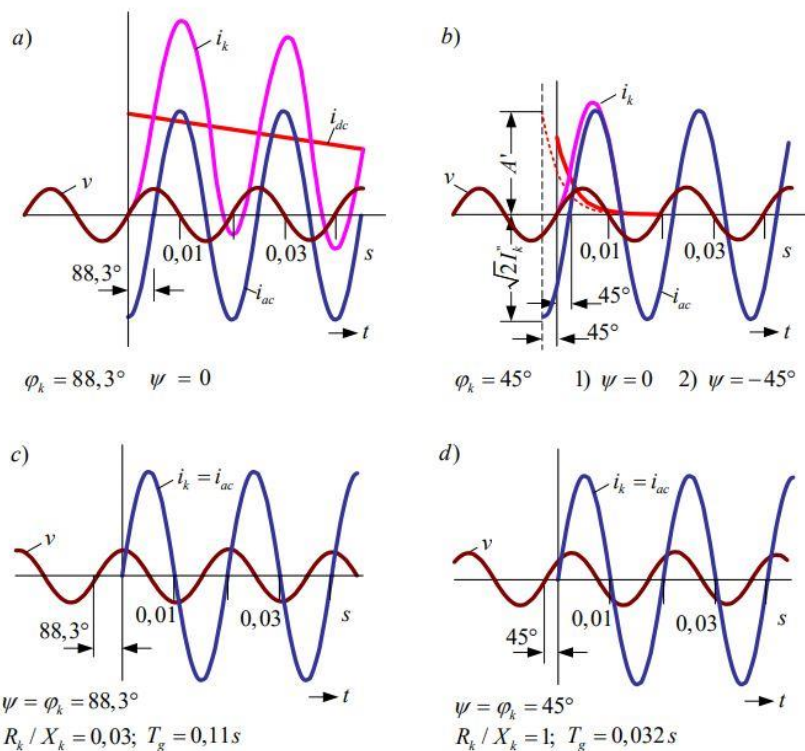
$$i_k(t) = \sqrt{2}I_{ac} \left\{ \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) + \left[ \frac{I_t}{I_{ac}} \cdot \sin(\psi - \varphi_t) - \sin(\psi - \varphi_k) \right] \cdot e^{-\frac{\omega t}{\tan \varphi_k}} \right\} \quad (5-10)$$



Doprinos struje opterećena struji kratkog spoja je neznatan, pa slijedi da je trenutna struja kod kvara daleko od generatora jednaka:

$$i_k(t) = \sqrt{2}I_{ac} \left\{ \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - \sin(\psi - \varphi_k) \cdot e^{-\frac{R_k}{L_k}t} \right\} \quad (5-11)$$

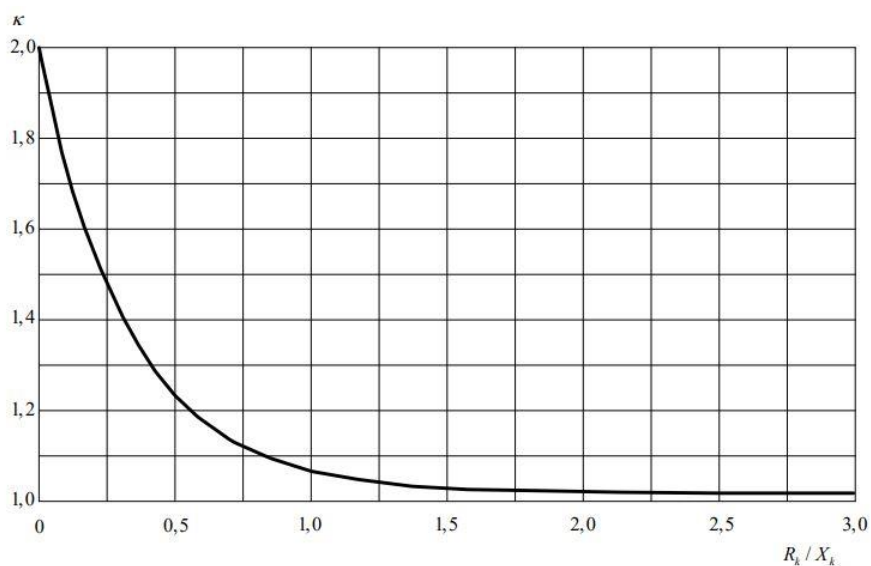
Istosmjerna komponenta nastaje zbog reakcije induktiviteta strujnog kruga koji se opire promjeni struje. Što je induktivitet izraženiji istosmjerna komponenta će biti veća i duže trajati. Kada bi imali samo induktivnu komponentu, što u realnim mrežama nije slučaj, istosmjerna komponenta bi bila konstantna, dok kod postojanja samo djelatne komponente impedancije kvara istosmjerna komponenta ne bi ni postojala. Također, istosmjerna komponenta ovisi i o tome kada kvar nastupi. Na slici 5.4. možemo uočiti da struja kvara kreće od nula jer je mreža u praznom hodu (nema struje), nakon čega raste na maksimalnu trenutnu vrijednost struje kratkog spoja koja se zove udarna struja kratkog spoja. Nakon perioda od  $5\tau$  ( $\tau = \frac{L_k}{R_k}$ ) istosmjerna komponenta iščezne, a struja kratkog spoja jednaka je efektivnoj vrijednosti izmjenične komponente struje ( $t \rightarrow \infty$ ). Ovaj prijelazni proces možemo podijeliti u tri dijela, a to su početni, tranzijentni i trajni dio. Kod kvara daleko od generatora efektivna vrijednost izmjenične komponente je konstantna, a time i vrijednosti  $U$  i  $Z_k$ , pa su nam početna i trajna struja jednake. S obzirom na to da istosmjerna komponenta iščezne, ona nam je bitna u početnom dijelu za određivanje udarne struje koja može uzrokovati velika mehanička naprezanja postrojenja i aparata. Udarna struja bitna nam je za dimenzioniranje opreme u postrojenjima, kao što su sabirnice jer zbog blizine faza struja kvara djeluju jedna na drugu silama. Kod dalekovoda to nije problem jer su faze dovoljno daleko jedna od druge, kao i kod kablova koji su u zemlji jer zemlja sprečava djelovanje sila. Udarna struja ovisi o trenutku nastupanja kvara  $\omega t$ , kutu sklapanja napona  $\psi$  te kutu impedancije  $\varphi_k$  i postiže najveću vrijednost pri kutu sklapanja napona  $\psi = 0^\circ$ . Ako je  $\psi = \varphi_k$  struja kratkog spoja jednaka je izmjeničnoj komponenti jer nema istosmjerne komponente.



Sl. 5.5. Valni oblici struje kratkog spoja i napona pri različitim kutovima  $\psi$  i  $\varphi_k$  [13]

Norma IEC ima dijagram iz kojeg se određuje koeficijent  $\kappa$  koji nam uzima u obzir istosmjerno uzvišenje i služi za određivanje udarne struje:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (5-12)$$

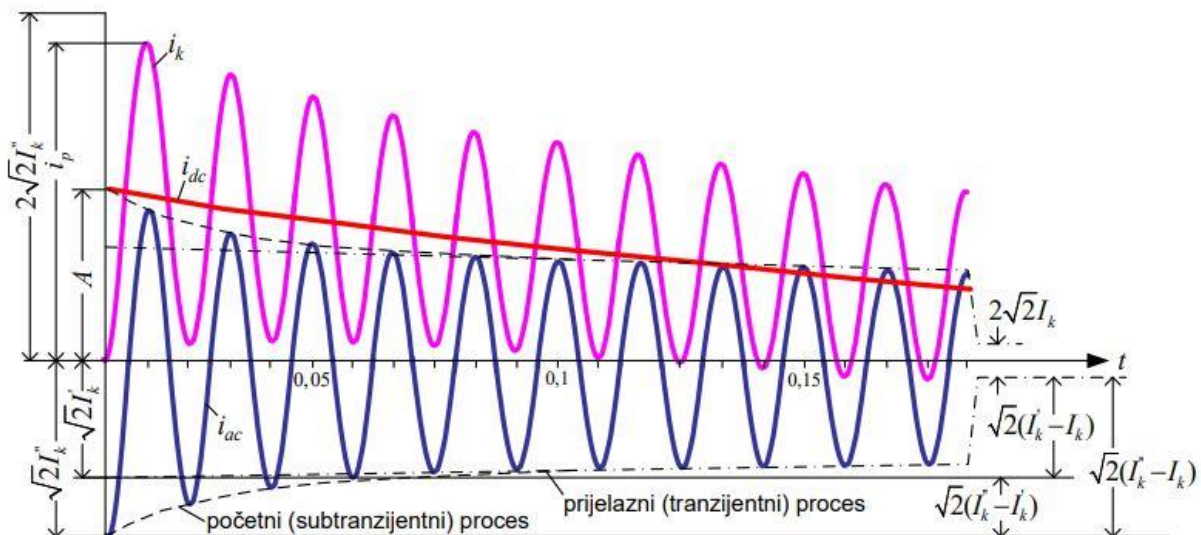


Sl. 5.6. Udarni faktor kapa [13]

Prema literaturi [13]: „Maksimalna vrijednost udarnog faktora iznosi 2,0 pri čemu će udarna struja kratkog spoja biti jednaka dvostrukoj amplitudi početne izmjenične struje kratkog spoja. U postrojenjima ovaj izrazito nepovoljan slučaj može se pojaviti ako se kratki spoj dogodi neposredno iza transformatora ili prigušnicâ za ograničenje struje kvara, dakle iza koncentriranih velikih induktivnih reaktancija.”

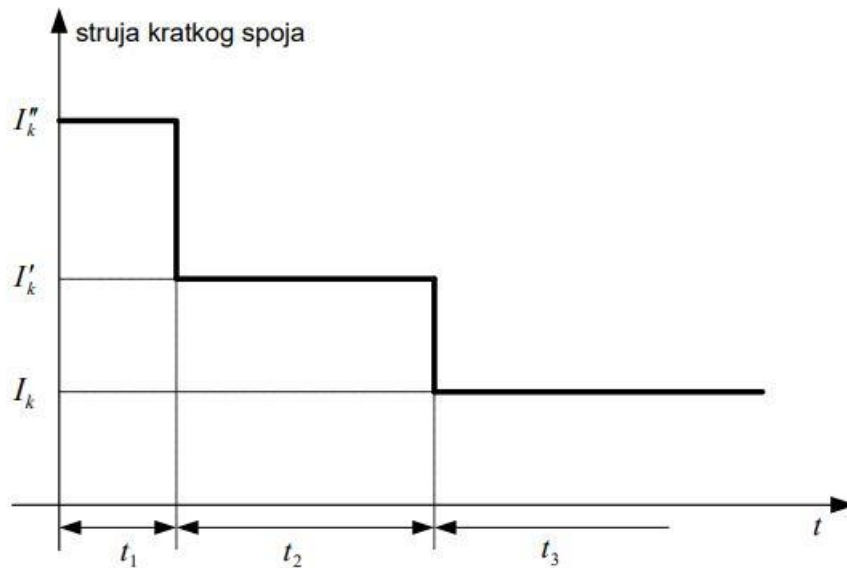
## 5.2. Kratki spoj blizu generatora

U prijenosnim mrežama s velikim elektranama generator ima značajan utjecaj i mora se u proračunu uzet u obzir. Također, kao što je navedeno, i u distribucijskoj mreži mogu se nalaziti elektrane na biomasu i bioplin koje imaju sinkrone generator te se kod tih postrojenja uzima u obzir generator. Ako u mreži imamo sinkrone motore i sinkrone kompenzatore, njihov je utjecaj u početnom dijelu struje kvara isti kao kod generatora te i njih moramo uzeti u obzir.



Sl. 5.7. Tijek struje kratkog spoja  $i_k(t)$  kod kratkog spoja blizu generatora [13]

Na struju kratkog spoja najveći utjecaj ima impedancija generatora te što je kvar bliže generatoru struja kratkog spoja bit će veća. Sa slike 5.7. uočavamo da kod kratkog spoja blizu generatora mijenja se i izmjenična komponenta, odnosno smanjuje se jer reaktancija unutar generatora i elektromotorna sila unutar generatora nisu konstantne. Istosmjerna komponenta ponaša se isto kao kod kvara daleko od generatora. Vrijeme trajanja kratkog spoja, isto kao i kod kvara daleko od generatora, možemo podijeliti na tri dijela: subtranzijentni, tranzijentni i trajni dio.



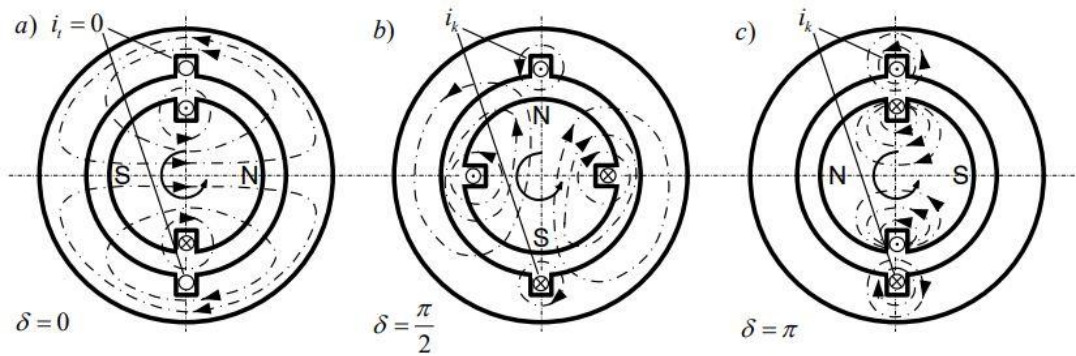
Sl. 5.8. Vrijeme trajanja pojedinih dijelova [13]

U početnom dijelu se pojavljuje velika struja kratkog spoja jer efektivna vrijednost izmjenična komponenta ima veliki iznos kao i istosmjerna komponenta, dok s vremenom struja kratkog spoja opada zbog opadanja efektivne vrijednosti izmjenične komponente i prigušenja istosmjerne komponente.

### 5.2.1. Kratki spoj neopterećenog generatora

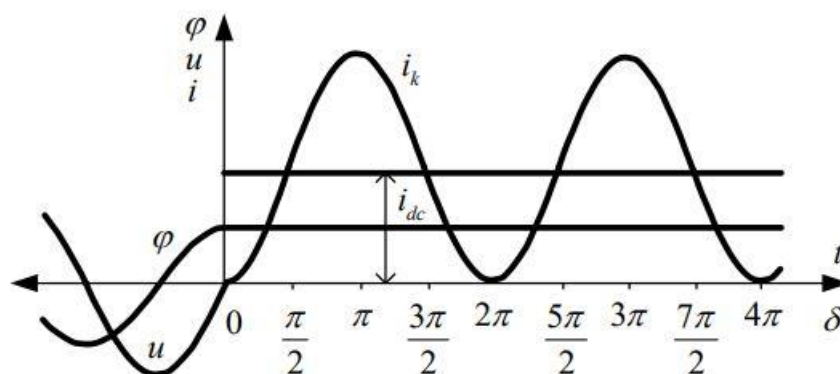
Na sinkronom generatoru postoji uzбудni namot na rotoru napajan istosmjernom strujom, prigušni namot na rotoru i armaturni namot na statoru. Generator nastoji očuvati rezultanti magnetno tok konstantnim, zbog čega se opire promjenama. Što su djelatni otpori veći, promjena će prije završiti, a time i opiranje promjenama. Međutim, kod generatora su djelatni otpori jako mali, zbog čega prijelazno stanje traje dugo.

„Najnepovoljniji je slučaj kad do kratkog spoja dođe na stezaljkama neopterećenog generatora upravo u trenutku prolaza napona kroz nulu, te pri nazivnom broju okretaja i konstantnoj uzbuđi koja na njegovim stezaljkama rezultira nazivnim naponom” navode autori u literaturi [13].



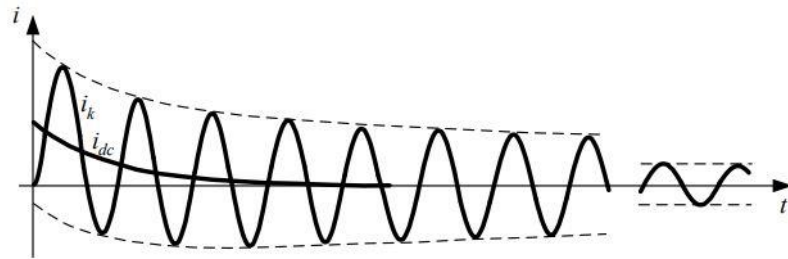
Sl. 5.9. Magnetski tokovi u neopterećenom turbogeneratoru bez prigušnog napona za vrijeme kvara u najnepovoljnijem slučaju [13]

Do kratkog spoja dolazi na stezaljkama generatora, a stator ne stvara tok jer je u praznom hodu (nema struje). Magnetski tok rotora obuhvaća statorski namot, a kut  $\delta$  između statora i rotora u trenutku nastanka kvara je  $0^\circ$ . Odmicanjem rotora od statora sve manje njegovog toka obuhvaća statorski namot. Stator nastoji održati tok te stvara vlastiti tok protjecanjem struje kroz stator koju omogućuje kratki spoj. Kod kuta  $\delta = \frac{\pi}{2}$  rotorski magnetski tok više ne obuhvaća statorski namot te stator mora stvoriti takav tok koji je jednak toku u trenutku nastanka kvara. Zbog što većeg odmicanja rotora na statoru se stvara još veća pulsirajuća struja koja je pomaknuta u smjeru pozitivne osi pomoću istosmjerne komponente (slika 5.10.) i ne prigušuje se jer je generator idealan (djelatni otpor namota jednak nuli). Osim što je pulsirajuće struje veća, statorski namot mora stvoriti i protuamperzavoje koji će se suprotstaviti uzbudnom magnetskom toku jer osim povećanja magnetskog toka uzbudnog namota tok ima i suprotan smjer. Najveća struja javlja se za kut zakretanja rotora  $\delta = \pi$ , nakon čega se daljnjim zakretanjem rotora smanjuje. [13]



Sl. 5.10. Struja u statorskom namotu idealnog sinkronog generatora [13]

U realnom generatoru djelatni otpor nije nula. Zbog opadanja magnetskog toka, radi pokrivanja gubitaka u namotima i željezu, struja kvara će opadati kao i istosmjerna i izmjenična komponenta.[13]



Sl. 5.11. Struja u statorskom namotu realnog sinkronog generatora [13]

Ako na generatoru ima prigušni namot, početna izmjenična struja bit će veća jer kroz stator ide još veća struja, ali će se brzo prigušiti. Na slici 5.11. vidimo da struja najbrže opada u početnom dijelu. Razlog tomu su vrtložne struje u polovima rotora, dok kod postojanja prigušnog namota opadanje će biti još veće radi velikog otpora prigušnog namota ( $\tau = \frac{L}{R}$ ). [13]

U praznom hodu unutarnja elektromagnetska sila i napon na stezaljkama generatora su jednake. Reaktancije su posljedica promjenjivosti magnetskog toka obuhvaćenog statorom, pa slijedi:

- Efektivna vrijednost struje kratkog spoja u subtranzijentnom dijelu:

$$I_k'' = \frac{E_0}{X_d''} = \frac{U_r}{\sqrt{3}X_d''} \quad (5-13)$$

- Efektivna vrijednost struje kratkog spoja u tranzijentnom dijelu:

$$I_k' = \frac{E_0}{X_d'} = \frac{U_r}{\sqrt{3}X_d'} \quad (5-14)$$

- Efektivna vrijednost struje kratkog spoja u trajnom dijelu:

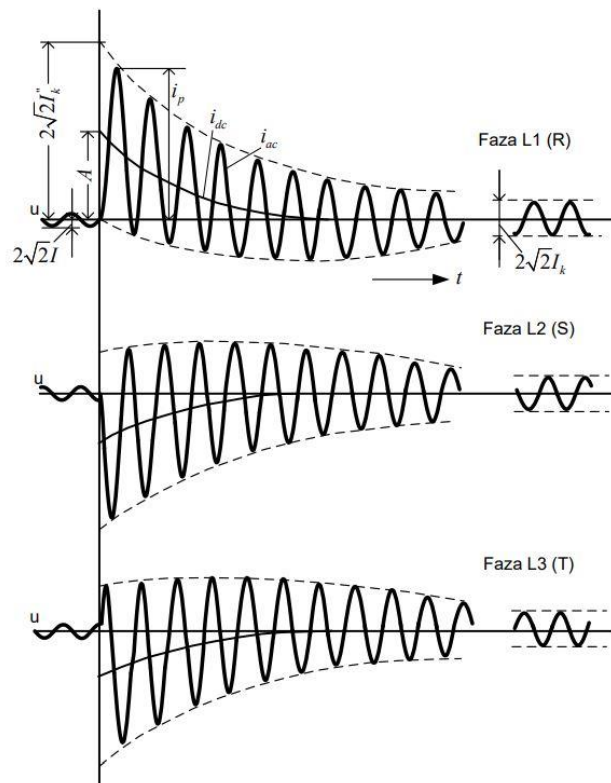
$$I_k = \frac{E_0}{X_d} = \frac{U_r}{\sqrt{3}X_d} \quad (5-15)$$

Vremenska promjena struje kratkog spoja:

$$i_k(t) = \sqrt{2} \left[ (I_k'' - I_k') \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I_k' - I_k) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_k \right] \cdot \sin(\omega t - \varphi_k) + \sqrt{2} I_k'' \cdot e^{-\frac{t}{T_{dc}}} \cdot \sin \varphi_k \quad (5-16)$$

Prema literaturi [13]: „Prvi je član jednadžbe subtranzijentni dio, drugi tranzijentni dio, treći trajni dio izmjenične komponente struje kratkog spoja, dok četvrti član predstavlja istosmjernu komponentu.”

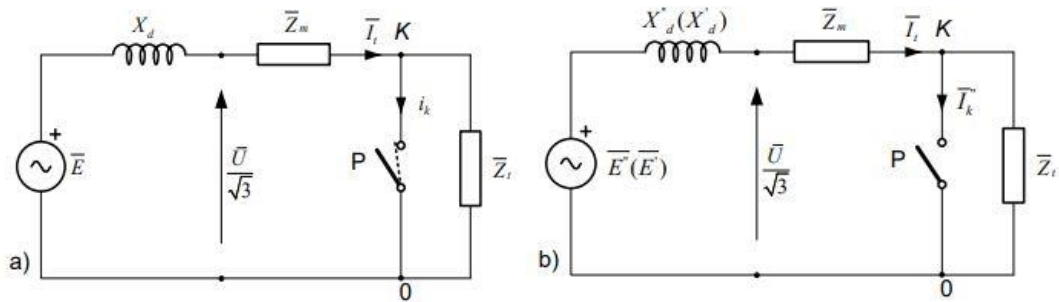
Kod kratkog spoja u sve tri faze struje su pomaknute za 120 stupnjeva.



Sl. 5.12. Struja trofaznog kratkog spoja u sve tri faze [13]

### 5.2.2. Kratki spoj opterećenog generatora

Sinkroni generator je rijetko kada u praznom hodu, priključen je na mrežu i proizvodi djelatnu snagu. Generator je opterećen impedancijom tereta  $Z_t$  kroz koju teče struja tereta  $I_t$  koja je bitna u proračunu kratkog spoja. Za proračun je bitno poznavati struju tereta  $I_t$ , što je veliki problem jer se opterećenje mijenja u mreži i ne znamo trenutak nastanka kvara. Napon stezaljki i unutarnja elektromotorna sila generatora nisu jednaki. Unutarnja elektromotorna sila je veća od faznog napona na stezaljkama generatora za pad napona na sinkronoj reaktanciji koji je posljedica toka struje tereta  $I_t$  (slika 5.13.).



Sl. 5.13. Nadomjesna shema [13]

$$\bar{E} = \frac{\bar{U}}{\sqrt{3}} + jX_d\bar{I}_t \quad (5-17)$$

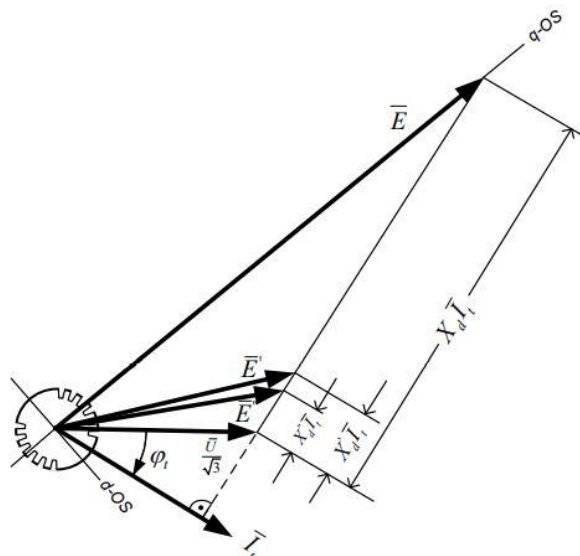
Subtranzijentna elektromotorna sila računa se u trenutku neposredno prije nastanka kvara,  $t = 0$ , uz pomoć struje opterećenja  $I_t$ .

$$\bar{E}'' = \frac{\bar{U}}{\sqrt{3}} + jX_d''\bar{I}_t \quad (5-18)$$

Tranzijentna elektromotorna sila računa se u trenutku tranzijentnog stanja, iza trenutka nastanka kvara:

$$\bar{E}' = \frac{\bar{U}}{\sqrt{3}} + jX_d'\bar{I}_t \quad (5-19)$$

Iz vektorskog dijagrama, slika 5.14., može se uočiti da je član  $X_d''\bar{I}_t$  manji od člana  $X_d\bar{I}_t$  jer je subtranzijentna reaktancija najmanja. Iz tog slijedi da je subtranzijentna elektromotorna sila  $\bar{E}''$  puno manja od ustaljene elektromotorne sile  $\bar{E}$ . Napon na stezaljkama je za vrijeme kvara konstantan.



Sl. 5.14. Vektorski dijagram opterećenog generatora [13]



Pošto je struju tereta nepoznata, norma IEC definira faktor napona  $c$  koji nam govori za koliko je subtranzijentna elektromotorna sila veća od napona na stezaljkama generatora. Iznad 1kV  $c=1,1$  za maksimalnu subtranzijentnu struju kvara, a za minimalnu subtranzijentnu struju kvara  $c=1$ . Za napon manji od ili jednak 1kV  $c=1,05$  za maksimalnu subtranzijentnu struju kvara, a za minimalnu subtranzijentnu struju kvara  $c=0,95$ .

$$c = \frac{E''}{\frac{U_n}{\sqrt{3}}} \quad (5-20)$$

Porastom ekvivalentne impedancije mreže raste njen utjecaj na struju kratkog spoj zbog čega je uzimamo u obzir u proračunu struje kratkog spoja:

$$I_k'' = \frac{E''}{Z_k''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k''} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{cU_n}{\sqrt{(R_G + R_m)^2 + (X_d'' + X_m)^2}} \quad (5-21)$$

$$I_k' = \frac{E'}{Z_k'} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{cU_n}{\sqrt{(R_G + R_m)^2 + (X_d' + X_m)^2}} \quad (5-22)$$

$$I_k = \frac{E}{Z_k} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{cU_n}{\sqrt{(R_G + R_m)^2 + (X_d + X_m)^2}} \quad (5-23)$$

Nakon izračuna subtranzijentne struje kvara možemo računati prividnu subtranzijentnu snagu kratkog spoja. Ta snaga nije stvarna, ne može se izmjeriti, jer se ne mogu istovremeno pojaviti napon i struja kvara.

$$S_k'' = \sqrt{3}U_n I_k'' \quad (5-24)$$

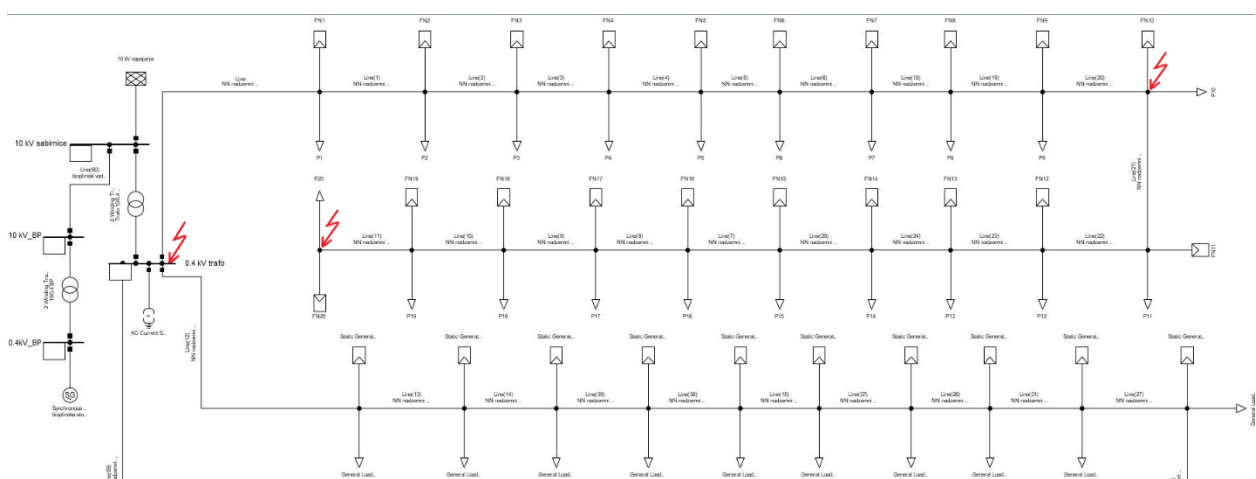
Pomoću te snage računamo ekvivalentnu impedanciju koja je korisna za zamjenu dijela mreže koju nadomještavamo s naponskim izvorom i tom ekvivalentnom impedancijom.

$$Z_{ekv} = \frac{cU_n^2}{S_k''} = \frac{cU_n^2}{\sqrt{3}I_k''} \quad (5-25)$$



S druge strane nalazi se bioplinska elektrana od 1MW koja koristi Jenbacher-ov motor JMS 320 GS 1063kW el.. Motor pokreće STAMFORD PI734C generator nazivne prividne snage 1550kVA, nazivnog faktora snage 0,8, nazivnog napona 0,4 V, nazivne struje 2237,23 A, nazivne frekvencije 50 HZ, broja polova 4, efikasnosti pri nazivnom faktori 1 od 97%. Detaljna specifikacija STAMFORD generatora dana je u prilogu P.6.1.. Bioplinska elektrana se spaja na 10 kV-nu sabirnicu (na mjestu spoja nadomjesne mreže i transformatora) preko KONČAR-evog transformatora i niskonaponskog nadzemnog voda. KONČAR-ev transformator je trofazni uljni transformator nazivne snage 1600 kVA, prijenosnog omjera 10/0,4 kV, napona kratkog spoja  $u_k=6\%$ , Dyn5 spoja te gubitaka u bakru 19800 W i gubitaka u željezu 2550 W. Podaci niskonaponskog voda dobili su se proračunom presjeka kabela. Pri proračunu presjeka kabela uzela se samo impedancija KONČAR-evog transformatora od 1600 kVA, jer je duljina kabela 500 m, odnosno kabel je kratak pa ga zanemarimo. Zanimarivanjem izvora dobije se manja ukupna impedancija, ali nešto veća struja kvara no na kraju dobijemo isti presjek kabela od 25 mm<sup>2</sup>. Pomoću Elka kataloga odabran je jednožilni AL kabel položen u trolist nazivnog napona 10 kV, nazivne struje 125 A, jediničnog otpora  $R(20^\circ) = 1,20 \frac{\Omega}{km}$ , jediničnog induktiviteta  $L = 0,46 \frac{mH}{km}$  te jediničnog kapaciteta  $C = 0,208 \frac{\mu F}{km}$ .

Potrebno je izvršiti proračun jednofaznog i trofaznog kratkog spoja pomoću programa DigSILENT te odrediti doprinos fotonaponskog sustava i bioplinske elektrane struji kratkog spoja. Proračun izvršiti za kratak spoj na sabirnici na početku odvoda (sabirnica 0,4 k V trafo), na čvoru na sredini odvoda te na čvoru na kraju odvoda kako je prikazano na slici 6.2..



Sl. 6.2. Kratak spoj sustava

## 6.1. Kratak spoj mreže bez fotonaponskog sustava i bioplinske elektrane

S obzirom na to da je sustav simetričan proračuni će se vršiti samo na jednom odvodu, odnosno pri ispisu rezultata promatrat će se samo jedan odvod.

Prvo se izvršila simulacija tokova snage te su rezultati prikazani u tablici 6.1.. Čvor P1 predstavlja spoj potrošača P1 i fotonapona FN1, čvor P2 predstavlja spoj potrošača P2 i fotonapona FN2 na niskonaponsku mrežu... Nadalje, vod 1 je vod između sabirnice 0.4 kV trafo i čvora P1, vod 2 je vod između čvora P1 i čvora P2, vod 3 je vod između čvora P2 i čvora P3...

Tablica 6.1. Tokovi snage

	<b>P [W]</b>	<b>Q [var]</b>	<b>u [p.u.]</b>
<i>10 kV sabirnica</i>	282224,860	267532,588	1,0
<i>0.4 kV trafo</i>	278471,320	258280,99	0,979
<i>Vod 1</i>	92823,62	2438,29	0,98
<i>Vod 2</i>	87584,60	2101,28	0,97
<i>Vod 3</i>	82431,67	1795,25	0,96
<i>Vod 4</i>	77361,59	1519,04	0,95
<i>Vod 5</i>	72370,95	1271,40	0,94
<i>Vod 6</i>	67456,20	1051,07	0,93
<i>Vod 7</i>	62613,63	856,71	0,93
<i>Vod 8</i>	57839,38	686,93	0,92
<i>Vod 9</i>	53129,44	540,28	0,91
<i>Vod 10</i>	48479,68	415,28	0,91
<i>Vod 11</i>	43885,80	310,39	0,90
<i>Vod 12</i>	39343,41	224,01	0,90
<i>Vod 13</i>	34847,97	154,53	0,89
<i>Vod 14</i>	30394,85	100,27	0,89
<i>Vod 15</i>	25979,31	59,53	0,88
<i>Vod 16</i>	21596,53	30,58	0,88
<i>Vod 17</i>	17241,59	11,64	0,88
<i>Vod 18</i>	12909,52	0,94	0,88
<i>Vod 19</i>	8595,29	-3,35	0,87
<i>Vod 20</i>	4293,82	-3,05	0,87

Promatrajući rezultate vidimo da napon opada kako se udaljavamo od izvora zbog gubitaka a i samog opterećenja u mreži.

### 6.1.1. Trofazni kratki spoj

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na sabirnici 0.4 kV trafo dobiveni su rezultati na slici 6.3..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1			
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Sk" [VA]	Ik" [A]	Ip [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	Ik [A]	Ith [A]
0.4 kV trafo	0,40	0,00	0,00	1,052546705,05 VA	18109,61 A	-77,47	39008,88 A	18109,61546704,90	18109,6118248,83		
2-Winding Trans	10 kV sabi			12546704,90 VA	18109,61 A	102,53	39008,88 A				
Line	čvor 1			0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				
Line(12)	Terminal(2)			0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				
Line(59)	Terminal(4)			0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				

Sl. 6.3. Trofazni kratki spoj na sabirnici 0.4 kV trafo

Sa slike 6.3. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 18109,61$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 12,5467$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 39,00089$  kA.

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P10 dobiveni su rezultati na slici 6.4..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1			
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Sk" [VA]	Ik" [A]	Ip [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	Ik [A]	Ith [A]
čvor 10	0,40	0,00	0,00	1,05 908076,26 VA	1310,70 A	-23,26	1892,37 A	1310,69908076,08	1310,69 1312,39		
Line(20)	čvor 9			908076,14 VA	1310,69 A	156,74	1892,37 A				
Line(21)	čvor 11			0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				

Sl. 6.4. Trofazni kratki spoj na čvoru P10

Sa slike 6.4. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 1310,70$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,908$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 1,892$  kA.

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P20 dobiveni su rezultati na slici 6.5..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	deg	c- Factor	Sk" [VA]	Ik" [A]	deg	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	Ik [A]	Ith [A]
čvor 20	0,40	0,00	0,00	1,05	463647,09 VA	669,22 A	-21,55	965,81 A	669,22	669,22	669,22	670,08
Line(11)	čvor 19				463647,08 VA	669,22 A	158,45	965,81 A				

Sl. 6.5. Trofazni kratki spoj na čvoru P20

Sa slike 6.5. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 669,22$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,463$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 965,81$  A.

Uočavamo da se vrijednosti trofaznog kratkog spoja smanjuju kako se približavamo kraju odvoda. Razlog tomu je sve manji doprinos struji kratkog spoja udaljenih elemenata mreže kako se približavamo kraju odvoda.

### 6.1.2. Jednofazni kratki spoj

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na sabirnici 0.4 kV trafo dobiveni su rezultati na slici 6.6..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	deg	c- Factor	Sk" [VA]	Ik" [A]	deg	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
0.4 kV trafo	A	0,40	0,00	0,00	1,05	4931176,97 VA	21352,62 A	-80,18	45994,47 A	21352,62	4931176,97	0,00
	B		0,24	-109,27		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,98
	C		0,21	111,69		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,87
2-Winding Trans	10 kV sabi				A	4931176,93 VA	21352,62 A	99,82	45994,47 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
Line	čvor 1				A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 2				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	deg	c- Factor	Sk" [VA]	Ik" [A]	deg	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
Line(12)	Terminal(2)				A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
Line(59)	Terminal(4)				A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
AC Current Sour					A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			

Sl. 6.6. Jednofazni kratki spoj na sabirnici 0.4 kV trafo

Sa slike 6.6. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 21352,62$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 4,93$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 45,994$  kA.

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P10 dobiveni su rezultati na slici 6.7..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko					Annex: / 1					
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV]		c- Factor	Sk" [VA ]	Ik" [A ]	[deg]	ip [A ]	Ib [A ]	Sb [VA ]	EFF [-]
čvor 10	A	0,40	0,00	0,00	1,05	305378,61 VA	1322,33 A	-22,84	1909,16 A	1322,33	305378,61	0,00
	B		0,24	-119,77		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,99
	C		0,24	119,35		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	1,00
Line(20)			čvor 9			A	305378,57 VA	1322,33 A	157,16	1909,16 A		
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
Line(21)			čvor 11			A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A		
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko					Annex: / 2					
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV]		c- Factor	Sk" [VA ]	Ik" [A ]	[deg]	ip [A ]	Ib [A ]	Sb [VA ]	EFF [-]
P10						A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A		
						B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A		
						C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A		

Sl. 6.7. Jednofazni kratki spoj na čvoru P10

Sa slike 6.7. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 1322,33$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,305$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 1,909$  kA.

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P20 dobiveni su rezultati na slici 6.8..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko					Annex: / 1					
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV]		c- Factor	Sk" [VA ]	Ik" [A ]	[deg]	ip [A ]	Ib [A ]	Sb [VA ]	EFF [-]
čvor 20	A	0,40	0,00	0,00	1,05	155229,65 VA	672,16 A	-21,32	970,06 A	672,16	155229,65	0,00
	B		0,24	-119,89		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,99
	C		0,24	119,67		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	1,00
Line(11)			čvor 19			A	155229,65 VA	672,16 A	158,68	970,06 A		
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
P20						A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A		
						B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A		
						C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A		

Sl. 6.8. Jednofazni kratki spoj na čvoru P20

Sa slike 6.8. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 672,16$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,155$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 970,06$  A.

I u ovom slučaju se vrijednosti kratkog spoja smanjuju kako se približavamo kraju odvoda. Također možemo primijetiti da su struje jednofaznog kratkog spoja veće od struja trofaznog kratkog spoja.

## 6.2. Kratak spoj mreže s priključenim fotonaponskim sustavom

Kod modeliranja invertera u fotonaponskom sustavu za vrijeme kvara podešeno je da struja poraste za 10% nazivne vrijednosti struje, odnosno da je struja kvara 1,1 nazivne vrijednosti struje, u skladu s istraživanjem u poglavlju 4.

U tablici 6.2. prikazani su tokovi snage za slučaj priključenog fotonaponskog sustava na mrežu.

Tablica 6.2. Tokovi snage s priključenim fotonaponskim sustavom

	<b>P [W]</b>	<b>Q [var]</b>	<b>u [p.u.]</b>
<i>10 kV sabirnica</i>	180574,998	262269,453	1,0
<i>0.4 kV trafo</i>	183522,509	256038,893	0,987
<i>Vod 1</i>	-61173,67	1012,78	0,99
<i>Vod 2</i>	-58374,96	868,72	0,99
<i>Vod 3</i>	-55535,61	739,29	1,0
<i>Vod 4</i>	-52658,01	623,61	1,01
<i>Vod 5</i>	-49744,49	520,85	1,01
<i>Vod 6</i>	-46797,32	430,17	1,02
<i>Vod 7</i>	-43818,76	350,78	1,02
<i>Vod 8</i>	-40811,00	281,88	1,03
<i>Vod 9</i>	-37776,20	222,69	1,03
<i>Vod 10</i>	-34716,49	172,44	1,03
<i>Vod 11</i>	-31633,98	130,38	1,04
<i>Vod 12</i>	-28530,76	95,76	1,04
<i>Vod 13</i>	-25408,79	67,85	1,04
<i>Vod 14</i>	-22270,18	45,92	1,05
<i>Vod 15</i>	-19116,92	29,24	1,05
<i>Vod 16</i>	-15950,99	17,12	1,05
<i>Vod 17</i>	-12774,36	8,82	1,05
<i>Vod 18</i>	-9589,00	3,67	1,05
<i>Vod 19</i>	-6396,86	0,94	1,05
<i>Vod 20</i>	-3199,88	-0,05	1,05

Iz rezultata vidimo da se promijenio tok snage, odnosno u ovom slučaju imamo višestranu napajanu mreže. Također su se promijenile i naponske prilike u mreži.



### 6.2.1. Trofazni kratki spoj

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na sabirnici 0.4 kV trafo dobiveni su rezultati na slici 6.9..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Sk" [VA]	Ik" [A]	Ip [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	Ik [A]	Ith [A]	
0.4 kV trafo	0,40	0,00	0,00	1,053155192,03 VA	18987,88 A	-77,43	40879,87 A	18987,88155192,03	18987,8819133,52			
2-Winding Trans	10 kV sabi			12546704,90 VA	18109,61 A		38988,99 A					
Line	čvor 1			202856,32 VA	292,80 A		630,38 A					
Line(12)	Terminal(2			202856,32 VA	292,80 A		630,38 A					
Line(59)	Terminal(4			202856,32 VA	292,80 A		630,38 A					

Sl. 6.9. Trofazni kratki spoj na sabirnici 0.4 kV trafo

Sa slike 6.9. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 18987,88$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 13,155$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 40,879$  kA.

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P10 dobiveni su rezultati na slici 6.10..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Sk" [VA]	Ik" [A]	Ip [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	Ik [A]	Ith [A]	
čvor 10	0,40	0,00	0,00	1,05 996620,98 VA	1438,50 A	-30,61	2231,73 A	1438,50996620,98	1438,50	1441,58		
Line(20)	čvor 9			927560,00 VA	1338,82 A		2077,08 A					
Line(21)	čvor 11			107820,41 VA	155,63 A		241,44 A					
FN10				11000,00 VA	15,88 A		24,63 A					

Sl. 6.10. Trofazni kratki spoj na čvoru P10

Sa slike 6.10. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 1438,5$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,9966$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 2,232$  kA.

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P20 dobiveni su rezultati na slici 6.11..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Sk" [VA]	Ik" [A]	Ip [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	Ik [A]	Ith [A]	
čvor 20	0,40	0,00	0,00	1,05 508470,82 VA	733,91 A	-29,22	1137,47 A	733,91508470,82	733,91	735,48		
Line(11)	čvor 19			502253,03 VA	724,94 A		1123,56 A					
FN20				11000,00 VA	15,88 A		24,61 A					

Sl. 6.11. Trofazni kratki spoj na čvoru P20

Sa slike 6.11. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 733,91$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,5085$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 1137,47$  A.

Uočavamo da se vrijednosti trofaznog kratkog spoja smanjuju kako se približavamo kraju odvoda. Razlog tomu je sve manji doprinos struji kratkog spoja udaljenih elemenata mreže kako se približavamo kraju odvoda.

### 6.2.2. Jednofazni kratki spoj

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na sabirnici 0.4 kV trafo dobiveni su rezultati na slici 6.12..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko				Annex: / 1						
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]		c- Factor	Sk'' [VA]	Ik'' [A]		ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
0.4 kV trafo	A	0,40	0,00	0,00	1,05	5022448,43 VA	21747,84 A	-80,21	46821,90 A	21747,84	5022448,43	0,00
	B		0,24	-109,30		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,98
	C		0,22	111,65		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,87
2-Winding Trans	10 kV sabi				A	4945010,60 VA	21412,52 A	99,77	46099,99 A			
					B	77447,44 VA	335,36 A	160,70	722,01 A			
					C	77446,83 VA	335,35 A	40,70	722,00 A			
Line	čvor 1				A	25815,98 VA	111,79 A	100,70	240,67 A			
					B	25815,81 VA	111,79 A	-19,30	240,67 A			
					C	25815,61 VA	111,78 A	-139,30	240,67 A			

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko				Annex: / 2						
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]		c- Factor	Sk'' [VA]	Ik'' [A]		ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
Line(12)	Terminal(2)				A	25815,98 VA	111,79 A	100,70	240,67 A			
					B	25815,81 VA	111,79 A	-19,30	240,67 A			
					C	25815,61 VA	111,78 A	-139,30	240,67 A			
Line(59)	Terminal(4)				A	25815,98 VA	111,79 A	100,70	240,67 A			
					B	25815,81 VA	111,79 A	-19,30	240,67 A			
					C	25815,61 VA	111,78 A	-139,30	240,67 A			
AC Current Sour					A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			

Sl. 6.12. Jednofazni kratki spoj na sabirnici 0.4 kV trafo

Sa slike 6.12. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 21747,84$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 5,0225$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 46,822$  kA.

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P10 dobiveni su rezultati na slici 6.13..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	Sk" [VA]	Ik" [A] [deg]		ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
čvor 10	A	0,40	0,00	0,00	1,05	315440,22 VA	1365,90 A	-25,15	2119,10 A	1365,90	315440,22	0,00
	B		0,25	-122,08		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,97
	C		0,25	117,04		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	1,06
Line(20)	čvor 9				A	307816,14 VA	1332,88 A	156,68	2067,88 A			
					B	12535,12 VA	54,28 A	163,22	84,21 A			
					C	12535,04 VA	54,28 A	43,22	84,21 A			
Line(21)	čvor 11				A	11375,48 VA	49,26 A	103,43	76,42 A			
					B	11375,40 VA	49,26 A	-16,57	76,42 A			
					C	11375,32 VA	49,26 A	-136,57	76,42 A			

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 2				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	Sk" [VA]	Ik" [A] [deg]		ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
P10					A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
FN10					A	1160,54 VA	5,03 A	-78,83	7,80 A			
					B	1160,54 VA	5,03 A	161,17	7,80 A			
					C	1160,53 VA	5,03 A	41,17	7,80 A			

Sl. 6.13. Jednofazni kratki spoj na čvoru P10

Sa slike 6.13. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 1365,90$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,315$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 2,119$  kA.

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P20 dobiveni su rezultati na slici 6.14..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	Sk" [VA]	Ik" [A] [deg]		ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
čvor 20	A	0,40	0,00	0,00	1,05	160287,31 VA	694,06 A	-23,73	1075,71 A	694,06	160287,31	0,00
	B		0,25	-122,30		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,97
	C		0,25	117,27		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	1,06
Line(11)	čvor 19				A	159628,25 VA	691,21 A	156,61	1071,29 A			
					B	1155,86 VA	5,01 A	161,20	7,76 A			
					C	1155,85 VA	5,00 A	41,20	7,76 A			
FN20					A	1155,87 VA	5,01 A	-78,80	7,76 A			
					B	1155,86 VA	5,01 A	161,20	7,76 A			
					C	1155,85 VA	5,00 A	41,20	7,76 A			

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 2				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	Sk" [VA]	Ik" [A] [deg]		ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
P20					A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			

Sl. 6.14. Jednofazni kratki spoj na čvoru P20

Sa slike 6.14. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 694,06$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,160$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 1075,71$  A.

I u ovom slučaju se vrijednosti kratkog spoja smanjuju kako se približavamo kraju odvoda. Možemo primijetiti da su struje trofaznog kratkog spoja na čvoru P10 i P20 veće od struja jednofaznog kratkog spoja. Struja jednofaznog kratkog spoja na sabirnici 0,4 kV trafo veća je od struje trofaznog kratkog spoja zbog transformatora s uzemljenom neutralnom točkom.

### 6.3. Kratak spoj mreže s priključenom bioplinskom elektranom

U tablici 6.3. prikazani su tokovi snage za slučaj priključene bioplinske elektrane na mrežu.

Tablica 6.3. Tokovi snage s priključenom bioplinskom elektranom

	<b>P [W]</b>	<b>Q [var]</b>	<b>u [p.u.]</b>
<i>10 kV_BP</i>	989093,743	332521,333	1,006
<i>0.4 kV_BP</i>	1000008,929	292963,088	1,002
<i>10 kV sabirnica</i>	982640,304	597545,289	1,0
<i>0.4 kV trafo</i>	278471,320	258280,99	0,979
<i>Vod 1</i>	92823,62	2438,29	0,98
<i>Vod 2</i>	87584,60	2101,28	0,97
<i>Vod 3</i>	82431,67	1795,25	0,96
<i>Vod 4</i>	77361,59	1519,04	0,95
<i>Vod 5</i>	72370,95	1271,40	0,94
<i>Vod 6</i>	67456,20	1051,07	0,93
<i>Vod 7</i>	62613,63	856,71	0,93
<i>Vod 8</i>	57839,38	686,93	0,92
<i>Vod 9</i>	53129,44	540,28	0,91
<i>Vod 10</i>	48479,68	415,28	0,91
<i>Vod 11</i>	43885,80	310,39	0,90
<i>Vod 12</i>	39343,41	224,01	0,90
<i>Vod 13</i>	34847,97	154,53	0,89
<i>Vod 14</i>	30394,85	100,27	0,89
<i>Vod 15</i>	25979,31	59,53	0,88
<i>Vod 16</i>	21596,53	30,58	0,88
<i>Vod 17</i>	17241,59	11,64	0,88

Vod 18	12909,52	0,94	0,88
Vod 19	8595,29	-3,35	0,87
Vod 20	4293,82	-3,05	0,87

Možemo primijetiti da su rezultati tokova snage zbog referentnog čvora koji drži napon 1 p.u. isti kao i kod mreže bez spojenih elektrana. Također dolazi do povišenja napona na mjestu priključka bioplinske elektrane.

### 6.3.1. Trofazni kratki spoj

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na sabirnici 0.4 kV trafo dobiveni su rezultati na slici 6.15..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko				Annex: / 1					
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Sk" [VA]	I <sub>k</sub> " [A]	I <sub>k</sub> " [deg]	i <sub>p</sub> [A]	I <sub>b</sub> [A]	S <sub>b</sub> [VA]	I <sub>k</sub> [A]	I <sub>th</sub> [A]
0.4 kV trafo	0,40	0,00	0,00	1,053056871,24 VA	18845,97 A	-77,15	40261,78 A	18845,97056871,24	18845,9718985,65		
2-Winding Trans	10 kV sabi			13056871,08 VA	18845,97 A	102,85	40261,78 A				
Line	čvor 1			0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				
Line(12)	Terminal(2			0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				
Line(59)	Terminal(4			0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				

Sl. 6.15. Trofazni kratki spoj na sabirnici 0.4 kV trafo

Sa slike 6.15. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 18845,97$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 13,0568$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 40,261$  kA.

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P10 dobiveni su rezultati na slici 6.16..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko				Annex: / 1					
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Sk" [VA]	I <sub>k</sub> " [A]	I <sub>k</sub> " [deg]	i <sub>p</sub> [A]	I <sub>b</sub> [A]	S <sub>b</sub> [VA]	I <sub>k</sub> [A]	I <sub>th</sub> [A]
čvor 10	0,40	0,00	0,00	1,05 909294,57 VA	1312,45 A	-23,12	1894,83 A	1312,45909294,57	1312,45	1314,15	
Line(20)	čvor 9			909294,45 VA	1312,45 A	156,88	1894,83 A				
Line(21)	čvor 11			0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				

Sl. 6.16. Trofazni kratki spoj na čvoru P10

Sa slike 6.16. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 1312,45$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,909$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 1,894$  kA.

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P20 dobiveni su rezultati na slici 6.17..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	Sk" [VA]	Ik" [A]	Ip [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	Ik [A]	Ith [A]
čvor 20	0,40	0,00	0,00	1,05	463946,80 VA	669,65 A	-21,47	966,42 A	669,65	463946,80	669,65	670,51
Line(11)	čvor 19				463946,79 VA	669,65 A	158,53	966,42 A				

Sl. 6.17. Trofazni kratki spoj na čvoru P20

Sa slike 6.17. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 669,65$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,4639$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 966,42$  A.

Uočavamo da se vrijednosti trofaznog kratkog spoja smanjuju kako se približavamo kraju odvoda. Razlog tomu je sve manji doprinos struji kratkog spoja udaljenih elemenata mreže kako se približavamo kraju odvoda.

### 6.3.2. Jednofazni kratki spoj

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na sabirnici 0.4 kV trafo dobiveni su rezultati na slici 6.18..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	Sk" [VA]	Ik" [A]	Ip [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
0.4 kV trafo	A	0,40	0,00	0,00	1,05	5071411,41 VA	21959,86 A	-80,06	46914,16 A	21959,86	5071411,41	0,00
	B		0,24	-109,63		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,98
	C		0,21	112,26		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,87
2-Winding Trans	10 kV sabi				A	5071411,37 VA	21959,86 A	99,94	46914,16 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
Line	čvor 1				A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 2				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	Sk" [VA]	Ik" [A]	Ip [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
Line(12)	Terminal(2)				A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
Line(59)	Terminal(4)				A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
AC Current Sour					A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			

Sl. 6.18. Jednofazni kratki spoj na sabirnici 0.4 kV trafo

Sa slike 6.18. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 21959,86$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 5,071$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 46,914$  kA.

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P10 dobiveni su rezultati na slici 6.19..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1					
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	S <sub>k</sub> '' [VA]	I <sub>k</sub> '' [A] [deg]	i <sub>p</sub> [A]	I <sub>b</sub> [A]	S <sub>b</sub> [VA]	EFF [-]		
čvor 10	A	0,40	0,00	0,00	1,05	305627,69 VA	1323,41 A -22,76	1910,64 A	1323,41	305627,69	0,00		
	B		0,24	-119,76		0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,99		
	C		0,24	119,40		0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A	0,00	0,00	1,00		
Line(20)													
		čvor 9				A 305627,65 VA	1323,41 A 157,24	1910,64 A					
						B 0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					
						C 0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					
Line(21)													
		čvor 11				A 0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					
						B 0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					
						C 0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 2					
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	S <sub>k</sub> '' [VA]	I <sub>k</sub> '' [A] [deg]	i <sub>p</sub> [A]	I <sub>b</sub> [A]	S <sub>b</sub> [VA]	EFF [-]		
P10	A					0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					
	B					0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					
	C					0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					

Sl. 6.19. Jednofazni kratki spoj na čvoru P10

Sa slike 6.19. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 1323,41$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,305$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 1,91$  kA.

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P20 dobiveni su rezultati na slici 6.20..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1					
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	S <sub>k</sub> '' [VA]	I <sub>k</sub> '' [A] [deg]	i <sub>p</sub> [A]	I <sub>b</sub> [A]	S <sub>b</sub> [VA]	EFF [-]		
čvor 20	A	0,40	0,00	0,00	1,05	155290,84 VA	672,43 A -21,28	970,43 A	672,43	155290,84	0,00		
	B		0,24	-119,89		0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,99		
	C		0,24	119,70		0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A	0,00	0,00	1,00		
Line(11)													
		čvor 19				A 155290,84 VA	672,43 A 158,72	970,43 A					
						B 0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					
						C 0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					
P20	A					0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					
	B					0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					
	C					0,00 VA	0,00 A 0,00	0,00 A					

Sl. 6.20. Jednofazni kratki spoj na čvoru P20

Sa slike 6.20. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 672,43$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,155$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 970,43$  A.

I u ovom slučaju se vrijednosti kratkog spoja smanjuju kako se približavamo kraju odvoda. Također možemo primijetiti da su struje jednofaznog kratkog spoja veće od struja trofaznog kratkog spoja.

#### 6.4. Kratak spoj mreže s priključenim fotonaponskim sustavom i bioplinskom elektranom

U tablici 6.4. prikazani su tokovi snage za slučaj priključenog fotonaponskog sustava i bioplinske elektrane na mrežu.

Tablica 6.4. Tokovi snage s priključenim fotonaponskim sustavom i bioplinskom elektranom

	<b>P [W]</b>	<b>Q [var]</b>	<b>u [p.u.]</b>
<i>10 kV_BP</i>	989093,743	332521,333	1,006
<i>0.4 kV_BP</i>	1000008,929	292963,088	1,002
<i>10 kV sabirnica</i>	1163215,313	592282,155	1,0
<i>0.4 kV trafo</i>	183522,509	256038,893	0,987
<i>Vod 1</i>	-61173,67	1012,78	0,99
<i>Vod 2</i>	-58374,96	868,72	0,99
<i>Vod 3</i>	-55535,61	739,29	1,0
<i>Vod 4</i>	-52658,01	623,61	1,01
<i>Vod 5</i>	-49744,49	520,85	1,01
<i>Vod 6</i>	-46797,32	430,17	1,02
<i>Vod 7</i>	-43818,76	350,78	1,02
<i>Vod 8</i>	-40811,00	281,88	1,03
<i>Vod 9</i>	-37776,20	222,69	1,03
<i>Vod 10</i>	-34716,49	172,44	1,03
<i>Vod 11</i>	-31633,98	130,38	1,04
<i>Vod 12</i>	-28530,76	95,76	1,04
<i>Vod 13</i>	-25408,79	67,85	1,04
<i>Vod 14</i>	-22270,18	45,92	1,05
<i>Vod 15</i>	-19116,92	29,24	1,05
<i>Vod 16</i>	-15950,99	17,12	1,05



Vod 17	-12774,36	8,82	1,05
Vod 18	-9589,00	3,67	1,05
Vod 19	-6396,86	0,94	1,05
Vod 20	-3199,88	-0,05	1,05

Promatrajući rezultate možemo uočiti da su tokovi snage zbog referentnog čvora koji drži napon 1 p.u. isti kao i kod mreže u kojoj je priključen samo fotonaponski sustav. Promijenio se tok snage, odnosno i u ovom slučaju imamo višestrano napajanje mreže. Također su se promijenile i naponske prilike u mreži. Bioplinska elektrana se ponaša isto kao i kod mreže u kojoj je priključen samo bioplinska elektrana.

#### 6.4.1. Trofazni kratki spoj

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na sabirnici 0.4 kV trafo dobiveni su rezultati na slici 6.21..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko				Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Sk" [VA]	Ik" [A]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	Ik [A]	Ith [A]
0.4 kV trafo	0,40	0,00	0,00	1,053665403,12 VA	19724,31 A	-77,13	42132,58 A	19724,31665403,12	19724,3119870,42	
2-Winding Trans	10 kV sabi			13056871,08 VA	18845,97 A	102,85	40256,38 A			
Line	čvor 1			202856,32 VA	292,80 A	103,49	625,44 A			
Line(12)	Terminal(2)			202856,32 VA	292,80 A	103,49	625,44 A			
Line(59)	Terminal(4)			202856,32 VA	292,80 A	103,49	625,44 A			

Sl. 6.21. Trofazni kratki spoj na sabirnici 0.4 kV trafo

Sa slike 6.21. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 19724,31$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 13,665$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 42,132$  kA.

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P10 dobiveni su rezultati na slici 6.22..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko				Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Sk" [VA]	Ik" [A]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	Ik [A]	Ith [A]
čvor 10	0,40	0,00	0,00	1,05 997378,96 VA	1439,59 A	-30,48	2232,55 A	1439,59997378,96	1439,59	1442,67
Line(20)	čvor 9			928542,29 VA	1340,24 A	155,29	2078,46 A			
Line(21)	čvor 11			107820,41 VA	155,63 A	97,97	241,35 A			
FN10				11000,00 VA	15,88 A	-84,29	24,62 A			

Sl. 6.22. Trofazni kratki spoj na čvoru P10

Sa slike 6.22. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 1439,59$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,997$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 2,233$  kA.

Simulacijom trofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P20 dobiveni su rezultati na slici 6.23..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	Voltage [deg]	c- Factor	Sk'' [VA]	Ik'' [A]	Ik'' [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	Ik [A]	Ith [A]
čvor 20	0,40	0,00	0,00	1,05	508579,20 VA	734,07 A	-29,16	1137,53 A	734,07	508579,20	734,07	735,63
Line(11)	čvor 19				502371,79 VA	725,11 A	151,87	1123,65 A				
FN20					11000,00 VA	15,88 A	-84,29	24,60 A				

Sl. 6.23. Trofazni kratki spoj na čvoru P20

Sa slike 6.23. vidimo da je početna struja trofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 734,07$  A, snaga trofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,508$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 1137,53$  A.

Uočavamo da se vrijednosti trofaznog kratkog spoja smanjuju kako se približavamo kraju odvoda. Razlog tomu je sve manji doprinos struji kratkog spoja udaljenih elemenata mreže kako se približavamo kraju odvoda.

#### 6.4.2. Jednofazni kratki spoj

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na sabirnici 0.4 kV trafo dobiveni su rezultati na slici 6.24..

	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	Voltage [deg]	c- Factor	Sk'' [VA]	Ik'' [A]	Ik'' [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
0.4 kV trafo	A	0,40	0,00	0,00	1,05	5160603,81 VA	22346,07 A	-80,10	47732,85 A	22346,07	5160603,81	0,00
	B		0,24	-109,67		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,99
	C		0,22	112,22		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,88
2-Winding Trans	10 kV sabi				A	5084001,12 VA	22014,37 A	99,89	47024,32 A			
					B	76606,71 VA	331,72 A	160,52	708,57 A			
					C	76606,11 VA	331,71 A	40,52	708,57 A			
Line	čvor 1				A	25535,73 VA	110,57 A	100,52	236,19 A			
					B	25535,57 VA	110,57 A	-19,48	236,19 A			
					C	25535,37 VA	110,57 A	-139,48	236,19 A			

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 2			
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	Voltage [deg]	c- Factor	Sk'' [VA]	Ik'' [A]	Ik'' [deg]	ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]
Line(12)	Terminal(2)				A	25535,73 VA	110,57 A	100,52	236,19 A		
					B	25535,57 VA	110,57 A	-19,48	236,19 A		
					C	25535,37 VA	110,57 A	-139,48	236,19 A		
Line(59)	Terminal(4)				A	25535,73 VA	110,57 A	100,52	236,19 A		
					B	25535,57 VA	110,57 A	-19,48	236,19 A		
					C	25535,37 VA	110,57 A	-139,48	236,19 A		
AC Current Sour					A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A		
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A		
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A		

Sl. 6.24. Jednofazni kratki spoj na sabirnici 0.4 kV trafo

Sa slike 6.24. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 22346,07$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 5,16$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 47,733$  kA.

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P10 dobiveni su rezultati na slici 6.25..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko					Annex: / 1						
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	Sk'' [VA ]	Ik'' [A ] [deg]		ip [A ]	Ib [A ]	Sb [VA ]	EFF [-]	
čvor 10	A	0,40	0,00	0,00	1,05	315623,52 VA	1366,69 A	-25,07	2119,49 A	1366,69	315623,52	0,00	
	B		0,25	-122,07		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,97	
	C		0,25	117,09		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	1,05	
Line(20)	čvor 9					A	308023,64 VA	1333,78 A	156,76	2068,46 A			
						B	12532,87 VA	54,27 A	163,17	84,16 A			
						C	12532,79 VA	54,27 A	43,17	84,16 A			
Line(21)	čvor 11					A	11373,44 VA	49,25 A	103,38	76,38 A			
						B	11373,36 VA	49,25 A	-16,62	76,37 A			
						C	11373,28 VA	49,25 A	-136,62	76,37 A			

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko					Annex: / 2						
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [deg]		c- Factor	Sk'' [VA ]	Ik'' [A ] [deg]		ip [A ]	Ib [A ]	Sb [VA ]	EFF [-]	
P10	A					0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				
	B					0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				
	C					0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A				
FN10	A					1160,33 VA	5,02 A	-78,88	7,79 A				
	B					1160,33 VA	5,02 A	161,12	7,79 A				
	C					1160,32 VA	5,02 A	41,12	7,79 A				

Sl. 6.25. Jednofazni kratki spoj na čvoru P10

Sa slike 6.25. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 1366,69$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,315$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 2,119$  kA.

Simulacijom jednofaznog kratkog spoja prema IEC60909 normi na čvoru P20 dobiveni su rezultati na slici 6.26..

Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 1				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]		c-Factor	Sk" [VA]	Ik" [A]		ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
		[kV]	[deg]		[VA]	[A]	[deg]	[A]	[A]	[VA]	[-]	
čvor 20	A	0,40	0,00	0,00	1,05	160324,58 VA	694,23 A	-23,69	1075,79 A	694,23	160324,58	0,00
	B		0,25	-122,30		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	0,97
	C		0,25	117,29		0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A	0,00	0,00	1,06
Line(11)	čvor 19				A	159666,59 VA	691,38 A	156,65	1071,37 A			
					B	1155,88 VA	5,01 A	161,18	7,76 A			
					C	1155,87 VA	5,01 A	41,18	7,76 A			
FN20					A	1155,89 VA	5,01 A	-78,82	7,76 A			
					B	1155,88 VA	5,01 A	161,18	7,76 A			
					C	1155,87 VA	5,01 A	41,18	7,76 A			

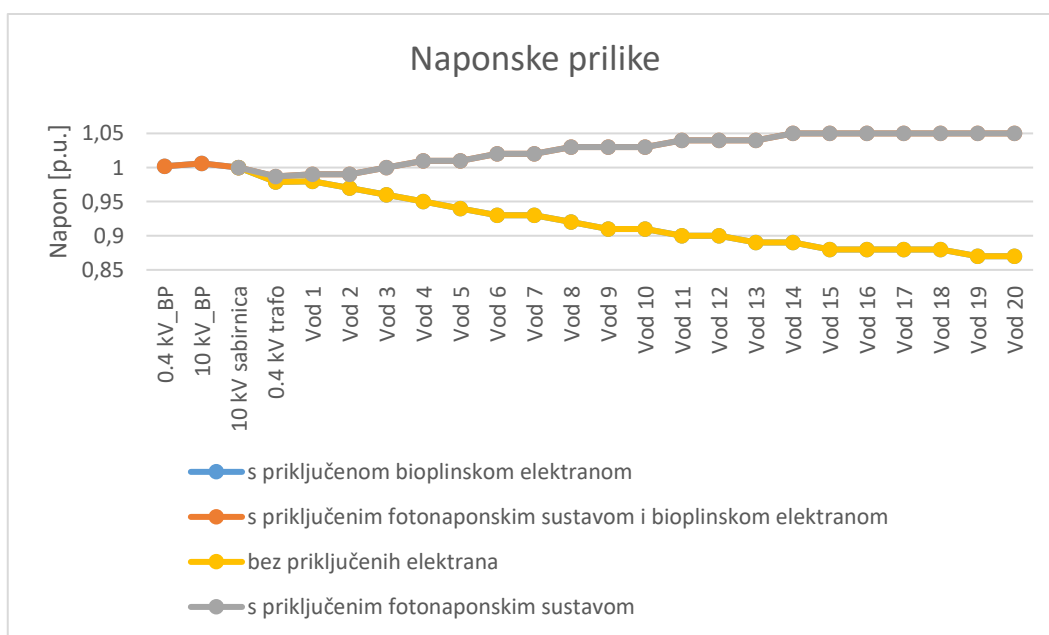
Grid: PV Spansko		System Stage: PV Spansko						Annex: / 2				
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]		c-Factor	Sk" [VA]	Ik" [A]		ip [A]	Ib [A]	Sb [VA]	EFF [-]	
		[kV]	[deg]		[VA]	[A]	[deg]	[A]	[A]	[VA]	[-]	
P20					A	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					B	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			
					C	0,00 VA	0,00 A	0,00	0,00 A			

Sl. 6.26. Jednofazni kratki spoj na čvoru P20

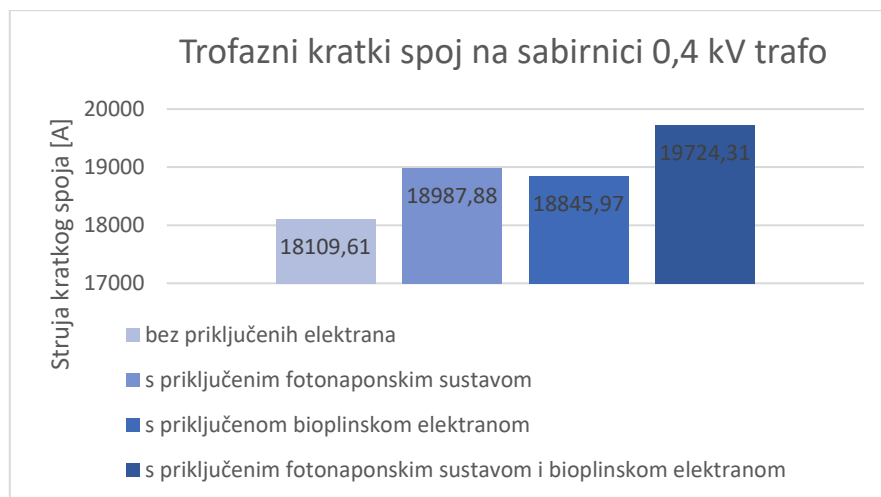
Sa slike 6.26. vidimo da je početna struja jednofaznog kratkog spoja  $I_k'' = 694,23$  A, snaga jednofaznog kratkog spoja  $S_k'' = 0,16$  MVA, a udarna struja kratkog spoja  $i_p = 1075,79$  A.

I u ovom slučaju se vrijednosti kratkog spoja smanjuju kako se približavamo kraju odvoda. Možemo primijetiti da su struje trofaznog kratkog spoja na čvoru P10 i P20 veće od struja jednofaznog kratkog spoja. Struja jednofaznog kratkog spoja na sabirnici 0,4 kV trafo veća je od struje trofaznog kratkog spoja zbog transformatora čija je neutralna točka uzemljena.

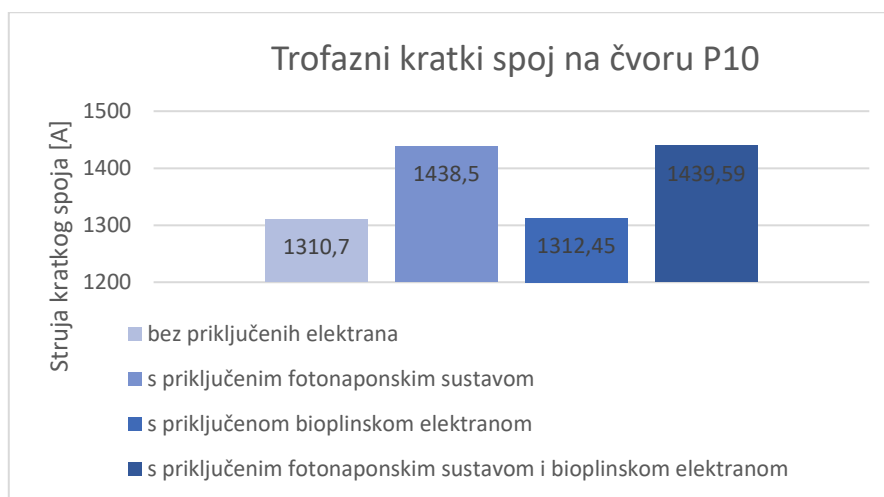
## 6.5. Grafički prikaz rezultata



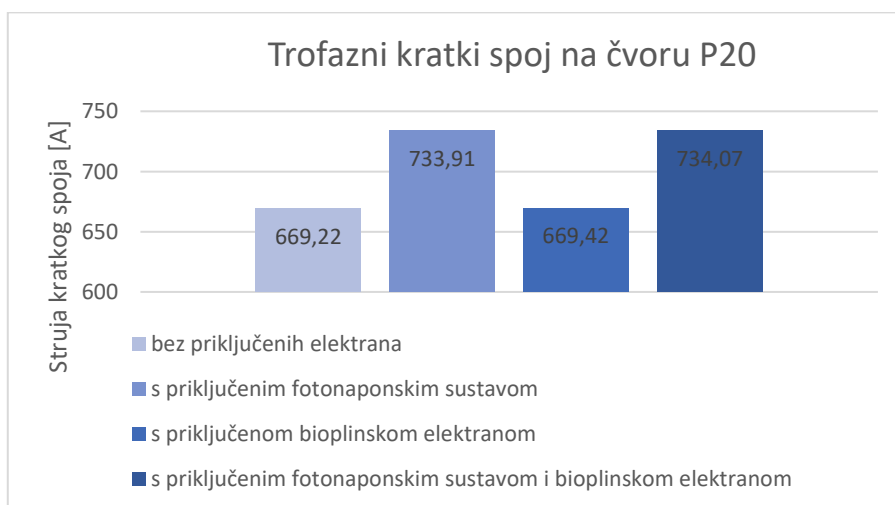
Grafikon 6.1. Naponske prilike



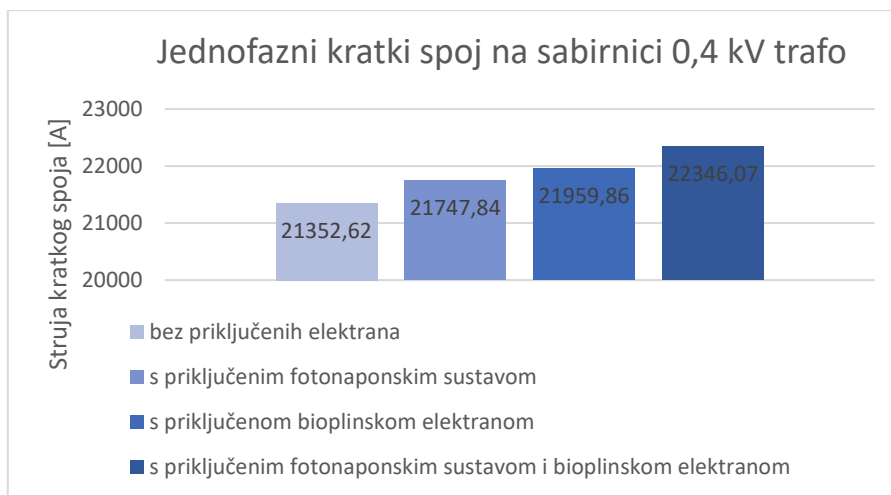
Grafikon 6.2. Trofazni kratki spoj na sabirnici 0,4 kV trafo



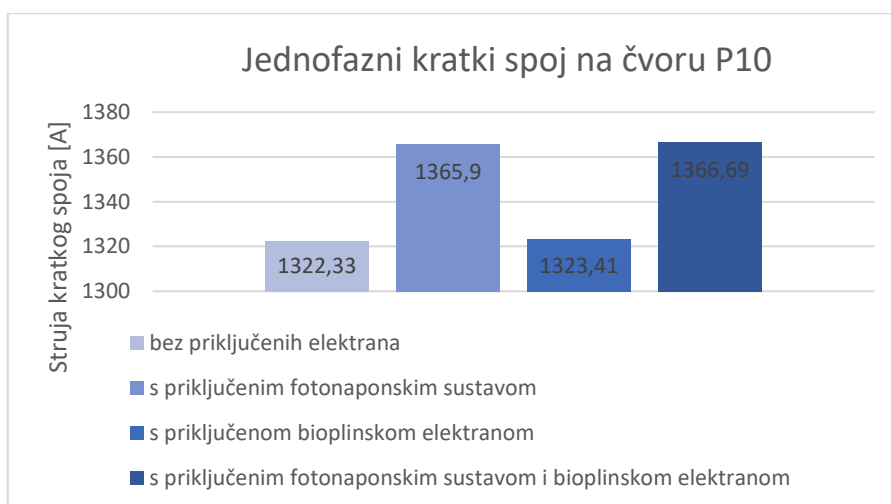
Grafikon 6.3. Trofazni kratki spoj na čvoru P10



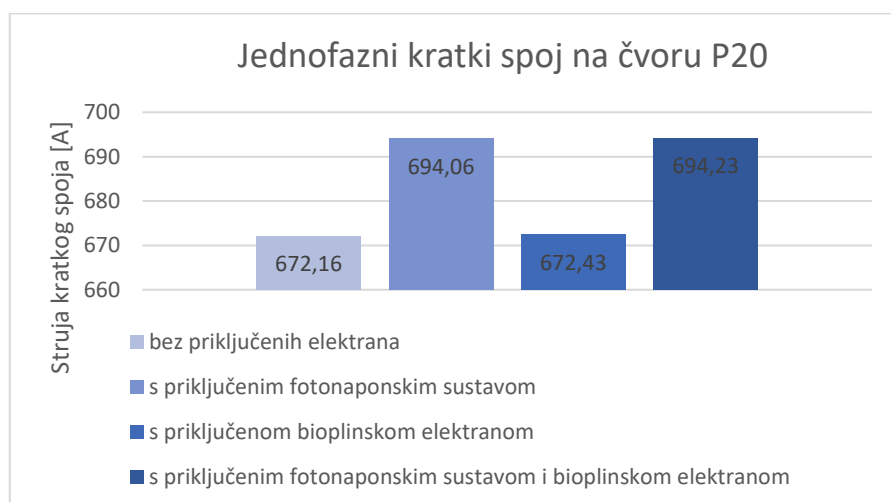
Grafikon 6.4. Trofazni kratki spoj na čvoru P20



Grafikon 6.5. Jednofazni kratki spoj na sabirnici 0,4 kV trafo



Grafikon 6.6. Jednofazni kratki spoj na čvoru P10



Grafikon 6.7. Jednofazni kratki spoj na čvoru P20

## 6.6. Doprinos struji kratkog spoja

Početna struja trofaznog kratkog spoja bez priključenih fotonaponskih sustava i bioplinske elektrane:

- a) na sabirnici 0.4 kV trafo:  $I''_{k3,0.4 \text{ kV trafo}} = 18109,61 \text{ A}$
- b) na čvoru P10:  $I''_{k3,P10} = 1310,70 \text{ A}$
- c) na čvoru P20:  $I''_{k3,P20} = 669,22 \text{ A}$

Početna struja jednofaznog kratkog spoja bez priključenih fotonaponskih sustava i bioplinske elektrane:

- a) na sabirnici 0.4 kV trafo:  $I''_{k1,0.4 \text{ kV trafo}} = 21352,62 \text{ A}$
- b) na čvoru P10:  $I''_{k1,P10} = 1322,33 \text{ A}$
- c) na čvoru P20:  $I''_{k1,P20} = 672,16 \text{ A}$

### 6.6.1. Doprinos fotonaponskog sustava struji kratkog spoja

#### 6.6.1.1. Trofazni kratak spoj

- a) na sabirnici 0.4 kV trafo

Početna struja trofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k3,0.4 \text{ kV trafo,FN}} = 18987,88 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k3,0.4 \text{ kV trafo,FN}}}{I''_{k3,0.4 \text{ kV trafo}}} - 1 = \frac{18987,88}{18109,61} - 1 = 0,0485$$

$$0,0485 \cdot 100 = 4,85 \%$$

- b) na čvoru P10

Početna struja trofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k3,P10,FN} = 1438,5 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k3,P10,FN}}{I''_{k3,P10}} - 1 = \frac{1438,5}{1310,70} - 1 = 0,0975$$

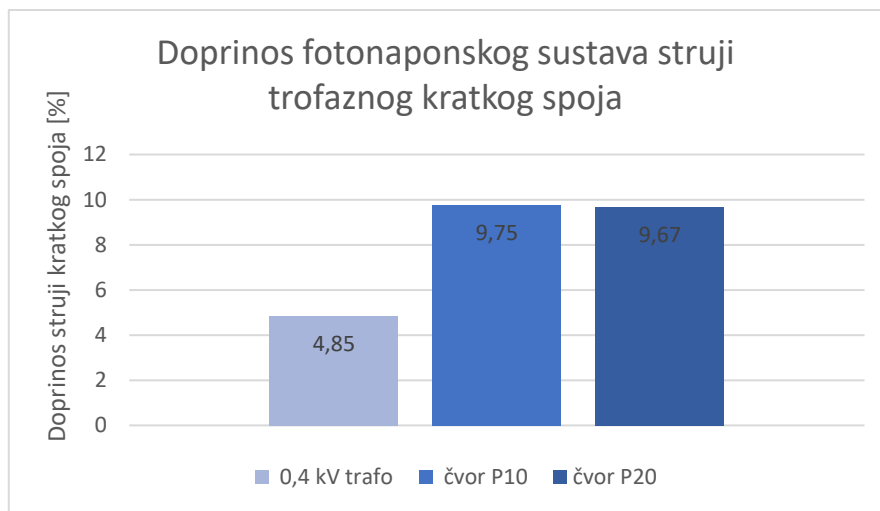
$$0,0975 \cdot 100 = 9,75 \%$$

c) na čvoru P20

Početna struja trofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k3,P20, FN} = 733,91$  A.

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k3,P20, FN}}{I''_{k3,P20}} - 1 = \frac{733,91}{669,22} - 1 = 0,0967$$
$$0,0967 \cdot 100 = 9,67 \%$$



Grafikon 6.8. Doprinos fotonaponskog sustava struji trofaznog kratkog spoja

### 6.6.1.2. Jednofazni kratki spoj

a) na sabirnici 0.4 kV trafo

Početna struja jednofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k1,0.4 \text{ kV trafo}, FN} = 21747,84$  A.

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k1,0.4 \text{ kV trafo}, FN}}{I''_{k1,0.4 \text{ kV trafo}}} - 1 = \frac{21747,84}{21352,62} - 1 = 0,0185$$

$$0,0185 \cdot 100 = 1,85 \%$$

b) na čvoru P10

Početna struja jednofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k1,P10, FN} = 1365,9$  A.

Doprinos struji kratkog spoja:



$$\frac{I''_{k1,P10, FN}}{I''_{k1,P10}} - 1 = \frac{1365,9}{1322,33} - 1 = 0,03295$$

$$0,03295 \cdot 100 = 3,295 \%$$

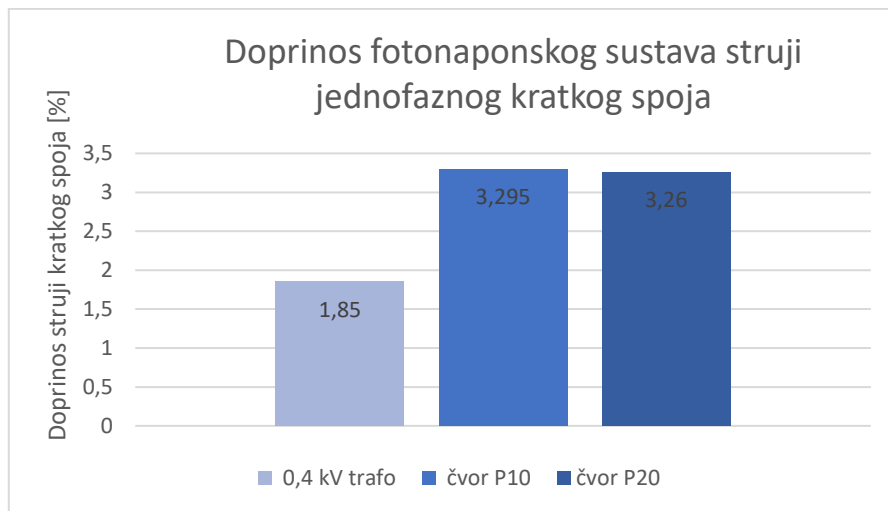
c) na čvoru P20

Početna struja jednofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k1,P20, FN} = 694,06$  A.

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k1,P20, FN}}{I''_{k1,P20}} - 1 = \frac{694,06}{672,16} - 1 = 0,0326$$

$$0,0326 \cdot 100 = 3,26 \%$$



Grafikon 6.11. Doprinos fotonaponskog sustava struji jednofaznog kratkog spoja

## 6.6.2. Doprinos bioplinske elektrane struji kratkog spoja

### 6.6.2.1. Trofazni kratak spoj

a) na sabirnici 0.4 kV trafo

Početna struja trofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k3,0.4 \text{ kV trafo, BP}} = 18845,97$  A.

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k3,0.4 \text{ kV trafo, BP}}}{I''_{k3,0.4 \text{ kV trafo}}} - 1 = \frac{18845,97}{18109,61} - 1 = 0,04066$$

$$0,04066 \cdot 100 = 4,066 \%$$

b) na čvoru P10

Početna struja trofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k3,P10,BP} = 1312,45$  A.

Doprinos struji kratkog spoja:

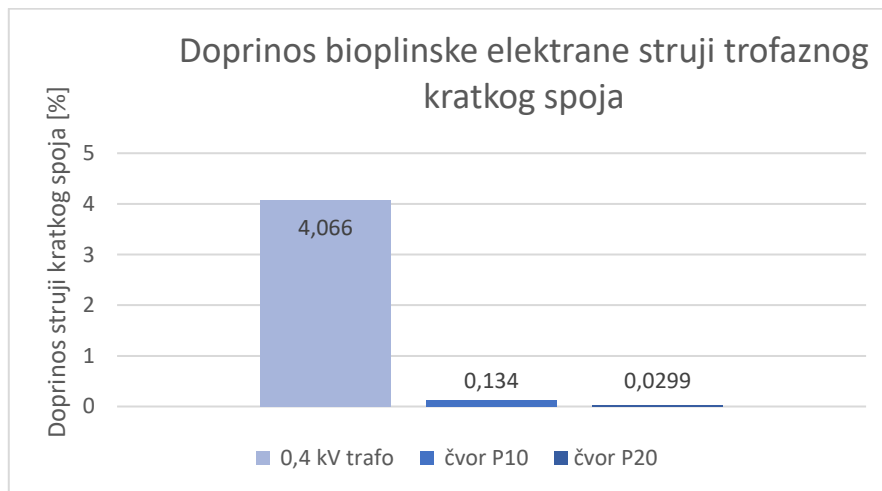
$$\frac{I''_{k3,P10,BP}}{I''_{k3,P10}} - 1 = \frac{1312,45}{1310,70} - 1 = 0,00134$$
$$0,00134 \cdot 100 = 0,134 \%$$

c) na čvoru P20

Početna struja trofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k3,P20,BP} = 669,42$  A.

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k3,P20,BP}}{I''_{k3,P20}} - 1 = \frac{669,42}{669,22} - 1 = 0,000299$$
$$0,000299 \cdot 100 = 0,0299 \%$$



Grafikon 6.9. Doprinos bioplinske elektrane struji trofaznog kratkog spoja

### 6.6.2.2. Jednofazni kratki spoj

a) na sabirnici 0.4 kV trafo

Početna struja jednofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k1,0.4 \text{ kV trafo,BP}} = 21959,86 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k1,0.4 \text{ kV trafo,BP}}}{I''_{k1,0.4 \text{ kV trafo}}} - 1 = \frac{21959,86}{21352,62} - 1 = 0,0284$$

$$0,0284 \cdot 100 = 2,84 \%$$

b) na čvoru P10

Početna struja jednofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k1,P10,BP} = 1323,41 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k1,P10,BP}}{I''_{k1,P10}} - 1 = \frac{1323,41}{1322,33} - 1 = 0,00082$$

$$0,00082 \cdot 100 = 0,082 \%$$

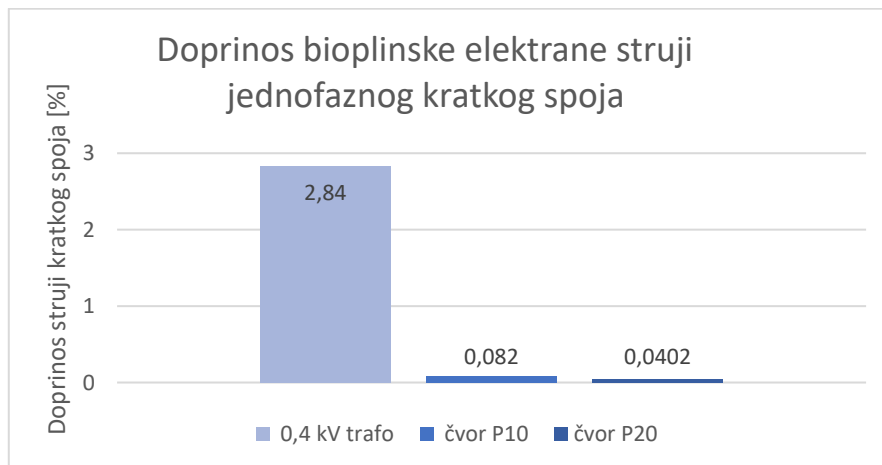
c) na čvoru P20

Početna struja jednofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k1,P20,BP} = 672,43 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k1,P20,BP}}{I''_{k1,P20}} - 1 = \frac{672,43}{672,16} - 1 = 0,000402$$

$$0,000402 \cdot 100 = 0,0402 \%$$



Grafikon 6.12. Doprinos bioplinske elektrane struji jednofaznog kratkog spoja

### 6.6.3. Doprinos fotonaponskog sustava i bioplinke elektrane struji kratkog spoja

#### 6.6.3.1. Trofazni kratak spoj

a) na sabirnici 0.4 kV trafo

Početna struja trofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k3,0.4 \text{ kV trafo,FNBP}} = 19724,31 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k3,0.4 \text{ kV trafo,FNBP}}}{I''_{k3,0.4 \text{ kV trafo}}} - 1 = \frac{19724,31}{18109,61} - 1 = 0,0892$$

$$0,0892 \cdot 100 = 8,92 \%$$

b) na čvoru P10

Početna struja trofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k3,P10,FNBP} = 1439,59 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k3,P10,FNBP}}{I''_{k3,P10}} - 1 = \frac{1439,59}{1310,70} - 1 = 0,0983$$

$$0,0983 \cdot 100 = 9,83 \%$$

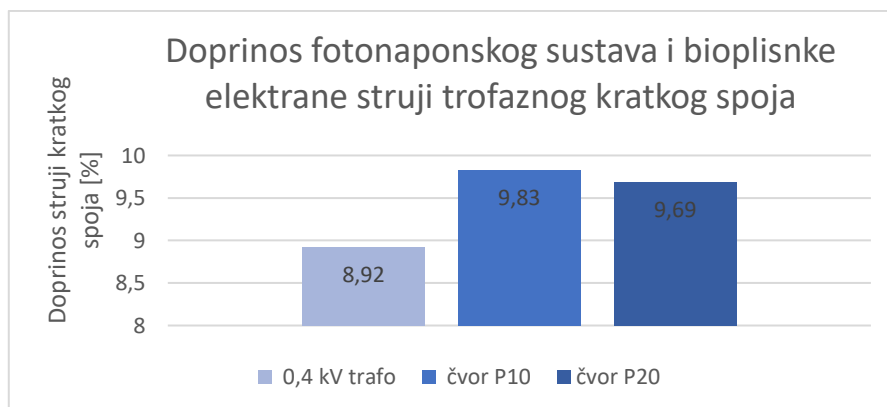
c) na čvoru P20

Početna struja trofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k3,P20,FNBP} = 734,07 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k3,P20,FNBP}}{I''_{k3,P20}} - 1 = \frac{734,07}{669,22} - 1 = 0,0969$$

$$0,0969 \cdot 100 = 9,69 \%$$



Grafikon 6.10. Doprinos fotonaponskog sustava i bioplinke elektrane struji trofaznog kratkog spoja

### 6.6.3.2. Jednofazni kratki spoj

a) na sabirnici 0.4 kV trafo

Početna struja jednofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k1,0.4 \text{ kV trafo,FNBP}} = 22346,07 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k1,0.4 \text{ kV trafo,FNBP}}}{I''_{k1,0.4 \text{ kV trafo}}} - 1 = \frac{22346,07}{21352,62} - 1 = 0,0465$$

$$0,0465 \cdot 100 = 4,65 \%$$

b) na čvoru P10

Početna struja jednofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k1,P10,FNBP} = 1366,69 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k1,P10,FNBP}}{I''_{k1,P10}} - 1 = \frac{1366,69}{1322,33} - 1 = 0,03355$$

$$0,03355 \cdot 100 = 3,355 \%$$

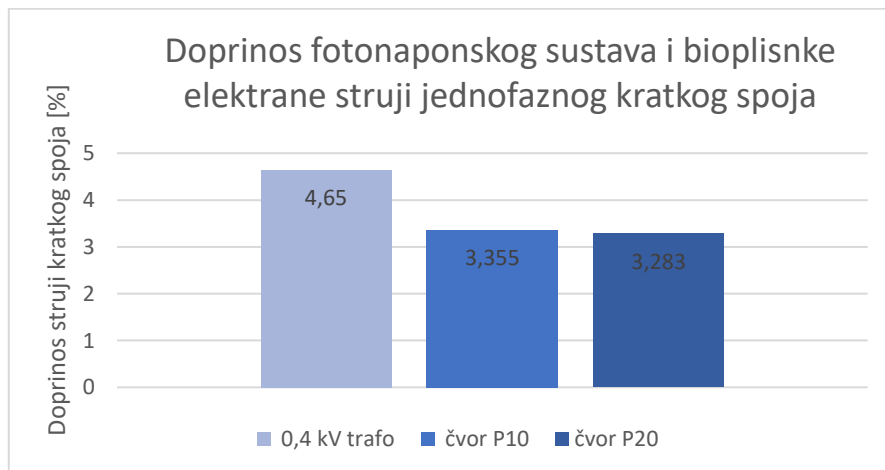
c) na čvoru P20

Početna struja jednofaznog kratkog spoja iznosi  $I''_{k1,P20,FNBP} = 694,23 \text{ A}$ .

Doprinos struji kratkog spoja:

$$\frac{I''_{k1,P20,FNBP}}{I''_{k1,P20}} - 1 = \frac{694,23}{672,16} - 1 = 0,0328$$

$$0,0328 \cdot 100 = 3,283 \%$$



Grafikon 6.10. Doprinos fotonaponskog sustava i bioplinke elektrane struji jednofaznog kratkog spoja

## 7. ZAKLJUČAK

U jednostranoj (pasivnoj) distribucijskoj mreži naponi opadaju kako se udaljavamo od nadomjesne mreže zbog gubitaka a i samog opterećenja u mreži. Dodavanjem novih distribuiranih izvora mijenjaju se tokovi snage. Priključena bioplinska elektrana u mrežu injektira djelatnu snagu zbog čega dolazi do porasta napona na mjestu priključenja te susjednim sabirnicama. Također i fotonaponska elektrana proizvodi više djelatne snage nego što potrošač može iskoristiti zbog čega dio djelatne snage odlazi u mrežu. To rezultira povećanju napona na priključenom čvoru kao i na ostalim čvorovima te dvostranom napajanju mreže čime mreža postaje aktivna (tok energije od potrošača prema mreži). Promjena naponskih prilika za sobom vuče i promjenu strujnih prilika. Povećanjem napona dodavanjem novih izvora smanjuje se struja u mreži. S druge strane dodatni izvori doprinose struji kratkog spoja. Doprinos fotonaponske elektrane ovisi o inverteru koji ograničava struju kratkog spoja na 1,1 nazivne vrijednosti struje, energiji Sunca, mjestu kvara te vrsti kvara. Iz rezultata simulacije vidi se da je doprinos trofaznoj struji kvara veći od doprinosa jednofaznoj struji kvara. Najmanji doprinos fotonaponskih elektrana struji kvara je na sabirnici gdje se odvod spaja s ostatkom mreže zbog značajnog doprinosa transformatora. Kad se kratak spoj desi odmah iza transformatora (na sabirnici na kojoj je spojen transformator) udarna struja zbog velike induktivne reaktancije ima veliki iznos čime je i struja kratkog spoja jako velikog iznosa. Najveći doprinos fotonaponskih elektrana je na sredini odvoda zbog podjednake udaljenosti fotonaponskih elektrana na odvodu od kvara s tim da elektrane na kraju odvoda jače doprinose struji jer se kvar desio iza njih, dok fotonaponske elektrane iz ostala dva odvoda slabije doprinose zbog svoje udaljenosti. Na kraju odvoda doprinos struji kratkog spoja je nešto manji od doprinosa na sredini odvoda zbog veće udaljenosti fotonaponskih elektrana i jer se kvar desio na čvoru ispred fotonaponskih elektrana. Nadalje, doprinos bioplinske elektrane ovisi o udaljenosti elektrane od mjesta kvara, transformatoru i samom generatoru u elektrani. Što je kvar dalje od elektrane doprinos struji kratkog spoja je manji. Veličina istosmjerne komponente vidi se preko udarne struje kvara te što je udarna struja kvara veća kvar je bliži i istosmjerna komponenta je izraženija. Bioplinska elektrana daje veću trofaznu struju kratkog spoja nego jednofaznu struju kratkog spoja, ali zbog uzemljene neutralne točke transformatora konačni doprinos struji jednofaznog kratkog spoja je veći nego doprinos struji trofaznog kratkog spoja. Naravno, napon za vrijeme kratkog spoja je veći što smo dalje od mjesta kvara.

Možemo zaključiti da inverterske elektrane ne utječu značajno na struju kratkog spoja jer je njihov doprinos ograničen samim inverterom, dok je doprinos elektrana sa sinkronim strojevima ovisan o udaljenosti kvara od elektrane. Sinkroni generatori u distribuiranim izvorima su male snage pa

je i doprinos značajno manjeg iznosa. S porastom broja distribuiranih izvora raste doprinos struji kratkog spoja što može utjecati na samu zaštitu u elektroenergetskom sustavu. Međutim, veći problem može biti sama regulacija napona, iako se distribuirani izvori mogu koristiti kao regulatori za podizanje napona, jer prilikom pada opterećenja dolazi do naglog rasta napona dok prilikom ispada ili smanjene proizvodnje distribuiranog izvora dolazi do smanjenja napona. Također, energetska elektronika utječe na kvalitetu električne energije injektiranjem viših neparnih harmonika, ali distribuirani izvori poboljšavaju tokove snaga, smanjuju gubitke te time povećavaju stabilnost i pouzdanost sustava.

## LITERATURA

- [1] T. Wijnhoven, J. Tant, G. Deconinck, T. Neumann, I. Erlich, „Influence of voltage support by converter based distributed generation on the short-circuit power”, 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 1-6, Nizozemska, 2015
- [2] S.M. Liu, T. Bi, A. Xue, J.Z. Liu, „Equivalent Model for Calculating Fault Current from Inverter-Interfaced Renewable Energy Generators”, Journal of Environmental Informatics, 32, 36-44., Kanada, 2018.
- [3] L. Alfieri, G. Carpinelli, A. Bracale, P. Caramia, A.R. Di Fazio, „Impact of Photovoltaic Generators on the Three Phase Short Circuit Operating Conditions”, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 1-7., Palermo (Italija), 2018
- [4] V. Gevorgian and E. Muljadi, „Wind Power Plant Short Circuit Current Contribution for Different Fault and Wind Turbine Topologies”, The 9th Annual International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, NREL/CP-5500-49113, Québec (anada), listopad 2010.
- [5] M. Kmec, R. Jakubčák, L. Lisoň, Z. Čonka, L. Beňa, „Impact of connection point of alternative energy sources to the size of short circuit, current in the distribution network”, Perspectives for the development of low-power systems using biomass, 274 - 279, Intensive Programme 2014.
- [6] Anica Jukić, „Proračun struje kratkog spoja u niskonaponskim mrežama sa fotonaponskim elektranama”, Osijek, 2019., <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:2038/preview> (26.06.2022.)
- [7] N. Boduljak, „Struje kratkog spoja u elektroenergetskim sustavima i postrojenjima”, Osijek, 2016., <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:1073/preview> (15.06.2019.)
- [8] T. Šaronić, „Računalne metode za proračun struja kratkog spoja”, Osijek, 2016., <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:1202/preview> (15.06.2019.)
- [9] S. Nikolovski, D. Šljivac, „Elektroenergetske mreže - zbirka riješenih zadataka”, ETF Osijek, 2000.
- [10] M. Abičić: „Kratki spojevi u mreži”, <http://mabacic.eios.hr/oo/ks.pdf> (15.06.2019.)
- [11] L. Jozsa, „Skripta za predavanja - Analiza elektroenergetskog sustava”, ETF Osijek
- [12] J. Keller, B. Kroposki, „Understanding Fault Characteristics of Inverter-Based Distributed Energy Resources”, NREL, Golden, CO (SAD), siječanj 2010., Web. doi:10.2172/971441.
- [13] Lajos Józsa, Krešimir Fekete, Hrvoje Glavaš, „Kratki spojevi u elektroenergetskim mrežama”, Graphis d.o.o., Zagreb, 2022.
- [14] Krešimir Fekete, Zvonimir Klaić, Ljubomir Majdandžić, „Expansion of the residential photovoltaic systems and its harmonic impact on the distribution grid”, Renewable Energy , Vol. 43, 140-148, srpanj, 2012.
- [15] Vladimir Jurjević i drugi, „Tehnički priručnik KONČAR”, KONČAR Elektroindustrija d.d., Zagreb, studeni 1991.
- [16] Jenbacher motor JMS 320 GS, Tehničke specifikacije, <https://www.yumpu.com/en/document/read/9853569/jms-320-gs-bl> (26.08.2022.)



- [17] STAMFORD generator, Tehnički podaci, [https://www.stamford-avk.com/sites/stamfordavk/files/PI7C-312-TD-EN\\_Rev\\_A.pdf](https://www.stamford-avk.com/sites/stamfordavk/files/PI7C-312-TD-EN_Rev_A.pdf) (26.08.2022.)
- [18] Elka katalog, <http://elka.hr/wp-content/uploads/2017/03/Energetski-srednjenaponski-kabeli-do-36-kV-Power-cables-up-to-36-kV.pdf> (26.08.2022.)
- [19] Program: DigSILENT, <https://www.digsilent.de/en/> (26.08.2022.)

## SAŽETAK

U ovom radu je opisan utjecaj distribuiranih izvora temeljenih na inverteru i sinkronih generatora na struju kratkog spoja. Na primjeru 10/0,4 kV niskonaponske distributivne mreže proračunata je jednofazna i trofazna struja kratkog spoja pomoću programa DigSILENT. Proračun je izvršen za četiri slučaja: kada nisu spojeni fotonaponski sustav i bioplinska elektrana, kada je spojen fotonaponski sustav, kada je spojena bioplinska elektrana i kada su spojeni i bioplinska elektrana i fotonaponski sustav. Na kraju je analiziran doprinos fotonaponskog sustava (distribuiranog izvora temeljenog na inverteru) i bioplinske elektrane (temeljene na sinkronom generatoru) na struju kratkog spoja.

Ključne riječi: kratak spoj, fotonaponski sustav, bioplinska elektrana, DigSILENT

**TITLE:** Specifics of short-circuit current calculation in networks with different technologies of renewable energy sources

## ABSTRACT

This paper describes the influence of distributed sources based on inverters and synchronous generators on the short-circuit current. On the example of a 10/0.4 kV low-voltage distribution network, single-phase and three-phase short-circuit currents were calculated using the DigSILENT program. The calculation was made for four cases: when the photovoltaic system and the biogas power plant are not connected, when the photovoltaic system is connected, when the biogas power plant is connected and when both the biogas power plant and the photovoltaic system are connected. At the end, the contribution of the photovoltaic system (distributed source based on the inverter) and the biogas power plant (based on the synchronous generator) to the short-circuit current was analyzed.

Keywords: short circuit, photovoltaic system, biogas power plant, DigSILENT

## ŽIVOTOPIS

Anica Jukić rođena je 26. srpnja 1997. u Novoj Biljoj, Bosna i Hercegovina. Nakon završene Osnovne škole „Fra Grga Martić“ Ozimica, područna škola Lug-Brankovići upisuje Katolički školski centar „Don Bosco“ u Žepču. U istom se školuje za Tehničara za mehatroniku. Tijekom srednjoškolskog obrazovanja sudjeluje kao gost na državnom natjecanju iz Osnova elektrotehnike i mjerenja u elektrotehnici u Republici Hrvatskoj i općinskim natjecanjima iz sporta. Tijekom osnovnoškolskog obrazovanja sudjeluje na općinskim i kantonalnim natjecanjima iz matematike, fizike i sporta.

Po završetku srednje škole upisuje sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, te se nakon prve godine opredjeljuje za smjer Energetika. Kao najbolji student na svome smjeru dobitnica je priznanja za postignut uspjeh u studiranju. Preddiplomski studij završava sa završnim radom na temu „Proračun struje kratkog spoja u niskonaponskim mrežama sa fotonaponskim elektranama“.

Potom upisuje sveučilišni diplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Opredjeljuje se za smjer Elektroenergetski sustavi. Dobitnica je dekanovog priznanja za postignuti uspjeh kao najbolji student.

---

Potpis autora

**PI734C**  
**WINDING 312**

**STAMFORD**

CONTROL SYSTEM	SEPARATELY EXCITED BY P.M.G.		
A.V.R.	MX341	MX321	
VOLTAGE REGULATION	± 1 %	± 0.5 %	With 4% ENGINE GOVERNING
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	REFER TO SHORT CIRCUIT DECREMENT CURVES (page 7)		

INSULATION SYSTEM	CLASS H							
PROTECTION	IP23							
RATED POWER FACTOR	0.8							
STATOR WINDING	DOUBLE LAYER LAP							
WINDING PITCH	TWO THIRDS							
WINDING LEADS	6							
MAIN STATOR RESISTANCE	0.00126 Ohms PER PHASE AT 22°C STAR CONNECTED							
MAIN ROTOR RESISTANCE	1.85 Ohms at 22°C							
EXCITER STATOR RESISTANCE	17.5 Ohms at 22°C							
EXCITER ROTOR RESISTANCE	0.063 Ohms PER PHASE AT 22°C							
R.F.I. SUPPRESSION	BS EN 61000-6-2 & BS EN 61000-6-4,VDE 0875G, VDE 0875N. refer to factory for others							
WAVEFORM DISTORTION	NO LOAD < 1.5% NON-DISTORTING BALANCED LINEAR LOAD < 5.0%							
MAXIMUM OVERSPEED	2250 Rev/Min							
BEARING DRIVE END	BALL. 6228 C3							
BEARING NON-DRIVE END	BALL. 6319 C3							
	1 BEARING				2 BEARING			
WEIGHT COMP. GENERATOR	3018 kg				2967 kg			
WEIGHT WOUND STATOR	1445 kg				1445 kg			
WEIGHT WOUND ROTOR	1257 kg				1195 kg			
WR <sup>2</sup> INERTIA	37.3309 kgm <sup>2</sup>				36.33 kgm <sup>2</sup>			
SHIPPING WEIGHTS in a crate	3091kg				3036kg			
PACKING CRATE SIZE	194 x 105 x 154(cm)				194 x 105 x 154(cm)			
	50 Hz				60 Hz			
TELEPHONE INTERFERENCE	THF<2%				TIF<50			
COOLING AIR	2.69 m <sup>3</sup> /sec 5700 cfm				3.45 m <sup>3</sup> /sec 7300 cfm			
VOLTAGE STAR	380/220	400/231	415/240	440/254	416/240	440/254	460/266	480/277
KVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES	1505	1550	1550	1520	1705	1815	1855	1890
X <sub>d</sub> DIR. AXIS SYNCHRONOUS	3.18	2.96	2.75	2.40	3.86	3.67	3.43	3.21
X' <sub>d</sub> DIR. AXIS TRANSIENT	0.19	0.18	0.17	0.15	0.23	0.22	0.21	0.20
X'' <sub>d</sub> DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.14	0.13	0.12	0.11	0.17	0.16	0.15	0.14
X <sub>q</sub> QUAD. AXIS REACTANCE	2.05	1.91	1.77	1.55	2.49	2.37	2.22	2.07
X'' <sub>q</sub> QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.29	0.27	0.25	0.22	0.35	0.33	0.31	0.29
X <sub>l</sub> LEAKAGE REACTANCE	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
X <sub>2</sub> NEGATIVE SEQUENCE	0.20	0.19	0.18	0.15	0.25	0.23	0.22	0.21
X <sub>0</sub> ZERO SEQUENCE	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
REACTANCES ARE SATURATED				VALUES ARE PER UNIT AT RATING AND VOLTAGE INDICATED				
T <sub>d</sub> TRANSIENT TIME CONST.	0.135s							
T'' <sub>d</sub> SUB-TRANSTIME CONST.	0.01s							
T <sub>do</sub> O.C. FIELD TIME CONST.	2.23s							
T <sub>a</sub> ARMATURE TIME CONST.	0.02s							
SHORT CIRCUIT RATIO	1/X <sub>d</sub>							