

# Analiza prijelazne stabilnosti elektrane na biomasu 5 MW

---

**Medved, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*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:200:194555>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni diplomski studij**

**ANALIZA PRIJELAZNE STABILNOSTI ELEKTRANE  
NA BIOMASU 5 MW**

**Diplomski rad**

**Ivan Medved**

**Osijek, 2016.**

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	1
1.2. Uvod u problematiku stabilnosti .....	1
<b>2. DEFINICIJA STABILNOSTI ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA</b> .....	<b>3</b>
2.1. Naponska stabilnost.....	4
2.1.1. Kriteriji stabilnosti.....	6
2.1.1.1. $d\Delta Q/dV$ kriterij .....	6
2.1.1.2. $dE/dV$ kriterij.....	8
2.1.1.3. $dQ_g/dQ_l$ kriterij .....	9
2.1.2. Podjela naponske stabilnosti.....	10
2.2. Frekvencijska stabilnost .....	11
2.2.1. Primarna i sekundarna regulacija .....	11
2.3. Kutna stabilnost.....	13
2.3.1. Podjela kutne stabilnosti.....	16
<b>3. PRIJELAZNA STABILNOST</b> .....	<b>18</b>
3.1. Jednadžba njihanja generatora.....	19
3.2. Numeričke metode integracije.....	21
3.2.1. Euler-ova metoda .....	22
3.2.2. Metoda korak po korak.....	23
3.3. Krivulja snaga-kut .....	25
3.4. Metoda jednakih površina .....	27
3.5. Utjecaj različitih kvarova na prijelaznu stabilnost .....	30
3.5.1. Jednofazni izravni kratki spoj.....	31
3.5.2. Dvofazni izravni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom.....	32
3.5.3. Dvofazni izravni kratki spoj .....	33
3.5.4. Trofazni kratki spoj .....	33
<b>4. KARAKTERISTIKE PROMATRANOG SUSTAVA</b> .....	<b>35</b>
4.1. Generator .....	36
4.2. Transformatori.....	38
4.3. Sabirnice .....	39
4.4. Kabeli .....	39
<b>5. SIMULACIJA PRIJELAZNE STABILNOSTI</b> .....	<b>41</b>
5.1. Trofazni kratki spoj na sabirnici ELEKTRANA 10 kV .....	43

5.2.	Trofazni kratki spoj na sabirnici SL.BROD 10 kV .....	46
5.3.	Trofazni kratki spoj na sabirnici STROSSMAYER 10 kV uz APU .....	49
5.4.	Trofazni kratki spoj na sabirnici STROSSMAYER 10 kV uz dvostruki APU .....	53
<b>6.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>57</b>
<b>7.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>58</b>
<b>8.</b>	<b>POPIS I OPIS UPOTRIJEBLJENIH OZNAKA .....</b>	<b>59</b>
<b>9.</b>	<b>SAŽETAK.....</b>	<b>61</b>
<b>10.</b>	<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>62</b>

# 1. UVOD

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak ovog diplomskog rada sastoji se od dva dijela. Prvi dio zahtjeva postavljanje teorijske podloge o stabilnosti elektroenergetskog sustava i obuhvaća prva tri poglavlja. U prvom, uvodnom poglavlju, govori se o važnosti razmatranja stabilnosti elektroenergetskog sustava. U drugom poglavlju definira se stabilnost sustava i opisana je podjela. Kako je prijelazna stabilnost glavna tema ovog rada, detaljno je razrađena u trećem poglavlju. Definirana je jednadžba njihanja generatora, prikazane su osnovne metode numeričke integracije, te ponašanja generatora u slučaju poremećaja.

Drugi dio rada je praktično dio i obuhvaća četvrto i peto poglavlje. U četvrtom poglavlju prikazane su karakteristike modeliranog sustava na kojemu se provodi analiza prijelazne stabilnosti. Rezultati analize prikazani su u petom poglavlju.

## 1.2. Uvod u problematiku stabilnosti

Elektroenergetski sustav predstavlja skup elementa smisleno povezanih u jednu cjelinu, u svrhu pretvaranja osnovnih oblika energije u električnu, te prijenos električne energije do krajnjih potrošača. Iako se električna energija rijetko koristi kao krajnji oblik energije, njezina je prednost što se u tom obliku može kontrolirati i prenositi do krajnjih korisnika, gdje se pretvara u neki od iskoristivih oblika energije kao što su svjetlosna, toplinska ili mehanička energija. [1]

Glavni cilj elektroenergetskog sustava je pouzdana opskrba potrošača električnom energijom, a da bi to bilo moguće, sustav mora biti u mogućnosti proizvoditi, prenositi te distribuirati električnu energiju na širokom geografskom području. Zbog svoje složenosti, elektroenergetski sustav zahtjeva široki spektar zahvata tijekom svoga rada. Potreba potrošača za električnom energijom glavni je parametar koji određuje proizvodnju elektrana, a potrebe se mijenjaju tokom cijelog dana. Stoga je potrebno održavati ravnoteže snaga unutar sustava tako da zbroj snaga proizvodnje elektrana bude jednak zbroju snaga opterećenja potrošača i gubitaka.

Dok se spore promjene opterećenja s određenim trendom mogu unaprijed predvidjeti, EES je kontinuirano izložen drugim vrstama poremećaja kao što su kratki spojevi na prijenosnim vodovima, ispadi proizvodnih jedinica, ispadi značajnih potrošača, te nedostatak raspoložive snage u sustavu. Poremećaji mogu zahvatiti samo neke elemente sustava, dijelove sustava, ili čak cijeli sustav, a zbog složenosti sustava moguć je velik broj različitih dinamičkih interakcija. Veći poremećaji mogu prouzrokovati promjene u topologiji mreže nakon izoliranja pogođenog elementa iz sustava. Kada je EES podvrgnut poremećaju upitna je njegova stabilnost koja ovisi o početnom stanju sustava, te o karakteristikama poremećaja, što dovodi do definiranja stabilnosti.

## 2. DEFINICIJA STABILNOSTI ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

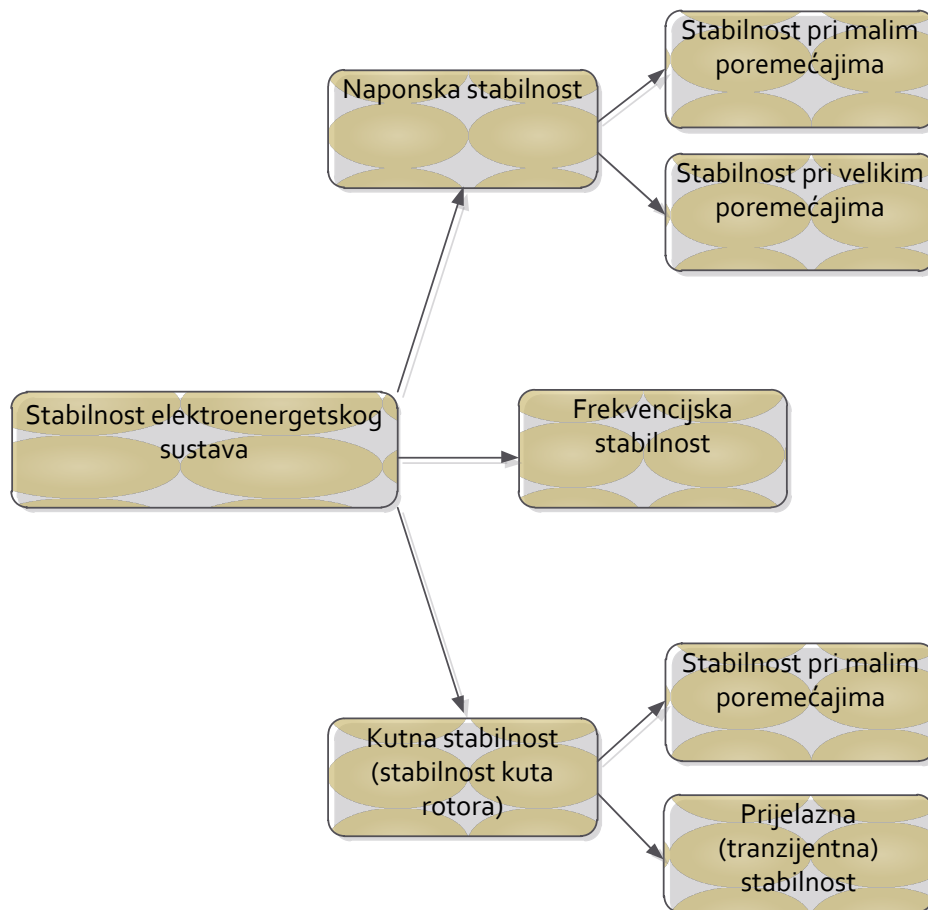
Stabilnost elektroenergetskog sustava je sposobnost sustava da u normalnim pogonskim uvjetima zadrži ravnotežno pogonsko stanje, a da nakon poremećaja ponovno uspostavi ravnotežno pogonsko stanje [1]. Budući da se EES u proizvodnji najviše oslanja na sinkrone generatore, stabilnost sinkronih generatora je ključan uvjet za stabilan rad EES-a. Analogno prvoj definiciji, stabilnost jednog generatora koji radi paralelno sa sustavom definira se kao sposobnost tog generatora da unatoč poremećaju ostane u sinkronizmu sa sustavom.

Prema definiciji stabilnosti, nakon poremećaja je potrebno osigurati cjeloviti integritet EES-a. On je očuvan ako preostali dio EES-a, nakon izoliranja pogođenih elemenata, ostane cjelovit bez daljnjih ispada proizvodnih jedinica ili potrošača. Na stabilnost sustava utječu električne i mehaničke konstante generatora, konstante pogonskih strojeva, kao i regulatori uzbude generatora te turbinski regulatori. Budući da na stabilnost utječe i povezanost generatora, to znači da utječu i konstante dalekovoda i njihove dužine.

Zbog utjecaja velikog broja različitih faktora stabilnost EES-a gotovo je nemoguće analizirati kao cjelinu. Stoga se problematika stabilnosti klasificira u određene kategorije kako bi se olakšalo prepoznavanje ključnih faktora koji doprinose nestabilnosti, te stvorile metode za poboljšanje stabilnog rada sustava. U osnovi se stabilnost dijeli na tri kategorije:

- Stabilnost napona
- Stabilnost frekvencije
- Stabilnost kuta rotora ili kutna stabilnost

Na slici 2.1. prikazana je detaljna podjela stabilnosti. Budući da je analiza stabilnosti zasnovana na velikom broju različitih razmatranja, iz praktičnih se razloga može klasificirati prema fizičkoj prirodi rezultirajuće nestabilnosti, prema veličini poremećaja koji uzrokuje nestabilnost, prema vremenskom rasponu razmatranja prijelazne pojave te metodama proračuna stabilnosti. Stoga se u daljnjem razmatranju, osnovne tri kategorije dijele se prema veličini poremećaja i njegovom trajanju.



**Slika 2.1.** Podjela stabilnosti elektroenergetskog sustava

## 2.1. Naponska stabilnost

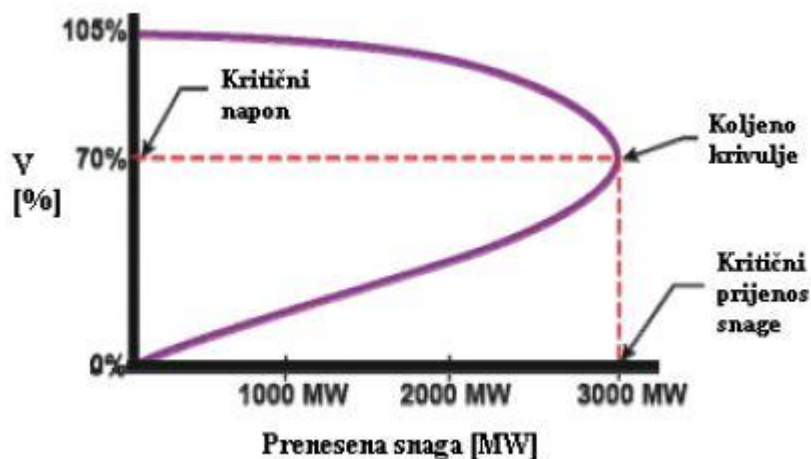
Kako se stanje opterećenosti sustava, te konfiguracije mreže s vremenom stalno mijenjaju, napon u svim čvorištima mreže je promjenjivog karaktera. Stoga je zadatak regulacije napona održati pogonski napon unutar dozvoljenih granica.

Naponska stabilnost definira se kao sposobnost sustava da u stacionarnom stanju ili nakon poremećaja, održi vrijednosti napona unutar propisanih granica [2]. Ispravno održavanje napona zahtijeva poznavanje međusobne povezanosti napona i jalove snage, jer povećanje proizvodnje jalove snage uzrokuje povećanje napona, a povećanje potrošnje jalove snage uzrokuje smanjenje napona. Glavni kriterij naponske stabilnosti glasi: za svaku točku sustava vrijedi da svakom porastu napona odgovara injekcija jalove energije u tu točku. Ukoliko postoji točka za koju vrijedi da se injekcijom jalove energije smanjuje napon, sustav je nestabilan. Stoga je u svakom trenutku potrebno držati ravnotežu između jalove snage proizvodnje i jalove snage potrošnje, jer je glavni uzrok naponske nestabilnosti upravo



nemogućnost sustava da isporuči potrebne količine jalove energije. Takva nestabilnost može dovesti do propada napona, a u najgorem slučaju i do sloma napona. Osim tokova snaga i topologije mreže, slomu napona mogu pridonijeti i ograničenje regulacije napona i jalove energije generatora, karakteristike tereta te karakteristike prijenosnog sustava.

Karakteristike prijenosnog sustava pri razmatranju stabilnosti napona najbolje se mogu opisati P-V i Q-V krivuljama. Primjer P-V krivulje prikazan je na slici 2.2., a pokazuje ovisnost napona čvorišta o injektiranoj djelatnoj snazi u promatrano čvorište. Može se zaključiti kako prijenosna moć sustava određuje granicu naponske stabilnosti.



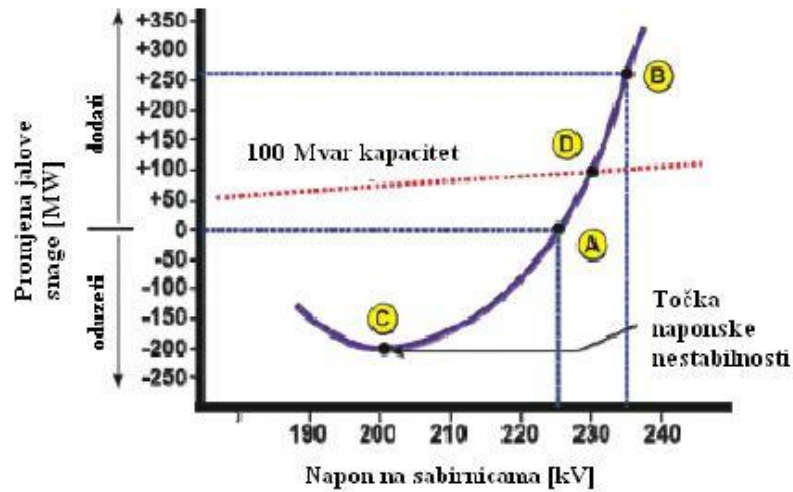
Slika 2.2. P-V krivulja [1]

Na slici se vidi nelinearna ovisnost napona o porastu prijenosa djelatne snage, odnosno napon sve strmije opada s približavanjem granici stabilnosti. Točka na krivulji kojoj odgovara kritični prijenos naziva se koljeno P-V krivulje. Ako bi opterećenje postalo veće od kritične vrijednosti, došlo bi do naglog pada napona i prijenosa snage što bi dovelo do nestabilnosti napona te u konačnici do mogućeg sloma napona.

Na slici 2.3. prikazan je primjer Q-V krivulje. Ona pokazuje koliko je reaktivne energije potrebno injektirati u promatrani čvor da bi se vrijednost napona tog čvora kretala unutar propisanih granica, uz konstantnu radnu snagu.

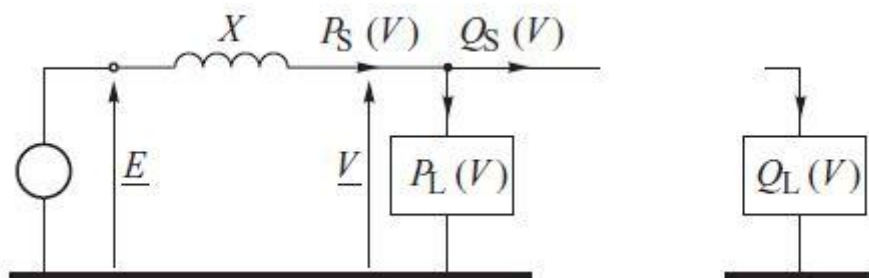
Na slici je prikazano nekoliko karakterističnih točaka. Točka C je kritična točka, te ukoliko vrijednost napona padne ispod te vrijednosti, postoji mogućnost naponskog sloma. Točka A odgovara točki kada u sustavu nema injektirane dodatne snage, a napon je niži od nazivnoga.

Da bi se postigao nazivni napon, potrebno je u sustav injektirati određenu količinu reaktivne energije koja odgovara točki B.



Slika 2.3.  $Q$ - $V$  krivulja[1]

### 2.1.1. Kriteriji stabilnosti



Slika 2.4. Ekvivalentni krug za određivanje karakteristika jalove snage u sustavu. [3]

Neka je  $E$  napon izvora električne energije, a  $V$  napon kod potrošača.  $P_s$  i  $Q_s$  predstavljaju generiranu radnu i jalovu snagu, a  $P_l$  i  $Q_l$  radnu i jalovu snagu potrošnje.  $X$  je reaktancija prijenosnog voda.

#### 2.1.1.1. $d\Delta Q/dV$ kriterij

Klasični kriterij stabilnosti i predstavlja mogućnost sustava da napoji potrošače jalovom energijom uz zadani uvjet djelatne snage. Neka jalova snaga proizvodnje u ovom primjeru ne bude određena jalovom snagom koju zahtjeva potrošač.

Tada je djelatna snaga:

$$P_l(V) = P_s(V) = \frac{E * V}{X} \sin \delta, \quad (2.1)$$

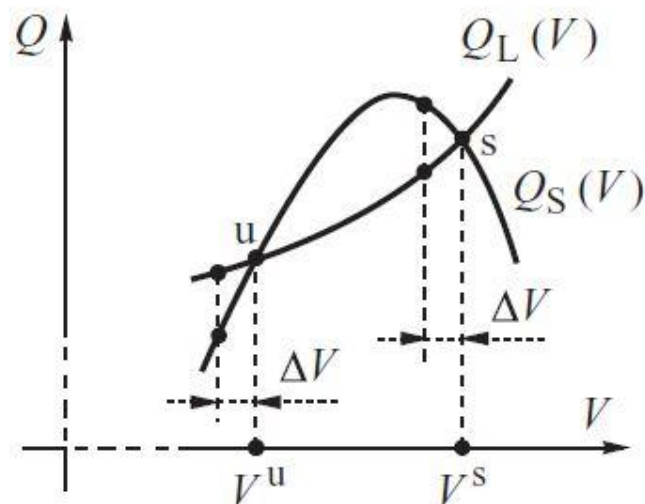
a jalova snaga proizvodnje:

$$Q_s(V) = \frac{E * V}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X}. \quad (2.2)$$

Iz ove dvije jednačbe dobije se jednačba koja određuje karakteristiku *reaktivna snaga – napon* i pokazuje koliko će reaktivne snage biti generirano od strane izvora ako je sustav opterećen djelatnom snagom uz napon potrošača kao varijablu.

$$Q_s(V) = \sqrt{\left[\frac{E * V}{X}\right]^2 - [P_l(V)]^2} - \frac{V^2}{X}. \quad (2.3)$$

Ako se sada reaktivna snaga tereta, koja je u početnom razmatranju bila teorijski odvojena, ponovno spoji na sustav, tada se karakteristike proizvodnje i potrošnje mogu nacrtati na zajedničkom dijagramu.



**Slika 2.5.**  $d\Delta Q/dV$  kriterij. [3]

Na slici 2.5. prikazana je ovisnost proizvodnje i potrošnje jalove snage, odnosno ravnoteže jalove snage o naponu. Sa slike je vidljivo kako se  $Q_s(V)$  i  $Q_l(V)$  karakteristike sijeku u dvije točke, odnosno za zadovoljenje zahtjevane snage, postoje dvije vrijednosti napona. Jedna točka (s) odgovara stabilnoj, dok druga točka (u) odgovara nestabilnoj ravnoteži. Promatrajući nestabilnu točku (u), može se vidjeti kako će u slučaju poremećaja smanjenje

napona izazvati deficit jalove snage. Tada će proizvodnja biti manja od potrošnje jalove snage,  $Q_s(V) < Q_l(V)$ , te vrijedi izraz:

$$\frac{d(Q_s - Q_l)}{dV} > 0. \quad (2.4)$$

Tada će deficit jalove snage izazvati daljnji propad napona te će sustav izgubiti stabilnost. U slučaju stabilne točke (s), smanjenje napona izazvat će višak jalove snage u sustavu. Proizvodnja će tada biti veća od potrošnje jalove snage  $Q_s(V) > Q_l(V)$ , te će to povratno djelovati na povišenje napona, odnosno vraćanje u stabilnu točku.

$$\frac{d(Q_s - Q_l)}{dV} < 0. \quad (2.5)$$

Isto vrijedi i u slučaju povećanja napona, nastaje deficit jalove snage te se napon smanjuje i vraća u stabilnu točku. Može se zaključiti kako je promjena viška reaktivne snage negativna u stabilnoj, a pozitivna u nestabilnoj točki.

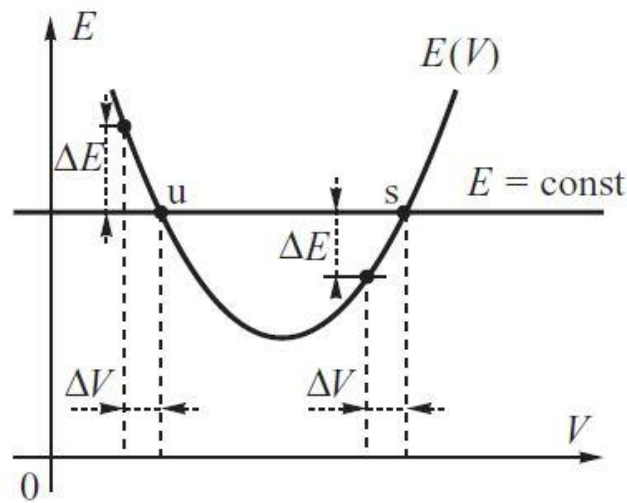
#### 2.1.1.2. $dE/dV$ kriterij

Neka se ekvivalentna elektromotorna sila  $E$  u sustavu izrazi kao funkcija napona potrošača:

$$E(V) = \sqrt{\left[V + \frac{Q_l(V) * X}{V}\right]^2 + \left[\frac{P_l(V) * X}{V}\right]^2}. \quad (2.6)$$

Ako se pretpostavi da je elektromotorna sila izvora konstanta ( $E=konst.$ ) dobije se karakteristika  $dE/dV$  kriterija, na slici 2.6. Komponente  $\frac{P_l(V)*X}{V}$  i  $\frac{Q_l(V)*X}{V}$  predstavljaju padove napona na reaktanciji prijenosnog voda  $X$ . Budući da su te dvije komponente daleko manje od vrijednosti napona  $V$ , iz izraza se vidi kako će u slučaju smanjenja napona  $V$  doći do smanjenja  $E(V)$ . Ako se napon  $V$  dalje nastavi smanjivati, obje komponente padova napona će tada doći do izražaja i nakon određene vrijednosti napona  $V$ , karakteristika  $E(V)$  će rasti. Zbog toga ovaj kriterij također ima dvije točke, stabilnu (s) i nestabilnu (u). Za stabilnu točku vrijedi da će smanjenje napona potrošača uzrokovati smanjenje elektromotorne sile  $E(V)$  koja je tada manja od konstantne vrijednosti  $EMS$  izvora. Budući da je  $EMS$  izvora tada prevelika za napajanje potrošača, napon potrošača  $V$  je prisiljen porasti i vratiti se u stabilnu točku. Isto vrijedi i za poremećaj koji uzrokuje povećanje napona potrošača, tada je  $E(V) > E$  što znači

da je napon koji zahtjeva potrošač veći od EMS izvora. Tada je napon potrošača  $V$  također prisiljen vratiti se u stabilnu točku.



Slika 2.6.  $dE/dV$  kriterij. [3]

U slučaju poremećaja za nestabilnu točku (n) vidi se kako smanjenje napona potrošača ima za posljedicu povećanje elektromotorne sile sustava i vrijedi da je  $E(V) > E$ . Kako je tada EMS izvora premala ne može se zadovoljiti održavanje napona te napon potrošača još više opada što pokazuje da je točka nestabilna. Prema ovom kriteriju, točka je stabilna ako vrijedi:

$$\frac{dE}{dV} > 0. \quad (2.7)$$

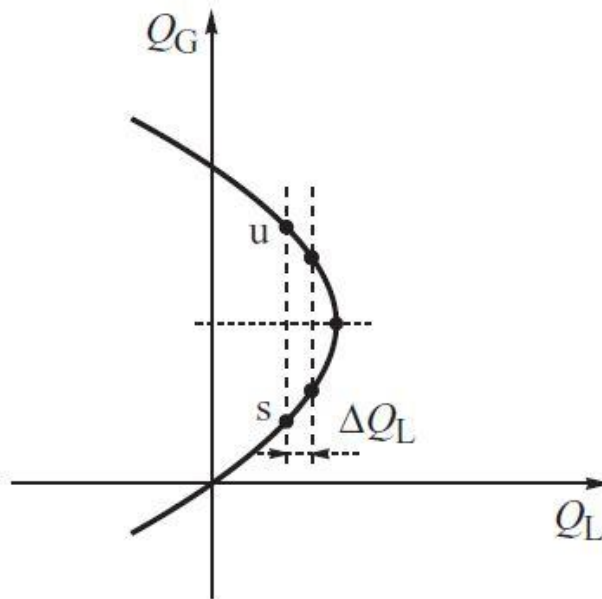
Za elektroenergetski sustav za više generatora, svaki generatorski čvor mora zadovoljiti ovaj kriterij.

### 2.1.1.3. $dQ_g/dQ_l$ kriterij

Na slici 2.7. prikazan je utjecaj malog poremećaja na  $dQ_g/dQ_l$  kriterij. Napon  $V$  i kut opterećenja  $\delta$  ovise o zahtjevima potrošača za radnom i reaktivnom snagom, a za generiranu reaktivnu snagu vrijedi:

$$Q_g(V) = \frac{V^2}{X} - \frac{E * V}{X} \cos\delta, \quad (2.8)$$

Pri razmatranju ovog kriterija, opet je vidljivo kako postoje dvije ravnotežne točke koje predstavljaju dvije vrijednosti generirane reaktivne snage za zadovoljenje potražnje, stabilna (s) i nestabilna točka (u).



**Slika 2.7.**  $dQ_g/dQ_l$  kriterij[3]

Vrijedi da je točka stabilna ako povećanje potražnje reaktivne snage, uzrokuje povećanje proizvodnje reaktivne snage (točka  $s$ ). Za nestabilnu točku  $u$  vrijedi da povećanje potražnje reaktivne snage uzrokuje smanjenje proizvodnje, a smanjenje potražnje uzrokuje povećanje proizvodnje. Može se zaključiti kako je sustav stabilan ako proizvodnja reaktivne snage prati promjene potražnje, odnosno vrijedi:

$$\frac{dQ_g}{dQ_l} > 0. \quad (2.9)$$

### 2.1.2. Podjela naponske stabilnosti

U složenim elektroenergetskim sustavima mnogo je čimbenika koji mogu dovesti do raspada sustava zbog naponske nestabilnosti: jačina prijenosnog sustava, razine prijenosa snage, karakteristike tereta, sposobnosti generiranja reaktivne snage te karakteristike kompenzacije reaktivne snage. Stoga se u svrhu analize naponska stabilnost dijeli prema veličini i trajanju poremećaja. Prema veličini poremećaja tako postoji naponska stabilnost pri malim poremećajima, te naponska stabilnost pri velikim poremećajima.

Naponska stabilnost pri malim poremećajima predstavlja sposobnost sustava da održi napone u propisanim granicama pri malim promjenama u sustavu. To mogu biti kontinuirane promjene opterećenja s određenim trendom koje se unaprijed mogu prognozirati, te se kompenzirati regulacijom proizvodnih jedinica u pogonu, ili obustavom i puštanjem u pogon

određenih proizvodnih jedinica. Za naponsku stabilnost pri malim poremećajima vrijedi kriterij da je sustav naponski stabilan ako za svaku točku vrijedi da povećanje injektirane reaktivne snage uzrokuje povećanje napona.

Naponska stabilnost pri velikim poremećajima predstavlja sposobnost sustava da zadrži vrijednosti napona unutar propisanih granica nakon velikih poremećaja kao što su ispadi proizvodnih jedinica, kvarovi na prijenosnim vodovima, uključivanje ili ispadi velikih potrošača.

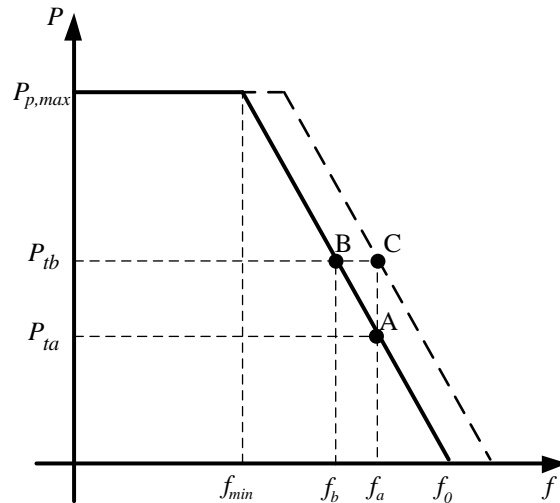
## **2.2. Frekvencijska stabilnost**

Frekvencijska stabilnost predstavlja sposobnost elektroenergetskog sustava da u slučaju neravnoteže proizvodnje i potrošnje održi frekvenciju unutar prihvatljivih granica. Neravnoteža proizvodnje i potrošnje može biti uzrokovana ispadom proizvodnih jedinica iz pogona, preopterećenjem vodova, naglim promjenama opterećenja u sustavu i raspadom sustava na podsustave. Frekvencijska stabilnost uključuje sve poremećaje, i male i velike, i određena je cjelokupnim odzivom sustava u vidu srednje vrijednosti frekvencije. Stabilnost frekvencije ovisi o sposobnosti sustava da održi ili povрати ravnotežu između proizvodnje i potrošnje, a povezana je s nedostacima u koordinaciji regulacijske i zaštitne opreme.

### **2.2.1. Primarna i sekundarna regulacija**

Budući da proizvodne jedinice u svakom trenutku moraju pratiti promjenjivo opterećenje, potrebno je konstantno regulirati izlaznu električnu snagu generatora. Jednim dijelom to se postiže regulacijom mehaničke snage turbine. Regulatori koji upravljaju snagom turbine nazivaju se primarni regulatori, a sam proces primarna regulacija. Na slici 2.8. prikazana je karakteristika primarnog regulatora. Iz karakteristike se može vidjeti kako promjena opterećenja utječe na frekvenciju.

Ako se uslijed promjene opterećenja stvori neravnoteža proizvodnje i potrošnje električne energije, primarni regulator će nastojati prigušiti tu razliku otvaranjem ili zatvaranjem ventila. Ako se zbog povećanja opterećenja, prema slici 2.8., snaga generatora primarnom regulacijom povisi sa vrijednosti  $P_{ta}$  na vrijednost  $P_{tb}$  može se vidjeti kako frekvencija opada sa vrijednosti  $f_a$  na vrijednost  $f_b$ . Radna točka u tom slučaju pomiče se iz točke A u točku B.

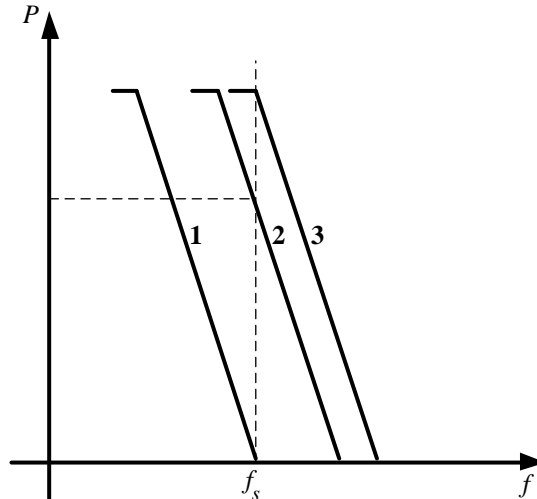


**Slika 2.8.** Karakteristika primarnog regulatora turbine [4]

Upravo taj nedostatak održavanja frekvencije predstavlja glavni problem primarne regulacije, a izbjegava se uvođenjem sekundarne regulacije. Budući da je u točki B frekvencija preniska, sekundarnom regulacijom se primarna karakteristika regulatora translacija uzduž horizontalne osi sve dok frekvencija ne poprimi vrijednost što bliže onoj prije poremećaja. Nova radna točka je u točki C, a odgovara povećanom opterećenju nakon poremećaja  $P_{tb}$  i početnoj frekvenciji prije poremećaja  $f_a$ .

Ovo vrijedi u slučaju otočnog pogona. Ako se generator priključi na krutu mrežu, zajednička frekvencija sustava određuje radnu točku na karakteristici primarnog regulatora. Budući da promjena proizvedene električne energije jednog ne uzrokuje promjenu frekvencije cjelokupnog sustava, sekundarnom regulacijom moguće je mijenjati opterećenje pojedinog agregata. Na slici 2.9. prikazana su tri položaja karakteristike primarnog regulatora. Okomitom isprekidanom linijom označena je konstantna frekvencija sustava  $f_s$ . Prvi položaj predstavlja stanje praznog hoda generatora, a turbina pokriva samo neznatne gubitke. Sekundarnom regulacijom generator se iz stanja praznog hoda dovodi u stanje opterećenosti. Drugi položaj predstavlja opterećenost agregata od oko 75%. Daljnjim pomicanjem primarne karakteristike moguće je generator dovesti do maksimalnog opterećenja što odgovara položaju 3. Taj slučaj se izbjegava jer generator tada radi na granici stabilnosti.





**Slika 2.9.** Promjena opterećenja agregata sekundarnom regulacijom[4]

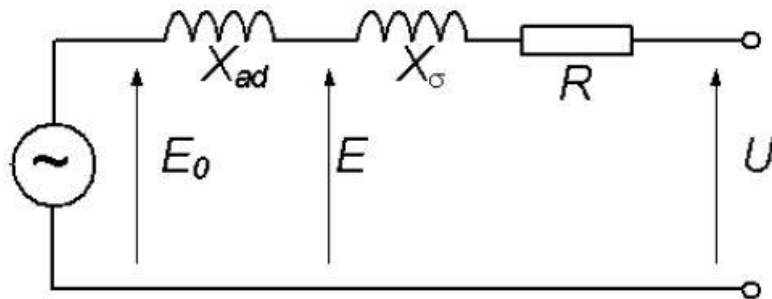
Pri manjim dnevnim promjenama opterećenja u sustavu, u pojedinim razdobljima dana, razlika proizvodnje i potrošnje može se pratiti sekundarnom regulacijom. Ako se u slučaju velikih poremećaja u sustavu frekvencija sustava naglo promjeni, primarni regulatori svih turbina u sustavu reagiraju na način da svaki agregat preuzima ili odbacuje dio opterećenja, ovisno o prirodi poremećaja.

### 2.3. Kutna stabilnost

Kutna stabilnost ili stabilnost kuta rotora predstavlja sposobnost sinkronih generatora, koji rade paralelno sa EES-om, da zadrže sinkronizam nakon poremećaja, za određeno početno pogonsko stanje sustava. Kutna stabilnost ovisi o sposobnosti održavanja ravnoteže između električnog i mehaničkog momenta svakog sinkronog generatora u sustavu. Sinkroni generator spojen na EES ima svojstva titrajnog kruga u kojemu se energija njiše između dva spremnika. To su mreža, koja je spremnik električne energije, i rotor sinkronog stroja, koji je spremnik mehaničke energije. Kao posljedica njihanja energije javljaju se njihanja svih električnih i mehaničkih veličina stroja: frekvencija, struja, napon, brzina vrtnje, kut opterećenja, radna snaga, jalova snaga. Ova njihanja nazivaju se elektromehanička njihanja, do kojih dolazi ako se naruši ravnoteža između mehaničkog momenta pogonskog stroja i električnog momenta kojeg razvija sinkroni generator.

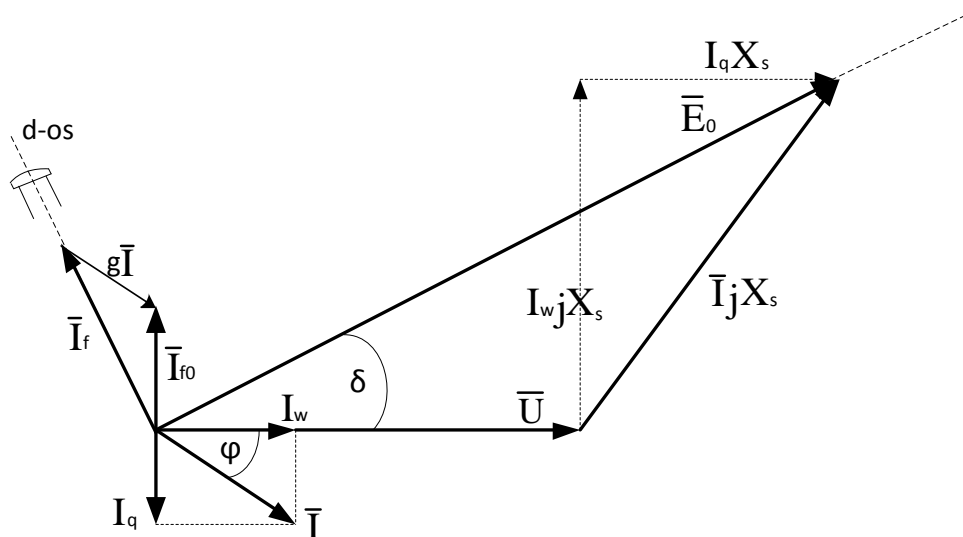
Neka se za razumijevanje daljnjeg razmatranja najprije definiraju *kut opterećenja generatora* ili *kut rotora*. Na slici 2.11. nalazi se vektorsko-fazorski dijagram sinkronog generatora u d-q

koordinatnom sustavu koji se sastoji od direktne (d) osi, i kvadratne (q) osi. Obje osi prate rotor, d-os leži u smjeru magnetskog polja koje stvara uzбудni namot, dok je q-os pomaknuta  $90^\circ$  u odnosu na d-os. Na slici 2.10. prikazana je nadomjesna shema sinkronog stroja.



**Slika 2.10.** Nadomjesna shema sinkronog generatora s cilindričnim rotorom[5]

Neka je napon stezaljki generatora  $\bar{U}$  referentna veličina. Struja  $\bar{I}$  kasni za naponom za određeni kut  $\varphi$ , a sastoji se od radne komponente  $I_w$ , te jalove komponente  $I_q$ . Na smjer vektora struje  $\bar{I}$  okomit je pad napona zbog sinkrone reaktancije  $\bar{I} * jX_s$ . Ako se vektorski zbroje napon stezaljki generatora, i pad napona zbog sinkrone reaktancije, dobije se unutarnji (polni) napon generatora  $\bar{E}_0$ . U električnom smislu promatrano, kut opterećenja generatora  $\delta$  predstavlja kut između napona statora generatora  $\bar{U}$  i unutarnjeg napona rotora  $\bar{E}_0$

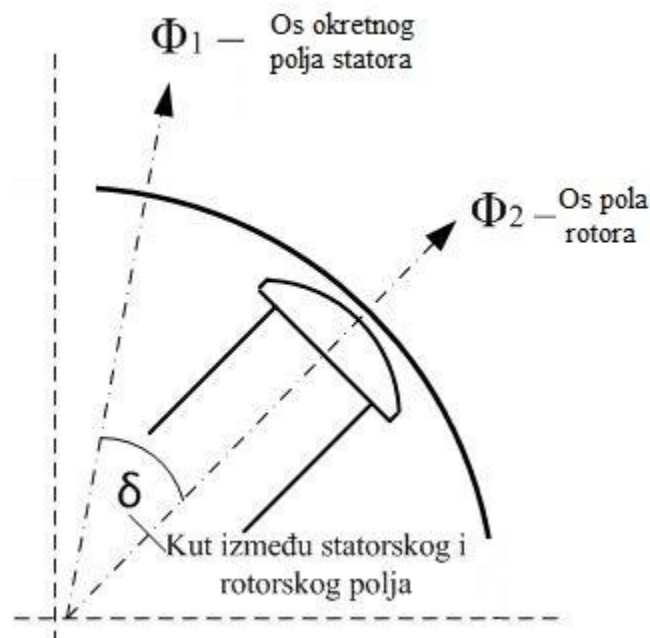


**Slika 2.11.** Vektorsko-fazorski dijagram sinkronog generatora

Struja uzbuđe praznog hoda  $\bar{I}_{f0}$  okomita je na napon stezaljki generatora  $\bar{U}$ , dok je struja uzbuđe  $\bar{I}_f$  okomita na unutarnji polni napon generatora  $\bar{E}_0$ . Spoj vrhova fazora  $\bar{I}_f$  i  $\bar{I}_{f0}$

predstavlja reakciju armature i označava se sa  $\vec{g}$ , a paralelan je sa armaturnom strujom  $\vec{I}$ . Kut rotora može se promatrati i u geometrijskom smislu pomoću magnetskih tokova rotora i statora. Protjecanjem uzbudne struje kroz uzбудni namot na rotoru dobije se elektromagnet. Kako se rotor okreće, tako se okreće i njegovo magnetsko polje. Promatrano sa statora, to je okretno magnetsko polje, te se na statoru inducira napon koji slijedi polje rotora. U generatoru je ukupno magnetsko polje rezultat magnetskog polja koje stvara uzбудna struja i magnetskog polja koje stvaraju struje armature.

Slika 2.12. prikazuje kut rotora u geometrijskom smislu kao kutnu razliku između osi okretnog magnetskog polja statora, i osi pola rotora. U sustavu sa više generatora, kut rotora predstavlja međusobnu kutnu razliku položaja rotora generatora.



**Slika 2.12.** Geometrijski prikaz kuta rotora

Nestabilnost sustava može rezultirati povećanjem kutne razlike pojedinih generatora. Kada je sustav izložen poremećaju, narušava se konstantnost brzine vrtnje što rezultira ubrzavanjem ili usporavanjem pojedinih generatora u odnosu na ostale generatore sustava. Ako se jedan generator u nekom trenutku vrti sporije od drugog, njegov relativni kutni položaj kasni za bržim generatorom. Zbog te kutne razlike, brži generator preuzima dio tereta sa sporijeg generatora.

Ako se kutna razlika poveća preko određene granice dolazi do smanjenja prijenosne moći, što uzrokuje daljnje povećavanje kutne razlike te sustav prelazi u labilnu ravnotežu, što može dovesti do ispada generatora iz sinkronizma.

Ako jedan generator ispadne iz sinkronizma, ostali generatori preuzimaju njegovo opterećenje, što može preopteretiti neki od generatora te njega dovesti do gubitka sinkronizma. U najgorem slučaju može doći do lančanog ispada generatora te raspada cjelokupnog sustava. Na aspekt zadržavanja sinkronizma generatora naviše utječe dinamika kuta rotora generatora i odnos između radne snage i kuta rotora.

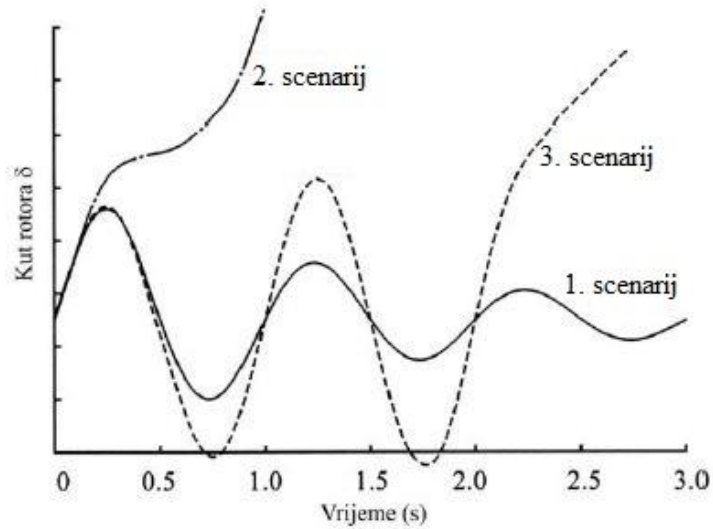
### **2.3.1. Podjela kutne stabilnosti**

Kutna stabilnost dijeli se na stabilnost uz male poremećaje i prijelaznu stabilnost. Prijelazna ili tranzijentna stabilnost predstavlja stabilnost pri velikim poremećajima. Pod velikim poremećajima smatraju: uključanja i isključenja velikih potrošača, ispadi proizvodnih jedinica ili kvarovi u mreži. Prijelazna stabilnost kao glavna tema ovoga rada obrađena je u zasebnom poglavlju.

Stabilnost uz male poremećaje odnosi se na oscilacije koje su izazvane malim promjenama pogonskog stanja sustava. Iako se oscilacije uzrokovane malim poremećajima u većini slučajeva naglo priguše i ne predstavljaju opasnost od gubitka stabilnosti, one ipak pod određenim okolnostima mogu dovesti do gubitka stabilnosti zbog trajnog zadržavanja oscilacija. To su oscilacije koje nisu prigušene i s vremenom se mogu pojačati, odnosno raspirivati. Nestabilnost se može manifestirati na dva načina: [1]

1. konstantno povećanje kuta rotora uslijed nedostatka sinkronizacijskog momenta;
2. rotorske oscilacije rastućih amplituda uslijed nedostatka prigušnog momenta.

Na slici 2.13. prikazani su odzivi kuta opterećenja za tri različita scenarija. Prvi scenarij predstavlja stabilno stanje gdje kut opterećenja doseže maksimum, a zatim se nakon nekoliko prigušenih oscilacija vraća u početno stabilno stanje. Drugi scenarij predstavlja nestabilno stanje. Nakon poremećaja kut opterećenja se kontinuirano povećava sve dok se ne izgubi sinkronizam. U ovom slučaju nestabilnost je uzrokovana nedovoljnim sinkronizacijskim momentom i često se naziva nestabilnost prvog njihaja.



**Slika 2.13.** *Odzivi kuta opterećenja[6]*

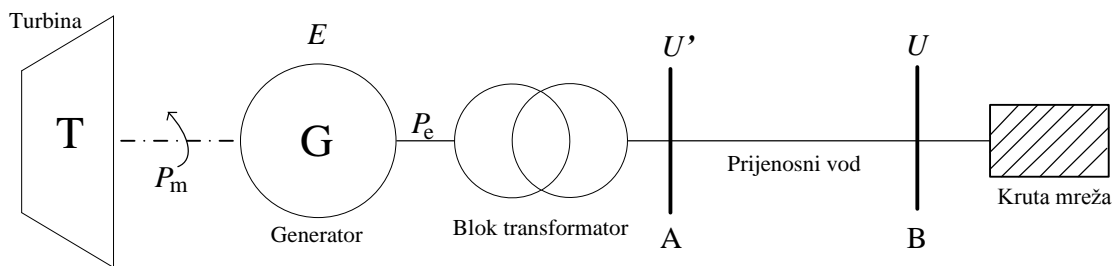
U trećem scenariju sustav neposredno nakon poremećaja ne gubi stabilnost, ali se javljaju rastuće oscilacije amplitude kuta opterećenja pa se može reći da je novo ustaljeno stanje nakon poremećaja nestabilno. Te raspirujuće oscilacije će nakon određenog vremena prouzročiti gubitak sinkronizma. Ovaj scenarij spada u kategoriju nestabilnosti pri malim poremećajima.

### 3. PRIJELAZNA STABILNOST

Veliki poremećaji u mreži imaju za posljedicu velike oscilacije električnih veličina sustava: kut rotora generatora, naponi sabirnica, tokovi snaga i druge varijable. Sposobnost generatora da zadrži sinkronizam pri ovakvim poremećajima sustava naziva se prijelazna ili tranzijentna stabilnost.

Prijelazna stabilnost odnosi se na ispitivanje odziva sustava u kratkotrajnom razdoblju nakon nastanka kvara, odnosno početka elektromehaničke prijelazne pojave. Ispitivanje se vrši za vrijeme prvog njihanja rotora sinkronog generatora. Vremenski period za analizu prijelazne stabilnosti je obično u rasponu do 5 sekundi nakon nastanka poremećaja.

Na slici 3.1. prikazan je priključak generatora na krutu mrežu. Sustav se sastoji od turbine, generatora, blok transformatora, prijenosnog sustava i krute mreže.



3.1. Prključak generatora na krutu mrežu

Ispitivanje kutne stabilnosti sustava vrši se pomoću krivulje snaga – kut, gdje je kriterij za stabilnost međusobna kutna razlika susjednih generatora. Ukupna reaktancija prijenosnog sustava  $X$  računa se kao zbroj reaktancije generatora, reaktancije transformatora, te reaktancije prijenosnog voda.

Ako se pretpostavi da se radi o sustavu bez gubitaka snage, djelatna električna snaga koju generator predaje u mrežu može se odrediti iz izraza:

$$P_e = \frac{E * U}{X} * \sin\delta \quad (3.1)$$

gdje je:  $P_e$  – električna snaga predana sustavu  
 $E$  – elektromotorna sila generatora  
 $U$  – napon elektroenergetskog sustava u točki B

$X$  – ukupna reaktancija prijenosnog sustava

$\delta$  – kut opterećenja generatora

### 3.1. Jednadžba njihanja generatora

Svaki poremećaj u sustavu stvara promjenu električnog momenta generatora  $M_e$ . Budući da je promjena električnog momenta generatora znatno brža od promjene mehaničkog momenta turbine  $M_m$ , dolazi do neravnoteže ova dva momenta što uzrokuje promjenu brzine vrtnje generatora. [1] Promjena brzine vrtnje najbolje je opisana drugim Newtonovim zakonom:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_m - M_e \quad (3.2)$$

gdje je:  $J$  – ukupni moment tromosti agregata [ $\text{kgm}^2$ ]

$\omega_r$  - mehanička brzina vrtnje rotora [ $\text{rad/s}$ ]

$M_m$  - mehanički moment turbine

$M_e$  – električni moment generatora

Mehanička brzina vrtnje rotora  $\omega_r$  može se izraziti kao:

$$\omega_r = \omega_0 + \Delta\omega_r \quad (3.3)$$

gdje je:  $\omega_0$  - sinkrona brzina vrtnje rotora

$\Delta\omega_r$  - promjena brzine vrtnje uzrokovana neravnotežom električnog i mehaničkog momenta

Budući da je promjena brzine vrtnje  $\Delta\omega_r$  uzrokovana poremećajem sustava direktno povezana sa promjenom kuta opterećenja, vrijedi izraz:

$$\Delta\omega_r = \frac{d\delta_r}{dt}. \quad (3.4)$$

Ako se izraz (3.4) uvrsti u (3.1):

$$J \frac{\omega_0 + \frac{d\delta_r}{dt}}{dt} = M_m - M_e \quad (3.5)$$

$$J \frac{d^2 \delta_r}{dt^2} = M_m - M_e. \quad (3.6)$$

Pri istraživanju odnosa opterećenja i frekvencije potrebno je uvesti ovisnost brzine o električnoj i mehaničkoj snazi, prema izrazu:

$$P = \omega_r M. \quad (3.7)$$

Ako se izraz (3.7) uvrsti u (3.6), dobije se izraz:

$$J \frac{d^2 \delta_r}{dt^2} = \frac{P_m}{\omega_r} - \frac{P_e}{\omega_r} \quad (3.8)$$

gdje je:  $P_m$  – mehanička snaga koju turbina predaje generatoru  
 $P_e$  – izlazna električna djelatna snaga generatora

Ako se izraz (3.8) pomnoži sa sinkronom brzinom  $\omega_0$ , dobije se:

$$J \omega_0 \frac{d^2 \delta_r}{dt^2} = \frac{\omega_0}{\omega_r} P_m - \frac{\omega_0}{\omega_r} P_e. \quad (3.9)$$

Budući da je brzina za vrijeme poremećaja približno jednaka sinkronoj brzini generatora ( $\omega_0 \approx \omega_r$ ), članovi uz mehaničku i električnu snagu iznose približno 1, pa se mogu zanemariti. Umnožak sinkrone brzine i momenta tromosti agregata naziva se kutni moment ( $M_i = J \omega_0$ ). Konačno se dobije izraz:

$$M_i \frac{d^2 \delta_r}{dt^2} = P_m - P_e. \quad (3.10)$$

Ovaj izraz naziva se jednadžba njihanja i predstavlja temeljnu jednadžbu kojom se opisuje dinamika rotora. Za ovaj izraz vrijedi pretpostavka da su zanemareni gubici, te utjecaj prigušnog mehaničkog momenta. Umjesto kutnog momenta često se koristi normalizirana konstanta tromosti  $H$  koja je definirana kao omjer kinetičke energije agregata pri sinkronoj brzini i nazivne snage generatora:

$$H = \frac{J \omega_0^2}{2S_n} = \frac{W_r}{S_n} \quad (3.11)$$

gdje je:  $H$  – normalizirana konstanta tromosti agregata  
 $S_n$  – nazivna snaga generatora  
 $W_r$  – kinetička energija rotora



Ako se iz izraza (3.11) moment tromosti izrazi pomoću normalizirane konstante tromoste i nazivne snage:

$$J = \frac{2HS_n}{\omega_0^2}. \quad (3.12)$$

Kako bi se prostorni radijani izrazili preko električnih radijana, koriste se supstitucije:

$$\delta = \frac{\delta_r}{p} \quad (3.13)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_0}{p} \quad (3.14)$$

gdje je  $p$  broj pari polova sinkronog generatora. Uvrštavanjem gornja tri izraza u temeljnu jednadžbu dinamike rotora, dobije se:

$$\frac{2HS_n}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e. \quad (3.15)$$

Jednadžbu njihanja uobičajeno je izražavati korištenjem relativnih jedinica, tako da se izraz svede na baznu snagu  $S_B$ . U ovom slučaju bazna snaga je jednaka nazivnoj ( $S_B = S_n$ ), a nazivna brzina vrtnje u relativnim jedinicama iznosi  $\omega_n=1$ , pa vrijedi:

$$2H \frac{d^2\delta}{dt^2} = p_m - p_e. \quad (3.16)$$

Ovo je diferencijalna jednadžba drugog reda koju se može zamijeniti sa dvije linearne jednadžbe prvog reda:

$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt^2} = p_m - p_e \quad (3.17)$$

$$\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} \quad (3.18)$$

### 3.2. Numeričke metode integracije

Mnogi složeni fizikalni sustavi opisuju se diferencijalnim jednadžbama čije se rješenje ne može strogo odrediti u analitičkom obliku. Numeričkim metodama moguće je odrediti približno rješenje takvih diferencijalnih jednadžbi. Metode numeričke integracije obično

koriste metode korak po korak za određivanje niza vrijednosti zavisne varijable, koja pripada izabranom nizu vrijednosti nezavisne varijable [7]. Točnost rješenja numeričke integracije ovisi o izabranoj metodi, te o širini intervala

### 3.2.1. Euler-ova metoda

Neka je zadana diferencijalna jednačina prvog reda:

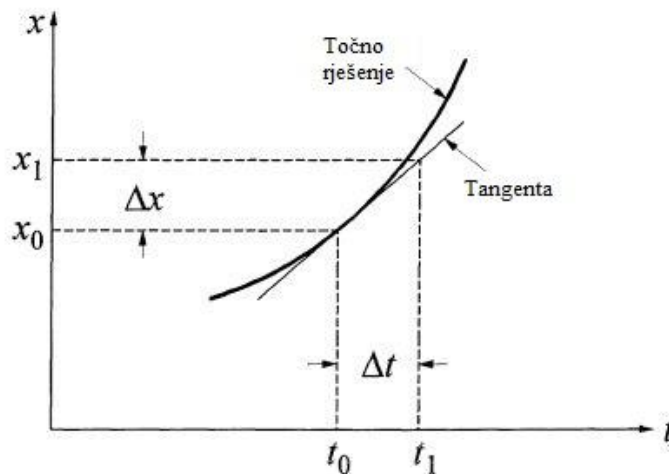
$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad (3.19)$$

gdje je  $x$  vektor stanja od  $n$  zavisnih varijabli, a  $t$  je nezavisna varijabla (vrijeme). Cilj ove metode je riješiti  $x$  kao funkciju od  $t$ , uz početne uvjete  $x_0$  i  $t_0$ . Rješenje jednačine 3.19. glasi:

$$x = g(t, c) \quad (3.20)$$

gdje je  $c$  konstanta određena početnim uvjetima. Ovo rješenje prikazuje krivulja na slici 3.2. U nekoj točki, krivulja se može aproksimirati tangentom. Za točku  $x = x_0$  i  $t = t_0$  vrijedi približno:

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} = f(x_0, t_0). \quad (3.21)$$



Slika 3.2. Primjer primjene Eulerove metode[1]

gdje je  $\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0}$  nagib krivulje u toj točki. Sada se za početne uvjete  $x_0$  i  $t_0$  može odrediti nova vrijednost  $x_1$  koja odgovara vrijednosti  $t_1$ :

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \Delta t \quad (3.22)$$

gdje je  $\Delta x$  porast vrijednosti  $x$  za odgovarajući porast vrijednosti  $t$ . Analogno tome, može se odrediti slijedeća vrijednost  $x_2$  na temelju poznate vrijednosti  $x_1$  iz prethodnog intervala.

$$x_2 = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_1} \Delta t \quad (3.23)$$

Proces se može nastaviti na isti način pa vrijedi opća formula:

$$x_n = x_{n-1} + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_1} \Delta t \quad (3.24)$$

### 3.2.2. Metoda korak po korak

Metoda korak po korak jedna je varijanta Eulerove metode i često se koristi. Neka se za ovaj primjer iskoristi jednadžba njihanja generatora 3.15. gdje su konstantne vrijednosti zamjenjene konstantom  $k$ , a  $\Delta P$  je razlika mehaničke i električne snage. Dobije se diferencijalna jednadžba (3.16.) čije rješenje nije jednostavno i ne može se riješiti analitički.

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = k \Delta P \quad (3.25)$$

Budući da je kutna akceleracija  $\alpha$  generatora proporcionalna razlici mehaničke i električne snage generatora, može se pisati:

$$\alpha = k(P_m - P_e), \quad (3.26)$$

gdje se električna snaga može prikazati kao funkcija kuta opterećenja  $P_e = f(\delta)$ , a kut opterećenja kao funkcija vremena  $\delta = f(t)$ . Promatrano vrijeme potrebno je podijeliti na jednake intervale. Što su manji intervale, aproksimacija je točnija. Na slici 3.3. prikazano je određivanje krivulje njihanja metodom korak po korak. Prva krivulja prikazuje akceleraciju generatora kao funkciju vremena i aproksimira se tako da za svaki interval  $\Delta t$  vrijedi:

$$0 < t < \frac{\Delta t}{2}; \quad \alpha_0 = konst.$$

$$\frac{\Delta t}{2} < t < \frac{3\Delta t}{2}; \quad \alpha_1 = konst.$$

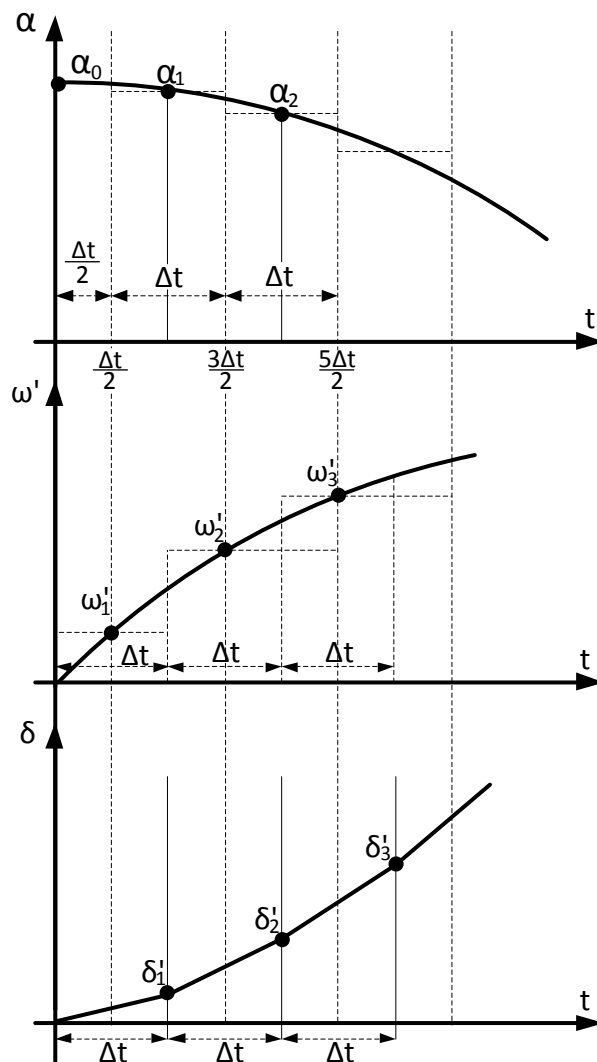
$$\frac{3\Delta t}{2} < t < \frac{5\Delta t}{2}; \quad \alpha_2 = \text{konst.}$$

Ova ubrzavanja uzrokuju povećanje kutne brzine koje je prikazano na drugoj krivulji. Tako se za svaki interval na temelju poznate akceleracije određuje dostignuta kutna brzina rotora, označena sa  $\omega'$ , i predstavlja razliku između stvarne i sinkrone brzine.

$$\omega_1' = \alpha_0 \frac{\Delta t}{2}, \quad (3.27)$$

$$\omega_2' = \omega_1' + \alpha_1 \Delta t, \quad (3.28)$$

$$\omega_3' = \omega_2' + \alpha_2 \Delta t. \quad (3.29)$$



**Slika 3.3.** *Određivanje krivulje njihanja generatora metodom korak po korak [7]*

Sada je potrebno aproksimirati krivulju  $\omega' = f(t)$  kao i u slučaju za akceleraciju:

$$0 < t < \Delta t; \quad \omega_1' = konst.$$

$$\Delta t < t < 2\Delta t; \quad \omega_2' = konst.$$

$$2\Delta t < t < 3\Delta t; \quad \omega_3' = konst.$$

Ove brzine veće su od nazivne i uzrokuju povećanje kuta opterećenja generatora. Treća krivulja prikazuje povećanje kuta opterećenja za svaki interval  $\Delta t$  i označeno je sa  $\delta'$ . Za svaki interval kut opterećenja iznosi:

$$\delta_1' = \omega_1' \Delta t \quad (3.30)$$

$$\delta_2' = \delta_1' + \omega_2' \Delta t \quad (3.31)$$

$$\delta_3' = \delta_2' + \omega_3' \Delta t \quad (3.32)$$

...

$$\delta_n' = \delta_{n-1}' + \omega_n' \Delta t \quad (3.33)$$

Za svaki novi interval, porast kuta računa se iz porasta prethodnog intervala i neravnoteže električne i mehaničke snage prethodnog intervala, pa vrijedi izraz 3.34:

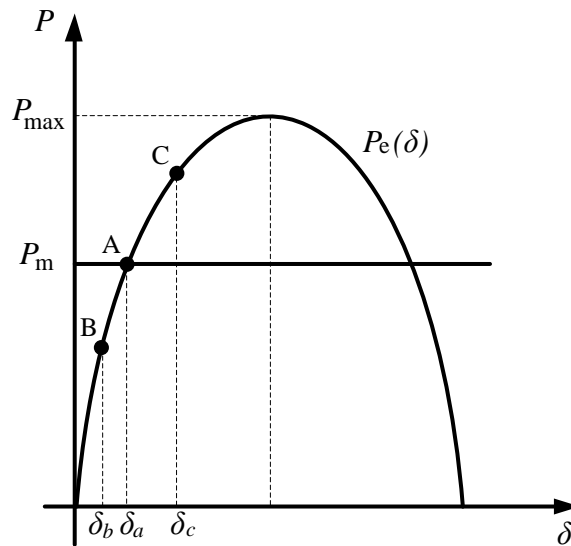
$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + k \Delta P_{n-1} \Delta t^2 \quad (3.33)$$

### 3.3. Krivulja snaga-kut

Ako je vrijednost uzbude konstantna, kao i napon sustava u točki B (slika 3.1.), iz jednadžbe za snagu predanu sustavu (3.1) vidi se kako ona ovisi samo o promjeni kuta opterećenja generatora. Može se pretpostaviti da je vrijednost ukupne reaktancije prijenosnog sustava također konstantna. Ako se promjena snage prikaže grafički u ovisnosti o promjeni kuta opterećenja, dobije se krivulja snaga-kut. Na slici 3.4. prikazan je primjer krivulje snaga-kut koja odgovara sustavu sa slike 3.1.

Vodoravnim pravcem prikazana je mehanička snaga pogonskog stroja  $P_m$ , dok je sinusoidom prikazana krivulja snaga-kut. Za vrijeme stacionarnog stanja, prije poremećaja, sjecište vodoravnog pravca i rastućeg dijela sinusoide označava radnu točku u kojoj se nalazi

generator. Na slici 3.4. radna točka prije poremećaja označena je s A. Toj radnoj točki odgovara vrijednost kuta opterećenja generatora  $\delta_a$  i može se očitati sa horizontalne osi.



### 3.4. Krivulja snaga - kut

Ako zbog kvara u sustavu dođe do smanjenja električne snage, stvorit će se neravnoteža električne i mehaničke snage. Iz jednadžbe njihanja generatora vidljivo je kako dolazi do promjene brzine vrtnje generatora. Ta promjena brzine vrtnje uzrokovana je upravo neravnotežom električne i mehaničke snage koja je pozitivnog karaktera, i uzrokuje ubrzavanje generatora. U trenutku nastanka poremećaja, kut opterećenja smanjit će se na vrijednost  $\delta_b$ . Ubrzanjem rotora generatora, kut opterećenja nastoji ponovno uspostaviti vrijednost  $\delta_a$  koju je imao prije poremećaja. Porastom kuta opterećenja, raste i električna snaga koju generator predaje u mrežu.

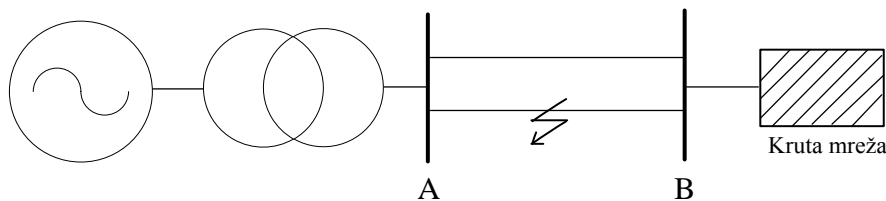
Kutna akceleracija se smanjuje i pozitivna je sve dok kut opterećenja ne dostigne početnu vrijednost  $\delta_a$ . U tom trenutku kutna akceleracija je nula, ali je brzina vrtnje rotora veća od sinkrone brzine. Zbog tromosti rotor nastavlja ubrzavati, a kut opterećenja i dalje raste. Tada snaga akceleracije postaje negativna jer je mehanička snaga turbine manja od električne snage. Rotor tada usporava sve dok ne dostigne vrijednost sinkrone brzine  $\omega_0$ , gdje kut opterećenja poprima vrijednost  $\delta_c$  u točki C.

Rad koji je izvršila pozitivna snaga akceleracije ekvivalent je kinetičkoj energiji akumuliranoj u zamašnim masama turbine i generatora (agregata). Za vrijeme usporavanja rotora, troši se upravo ta akumulirana kinetička energija, koja se potroši do točke C kada je brzina vrtnje

jednaka sinkronoj ( $\omega = \omega_0$ ). Budući da je u tom trenutku akceleracija negativna, rotor nastavlja usporavati te je tada brzina vrtnje manja od sinkrone. Tada se vrijednost kuta opterećenja ponovno približava početnoj vrijednosti  $\delta_a$ . Izjednačavanjem električne i mehaničke snage u točki A njihanje nije završeno, već zbog tromosti rotor nastavlja usporavati te kut opterećenja opada prema točki B. Ovaj proces njihanja između točaka B i C s vremenom će isčeznuti i radna točka će se smiriti u točki A.

### 3.4. Metoda jednakih površina

Neka se za ovu metodu razmotri slučaj kada je generator preko blok transformatora i dvostrukog voda priključen na krutu mrežu. Shema spoja prikazana je na slici 3.5.



### 3.5. Spoj generatora na krutu mrežu preko dvostrukog voda – kvar na jednom od vodova

Pri razmatranju prijelazne pojave djelatni otpor i poprečne grane se zanemaruju, a sinkroni generator nadomješta se sinkronom reaktancijom i elektromotrnim silom. Nadomjesna električna shema koja odgovara slici 3.5. prikazana je u nastavku (slika 3.6.). Pri izračunu prijenosne reaktancije potrebno je obratiti pozornost na paralelno spojene vodove koji na taj način povećavaju prijenosnu moć. Ukupna reaktancija je tada:

$$X_p = X_d' + X_{tr} + \frac{X_v}{2} \quad (3.34)$$

gdje je:  $X_p$  – prijenosna reaktancija prije poremećaja

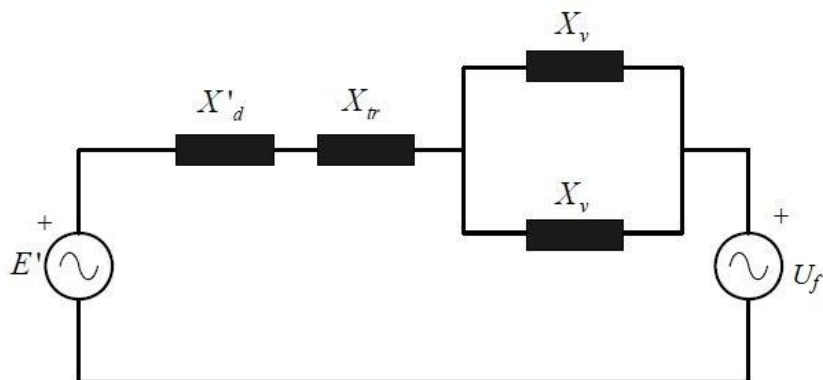
$X_d'$  – sinkrona reaktancija generatora

$X_{tr}$  – reaktancija transformatora

$X_v$  – reaktancija jednog prijenosnog voda

Za vrijeme stacionarnog stanja, oba su voda uključena i tada za snagu generatora vrijedi izraz:

$$P_{el} = \frac{E' * U}{X_p} * \sin\delta \quad (3.35)$$



3.6. Nadomjesna shema mreže sa slike 3.3.

Ovo stanje odgovara krivulji 1 na slici 3.7. Ako se zbog kvara na jednom od vodova taj vod isključi, tada se ukupna reaktancija prijenosnog sustava mijenja:

$$X_p' = X_d' + X_{tr} + X_v \quad (3.36)$$

a električna snaga koju generator predaje sustavu:

$$P_{el}' = \frac{E' * U}{X_p'} * \sin\delta \quad (3.37)$$

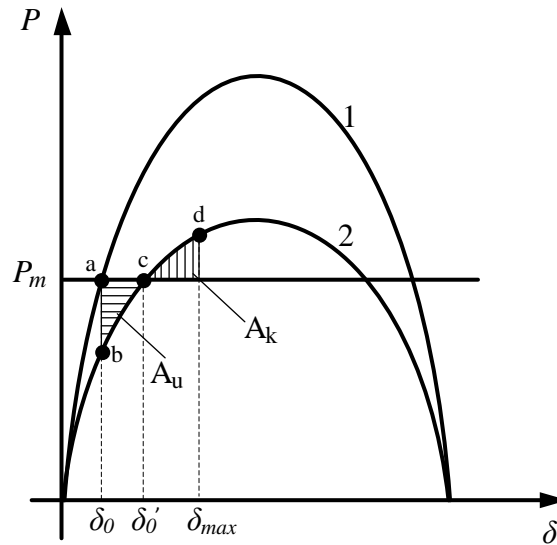
Budući da je nakon isključenja jednog voda ukupna prijenosna reaktancija veća od prijenosne reaktancije prije kvara ( $X_p' > X_p$ ) može se vidjeti kako je električna snaga generatora nakon isključenja manja nego prije kvara ( $P_{el}' < P_{el}$ ). Prijenos snage nakon isključenja voda prikazan krivuljom 2.

Za vrijeme ubrzavanja generatora, snaga akceleracije izvršava rad koji je razmjernan površini ubrzavanja  $A_u$  na krivulji snaga – kut (slika 3.7.). Od točke c do točke d, površina kočenja  $A_k$  razmjerna je energiji koju je rotor dao pri usporavanju. Kut  $\delta_{max}$  je maksimalni kut opterećenja koji je generator dostigao za vrijeme njihanja, a određuje se metodom jednakih površina.

Maksimalna vrijednost kuta opterećenja koju generator smije doseći za vrijeme njihanja, a da bi ostao unutar granica stabilnosti, naziva se kritični kut opterećenja. Da bi to vrijedilo, površina ubrzavanja rotora ne smije biti veća od površine kočenja. To znači da će granica prijelazne stabilnosti biti postignuta ako je površina ubrzavanja generatora jednaka površini kočenja generatora:

$$A_u = A_k \quad (3.38)$$





### 3.7. Krivulja snaga-kut u slučaju isključenja jednog voda

Rad za vrijeme ubrzavanja izvršen od strane rotora turbine i generatora, koji odgovara površini  $A_u$ , može se odrediti iz izraza:

$$A_u = \int_{\delta_0}^{\delta'_0} \Delta M(\delta) d\delta \quad (3.39)$$

$\delta_0$  je kut opterećenja za vrijeme stacionarnog stanja prije nastanka poremećaja, a odgovara pogonskoj točki 'a' na slici 3.7.  $\delta'_0$  je vrijednost kuta opterećenja u trenutku kada se električna i mehanička snaga izjednače, a odgovara točki 'c' na slici 3.7. Budući da se brzina vrtnje za vrijeme poremećaja vrlo malo mijenja, vrijedi da je  $\omega_0 = \omega = konst.$  Uvrštavanjem u prethodni izraz dobije se:

$$A_u = \omega_0 \int_{\delta_0}^{\delta'_0} \Delta P(\delta) d\delta \quad (3.40)$$

Integral predstavlja površinu određenu točkama a-b-c na slici 3.7., te se može pisati:

$$A_u = \omega_0 \int_{\delta_0}^{\delta'_0} [P_m - P_{e,2}(\delta)] d\delta \quad (3.41)$$

Analogijom se može odrediti i površina kočenja, koja je omeđena točkama c-d-e. Rad koji rotor izvrši za vrijeme kočenja od točke c do točke d:

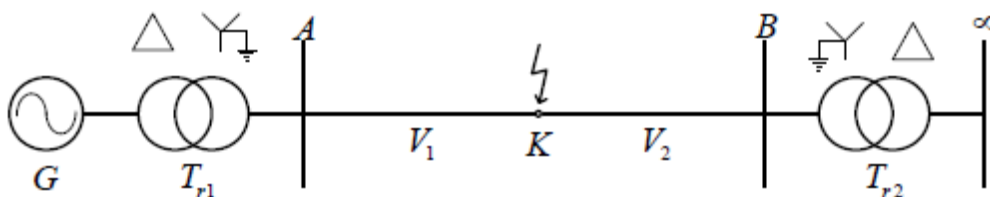
$$A_k = \omega_0 \int_{\delta'_0}^{\delta_m} [P_{e,2}(\delta) - P_m] d\delta \quad (3.42)$$

Za vrijeme poremećaja, radna točka generatora može prijeći na silaznu stranu krivulje snage, sve dok električna snaga generatora ostane iznad vodoravnog pravca mehaničke snage turbine. Ako se radna točka nađe na silaznoj putanji krivulje, ispod pravca mehaničke snage turbine, više neće postojati dovoljan kočioni moment koji bi vratio generator u stabilnu radnu točku i tada generator ispada iz sinkronizma.

### 3.5. Utjecaj različitih kvarova na prijelaznu stabilnost

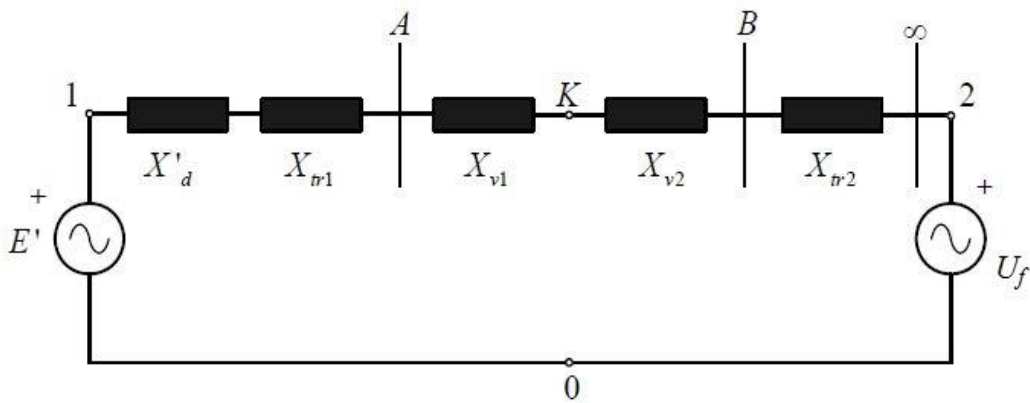
Najčešći kvarovi u elektroenergetskom sustavu su kratki spojevi u mrežama, i to trofazni kratki spoj, dvofazni kratki spoj, dvofazni kratki spoj sa zemljom, jednofazni kratki spoj, te zemljospoj. Ovo su općeniti oblici kvarova i neki su prikazani u nastavku. Mogu se detaljizirati ovisno o topologiji mreže i načinima uzemljenja zvjezdista, o čemu ovise i iznosi struja kratkog spoja. Proračuni struja, snaga i napona kratkog spoja izvode se zbog potrebe projektiranja mreža i postrojenja jer su velika strujna opterećenja za vrijeme kvara mjerodavna za dimenzioniranje opreme i parametrisiranje zaštite.

Neka se za razmatranje utjecaja različitih vrsta kratkog spoja na prijelaznu stabilnost primijeni sustav prema slici 3.8. Sustav se sastoji od generatora koji je preko transformatora TR 1 priključen na mrežu, prijenosnog voda, te transformatora TR 2 na strani potrošača.



**Slika 3.8.** jednopolna shema promatranog sustava [8]

Točka K predstavlja mjesto nastanka kratkog spoja, i nalazi se na polovici prijenosnog voda. Na slici 3.9. prikazana je nadomjesna shema ovog sustava. Budući da će se razmatrati utjecaj kratkog spoja na sredini voda, reaktancija voda se dijeli na  $X_{v1}$  i  $X_{v2}$ , a vrijedi  $X_{v1} = X_{v2}$ .



**Slika 3.9.** nadomjesna shema direktnog sustava komponentata promatranog sustava[8]

Reaktancije lijevo od točke kratkog spoja K mogu se nadomjestiti reaktancijom:

$$X_a = X_d' + X_{tr1} + X_{v1} \quad (3.43)$$

a reaktancije desno od točke kratkog spoja K reaktancijom:

$$X_b = X_{v2} + X_{tr2} \quad (3.44)$$

Za matematičko modeliranje kratkih spojeva koji su nesimetričnog karaktera, koristi se metoda simetričnih komponentata. Metoda omogućava preslikavanje nesimetričnog trofaznog sustava u tri simetrična trofazna sustava.

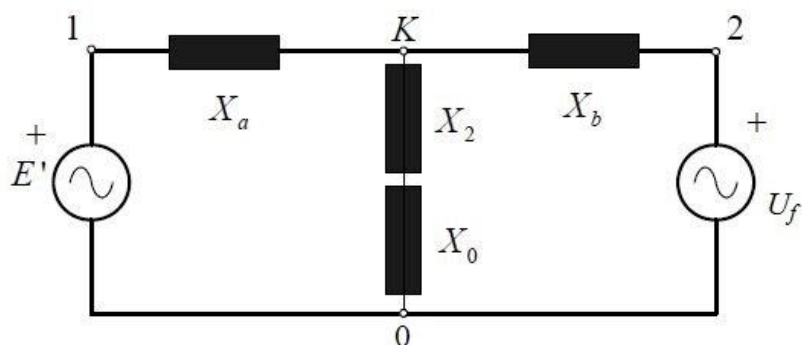
Mjesto kvara nadomješta se izvorom napona koji predstavlja jedini izvor napona u proračunu kratkog spoja, a svi ostali elementi mreže zamjenjuju se impedancijama, odnosno u slučaju zanemarenja radnog otpora reaktancijama.

### 3.5.1. Jednofazni izravni kratki spoj

U slučaju jednofaznog kratkog spoja potrebno je korištenjem simetričnih komponentata uvesti reaktanciju kvara  $X_k = X_0 + X_2$ , gdje  $X_0$  predstavlja nultu komponentu reaktancije, a  $X_2$  inverznu komponentu reaktancije kratkog spoja. Na slici 3.10. prikazana je nadomjesna shema mreže za jednofazni izravni kratki spoj.

Ako se na mjesto kvara uvrsti reaktancija  $X_k$ , potrebno je pretvorbom spoja zvijezda u spoj trokut odrediti izraz za ukupnu prijenosnu reaktanciju sustava  $X_{12}$ :

$$X_{12} = X_a + X_b + \frac{X_a X_b}{X_k} \quad (3.45)$$

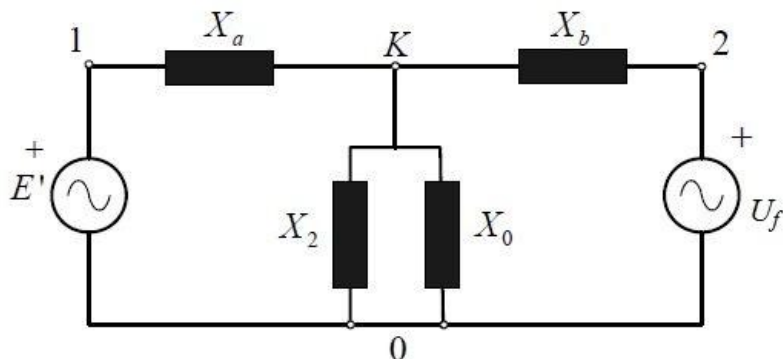


**Slika 3.10.** Nadomjesna shema za jednofazni kratki spoj [8]

Budući da se ukupna prijenosna reaktancija povećava u odnosu na stanje prije kvara, ukupna električna snaga koju generator predaje sustavu se smanjuje.

### 3.5.2. Dvofazni izravni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom

Ovakav kvar nastaje u slučaju kada za vrijeme dvofaznog kratkog spoja dođe do spoja jedne od faza sa zemljom. Pojavljuje se u mrežama sa uzemljenim zvjezdištem i predstavlja nesimetrično opterećenje sustava. Na analogni način kao i u prethodnom slučaju određuju se nadomjesna shema za vrijeme kvara (slika 3.11) i izraz za prijenosnu reaktanciju.



**Slika 3.11.** Nadomjesna shema za dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom [8]

Za vrijeme kvara, napon faza u kvaru pada na nulu, a simetrični sustavi spajaju se paralelno. Reaktanciju kvara predstavlja paralelni spoj nulte i inverzne komponente reaktancije.

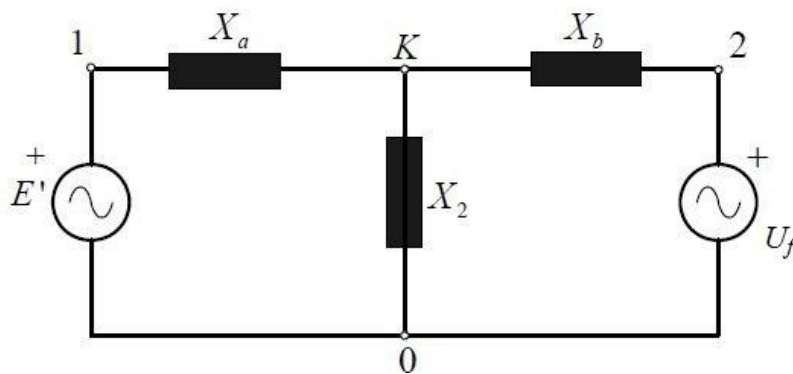
$$X_{12} = X_a + X_b + \frac{X_a X_b}{\frac{X_2 X_0}{X_2 + X_0}} \quad (3.46)$$

Zbog paralelnog spoja komponenta koje čine reaktanciju kvara može se zaključiti kako se posljednji član u prethodnom izrazu povećava zbog smanjenja reaktancije kvara. U

konačnici to rezultira povećanjem prijenosne reaktancije sustava čime se u odnosu na jednofazni kratki spoj još više smanjuje prenesena snaga.

### 3.5.3. Dvofazni izravni kratki spoj

Dvofazni kratki spoj također predstavlja nesimetrično opterećenje sustava. U slučaju izravnog kratkog spoja između dvije faze, bez spoja sa zemljom, reaktancija kvara jednaka je inverznoj komponenti. Nadomjesna shema za vrijeme kvara prikazana je na slici 3.12.



Slika 3.12. Nadomjesna shema za izravni dvofazni kratki spoj [8]

Nadomjesna reaktancija je tada:

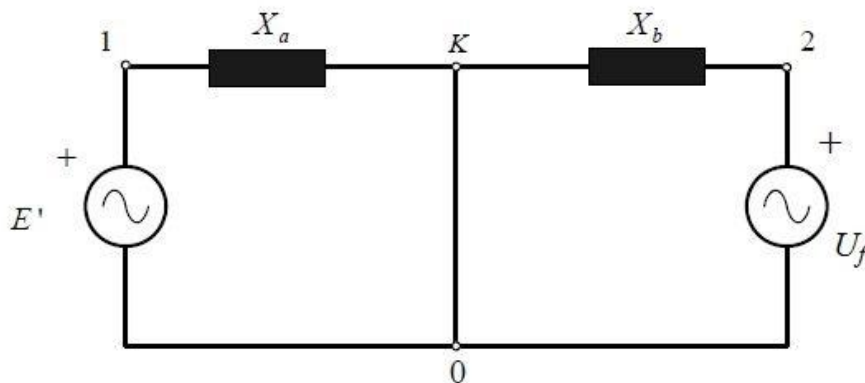
$$X_{12} = X_a + X_b + \frac{X_a X_b}{X_2} \quad (3.47)$$

### 3.5.4. Trofazni kratki spoj

Trofazni kratki spoj je kvar koji nastaje kratkim spajanjem sve tri faze i predstavlja jedini simetrični kvar. Zbog simetričnosti kvara dovoljno je promatrati samo jednu fazu, odnosno direktanu impedanciju mreže koja određuje jakost struje kratkog spoja. S obzirom na impedanciju kratkog spoja, trofazni kratki spoj može biti izravni (bez impedancije kratkog spoja) i neizravni (kratki spoj preko male impedancije). Na slici 3.13. prikazana je nadomjesna shema za slučaj izravnog kratkog spoja. Može se zaključiti kako je ukupna prijenosna reaktancija beskonačno velika što dovodi do prekida veze između generatora i mreže te nema prijenosa snage. Struja kratkog spoja tada je čisto induktivnog karaktera. Naponi sve tri faze na mjestu kvara padaju na nulu, a struje sve tri faze jednakog su iznosa.

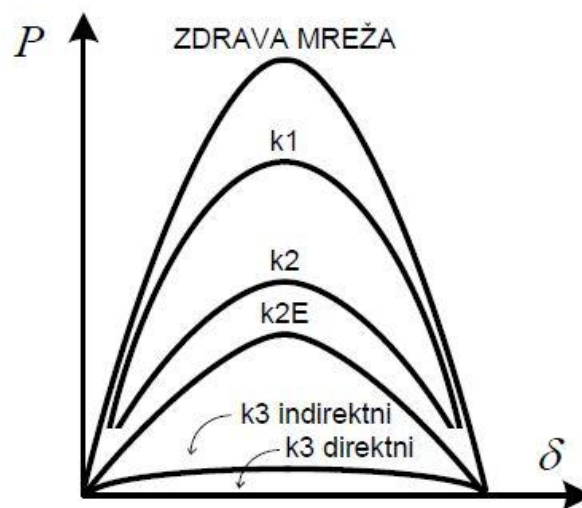
U slučaju neizravnog trofaznog kratkog spoja, ipak postoji određeni prijenos snage jer prijenosna reaktancija tada nije beskonačno velika. Impedanciju kvara predstavlja otpor

električnog luka, a budući da je ona ima malu vrijednost, postoji mogućnost prijenosa male snage.



**Slika 3.13.** Nadomjesna shema izravnog trofaznog kratkog spoja [8]

Na slici 3.14. prikazane su krivulje snaga-kut za stanje prije nastanka kvara, te za slučajeve opisanih kratkih spojeva. Može se vidjeti kako trofazni kratki spoj predstavlja najveći izazov za očuvanje prijelazne stabilnosti jer je površina ubrzavanja rotora tada najveća, što trofazni kratki spoj čini mjerodavnim za dimenzioniranje opreme i parametrisiranje zaštite. Kritično vrijeme isključenja tada je najkraće.

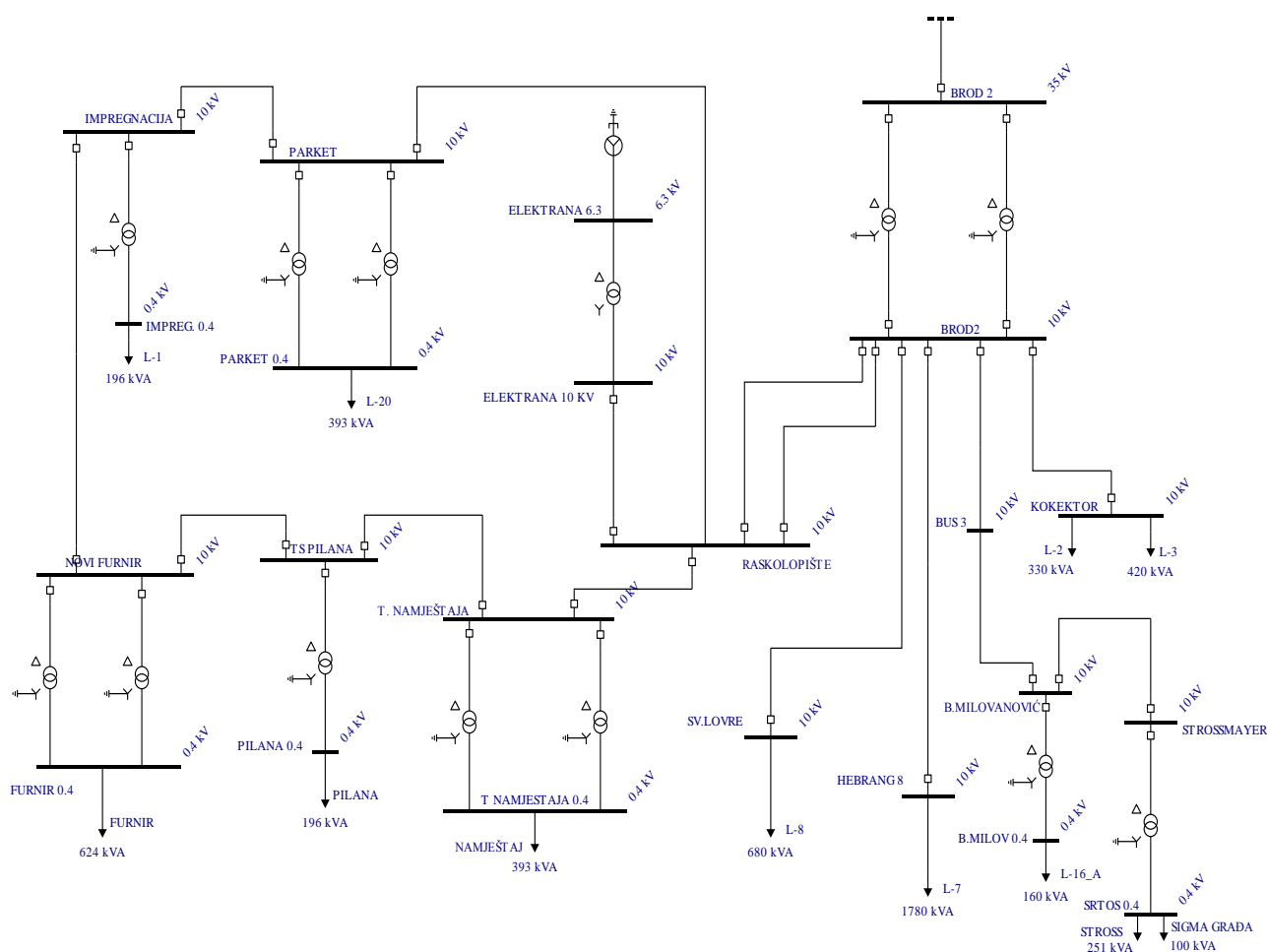


**Slika 3.14.** Krivulje snaga-kut koje vrijede za opisane kratke spojeve [8]

Na temelju nadomjesnih shema za vrijeme kvara procjenjuje se utjecaj pojedinog kratkog spoja na određenom mjestu u mreži. Iznos nadomjesne reaktancije određuje snagu koja se može prenijeti u mrežu. Samo u slučaju izravnog trofaznog kratkog spoja nema nikakvog prijenosa snage, dok kod nesimetričnih kratkih spojeva barem jedna zdrava faza omogućuje prijenos snage.

## 4. KARAKTERISTIKE PROMATRANOG SUSTAVA

Kogeneracijsko postrojenje na biomasu Slavonija DI nalazi se u sklopu drvne industrije u Slavonskom Brodu, na adresi Sv. Lovre 75. U neposrednoj okolini elektrane nalaze se 5 tvornica: tvornica piljene građe, tvornica parketa, tvornica rezanog furnira, tvornica ljuštenog furnira i tvornica namještaja. Upravo je to pogodilo izgradnju elektrane na biomasu koja će za svoj pogon koristiti otpad iz drvne industrije. Na slici 4.1. prikazana je cjelokupna mreža s priključenim generatorom, a izrađena je u alatu EasyPower u kojemu će se provoditi analiza prijelazne stabilnosti generatora.



Slika 4.1. Mreža modelirana u programskom alatu EasyPower

Glavno napajanje ove mreže vrši se preko TS Slavonski Brod 2 koja se sastoji od 2 transformatora nazivne snage 8 MVA. TS Slavonski Brod 2 je spojena preko 2 kabela sa rasklopnim postrojenjem Slavonija DI na koje je priključena elektrana.

Generator je na rasklopno postrojenje priključen preko blok transformatora nazivne snage 6000 kVA. Parametri blok transformatora prikazani su u tablici 4.1. Prijenosni omjer transformatora omogućuje prijelaz na distribucijski napon 20 kV u budućnosti.

**Tablica 4.1.** Parametri blok transformatora.

Nazivna snaga $S_n$	6000 kVA
Prijenosni omjer	6,3 / 10(20)
Napon kratkog spoja $u_k$	6%
Grupa spoja	Dyn5

#### 4.1. Generator

Generator ovog kogeneracijskog postrojenja je sinkroni, trofazni, sa cilindričnim rotorom. Opremljen je beskontaktnim sustavom uzbude i regulacije napona. Izlazna električna snaga generatora je 6000 kVA nazivnog napona 6,3 kV. Nazivna brzina vrtnje generatora je 1500 okretaja u minuti i ima 2 para polova. U tablici 4.2. prikazane su detaljne tehničke karakteristike.

Na proradu generatorskog prekidača djeluju slijedeće zaštite: [9]

- Nadstrujna zaštita statorskog namota generatora
- Nadstrujna zaštita od zemljospoja
- zaštita od previsokog napona
- zaštita od preniskog napona
- zaštita od porasta frekvencije
- zaštita od smanjenja frekvencije
- zaštita od povratne snage
- zaštita od nesimetričnog opterećenja
- diferencijalna zaštita
- zaštita od previsoke temperature namota
- zaštita od gubitka uzbude
- zaštita od kvarova u uzbudnom krugu
- zaštita od prevelike temperature ležajeva
- zaštita od prevelikog broja okretaja



- zaštita od premalog broja okretaja
- zaštita agregata od vibracija
- zaštita od kvarova pomoćnih sustava

**Tablica 4.2. Tehničke karakteristike generatora**

Osnovni podaci			
Nazivna snaga		6000 kVA	
Napon		6300 V	
Struja		549,9 A	
cos $\varphi$		0,85	
Frekvencija		50 Hz	
Brzina		1500 o/min	
Max brzina		1800 o/min	
Broj polova		4	
Broj faza		3	
Temperatura ambijanta		40 °C	
Klasa izolacije		H/H	
Vrsta hlađenja		IC 31	
Trajni rad			
Sinkrona reaktancija po d-osi	Xd	269 %	206,1 %
Sinkrona reaktancija po q-osi	Xq	265,1 %	169 %
Prijelazna reaktancija po d-osi	X'd	27,4 %	25,9 %
Početna reaktancija po d-osi	X''d	19,1 %	16,7 %
Početna reaktancija po q-osi	X''q	26,4 %	20,8 %
Inverzna reaktancija	X <sub>2</sub>	22,2 %	18,5 %
Nulta reaktancija	X <sub>0</sub>	11,1 %	9,7 %
Rasipna reaktancija statora	X <sub>1</sub>	10,8 %	10,1 %
Vremenske konstante na 115 °C			
Tranzijentna vremenska konstanta direktne osi pri praznom hodu		T <sub>do'</sub>	1,93 s

Subtranzijentna vremenska konstanta direktne osi pri praznom hodu	$T_{do''}$	0,03 s
Subtranzijentna vremenska konstanta kvadratne osi pri praznom hodu	$T_{qo''}$	0,17 s
Tranzijentna vremenska konstanta direktne osi pri kratkom spoju	$T_{d'}$	0,24 s
Subtranzijentna vremenska konstanta direktne osi pri kratkom spoju	$T_{d''}$	0,02 s
Subtranzijentna vremenska konstanta kvadratne osi pri kratkom spoju	$T_{q''}$	0,02 s
Vremenska konstanta armature pri kratkom spoju	$T_a$	0,08 s
<b>Djelatni otpor pri 20 °C</b>		
Djelatni otpor armaturnih namota pri protjecanju DC struje po fazi	$R_a$	35,65 mΩ
Djelatni otpor namota rotora pri protjecanju DC struje	$R_f$	270,7 mΩ
<b>Podaci kratkog spoja</b>		
Omjer kratkog spoja	$K_C$	0,49
Početna izmjenična struja trofaznog kratkog spoja (rms vrijednost)	$I_K''$	6,0 p.u.
Maksimalna istosmjerna struja trofaznog kratkog spoja (vršna vrijednost)	$I_S$	15,2 p.u.
Početni moment kod dvofaznog kratkog spoja	$M_{k2}$	296,9 kNm

## 4.2. Transformatori

**Tablica 4.3.** *Popis transformatora u mreži*

Primarna sabirnica	From Base [kV]	Sekundarna sabirnica	To Base [kV]	Grupa spoja	Snaga [MVA]
NOVI FURNIR	10	FURNIR 0.4	0.4	Dyn	1 000
IMPREGNACIJA	10	IMPREG. 0.4	0.4	Dyn	630
PARKET	10	PARKET 0.4	0.4	Dyn	630
PARKET	10	PARKET 0.4	0.4	Dyn	630
NOVI FURNIR	10	FURNIR 0.4	0.4	Dyn	1 000
TS PILANA	10	PILANA 0.4	0.4	Dyn	630
T. NAMJEŠTAJA	10	T NAMJESTAJA 0.4	0.4	Dyn	630
T. NAMJEŠTAJA	10	T NAMJESTAJA 0.4	0.4	Dyn	630
SL.BROD 2	35	BROD2	10	Dyn	8 000
SL.BROD 2	35	BROD2	10	Dyn	8 000
ELEKTRANA 6.3	6.3	ELEKTRANA 10 KV	10	Dyn5	6 000
B.MILANOVIĆ	10	B.MILOV 0.4	0.4	Dyn	400
STROSSMAYER	10	SRTOS 0.4	0.4	Dyn	630

### 4.3. Sabirnice

Mreža se sastoji od 23 sabirnice naponskih razina 0.4 kV, 10 kV, 35kV te 6.3 kV sabirnice na koju je spojen generator.

**Tablica 4.4.** *Popis sabirnica u mreži*

Sabirnica	Naponska razina (kV)
B.MILANOVIĆ 0.4	0.4
B.MILANOVIĆ 10	10
SL. BROD 2	35
SL. BROD 2	10
BUS 3	10
ELEKTRANA 6.3 kV	6.3
ELEKTRANA 10 kV	10
FURNIR 0.4	0.4
HEBRANG 8	10
IMPREG. 0.4	0.4
IMPREGNACIJA	10
KOLEKTOR	10
NOVI FURNIR	10
PARKET	10
PARKET 0.4	0.4
PILANA 0.4	0.4
RASKOLOPIŠTE	10
SRTOS 0.4	0.4
STROSSMAYER	10
SV.LOVRE	10
T NAMJESTAJA 0.4	0.4
T. NAMJEŠTAJA	10
TS PILANA	10

### 4.4. Kabeli

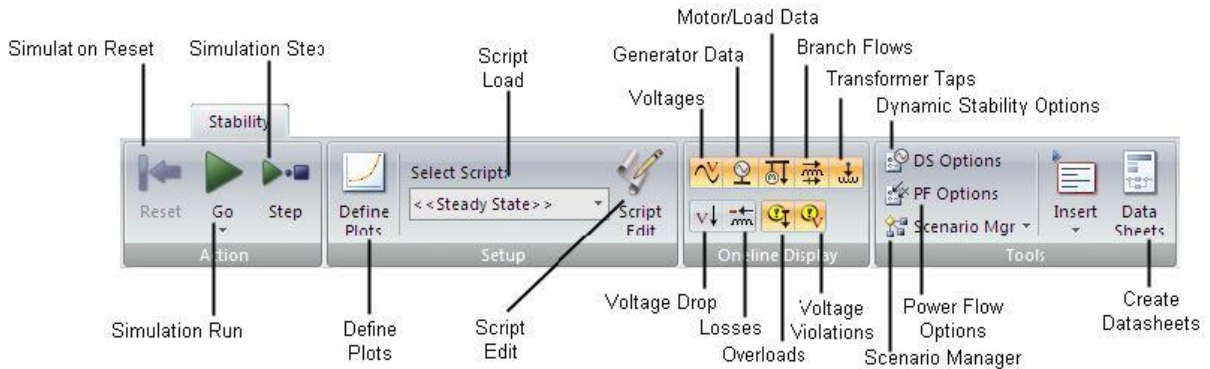
Promatrani sustav povezan je kabelskom mrežom. Rasklopište elektrane povezano je sa trafostanicom Sl.Brod 2 dvostrukom vezom, od kojih je jedna u normalnom pogonu isključena i služi kao rezerva. Krug tvornica napaja se radialno preko veze RASKLOPIŠTE – TVORNICA NAMJEŠTAJA, dok je veza RASKLOPIŠTE – TS TVORNICA PARKETA također u normalnom pogonu isključena i služio kao rezerva.

**Tablica 4.5. Tablica kabela u mreži**

Početna sabirnica	Krajnja sabirnica	Duljina [m]
SL.BROD 2-10kV	RASKLOPIŠTE	100
SL.BROD 2-10kV	RASKLOPIŠTE	100
SL.BROD 2-10kV	HEBRANG 8-10kV	1640
SL.BROD 2-10kV	BUS-3	160
BUS-3	MILANOVICA 10 KV	1566
BROD 2 - 10 KV	SV LOVRE 10 KV	620
BROD 2 - 10 KV	KOLEKTOR	3
ELEKTRANA	RASKLOPIŠTE	50
RASKLOPIŠTE	TS NOVI PARKET	100
TS NOVI PARKET	TS NOVA IMPREGNA	100
TS NOVA IMPREGNA	TS NOVI FURNIR	100
TS NOVI FURNIR	TS PILANA	100
TS PILANA	TS TVORNICA NAMJ	100
TS TVORNICA NAMJ	RASKLOPIŠTE	100
MILANOVICA 10 KV	STROSSMAYER	120

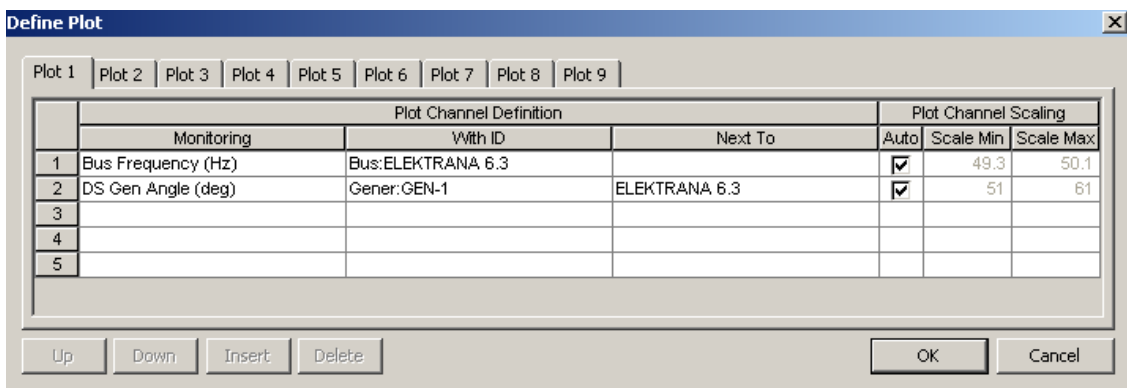
## 5. SIMULACIJA PRIJELAZNE STABILNOSTI

Simulacija je provedena u programskom alatu *EasyPower*, u modulu *Dynamic Stability*. Ovaj modul omogućava simulacije različitih događaja u elektroenergetskom sustavu u vremenskoj domeni. Moguće je simulirati pokretanje motora, uključivanje generatora i tereta, te kvarove u sustavu. Na slici 5.1. prikazana je alatna traka modula dinamičke stabilnosti.



Slika 5.1. Alatna traka modula *Dynamic Stability* [9]

Rezultati simulacije prikazani su na dijagramima, a prije simulacije potrebno je definirati varijable koje se žele promatrati. Definiranje ispisa omogućuje opcije *Define Plot* i odabire se sa alatne trake. Prozor definiranja ispisa prikazan je na slici 5.2. U prvom stupcu odabire se veličina koja se želi promatrati, a u drugom stupcu je potrebno odabrati element mreže na kojemu se ta veličina promatra. Primjer sa slike pokazuje ispis dvije veličine. Prva veličina je frekvencija na sabirnici priključenja generatora, dok je druga veličina kut opterećenja generatora.



Slika 5.2. Prozor za definiranje ispisa

Nakon definiranja ispisa potrebo je stvoriti događaj, a to omogućuje opcija *Edit Script* koja se također odabire s alatne trake. Ova opcija omogućuje definiranje niza događaja. Na slici 5.2. prikazan je primjer definiranja skripte. U prvom stupcu odabire se događaj ili naredba, dok se u drugom stupcu odabire element sustava na kojemu se događaj ili naredba izvršava. U stupce *Value 1* i *Value 2* upisuje se impedancija  $R+jX$  (npr. impedancija kratkog spoja). U posljednji stupac upisuje se vrijeme trajanja pojedinog događaja.

	Command	Equipment ID	Value 1	Value 2	Time
1	Run to Time				0.1
2	Fault Bus (R+jX Ohms)	Bus:ELEKTRANA 10 KV	0	0	
3	Run for Time				0.1
4	Open HV Breaker	PR-11			
5	Open HV Breaker	PR-10			
6	Run for Time				0.5
7					

**Slika 5.3.** Prozor za uređivanje skripti.

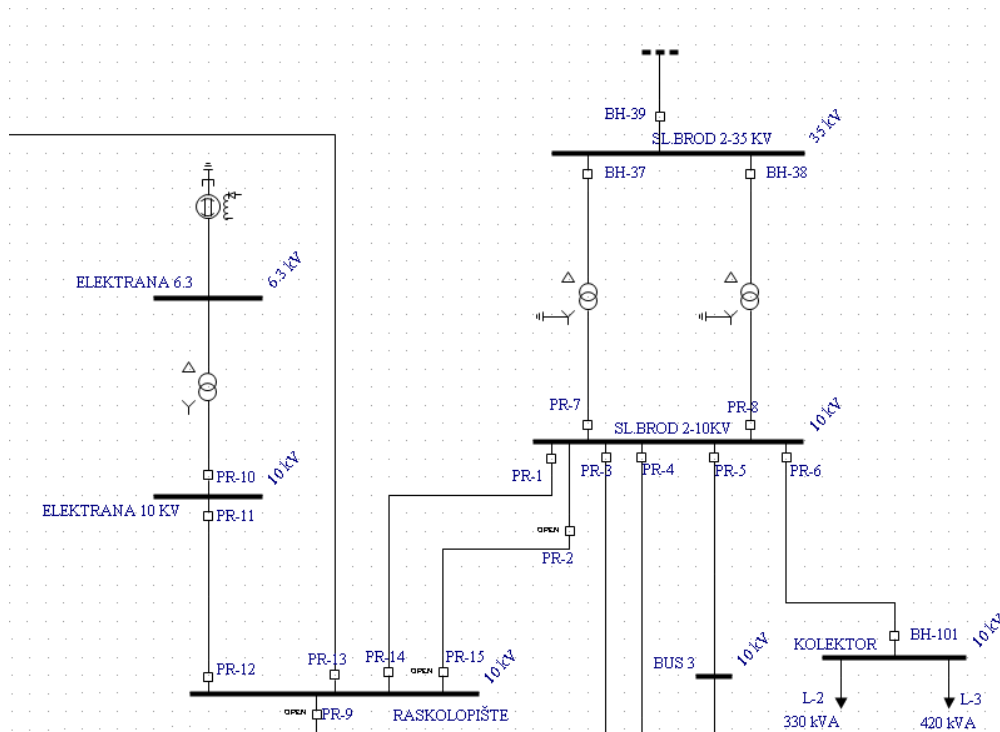
Ovaj primjer prikazuje otvaranje prekidača nakon što nastupi kratki spoj. Prva naredba *Run to time* znači trajanje stacionarnog stanja uz podešeno vrijeme 0.1 s. Nakon toga vremena nastupa druga naredba, a to je kratki spoj na sabirnici ELEKTRANA 10kV. Slijedeća naredba *Run for time* znači nastavak simulacije do slijedeće naredbe, uz podešeno vrijeme trajanja. U ovome slučaju nastupit će kratki spoj i trajat će 0.1 s dok ne dođe do otvaranja prekidača, naredbe 4 i 5 koje nastupaju odmah po završetku prethodne naredbe. Posljednja naredba predstavlja stanje nakon otvaranja prekidača u trajanju od 0.5 sekundi.

U nastavku su prikazani rezultati simulacije u slučaju trofaznih kratkih spojeva na tri različita mjesta. To su sabirnica na mjestu priključenja elektrane na mrežu - ELEKTRANA 10kV, sabirnica trafostanice Sl.Brod 2 10kV, te primarna strana trafostanice - sabirnica STROSSMAYER 10kV.

## 5.1. Trofazni kratki spoj na sabirnici ELEKTRANA 10 kV

Na slici 5.4. nalazi se uvećani prikaz promatranog djela mreže, odnosno mjesto priključka elektrane na mrežu, te trafostanica Sl. Brod 2. Prvi kvar nalazi se na sabirnici ELEKTRANA 10kV. Simuliran je izravni trofazni kratki spoj prema slijedećoj kronologiji:

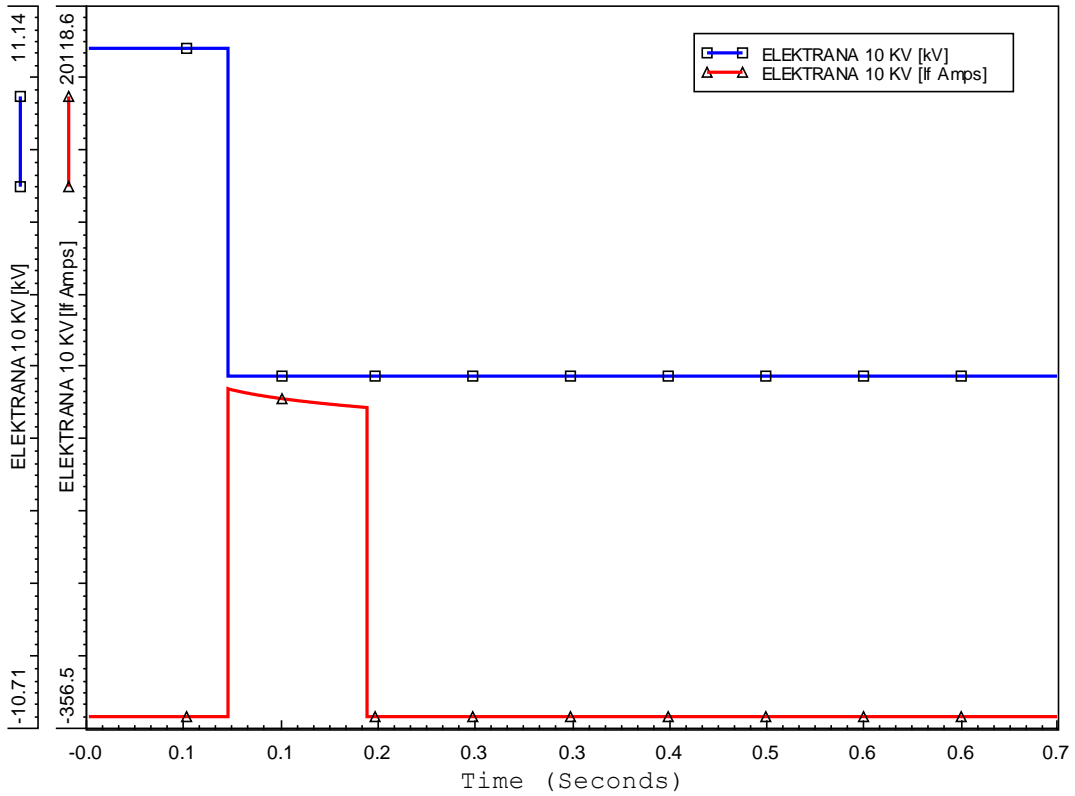
- 0 s – početak simulacije
- 0 – 0.1 s – trajanje stacionarnog stanja
- 0.1 s – nastanak trofaznog kratkog spoja na sabirnici ELEKTRANA 10kV
- 0.2 s – djelovanje zaštite i otvaranje prekidača PR-12
- 0.7 s – kraj simulacije



Slika 5.4. Mjesto priključka elektrane na mrežu

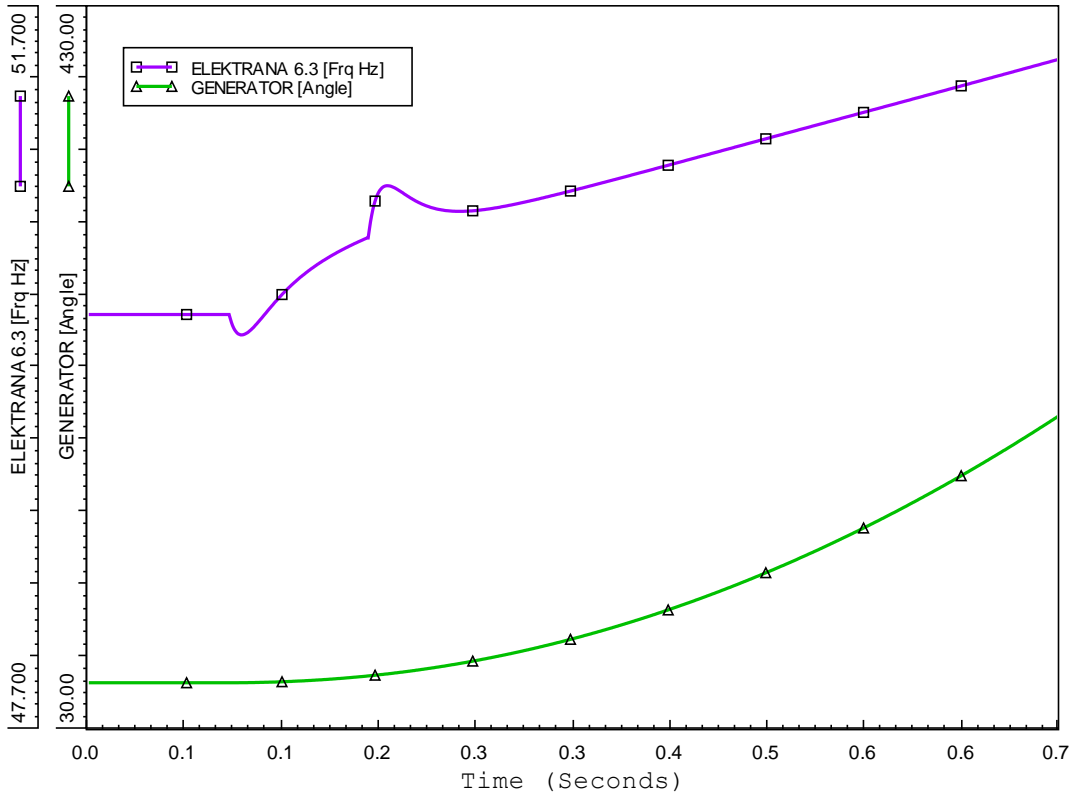
U trenutku nastanka takvog kratkog spoja, napon na pogođenoj sabirnici trenutno pada na nulu, a udarna struja trofaznog kratkog spoja iznosi 9300 A. Prema podešenju nadstrujne zaštite, trajanje kvara iznosi 100 ms, nakon čega prekidač PR-11 otvara kontakte i time se generator odvađa od mreže. Na slici 5.5. prikazani su napon na pogođenoj sabirnici te struja kvara. Kratki spoj se za vrijeme kvara napaja od strane mreže, te od strane generatora. Za vrijeme trajanja kvara, struja kratkog spoja polako opada, sve do trenutka reagiranja prekidača kada pada na nulu.

### EasyPower DS



Slika 5.5. Napon i struja kvara na sabirnici ELEKTRANA 10 kV

### EasyPower DS

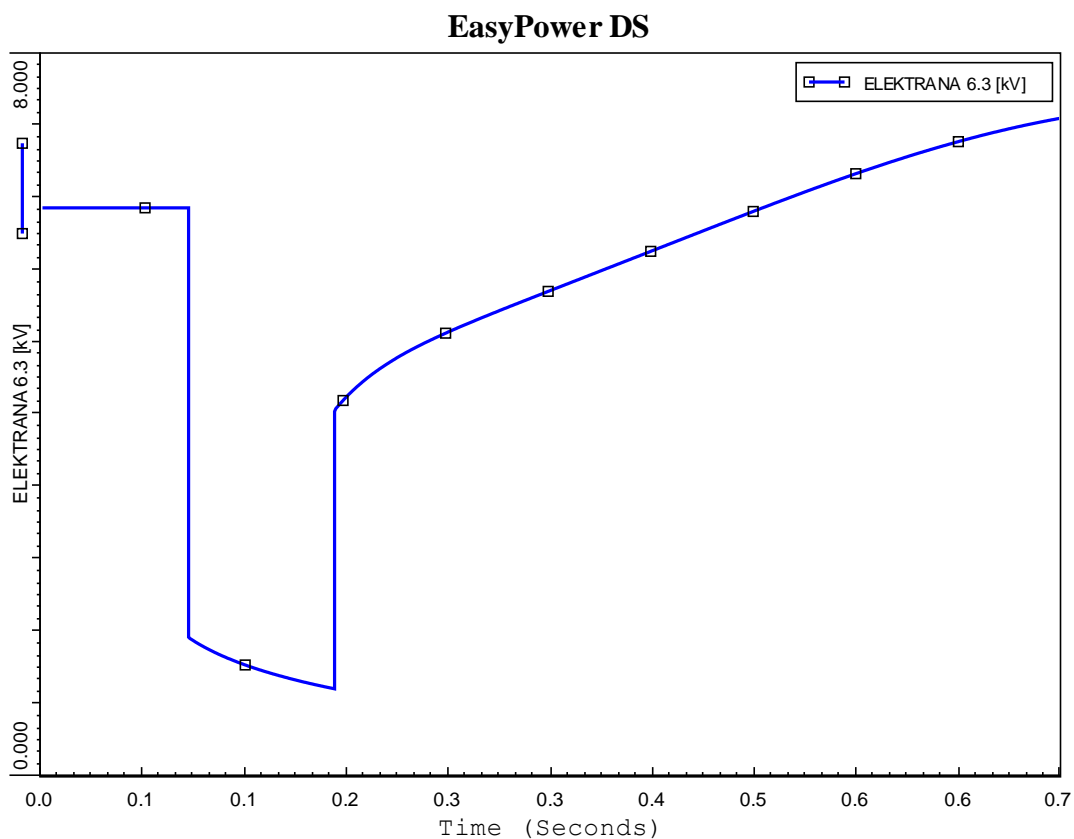


Slika 5.6. Frekvencija i kut opterećenja generatora



Na slici 5.6. prikazani su frekvencija i kut opterećenja generatora. Za vrijeme kvara frekvencija poraste sa 50 Hz na 50.47 Hz, dok kut opterećenja poraste sa  $55.6^\circ$  na  $59.5^\circ$ . Budući da je generator odvojen od mreže, neopterećen je i nastavlja ubrzavati, a time i kut opterećenja nastavlja rasti. Za potrebe ove simulacije nije podešena relejna zaštita, ali bi pri frekvenciji od 52 Hz trebala reagirati nadfrekventna zaštita i generator bi se trebao razbuditi, te zaustaviti.

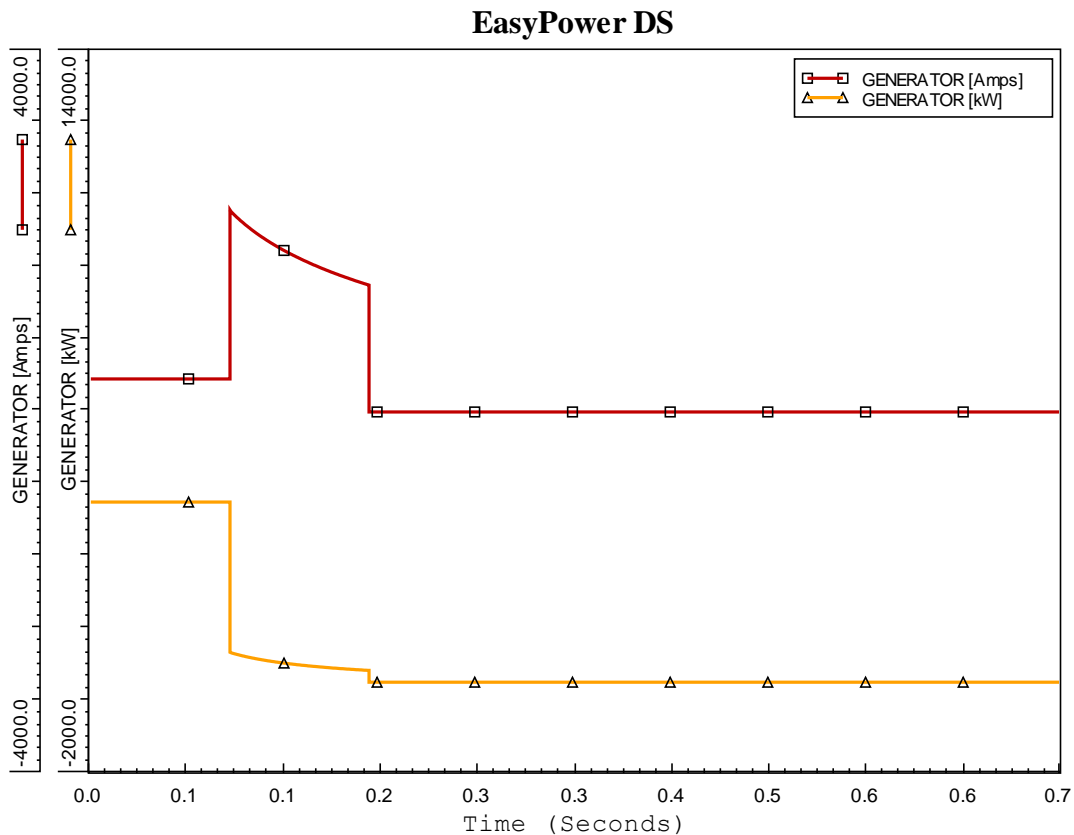
U trenutku nastanka kvara, napon na sabirnici ELEKTRANA 6.3 kV (slika 5.7.) ipak ne pada na nulu, već ga regulator uzbude generatora održava od vrijednosti 1.52 kV sve do 0.98 kV kada nastupi otvaranje prekidača. Tada napon ima skok do 4 kV i nastavlja rasti preko nazivne vrijednosti.



**Slika 5.7.** Napon na sabirnici ELEKTRANA 6.3 kV

Na slici 5.8. prikazani su struja generatora, te električna snaga koju generator predaje sustavu. U trenutku nastanka kvara struja generatora naglo poraste sa 368 A na 2223 A. To je struja koja je mjerodavna za nadstrujnu zaštitu koja je podešena na 100 ms. Za vrijeme kvara, generator napaja samo mjesto kratkog spoja, stoga snaga pada sa 4000 kW na 653 kW, i

prestavlja gubitke jer se u slučaju izravnog trofaznog kratkog spoja nikakva snaga ne prenosi sustavu. Ovakav kvar spada u kategoriju kvarova blizu generatoru.



**Slika 5.8.** Struja i električna snaga generatora

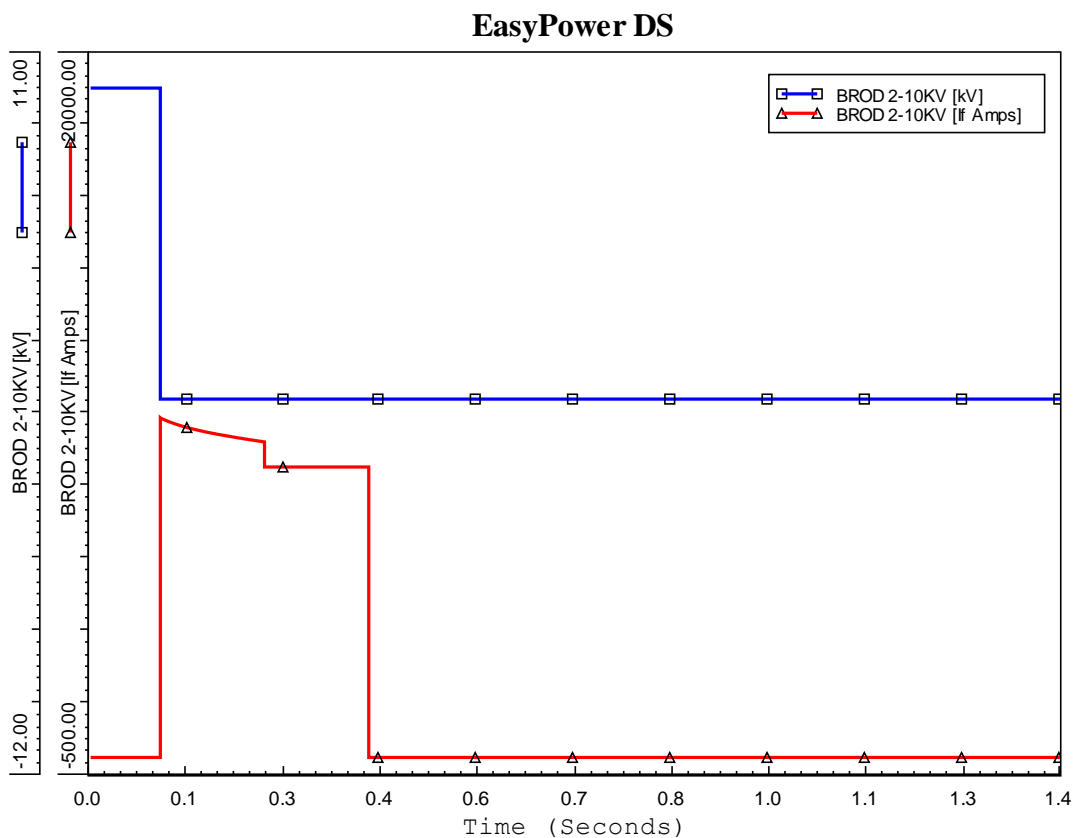
## 5.2. Trofazni kratki spoj na sabirnici SL.BROD 10 kV

U ovom primjeru provedena je simulacija trofaznog kratkog spoja na strani nižeg napona trafostanice Sl.Brod 2, prema kronologiji:

- 0 s* – početak simulacije
- 0 – 0.1 s* – trajanje stacionarnog stanja
- 0.1 s* – nastanak trofaznog kratkog spoja na sabirnici SL.BROD 2 10kV
- 0.25 s* – djelovanje zaštite i otvaranje prekidača PR-1
- 0.4 s* – djelovanje zaštite i otvaranje prekidača PR-7 i PR-8
- 1.4 s* – kraj simulacije

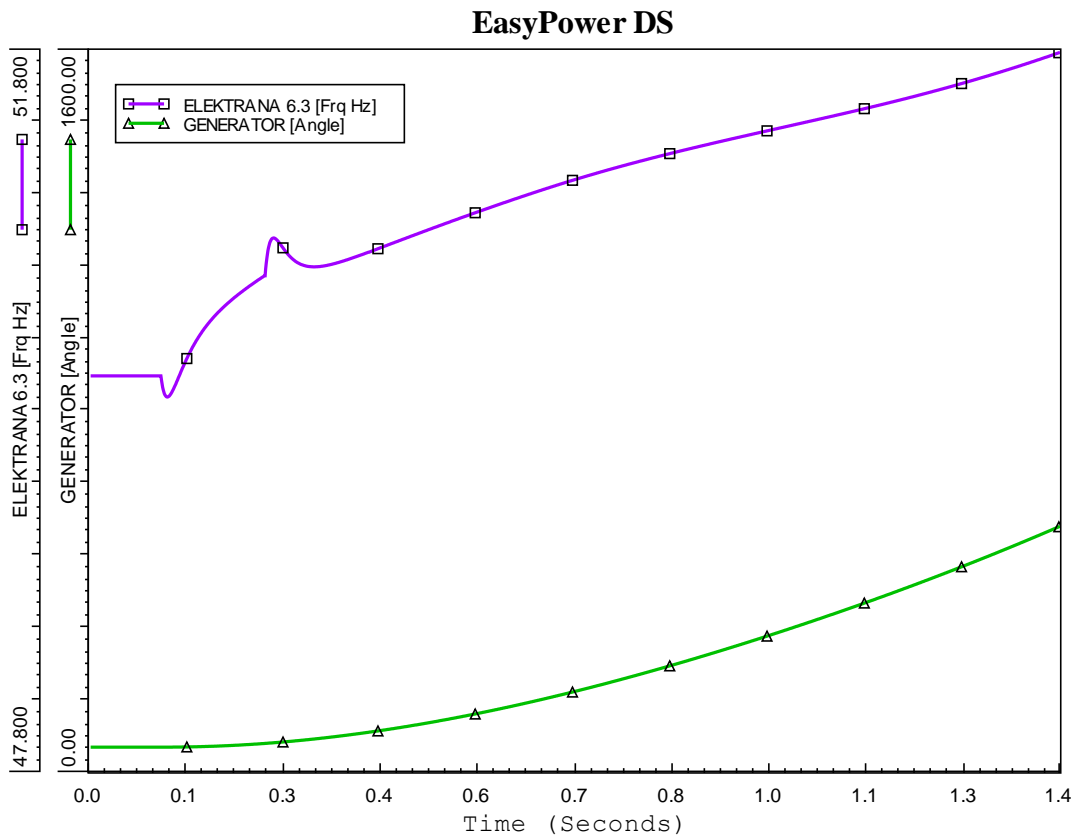
Na slici 5.9. prikazani su napon pogođene sabirnice, i struja trofaznog kratkog spoja. Prema podešenju nadstrujne zaštite, prekidač PR-1 prema rasklopištu prekida nakon 150 ms, dok prekidači PR-7 i PR-8 prema 35 kV strani trafostanice (slika 5.4.) prekidaju nakon 300

ms. Iz dijagrama se može vidjeti kako se prvih 150 ms trajanja kratkog spoja on napaja sa dvije strane, od strane generatora te od strane mreže. Nakon isključenja prekidača PR-1 kratki spoj se napaja samo od strane mreže u trajanju od još 150 ms. Vidljiv je doprinos generatora u udarnoj struji kratkog spoja koja iznosi 9643 A, te se smanjuje do iznosa 8984 A. Kada prekidač PR-1 odvoji generator od mreže, ukupna struja kratkog spoja pada na konstantnu vrijednost 8264 A, a generator tada prelazi u otočni pogon i napaja industriju. Otočni pogon je stanje u kojem elektrana kao distribuirani izvor napaja lokalne potrošače u izoliranom dijelu mreže. Otočni pogon distribuiranog izvora je nepoželjan pogonski slučaj te ga je potrebno detektirati u što kraćem vremenu. Također bi u ovom slučaju trebala reagirati i nadstrujna zaštita generatora koja bi prekinula otočni pogon.

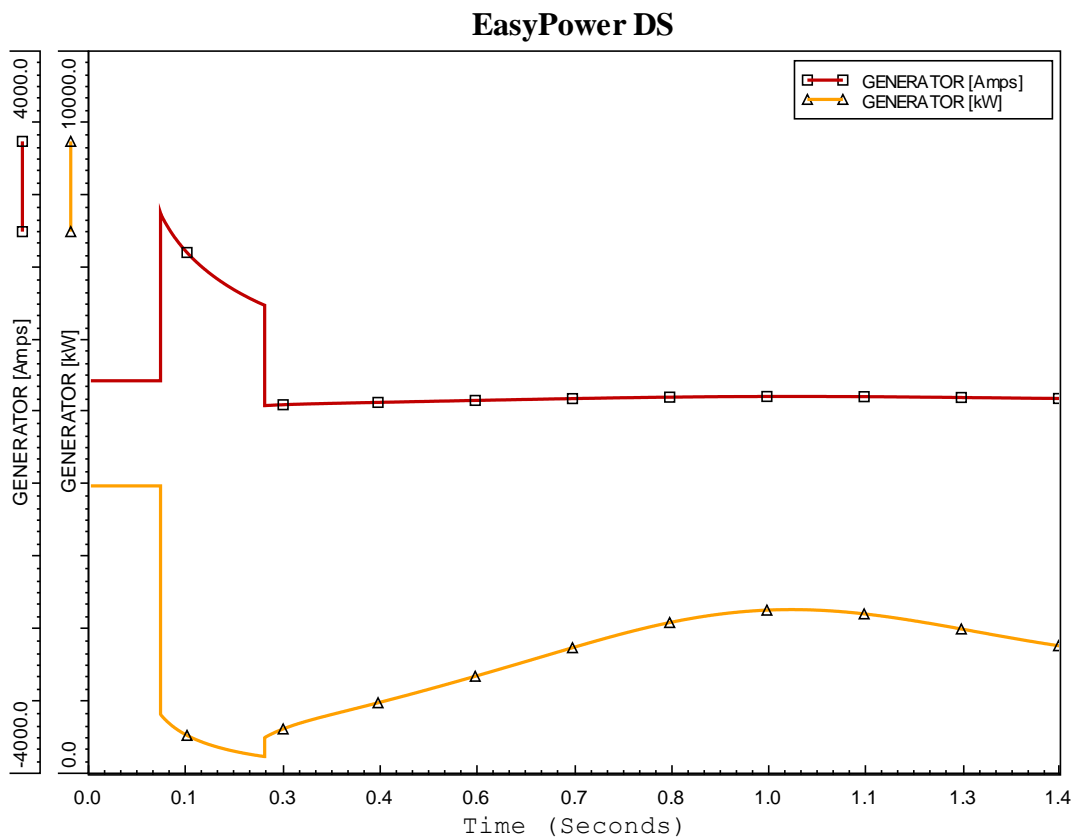


**Slika 5.9.** Napon i struja kvara na sabirnici SL.BROD 2 10kV

Na slici 5.10. prikazan je dijagram frekvencije i kuta opterećenja generatora. Frekvencija u trenutku nastanka kratkog spoja ima mali propad, te se za vrijeme kvara povećava od 49,883 Hz do 50.676 Hz. Kut opterećenja za to vrijeme poraste od 55,6° do 65,5°. Nakon odvajanja generatora od mreže i početka otočnog pogona, generator nastavlja ubrzavati, uz kontinuirano povećavanje kuta opterećenja. Ovdje je također potrebno reagiranje nadfrekventne zaštite pri 52 Hz i generator treba razbuditi i zaustaviti kako se ne bi izgubio sinkronizam.



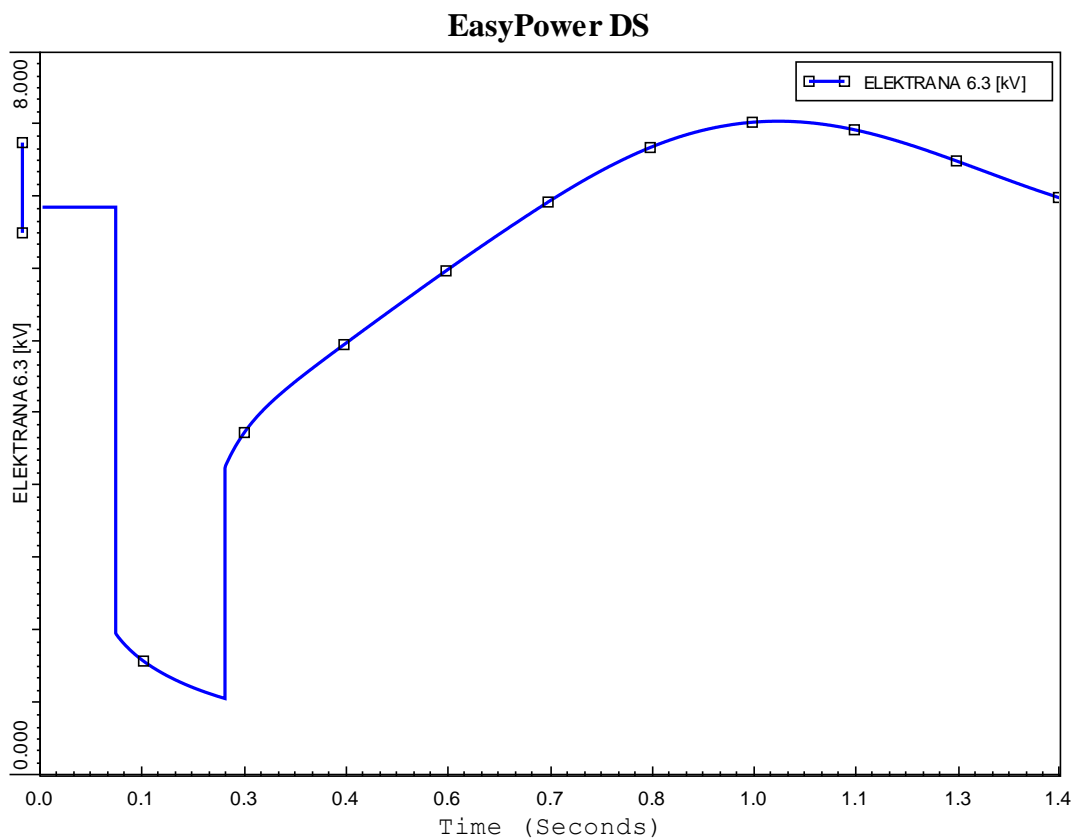
**Slika 5.10.** *Frekvencija i kut opterećenja generatora*



**Slika 5.11.** *Struja i električna snaga generatora*

U trenutku nastanka kratkog spoja, struja generatora naglo poraste sa 368 A na 2160 A, te za vrijeme trajanja kvara opada do 1207 A. Snaga koju generator predaje mreži naglo pada sa 4000 kW na 757 kW i za vrijeme trajanja kvara opada do 244 kW. Nakon odvajanja generatora od mreže dolazi do njihanja snage od 515 kW pa sve do 2200 kW. To je snaga koju generator predaje industrijskom pogonu.

Na slici 5.12. prikazan je napon na sabirnici generatora (ELEKTRANA 6.3 kV). U trenutku nastanka kvara, napon trenutno pada do vrijednosti 1.538 kV, te za vrijeme trajanja kvara opada do 0,86 kV. To su vrijednosti napona koje regulator uzbude uspjeva održati. Nakon odvajanja od mreže napon ima skokovitu promjenu do 3,5 kV te oscilira s amplitudom od 7.2kV.



**Slika 5.12.** Napon na sabirnici ELEKTRANA 6.3 kV

### 5.3. Trofazni kratki spoj na sabirnici STROSSMAYER 10 kV uz APU

Na slici 5.13. nalazi se uvećan prikaz dijela mreže gdje se simulira trofazni kratki spoj, na sabirnici STROSSMAYER 10kV. Kratki spoj je prolaznog karaktera, stoga će APU (Automatsko ponovno uključenje) nakon određenog vremena dati signal za zatvaranje prekidača. Slika 5.14. prikazuje napon i struju kvara pogođene sabirnice.

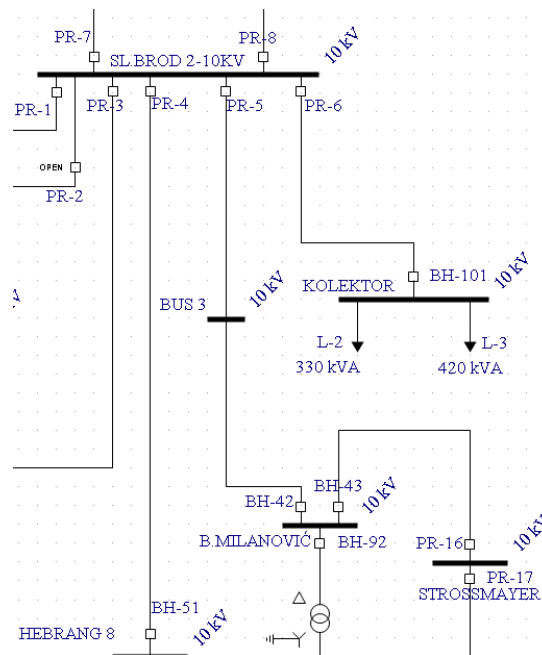
Kronologija simulacije je slijedeća:

- 0 s – početak simulacije
- 0 – 0.1 s – trajanje stacionarnog stanja
- 0.1 s – nastanak trofaznog kratkog spoja na sabirnici STROSSMAYER 10kV
- 0.15 s – djelovanje zaštite i otvaranje prekidača PR-5
- 0.45 s – automatsko ponovno uklapanje, kvar je otklonjen
- 2.5 s – kraj simulacije

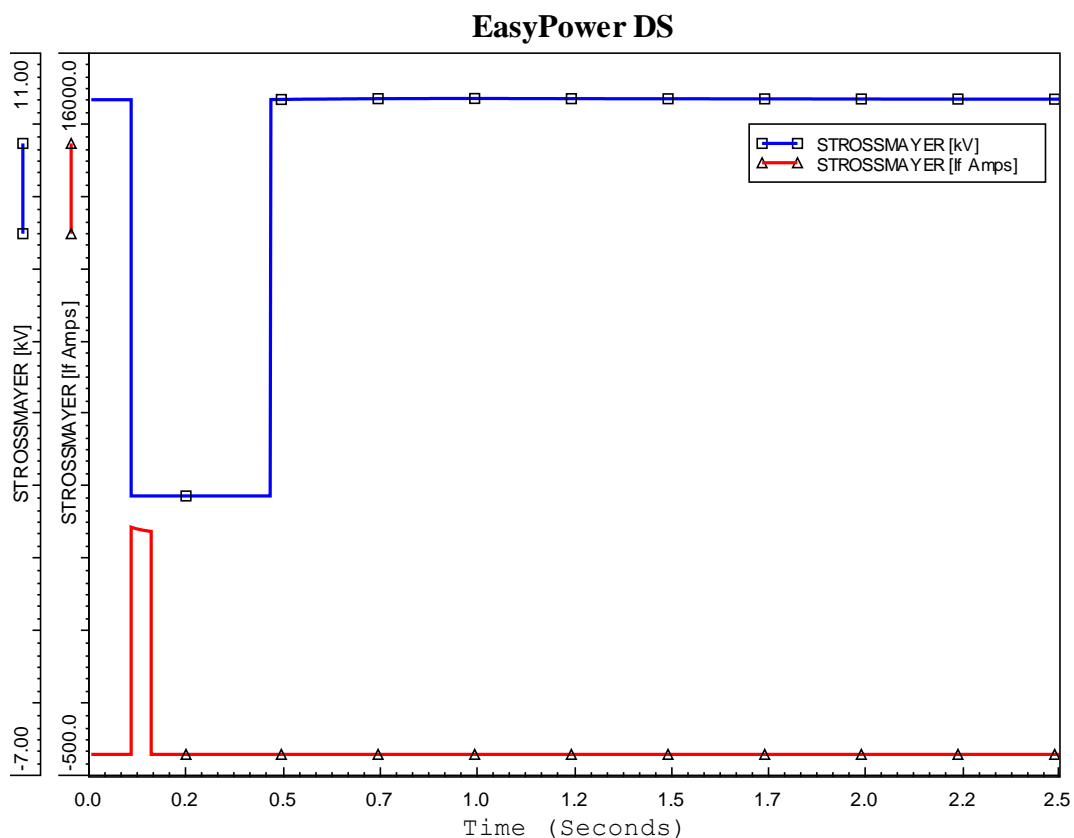
U trenutku nastanka kratkog spoja napon trenutno pada na nulu, dok struja kratkog spoja dostiže vrijednost 5196A. Nadstrujna je zaštita za struju 1200A podešena na 50 ms i tada prekidač PR-5 otvara kontakte i time je kvar izoliran. U tom slučaju cijelo vodno polje ostaje bez električne energije.

Kako je kvar prolaznog karaktera, a automatsko ponovno uključenje podešeno je na 300 ms, može se vidjeti kako nakon uključjenja napon poprima početnu vrijednost od 10 kV i sustav se vraća u normalni pogon.

U trenutku nastanka kratkog spoja dolazi do naglog preopterećenja generatora što se odražava naglim propadom frekvencije i porastom struje generatora. Na slici 5.15. prikazani su frekvencija i kut opterećenja generatora, a na slici 5.16. struja i električna snaga generatora.



**Slika 5.13.** Trofazni kratki spoj na sabirnici STROSSMAYER 10kV

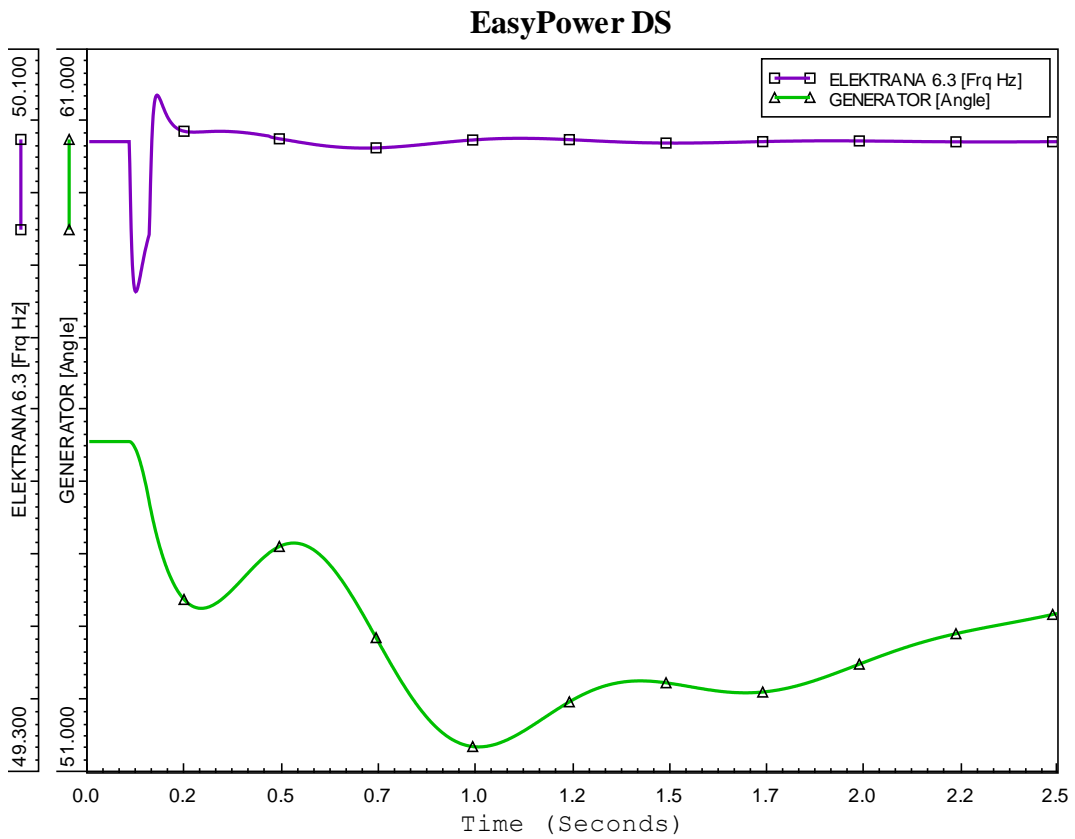


**Slika 5.14.** Napon i struja kvara na sabirnici STROSSMAYER 10kV

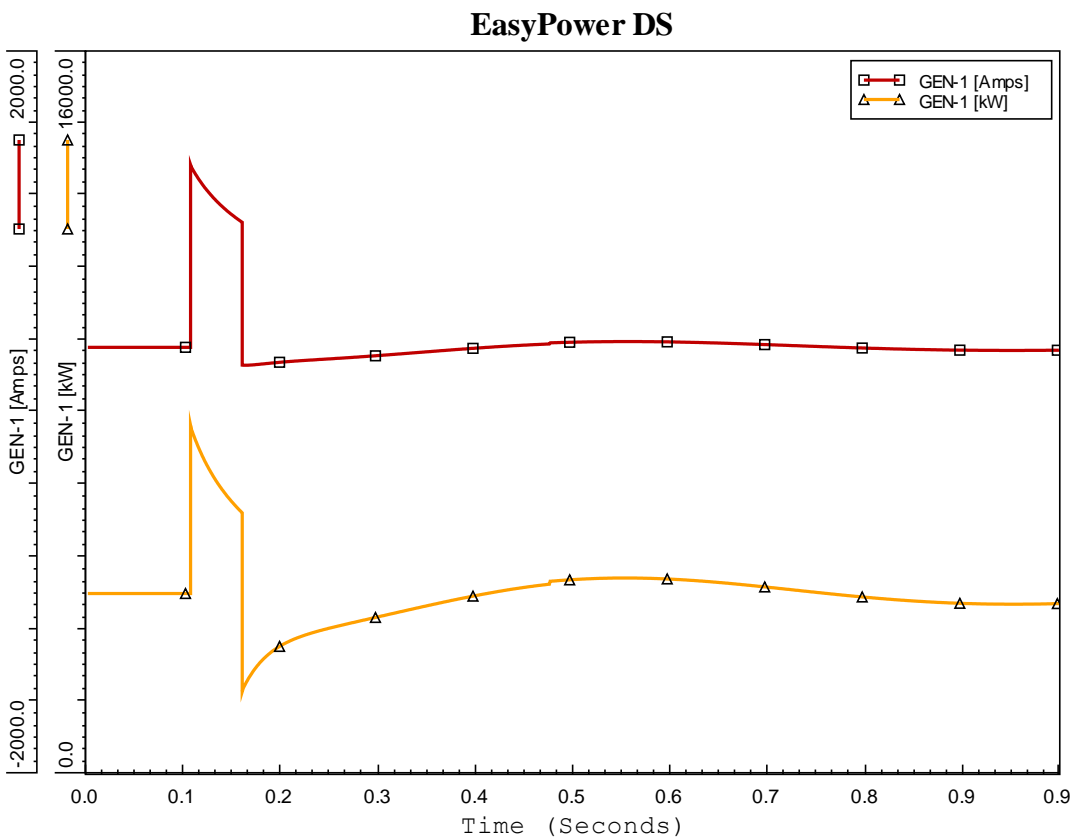
Frekvencija ima propad do 49,837 Hz, te nakon izoliranja kvara ima blago nadvišenje do 50,052 Hz. Nakon ponovnog uklopa zanemarivo oscilira i poprima konstantnu vrijednost od 50 Hz. Zbog njihanja generatora, kut opterećenja prvog njihaja pada sa  $55,6^\circ$  na vrijednost  $53,28^\circ$ . U slijedećem njihaju dostiže još nižu vrijednost od  $51,34^\circ$ . Nakon toga se oscilacije prigušuju, a generator zadržava sinkronizam.

Struja generatora doseže vrijednost 1370A, a nakon ponovnog uključanja ima prigušene oscilacije u iznosu od 270A do 350A. U slučaju da zaštita na trafostanici Sl.Brod 2 zakaže, reagirat će nadstrujna zaštita generatora koja je postavljena na 100 ms. Snaga generatora trenutno poraste sa 4000 kW na 7547kW i dolazi do kratkotrajnog preopterećenja generatora, a do trenutka izoliranja kvara snaga se smanjuje do 5830 kW. Nakon ponovnog uključanja, električna snaga oscilira te se nakon kratkog vremena izjednačava sa mehaničkom snagom turbine i time je prijelazna pojava završena.

Napon generatora u trenutku kvara pada na vrijednost 4,1 kV, a za vrijeme kvara opada do vrijednosti 3,9 kV. U ovom slučaju kada je kvar daleko od generatora, on za vrijeme kvara održava viši napon.

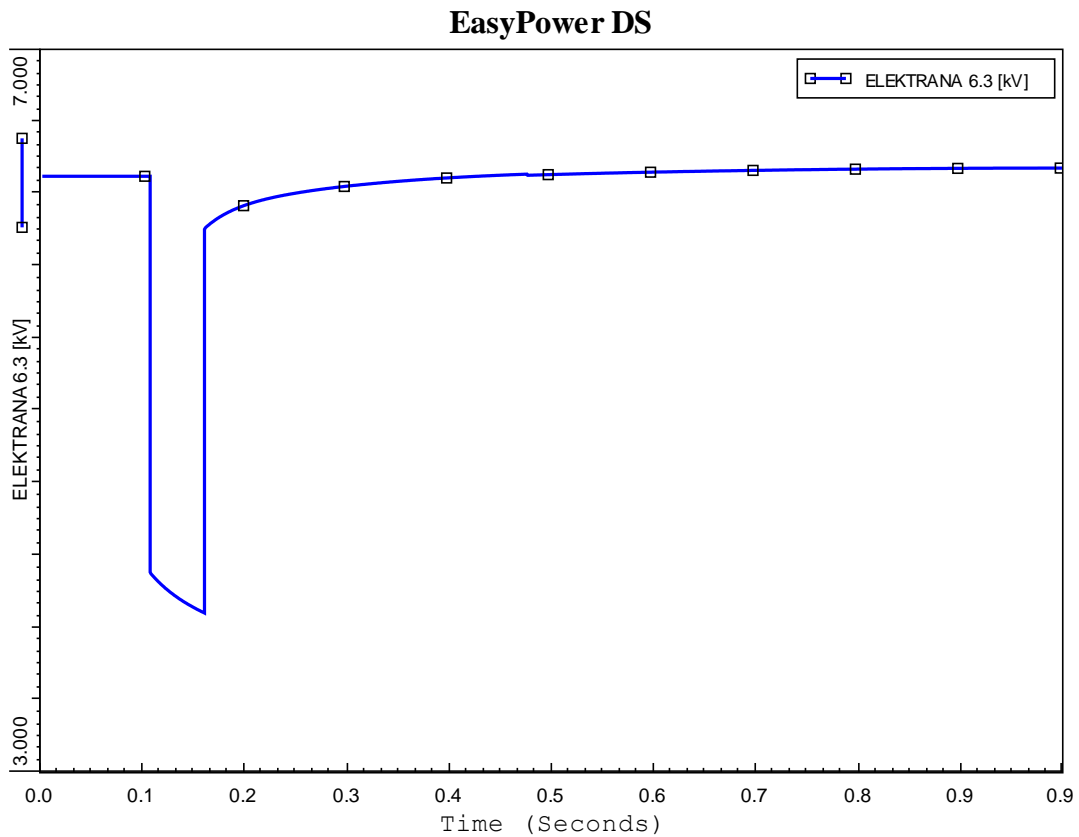


Slika 5.15. Frekvencija i kut opterećenja generatora



Slika 5.16. Struja i električna snaga generatora



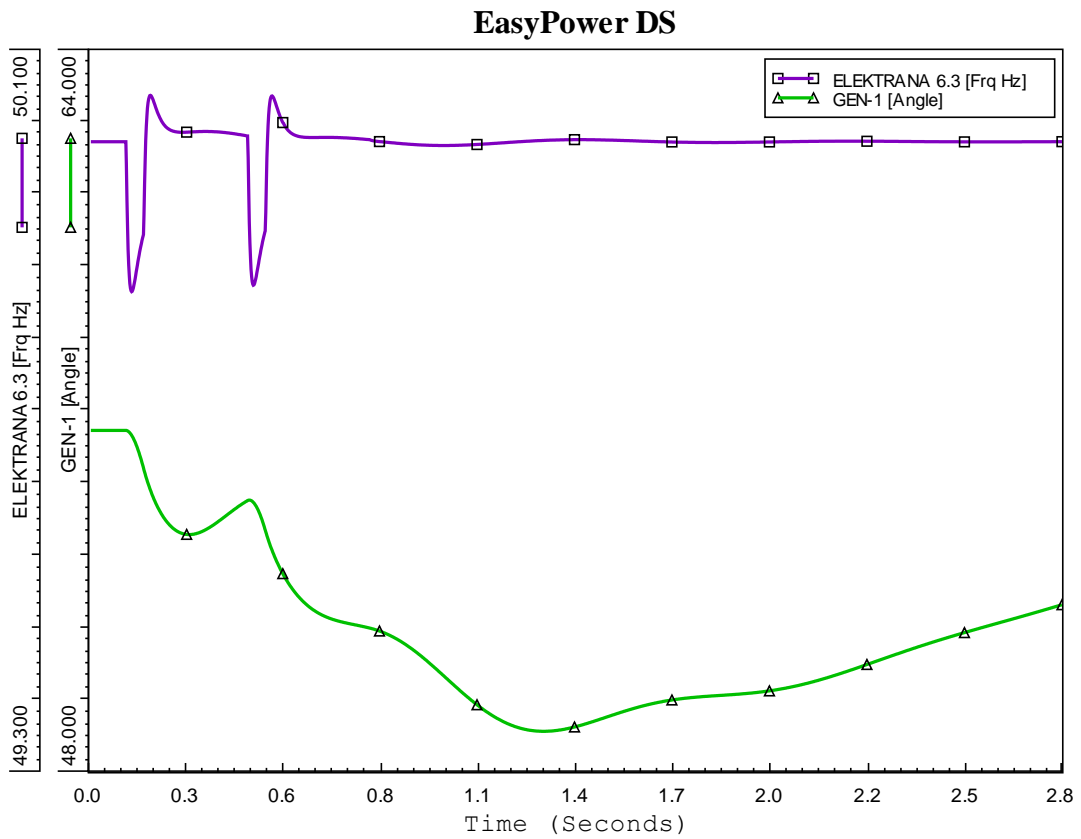


Slika 5.12. Napon na sabirnici ELEKTRANA 6.3 kV

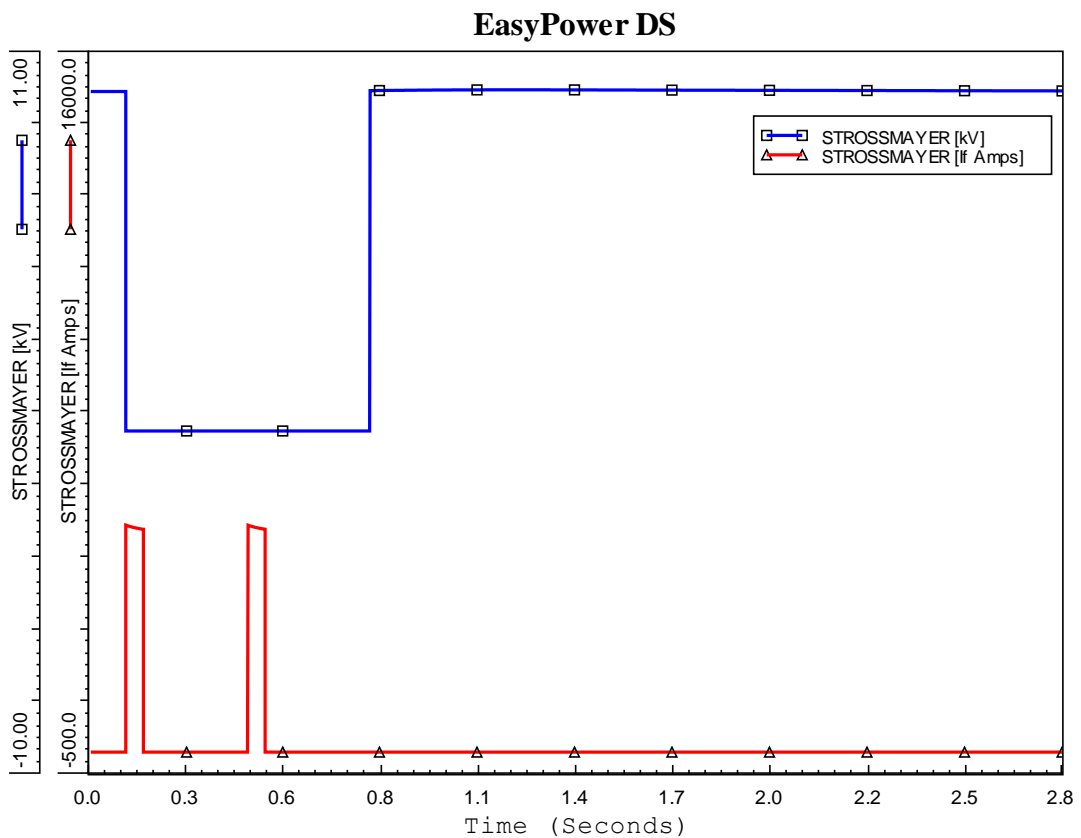
#### 5.4. Trofazni kratki spoj na sabirnici STROSSMAYER 10 kV uz dvostruki APU

U ovom primjeru kratki spoj je također prolaznog karaktera, ali zadržava se dulje nego u prethodnom slučaju. Stoga nakon isklapanja prekidača, APU uključuje za vrijeme trajanja kvara, te dolazi do ponovnog reagiranja zaštite, odnosno isklapanja. Nakon drugog isklapanja, kvar je otklonjen i APU uključuje prekidač. Kronologija simulacije je slijedeća:

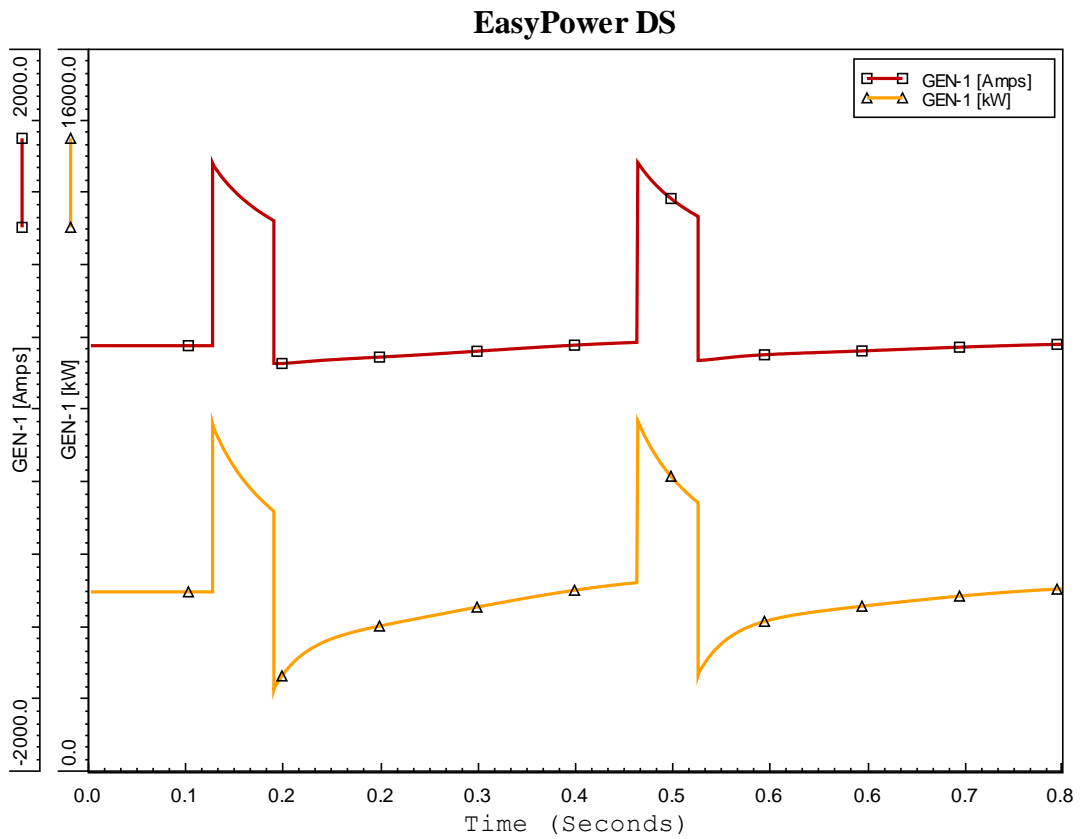
- 0 s – početak simulacije
- 0 – 0.1 s – trajanje stacionarnog stanja
- 0.1 s – nastanak trofaznog kratkog spoja na sabirnici STROSSMAYER 10kV
- 0.15 s – djelovanje zaštite i otvaranje prekidača PR-5
- 0.45 s – automatsko ponovno uklapanje, kvar još uvijek traje
- 0.5 s – ponovno djelovanje zaštite i otvaranje prekidača PR-5
- 0.8 s – automatsko ponovno uklapanje, kvar je otklonjen
- 2.8 s – kraj simulacije



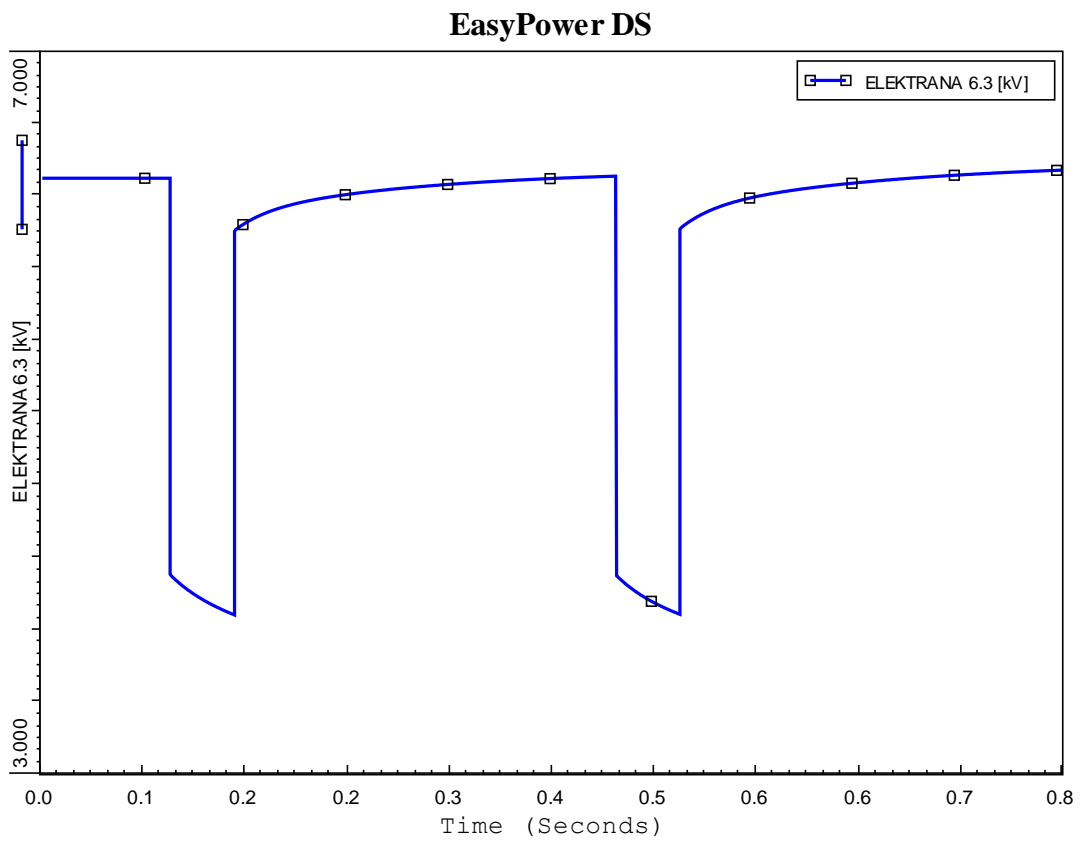
**Slika 5.15.** *Frekvencija i kut opterećenja generatora*



**Slika 5.14.** *Napon i struja kvara na sabirnici STROSSMAYER 10kV*



**Slika 5.16.** Struja i električna snaga generatora



**Slika 5.17.** Napon na sabirnici ELEKTRANA 6.3 kV

Vrijednosti promatranih veličina slične su kao i u prethodnom slučaju. Ipak, kut opterećenja (slika 5.15) zbog uklapanja za vrijeme kvara dostiže nižu vrijednost od  $48.9^\circ$ , te se uz prigušene oscilacije vraća u početno stanje.

## 6. ZAKLJUČAK

Analizu prijelazne stabilnosti važno je provoditi upravo zbog planiranja razvoja elektroenergetskog sustava. Na temelju krivulja njihanja generatora određuju se granične vrijednosti kritičnih vremena reagiranja zaštite. Za kvalitetnu i pouzdanu analizu potrebno je detaljno i pravilno dimenzionirati parametre generatora, sustava uzbude, te turbinske regulatore. Sustavi regulacije uzbude generatora i turbine utječu na pomicanje granice stabilnosti za vrijeme poremećaja te time pridonose očuvanju stabilnosti. Očuvanje stabilnosti elektroenergetskog sustava složen je problem, a osim o karakteristikama kvara ili poremećaja ovisi i pogonskim prilikama prije kvara, kao što su opterećenje, prizvodnja i topologija mreže.

Modul *Dynamic Stability* programskog alata *EasyPower* nema mogućnost simulacije jednofaznih i dvofaznih kratkih spojeva, nego omogućava simulaciju samo trofaznih kratkih spojeva. To predstavlja nedostatak budući da rezultati analize trofaznog kratkog spoja nisu uvijek mjerodavni za parametrisiranje zaštite.

Simulacije su provedene za slučajeve kratkih spojeva u neposrednoj blizini spomenutih sabirnica. Iz provedenih simulacija može se vidjeti kako trofazni kratki spoj udaljen od generatora uzrokuje njihanje generatora. Ipak, nakon izoliranja kvara generator zadržava sinkronizam. U slučaju bliskih kratkih spojeva pokazalo se kako se generator ne može zadržati u pogonu. Za kratki spoj na sabirnicama elektrane, prekida se svaka veza generatora sa mrežom, dok se u slučaju kratkog spoja na sabirnicama trafostanice Sl.Brod 2 prekida veza generatora s mrežom, no on je i dalje u pogonu te napaja drvenu industriju. Ovakav otočni pogon generatora kao distribuiranog izvora nije dozvoljen. Općenito elektranama koje su priključene na distribucijsku mrežu nije dozvoljen otočni pogon. Zbog toga moraju imati adekvatnu zaštitu od otočnog pogona, odnosno sustav detekcije otočnog pogona.

## 7. LITERATURA

- [1] P.Kundur, „*Power System Stability And Control*“, McGraw-Hill, Inc.
- [2] „*Naponsta stabilnost elektroenergetskog sustava*“ Stipe Ćurlin, HEP OPS d.o.o. Zagreb, Hrvatska
- [3] „*Power System Dynamics: Stability And Control*“, Jan Machowski, Januzs W. Bialek, James R. Bumby, 2008. John Wiley & Sons, Ltd.
- [4] Lajos Józsa, „*Vodjenje pogona elektroenergetskog sustava*“, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet, Zavod za elektroenergetiku, Osijek, 2008.
- [5] Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju Elektromehaničke i električne pretvorbe: „*Sinkroni stroj*“, Doc. dr. sc. Mario Vražić Zagreb, 2012.
- [6] „*Analiza prijelazne stabilnosti generatora industrijskog postrojenja*“, Dalibor Sipl, Energetika, Belišće d.d.
- [7] „*Električne Mreže III*“, dr. Marija Ožegović, Karlo Ožegović, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje – Split, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1982.
- [8] Predavanje iz kolegija Analiza elektroenergetskog sustava – Osnove stabilnosti elektroenergetskog sustava, Tranzijentna stabilnost 1. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet  
Prof. dr.sc. Lajos Józsa
- [9] „*Elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja na elektroenergetsku mrežu – Kogeneracijsko postrojenje Slavonija DI*“, Institut za elektroprivredu i energetiku d.d., Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2010.
- [10] „*Easy Power – User Manual*“, Version 9.0.3.
- [11] „*Analysis Of Electric Machinery And Drive Systems*“, Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, John Wiley & Sons, Inc. Publication

## 8. POPIS I OPIS UPOTRIJEBLJENIH OZNAKA

$A_u$  - površina ubrzavanja generatora

$A_k$  – površina kočenja generatora

$E$  - napon izvora električne energije

$\overline{E}_0$  – fazor unutarnjeg polnog napona generatora

$f$  – frekvencija

$H$  – normalizirana konstanta tromosti agregata

$\overline{I}$  - fazor struje generatora

$I_w$  - radna komponenta struje generatora

$I_q$  - jalova komponenta struje generatora

$\overline{I}_{f0}$  – struja uzbude praznog hoda

$\overline{I}_f$  - struja uzbude generatora

$J$  – ukupni moment tromosti agregata [ $\text{kgm}^2$ ]

$M_m$  - mehanički moment turbine

$M_e$  – električni moment generatora

$M_i$  - kutni moment agregata

$P$  - električna snaga generatora

$P_s$  – radna snaga proizvodnje

$P_l$  - radna snaga potrošnje

$P_e$  - električna snaga koju generator predaje sustavu

$P_m$  – mehanička snaga koju turbina predaje generatoru

$p$  – broj pari polova

$Q_s$  - jalova snaga proizvodnje

$Q_l$  - jalova snaga potrošnje

$S_n$  – nazivna snaga generatora

$t$  - vrijeme

$\bar{U}$  – fazor napona stezaljki generatora

$U_f$  - fazni napon

$W_r$  – kinetička energija rotora

$X$  - reaktancija

$X_p$  – prijenosna reaktancija prije poremećaja

$X_d'$  – sinkrona reaktancija generatora

$X_{tr}$  – reaktancija transformatora

$X_v$  – reaktancija jednog prijenosnog voda

$X_s$  - sinkrona reaktancija generatora

$\alpha$  - kutna akceleracija rotora generatora

$\delta$  - kut opterećenja generatora

$\delta_r$  –promjena kuta opterećenja

$\varphi$  – kut između fazora struje i napona generatora

$\omega_r$  - mehanička brzina vrtnje rotora[rad/s]

$\omega_0$  - sinkrona brzina vrtnje rotora

$\Delta\omega_r$  - promjena brzine vrtnje uzrokovana neravnotežom električnog i mehaničkog momenta



## 9. SAŽETAK

Sposobnost elektroenergetskog sustava da nakon poremećaja ostane stabilan od neizmjerne je važnosti zbog kvalitetne i pouzdane opskrbe potrošača električnom energijom. Analiza prijelaznog stanja nakon velikih poremećaja predstavlja jednu od značajnih analiza i provodi se za svaki elektroenergetski sustav.

U ovom radu provodi se analiza prijelazne stabilnosti elektrane na biomasu "Slavonija OIE". Okolna mreža uz elektranu modelirana je u programskom alatu *EasyPower*, a simulacija je provedena u modulu *Dynamic Stability*. Kroz simulacije promatrana su prijelazna stanja nakon trofaznih kratkih spojeva u neposrednoj blizini generatora, te udaljeni od generatora.

**Ključne riječi:** stabilnost elektroenergetskog sustava, prijelazna stabilnost, kut opterećenja, njihanje generatora.

### ABSTRACT

Ability of power system to remain stable after a disturbance is crucial for quality and reliable electricity supply. Transient analysis after a large disturbance is one of the most significant analysis and is implemented for every single power system.

In this study, an analysis of transient stability was conducted for biomass power plant "Slavonija OIE". Surrounding network with the power plant is modeled in the software *Easypower*, and simulation was conducted the module *Dynamic Stability*. Through simulations, transient conditions after three-phase short circuit were observed, close to a generator and far from a generator.

**Key words:** power system stability, transient stability, rotor angle, generator swing.

## 10. ŽIVOTOPIS

Ivan Medved, rođen 23. svibnja 1991. godine u Virovitici. 2006. godine upisuje se u "Srednju školu Marka Marulića", smjer elektrotehnika, u Slatini. Nakon završetka srednje škole, 2010. godine na temelju izvrsnog uspjeha ostvarujeizravan upis na Elektrotehnički fakultet u Osijeku. 2013. završava Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika te stječe titulu univ.bacc.ing.el. Iste godine upisuje se na diplomski sveučilišni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika.

---

Ivan Medved