

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**ANALIZA UTJECAJA DISTRIBUIRANOG IZVORA NA  
STRUJNO-NAPONSKE PRILIKE U OKOLNOJ MREŽI**

Rijeka, rujan 2016.

Marko Kadić

0069059207

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**ANALIZA UTJECAJA DISTRIBUIRANOG IZVORA NA  
STRUJNO-NAPONSKE PRILIKE U OKOLNOJ MREŽI**

Mentor: Doc. dr sc. Dubravko Franković

Rijeka, rujan 2016.

Marko Kadić

0069059207

## TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite  
prediplomskog stručnog studija elektrotehnike  
Br.: 602-04/16-14/3  
Rijeka, 14.03.2016.

# ZADATAK

## za završni rad

Pristupnik: Marko Kadić

Matični broj: : 0069059207  
Lokalni matični broj: 12800023

Naziv zadatka:

**ANALIZA UTJECAJA DISTRIBUIRANOG IZVORA NA  
STRUJNO-NAPONSKE PRILIKE U OKOLNOJ MREŽI**

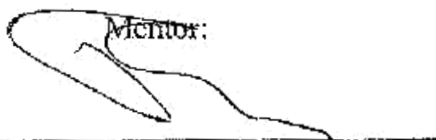
Title (*English*):

**Distributed energy resource impact on current-voltage profiles in  
the surrounding network**

Polje znanstvenog područja: 2.03. Elektrotehnika  
Grana znanstvenog područja: 2.03.01 elektroenergetika

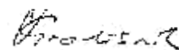
Na primjeru malog distribuiranog izvora energije – fotonaponske elektrane snage do 10 kW, odrediti utjecaj na okolnu mrežu. Poglavitito ispitati utjecaj na naponske prilike te na struju kratkog spoja. Posebno analizirati slučaj jednofaznog te posebno trofaznog priključka elektrane na niskonaponsku mrežu.

Mentor:



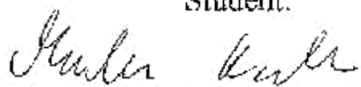
Doc. dr. sc. Dubravko Franković, dipl.ing.

Predsjednica Povjerenstva:



Lzv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik, dipl.ing.

Student:



Marko Kadić

*Završni radovi moraju biti u skladu s „Uputama za pisanje završnog / diplomskog rada“.*

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

**IZJAVA**

Sukladno članku 10. "Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija" Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku za završni rad pod brojem 602-04/16-14/3 (Analiza utjecaja distribuiranog izvora na strujno-naponske prilike u okolnoj mreži) uz konzultiranje s mentorom.

Marko Kadić

---

Rijeka, rujan 2016.

0069059207

**Zahvala:**

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru *doc. dr sc. Dubravku Frankoviću* koji mi je pomogao svojim savjetima pri izradi ovog završnog rada i što je uvijek imao vremena i strpljenja za moje upite.

Također, zahvaljujem se svojim kolegama i prijateljima što su obogatili ovaj dio moga života.

Na kraju, zahvaljujem se svojim roditeljima i ostatku obitelji na podršci i razumijevanju koju su mi uvijek pružali.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. DISTRIBUIRANI IZVORI ENERGIJE .....	2
3. FOTONAPONSKI EFEKT .....	6
3.1 Fotonaponske ćelije .....	6
3.1.1 Osnovne značajke fotonaponskih ćelija.....	7
3.2 Vrste fotonaponskih ćelija .....	12
3.2.1 Proizvodnja solarnih ćelija.....	14
3.3 Fotonaponski moduli .....	15
3.3.1 Povezivanje modula .....	17
4. FOTONAPONSKA ELEKTRANA RITEH-1.....	19
4.1 Komponente fotonaponske elektrane .....	22
4.1.1 Generatorski blok.....	22
4.1.2 Izmjenjivački blok .....	23
4.1.3 Razvodni ormar RO-FN.....	24
4.1.4 Obračunsko mjerno mjesto .....	27
5. RAČUNALNI PROGRAM ZA ANALIZU ELEKTROENERGETSKIH MREŽA – ETAP.....	28
6. ANALIZA STRUJNO-NAPONSKIH PRILIKA U OKOLNOJ MREŽI DISTRIBUIRANOG IZVORA POMOĆU RAČUNALNOG ALATA ETAP .....	32
6.1 Proračuni s trofaznim priključkom FNE Riteh-1 .....	36
6.1.1 Tokovi snaga.....	36
6.1.2 Jednopolni kratki spoj.....	40
6.1.3 Dvopolni kratki spoj .....	41
6.1.4 Dvopolni kratki spoj sa zemljom .....	42
6.1.5 Tropolni kratki spoj.....	43
6.2 Proračuni s jednofaznim priključkom FNE Riteh-1 .....	45
6.2.1 Nesimetrični tokovi snaga.....	45
6.2.2 Jednopolni kratki spoj.....	47
6.2.3 Dvopolni kratki spoj .....	49
6.2.4 Dvopolni kratki spoj sa zemljom .....	50
6.2.5 Tropolni kratki spoj.....	51

7. ZAKLJUČAK .....	52
8. POPIS LITERATURE.....	53
9. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	54

# 1. UVOD

Posljednjih pedeset godina razvijeni su suvremeni elektroenergetski sustavi. Povećani zahtjevi na nacionalnoj osnovi za elektromotornim sustavima i učestalnost nestanka struje, problem s kvalitetom električne energije i porast cijene električne energije prouzročili su da korisnici traže druge izvore visoko-kvalitetne pouzdane energije. Distribuirani izvori energije (engl. Distributed Energy Resources) su izvori električne energije, koji se nalaze blizu mjesta potrošnje (npr. kućanstvo, poslovni prostori). Pružaju alternativu za poboljšanje klasične električne mreže. Distribuirani izvori su cjenovno pristupačnije rješenje pri konstruiranju elektrana i dalekovoda. Distribuirani izvori korisnicima pridonose nižom cijenom, većom pouzdanošću usluge, kvalitetnijom električnom energijom, povećanom korisnošću električne energije i energetsom neovisnošću. Nekoliko posljednjih godina povećalo se zanimanje za distribuiranu proizvodnju (programi energetske učinkovitosti, smanjenje emisija CO<sub>2</sub>). Korištenje obnovljivih izvora električne energije poput vjetrogeneratora, fotonaponskih sustava, geotermalnih sustava, elektrana na biomasu, hidroenergetskih postrojenja korisno je za dobrobit našeg okoliša. Električna energija je najuporabljivija vrsta energije jer se može pretvoriti u druge oblike energije, stoga će u ovome radu biti detaljnije opisane solarne (fotonaponske ćelije), njihovo pretvaranje sunčeve energije u električnu energiju te njihovo priključenje na elektroenergetsku mrežu. U radu je opisana fotonaponska elektrana Riteh-1. Pomoću računalnog programa Etap modelirana je niskonaponska distributivna mreža i FNE Riteh-1. U programu Etap izvršeni su proračuni tokova snaga, proračuni nesimetričnih tokova snaga, proračuni jednopolnog, dvopolnog, dvopolnog sa zemljom te proračuni trolnog kratkog spoja.



## 2. DISTRIBUIRANI IZVORI ENERGIJE

Distribuirani izvori energije DER (engl. Distributed Energy Resources) su izvori električne energije, tj. proizvodne jedinice, priključene na distribucijsku elektroenergetsku mrežu. Konstruiraju se u rasponu snage od 3 kW do 10 MW. Distribuirani izvori se nalaze unutar električnog sustava distribucije kod ili blizu krajnjeg korisnika. U paralelnom su pogonu s distribucijskim sustavom ili drugim samostalnim jedinicama. Distribuirani izvori su dostupni već mnogo godina, poznatiji pod nekim od naziva kao: generatori i pomoćni generatori. U električnoj industriji koriste se pojmovi poput DS (engl. distributed source) - distribuirana snaga, DP (engl. distributed generation) - distribuirana proizvodnja i DER.

Tablica 2.1. Vrste mreža i dopuštena snaga

Niskonaponska mreža	Srednjenaponska mreža
< 500 kW	500 kW < 10 MW

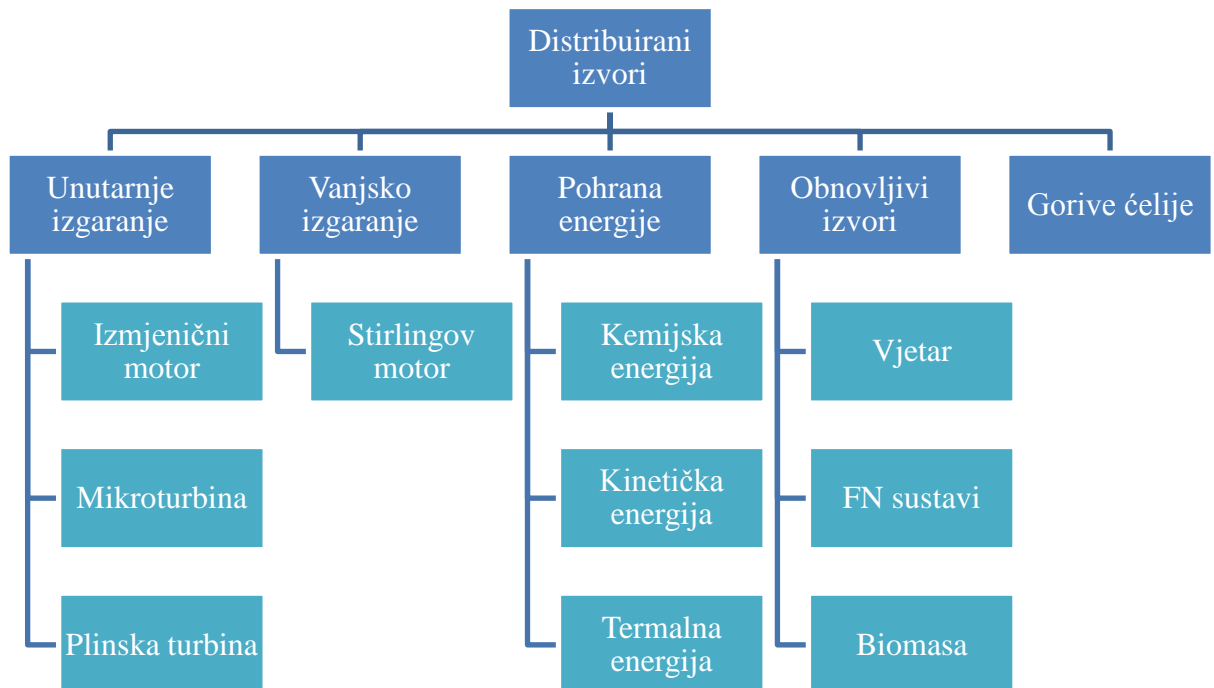
U Hrvatskoj je Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava regulirano da se na niskonaponsku (NN) mrežu priključuju elektrane ukupne snage do 500 kW. Priključak može biti ostvaren na NN vod ili na NN sabirnice TS 10(20)/0,4 kV. Na NN vod se priključuju elektrane ukupne snage do 100 kW. Na srednjenaponsku (SN) mrežu (10, 20, 30, 35 kV) priključuju se elektrane koje imaju ukupnu snagu veću od 500 kW do najviše 10 MW, ali se mogu priključiti i elektrane koje imaju manju snagu.

*Distribuirana snaga* obuhvaća svaku tehnologiju koja stvara ili pohranjuje energiju (baterije, zamašnjaci).

Solarne baterije (akumulatori) su izvori energije (pražnjenje) u periodu rada kada solarni moduli ne proizvode električnu energiju, odnosno spremišta viška proizvedene energije (punjenje). Stupanj djelovanja je odnos između energije dobivene tijekom pražnjenja i energije koju je potrebno iskoristiti za punjenje baterije. Baterija radi u cikličkom režimu rada (pražnjenje, punjenje). Solarne baterije imaju visok stupanj djelovanja, koji iznosi oko 85%.

Imaju malo samopražnjenje (<3% mjesečno) te predstavljaju “srca“ autonomnih sustava za napajanje električnom energijom.

*Distribuirana proizvodnja* obuhvaća svaku tehnologiju koja stvara energiju i predaje ju van mreže (mikroturbine, gorive ćelije, fotonaponski sustavi). Distribuirana proizvodnja predstavlja direktno priključenje svakoga izvora električne energije na distribucijsku mrežu, a sam izvor također može biti priključen s potrošačke mjerne strane. Kod distribuirane proizvodnje posebna važnost se pridaje istodobnoj proizvodnji i toplinske i električne energije jer se oni mogu trošiti lokalno. Nakon što je energija predana u mrežu mora biti ograničena pravilima.



Slika 2.1. Podjela distribuiranih izvora

Stirlingov motor ili motor s toplim zrakom radi kao klipni motor s vanjskim izgaranjem, tj. ima vanjski odvod topline i zatvoren kružni proces. Kod ovakve vrste motora izgaranje se odvija kontinuirano. Kao izvor topline može se koristiti koncentrirano zračenje Sunca te toplina termalnih izvora.

U tablici 2.2. su prikazani distribuirani izvori, njihove veličine izgradnje te kapitalni i ukupni troškovi.

*Tablica 2.2. Kapitalni troškovi i troškovi energije za različite distribuirane izvore*

<b>Tehnologija</b>	<b>Veličina izgradnje</b>	<b>Kapitalni troškovi €/kW</b>	<b>Ukupni troškovi €/kWh</b>
<b>Vjetroelektrane (na kopnu)</b>	15 MW	900 - 1300	0.04 - 0.09
<b>Vjetroelektrane (na površini mora)</b>	100 MW	1500 - 2000	0.05 - 0.12
<b>Kombi-elektrane CHP</b>	40 MW	550 - 850	0.04 - 0.057
<b>Hidroelektrane (mali pad)</b>	5 MW	900 - 1000	0.02 - 0.03
<b>Kogeneracija (turbinski pogon)</b>	5 MW	800 - 850	0.053 - 0.057
<b>Kogeneracija (recipročni pogon)</b>	5 MW	500 - 750	0.03 - 0.045
<b>Fotonaponski sustavi</b>	5 MW	6000 - 10000	0.75 - 1
<b>Gorive stanice</b>	5 MW	1100 - 1600	0.08 - 1
<b>Mikro-izvori (recipročni pogon)</b>	50 MW	600 - 1500	0.07 - 0.15
<b>Mikro-izvori (turbinski pogon)</b>	50 MW	≈ 300	0.03 - 0.05
<b>Mikro-izvori (gorive stanice)</b>	50 MW	≈ 900	0.09 - 0.15

Kogeneracija (engl. Combined Heat and Power) ili CHP je postupak istovremene proizvodnje električne i korisne toplinske energije u jedinstvenom procesu. Kogeneracija koristi otpadnu toplinu koja nastaje uobičajenom proizvodnjom električne energije u termoenergetskim postrojenjima te se najčešće koristi za grijanje građevina ili naselja.

Kogeneracijsko postrojenje koristi biomasu za proizvodnju električne i toplinske energije u indirektnom plinsko-turbinskom (recipročnom) procesu. Osnova sustava je klasična plinska turbina s vanjskom komorom izgaranja čija koncepcija omogućava da se zrak iz kompresora prije uvođenja u turbinu odvede u vanjski dogrijavač zraka s loženjem biomase te se tako dogrijan uvodi u turbinu. Ovim postupkom se omogućava da plinska turbina umjesto s plinovima izgaranja radi s čistim zagrijanim zrakom čime je njezin rad osiguran u idealnim radnim uvjetima. Uz idealne radne uvjete produžen je i radni vijek. Tehnologija izravnog izgaranja krute biomase u ložištima termoenergetskih postrojenja dominira u kogeneracijskoj proizvodnji toplinske i električne energije iz biomase. Kruta biomasa može izgarati samostalno ili je riječ o suizgaranju (suspaljivanju) s fosilnim gorivima, od kojih se najčešće koristi ugljen. Za postrojenja malih i srednjih snaga karakteristično je samostalno izgaranje, a za postrojenja srednjih i velikih snaga je karakteristično suizgaranje.

### 3. FOTONAPONSKI EFEKT

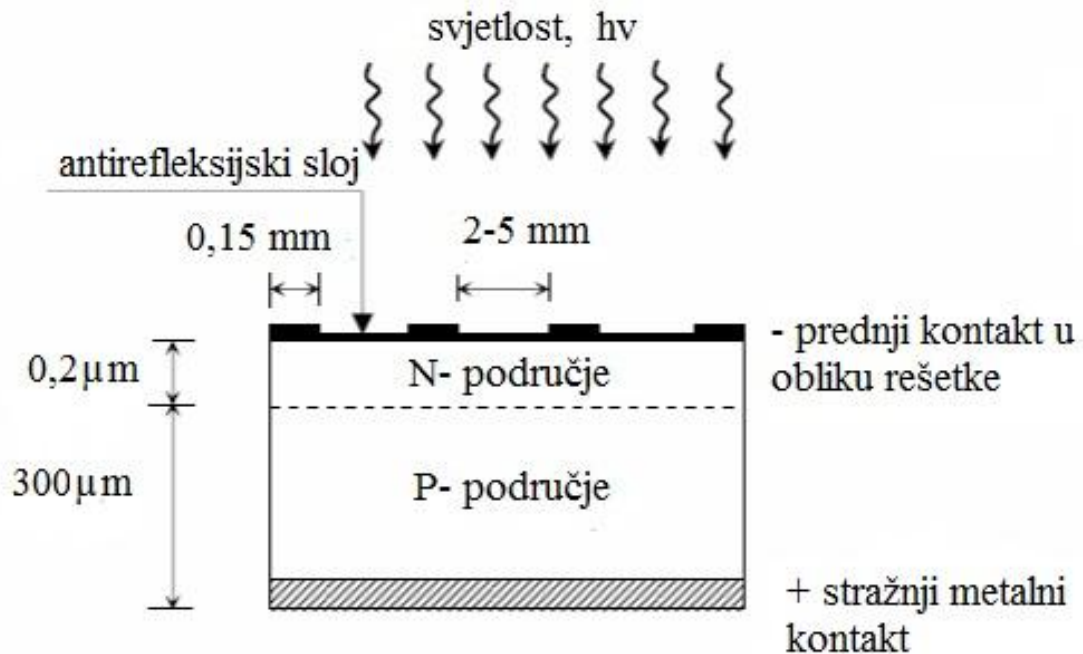
Fotonaponski efekt otkriven je 1839. godine. Otkrio ga je francuski fizičar Alexandre-Edmund Becquerel. Becquerel je otkrio da određeni materijali stvaraju malu količinu električne struje kada su izloženi svjetlu. Sunčeva svjetlost se sastoji od fotona ili “paketića“ energije. Becquerel je primjetio da se mijenja jakost struje između metalnih (platinastih i zlatnih) elektroda u elektrolitu (kiseloj, lužnatoj ili neutralnoj otopini) kada su izložene sunčevom zračenju. Fotoni sadrže različitu količinu energije ovisno o različitim valnim duljinama svjetla. Kada fotoni udare o solarnu ćeliju mogu biti reflektirani, apsorbirani ili proći kroz nju. Kada je foton apsorbiran, njegova energija prenesena je k elektronu u elektronski omotač (poluvodič). S novom energijom, elektron može “pobjeći“ iz svoje normalne pozicije pomoću tog fotona kako bi postao struja u električnom krugu. Napuštanjem svoje pozicije elektron stvara rupu. Promjenom energetske stanja elektrona nastaje ili se apsorbira svjetlost određene boje. Opsežnija istraživanja o fotonaponskom efektu je proveo njemački fizičar Heinrich Hertz, te ih nazvao Hertzovim efektom. 1905. godine fotonaponski efekt u potpunosti je objasnio Albert Einstein.

#### 3.1 Fotonaponske ćelije

Fotonaponska ćelija (engl. Photovoltaic cell) je poluvodički element koji omogućava izravnu pretvorbu svjetlosti (Sunčevo zračenje) u električnu energiju na osnovi fotonaponskog efekta. 1833. godine američki izumitelj Charles Fritts konstruirao je prvi element za pretvorbu svjetlosti u električnu energiju na bazi fotonaponskog efekta. Sastojao se od poluvodičkog materijala selena koji se nalazio na podlozi od zlata. 1891. godine su postavljene zakonitosti fotonaponskog efekta i Aleksandr Grigorjevič Stoletov je izradio prvu fotonaponsku ćeliju. 1946. godine Russell Shoemaker je patentirao prvu suvremenu fotonaponsku ćeliju na osnovi od silicija.

Solarna ćelija je zapravo poluvodička dioda (PN-spoj). PN-spoj nastaje dodavanjem trovalentnih (akceptorskih) primjesa jednom dijelu kristala čistog poluvodiča, a drugom dijelu peterovalentne (donorske) primjese, tako nastaje p-tip odnosno n-tip poluvodiča. Na granici između p-tipa i n-tipa elektroni počinju difundirati iz n-tipa u p-tip i šupljine iz p-tipa u n-tip. PN-spoj ima ispravljačko djelovanje. Lakše vodi struju kada je p-tip poluvodiča propusno

polariziran, a n-tip zaporno polariziran. PN-spoj propušta struju samo u jednom smjeru (dioda).



Slika 3.1. Silicijeva solarna ćelija

### 3.1.1 Osnovne značajke fotonaponskih ćelija

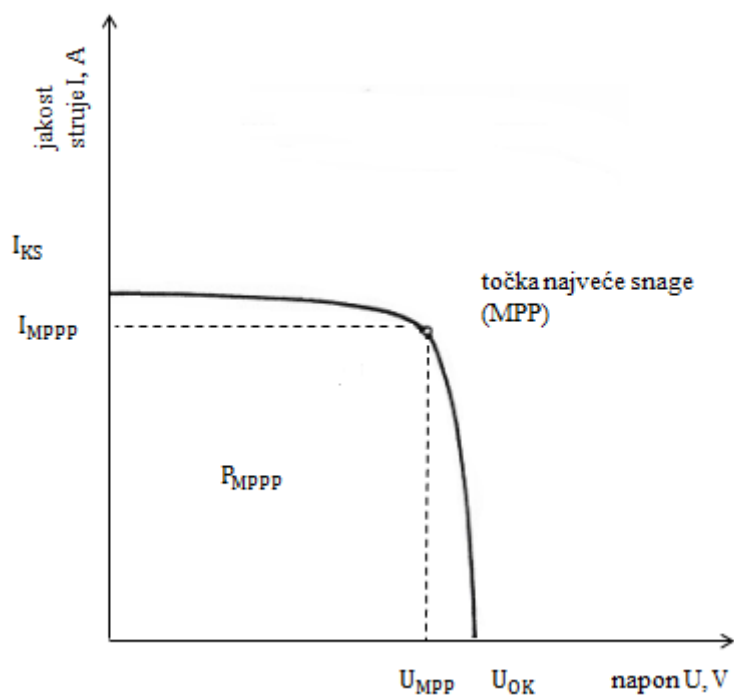
Kako bi se najjednostavnije prikazala osnovna električna svojstva fotonaponskih ćelija koristi se strujno naponska karakteristika ili I-U krivulja.

Fotonaponsku ćeliju opisuju četiri osnovna parametra:

- jakost struje kratkog spoja ( $I_{KS}$ )
- napon otvorenog kruga ( $U_{OK}$ )
- faktor punjenja (F)
- stupanj djelovanja ( $\eta_{FNC}$ )

Tablica 3.1. Osnovne radne značajke najčešćih izvedbi FN ćelija

vrsta FN ćelije	napon otvorenog kruga $U_{OK}$ , V	gustoća struje kratkog spoja $J_{KS}$ , $A/m^2$	stupanj djelovanja $\eta_{FNC}$ , %
od monokristalnog silicija	0,65	300	17
od polikristalnog silicija	0,6	260	15
od amornog silicija	0,85	150	9
od kadmijevog telurida	0,7	150	12



Slika 3.2. Strujno-naponska karakteristika FN ćelije

**Jakost struje kratkog spoja** je iznos jakosti struje u krugu s fotonaponskom ćelijom kao izvorom struje, kada je napon na krajevima njezinih stezaljki jednak 0 ( $U = 0$ ). To znači da je struja kratkog spoja jednaka fotostruji i vrijedi  $I_{KS} = I_{FS}$ .

**Napon otvorenog kruga**  $U_{OK}$  je iznos napona na stezaljkama na krajevima fotonaponske ćelije kada je strujni krug otvoren i FN ćelija je izvor struje, tada je  $I=0$ .

m- faktor idealnosti diode

k- Boltzmannova konstanta

T- temperatura

q- naboj elektrona

$I_0$  -struja zasićenja diode (poželjno je da bude što manja).

Napon otvorenog kruga računa se prema sljedećem izrazu (3.1):

$$U_{OK} = \frac{m \cdot k \cdot T}{q} * \ln\left(\frac{I_{FS}}{I_0} + 1\right), \quad (3.1)$$

**Faktor punjenja** je veličina koja pokazuje koliko se stvarna FN ćelija približava idealnoj, odnosno koliki je utjecaj njezinog serijskog otpora (što ovisi o materijalu i načinu njezine izrade). Na I-U krivulji prikazuje se točkom prijeloma ili točkom najveće snage MPP (engl. Maximum Power Point), prikazano na sl. 3.2.

To je točka čija vrijednost na apscisi odgovara najvišem, odnosno nazivnom ili naponu u točki najveće snage ( $U_{MAX}$ ,  $U_n$ ,  $U_{MPP}$ ). Na ordinati se prikazuje najvećom, nazivnom ili jakošću struje u točki najveće snage ( $I_{MAX}$ ,  $I_n$ ,  $I_{MPP}$ ). Faktor punjenja je jednak omjeru najveće snage fotonaponske ćelije i umnoška napona otvorenog kruga i jakosti struje kratkog spoja:

$$F = \frac{P_{MPP}}{U_{OK} * I_{KS}} = \frac{U_{MPP} * I_{MPP}}{U_{OK} * I_{KS}}, \quad (3.2)$$

pri čemu su:

F - faktor punjenja, = 0,7 - 0,9



$P_{MPP}$  – najveća snaga FN ćelije, W

$U_{MPP}$  – najviši napon (u točki najveće snage) FN ćelije, V

$I_{MPP}$  – najveća jakost struje (u točki najveće snage) FN ćelije, A.

**Stupanj djelovanja** fotonaponske ćelije je omjer najveće električne snage koja može biti dobivena i snage Sunčevog zračenja na njezinoj površini:

$$\eta_{FNC} = \frac{P_{MPP}}{G * A_{FNC}} * 100 = F * \frac{U_{OK} * J_{KS}}{G} * 100, \quad (3.3)$$

pri čemu su:

$\eta_{FNC}$  – stupanj djelovanja FN ćelije, % (tablica 3.1)

$G$  – snaga Sunčevog zračenja, W/m<sup>2</sup>

$A_{FNC}$  – površina FN ćelije, m<sup>2</sup>

$J_{KS}$  – gustoća struje kratkog spoja, A/m<sup>2</sup> (tablica 3.1)

Stupanj djelovanja je pokazatelj gubitaka koji su nastali zbog strukture ćelije i procesa u njoj, ali i njezinim djelovanjem kao elementa strujnog kruga.

**Karakteristični otpor** fotonaponske ćelije jednak je omjeru napona otvorenog kruga i jakosti struje kratkog spoja:

$$R_k = \frac{U_{OK}}{I_{KS}}, \quad (3.4)$$

pri čemu je:

$R_k$  – karakteristični otpor FN ćelije,  $\Omega$

**Snaga** FN ćelije je određena jednadžbom:

$$P = U * \left[ I_{fS} - I_0 * \left( e^{\frac{q*U}{k*T}} - 1 \right) \right], \quad (3.5)$$

pri čemu je:

P - snaga FN ćelije, W

$I_{FS}$  - iznos fotostruje

$I_0$  - struja zasićenja diode

q- naboj elektrona

U - napon na sunčevoj ćeliji

k - Boltzmannova konstanta

T - temperatura

**Najveća snaga** FN ćelije ( $P_{MPP}$ ) jednaka je umnošku najveće struje ( $I_{MPP}$ ) i najvišeg napona ( $U_{MPP}$ ), a grafički se može prikazati kao površina pravokutnika koji je upisan u I-U krivulju (sl. 3.2). Snaga je rezultat umnoška napona otvorenog kruga ( $U_{OK}$ ), struje kratkog spoja ( $I_{KS}$ ) i faktora punjenja (F). Određuje se jednačbom:

$$P_{MPP} = U_{MPP} * I_{MPP} = U_{OK} * I_{KS} * F \quad (3.6)$$

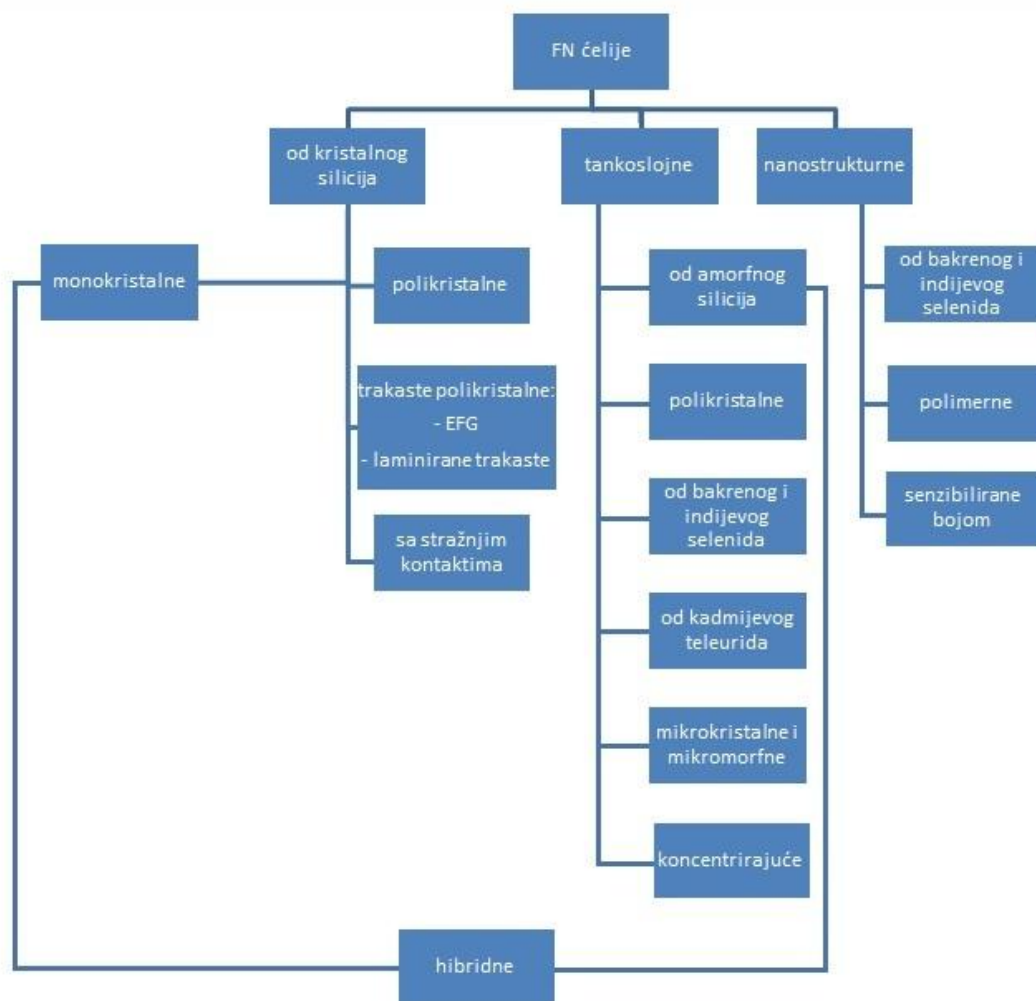
Na snagu fotonaponske ćelije velik utjecaj ima nekoliko čimbenika:

- dimenzije ćelije: ako se poveća površina ćelije, povećava se i struja kratkog spoja, napon otvorenog kruga ostaje konstantan pa se snaga povećava
- jakost Sunčevog zračenja: ako se poveća intenzitet zračenja povećat će se i struja kratkog spoja, dok se napon otvorenog kruga jako malo snizi, snaga se povećava
- temperatura: kada temperatura poraste, snižava se napon otvorenog kruga (za oprilike 2mV/K), dok struja kratkog spoja ostaje gotovo konstantna te se snaga smanjuje.

### 3.2 Vrste fotonaponskih ćelija

Postoje četiri osnovne skupine:

- ćelije od kristalnog silicija
- tankoslojne ćelije
- hibridne ćelije
- nanostrukturalne ćelije



Slika 3.3. Osnovne vrste FN ćelija s obzirom na materijal i tehnologiju proizvodnje

Danas se najčešće primjenjuju FN ćelije od monokristalnog ili polikristalnog silicija. Njihov udio na tržištu je oko 98%. Kod njih koristimo silicij visokog stupnja čistoće jer kristalna

rešetka treba biti potpuno čista. Inače bi nastajanje i kretanje slobodnih nositelja naboja (elektroni i šupljine) bilo otežano.

Tankoslojne ćelije se danas rijetko koriste zbog malog stupnja djelovanja. Očekuje se njihova ekspanzija u budućnosti. Imaju manju debljinu i mogu se savijati.

Za sustave spojene na javnu elektroenergetsku mrežu koriste se FN ćelije od monokristalnog i polikristalnog silicija.

Fotonaponske ćelije se prave od materijala kao što su monokristali, polikristali (multikristali) ili kao amorfne tvari.

Monokristalna ćelija - cijeli obujam ćelije sastoji se od jednog kristala

Polikristalne ćelije - tijekom rasta kristala na njemu se formira više kristala te se iz takvog kristala izreže pločica koja se sastoji od više kristala

Amorfne tvari – nastaju brzim hlađenjem rastaljenog materijala tako da se molekule ne stignu rekombinirati, tj. ne stignu poprimiti stabilna stanja

**Monokristalne FN silicijeve ćelije** pretvaraju  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u  $140 \text{ W}$  električne snage kada je površina ploče  $1 \text{ m}^2$ . Za njihovu proizvodnju potreban je čisti poluvodički materijal. Visok stupanj iskorištenja se dobije vađenjem monokristalnih štapića iz rastaljenog silicija te se režu u tanke pločice.

**Polikristalne FN silicijeve ćelije** pretvaraju  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u  $130 \text{ W}$  električne snage kada je površina ploče  $1 \text{ m}^2$ . Ekonomičnija je proizvodnja ovih ploča u odnosu na monokristalne. Postupak izrade je takav da se tekući silicij ulijeva u blokove te se blokovi režu u ploče. Kristalne strukture nastaju skrućivanjem materijala. Solarna fotonaponska ćelija u ovom slučaju ima manji stupanj iskorištenja jer se na granicama materijala pojavljuju greške.

**Amorfne FN silicijeve ćelije** pretvaraju  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u  $50 \text{ W}$  električne snage kada je površina ploče  $1 \text{ m}^2$ . Amorfna ili tankoslojna ćelija nastaje stavljanjem tankog filma silicija na staklo ili na neku drugu podlogu. Sloj je debljine oko  $1 \text{ }\mu\text{m}$ . Zato je proizvodnja cjenovno pristupačnija. Stupanj iskorištenja amorfni ćelija znatno je niži, ako ih usporedimo s drugim tipovima ćelija. Amorfne FN silicijeve ćelije se koriste u opremi kojoj je potrebna mala snaga (satovi).

**Galij arsenid** je poluvodič koji je napravljen iz mješavine galija (Ga) i arsena (As). Koristi se kod ploča s visokim učinkom. Debljina materijala je iznimno niska (par mikrometara), jer ima visoku apsorpciju. Ima znatno manju osjetljivost na toplinu i zračenje. Cjenovno je skuplja opcija te se koristi u svemirskim programima i u sustavima sa konstantnim zračenjem, jer se tako štedi na ćelijama.

**Galij indijum fosfidna/galij arsenid (GaInp)/GaAs** je dvoslojna ćelija i ima stupanj iskoristivosti od oko 30%. Ploče od galijeve arsenida pretvaraju  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u 300 W električne snage pri površini ploče od  $1 \text{ m}^2$ .

**Kadmij telurijev (CdTe)** ploče pretvaraju  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u 160 W električne snage pri površini ploče od  $1 \text{ m}^2$ . Kadmij telurid se sastoji od metala kadmija i polumetala telurija. Tehnologija izrade ovih ploča je cjenovno pristupačnija. Za kadmij se sumnja da je kancerogen, pa nije u široj upotrebi.

### 3.2.1 Proizvodnja solarnih ćelija

Pločice od polikristalnog silicija se dobivaju piljenjem lijevanih poluga silicija u vrlo tanke (180-350  $\mu\text{m}$ ) kriške ili pločice. Pločice su uobičajeno slabo dopirani poluvodiči p-tipa. Kako bi se dobila solarna ćelija iz pločice, potrebno je izvršiti površinsku difuziju dopanada n-tipa na prednjoj strani pločice. Tako se stvara P-N spoj koji se nalazi nekoliko stotina nanometara ispod površine. Sljedeće je primjenjivanje antirefleksijske prevlake, koja povećava količinu svjetlosti iskorištene u ćeliji. Silicij nitrid se koristi kao antirefleksijska prevlaka zbog odlične mogućnosti pasivizacije površine. Silicij nitrid sprječava rekombinaciju nosilaca naboja na površini ćelije. Kasnije se pločici dodaje metalni kontakt po njenoj stražnjoj površini te se još dodaje mrežasti metalni kontakt koji je napravljen od tankih "prstiju" i većih "sabirnica". "Prsti" i "sabirnice" se tiskaju na zaslon prednje površine primjenom srebrne paste. Tada se tiska metalna pasta na stražnji zaslon te se dobije stražnji kontakt. Pasta se grije na nekoliko stotina stupnjeva celzijusa kako bi formirala metalne elektrode. Nakon što su izrađeni metalni kontakti vrši se spajanje ćelija u seriju ili paralelu pomoću metalnih traka ili plosnatih žica.

### 3.3 Fotonaponski moduli

Solarni paneli generiraju jeftinu, “zelenu“ energiju od sunčeve svjetlosti. Solarni paneli su poznatiji i kao solarni fotonaponski sustavi (engl. Solar Photovoltaics) PV. Pomoću fotonaponskih ćelija sakupljaju energiju sunca. Fotonaponske ćelije ne trebaju direktno sunčevu svjetlost jer skupljaju određenu struju tokom oblačnih dana. Fotonaponske ćelije pretvaraju sunčevu svjetlost u struju.



Slika 3.4. Tehnički podaci o ćeliji s fotonaponske elektrane Riteh-1

P<sub>MPP</sub> – najveća snaga FN ćelije, W

(engl. power tolerance) - tolerancija snage, W

I<sub>sc</sub> - jakost struje kratkog spoja, A

V<sub>oc</sub> - napon otvorenog kruga, V

$I_{MPP}$  – najveća jakost struje (u točki najveće snage) FN ćelije, A

$V_{MPP}$  – najviši napon (u točki najveće snage) FN ćelije, V

(engl. weight) - masa

(engl. maximum system voltage) - maksimalni napon sustava

(engl. dimensions) - dimenzije

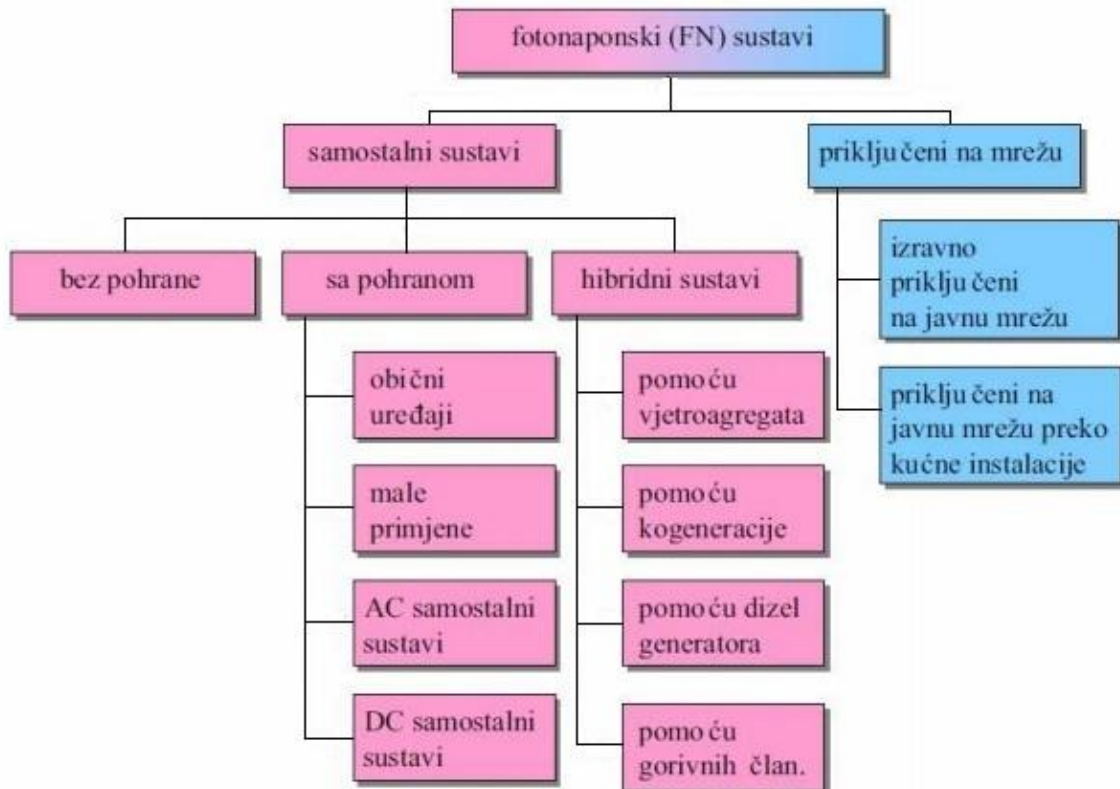
Prednosti korištenja solarnih panela:

- smanjenje računa za električnu energiju - sunčeva svjetlost je besplatna, tako da nakon što se otplate investicijski troškovi, troškovi za električnu energiju će biti smanjeni
- mogućnost predaje električne energije nazad u mrežu i njena prodaja
- primjerice tipična kućanstva sa ugrađenim solarnim panelima na krovu mogu smanjiti potrošnju ugljena za otprilike 2 tone godišnje

Kada svjetlost obasja ćeliju tada se stvara električno polje duž slojeva. Što je jača sunčeva svjetlost to je proizvedeno više električne energije odnosno struje. Grupe ćelija su montirane zajedno u panele ili module koji mogu biti primjerice na krovu ili na zemlji. Snaga ćelija solarnih fotonaponskih sustava mjeri se u  $W_p$  (Watts peak) – vršna vrijednost u W. Intenzitet svjetlosti iznosi  $1000 \text{ W/m}^2$  kada je temperatura  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  pri faktoru zračne mase od 1,5. Njihovo održavanje je prilično jednostavno. Potrebno je paziti da su paneli relativno čisti te da im drveća ne prave sjenu.

Efikasnost solarnih ćelija je od 10 - 20%, ovisno od kojeg su materijala napravljene. Koriste se kao samostalni ili kao dodatni izvor energije. Sateliti, kalkulatori, cestovni znakovi i udaljeni objekti koriste solarne ćelije kao samostalni izvor energije. Doduše najučinkovitiju solarnu energiju će dobiti solarne postaje u svemiru, jer su najbliže suncu.

Na slici 3.5. prikazana je podjela fotonaponskih ćelija.



Slika 3.5. Podjela fotonaponskih sustava

### 3.3.1 Povezivanje modula

Povezivanje modula izvodi se na dva načina: serijski i paralelno.

Serijskim spajanjem napon se povećava proporcionalno s povećanjem površine. Naizmjenično se spajaju (+) i (-) polovi modula u nizu.

Paralelnim spajanjem se jakost struje povećava proporcionalno s povećanjem površine. Svi (+) polovi se spajaju na isti vodič, isti postupak je i za (-) vodiče.





*Slika 3.6. Priključna kutija fotonaponskih modula*

Panely se međusobno spajaju putem konektora koji se nalaze na kraju kabela koji su spojeni na priključnu kutiju.

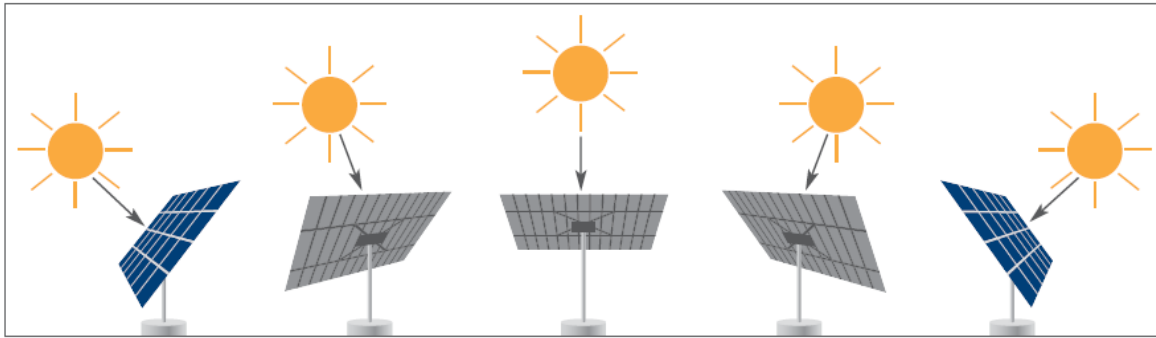
#### 4. FOTONAPONSKA ELEKTRANA RITEH-1

Riteh-1 je prva riječka fotonaponska elektrana s pomičnim sustavom koji omogućava praćenje kretanja Sunca i optimalnu iskoristivost, slika 4.1. Instalirana snaga elektrane je 3,5 kW. Predviđena godišnja proizvodnja električne energije procijenjena je temeljem računalne simulacije na 4700 kWh. Snaga vlastite potrošnje elektrane u prosjeku iznosi 0,1 kW. FNE je spojena paralelno sa niskonaponskom distributivnom mrežom i priključena je na napon 230V.



*Slika 4.1. FNE Riteh-1*

Ova je elektrana jedinstvena na našem području po tome što je opremljena sustavom koji fotonaponske ploče zakreće prema kretanju Sunca, čime je učinkovitost u odnosu na uobičajene, fiksne sustave, povećana za oko 30 – 40%, slika 4.2.



*Slika 4.2. Fotonaponski sustav s dvoosnim praćenjem Sunca*

Površina modula iznosi  $25,00 \text{ m}^2$ , strane su duljine 5 m, kut rotacije istok-zapad iznosi  $300^\circ$ , a rotirajući kut elevacije iznosi  $20^\circ\text{-}90^\circ$ .

Sustav posjeduje senzore sunčeve svjetlosti (dvije male piramide) pomoću kojih se prati smjer iz kojega dopire najviše ukupnog zračenja te se fotonaponski paneli okreću prema tom smjeru, slika 4.3.



*Slika 4.3. Fotonaponski sustav s dvoosnim praćenjem Sunca*



*Slika 4.4. Mjesto priključenja kabela*

Na slici 4.4. se vide upravljački kabeli spojeni na kutiju s automatikom. Prikazani kabeli omogućuju vezu sa sensorima te upravljanje s aktuatorima za pozicioniranje panela.

Anemometar je mjerni instrument za mjerenje jačine vjetera i brzinu strujanja zraka te služi za zaštitu elektrane od mehaničkog oštećenja, spuštanjem panela u horizontalni položaj, slika 4.5.



*Slika 4.5. Anemometar*

Konstrukcija elektrane je dizajnirana da izdrži opterećenje vjetrom, za raspon brzina vjetra 102-300 km/h. Elektrana je napravljena da podnese temperaturu u raponu od -20°C do +55°C, a razina buke je do 40 dB(A) na udaljenosti do 10 m.

## 4.1 Komponente fotonaponske elektrane

### 4.1.1 Generatorski blok

Generatorski blok se sastoji od fotonaponskih panela povezanih u seriju.



*Slika 4.6. 15 panela spojenih u seriju*

Odabran je fotonaponski panel:

Proizvođač

SOLVIS

Tip

SV 60- 235 Wp

Fotonaponski moduli montiraju se na aluminijsku konstrukciju, koja pomoću sustava aktuatora omogućuje dvoosno praćenje Sunca. Aluminijska konstrukcija je pričvršćena za čelični nosivi stup fiksiran u kvadratičnom betonskom temelju.

#### 4.1.2 Izmjenjivački blok

Ugrađen je izmjenjivač odgovarajuće snage za pretvaranje istosmjerne u izmjeničnu struju.

Izmjenjivački blok se sastoji od jednog izmjenjivača (invertera) Solplus SP50 koji je montiran na nosivi stup FN elektrane, sa sljedećim tehničkim podacima:

##### ULAZNI PODACI:

DC maksimalna snaga $P_{DC}$ ,		6,0 kW
Maximalna ulazna struja	$I_{dc\ max}$	16,2 A
Minimalni ulazni napon	$U_{dc\ min}$	380 V
Maksimalni ulazni napon	$U_{dc\ max}$	850 V
MPP radno područje	$U_{min} - U_{max}$	345-750 V

##### IZLAZNI PODACI:

AC nominalna izlazna snaga $P_{ac}$ , $\cos\varphi=1$		4,6	kW
Maximalna izlazna snaga		5,0	kW
Maksimalna izlazna struja	$I_{ac\ max}$	21,7	A
Priključak na mrežu		1 NPE 230	V
Frekvencija		50	Hz
Područje frekvencije		49.8-50.2	Hz
Harmoničko izobličenje		< 3%	
Faktor snage	$\cos\varphi$	>0,99	ind
Noćna potrošnja		0,01	W

U izmjenjivaču su ugrađene sljedeće zaštitne funkcije pri kojima se automatski odvaja od distributivne mreže ukoliko nastupi sljedeće:

- previsoki ili preniski napon mreže 196 – 253 V vrijeme isklopa 0,1 sec
- previsoka ili preniska frekvencija mreže, 49,8 - 50,2 Hz

- vrijednost impedancije mreže, izmjenivač ne predaje energiju u mrežu ukoliko je impedancija mreže ( $Z_{ac}$ ) veća od postavljene (vrijednost impedancije mreže se može regulirati), vrijeme isklopa 5 sec
- ispad jedne faze mrežnog napona na koju je izmjenivač priključen,
- diferencijalna zaštita DC struje 30 mA
- diferencijalna zaštita AC struje 30 mA



*Slika 4.7. Izmjenjivač Solplus SP50*

#### 4.1.3 Razvodni ormar RO-FN

Razvodni ormar RO-FN je smješten uz zaštitnu ogradu postrojenja (sl. 4.8). U razvodnom ormaru nalazi se dovod s izmjenjivača koji je zaštićen automatskim osiguračem. Razvodni ormar je priključen na obračunsko-mjerno mjesto, u samostojećem razvodnom ormaru naslonjenog „leđima“ na RO-FN. Razvodni ormar opremljen je strujnom zaštitnom sklopkom nazivne struje greške 300 mA tip A, automatskim osiguračem, dvopolnom sklopkom-osigurač s kratkospojnicima i odvodnicima prenapona (sl. 4.9).



*Slika 4.8. Razvodni ormar RO-FN*



*Slika 4.9. Razvodni ormar elektrane sa sklopnom, zaštitnom, regulacijskom i komunikacijskom opremom*

Na sljedećoj stranici prikazana je strujna shema razdjelnika (sl 4.10.).





#### 4.1.4 Obračunsko mjerno mjesto

U sklopu obračunskog mjernog mjesta ugrađeno je elektroničko brojilo sljedećih karakteristika: monofazno, dvosmjerno, intervalno, izravno mjerenje energije, mjerenje vršne snage, daljinsko očitavanje. Mjerno mjesto je opremljeno sa GSM komunikatorom za daljinsko očitavanje brojila.

Korisnik mreže: fotonaponska elektrana

Kategorija: Proizvodnja-NN, povlašteni proizvođač, 3,5 kW,

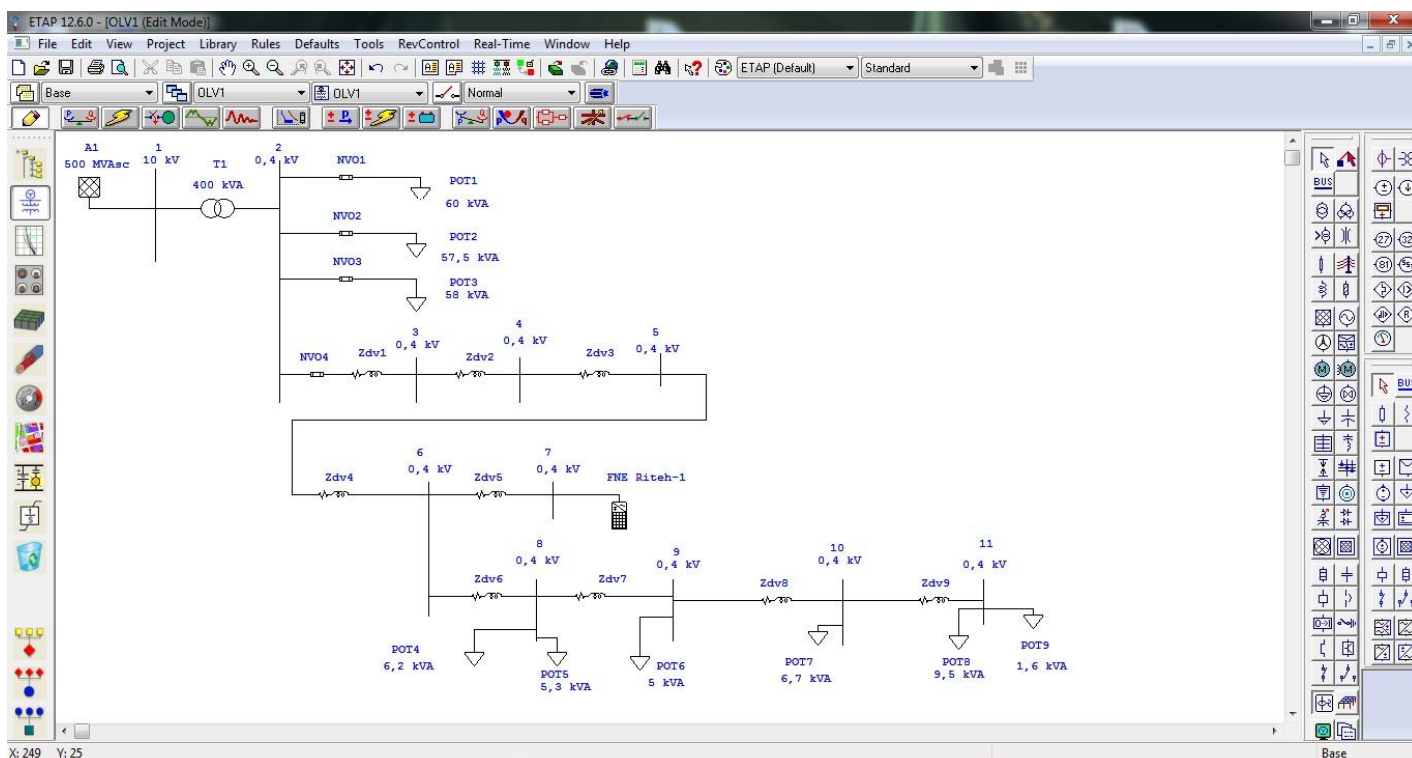
Potrošnja NN, vlastita potrošnja elektrane, 0,02 kW.



*Slika 4.11. Obračunsko mjerno mjesto s brojilom*

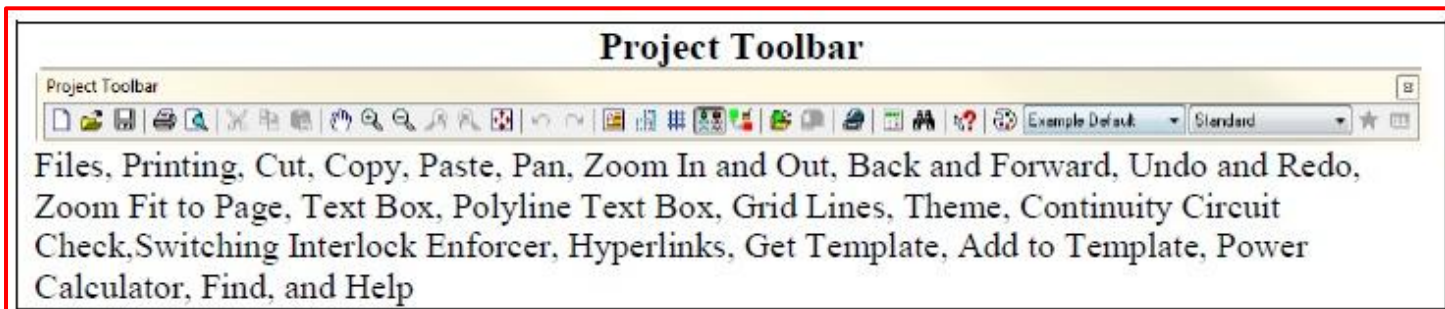
## 5. RAČUNALNI PROGRAM ZA ANALIZU ELEKTROENERGETSKIH MREŽA - ETAP

Etap je jedno od najopsežnijih rješenja za projektiranje, simulaciju i analizu u prijenosu, distribuciji, proizvodnji i industrijskim energetske sustavima. Računalni program ETAP sadrži sve potrebne alate i podršku za modeliranje i analizu elektroenergetskog sustava. Projekti se izrađuju na način da se u grafičko sučelje umeću elementi iz baze električnih komponenti te se međusobno povezuju. ETAP omogućuje provođenje različitih tipova simulacija i proračuna, od kojih su neki: modul za proračun istosmjernih mreža; modul za proračun izmjeničnih mreža, proračun kabelskih kanala, proračun uzemljenja mreže, GIS (engl. Geographis information system) – geografski informacijski sustav, izbor i koordinacija zaštitnih uređaja, izrada istosmjernih i izmjeničnih upravljačkih sustava. Na slici 5.1, s desne strane, vidimo neke od dostupnih elemenata - energetske komponente: poput transformatora, generatora, nadzemnih vodova, itd. te zaštitne i regulacijske elemente te mjerne instrumente.



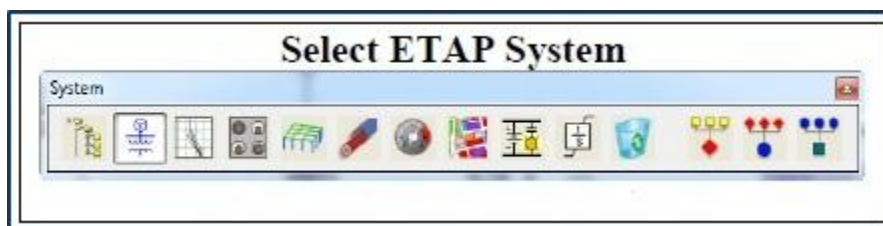
Slika 5.1. Korisničko sučelje programa Etap

Slika 5.2. prikazuje alatnu traku, koja se sastoji od različitih ikona, a neke od ikona su: dokumenti, printati, rezati, kopirati i sl.



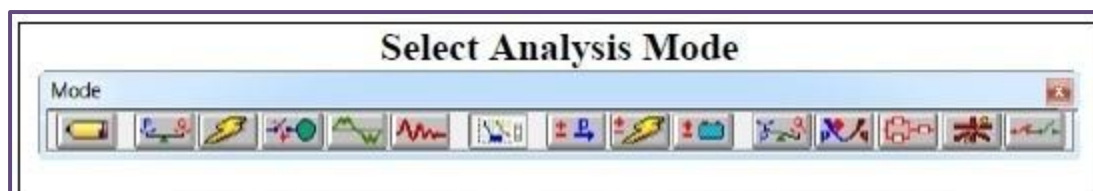
Slika 5.2. Alatna traka

Sa slike 5.3. neke od korištenih ikona su: druga ikona s lijeve strane (engl. One-Line Diagrams) - mrežni sustav i četvrta ikona s desne strane (engl. System Dumpster) - koš. Koš se sastoji od elemenata koji su izbrisani ili kopirani. Kada se pojedini element "izreže" iz mreže, on je automatski prenesen u koš. ETAP zadržava sve elemente u košu dok ih se ne obriše iz koša.



Slika 5.3. Odabir sustava

Na slici 5.4. prva ikona s lijeve strane nosi ime (engl. Edit) – uredi, kada se klikne na nju može se kreirati mreža, u nju dodavati elemente, brisati elemente, mijenjati nazive elemenata te im mijenjati vrijednosti. Druga ikona s lijeve strane pokreće (engl. Load Flow Analysis) – proračun tokova snaga, a klikom na nju, može se podešavati razne parametre proračuna kako



bi se dobio željeni prikaz rezultata nakon provedene analize mreže.

Slika 5.4. Metode analize

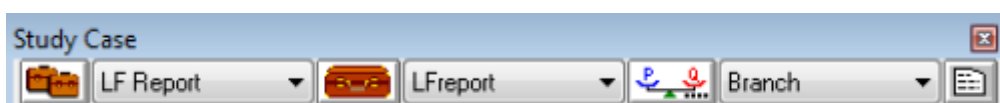
Izborom tipa analize omogućena je izrada i mijenjanje scenarija analize, sama analiza, pregled alarmnih stanja i upozorenja te izrada izlaznih izvješća.

Na primjer, na sljedećoj slici je vidljiva alatna traka proračuna tokova snaga – (engl. Load Flow). Prva ikona se zove Load Flow, čijim klikom se pokreće proračun tokova snaga za modelirani sustav. Druga ikona se zove (engl. Auto-Run Load Flow) – i omogućuje automatsko pokretanje tokova snaga, nakon što se promijeni neka od vrijednosti u mreži.



Slika 5.5. Alatna traka proračuna tokova snaga

Dodatak metodi analize je (eng. Study Case) tzv. istraživački slučaj, koji omogućuje mijenjanje parametara mreže i izlaznih izvještaja. Za svaku analizu mreže može se imati poseban istraživački slučaj.

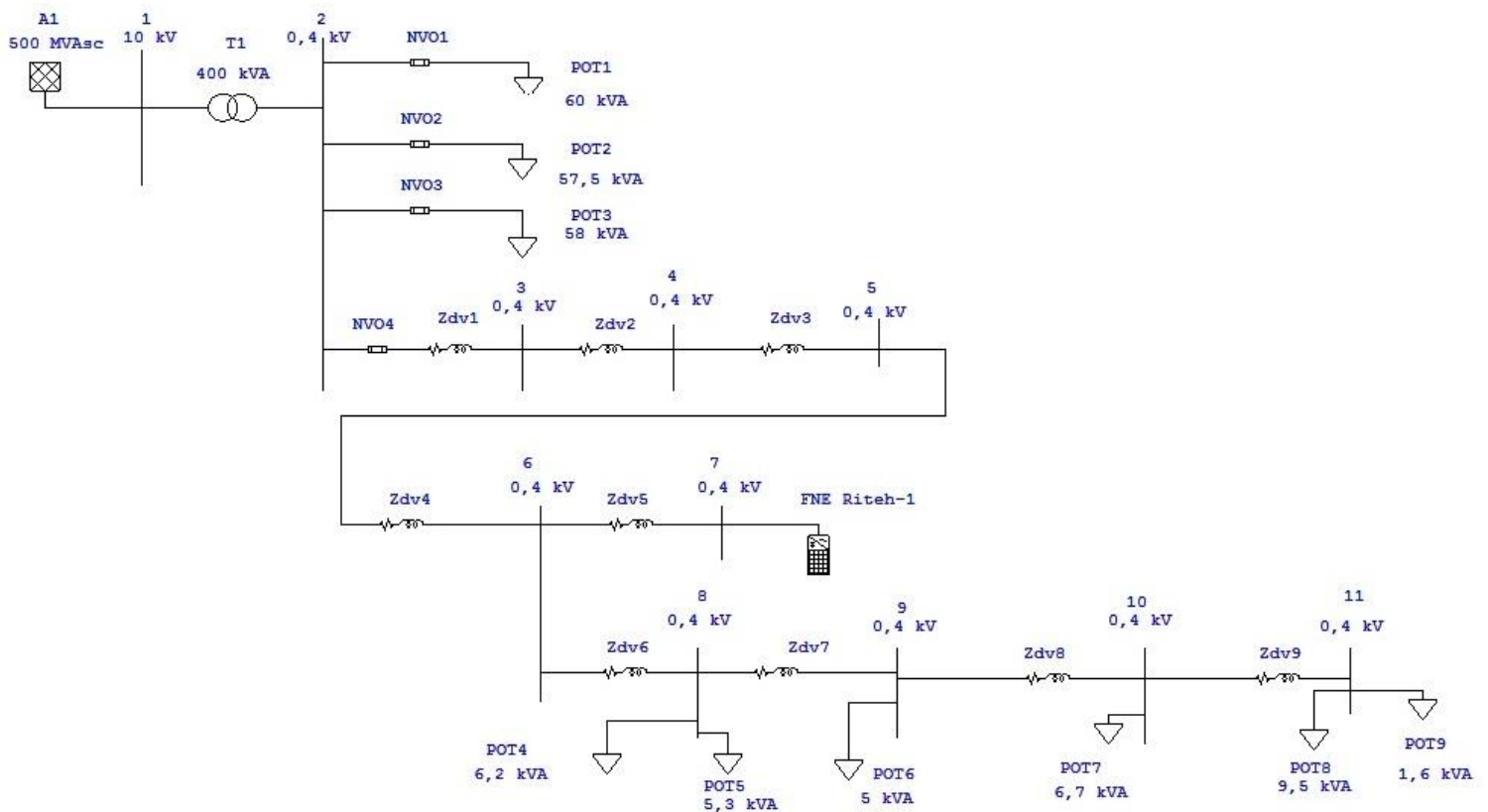


Slika 5.6. Istraživački slučaj

Elementi se ubacuju u mrežu tako da se mišem klikne na element te se drži lijevi klik miša i element povlači na radnu pozadinu. Elementi se povezuju tako da se pomakne pokazivač miša na početak jednog elementa i klikne se mišem te potom ETAP sam crta liniju koju se spaja na kraj drugog elementa. Dvostrukim klikom moguće je mijenjati vrijednosti elemenata.

## 6. ANALIZA STRUJNO-NAPONSKIH PRILIKA U OKOLNOJ MREŽI DISTRIBUIRANOG IZVORA POMOĆU RAČUNALNOG ALATA ETAP

Na slici 6.1. prikazana je niskonaponska distributivna mreža i FNE Riteh-1, a u nastavku su objašnjeni dijelovi mreže.



Slika 6.1. Niskonaponska distributivna mreža i FNE Riteh-1

Dakle, slika 6.1. prikazuje ekvivalent SN mreže (A1) i sabirnicu (1) na višenaponskoj strani transformatora (T1) nazivnog napona 10 kV. Transformator zatim transformira napon na sekundarnoj strani na 0,4 kV. Nadalje, ostale sabirnice u mreži priključene su na nazivni napon 0,4 kV. Na sabirnicu (2) priključene su četiri grane koje štite NVO osigurači. Na krajevima prvih triju grana nalaze se potrošači (POT1, POT2, POT3), koji u naravi predstavljaju agregirano opterećenje na trima NN izvodima.

U četvrtoj grani, također šticeenom NVO osiguračem, nalazi se prva kabelska dionica (Zdv1) koja je spojena na sabirnicu (3). Sa sabirnice (3) nastavlja se dionica (Zdv2) koja je spojena na sabirnicu (4). Nadalje sabirnica (4) je priključena na dionicu (Zdv3), dionica (Zdv3) je priključena na sabirnicu (5). Sabirnica (5) je spojena na dionicu (Zdv4) koja je priključena na sabirnicu (6). Na sabirnici (6) mreža se dijeli na dva dijela, jedan dio je spojen preko dionice (Zdv5) prema sabirnici (7) koja je koja je u naravi mjesto priključenja izmjenjivača (Solplus SP50) tj. FNE Riteh-1. Drugi dio se sastoji od dionica (Zdv6, Zdv7, Zdv8 i Zdv9) na koje su priključena obližnja kućanstva (POT4, POT5, POT6, POT7, POT8 i POT9) preko sabirnica (8, 9, 10 i 11).

Na niskonaponsku distributivnu mrežu priključena je FNE Riteh-1. Pri izvođenju proračuna neki od korištenih podataka su prikazani u tablicama 6.1. i 6.2. Na mrežu je priključen transformator nazivne snage 400 kVA (tablica 6.1.), spoja Dyn5 (višenaponski namot spojen je u trokut, a niženaponski namot spojen je u zvijezdu i zaostaje za višenaponskim namotom za 150°). Također u tablici 6.1. prikazani su otpor transformatora (Rdt) i reaktancija transformatora (Xdt).

*Tablica 6.1. Impedancija transformatora*

<b>Sn (kVA)</b>	<b>Spoj</b>	<b>Rdt (<math>\Omega</math>/fazi)</b>	<b>Xdt (<math>\Omega</math>/fazi)</b>
400	Dyn5	0,00508	0,0152

Kabelski vodovi su prikazani u tablici 6.2., radni otpori vodiča označeni su oznakom Rdv, a reaktancije vodiča prikazane su oznakom Xdv. U nastavku rada prikazani su i opisani napravljeni proračuni (proračuni tokovi snaga i kratkog spoja).



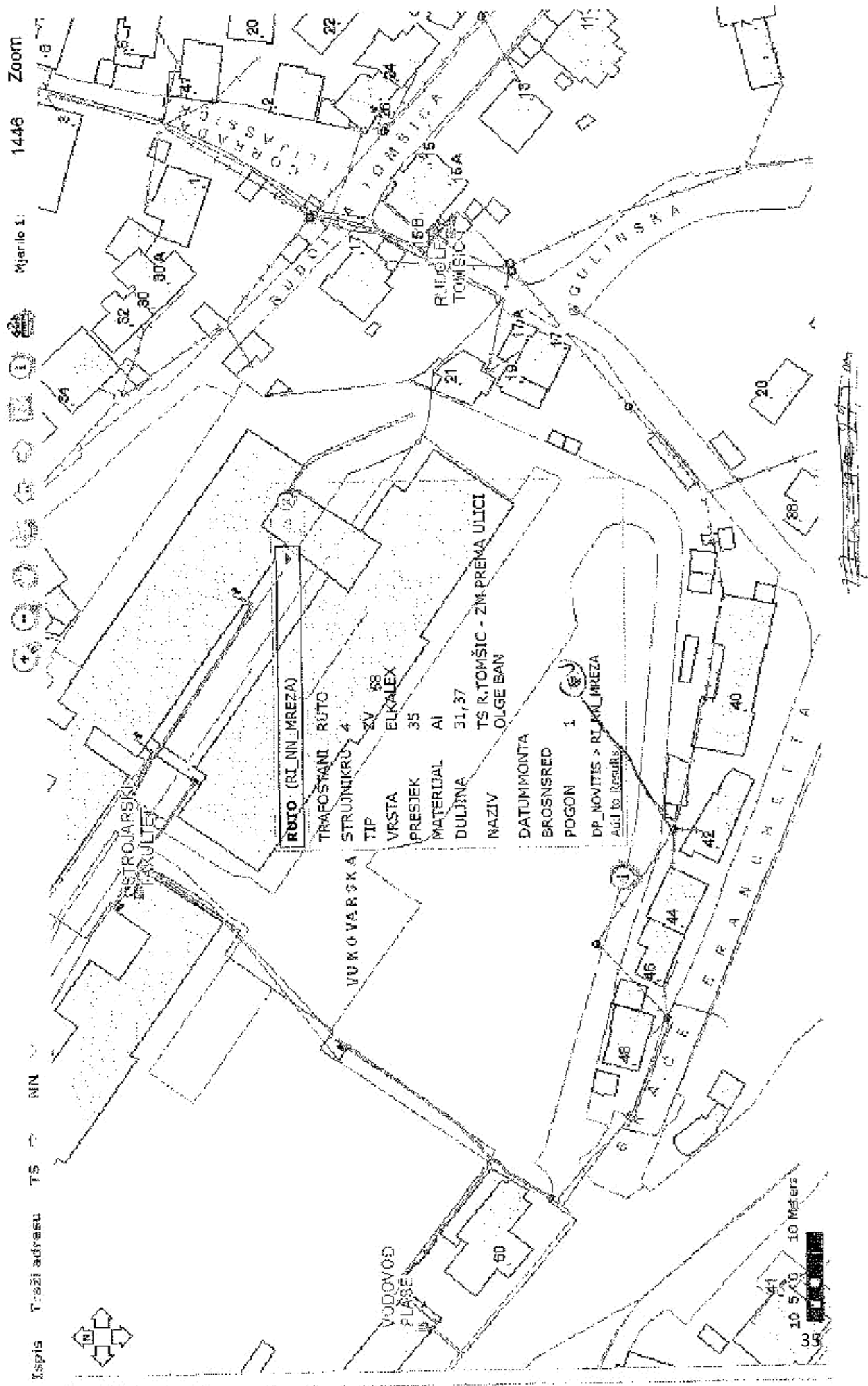
Tablica 6.2. Karakteristike NN vodova

Dionica	Vodič	Rdv ( $\Omega/\text{km}$ )	Xdv ( $\Omega/\text{km}$ )	duljina (km)
<b>1</b>	PP 41, PP 41-A 4 x 70 mm <sup>2</sup>	0,32	0,10	0,031
<b>2</b>	FR-N1XD9-AR 3 x 70 + 71,5 mm <sup>2</sup>	0,50	0,08	0,066
<b>3</b>	FR-N1XD9-AR 3 x 35 + 71,5 mm <sup>2</sup>	0,97	0,08	0,08
<b>4</b>	FR-N1XD4-AR 4 x 16 mm <sup>2</sup>	2,14	0,09	0,038
<b>5</b>	NYN, NAYN 4 x 25 mm <sup>2</sup>	1,44	0,08	0,015

Na sljedećoj stranici prikaza je FN elektrana Riteh-1 i dijelovi NN mreže s koje se napajaju kućanstva (potrošači) koji su korišteni u narednim proračunima.

Slika 6.2. Geoinformacijski sustav DP Elektroprimorje Rijeka

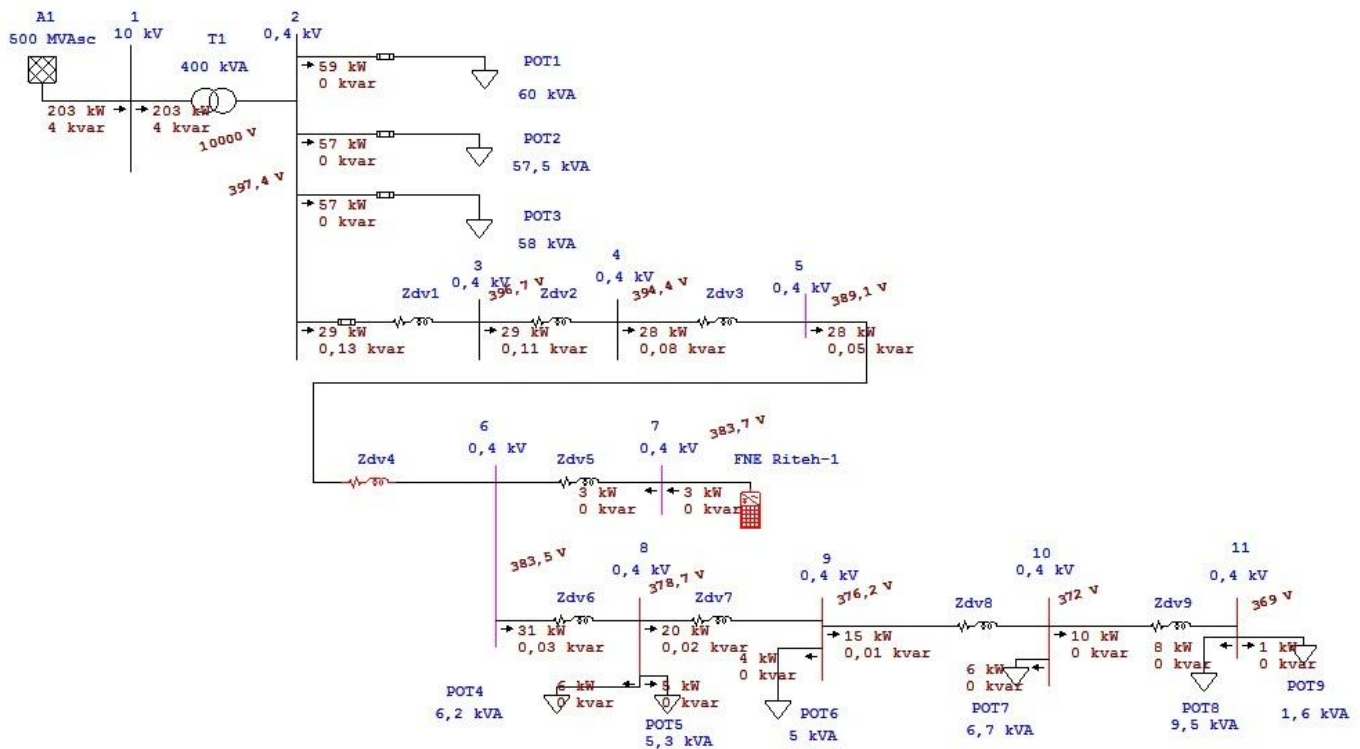
Geoinformacijski sustav DP Elektroprimorje Rijeka



## 6.1 Proračuni s trofaznim priključkom FNE Riteh-1

### 6.1.1 Tokovi snaga

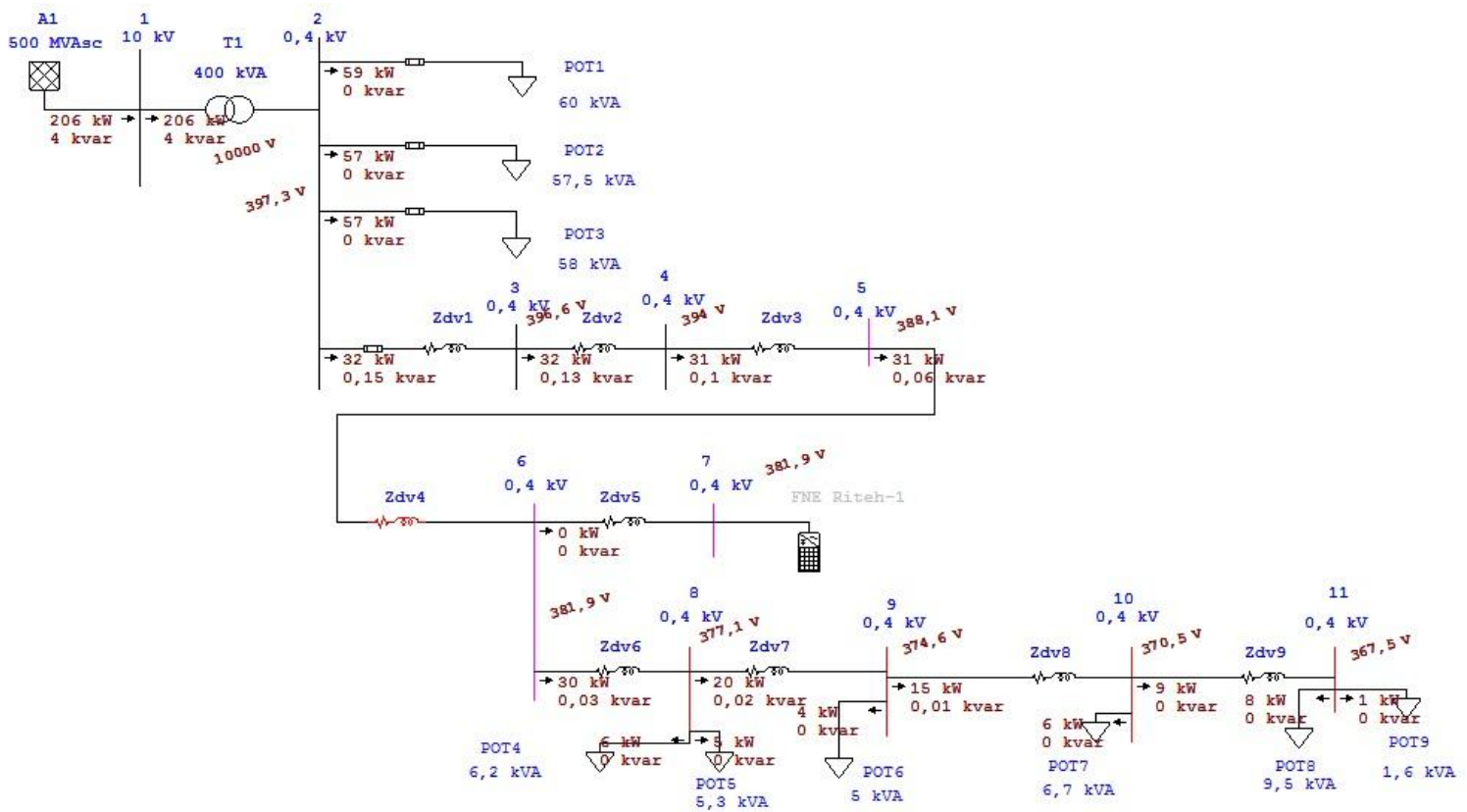
Na slici 6.3. prikazana je niskonaponska mreža modelirana u računalnom alatu Etap.



Slika 6.3. Proračun tokova snaga

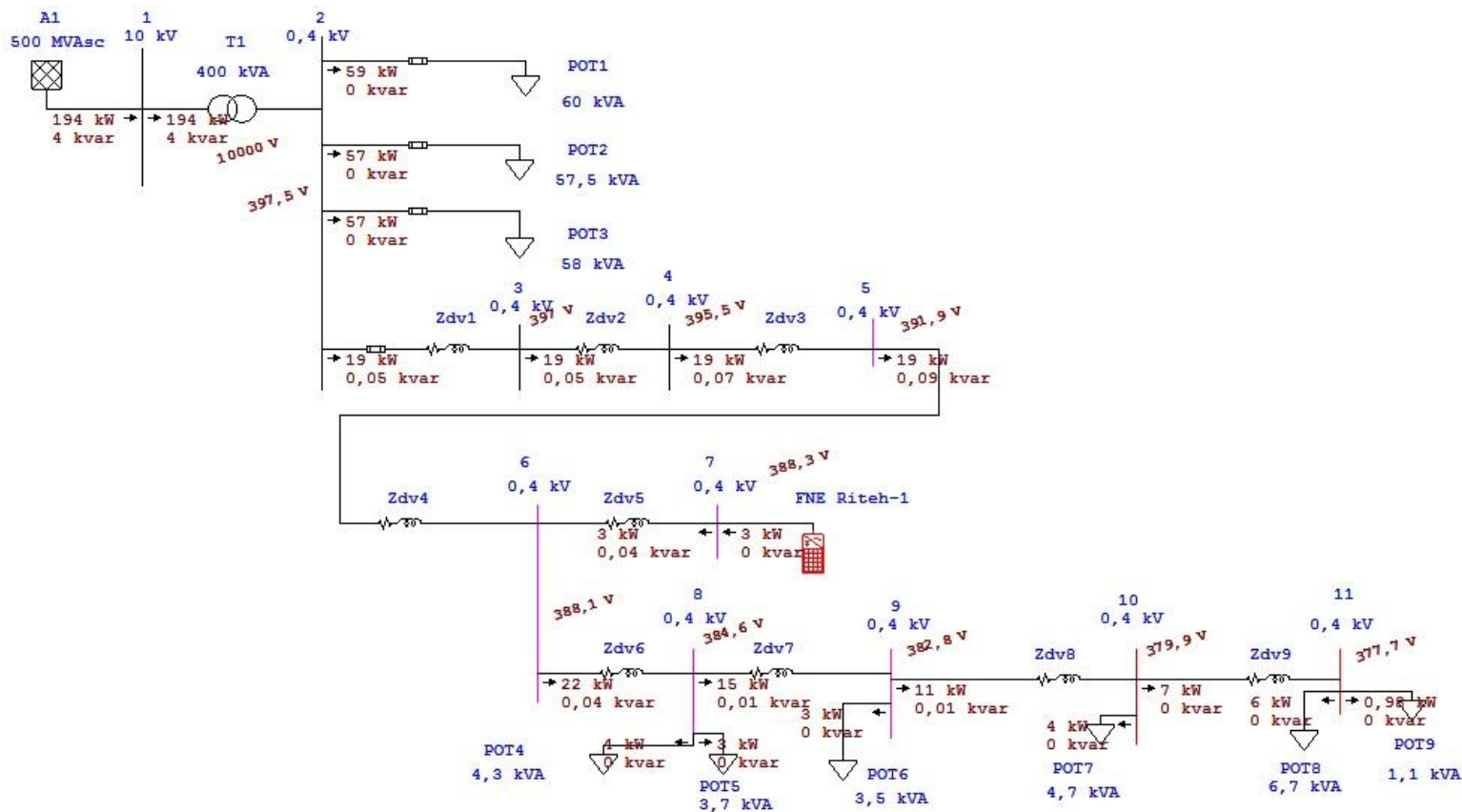
Primjetimo da napon u mreži padne za 4,075% dok se približavamo FNE Riteh-1. Padovi napona za ovakve konstrukcije NN mreža su uobičajeni od 5-10%. Napon na sabirnici (7) iznosi 383,7 V. Nadalje do potrošača (POT9) napon padne za dodatnih 3,675% i na kraju mreže napon na sabirnici (11) iznosi 369 V. FNE proizvodi snagu od približno 3 kW.

Kada je FNE Riteh-1 u pogonu, aktivna mreža (A1) predaje 203 kW snage u ostatak mreže (sl 6.3), a kada je FNE Riteh-1 van pogona (sl 6.4.) snaga je veća za 3 kW.



Slika 6.4. Proračun tokova snaga sa isključenom elektranom

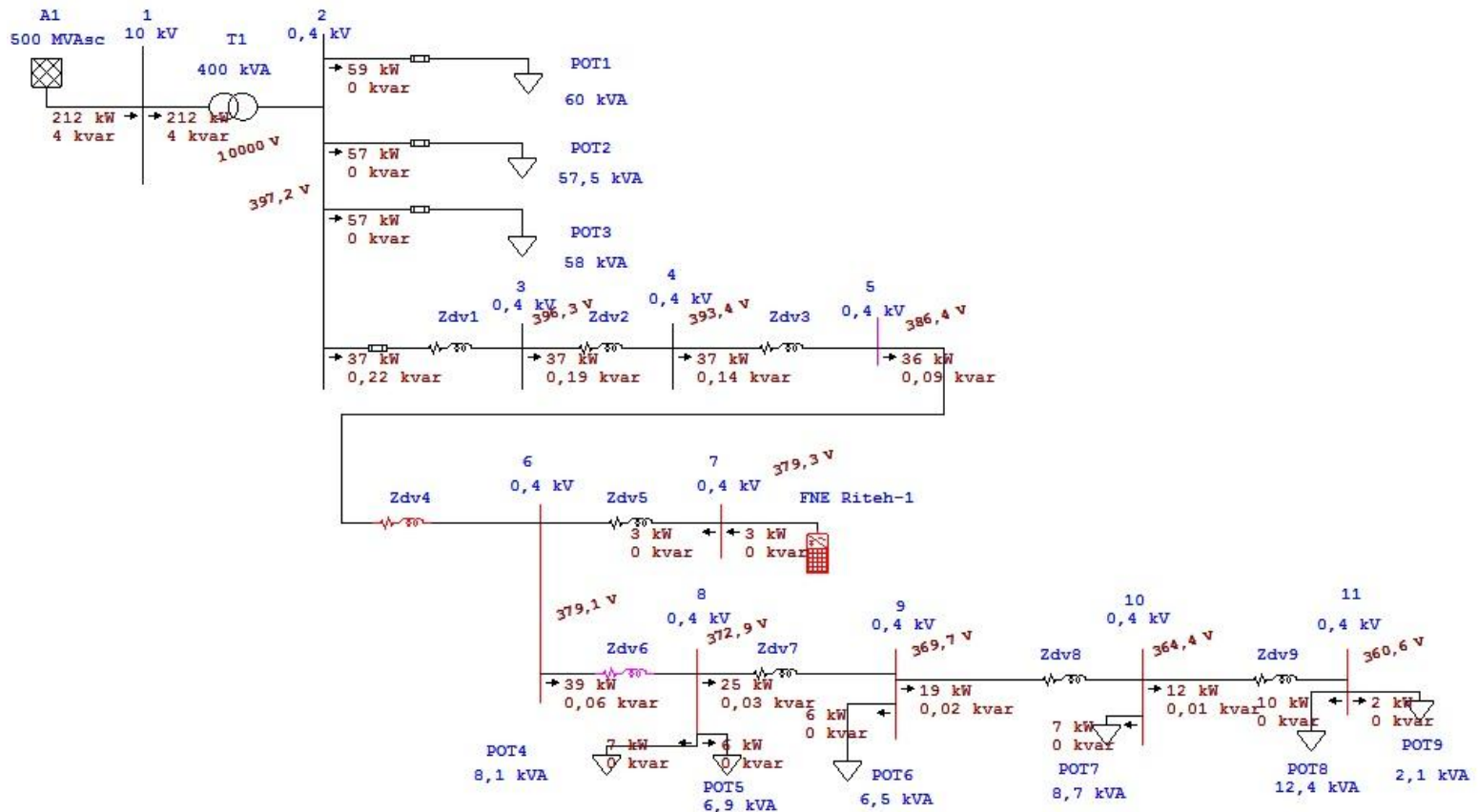
Ako se isključi elektrana, padovi napona u mreži neznatno se promijene.



Slika 6.5. Proračun tokova snaga ljeti

Može se primjetiti da napon u mreži padne za 2,925% kako se približavamo FNE Riteh-1, zatim da je napon na istoj sabirnici (7) na slici 6.3. pao za 4,075% kako se približavamo FNE Riteh-1. Kada je smanjena potrošnja potrošača (POT4, POT5, POT6, POT7, POT8 I POT9) tj. potrošnja kuća, padovi napona su manji za 1,15% na sabirnici (7).

Napon na sabirnici (7) iznosi 388,3 V (što je 4,6 V više nego na slici 6.3.). Nadalje, do potrošača (POT9) napon padne za dodatnih 2,65% tj. za 10,6 V i na kraju mreže napon na sabirnici (11) iznosi 377,7 V.



Slika 6.6. Proračun tokova snaga zimi

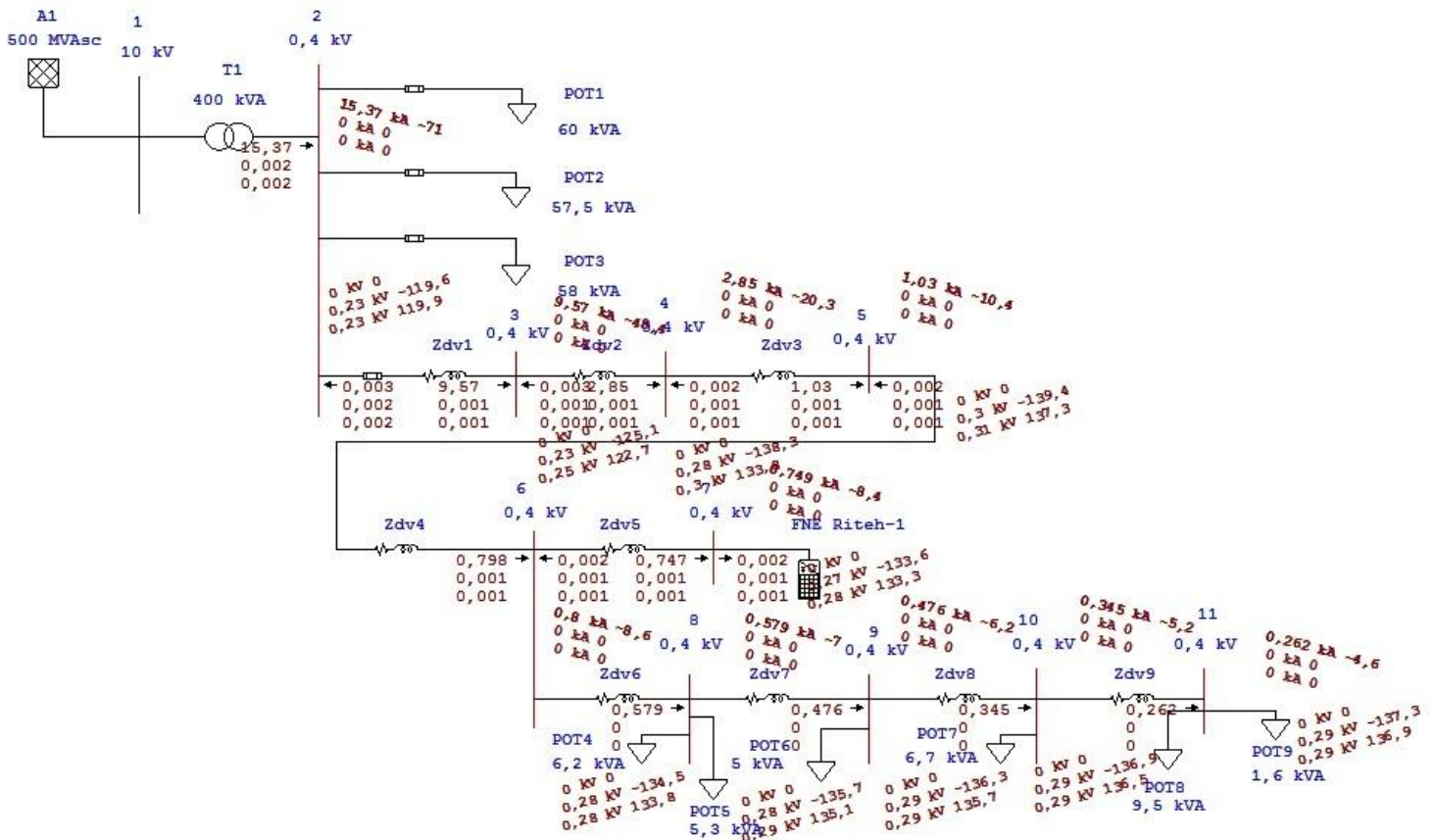
Primjetimo da napon u mreži padne za 5,175% (za 20,7 V) i iznosi 379,3 V kako se približavamo FNE Riteh-1, zatim da je napon na istoj sabirnici (7) na slici 6.5. ljeti iznosio 388,3 V. Razlika je otprilike oko 2,25% (ljet-zima). Kada je povećana potrošnja potrošača u usporedbi s potrošnjom ljeti (POT4, POT5, POT6, POT7, POT8 i POT9) tj. potrošnja kućanstava, padovi napona su veći za 2,25% na sabirnici (7).

Napon na sabirnici (7) iznosi 379,3 V. Nadalje do potrošača (POT9) napon padne za dodatnih 4,675% i na kraju mreže napon na sabirnici (11) iznosi 360,6 V.

## 6.1.2 Jednopolni kratki spoj

Proračuni su izvedeni za sve sabirnice osim sabirnice 1, s naglaskom na sabirnicu 7, na koju je priključena FNE Riteh-1.

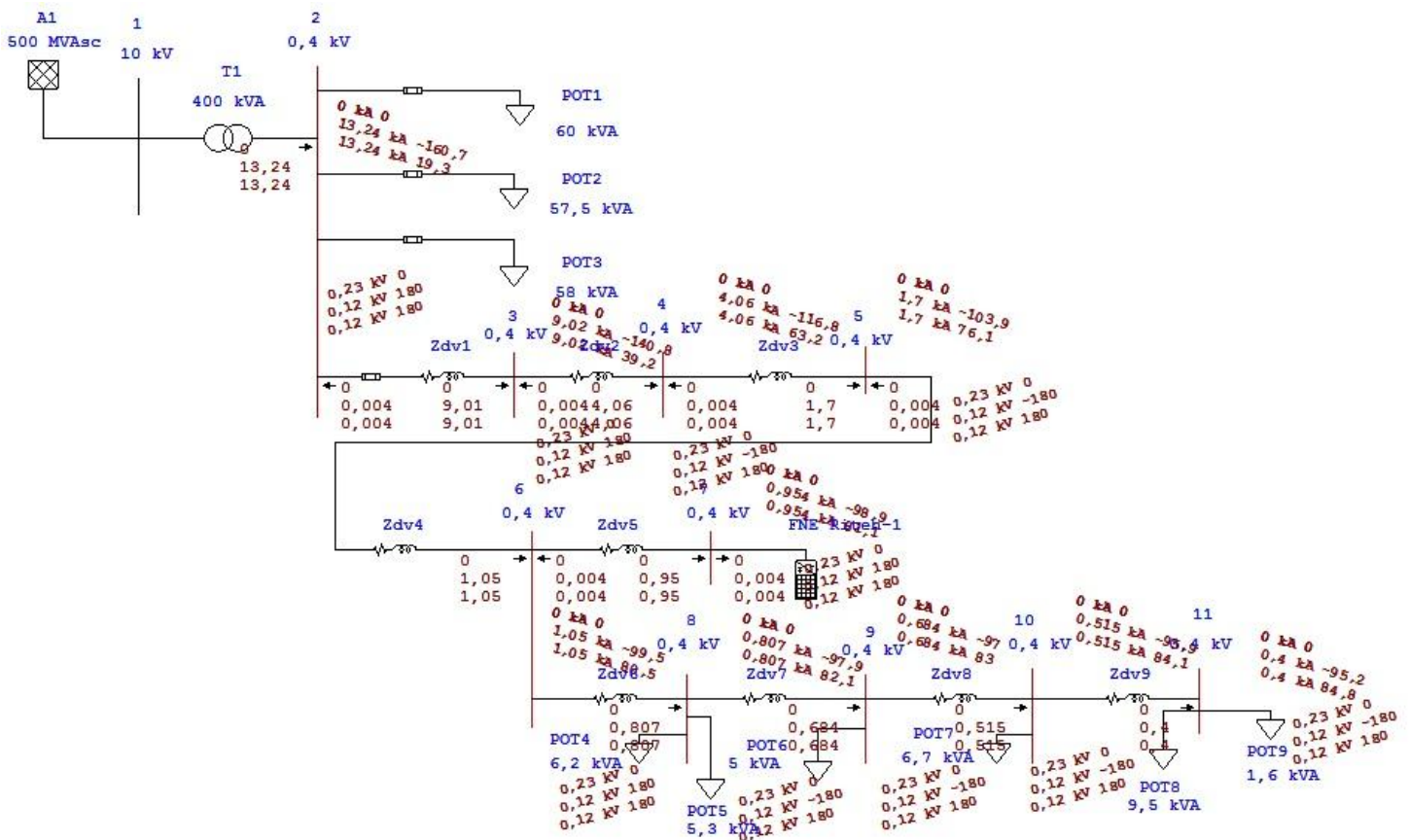
Struja jednopolnog kratkog spoja na mjestu priključenja elektrane na sabirnici (7) iznosi 0,749 kA. Struja 1pKS-a ima najveću vrijednost (15,37 kA) na sabirnici (2), a najmanju na kraju mreže tj. na sabirnici (11) koja iznosi 0,262 kA.



Slika 6.7. Proračun jednopolnog kratkog spoja

### 6.1.3 Dvopolni kratki spoj

Struje dvopolnog kratkog spoja na mjestu priključenja elektrane na sabirnici (7) iznose 0,954 kA i 0,954 kA, njihov zbroj daje struju iznosa 1,885 kA. Struja 2pKS-a je većeg iznosa u odnosu na struju 1pKS-a. Struja 2pKS-a ima najveću vrijednost (13,24 kA) na sabirnici (2), a najmanju na kraju mreže tj. na sabirnici (11) koja iznosi 0,4 kA i 0,4 kA. Struja na sabirnici (11) iznosi 796,71A.

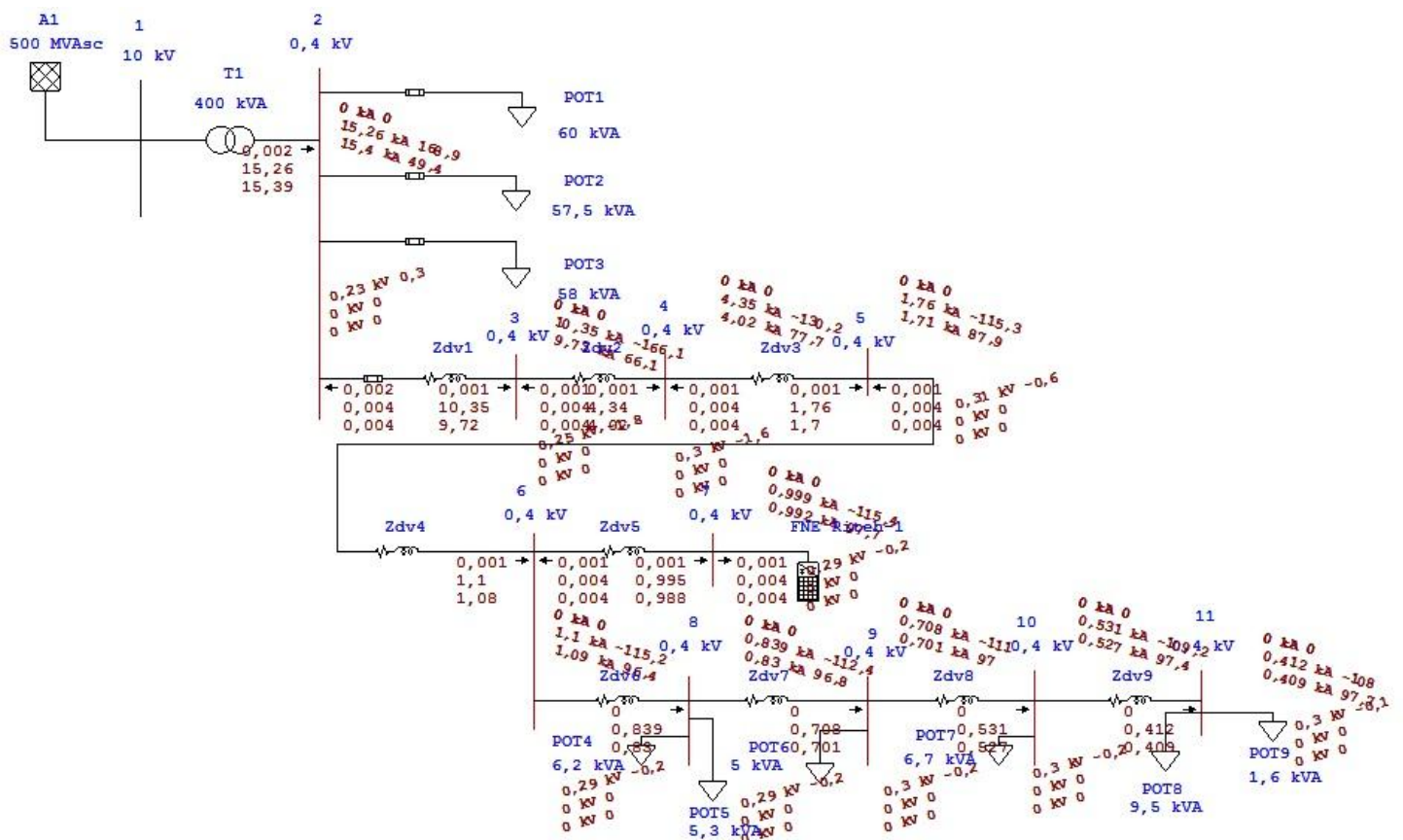


Slika 6.8. Proračun dvopolnog kratkog spoja



## 6.1.4 Dvopolni kratki spoj sa zemljom

Struje dvopolnog kratkog spoja sa zemljom na mjestu priključenja elektrane na sabirnici (7) iznose 0,999 kA i 0,992 kA, njihov zbroj daje nam struju iznosa 1,967 kA. Struja 2pKS-a sa zemljom je većeg iznosa u odnosu na struju 2pKS-a. Struja 2pKS-a sa zemljom ima najveću vrijednost (15,4 kA) na sabirnici (2), a najmanju na kraju mreže tj. na sabirnici (11) koja iznosi 0,409 kA.



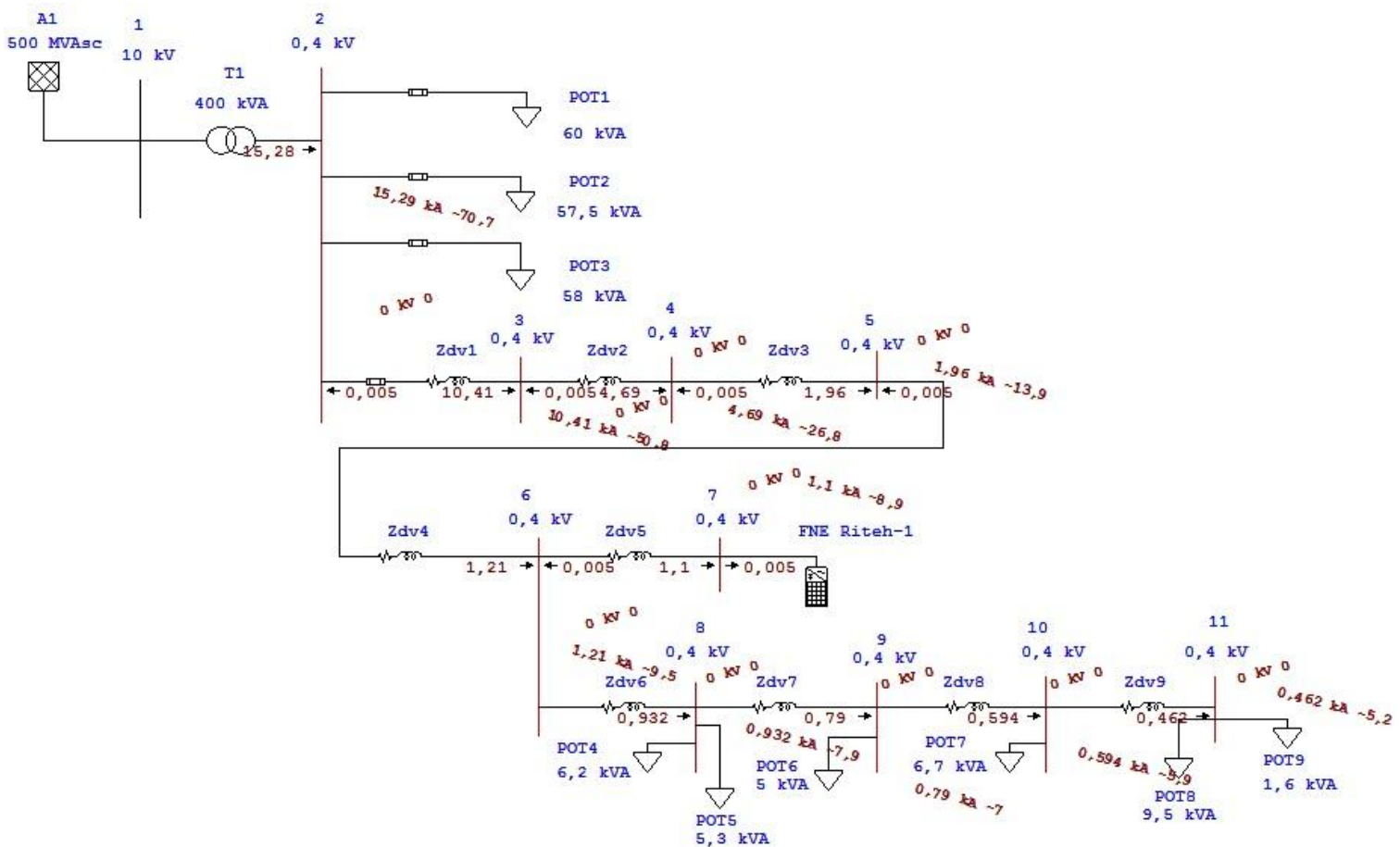
Slika 6.9. Proračun dvopolnog kratkog spoja sa zemljom

### 6.1.5 Tropolni kratki spoj

Struja trofaznog kratkog spoja na mjestu priključenja elektrane na sabirnici (7) iznosi 1,1 kA. Struja 3pKS-a ima najveću vrijednost (15,29 kA) na sabirnici (2), a najmanju na kraju mreže tj. na sabirnici (11), koja iznosi 0,462 kA.

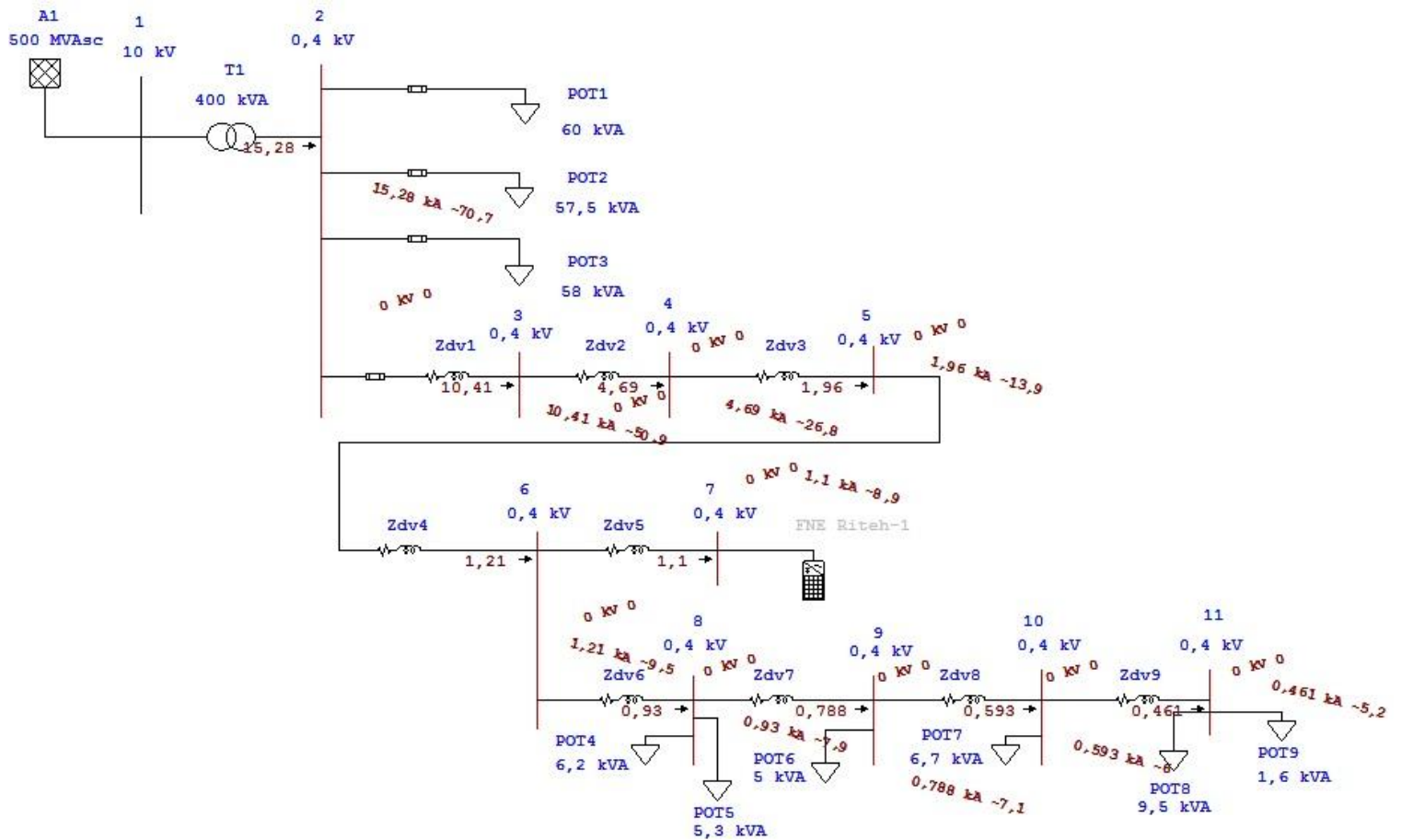
FNE Riteh-1 pridonosi struji trofaznog kratkog spoja u iznosu od 5 A, koja teče prema mjestu kvara tj. prema sabirnicama na kojima se dogodio kratki spoj (sabirnice 2, 3, 4, 5 i 6).

Prilikom izvođenja proračuna za 1pKS, 2pKS, 2pKS sa zemljom i 3pKS može se primijetiti da se najveća struja dobiva kada se simulira 3pKS.



Slika 6.10. Proračun trofaznog KS-a

U nastavku je prikazan proračun kada je FNE Riteh-1 isključena iz mreže.

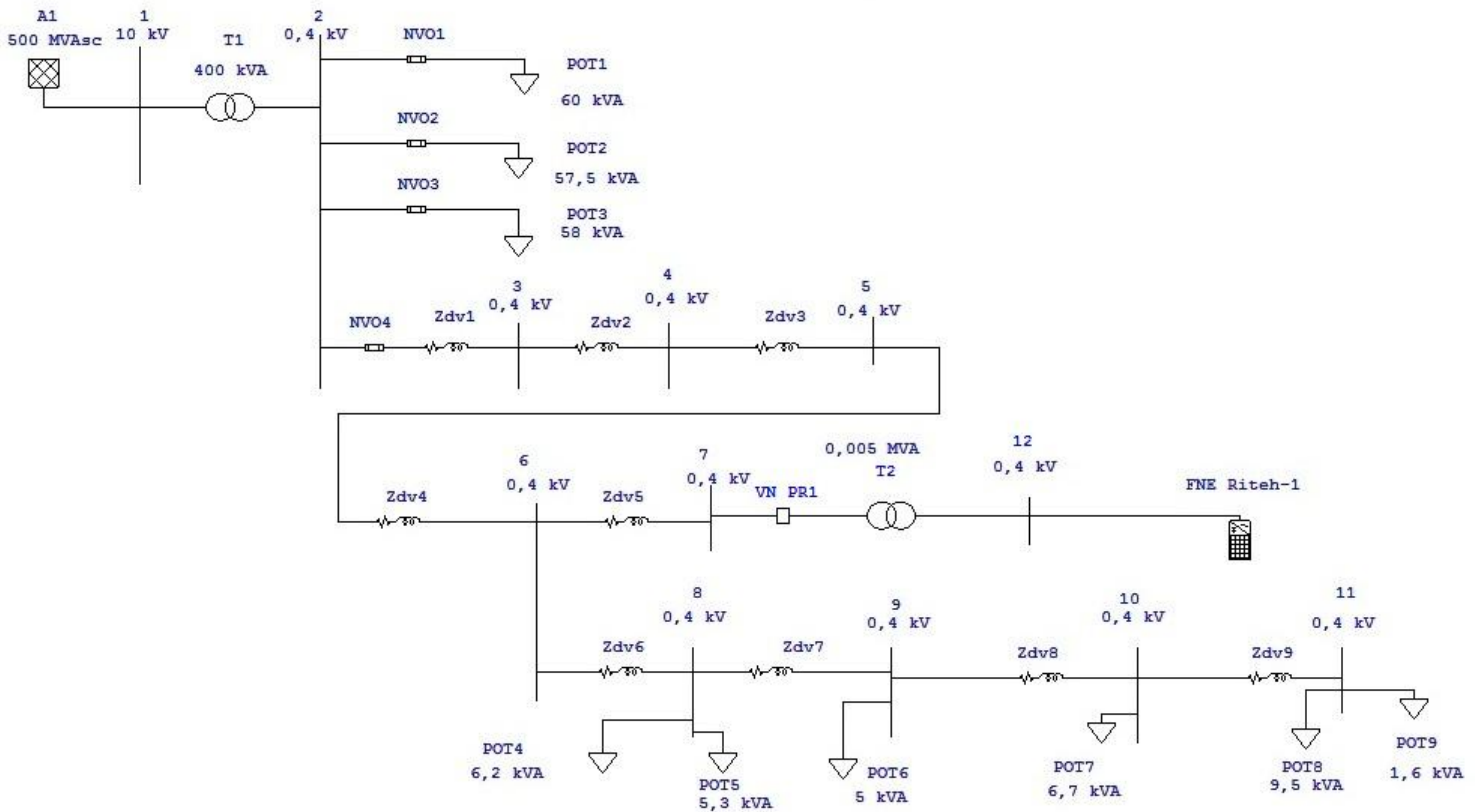


Slika 6.11. Proračun tropolnog KS-a sa ugašenom elektranom

Kada se isključi FNE Riteh-1 mreža ostaje gotovo ista, osim što nema struje od 5 A kojom doprinosi FNE Riteh-1, kao u slučaju (sl. 6.13.) i od sabirnice (6) kroz mrežu teče zanemarivo manja početna struja 3pKS-a.

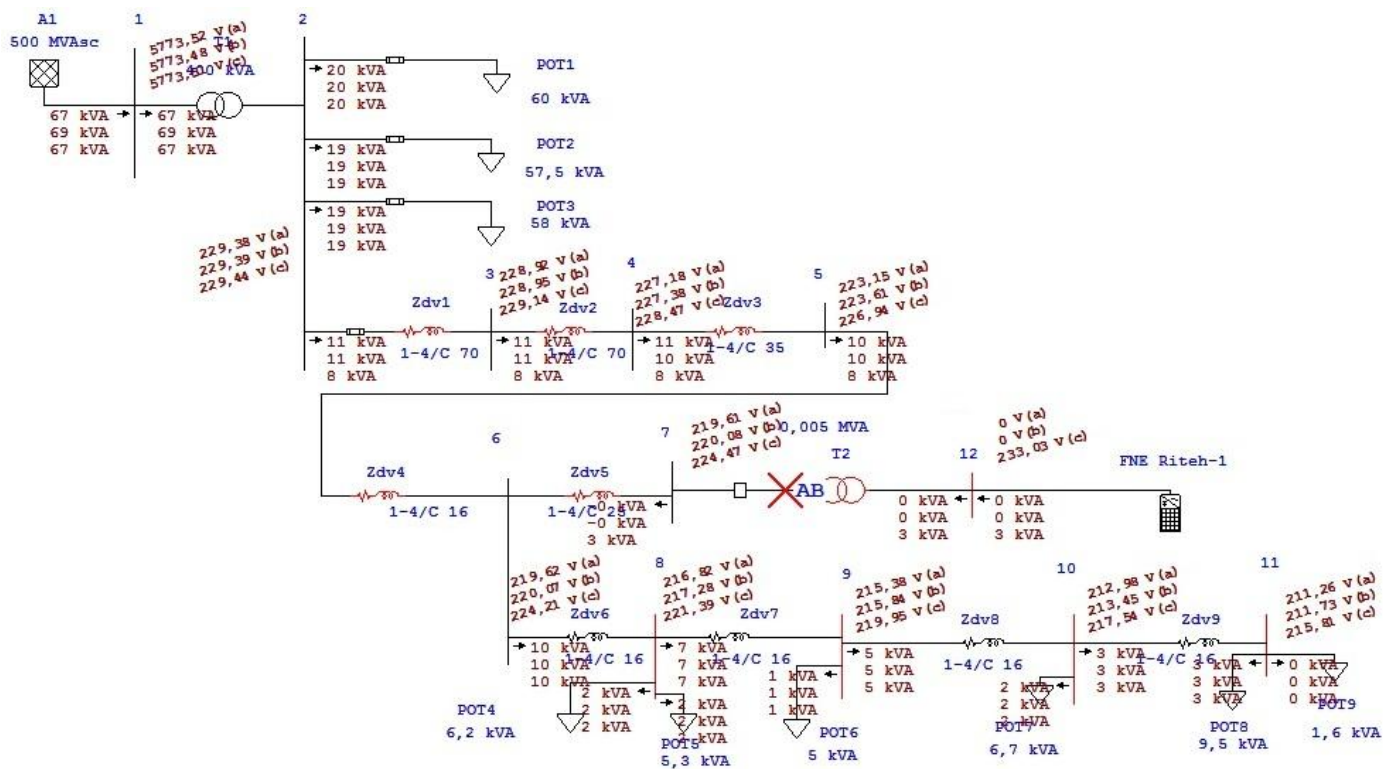
## 6.2 Proračuni s jednofaznim priključkom FNE Riteh-1

### 6.2.1 Nesimetrični tokovi snaga



Slika 6.12. Niskonaponska distributivna mreža i FNE Riteh-1

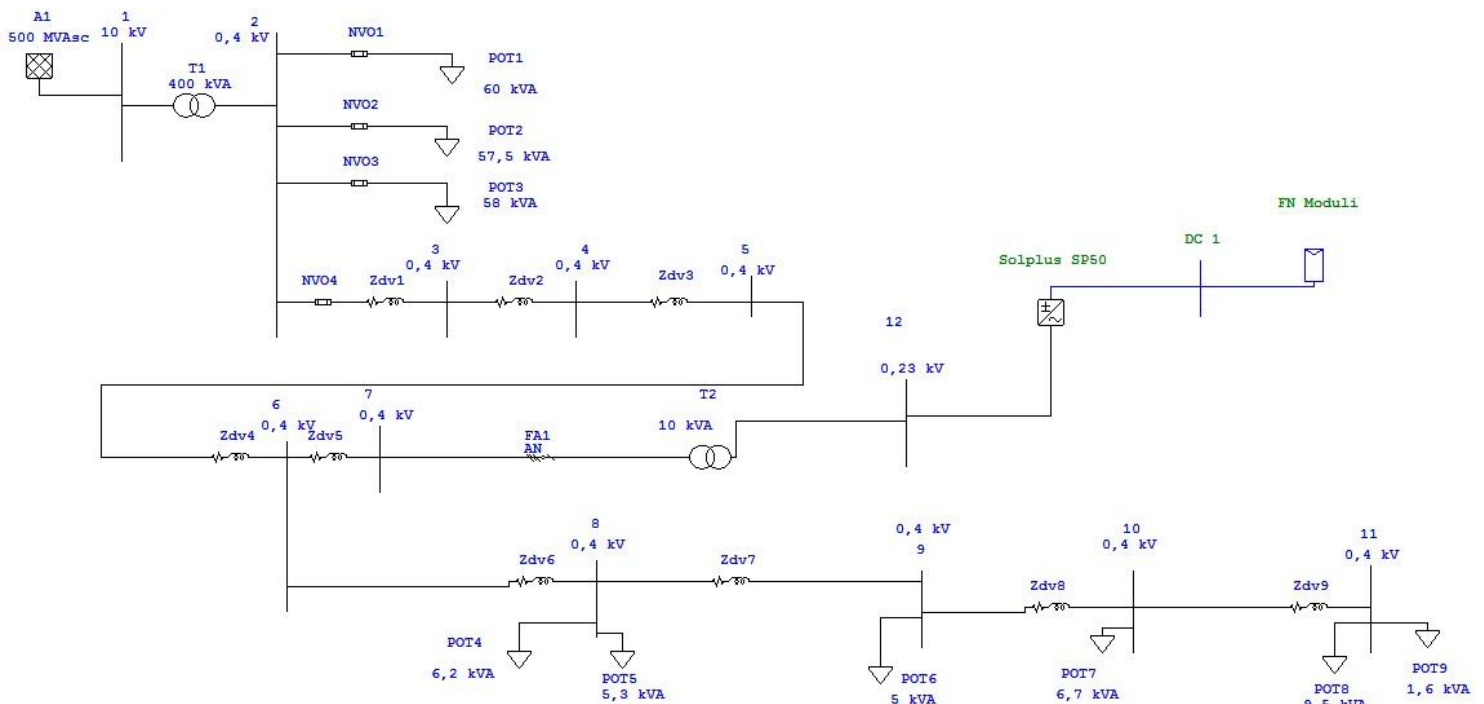
Mreža je promijenjena u odnosu na sliku 6.1. Između sabirnice (7) i FNE Riteh-1 dodani su transformator (T2) i sabirnica (12). Transformator je snage 5 kVA i prijenosnog omjera 1:1.



Slika 6.13. Proračun nesimetričnih tokova snaga s prekidom faza

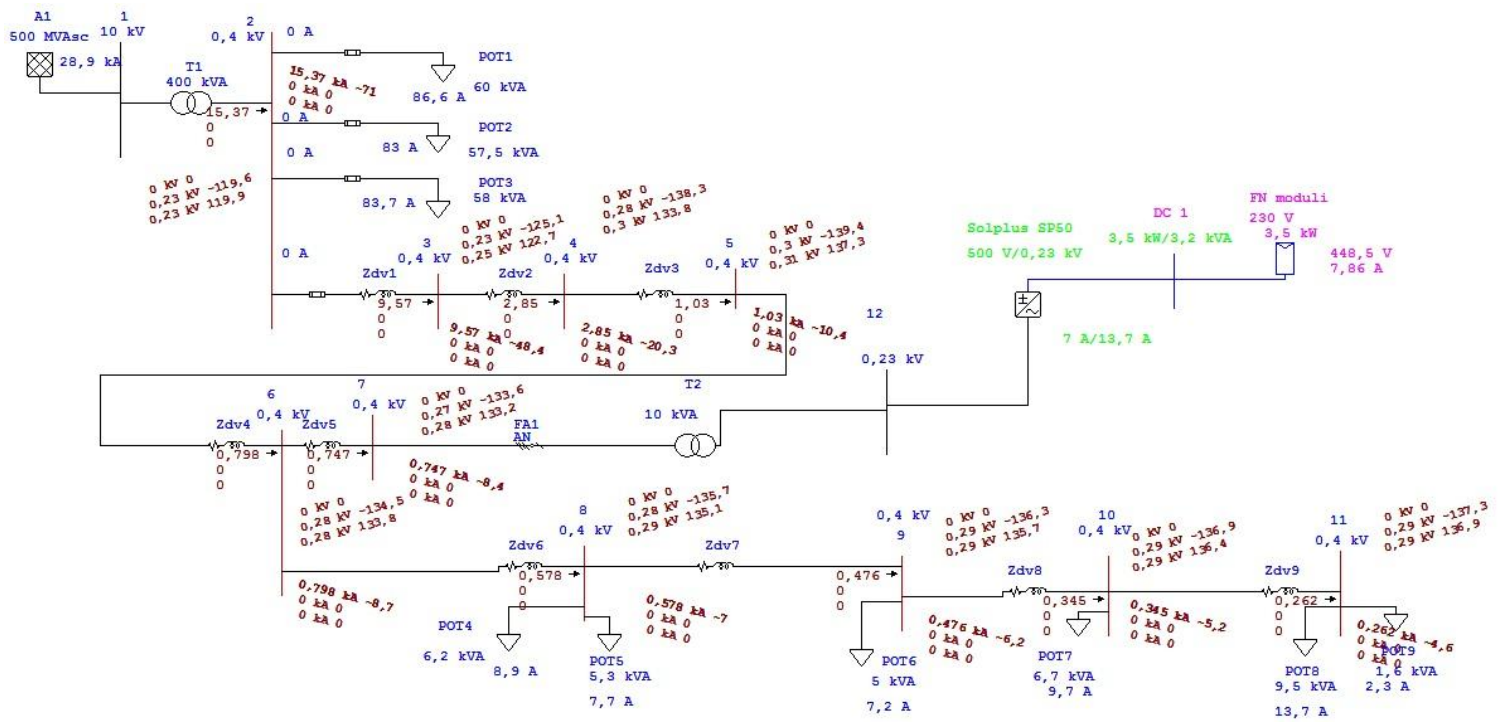
Cijela mreža je i dalje trofazna. Naponi na sabirnici (7) iznose: 219,61 V, 220,08 V i 224,47 V. Mreža je nesimetrična te su izvedeni proračuni nesimetričnih tokova snaga. Između sabirnica (7) i transformatora (T2) mreža je prekinuta i otvorene su faze A i B. Nadalje FNE Riteh-1 je priključena jednofazno i daje snagu 3 kVA u mrežu. Napon na sabirnici (12) iznosi 233,03 V.

## 6.2.2 Jednopolni kratki spoj



Slika 6.14. Niskonaponska distributivna mreža i FNE Riteh-1

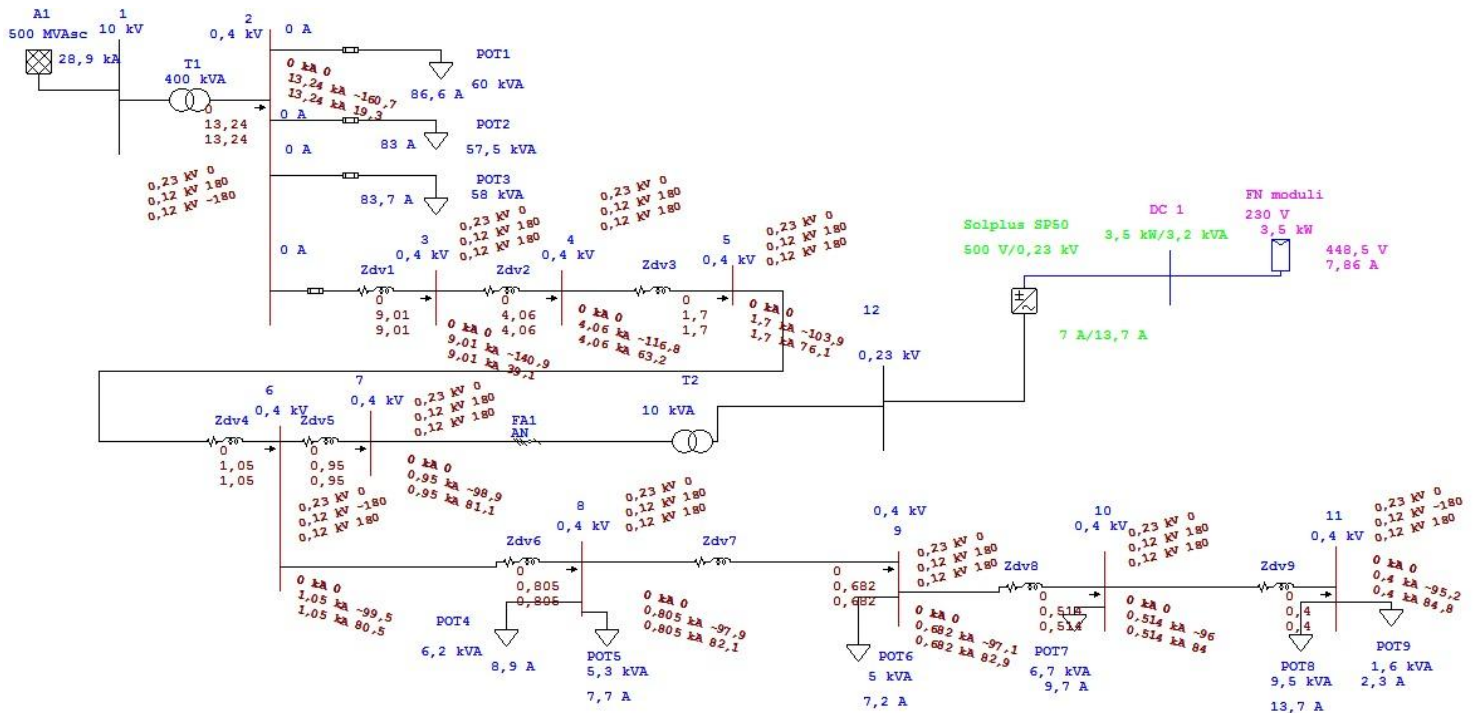
Mreža ostaje nepromijenjena do sabirnice (7) (u odnosu na sliku 6.12.). Nakon sabirnice (7) mreža se spaja na fazni adapter (FA1). Do faznog adaptera mreža je spojena trofazno, a adapter se spaja na transformator (T2) koji je spojen jednofazno. Transformator je prijenosnog omjera 1:1. Primar i sekundar su spojeni na nazivni napon od 230 V. Nadalje transformator je spojen na sabirnicu (12), a sabirnica (12) je spojena na inverter (Solplus SP50). Element FNE Riteh-1 (sl. 6.12.) zamijenjen je sa inverterom (Solplus SP50 i FN modulima). Inverter i moduli imaju iste zadane vrijednosti kao i FNE Riteh-1 (sl. 6.12.). Sabirnica (12) je spojena na ulaz invertora izmjenično, a na izlaz invertora spojena je istosmjerna sabirnica (DC 1). Na sabirnicu (DC 1) spojeni su FN moduli.



Slika 6.15. Proračun jednopolnog kratkog spoja

Najveća struja  $I_{pKS}$ -a dobiva se na sabirnici (2) i iznosi 15,37 kA . Struja na sabirnici (7) iznosi 0,747 kA. Struja  $I_{pKS}$ -a na sabirnici (7) je gotova ista kao i na slici 6.7. kada je FNE Riteh-1 spojena putem trofaznog priključka. FN moduli generiraju napon od 448,5 V i struju od 7,86 A. Ružičastom bojom prikazane su istosmjerne veličine, a zelenom bojom AC-DC veličine. Inverter (Solplus SP50) u kratkom spoju kratkotrajno doprinosi struji KS-a sa 13,7 A.

## 6.2.3 Dvopolni kratki spoj

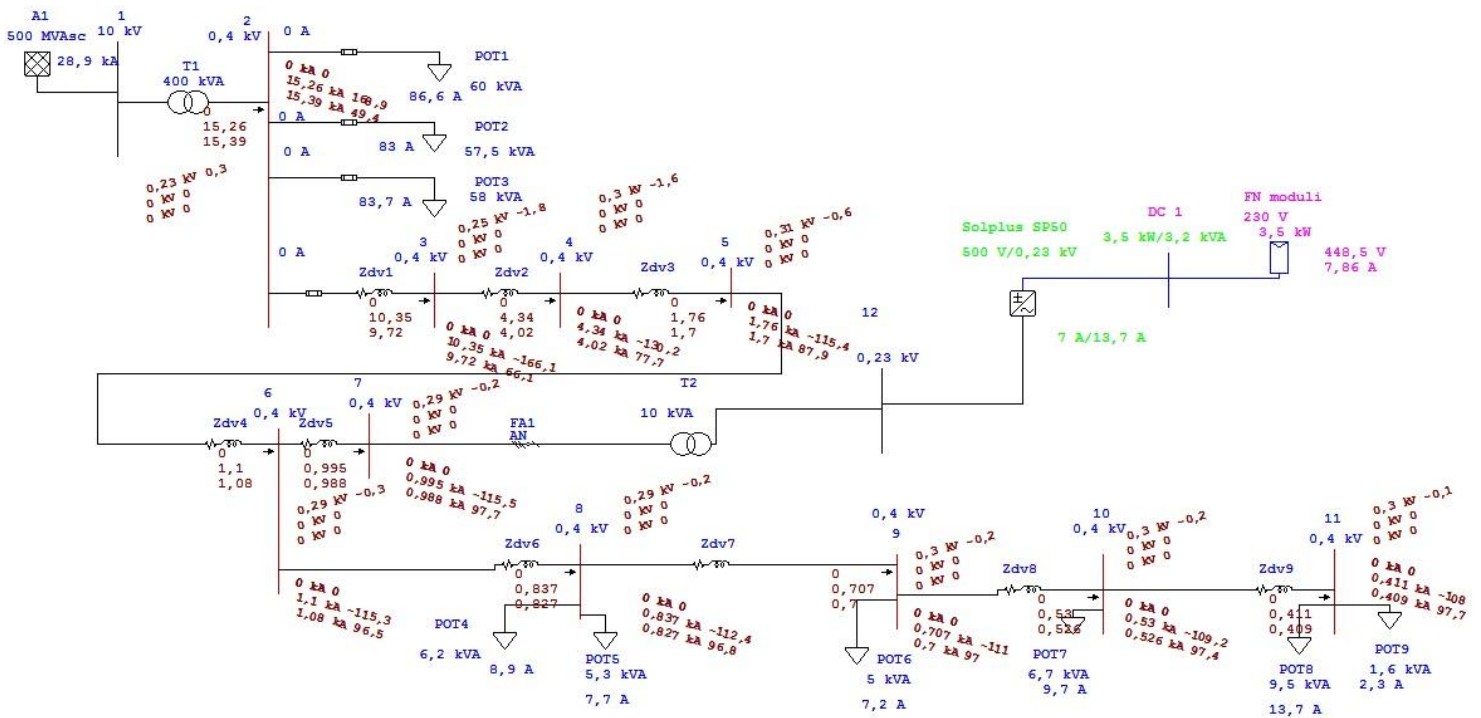


Slika 6.16. Proračun dvopolnog kratkog spoja

Struje dvopolnog kratkog spoja na sabirnici (7) iznose 0,95 kA i 0,95 kA, njihov zbroj daje struju iznosa 1,906 kA. Iznosi struja su približno jednaki i za trofazni i za jednofazni priključak. Struja 2pKS-a je većeg iznosa u odnosu na struju 1pKS-a. Struja 2pKS-a ima najveću vrijednost (13,24 kA) na sabirnici (2), a najmanju na kraju mreže tj. na sabirnici (11) koja iznosi 0,4 kA i 0,4 kA. Struja na sabirnici (11) iznosi 796,71 A.



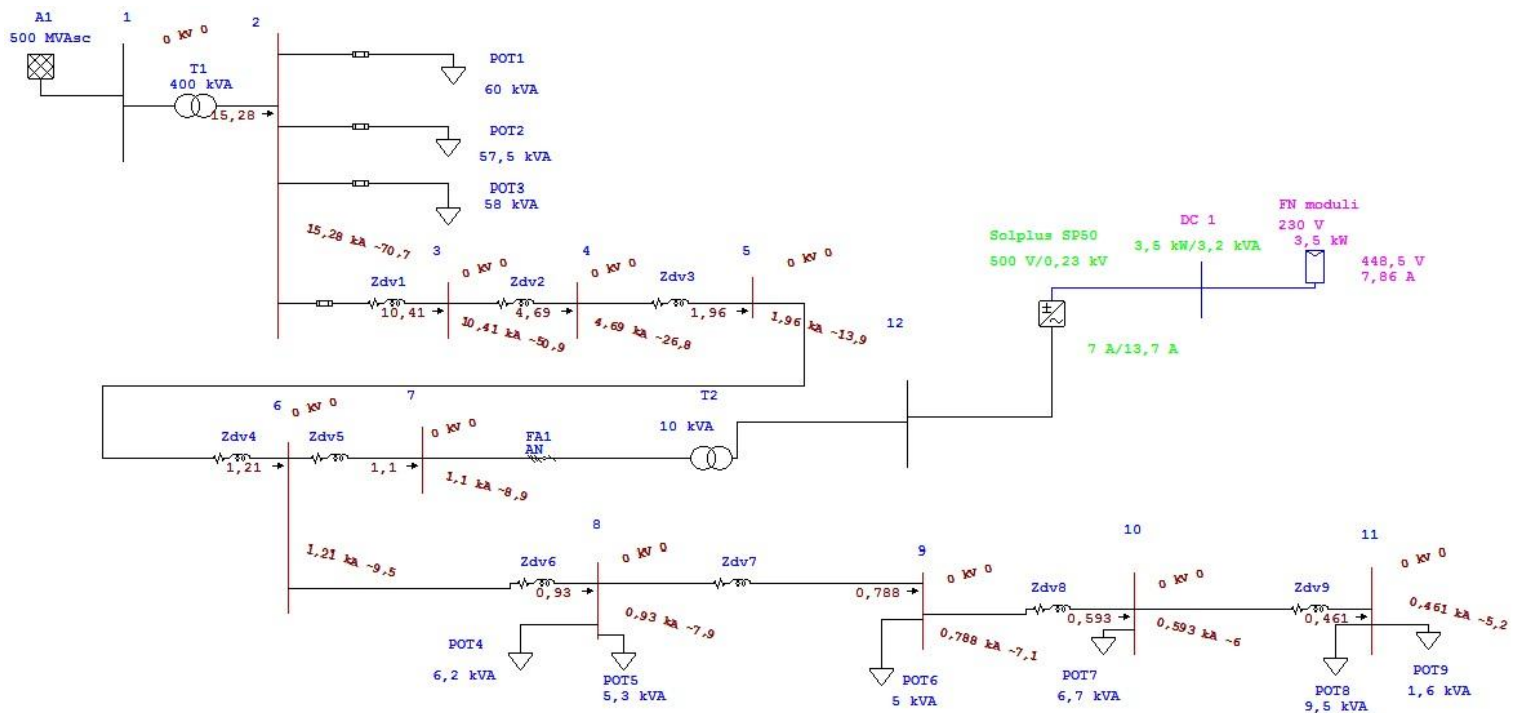
## 6.2.4 Dvopolni kratki spoj sa zemljom



Slika 6.17. Proračun dvopolnog kratkog spoja sa zemljom

Struje dvopolnog kratkog spoja sa zemljom na mjestu priključenja elektrane na sabirnici (7) iznose 0,995 kA i 0,988 kA, njihov zbroj daje struju iznosa 1,959 kA. Struja 2pKS-a sa zemljom je većeg iznosa u odnosu na struju 2pKS-a. Struja 2pKS-a sa zemljom ima najveću vrijednost (15,39 kA) na sabirnici (2), a najmanju na kraju mreže tj. na sabirnici (11) koja iznosi 0,411 kA.

## 6.2.5 Tropolni kratki spoj



Slika 6.18. Proračun tropolnog KS-a

Struja tropolnog kratkog spoja na mjestu priključenja elektrane na sabirnici (7) iznosi 1,1 kA. Struja 3pKS-a ima najveću vrijednost (15,28 kA) na sabirnici (2), a najmanju na kraju mreže tj. na sabirnici (11), koja iznosi 0,462 kA.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisani su distribuirani izvori električne energije i njihov utjecaj na strujno-naponske prilike u mreži. Budući da je električna energija lako dostupna i energija koja se lako može pretvoriti iz jednog oblika energije u drugi, u radu su opisane fotonaponske ćelije. Fotonaponske ćelije pretvaraju sunčevu energiju u električnu energiju. U radu je opisano njihovo priljučenje na elektroenergetsku mrežu.

Najvažniji dio ovog rada je analiza utjecaja fotonaponske elektrane Riteh-1 na strujno-naponske prilike u okolnoj mreži za različite scenarije. Elektrana je prikazana preko svojih komponenti te detaljno simulirana kroz programski paket. Posebna pažnja posvećena je programskom paketu ETAP, na osnovu kojega su izvršeni razni proračuni i ustanovljene strujno-naponske prilike u mreži. Prilikom modeliranja mreže razmatrao se utjecaj jednofaznog, odnosno trofaznog priključka FNE Riteh-1 na okolnu mrežu. Zbog činjenice, da je nazivna snaga elektrane relativno mala u odnosu na snagu distribucijskog transformatora koji napaja NN mrežu, rezultati su vrlo slični za obje varijante proračuna. Nameće se zaključak da je distribuirane izvore energije, kao u ostalom i potrošače električne energije, uputnije priključiti trofazno, no zbog ekonomske komponente projekata to vrlo često nije opravdano.

## 8. POPIS LITERATURE

- [1.] Capehart, B: Distributed Energy Resources (DER) , s interneta, <https://www.wbdg.org/resources/der.php> , 23. listopada 2014.
- [2.] DNV GL Energy: A Review of Distributed Energy Resources, s interneta [http://www.nyiso.com/public/webdocs/media\\_room/publications\\_presentations/Other\\_Reports/Other\\_Reports/A\\_Review\\_of\\_Distributed\\_Energy\\_Resources\\_September\\_2014.pdf](http://www.nyiso.com/public/webdocs/media_room/publications_presentations/Other_Reports/Other_Reports/A_Review_of_Distributed_Energy_Resources_September_2014.pdf), rujan 2014.
- [3.] Priključenje distribuirane proizvodnje na mrežu, s interneta, <http://www.gradimo.hr/clanak/prikljucenje-distribuirane-proizvodnje-na-mrezu/36972>, 20. svibnja 2010.
- [4.] Solar panels, s interneta, <http://www.energysavingtrust.org.uk/renewable-energy/electricity/solar-panels>, 2016.
- [5.] Energetski i signalni kabeli do 1kV, s interneta, <http://elka.hr/category/energetski-i-signalni-kabeli-do-1-kv/>, 2016
- [6.] Prebeg, D: Solarne fotonaponske ćelije (fotoćelije), s interneta, <http://www.zelenaenergija.org/clanak/solarne-fotonaponske-celije-fotocelije/429>, 26. srpnja 2011.
- [7.] Glavan, M: Riteh-1- prva elektrana koja prati kretanje sunca, s interneta, [http://www.novolist.hr/Vijesti/Rijeka/Ri-Servis/Riteh-1-prva-elektrana-koja-prati-kretanje-sunca?meta\\_refresh=true](http://www.novolist.hr/Vijesti/Rijeka/Ri-Servis/Riteh-1-prva-elektrana-koja-prati-kretanje-sunca?meta_refresh=true), 5. srpnja 2014.
- [8.] Labudović, B: Osnove primjene fotonaponskih sustava, Energetika marketing, Zagreb, veljača 2011.

## 9. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Završni rad obrađuje problematiku distribuiranih izvora energije, osobito njihova priključka na mrežu. Opisani su fotonaponski sustavi te njihovi osnovni dijelovi, princip rada, vrste i osnovne značajke. U radu je opisana fotonaponska elektrana Riteh-1 i na njenom primjeru su provedeni proračuni tokova snaga i kratkog spoja. Proračuni su izvedeni u računalnom alatu Etap. Izvršeni su proračuni jednopolnog kratkog spoja, dvopolnog kratkog spoja, dvopolnog kratkog spoja sa zemljom, te tropolnog kratkog spoja. Također izvršeni su proračuni simetričnih i nesimetričnih tokova snaga.

The final work deals with the issues of distributed energy resources, especially their connection to the network. Photovoltaic systems were described and their main elements, their work principles, types and basic characteristics. In this work was described photovoltaic power plant Riteh-1 and to its example were performed load flow and short circuit calculations. Calculations were performed in a computer tool Etap. Completed calculations were line-to-ground (LG), line-to-line (LL), line-to-line-to-ground (LLG) and 3 phase fault. There have been aslo performed calculations of load flow and unbalanced load flow.

Distribuirani električni izvori – Distributed Energy Resources

Fotonaponski sustavi – Solar photovoltaics

Fotonaponske ćelije – Photovoltaic cells

Jednopolni kratki spoj – Line-to-ground (LG)

Dvopolni kratki spoj – Line-to-line (LL)

Dvopolni kratki spoj sa zemljom – Line-to-line-to-ground (LLG)

Tropolni kratki spoj – 3 phase fault

Tokovi snaga – Load flow

Nesimetrični tokovi snaga – Unbalanced load flow

Three-phase connection – Trofazni priključak

Single-phase connection – Jednofazni priključak