Sigurnosni aspekti fotonaponskih elektrana

Stojnović, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:956304

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

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

Sveučilišni studij

SIGURNOSNI ASPEKTI FOTONAPONSKIH ELEKTRANA

Diplomski rad

Luka Stojnović

Osijek, 2017.

Zahvale

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Goranu Kneževiću i sumentoru dr. Vladimiru Katiću te profesoru dr. Draganu Milićeviću koji su svojim vodstvom i savjetima pomogli ostvarivanju ovog rada.

Ovim putem se posebno zahvaljujem profesoru dr. Zoltanu Čorbi koji me vodio kroz izradu ovog rada i bez čije pomoći ovaj rad ne bi bilo moguće napraviti.

Hvala Vam!

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 12.05.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Luka Stojnović
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-796, 07.10.2014.
OIB studenta:	01704645998
Mentor:	Doc.dr.sc. Goran Knežević
Sumentor:	Vladimir Katić
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Danijel Topić
Član Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Krešimir Fekete
Naslov diplomskog rada:	Sigurnosni aspekti fotonaponskih elektrana
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	U diplomskom radu potrebno je teorijski obraditi sigurnosne aspekte fotonaposkih elektrana. Također, potrebno je posebno izvršiti proračune i ispitivanja uzemljenja postojeće fotonaponske elektrane.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	12.05.2017.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 25.05.2017.

Ime i prezime studenta:	Luka Stojnović
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-796, 07.10.2014.
Ephorus podudaranje [%]:	1

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Sigurnosni aspekti fotonaponskih elektrana**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Goran Knežević

i sumentora Vladimir Katić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

Predgovor 1
1. Uvod 2
2. Opis fotonaponske elektrane 3
2.1. Opis fotonaponske elektrane FTN i upoznavanje s instalacijama za uzemljenje 3
2.1.1. Paneli 5
2.1.2. Invertori 7
2.1.3. Komunikacija 10
2.1.4. VSN300 WI-FI LOGGER Card 12
2.1.5. Konstrukcija 13
2.1.6. Instalacije za uzemljenje 14
2.2. Opis fotonaponske elektrane Sajan i upoznavanje s instalacijama za uzemljenje 15
2.2.1. Paneli 18
2.2.2. Invertori 18
2.2.3. Komunikacija 19
2.2.4. Konstrukcija 20
2.2.5. Centralna trafostanica (CTS) 20
2.2.6. Instalacije za uzemljenje 21
3. Opis mjernog uređaja i postupka mjerenja s mjernim uređajem 23
3.1. Teorijski opis mjerenja uzemljenja 23
3.2. Postupak provjere i mjerenja uzemljenja 25
3.3. Izrada plana mjerenja 26
4. Mjerenje 27
4.1. Mjerenje na fotonaponskoj elektrani FTN 27
4.2. Mjerenje na fotonaponskoj elektrani Sajan 30
5. Programski alat CYMGRD 32
6. Modeliranje i simulacija uzemljenja 33
6.1. Analiza tla (*soil analysis*) 33
6.2. Analiza instalacija za uzemljenje (*grid analysis)* 34
6.3. Grafički prikaz potencijala (*contour plot)* 36
6.4. Grafički prikaz utjecaja na promatrača (*profile plot)* 36
7. Simulacije uzemljenja u CYMGRD-u 37

7.1. Simulacija FN elektrane Sajan 37
7.2. Simulacije FN elektrane FTN 40
7.2.1. Struja kvara nije ograničena u distributivnoj mreži 40
7.2.2. Struja kvara ograničena u distributivnoj mreži 43
7.2.3. Teorijski izračun otpora uzemljivača FN elektrane FTN 45
8. Analiza rezultata 47
8.1. Analiza rezultata za FN elektranu Sajan 47
8.2. Analiza rezultata za FN elektranu FTN 48
9. Zaključak 49
10. Literatura 50
11. Sažetak 51
12. Abstract 52
13. Životopis 53
14. Prilozi 54

Predgovor

Ovaj rad je napisan u sklopu projekta studentske mobilnosti EUROWEB+ (2014-0849/001-001) pod pokroviteljstvom Erasmus Mundus projekta Europske unije.

Rad je napravljen na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu pod vodstvom sumentora dr. Vladimira Katića. Mentor rada je doc.dr.sc. Goran Knežević s Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija iz Osijeka.

1. Uvod

Uzemljenje je galvanski spoj metalnog dijela električnog uređaja, postrojenja ili točke iz mreže, koja je zbog kvara ili nekog drugog razloga došla pod napon, sa zemljom preko uzemljivača. Metalni uzemljivači polažu se u zemlju radi galvanskog spoja zemlje s uzemljenim dijelom mreže ili instalacije.

Uzemljenje treba ispuniti tri glavna zadatka:

- Osigurati pravilno funkcioniranje raznih električnih instalacija – pogonsko uzemljenje
- Osigurati zaštitu čovjeka od visokih napona dodira i napona koraka koji se mogu pojaviti uslijed kvarova na izolaciji – zaštitno uzemljenje
- Omogućiti prenaponska pražnjenja – prenaponsko ili gromobransko uzemljenje

Postoji više različitih metoda mjerenja otpora uzemljenja (UI metoda, Wiechertova mosna metoda, Stösselova mosna metoda, Behrendova metoda, Behrendova kompenzacijska metoda itd.). Pri izradi ovog rada korištena je i opisana UI metoda.

Otpor uzemljivača je tijekom godine promjenjiv zbog promjena u temperaturi i vlažnosti tla, ali te su promjene u praksi zanemarive.

U ovom radu prikazana su mjerenja otpora uzemljivača na fotonaponskim elektranama FTN i Sajan. Ti rezultati uspoređeni su s računalnim simulacijama dobivenim u programskom alatu CYMGRD (verzija 6.3) te s rezultatima dobivenim teorijskim proračunom otpora uzemljenja. CYMGRD je programski alat koji pomaže inženjerima pri dizajniranju uzemljenja za trafostanice ili druge građevine. Alat se također može koristiti za interpretacije rezultata mjerenja otpornosti tla, razina potencijala tla i procjenu opasnih točaka u zadanom području.

U svrhu što boljeg upoznavanja s elektranama na kojima su izvršena mjerenja, rad sadržava i opise postrojenja fotonaponske elektrane FTN i fotonaponske elektrane Sajan te opise instalacija za uzemljenje na obje.

Na kraju rada, rezultati dobiveni mjerenjima, kompjuterskim simulacijama i proračunom analizirani su i objašnjeni te su uspoređeni s pravnim regulativama vezanim za karakteristike uzemljenja.

Potrebni blokovski i shematski prikazi rađeni su u programu Microsoft Office Visio.

2. Opis fotonaponske elektrane

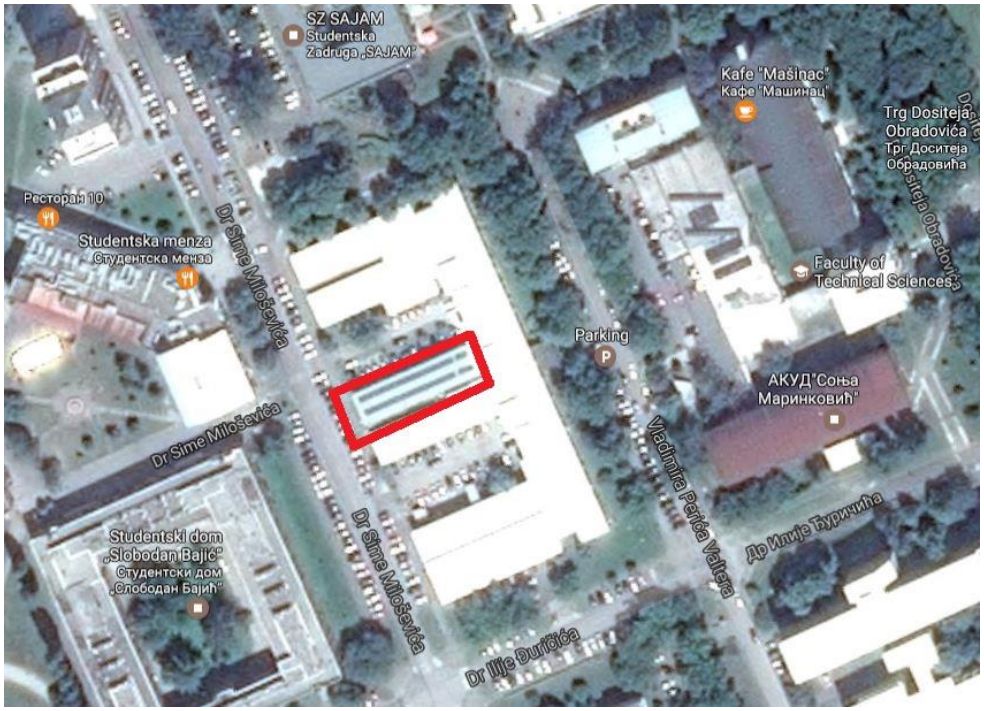
Fotonaponska elektrana je fotonaponsko postrojenje koje služi za proizvodnju električne energije direktnom pretvorbom sunčeve energije u električnu. Za razliku od decentraliziranih, najčešće krovno montiranih, fotonaponskih komponenata, fotonaponska elektrana proizvedenu električnu energiju predaje u električnu mrežu u ekonomski značajnim količinama.

Fotonaponska elektrana se sastoji od većeg broja fotonaponskih modula koji su povezani u nizove (engl. *string)* te preko izmjenjivača (engl. *inverter*) i transformatora spojeni na električnu mrežu.

Da bi se formirao dovoljno visok istosmjerni napon za praktičnu i ekonomičnu pretvorbu u izmjenični, fotonaponski paneli međusobno se vežu redno formirajući tzv. stringove.

2.1. Opis fotonaponske elektrane FTN i upoznavanje s instalacijama za uzemljenje

Fotonaponska elektrana Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu (FN elektrana FTN) nalazi se na krovu srednje zgrade Mašinskog fakulteta koja se proteže u pravcu jugoistok-sjeverozapad (Slika 1.1.). Krov je prekriven ravnim pocinčanim limom te je blago nagnut prema jugu (5°), a paneli su nagnuti 15° u odnosu na krov.

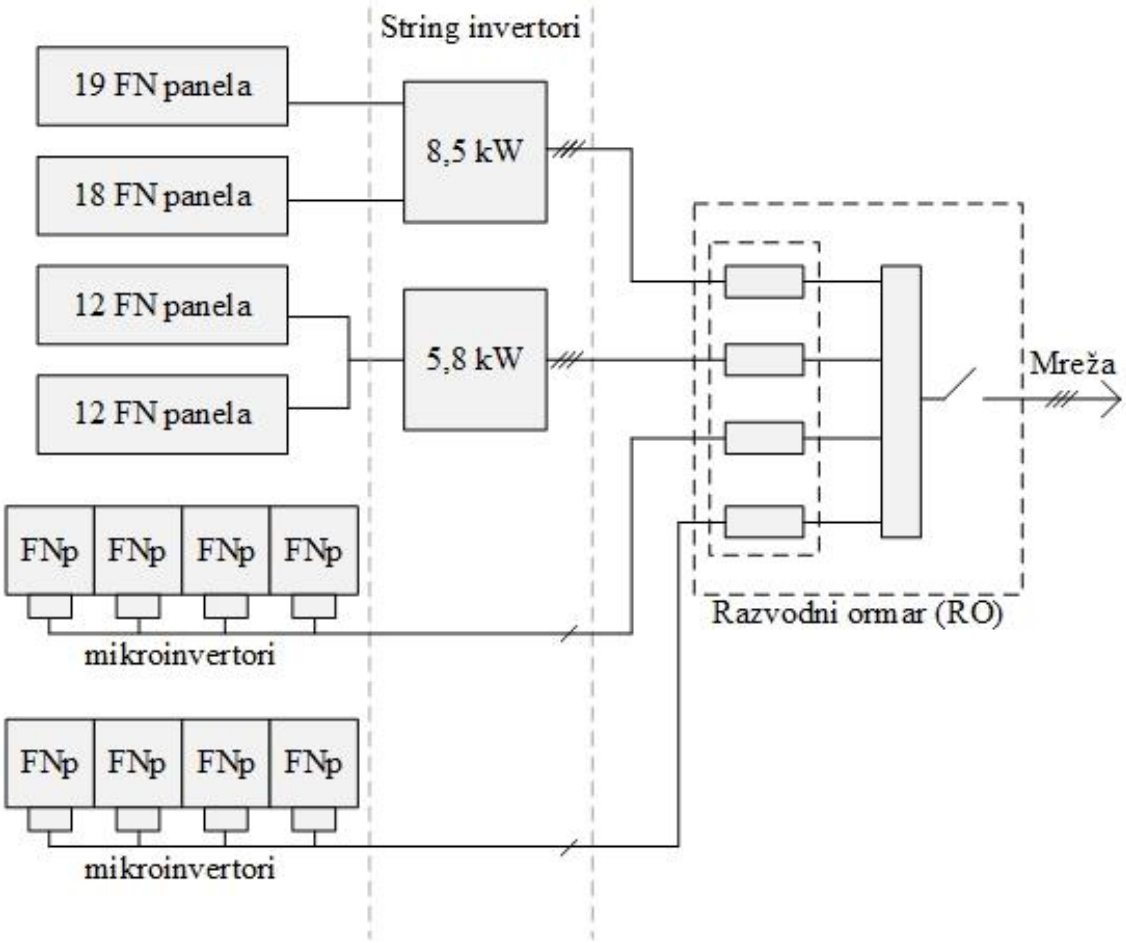


Slika 2.1. Lokacija FN elektrane FTN (slika preuzeta sa servisa Google maps)

Instalirana snaga elektrane je 16,3 kW. Blok shema elektrane je prikazana na slici 1.2. U sustavu su dva string invertora, snage 8,5 kW i 5,8 kW kao i osam mikroinvertora ukupne snage 2 kW. Maksimalna ukupna snaga panela je 17,04 kWp. Ukupna površina panela je 118 m².

Predimenzioniranje snage FN panela dovodi do čestog zasićenja invertora, odnosno rada invertora u režimu limitirane izlazne snage. Pravilo pri usklađivanju snage FN panela i invertora je da njihov međusobni omjer bude 1:1. Međutim, u praksi se rijetko dostiže nazivna snaga panela (koja je dana pri STC-u (standard testing conditions)), tako da se prihvaća sljedeći izraz pri projektiranju: $0{,}8 \cdot P_{FN} < P_{invdc} < 1{,}2 \cdot P_{FN}$. Ovaj odnos je 1,11 za invertor snage 8,5 kW (snaga svih panela je $(18 + 19) \cdot 255\ W_p = 9435\ W_p$), a odnos za invertor 5,8 kW je također $1{,}11(24 \cdot 270\ W_p = 6480\ W_p)$, čime je zadovoljen ovaj uvjet. Na raspolaganju je krov od 372,4 m². Životni vijek fotonaponskih panela je 25 godina. Sva proizvedena energija prodaje se Elektroprivredi Srbije (sklopljen je ugovor na 12 godina).

Vlastita potrošnja električne energije je minimalna i odnosi se na rad invertora kada ne predaju energiju (stand-by režim). Ti gubici su manji od 15 W za string invertore i 50 mW za mikroinvertore. Ukupna godišnja potrošnja invertora u stand-by režimu iznosi 133,152 kWh ($(15 + 15 + 8 \cdot 0{,}05) \cdot 12 \cdot 365 = 133{,}152$ kWh), gdje 12 označava broj sati kada su invertori na vlastitoj potrošnji (tijekom ljeta ova vrijednost je manja, a tijekom zime veća, tako da se uzima srednja vrijednost od 12 sati). Korištena oprema je opisana u tablici 2.1.



Slika 2.2. Blok shema FN elektrane (shema izrađena u alatu MS Visio 2013)

Tablica 2.1. *Spisak opreme*

Naziv komponente	Količina [kom]
Aurora TRIO-5,8-TL-OUTD (5,8kW)	1
Aurora TRIO-8,5-TL-OUTD(8,5 kW)	1
Aurora Micro-0,25-I-OUTD	8
Yingli Solar Panda_60_Cell_YL270C-30b	26
Yingli Solar_60_Cell_YL255P-29b	40
Jinko Solar JKM240-P	3
H2300 HELIOS Flat Roof 360 L	1
Aurora CDD	1
Switch	1
VSN300 WI-FI LOGGER Card	1

Oprema korištena u elektrani dolazi od sljedećih proizvođača: ABB (inverotori), Yingli Solar, Jinko Solar (paneli) i Alumil Solar (konstrukcija).

2.1.1. Paneli

U FN elektrani FTN koriste se 3 vrste panela:

Fotonaponski paneli proizvođača Yingli Solar, model YL250P-29b [2] snage 255 W_p. To su polikristalni, visokoefikasni paneli (15,3%), sastavljeni od 60 zasebnih ćelija. Parametri panela dani su u dva standardna uvjeta testiranja STC (Standard testing conditions, tablica 2.2) i NOCT (Nominal operating cell temperature, tablica 2.3). Svi se proračuni rade na pri STC. Podaci o temperaturnim karakteristikama panela su također važni jer se na temelju njih može unaprijed znati kako će se mijenjati karakteristike panela u ovisnosti o temperaturi (tablica 2.4). Jedan panel teži 19,1 kg.

Tablica 2.2. *Parametri pri STC-u (zračenje 1000 W/m², temperatura ćelije 25°, AM 1,5)*

Tip modula			YL255P-29b
Izlazna snaga	P_{max}	W_p	255
Tolerancija izlazne snage	P_{max}	W	0/5
Efikasnost panela	h_{max}	%	15,3
Napon pri točki maksimalne snage P_{max}	U_{tms}	V	30,6
Struja pri točki maksimalne snage	I_{tms}	A	8,32
Napon praznog hoda	U_{ph}	V	38,7
Struja kratkog spoja	I_{ks}	A	8,66

Tablica 2.3. *Parametri pri NOCT-u (zračenje 800 W/ m², temp. okoline 20°, brzina vjetra 1m/s)*

Izlazna snaga	P_{max}	W	184,7
Napon pri točki maksimalne snage P_{max}	U_{tms}	V	27,9
Struja pri točki maksimalne snage	I_{tms}	A	6,63
Napon praznog hoda	U_{ph}	V	35,7
Struja kratkog spoja	I_{ks}	A	7,19

Tablica 2.4. *Temperaturne karakteristike*

Nominalna radna temperature ćelije	NOCT	°C	46+/-2
Temperaturni koeficijent snage P_{max}	g	%/°C	-0,45
Temperaturni koeficijent napona U_{ph}	b-U_{ph}	%/°C	-0,33
Temperaturni koeficijent struje I_{ks}	a-I_{ks}	%/°C	0,06
Temperaturni koeficijent napona pri točki maksimalne snage U_{tms}	b-U_{tms}	%/°C	-0,45

Drugi tip korištenih panela je također panel proizvođača Yingli Solar, model Panda YL270C-30B [3]. To su monokristalni paneli snage 270W_p, sastavljeni od 60 zasebnih ćelija. Dimenzije panela su 1650mm/992mm/45mm, težine 19kg. Parametri panela su dani u tablici 2.5, a temperaturne karakteristike u tablici 2.7.

Tablica 2.5. *Parametri pri STC-u*

Tip modula			Panda YL270C-30B
Izlazna snaga	P_{max}	W_p	270
Efikasnost panela	h_{max}	%	16,5
Napon pri točki maksimalne snage P_{max}	U_{tms}	V	31,1
Struja pri točki maksimalne snage	I_{tms}	A	8,68
Napon praznog hoda	U_{ph}	V	39
Struja kratkog spoja	I_{ks}	A	9,06

Tablica 2.6. *Parametri pri NOCT-u (zračenje 800 W/ m²,temp.okoline 20°, brzina vjetra 1m/s)*

Izlazna snaga	P_{max}	W	194,7
Napon pri točki maksimalne snage P_{max}	U_{tms}	V	28,2
Struja pri točki maksimalne snage	I_{tms}	A	6,91
Napon praznog hoda	U_{ph}	V	36,2
Struja kratkog spoja	I_{ks}	A	7,21

Tablica 2.7. *Temperaturne karakteristike (Panda YL260C-30B)*

Nominalna radna temperature ćelije	NOCT	°C	46+/-2
Temperaturni koeficijent snage Pmax	g	%/°C	-0,42
Temperaturni koeficijent napona Uph	b-U_{ph}	%/°C	-0,31
Temperaturni koeficijent struje Iks	a-I_{ks}	%/°C	0,04





Slika 2.3 Polikristalni silicijski panel **Slika 2.4** Monokristalni silicijski panel

Treći korišteni panel je Jinko Solar JKM 240-P [4]. To je polikristalni silicijski panel, snage 240 W_p, sastavljen od 60 ćelija. Dimenzije panela su 1650/992/45 mm, težine 19 kg. Karakteristike panela su dane u tablicama 2.8. i 2.9.

Tablica 2.8. *Parametri pri STC-u*

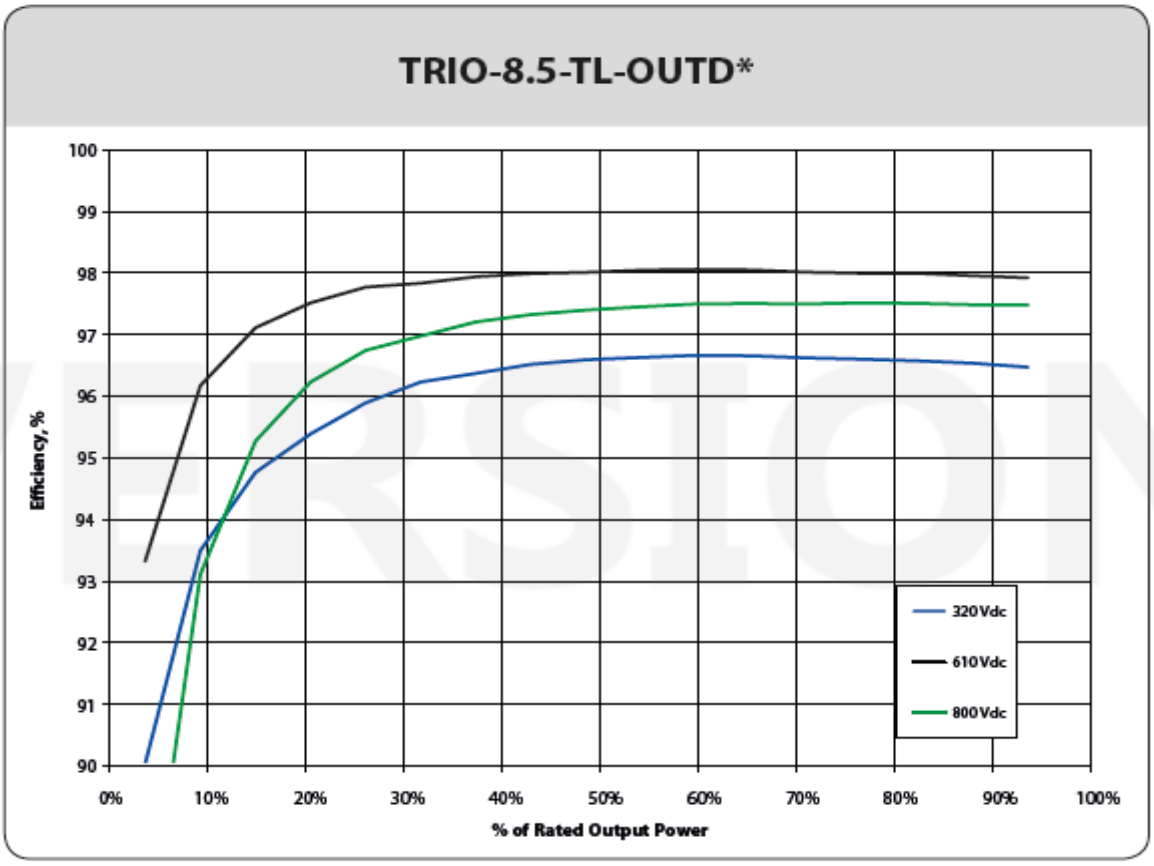
Tip modula			JKM 240-P
Izlazna snaga	P_{max}	W_p	240
Efikasnost panela	h_{max}	%	14,66
Napon pri točki maksimalne snage P_{max}	U_{tms}	V	30
Struja pri točki maksimalne snage	I_{tms}	A	8,01
Napon praznog hoda	U_{ph}	V	37,2
Struja kratkog spoja	I_{ks}	A	8,56

Tablica 2.9. *Temperaturne karakteristike (JKM 240-P)*

Nominalna radna temperature ćelije	NOCT	°C	48+/-2
Temperaturni koeficijent snage P_{max}	g	%/°C	-0,48
Temperaturni koeficijent napona U_{ph}	bU_{ph}	%/°C	-0,33
Temperaturni koeficijent struje I_{ks}	aI_{ks}	%/°C	0,04

2.1.2. Invertori

Jedan od invertora je trofazni 8,5 kW invertor, oznake TRIO-8,5-TL-OUTD-S iz serije AURORA [1]. Ovaj invertor odlikuje visoka efikasnost pretvaranja u širokom opsegu napona s dva nezavisna MPPT ulaza za najoptimalniju proizvodnju električne energije. „–S“ oznaka označava da je ova verzija invertora bez osigurača, s ugrađenim DC prekidačima. Na grafikonu je prikazano za koje napone, invertor ima najbolju efikasnost (slika 2.5). U tablici se mogu vidjeti neke od najbitnijih karakteristika invertora. Na ovaj invertor povezuje se dva stringa, svaki na poseban MPPT, po 19 i 18 panela, vezanih u red.



Slika 2.5 Efikasnost u ovisnosti o izlaznoj snazi za različite naponske razine [1]

Tablica 2.10. *Karakteristike invertora*

Parametri	TRIO-8,5-TL-OUTD
Ulazni napon U_{dc}	1000 V
Napon paljenja invertora U_{start}	350V (podesivo 200-500V)
Maksimalna ulazna snaga P_{dc}	8700 W
Broj MPPT-a	2
Maksimalan napon za svaki MPPT	4800 W
Maksimalna ulazna struja I_{dc}/za svaki MPPT $I_{mpptmax}$	30 A/20 A
Broj faza	3W- 4W (+PE)
Nominalna snaga P_{ac}	8500 W
Napon U_{ac}	400 V
Struja I_{ac}	14,5 A
Frekvencija, max	50 Hz
Efikasnost hmax	98%
Stand-by potrošnja	< 15 W

Drugi invertor koji će biti korišten je također iz serije AURORA, samo manje snage (5,8 kW) [1]. Također trofazni invertor, ali s jednim MPPT ulazom, bez ugrađenih osigurača, s DC prekidačem („-S“ verzija). U tablici 2.11. možemo vidjeti osnovne podatke. Na njega su paralelno vezana dva stringa s 12 panela po stringu.

Tablica 2.11. *Karakteristike invertora*

Parametri	TRIO-5,8-Tl-OUTD
Ulazni napon U_{dc}	1000 V
Napon paljenja invertora U_{start}	350V (podesivo 200-500V)
Maksimalna ulazna snaga P_{dc}	5950 W
Broj MPPT-a	2
Maksimalna ulazna struja I_{dc}/za svaki MPPT $I_{mpptmax}$	18,9 A/ 24 A
Broj faza	3W- 4W (+PE)
Nominalna snaga P_{ac}	5800 W
Napon U_{ac}	400 V
Struja I_{ac}	10 A
Frekvencija max	50 Hz
Efikasnost h_{max}	98%
Stand-by potrošnja	<15 W

Invertori TRIO-8,5-TL-OUTD I TRIO-5,8-Tl-OUTD izgledaju jednako, a razlikuju se samo u unutrašnjoj topologiji. Izgled invertora prikazan je na slici 2.6.



Slika 2.6 Invertori TRIO-5,8-Tl-OUTD i TRIO-8,5-TL-OUTD [1]

Uz navedena 2 invertora, FN elektrana FTN sadrži i osam mikroinvertora (Aurora PVI-0,25-I-OUTD) [5], svaki snage 250 W. Prednost mikroinvertora je što omogućuju korištenje MPPT (Maximum Power Point tracking) za svaki individualni modul. Elektrana koristi tri panela od 240 W_p, tri od 255 W_p i dva od 270 W_p. Osnovni podaci invertora mogu se vidjeti u tablici 2.12, a slika invertora prikazana je na slici 2.7.

Tablica 2.12. *Karakteristike mikroinvertora*

Parametri	Aurora PVI-0,25-I-OUTD
Maksimalna snaga P_{dcmax}	265 W
Opseg napona U_{dcmin}-Ud_{cmax}	12-60V
MPPT opseg $U_{mpptmin}$-$U_{mpptmax}$	25-60V
Maksimalna ulazna struja I_{dcmax}	10,5 A
Broj faza	1
Izlazna snaga Pac	250 W
Napon U_{ac}	230 V
Struja I_{ac}	1,3 A
Frekvencija	50 Hz
Efikasnost hmax	96,5 %



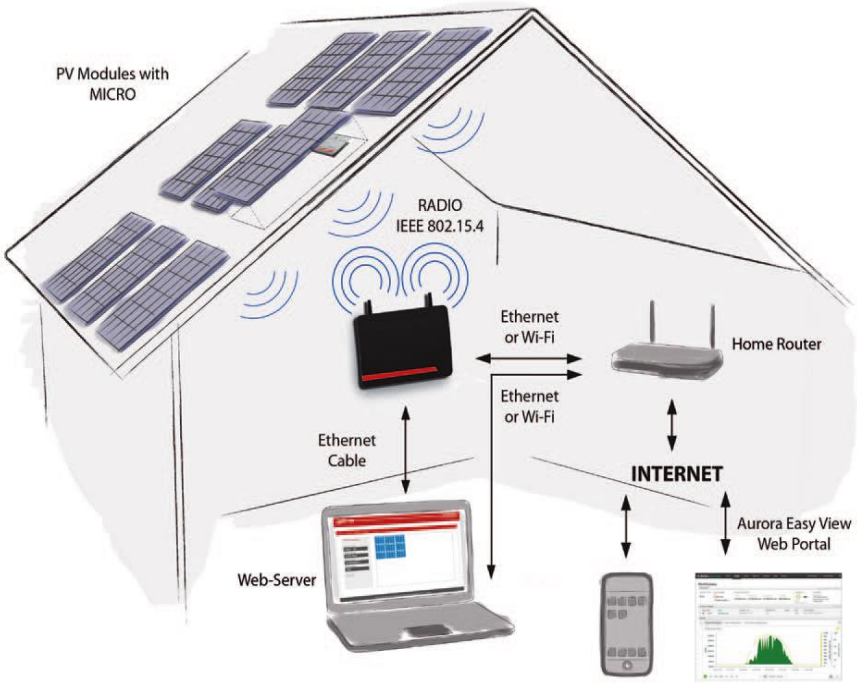
Slika 2.7 Izgled mikroinvertora [11]

2.1.3. Komunikacija

Komunikacija sa invertorima je neophodna da bi u svakom trenutku postojao pregled o proizvedenoj energiji, radu elektrane i potencijalnim problemima. Sve informacije moguće je vidjeti pomoću internet preglednika koristeći Aurora Vision portal. Tvrtka Power One nudi uređaje koji su kompatibilni s njihovim invertorima. U FN elektrani FTN koristi se Aurora CDD uređaj za komunikaciju mikroinvertora sa serverom. Također, moguća je upotreba Wi-Fi kartica, koja se ugrađuje u string invertore koji će slati podatke preko switch-a i tako omogućavati pregled proizvodnje u svakom trenutku. Aurora CDD je uređaj za komunikaciju servera sa mikroinvertorima [4]. Uređaj je prikazan na slici 2.8.



Slika 2.8 Aurora CDD [11]



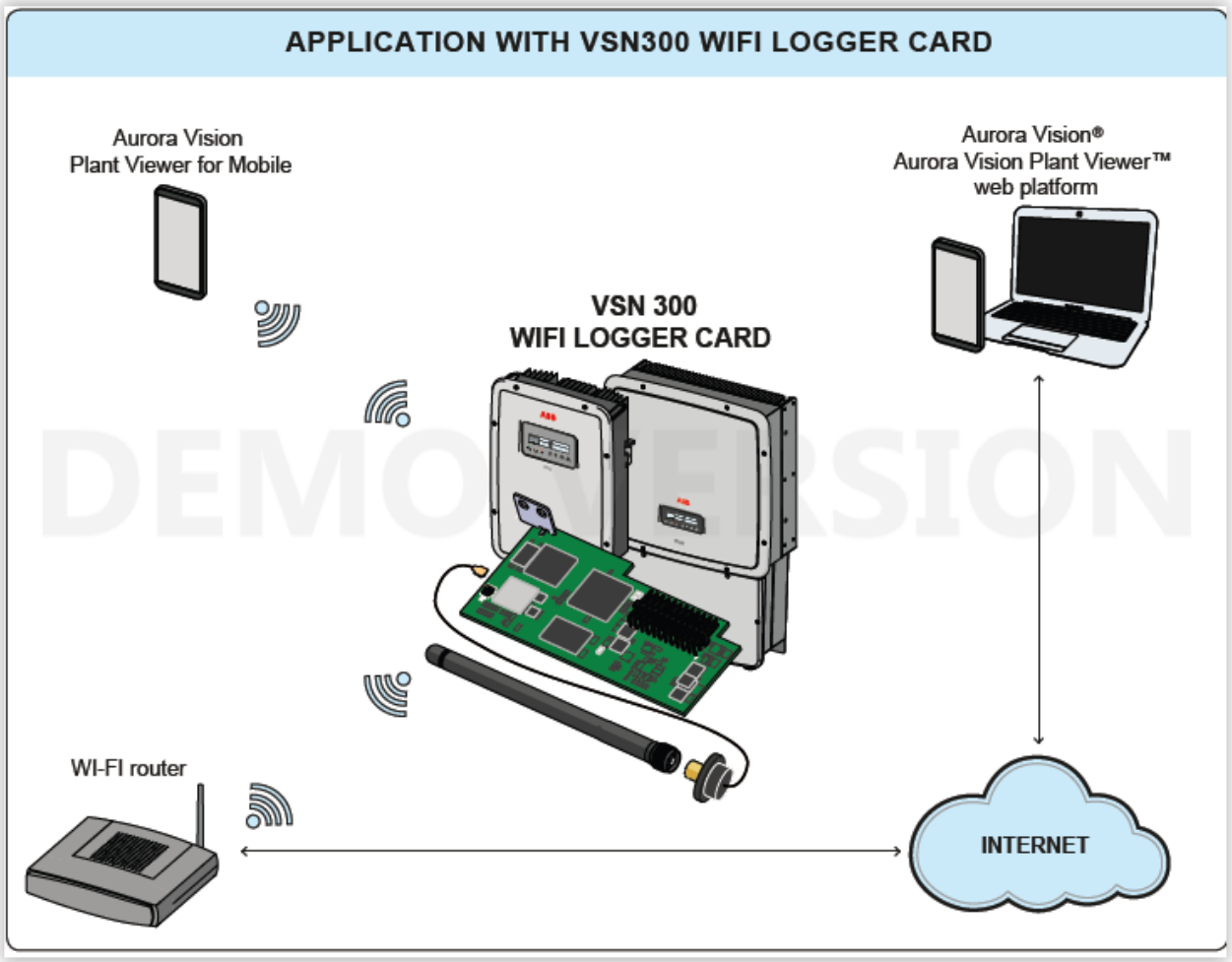
Slika 2.9 Princip povezivanja Aurora CDD [11]

Na slici 3.7 prikazani su način i mogućnosti povezivanja Aurora CDD-a s ostalim uređajima. Na mikroinvertore se povezuje pomoću bežične (wireless) tehnologije (Radio IEEE 802.15.4). Vrijeme preuzimanja podataka je svakih 60 sekundi. Moguće je povezati do 30 mikroinvertora na jedan Aurora CDD uređaj.

Komunikacija s modemom ili računalom ostvaruje se pomoću kabla (Ethernet RJ45 10/100 Mbps) ili bežično (Wi-Fi IEEE 802.11/24.GHz/10Mbps). Težina uređaja je 0,19 kg, a dimenzije 150x180x25 mm. Aurora CDD za rad koristi napon od 100-240 Uac.

2.1.4. VSN300 WI-FI LOGGER Card

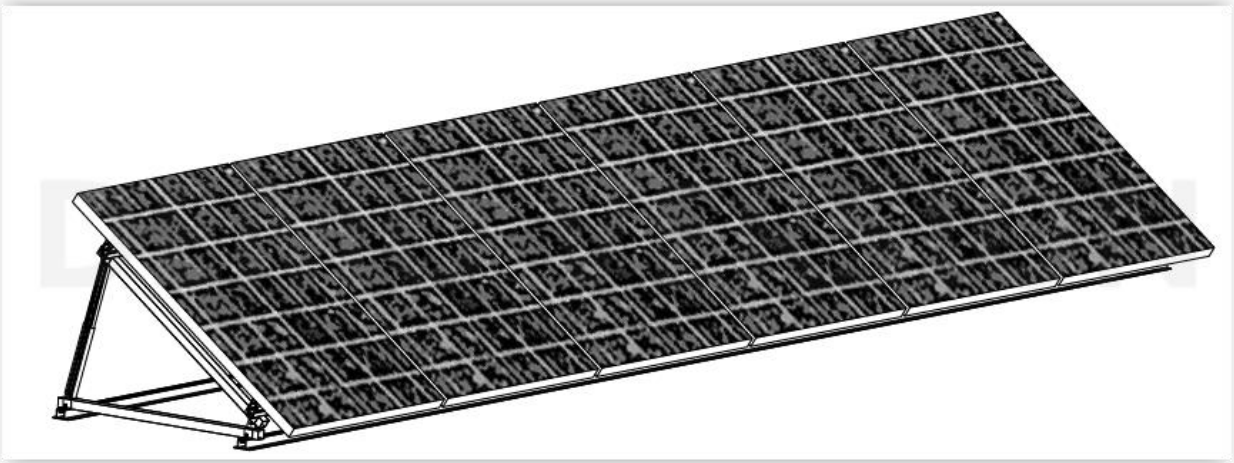
Wi-Fi Logger Card omogućuje bežično povezivanje invertora na lokalnu mrežu pomoću (Wireless connection). Omogućuje direktno povezivanje na računalo, pametne telefone ili tablet te je tako moguće nadgledati proizvodnju energije u svakom trenutku preko Aurora Vision Plant Viewer, tj Aurora Vision portala za daljinsko nadgledanje preko internet preglednika ili mobilne aplikacije (Aurora Vision Plant Viewer).



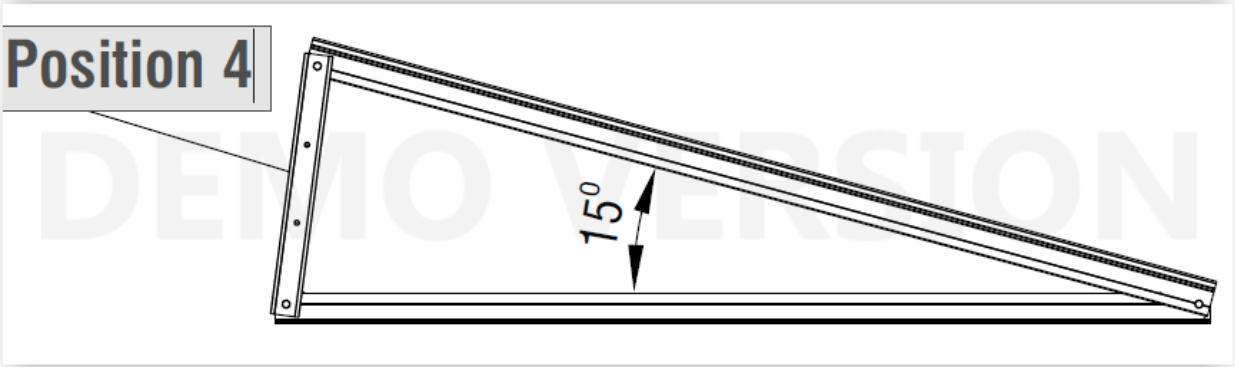
Slika 2.10 Shema povezivanja bežične kartice (Wi-Fi Logger Card) [11]

2.1.5. Konstrukcija

Konstrukciju je proizvela tvrtka ALUMIL SOLAR [3]. Konstrukcija je izrađena od aluminija što omogućava dugotrajan vijek trajanja bez korozije materijala. Konstrukcija je pričvršćenja za betonske blokove koji su direktno postavljeni na krov. Konstrukcija se sastoji iz trokuta izrađenih od aluminijskih profila. Nagibni kut tih trokuta se lako može mijenjati. Na horizontalne aluminijske profile, koji se montiraju na trokute, su postavljeni FN paneli. Paneli su na konstrukciju montirani vertikalno, što odgovara ovom tipu konstrukcije (slika 2.11). Nagibni kut panela je oko 20º, što se postiže postavljajući konstrukciju s nagibom od 15º, a krov je već nagnut oko 5º, slika 2.12.



Slika 2.11. Izgled noseće konstrukcije [11]



Slika 2.12. Kut za koji su paneli izdignuti od krova [11]

2.1.6. Instalacije za uzemljenje

Uzemljenje FN elektrane FTN izvedeno je tako da su kućišta panela i invertora spojena trakastim uzemljivačem (Fe/Zn trakom) na već postojeći temeljni uzemljivač Mašinskog fakulteta. Fe/Zn traka je povučena s krova preko fasade i kroz fasadu ili do tla ili do spojnih mjesta u za to predviđenim ormarićima (slike 2.13, 2.14.). Osim temeljnim uzemljivačem zgrade Mašinskog fakulteta, FN elektrana FTN je zaštićena i temeljnim uzemljivačima okolnih zgrada, poglavito temeljnim uzemljivačem glavne zgrade Fakulteta tehničkih nauka, koja joj je najbliža. Osim FN elektrane, na temeljni uzemljivač zgrade Mašinskog fakulteta spojeni su i drugi uređaji kojima je potrebno adekvatno uzemljenje (slika 2.15.).

Znači, iako uzemljivači nisu pravljeni ciljano za zaštitu FN elektrane, i dalje su adekvatni pri zaštiti postrojenja, jer osim što zatvaraju velik opseg, i međusobno su povezani u razgranat sustav što uzemljivaču dodatno smanjuje otpor, odnosno povećava struju koju uzemljivač može provesti bez da ljudi u blizini elektrane budu u opasnosti u slučaju kvara.



Slika 2.13. Način spajanja Fe/Zn trake s temeljnim uzemljivačem na zgradi FTN-a



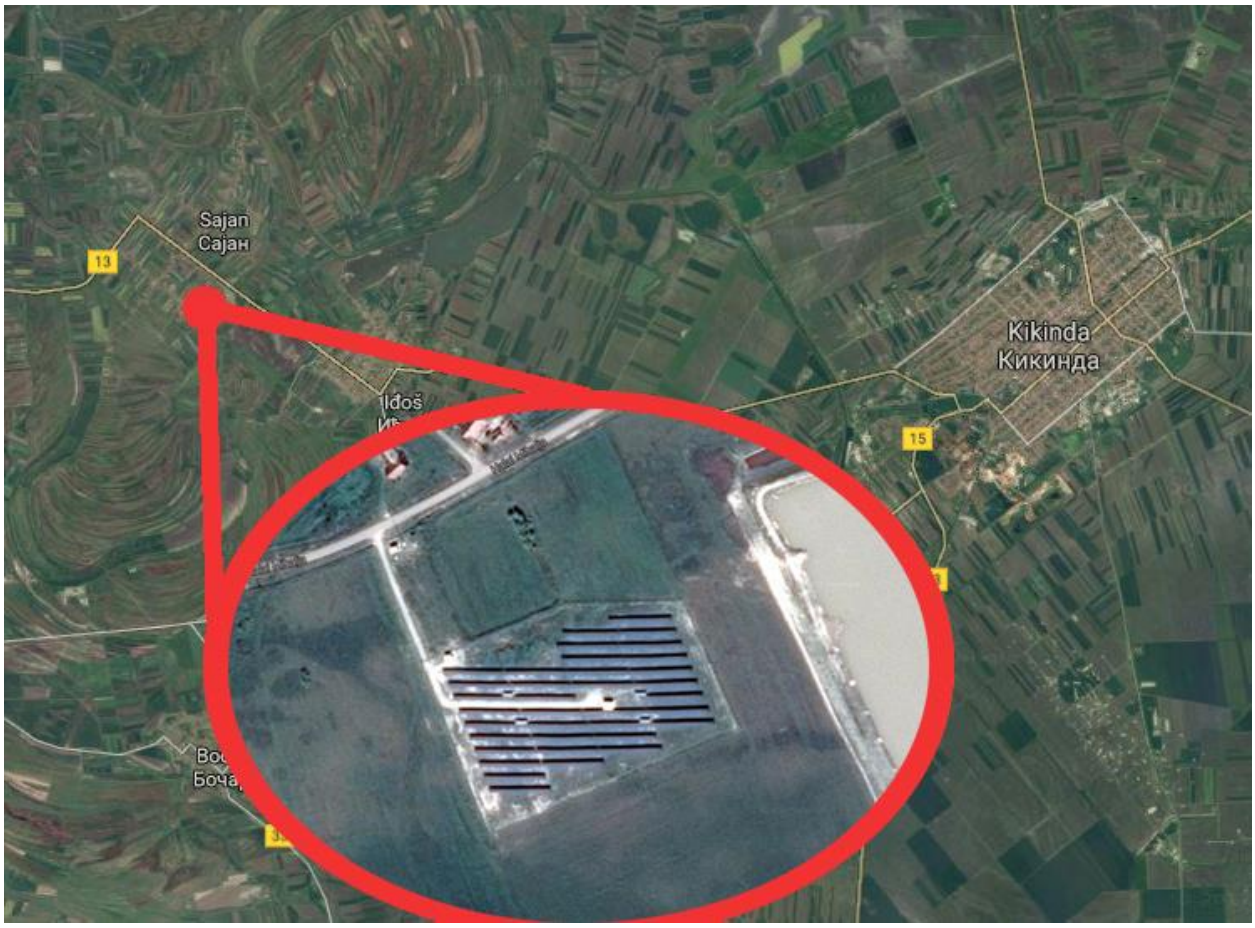
Slika 2.14 Uzemljenje uređaja preko temeljnog uzemljivača zgrade Mašinskog fakulteta



Slika 2.15 Spoj Fe/Zn trake s krova zgrade FTN-a s njenim temeljnim uzemljivačem

2.2. Opis fotonaponske elektrane Sajan i upoznavanje s instalacijama za uzemljenje

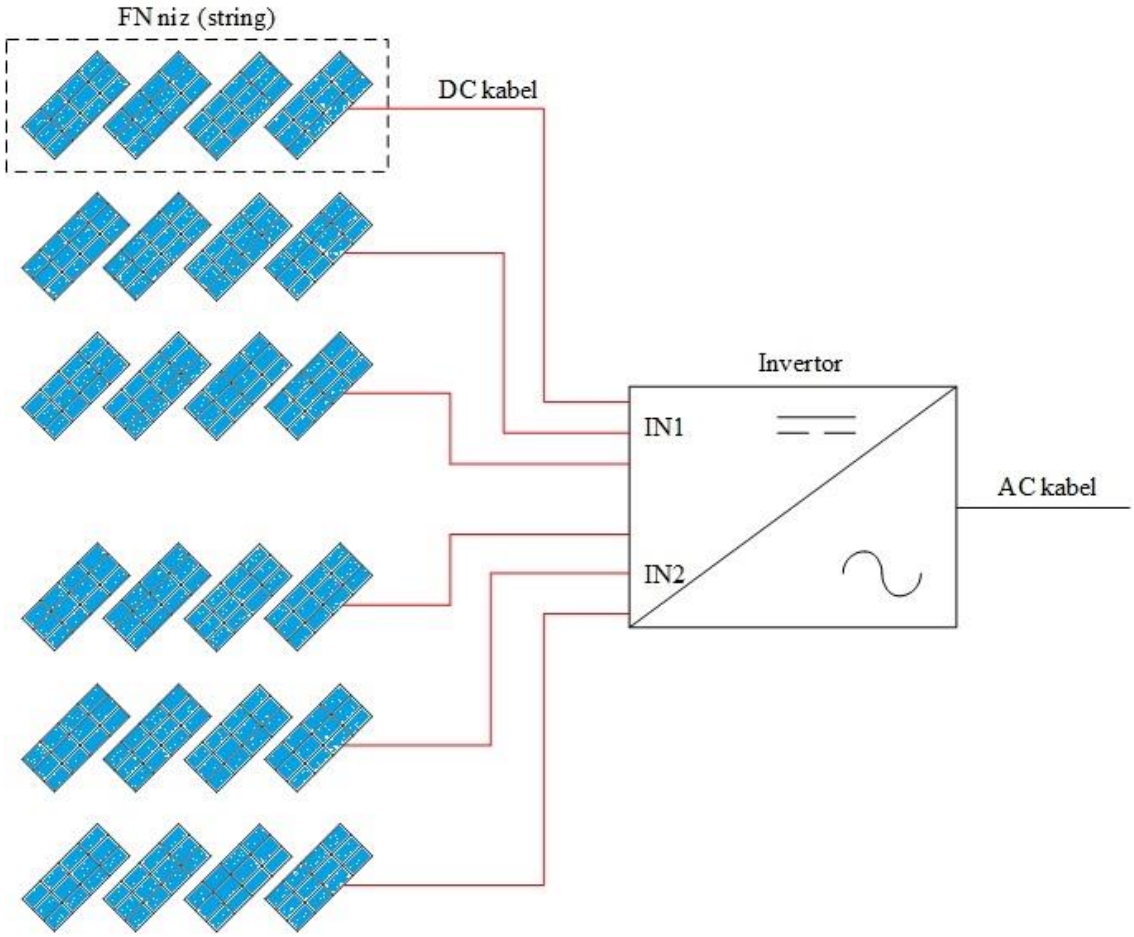
Fotonaponska elektrana Sajan (FN elektrana Sajan) nalazi se u selu Sajan u općini Kikinda, oko 15 kilometara zapadno od grada Kikinde (Slika 2.16.). FN elektrana Sajan sadrži 2364 panela, povezanih na 18 invertora u stringove, SN razvodno postrojenje s transformatorom, niskonaponsku izmjeničnu opremu i sustav za nadzor i upravljanje elektranom te potrebne priključne vodove.



Slika 2.16. Lokacija FN elektrane Sajan (slika preuzeta sa servisa google maps)

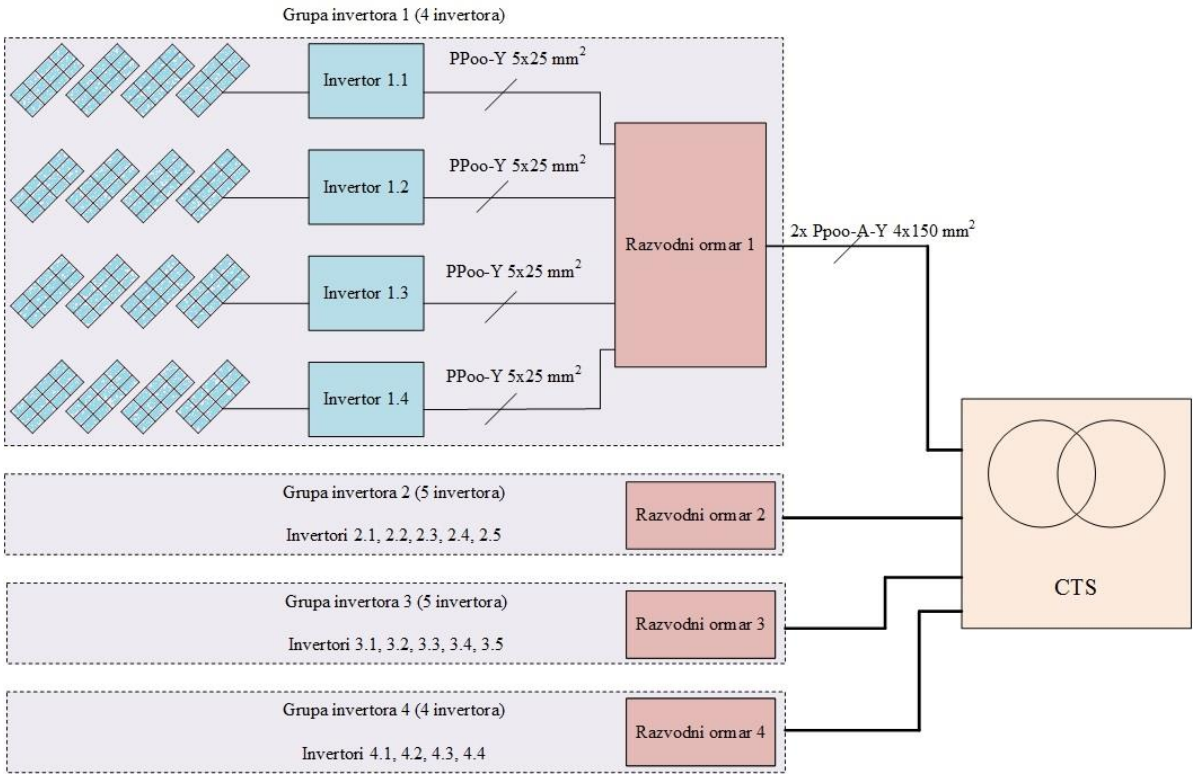
Paneli su postavljeni pod kutom od 28° što omogućuje maksimalnu iskoristivost sunčevog zračenja za geografsko područje na kojem se elektrana nalazi.

U elektrani postavljeno je 18 invertora, koji su međusobno identični i opisani su u dijelu 2.2.2. Invertori su isporučeni s takozvanom priključnom kutijom koja olakšava povezivanje i zaštitu invertorske jedinice, jer se unutar priključne kutije nalazi DC rastavljač, topljivi osigurači za zaštitu stringova, komponente za prenaponsku zaštitu DC strane invertora, te konektori za direktno povezivanje nizova serijski povezanih FN panela. Na ovaj način se izbjegava postavljanje DC razvodnih ormara čime se u značajnoj mjeri pojednostavljuje DC razvod.



Slika 2.17. Blok shema istosmjernog razvoda invertora snage 30 kW (shema izrađena u alatu MS Visio 2013)

Povezivanje panela u stringove izvedeno je kabelima namijenjenim za vanjsku montažu (otporni na UV zračenje, imaju širok opseg radne temperature, otporni su na kiseline itd.). Korišteni su kabeli tipa S-Flex01 1x6 mm^2, proizvođača FKS Jagodina. Tipska blok shema istosmjernog razvoda invertora prikazana je na slici 1.8 i ista je za sve invertore u elektrani. U elektrani je u četiri zone razmješteno ukupno 18 invertora. U zonama 1 i 4 postavljena su po 4 invertora dok je u zonama 2 i 3 postavljeno 5 invertora. Broj stringova, FN panela i ukupna snaga panela je prikazana u tablici 2.12. Na svih 18 invertora se vezuje po šest stringova, po tri na oba MPPT ulaza invertora (IN1 i IN2). Kod 17 invertora je broj FN panela u stringu 22, dok je kod jednog invertora (INV3.5) broj panela u stringu 20.



Slika 2.18. Blok shema NN razvoda napajanja invertora (shema izrađena u alatu MS Visio 2013)

Tablica 2.13. *Broj i snaga stringova FN panela u FN elektrani Sajan*

Invertor	Broj invertora	Broj stringa x broj panela		Ukupno panela	Pojedinačna snaga panela	Ukupna snaga panela po inv.
		Ulaz IN1	Ulaz IN2			
	kom	kom	kom	kom	Wp	kWp
TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X	17	3 x 22	3 x 22	132	245	32,34
	1 (INV3.5)	3 x 20	3 x 20	120	245	29,40

2.2.1. Paneli

FN paneli korišteni u FN elektrani Sajan su polikristalni paneli YL245P-29b, proizvođača Yingli Solar, serije YGE 60Cell 40mm. Navedeni FN panel prikazan je na slici 2.19.



Slika 2.19 Izgled polikristalnog FN panela YL245P-29b, proizvođača Yingli Solar [2]

Tablica 2.14. *Karakteristike FN panela* YL245P-29b

Tip modula			YL245P-29b
Izlazna snaga	P_{max}	W_p	245
Tolerancija izlazne snage	P_{max}	W	0/5
Efikasnost panela	h_{max}	%	15
Napon pri točki maksimalne snage P_{max}	U_{tms}	V	30,2
Struja pri točki maksimalne snage	I_{tms}	A	8,11
Napon praznog hoda	U_{ph}	V	37,8
Struja kratkog spoja	I_{ks}	A	8,63

2.2.2. Invertori

U FN elektrani Sajan postavljeni su invertori tvrtke ABB (POWER ONE), serije AURORA TRIO oznake TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X (slika 2.20.). Nazivna snaga invertorske jedinice je 27,6 kW, dok je maksimalna snaga invertora 30 kW. Radi se o string tipu invertora s dva nezavisna MPPT ulaza. Na oba MPPT ulaza invertora vežu se po tri FN stringa.



Slika 2.20 Izgled string invertora AURORA TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X, prizvođača ABB [6]

Tablica 2.14. *Karakteristike invertora AURORA TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X*

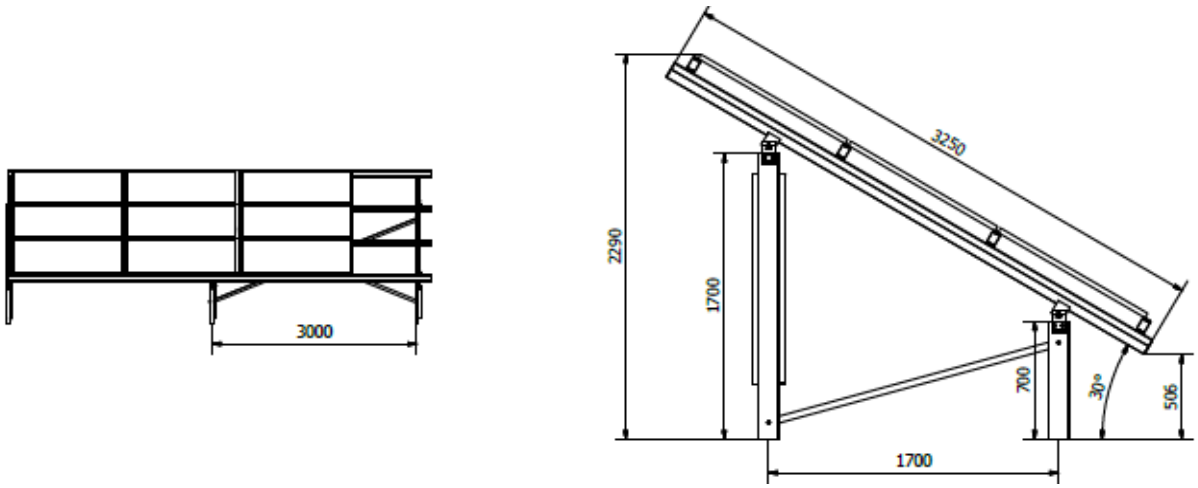
Parametri	TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X
Ulazni napon U_{dc}	620 V
Napon paljenja invertora U_{start}	175V
Maksimalna ulazna snaga P_{dc}	40 kW
Broj MPPT-a	2
Maksimalan napon za svaki MPPT	1000 V
Maksimalna ulazna struja I_{dc}/za svaki MPPT $I_{mpptmax}$	40 A/32 A
Broj faza	3W- 4W (+PE)
Nominalna snaga P_{ac}	27 600 W
Napon U_{ac}	400 V
Maksimalna struja I_{acmax}	45 A
Frekvencija, max	50 Hz
Efikasnost hmax	98%
Stand-by potrošnja	< 1 W

2.2.3. Komunikacija

Radi ispunjavanja zahtjeva Elektrovojvodine, nadzorni relej je opremljen komunikacijskim optičkim portom za prijenos stanja SN opreme putem EN61850 protokola. Prijenos signala od SN postrojenja u CTS do stanice za daljinski nadzor se ostvaruje 24 monomodnim optičkim kabelom koji je postavljan na relaciji SN kabla od PCC do CTS.

2.2.4. Konstrukcija

FN paneli su postavljeni na fiksnu konstrukciju AS189-P-30 proizvođača ALUMIL, Grčka. To je robusna konstrukcija koja se jednostavno adaptira za široki spektar terena. Konstrukcija je jednostavna za slaganje jer svi elementi dolaze pripremljeni za montažu. Na konstrukciju su montirana po 3 reda panela pod kutem od 28° u odnosu na tlo. Noseća konstrukcija s tehničkim karakteristikama dana je na slici 2.21.



Slika 2.21 Izgled noseće konstrukcije s tehničkim karakteristikama [14]

Svi metalni elementi noseće konstrukcije kao i svi elementi za međusobno povezivanje dijelova noseće konstrukcije, pričvršćivanje FN panela na noseću konstukciju i temeljenja, napravljeni su od toplo, duboko galvaniziranog čelika i aluminija. Čelični elementi noseće konstrukcije su direktno učvršćeni u zemlju i osiguravaju adekvatno učvršćenje noseće konstrukcije.

2.2.5. Centralna trafostanica (CTS)

U CTS objektu je smještena sva NN i SN oprema potrebna za predaju električne energije u distributivnu mrežu. Električna energija koju FN elektrana Sajan predaje u distributivnu mrežu mora biti na naponu od 20 kV te predana kablovskim vodom. Nakon što se invertorima obavi pretvaranje istosmjerne energije u izmjeničnu, daljnje prilagođavanje električne energije prema kriteriju naponskog nivoa ostvaruje se pomoću trofaznog energetskog transformatora 630 kVA, Dyn5, 0,42/20 kV koji se sa svom neophodnom SN i NN opremom postavlja u objekt CTS. U CTS-u je također smještena oprema za zaštitu 20 kV kablovskog razvoda fotonaponske elektrane i naponska i frekvencijska zaštita kao i oprema za prevenciju ulaska elektrane u otočni način rada. Izgled objekta CTS prikazan je na slici 2.22.



Slika 2.22. Izgled objekta CTS [14]

2.2.6. Instalacije za uzemljenje

Instalacije za uzemljenje u FN elektrani Sajan možemo podijeliti u tri dijela: uzemljenje objekta CTS, uzemljenje NN komponenata i uzemljenje gromobranske zaštite. Sva ta uzemljenja su međusobno povezana.

Objekt CTS-a izgrađen je od gotovih armirano-betonskih elemenata, temeljnih i podnih ploča koji su međusobno povezani odgovarajućim pocinčanim vijcima i bakrenim pletivom tako da tvore jednu galvansku cjelinu. Sukladno propisima CTS ima temeljni uzemljivač, tj. prirodnu unutrašnju konturu zaštitnog uzemljivača. Vanjska kontura zaštitnog uzemljivača izvedena je bakrenim užetom presjeka $50\,mm^2$ udaljenim 1 m od zida objekta i na dubini od 0,8 m. U kutevima ove konture zabijeni su štapni uzemljivači. Sonde (štapni uzemljivač) su izvedene od Fe/Zn cijevi φ76,1/6,5 mm 2,0 m. Sabirni zemljovod koji vodi ispod SN bloka povezan je s vanjskom konturom i temeljnim uzemljivačem. Na ovaj zaštitni uzemljivač vezani su svi metalni dijelovi (plaštevi energetskih kablova, vrata objekta CTS itd.), a ta veza je izvedena bakrenim kabelom od $35\,mm^2$. Spoj temeljnih ploča sa sabirnim zemljovodom izveden je pomoću brončane stezaljke.

Pri polaganju uzemljivačkog voda u zemlju, bakreno uže $50\,mm^2$ bilo je zatrpavano dobro usitnjenom zemljom. Svi spojevi sabirnog zemljovoda s temeljnim pločama i bakrenim užetom su pouzdano izvedeni i zaštićeni tehničkom mašću ili zaliveni bitumenom (ovisno o mjestu spoja).

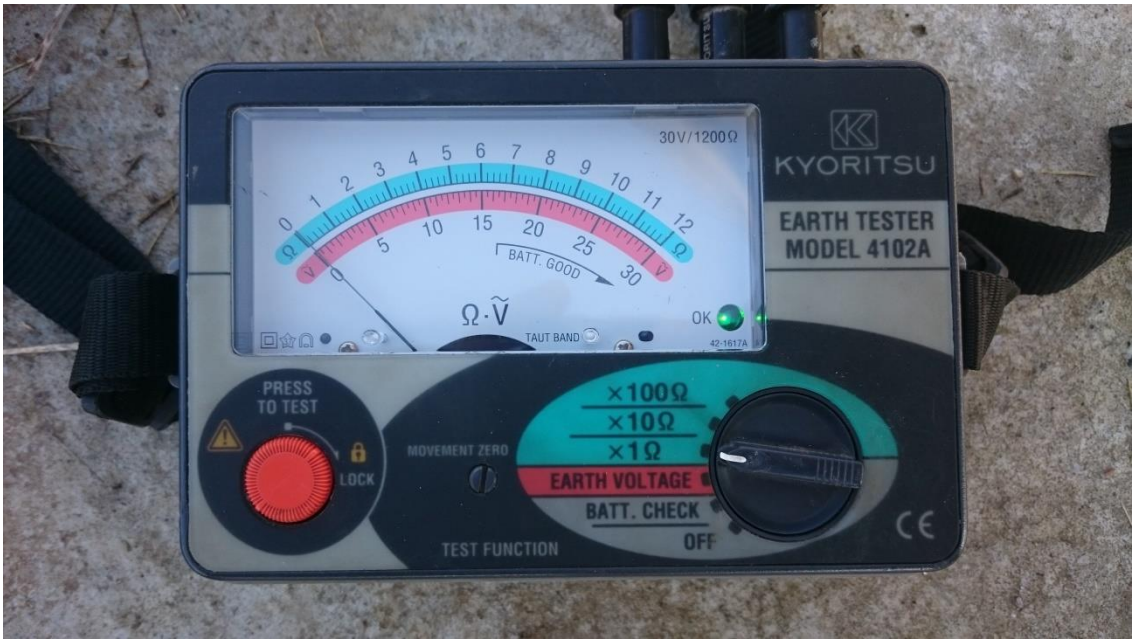
Uzduž trase NN izmjeničnih i istosmjernih kablova postavljen je i uzemljivač u vidu Fe/Zn trake 25x4 mm. Taj uzemljivač spojen je i na uzemljivač objekta CTS. Izjednačenje potencijala u

elektrani obuhvaća sve metalne elemente i površine elektrane (zaštitna ograda i vrata, noseća konstrukcija, stupovi video nadzora, kontejnerski objekt, metalna noseća konstrukcija invertora i razvodnih ormara, razvodni ormari komunikacijskog sustava i sustava video nadzora). Izjednačenje potencijala je sprovedeno i na nivou FN panela njihovom međusobnom ekvipotencijalizacijom i grupnim povezivanjem na sustav uzemljenja u FN elektrani.

U FN elektrani Sajan zaštita od direktnog udara groma izvedena je postavljenjem prihvatnog sustava gromobranske zaštite sa štapnim hvataljkama, s uređajem za rano pokretanje. Prihvatni sustav čine dvije štapne hvataljke s uređajima s ranim pokretanjem tip IONIFLASH MACH 60NG proizvođača France Paratonnerres. Pravilnim rasporedom hvataljki može se postići štićenje cjelokupnog kompleksa i opreme u njemu te su u ovoj elektrani su postavljene dvije štapne hvataljke s uređajima za rani start.

3. Opis mjernog uređaja i postupka mjerenja s mjernim uređajem

Uređaj korišten za mjerenje otpora uzemljenja u ovom radu dolazi od kineskog proizvođača KYORITSU, model 4102A. To je uređaj za mjerenje otpora distributivnih vodova, kućnih instalacija, električnih uređaja, temeljnih uzemljivača itd. Sadrži bateriju tako da nije potrebno vanjsko napajanje da bi se obavilo mjerenje. Dizajniran je prema sigurnosnoj normi IEC 61557, a otpornost na prašinu i vlagu je u skladu s normom IEC 60529 (IP54), što znači da se mjerenja mogu obavljati i u vrlo nepovoljnim vremenskim prilikama. Uz to uređaj je jednostavan za upotrebu te lak i ugodan za nošenje. Pored samog mjernog uređaja, za mjerenja su nam potrebne i dvije sonde za zabijanje u zemlju i popratni vodiči za spajanje tih sondi s uređajem. Izgled uređaja za vrijeme procesa mjerenja prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Mjerni uređaj KYORITSU 4102A

3.1. Teorijski opis mjerenja uzemljenja

Uzemljenje u električnom smislu predstavlja spoj uzemljivača sa električnom zemljom, odnosno točkom nultog potencijala. Električki najbitnija stavka kod uzemljenja je otpor uzemljenja koji se sastoji od tri dijela:

- Otpor metalnog spoja na elektrodi uzemljenja
- Otpor dodira između elektrode uzemljenja i najbližeg sloja zemljišta
- Otpor zemljišta koje okružuje elektrodu uzemljenja i najbližeg sloja zemljišta (otpor rasprostiranja)

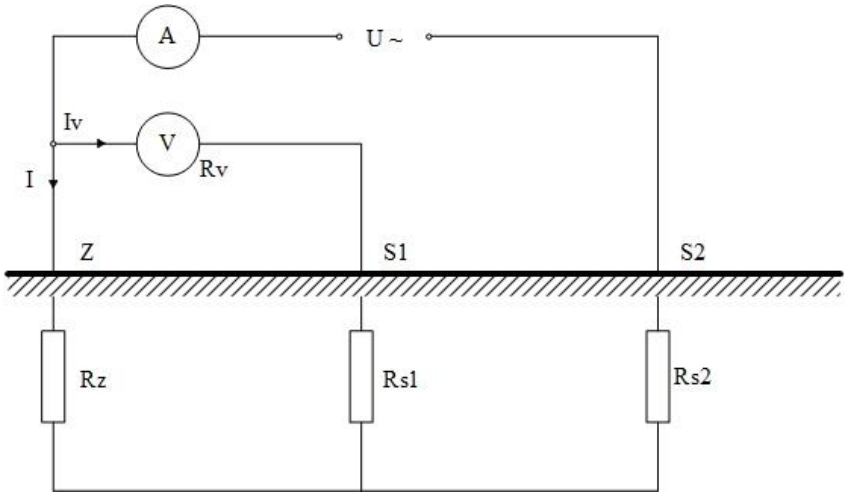
Otpor uzemljenja je zbroj otpora rasprostiranja i otpora zemljovoda. Uzemljivač predstavlja vodič koji se na određenoj dubini postavlja u zemlju ili se postavlja u beton koji je u dobroj vodljivoj vezi sa zemljom. Otpor zemljišta ovisi o nekoliko čimbenika (geološke značajke

zemljišta, kemijskom sastavu tla, temperaturi zemljišta i količini vlage u tlu) te se ovisno o godišnjim dobima i vremenskim prilikama mijenja. Bez obzira što se otpor tla tijekom godine mijenja, već na malim dubinama su te promjene dovoljno male da bi se u realnim uvjetima zanemarile.

Uzemljenje treba ispuniti tri glavna zadatka:

- Osigurati pravilno funkcioniranje raznih električnih instalacija – pogonsko uzemljenje
- Osigurati zaštitu čovjeka od visokih napona dodira i napona koraka koji se mogu pojaviti uslijed kvarova na izolaciji – zaštitno uzemljenje
- Omogućiti prenaponska pražnjenja – prenaponsko ili gromobransko uzemljenje

Postoji više različitih metoda mjerenja otpora uzemljenja (UI metoda, Wiechertova mosna metoda, Stösselova mosna metoda, Behrendova metoda, Behrendova kompenzacijaska metoda itd.). Pri izradi ovog rada korištena je UI metoda (slika 3.2.).



Slika 3.2. Nadomjesna shema mjerenja uzemljenja UI metodom (shema izrađena u programskom alatu MS Visio 2013)

Struju koja protječe kroz dva uzemljivača mjerimo ampermetrom, a napon između uzemljivača i okolne zemlje mjerimo voltmetrom. Bitno je postaviti sondu izvan naponskog lijevka. Kod manjih uzemljivača je radijus naponskog lijevka između 5 i 10 metara. Ako je voltmetar priključen između uzemljivača Z i sonde, mjerimo napon U_{ZS2}, a ako je priključen između uzemljivača S1 i sonde, mjerimo napon U_{ZS1}. S obzirom da je poznata struja I, koja protječe kroz uzemljivače, otpor uzemljenja računa se pomoću Ohmovog zakona.

Otpor uzemljivača Z je:

$$R_Z = \frac{U_{ZS1}}{I} \tag{3.1}$$

Otpor uzemljivača S2 je:

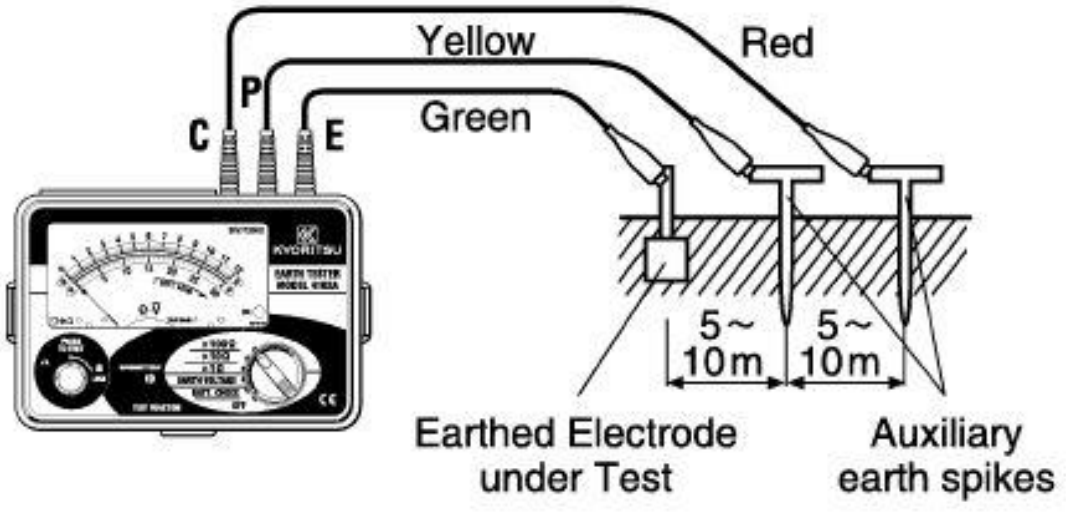
$$R_{S2} = \frac{U_{ZS2}}{I} \tag{3.2}$$

Pri mjerenju UI metodom potreban je voltmetar sa što većim unutarnjim otporom kako bi se osigurao što manji utjecaj sonde na mjerni rezultat. Zato su u upotrebi često elektronički voltmetri koji imaju veliki ulazni otpor. Otpor pomoćnog uzemljivača utječe na struju kroz zemlju, zato je bitno da otpor bude što manji da se potrebna struja može postići sa što manjim naponom. UI metoda se koristi kod velikih površinskih uzemljivača gdje je otpor jako mal te može iznositi tek nekoliko desetina oma ili manje. U takvim slučajevima UI metodom je jedino moguće pouzdano izmjeriti otpor uzemljenja.

3.2. Postupak provjere i mjerenja uzemljenja

Postupak mjerenja uzemljenja pomoću uređaja KYORITSU 4102A je jednostavan je i izvodi se u nekoliko koraka.

- Preklopka uređaja se postavlja u položaj „BATT. CHECK“ i pritiskom na tipku „PRESS TO TEST“ provjerava se može li baterija uređaja dati dovoljan napon za pouzdano mjerenje. Ako se kazaljka otkloni do područja „BATT. GOOD“, baterija uređaja je u redu, u suprotnom potrebno je promijeniti baterije.
- U uređaj se priključuju pomoćni vodiči te se u zemlju na odgovarajuća mjesta zabijaju mjerne sonde kako je prikazano na slici 3.3. Dva vodiča priključuju se na sonde zabijene u zemlju, a jedan na uzemljivač kojem se mjeri otpor.



Slika 3.3. Prikaz spajanja mjernog uređaja s uzemljivačem i sondama [10]

- Preklopku uređaja se postavlja u položaj „EARTH VOLTAGE“. Ako kazaljka pokazuje preko 10V može doći do grešaka u mjerenju otpora uzemljenja.
- Preklopka uređaja se postavlja u položaj „x100Ω“. Pritiskom na tipku „PRESS TO TEST“ testiramo otpor. Ako je otpor tla previsok „OK lampica“ neće goriti. U tom slučaju potrebno je smanjiti otpor. Otpor se može smanjiti na više načina: pregledavanjem spojeva vodiča i uređaja te spojeva sondi s vodičima, promjenom mjesta zabadanja sondi ili prelijevanjem vode preko mjernih sondi.
- U slučaju da se kazaljka ne pomakne s nulte vrijednosti, smanjuje se mjerno područje prebacivanjem preklopke u položaj „x10Ω“ ili „x1Ω“ po potrebi.

Uobičajeno je da je kod dobro dimenzioniranih uzemljivača otpor uzemljenja manji od 1 Ω, često samo nekoliko desetina oma. Bitno je pri zabadanju sonde birati, ako je moguće, vlažno tlo te je bitno da sonda ima dobar dodir s tlom u koje je zabodena. To se osigurava pažljivim zabadanjem pri kojem se što manje lateralno pomiče sonda tako da ne napravi širu rupu nego što je potrebno. U slučaju da je tlo suho, dobra provodnost se može osigurati i polijevanjem sonde s vodom. Također bitno je osigurati i dobar kontakt vodiča koji se spaja na instalacije za uzemljenje. Često se instalacije za uzemljenje ne čiste jer za time inače nema potrebe te se na njih može nakupiti tanki sloj mehaničke nečistoće. Dobar kontakt se može osigurati umjerenom upotrebom brusnog papira na mjestu spoja da se ne skine previše zaštitnog sloja, a da se ipak osigura dobra provodnost na spoju.

3.3. Izrada plana mjerenja

Plan mjerenja se izrađuje da se ubrzaju i ekonomiziraju mjerenja, odnosno da se ne previde neki aspekti mjerenja ili da se neka mjerenja ne ponove više puta nepotrebno. Mjerenja su obavljena na FN elektranama Sajan i FTN.

Mjerenja na FN elektrani FTN sastoje se od mjerenja otpora trakastog Fe/Zn uzemljivača na više mjesta da bi se utvrdila točnost mjerenja. Rezultati će biti bliski, jer su trakasti uzemljivači između objekata povezani na više mjesta te tako čine razgranatu mrežu zaštitnih vodiča.

Mjerenja na FN elektrani Sajan sastoje se od mjerenja otpora uzemljivača svake grupe invertora, mjerenja otpora uzemljivača gromobranskih instalacija te mjerenja otpora uzemljivača na objektu CTS.

4. Mjerenje

4.1. Mjerenje na fotonaponskoj elektrani FTN

Mjerenja na FN elektrani FTN obavljena su 19.10.2016. godine. Otpor uzemljivača mjeren je na tri mjesta. Na srednjoj zgradi Mašinskog fakulteta (zgrada na kojoj se nalazi elektrana), i na zgradi Fakulteta tehničkih nauka. Spoj na uzemljivač na srednjoj zgradi Mašinskog fakulteta prikazan je na slici 4.1., a spoj na zgradi FTN-a prikazan je na slici 4.2.



Slika 4.1. Način spajanja na uzemljivač na srednjoj zgradi Mašinskog fakulteta



Slika 4.2. Način spajanja na uzemljivač na zgradi FTN-a

Osim spoja sa instalacijama za uzemljenje, za uspješno mjerenje potrebno je zabosti i mjerne sonde na odgovarajući način. Način zabadanja sondi u tlo i spojevi sondi s vodičima prikazani su na slikama 4.3, 4.4, 4.5. i 4.6.



Slika 4.3. Spoj vodiča s mjernom sondom izvučenom iz zemlje



Slika 4.4. Spoj vodiča s mjernom sondom



Slika 4.5. Spoj vodiča s mjernom sondom izvučenom iz zemlje



Slika 4.6. Spoj vodiča s mjernom sondom

Otpori dobiveni kao rezultat mjerenja su prema očekivanju mali. S obzirom da se uzemljenje sastoji od većeg broja umreženih trakastih vodiča koji imaju dobru provodnost bilo je za očekivati da će uzemljenje imati dobru vodljivost.

Vrijednosti dobivenih otpora su:

- Otpor uzemljivača na srednjoj zgradi Mašinskog fakulteta: $R_x = 0,3\Omega$ (slika 4.7.)
- Otpor uzemljivača na zgradi FTN-a: $R_x = 0,2\Omega$ (slika 4.8.)



Slika 4.7. Otpor uzemljivača na srednjoj zgradi Mašinskog fakulteta



Slika 4.8. Otpor uzemljivača na zgradi FTN-a

4.2. Mjerenje na fotonaponskoj elektrani Sajan

Mjerenja na FN elektrani Sajan obavljena su 4.11.2016. godine. Mjereni su otpori uzemljenja na svakoj grupi invertora, na uzemljivačima gromobrana te na uzemljenju objekta CTS.

Prvo su obavljena mjerenja na grupama invertora, te je otpor uzemljenja također prema očekivanju bio vrlo nizak. Zatim su obavljena mjerenja na gromobranima MS2 i MS3 te na uzemljivaču objekta CTS. Najniži otpor uzemljenja je prema očekivanjima bio na objektu CTS, jer je objekt osim trakastim uzemljivačem uzemljen još i sa šipkama vertikalno zabodenim u zemlju. Rezultati mjerenja dani su u tablici 4.1.

Tablica 4.1. *Rezultati mjerenja otpora uzemljenja na FN elektrani Sajan*

Uzemljenje komponente	$R_x(\Omega)$
Grupa invertora 1	0,01
Grupa invertora 2	0,05
Grupa invertora 3	0,1
Grupa invertora 4	0,05
Gromobran MS2	0,05
Gromobran MS3	0,2
Uzemljenje transformatora (CTS)	0,01

Načini spajanja na instalacije za uzemljenje prikazani su na slikama 4.9. – 4.14.



Slika 4.9. Grupa invertora 1 s mjernim uređajem i vodičima



Slika 4.10. Mjerni instrument kod grupe invertora 2



Slika 4.11. Mjerni instrument spojen na grupu invertora 3



Slika 4.12. Spoj vodiča s uzemljivačem gromobrana MS2



Slika 4.13. Mjerni uređaj prilikom mjerenja otpora uzemljenja transformatora (CTS)



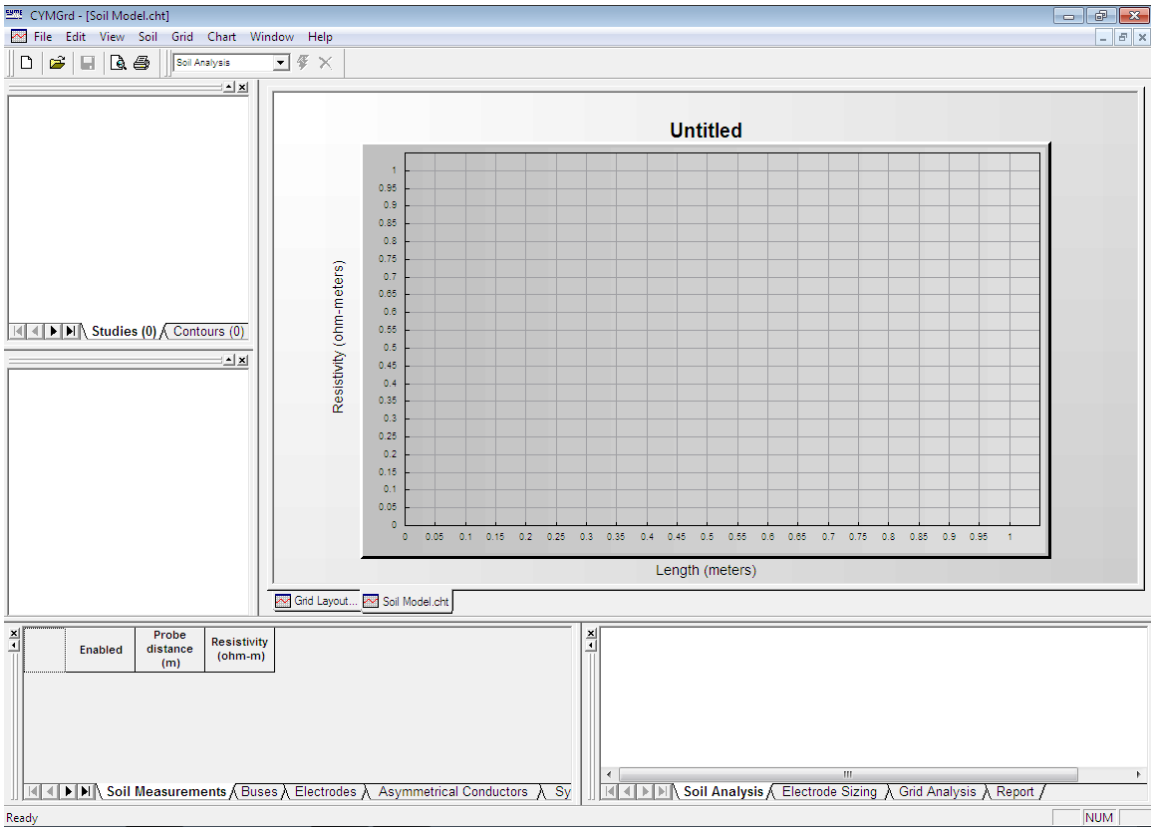
Slika 4.14. Spoj vodiča s instalacijom za uzemljenje transformatora

5. Programski alat CYMGRD

CYMGRD je programski alat koji pomaže inženjerima pri dizajniranju uzemljenja za trafostanice ili druge građevine. Alat se također može koristiti za interpretacije rezultata mjerenja otpornosti tla, razina potencijala tla i procjenu opasnih točaka u zadanom području.

Program podržava analizu tla kao jednoslojni i dvoslojni model. Također moguće je računati i najveće dozvoljene napone koraka i dodira koristeći IEEE standard 80-2000. Korisnik unosi struju kvara, debljinu i otpornost površinskog sloja tla (npr. usitnjeni kamen) te tjelesnu težinu i vrijeme izlaganja struji kvara pri proračunu utjecaja struje kvara na promatranu osobu.

U CYMGRD-u je moguće i modeliranje uzemljivača koristeći ravne (vodoravno položene) uzemljivače, štapne uzemljivače i uzemljivače u obliku lukova (vodoravno položene). Tako modelirani uzemljivači koriste se pri simuliranju potencijala tla i napona dodira na željenom području. Moguće je prikazati i ekvipotencijalne konture za potencijal tla i napon dodira i grafove koji prikazuju napon dodira i koraka u bilo kojem smjeru kretanja u odnosu na model. Grafovi su obojeni i mogu biti prikazani u 2D ili 3D prikazu te se tako lako može procijeniti sigurnost osoblja i opreme u blizini instalacija za uzemljenje. Izgled korisničkog sučelja programskog alata CYMGRD prikazano je na slici 5.1.



Slika 5.1. Korisničko sučelje programskog alata CYMGRD

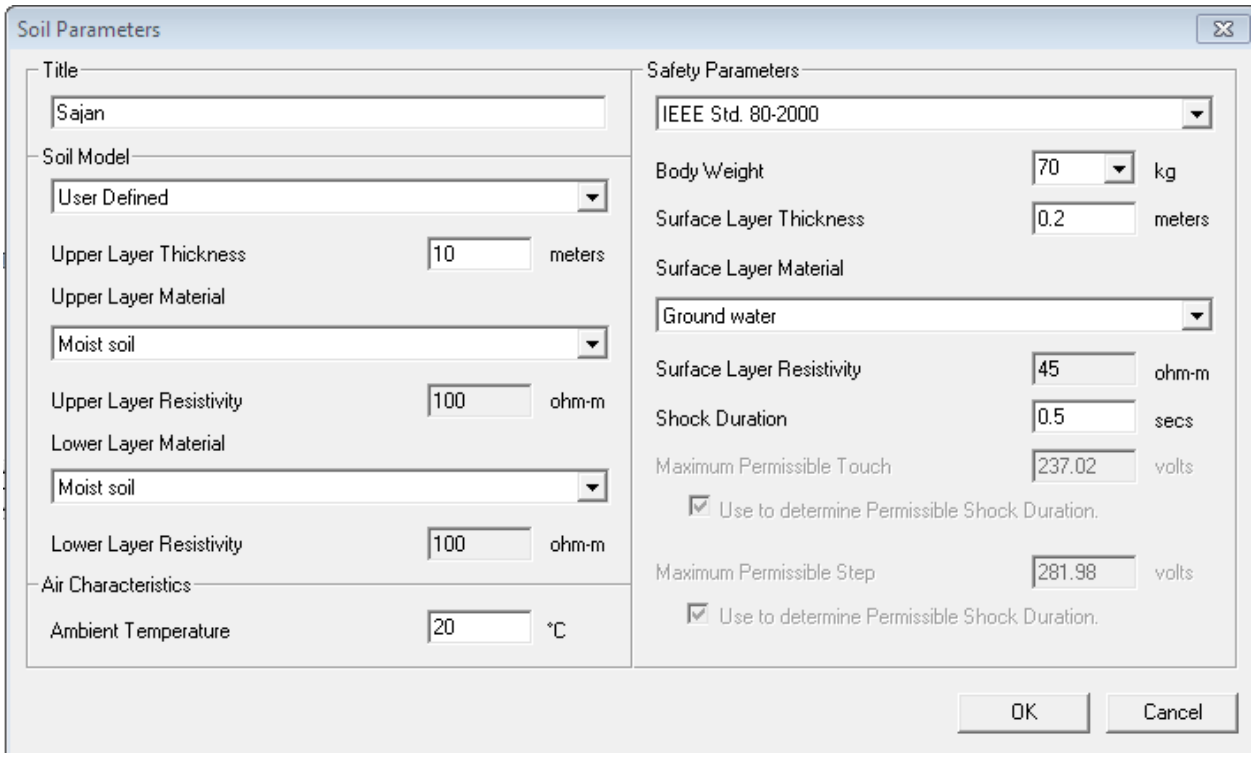
6. Modeliranje i simulacija uzemljenja

Simulacija uzemljenja postrojenja u programskom alatu CYMGRD sastoji se od 4 koraka: analiza tla (*Soil analysis*), analiza instalacija za uzemljenje (*grid analysis*), grafički prikaz potencijala (*contour plot)* i grafički prikaz utjecaja na promatrača (*profile plot).*

6.1. Analiza tla (*soil analysis*)

Pri analizi uzemljenja postrojenja, prvi korak je analiza tla (slika 6.1.). Pri analizi tla određuju se parametri pomoću kojih program računa otpornost tla i način rasprostiranja električne energije kroz tlo. Korisnik bira između jednoslojnog i dvoslojnog modela tla, odabire debljinu gornjeg sloja te unosi otpornost svakog sloja. Otpornosti slojeva je moguće unijeti ručno ili iskoristiti neku od opcija koje programski alat sadržava u sebi.

Osim otpornosti slojeva tla korisnik unosi i podatke o promatraču. Ti podaci se mogu u simulaciji koristit za simuliranje struje kvara na promatrača u različitim položajima u odnosu na instalaciju uzemljenja.



Slika 6.1. Parametriranje tla u programskom alatu CYMGRD

Uneseni parametri na slici 6.1. su parametri za FN elektranu Sajan. Tlo na kojem je smještena FN elektrana Sajan je poljoprivredno tlo sedme (najlošije) klase. Poljoprivredno tlo sedme klase karakterizira debljina površinskog sloja do 25 cm gdje počinje glina. To tlo ima ili preveliku ili premalu drenažnu moć, u ovom konkretnom slučaju FN elektrane Sajan tlo ima premalu

drenažnu moć te velika količina padalina ostaje na površini. Zato su karakteristike tla unesene na ovaj način.

6.2. Analiza instalacija za uzemljenje (*grid analysis)*

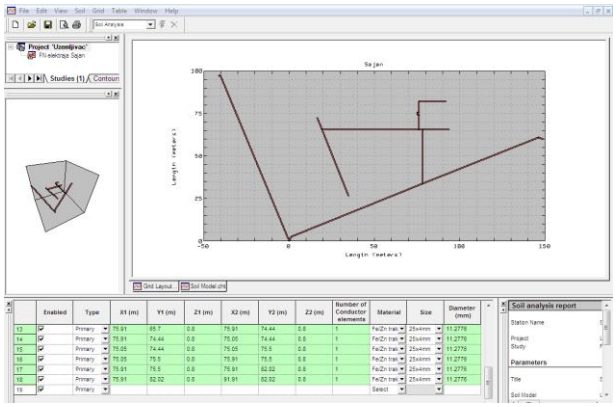
Analiza instalacija za uzemljenje podrazumijeva parametriranje struje kvara (slika 6.2.) i modeliranje uzemljivača (slike 6.3. i 6.4.). Struja kvara se parametrira unošenjem zadanih parametara. Pri proračunima CYMGRD koristi vrijednosti struje kvara (*LG Fault Current*) u amperima i odnos X/R. Ostale parametre CYMGRD koristi pri računanju faktora dijeljenja struje u slučaju da u modelu postoji i udaljeni doprinos struji kvara što u ovom radu nije slučaj.

Ovdje se koriste podaci dani u projektu za svaku FN elektranu. Struja kvara koja se koristi pri simulaciji Fotonaponske elektrane Sajan sastoji se od doprinosa struji kvara iz mreže i doprinosa od strane elektrane. Projektom predviđeni doprinos struji kratkog spoja iz mreže napona 20kV je $I_k = 981A$ i odnos $R/X = 1,011$. Svaki invertor može doprinijeti struji kvara s 2% većom strujom od nazivne tj. $I_{ki} = 46A$. S obzirom da elektrana ima 18 invertora, ukupan doprinos struji kvara sa strane elektrane iznosi $18 \times 46A = 828A$. Ukupna struja kvara u FN elektrani sajan iznosi $I_k + I_{ki} = 981A + 828A = 1809A$ (Slika 5.4.)

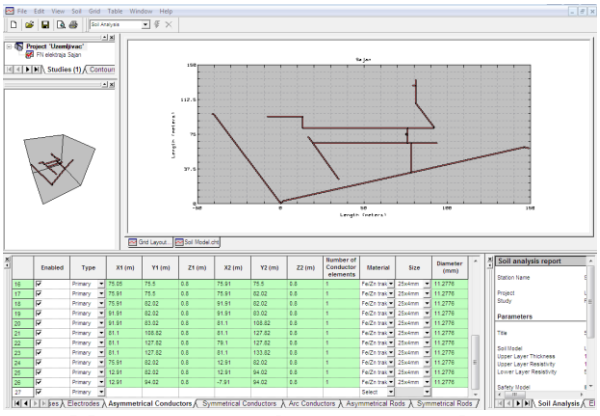
	Enabled	Bus ID	LG Fault Current (amps)	Fault Duration (secs)	Remote Contributio n (%)	LG X/R	Rtg (ohms)	Transmissi on Lines	Rdg (ohms)	Distribution Feeders
1	☑	Kvar	1809	0.5	100	1.011	100	1	200	1
2	☑									

Slika 6.2. Parametriranje struje kvara

Nakon parametriranja struje kvara potrebno je modelirati uzemljivač. Osim jednostavnih uzemljivača sve instalacije za uzemljenje se sastoje od više elemenata.



Slika 6.3. Unos elemenata instalacije za uzemljenje (1)



Slika 6.4. Unos elemenata instalacije za uzemljenje (2)

CYMGRD podržava horizontalno položene uzemljivače, štapne uzemljivače i uzemljivače u obliku luka. Ovisno o modelu, horizontalno postavljeni i štapni uzemljivači se mogu unositi kao ravnopravno raspoređeni elementi po zadanom području ili kao zasebni elementi. U promatranom slučaju samo su štapni uzemljivači kod objekta CTS (*Symmetrical rods)* i pripadajući im horizontalni uzemljivači (*Symmetrical conductors)* unošeni kao ravnopravno raspoređeni dok su svi ostali elementi unošeni kao zasebni (*Asymmetrical conductors).* Štapni uzemljivači određeni su položajem, dubinom na kojoj se nalaze, duljinom, materijalom od kojeg su napravljeni i promjerom. Horizontalno položeni uzemljivači određeni su početnom i krajnjom točkom, dubinom na kojoj su postavljeni, materijalom od kojeg su napravljeni i presjekom. Početna i krajnja točka se unose kao točke u koordinatnom sustavu. Nakon unošenja svih asimetričnih elemenata u CYMGRD, tablica elemenata prikazana je na slici 6.5.

Osim u slučajevima s izrazito jednostavnim instalacijama za uzemljenje ovaj korak je najzahtjevniji i od korisnika zahtjeva najviše vremena.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☑	Primary	0	0	0.8	1.16	2.73	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
2	☑	Primary	1.16	2.73	0.8	78.16	33.7	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
3	☑	Primary	78.16	33.7	0.8	78.16	65.7	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
4	☑	Primary	78.16	33.7	0.8	146.16	61	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
5	☑	Primary	146.16	61	0.8	148.96	59.9	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
6	☑	Primary	78.16	65.7	0.8	93.86	65.7	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
7	☑	Primary	78.16	65.7	0.8	75.91	65.7	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
8	☑	Primary	75.91	65.7	0.8	19.21	65.7	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
9	☑	Primary	19.21	65.7	0.8	16.61	72.3	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
10	☑	Primary	19.21	65.7	0.8	34.71	26.7	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
11	☑	Primary	0	0	0.8	-40.23	97.25	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
12	☑	Primary	-40.23	97.25	0.8	-41.23	97	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
13	☑	Primary	75.91	65.7	0.8	75.91	74.44	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
14	☑	Primary	75.91	74.44	0.8	75.05	74.44	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
15	☑	Primary	75.05	74.44	0.8	75.05	75.5	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
16	☑	Primary	75.05	75.5	0.8	75.91	75.5	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
17	☑	Primary	75.91	75.5	0.8	75.91	82.02	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
18	☑	Primary	75.91	82.02	0.8	91.91	82.02	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
19	☑	Primary	91.91	82.02	0.8	91.91	83.02	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
20	☑	Primary	91.91	83.02	0.8	81.1	108.82	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
21	☑	Primary	81.1	108.82	0.8	81.1	127.82	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
22	☑	Primary	81.1	127.82	0.8	79.1	127.82	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
23	☑	Primary	81.1	127.82	0.8	81.1	133.82	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
24	☑	Primary	75.91	82.02	0.8	12.91	82.02	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
25	☑	Primary	12.91	82.02	0.8	12.91	94.02	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
26	☑	Primary	12.91	94.02	0.8	-7.91	94.02	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
27	☑	Primary	-7.91	94.02	0.8	-26.24	94.02	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
28	☑	Primary	-7.91	94.02	0.8	-7.91	99.02	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
29	☑	Primary	-26.24	94.02	0.8	-26.24	97.02	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
30	☑	Primary	-26.24	97.02	0.8	-20.44	97.02	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
31	☑	Primary	-26.24	97.02	0.8	-26.24	103.61	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
32	☑	Primary	-40.23	97.25	0.8	40.27	133.82	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776
33	☑	Primary	40.27	133.82	0.8	109.7	133.82	0.8	1	Fe/Zn trak	25x4mm	11.2776

Soil Measurements | Buses | Electrodes | **Asymmetrical Conductors** | Symmetrical Conductors | Arc Conductors | Asymmetrical Rods | Symmetrical Rods

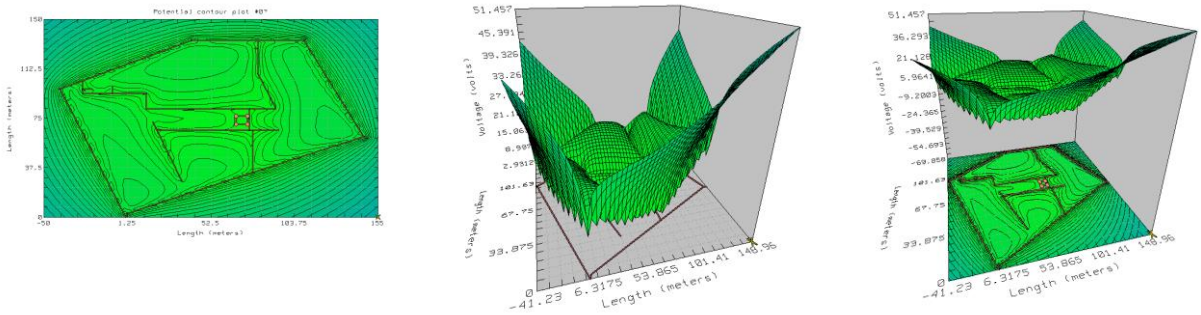
Slika 6.5. Prikaz tablice asimetričnih elemenata (*Asymmetrical conductors),* svaki element posebno

Uzemljivač u programskom alatu je modeliran na temelju nacrta uzemljenja iz projekta izgradnje FN elektrane Sajan (prilog [1]).

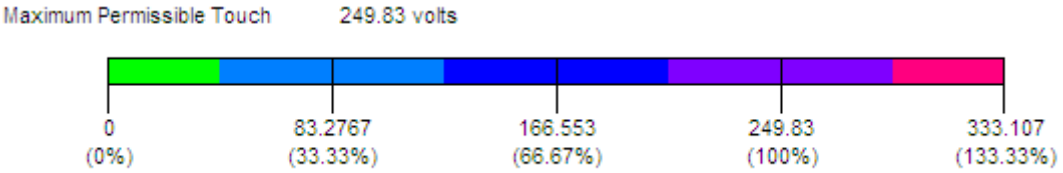
Ovim korakom završava se sa unošenjem podataka potrebnih za izvođenje simulacije. Nakon što programski alat obavi analizu mreže (*Grid analysis*) dobiveni rezultati se mogu iščitati i/ili grafički prikazati.

6.3. Grafički prikaz potencijala (*contour plot)*

Nakon unošenja svih potrebnih podataka, odabire se opcija *contour plot* te provodi simulacija. Rezultati su dani o obliku 2D ili 3D grafa te je moguće birati između prikaza napona dodira i potencijala zemljišta. Uz graf označen bojama i ekvipotencijalnim linijama CYMGRD daje i kazalo po bojama. Različiti načini prikaza i kazalo prikazani su na slikama 6.6. i .6.7.



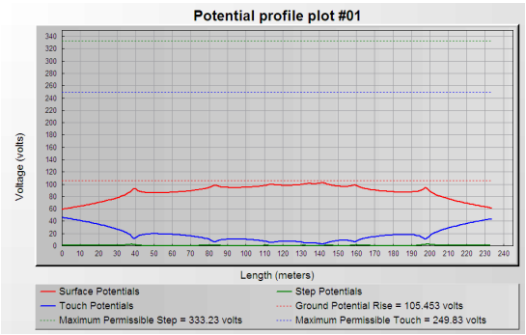
Slika 6.6. Različiti načini prikaza napona dodira



Slika 6.7. Kazalo po bojama za napon dodira

6.4. Grafički prikaz utjecaja na promatrača (*profile plot)*

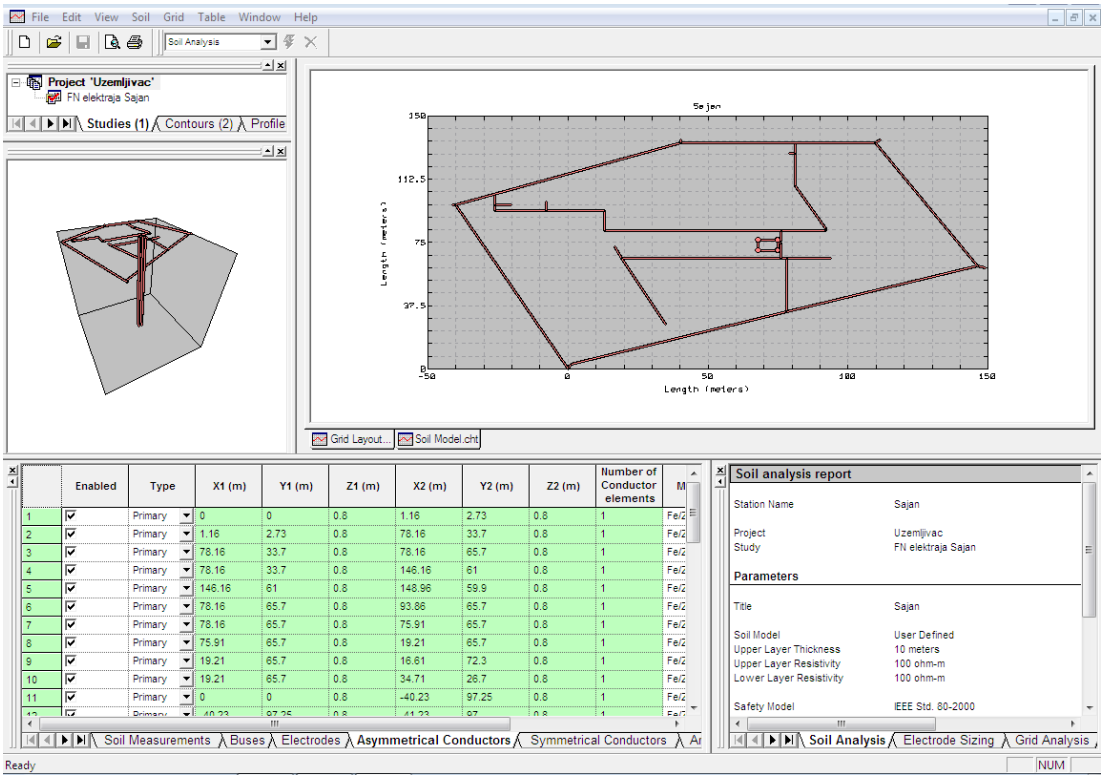
Grafički prikaz utjecaja na promatrača omogućuje analizu opasnosti po promatrača, koji se nalazi u blizini promatrane instalacije za uzemljenje. Utjecaji na promatrača se analiziraju s obzirom na prilike oko njega za vrijeme kvara. CYMGRD omogućuje prikaz napona koraka, napon dodira i potencijal zemljišta na zadanoj trasi. Također na istom grafu su prikazane i maksimalne dopuštene veličine zadane standardom IEEE 80-2000. Maksimalne dopuštene veličine ovise o zadanom modelu te se mijenjaju u ovisnosti o parametrima tla, parametrima kvara i modelu instalacija za uzemljenje. Za ovakav prikaz potrebno je unijeti početnu i krajnju točku trase po kojoj se promatrač kreće te duljinu promatračevog koraka.



Slika 6.7. Primjer utjecaja struje kvara na promatrača pri kretanju postrojenjem

7. Simulacije uzemljenja u CYMGRD-u

7.1. Simulacija FN elektrane Sajan



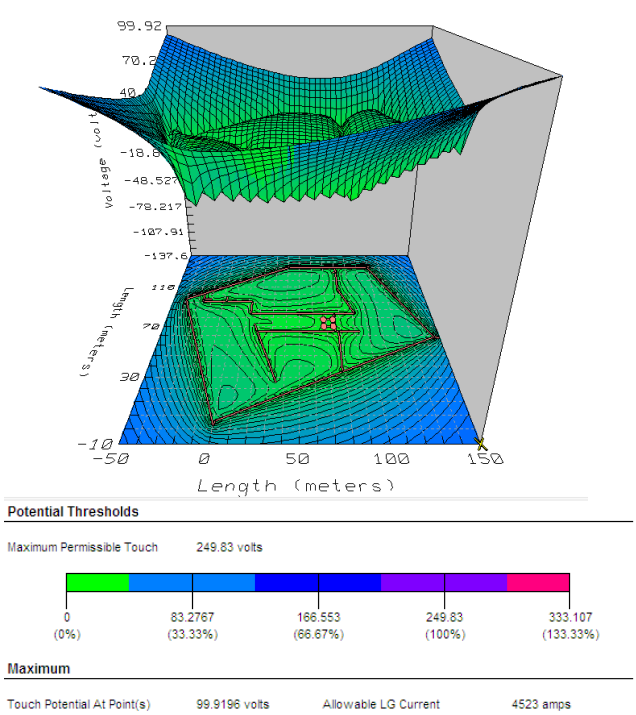
Slika 7.1. Model FN elektrane Sajan

Modeliranje i simulacija FN elektrane Sajan je objašnjeno u poglavlju 6. Nakon unosa ulaznih podataka i izvođenja simulacije dobiveni su sljedeći rezultati. Otpor uzemljivača dobiven simulacijom prikazan je na slici 5.10. i iznosi $R_x = 0{,}107\Omega$.

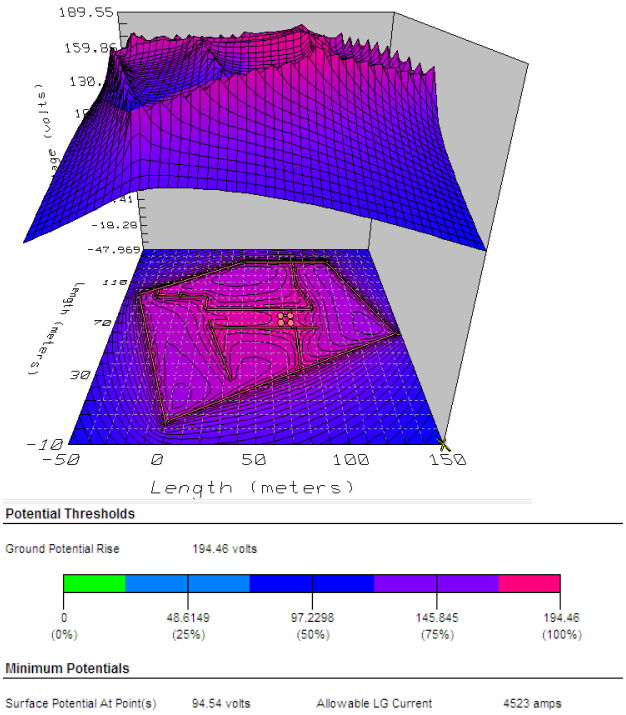
Output Results

Ground Potential Rise	194.46 volts
Calculated Ground Resistance	0.107153 ohms
Equivalent Impedance	0.107151 ohms

Slika 7.2. Otpor uzemljivača FN elektrane Sajan dobiven simulacijom

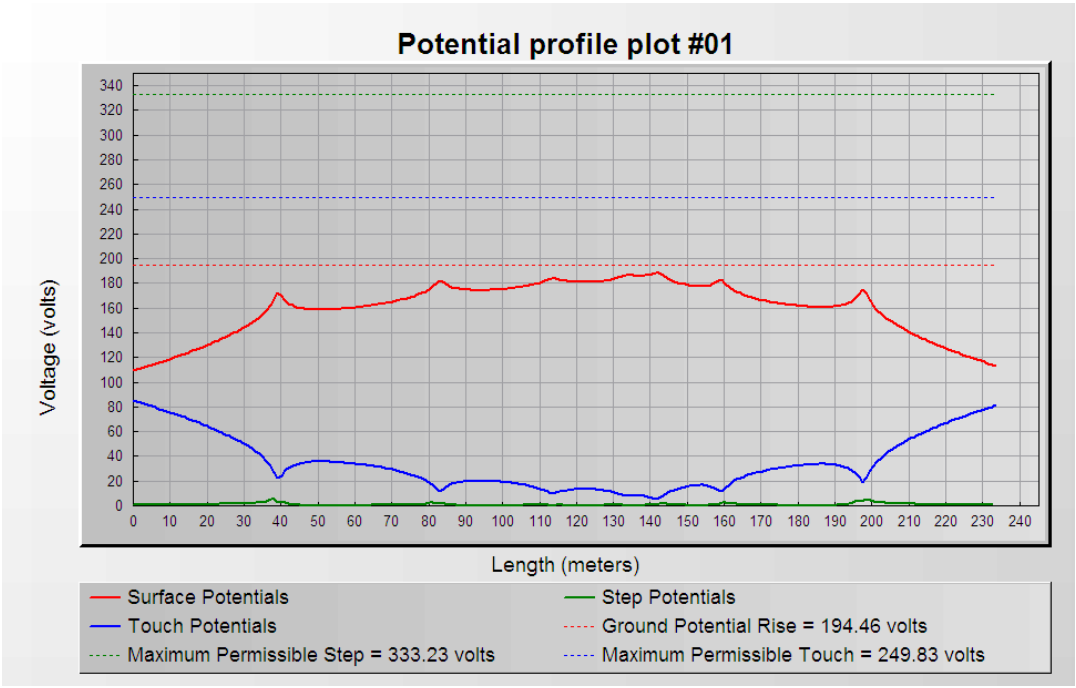


Slika 7.3. Napon dodira u FN elektrani Sajan

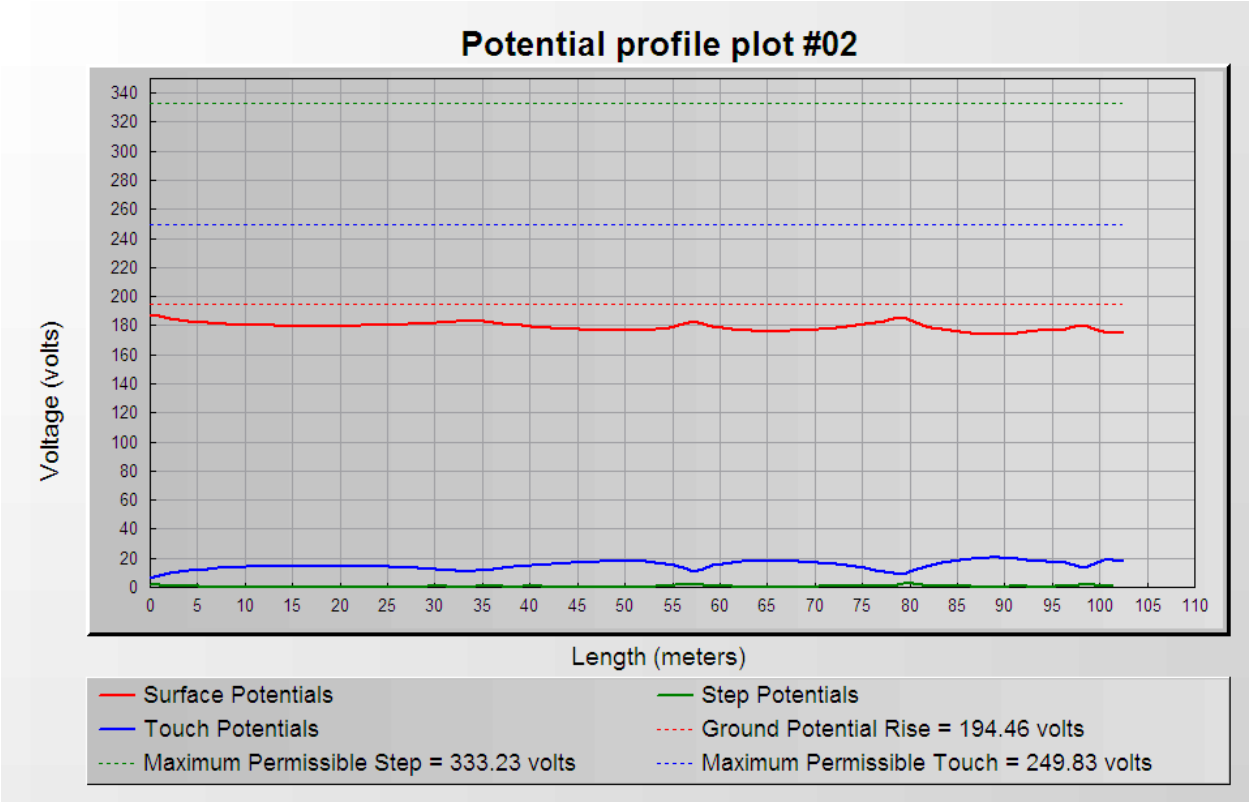


Slika 7.4. Potencijal tla u FN elektrani Sajan

U ovom primjeru zadana je duljina koraka od 1 metar te su maksimalne vrijednosti izračunate na temelju standarda IEEE80-2000 s obzirom na provodnost uzemljivača, parametre tla i struju kvara. Na slici 7.5. je prikazani su utjecaji na promatrača pri hodanju kroz elektranu po dijagonali u smjeru jugozapad – sjeveroistok, a na slici 7.6. prikazani su utjecaji na promatrača pri hodanju od objekta CTS do izlaza iz FN elektrane.



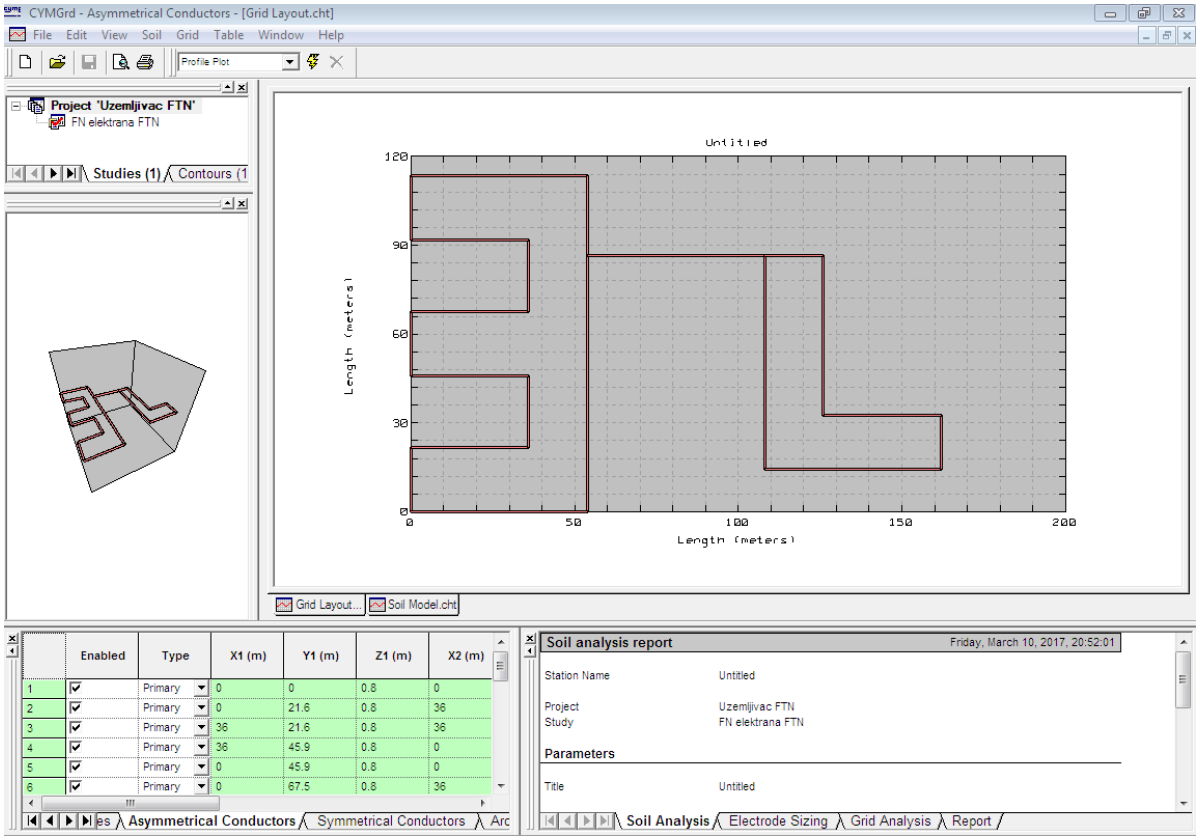
Slika 7.5. Utjecaji na promatrača pri hodanju kroz elektranu u smjeru jugozapad - sjeveroistok



Slika 7.6. Utjecaji na promatrača pri hodanju od objekta CTS do izlaza iz elektrane

7.2. Simulacije FN elektrane FTN

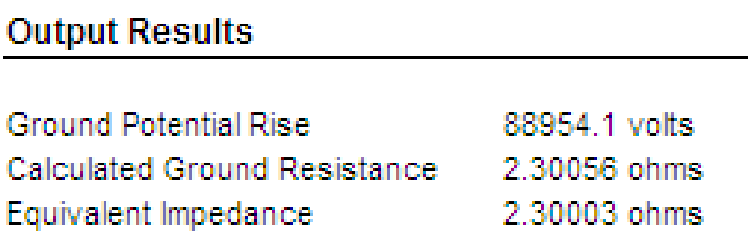
7.2.1. Struja kvara nije ograničena u distributivnoj mreži



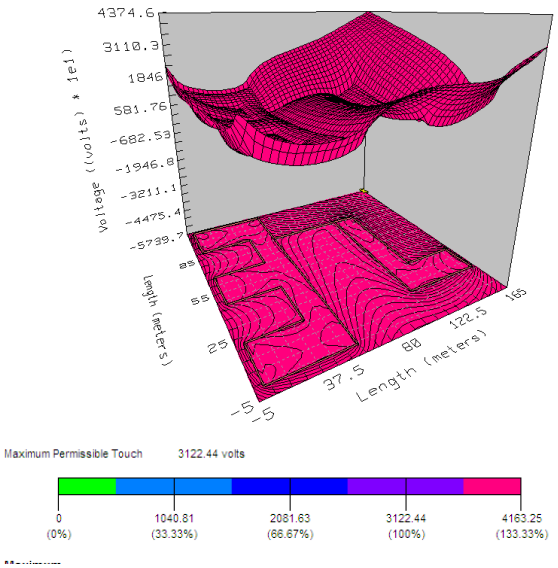
Slika 7.7. Model uzemljivača FN elektrane FTN

Modeliranje FN elektrane FTN u programskom alatu CYMGRD obavljeno je jednako kao i modeliranje FN elektrane Sajan, ali s pripadajućim parametrima. Nakon parametriranja tla, unosa struje kvara $I_k = 37,5kA$ te modeliranja uzemljivača, dobiveni su sljedeći rezultati. U ovoj simulaciji korištena je vrijednost struje kvara koja je dana u projektu za izgradnju FN elektrane FTN.

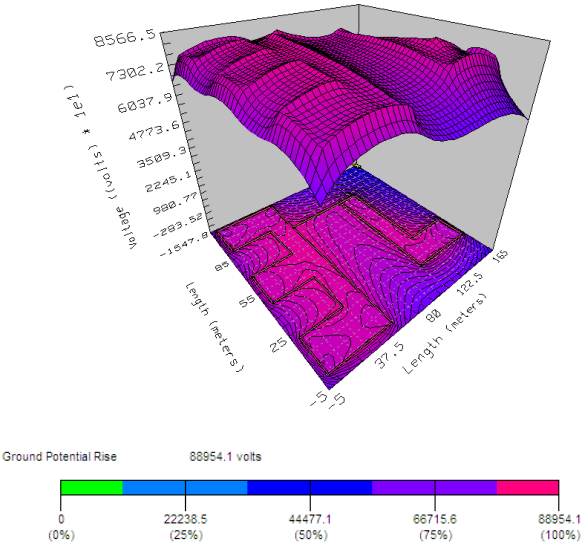
Otpor uzemljivača dobiven simulacijom prikazan je na slici 7.8. i iznosi $R_x = 2,30\Omega$



Slika 7.8. Otpor uzemljivača FN elektrane FTN dobiven simulacijom

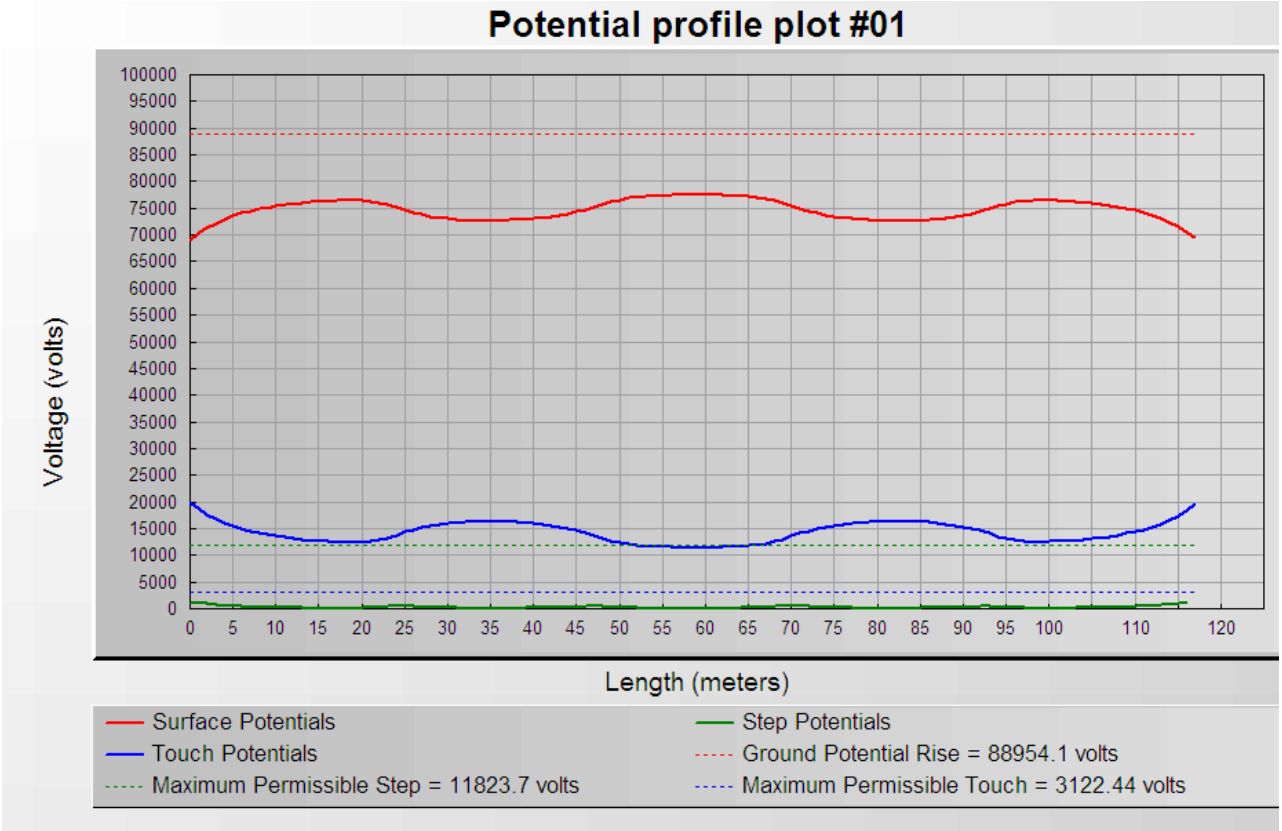


Slika 7.9. Napon dodira oko FN elektrane FTN

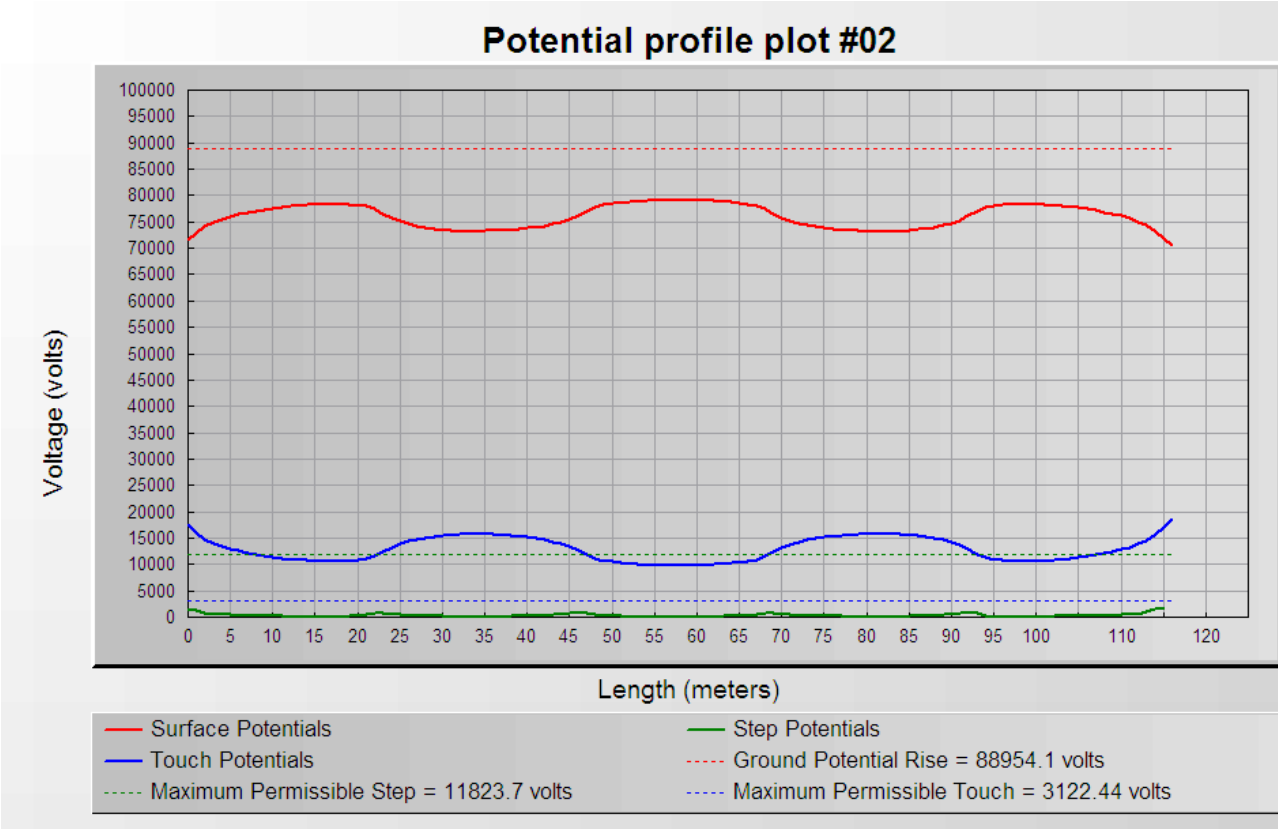


Slika 7.10. Potencijal zemljišta oko FN elektrane FTN

Simulirani su i utjecaji na promatrača koji hoda nogostupom s istočne strane Mašinskog fakulteta i koji hoda uza zid iste zgrade u smjeru sjeveroistoka za vrijeme kvara (Slike 7.11. i 7.12.).



Slika 7.11. Utjecaj na promatrača pri hodanju nogostupom uz Mašinski fakultet



Slika 7.12. Utjecaj na promatrača pri hodanju uza zid Mašinskog fakulteta

7.2.2. Struja kvara ograničena u distributivnoj mreži

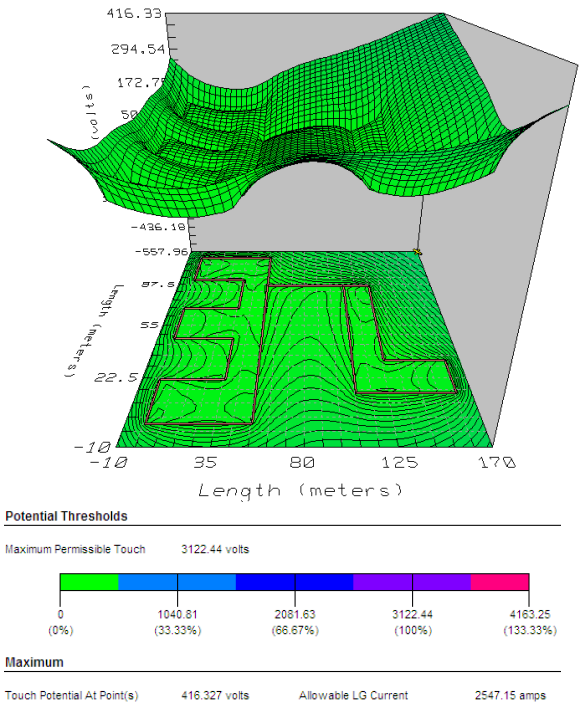
Pri simuliranju električkih veličina na instalacijama za uzemljenje za vrijeme kvara, s ograničenom strujom kvara, koristi se vrijednost struje kvara koja se sastoji od doprinosa iz mreže i od doprinosa struji kvara od strane invertora elektrane. Doprinos iz mreže je ograničen na 300A, što je standardna vrijednost prorade zaštite u distributivnim mrežama u gusto naseljenim područjima. Doprinos struji kvara od strane invertora se sastoji od struja kvara triju različitih tipova invertora. Pa tako invertor AURORA TRIO-8,5-TL-OUTD-S doprinosi struji kvara sa 16,5A, AURORA TRIO-5,8-TL-OUTD-S sa 12A, a osam mikroinvertora Aurora PVI-0,25-I-OUTD doprinose svaki s po 1,4A.

Prema tome u ovom slučaju struja kvara iznosi $300+16,5+12+8\times1,4=339,7A$. Korištenjem ove struje kvara dobiven je jednak otpor uzemljenja, ali su napon dodira i potencijal tla promjenjeni.

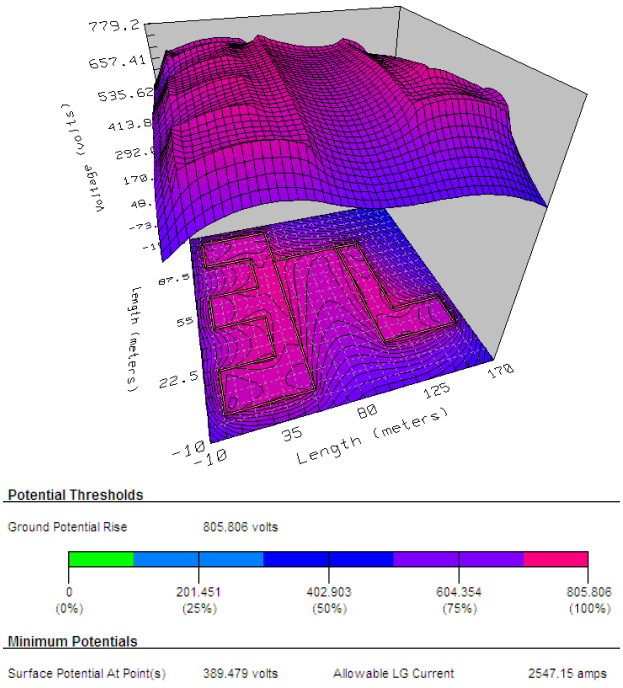
Output Results

Ground Potential Rise	805.806 volts
Calculated Ground Resistance	2.30056 ohms
Equivalent Impedance	2.30003 ohms

Slika 7.12. Otpor uzemljivača FN elektrane FTN dobiven simulacijom

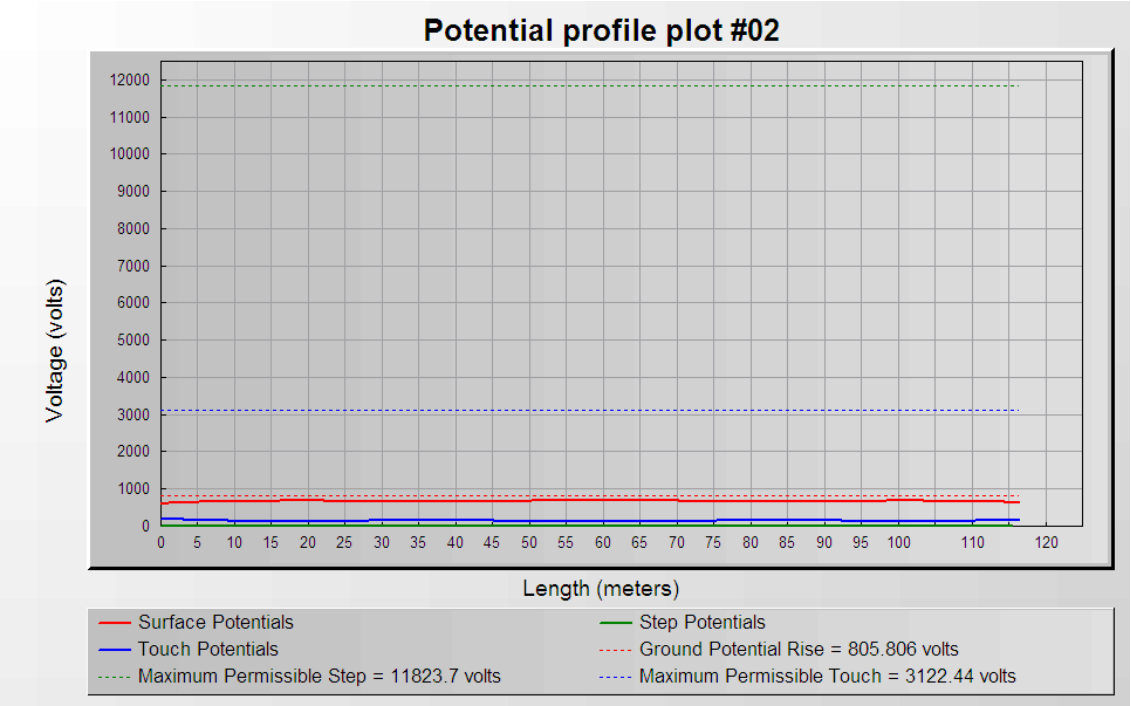


Slika 7.13. Napon dodira oko FN elektrane FTN pri ograničenoj struji kvara

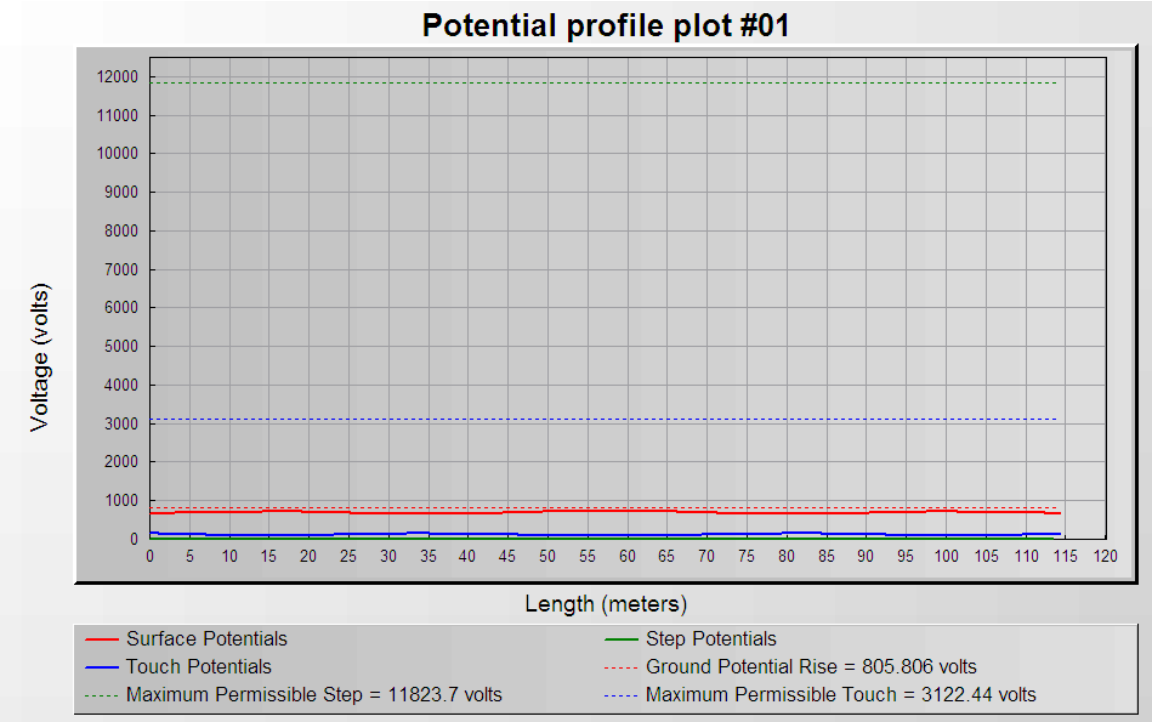


Slika 7.14. Potencijal zemljišta oko FN elektrane FTN pri ograničenoj struji kvara

Također, i u ovom slučaju simulirani su i utjecaji na promatrača koji hoda nogostupom s istočne strane Mašinskog fakulteta i koji hoda uza zid iste zgrade u smjeru sjeveroistoka za vrijeme kvara (Slika 7.15. i 7.16.).



Slika 7.15. Utjecaj na promatrača pri hodanju nogostupom uz Mašinski fakultet



Slika 7.16. Utjecaj na promatrača pri hodanju uza zid Mašinskog fakulteta

7.2.3. Teorijski izračun otpora uzemljivača FN elektrane FTN

U ovom poglavlju bit će izračunat otpor temeljnog uzemljivača zgrade Mašinskog fakulteta i glavne zgrade Fakulteta tehničkih nauka, jer je taj uzemljivač ujedno i uzemljivač FN elektrane FTN. Uzemljivačka traka ugrađena je u betonske temelje te joj se preko velike dodirne površine između betona i okolne zemlje smanjuje otpor, tako smanjujući otpor cjelokupnom uzemljivaču.

S obzirom da svi podaci potrebni za izračun nisu bili dostupni, u izračunu se dio podataka pretpostavlja na temelju veličina karakterističnih za zgrade sličnog tipa (dubina i širina temelja).

Otpor temeljnog uzemljivača se približno se računa prema formuli:

$$R_Z = \frac{\varphi_Z}{\pi \cdot d} \tag{7.1}$$

gdje je:

φ_Z - otpornost tla, $[\Omega m]$

d - promjer polukugle jednakog obujma kao i betonski temelj u koji je ugrađen metalni vodič, $[m]$

Promjer d se računa pomoću izraza:

$$d = 1,57 \cdot \sqrt[3]{V_t}, [m] \tag{7.2}$$

Pri čemu je V_t obujam temelja u m^3 i računa se kao:

$$V_t = O \cdot H \cdot D, \left[m^3 \right] \tag{7.3}$$

gdje je:

O - opseg temelja $[m]$

H - dubina temelja $[m]$

D - širina temelja $[m]$

Pri izračunu otpora temeljnog uzemljivača korišteni su sljedeći podaci:

$\varphi_Z = 100 \Omega m$
$O = 785 m$
$H = 5 m$
$D = 1,5 m$

Otpornost tla (φ_Z) je korištena ista kao i u simulacijama u CYMGRD-u. Za opseg temelja je uzeta približna kombinirana dužina opsega zgrada Mašinskog fakulteta i glavne zgrade Fakulteta tehničkih nauka mjerena koračanjem, gdje je jedan korak ekvivalentan jednom metru. Za dubinu i širinu temelja pretpostavljene su vrijednosti s obzirom na zgrade sličnog tipa za koje su te vrijednosti poznate.

Uvrštavanjem vrijednosti u jednadžbe (7.3.), 7.2.), i (7.1) dobiveni su sljedeći izrazi:

$$V_t = 785 \cdot 5 \cdot 1,5 = 5887,5 m^3 \tag{7.4}$$

$$d = 1,57 \cdot \sqrt[3]{5887,5} = 28,349 \tag{7.5}$$

$$R_Z = \frac{100}{\pi \cdot 28,349} = 1,123\Omega \tag{7.6}$$

Ukupna vrijednost otpora temeljnih uzemljivača zgrada Mašinskog fakulteta i glavne zgrade Fakulteta tehničkih nauka je $R_Z = 1,123\Omega$.

8. Analiza rezultata

U ovom poglavlju bit će uspoređeni rezultati dobiveni mjerenjem na dvije FN elektrane i rezultati dobiveni simulacijama u programskom alatu CYMGRD. Također bit će interpretirani i rezultati dobiveni simulacijama, a koji nisu ispitivani u mjerenjima te rezultati dobiveni teoretskim proračunom otpora uzemljenja.

Radi lakše usporedbe, otpor uzemljenja dobiven mjerenjem i simulacijom prikazan je usporedno u tablici 8.1.

Tablica 8.1. *Usporedba rezultata dobivenih mjerenjem, simulacijom i proračunom*

R_x mjereno (Ω)	R_x simulirano (Ω)	R_x proračunato (Ω)
FN elektrana Sajan		
$R_{x1} = 0,01$ $R_{x2} = 0,05$ $R_{x3} = 0,1$ $R_{x4} = 0,05$ $R_{x5} = 0,05$ $R_{x6} = 0,2$ $R_{x7} = 0,01$ $R_{x-prosječno} = 0,08$	$R_x = 0,107$	/
FN elektrana FTN		
$R_{x1} = 0,3$ $R_{x2} = 0,2$ $R_{x-prosječno} = 0,25$	$R_x = 2,3$	$R_x = 1,123$

8.1. Analiza rezultata za FN elektranu Sajan

Iz tablice 8.1. vidi se da su prosječne veličine dobivene mjerenjem i simulacijom za FN elektranu Sajan približno jednake. Znači da je FN elektrana Sajan dovoljno dobro modelirana u CYMGRD-u.

Dalje, iz prikaza napona dodira (slika 7.3.) vidi se da je instalacija za uzemljenje u FN elektrani Sajan dobro dimenzionirana jer napon dodira ni u jednoj točki ne prelazi dozvoljenu vrijednost. Osim što ne prelazi dozvoljenu vrijednost napon dodira unutar elektrane rijetko prelazi i vrijednost od 50V što je daleko ispod maksimalnog dopuštenog napona dodira od 249,83V.

8.2. Analiza rezultata za FN elektranu FTN

Rezultati dobiveni mjerenjem otpora uzemljenja i simulacijom FN elektrane FTN nisu ni približno jednaki. Razlikuju se za red veličine. Otpor dobiven simulacijom je 9,2 puta veći od otpora dobivenog mjerenjem.

Osim otpora uzemljenja, simulacijom dobiveni grafovi za slučaj bez ograničenja struje kvara na 300A ukazuju na to da uzemljenje FN elektrane FTN nije adekvatno jer je napon dodira daleko iznad dopuštenih vrijednosti kao i napon koraka. Uzimajući u obzir dobivene rezultate može se zaključiti da uzemljenje FN elektrane FTN nije adekvatno za taj slučaj.

Međutim taj zaključak ne bi bio točan jer programski alat CYMGRD ima ograničenja koja se manifestiraju pri modeliranju temeljnih uzemljivača i zato što je u tako gusto naseljenom području struja kvara ograničena dodavanjem impedancije u zvjezdište transformastora.

U slučaju opisanom u poglavlju 7.2.2. vidljivo je da s ograničenjem struje kvara na 300A uzemljivačka instalacija zadovoljava potrebne sigurnosne uvjete.

Uzemljenje FN elektrane FTN nije moguće dobro simulirati koristeći programski alat CYMGRD jer alat nema mogućnost označavanja uzemljivača kao temeljnog, tj. modeliranja istog u temelju zgrade, okruženog betonom. Fe/Zn traka koja služi kao uzemljivač zgrade je svojom cijelom dužinom položena u temelje zgrade Mašinskog instituta i zgrade FTN-a.

Kod izgradnje FN elektrane FTN nije građena zasebna uzemljivačka instalacija, nego je iskorištena postojeća instalacija za uzemljenje zgrade Mašinskog fakulteta. Iz grafova u poglavlju 7.2.1. se da zaključiti da ta instalacija nije adekvatna, tj. da zbog velike predviđene struje kvara prolaznici ili radnici na elektrani mogu biti u opasnosti. Taj zaključak nije točan, jer programski alat nema mogućnost modeliranja temeljnog uzemljivača okruženog betonom kako je ranije objašnjeno.

Pri teorijskom proračunu otpora uzemljenja, dobiven je otpor gotovo dvostruko manji od otpora dobivenog simulacijom. S obzirom da je u slučaju s ograničenjem struje kvara i simulirani otpor uzemljenja adekvatan, znači da je i otpor dobiven proračunom dovoljno mali tj. da je otpor temeljnog uzemljivača kao instalacije za uzemljenje FN elektrane FTN adekvatan.

9. Zaključak

Uzemljenje je kao jedan od primitivnijih oblika zaštite prisutno u gotovo svim električkim postrojenjima. Zbog toga je ključno da ono bude dobro dimenzionirano. Uzemljenja se mogu pri projektiranju novog postrojenja proračunavati ručno, međutim jednostavnije i brže je te proračune obavljati pomoću programskih alata.

Potrebno je poznavati ograničenja programskih alata i podudarnost njihovih rezultata sa stvarnim stanjem. To se potvrđuje usporedbom rezultata dobivenih mjerenjem, računalnim simulacijama i proračunima.

Rezultati dobiveni simulacijom i mjerenjem za FN elektranu Sajan se podudaraju te zaključujemo da je instalacija za uzemljenje u FN elektrani Sajan dobro dimenzionirana i da radnici u slučaju kvara nisu u opasnosti.

U Srbiji ne postoji zakonska norma koja propisuje maksimalno dozvoljen otpor uzemljenja. Kao mjerodavni dokument se uzima Tehnička preporuka 6p.7 Elektroprivrede Srbije. Prema tehničkoj preporuci maksimalni dozvoljeni otpor uzemljenja bi za FN elektranu Sajan bio $R_z \leq 4,5\Omega$, a za FN elektranu FTN $R_z \leq 5\Omega$ [11].

U Hrvatskoj također ne postoji zakonska norma koja propisuje maksimalno dozvoljen otpor uzemljenja, nego se koristi tehnička preporuka prema kojoj je projektant odgovoran za ispravan uzemljivač, odnosno otpor uzemljivača ovisno o upotrebi objekta i instalacijama objekta. Preporučena maksimalna vrijednost otpora uzemljenja za energetska postrojenja je $R_z \leq 2\Omega$, a za telekomunikacijska postrojenja $R_z \leq 10\Omega$. Pri zaštiti dviju promatranih elektrana mjerodavna vrijednost bi bila vrijednost dana za energetska postrojenja.

Otpori uzemljenja obiju promatranih elektrana su unutar zadanih veličina te su u skladu s pravilima struke.

S obzirom na ograničenja ovog programskog alata zaključuje se da rezultati i grafovi koji pokazuju da instalacije za uzemljenje na FN elektrani FTN nisu adekvatne, nisu mjerodavni, jer model uzemljenja nije bilo moguće točno prikazati zbog ograničenja programskog alata. Netočnost modela se vidi i iz nepodudarnosti rezultata dobivenih simulacijom, mjerenjem i proračunom.

10. Literatura

[1] Karakteristike i slike invertora, službena web stranica tvrtke ABB, dostupno na: https://library.e.abb.com/public/572ebc5cf17b45069cba6747fa0ef10f/TRIO-5.8_7.5_8.5_BCD.00376_EN_RevE_web.pdf pristupljeno: 17.1.2017.

[2] Karakteristike i slike solarnih panela, službena web stranica tvrtke Yingli solar, dostupno na: http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE_60_Cell_Series_EN.pdf pristupljeno: 22.1.2017.

[3] Karakteristike i slike solarnih panela, službena stranica tvrtke Zonnepanelen, dostupno na: https://www.zonnepanelen.net/nl/pdf/panels/Yingli_YL260C-30b_YL280C-30b.pdf_pristupljeno 22.1.2017 pristupljeno: 22.1.2017.

[4] Karakteristike i slike solarnih panela, službena stranica tvrtke Jinko solar, dostupno na: http://www.ir.jinkosolar.com/zhen/upload/201011160217552782.pdf pristupljeno: 23.1.2017.

[5] Karakteristike invertora, službena web stranica tvrtke ABB, dostupno na: https://library.e.abb.com/public/3b4b2359a4986e2685257dff005e1834/MICRO-0.25-0.3-0.3HV-Rev0.1.pdf pristupljeno: 27.1.2017.

[6] Karakteristike i slike invertora, službena web stranica tvrtke ABB, dostupno na: https://library.e.abb.com/public/6ae11b86a2044360c1257da10034a0ef/TRIO-27.6-JP_BCD.00578_EN_Rev%20B.pdf pristupljeno: 17.1.2017.

[7] CYMGRD 6.3 for Windows User's Guide and Reference Manual, 2006.

[8] Strahil J. Gušavac, „Osnovni principi projektovanja u mrežama srednjeg i niskog napona“, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 2014.

[9] The German Energy Society, „Planing and Installing Photovoltaic Systems – A guide for installers, architects and engineers“, second edition, 2008.

[10] Uputstva za korištenje i slike mjernog uređaja KYORITSU 4102A, KYORITSU ELECTRICAL INSTRUMENTS WORKS, LTD., „KYORITSU 4102A INSTRUCTION MANUAL“, dostupno na: http://www.kew-ltd.co.jp/files/en/manual/4102A_IM_92-1489A_E_L.pdf pristupljeno: 3.2.2017.

[11] Podaci i slike za FN elektranu FTN, D. Rekanović, „Fotonaponska elektrana snage 16,3 kW na krovu zgrade Mašinskog instituta”, Novi Sad, 2014, završni rad

[12] D. Čerzeković, „Proračun otpora uzemljenja temeljnog uzemljivača”, Osijek, 2016, završni rad

[13] Tehnička preporuka 6p.7, „Izvođenje uzemljenja u distributivnim transformatorskim stanicama 35/10 kV, 35/20 kV, 10/0,4 kV, 20/0,4 kVN 35/0,4 kV”, III Izdanje, jun 1996. Godine

[14] Slike i podaci za FN elektranu Sajan, Projekt izgradnje Fotonaponske elektrane Sajan, Sveska 1 – 1. Tehnički opis, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2013. Godina

11. Sažetak

U ovom diplomskom radu obrađena je tema uzemljenja dvije fotonaponske elektrane. Izvršena su mjerenja otpora uzemljenja na fotonaponskoj elektrani na krovu srednje zgrade Mašinskog fakulteta u Novom Sadu te na fotonaponskoj elektrani u selu Sajan kod Kikinde.

Osim mjerenja napravljeni su i modeli navedenih fotonaponskih elektrana u programskom alatu CYMGRD te su izvedene kompjuterske simulacije kvarova u postrojenjima te su promatrane strujne karakteristike instalacija za uzemljenje te utjecaj električnih veličina na osobe koje bi se eventualno nalazile u postrojenju za vrijeme kvara.

Dobiveni rezultati su uspoređeni i interpretirani.

12. Abstract

Subject matter of this final thesis is grounding of two photovoltaic power plants. Grounding resistance measurements were conducted on photovoltaic power plant on the roof of the middle building of the Machine institute in Novi Sad and on photovoltaic power plant in village Sajan near town of Kikinda.

Besides measurements, models of above listed photovoltaic power plants were made in software tool CYMGRD, and computer simulations of short circuit failures were conducted. Characteristics of current for the grounding installations during the short circuit and impact on an eventual bystander were monitored.

Collected results were compared and interpreted.

13. Životopis

Luka Stojnović rođen je 8.4.1992. god. u Osijeku. Osnovnu školu završio je u Osijeku u periodu od 1999. do 2007. godine. Godine 2007. upisuje III.gimnaziju Osijek, s prirodoslovno-matematičkim programom, koju završava 2011. godine s odličnim uspjehom te tako ostvaruje izravan upis na Elektrotehnički fakultet u Osijeku, kojeg upisuje 2011. godine te ga trenutno pohađa. U slobodno vrijeme bavi se rukometom. Član je fakultetske i sveučilišne momčadi s kojima je osvojio brojne nagrade.

14. Prilozi

[1] Nacrt instalacija za uzemljenje iz projekta za izgradnju FN elektrane Sajan

