

# Koordinacija zaštite FN elektrane nazivne snage 350 kW

---

Župan, Marina

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:317034>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-06**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**KOORDINACIJA ZAŠTITE FN ELEKTRANE NAZIVNE  
SNAGE 350 kW**

**Diplomski rad**

**Marina Župan**

**Osijek, 2023.**

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	2
2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE FN ELEKTRANA .....	3
2.1. Princip rada.....	4
2.2. Fotonaponski sustavi .....	5
2.3. Izmjenjivač .....	6
3. ZAŠTITA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU .....	8
4. KOORDINACIJA ZAŠTITE U FN ELEKTRANAMA .....	10
4.1. Svrha i osnovni kriteriji relejne zaštite .....	10
4.2. Osigurači.....	14
4.2.1. Odabir osigurača .....	17
4.3. Prekidači .....	18
5. MODEL FN ELEKTRANE 350 KW .....	21
5.1. Kvar 1 .....	29
5.2. Kvar 2 .....	32
5.3. Kvar 3 .....	34
5.4. Kvar 4 .....	36
5.5. Kvar 5 .....	38
6. ANALIZA REZULTATA.....	40
7. ZAKLJUČAK .....	42
LITERATURA.....	43
SAŽETAK.....	46
ŽIVOTOPIS .....	47

## 1. UVOD

U današnje vrijeme, sve veća svijest o energiji i zaštiti okoliša potiče traženje alternativa za smanjenje emisije stakleničkih plinova i ovisnosti o fosilnim gorivima. Naglasak se sve više stavlja na obnovljive izvore energije, poput Sunčevog zračenja, koji pružaju izvanredan potencijal za iskorištenje energije uz minimalan utjecaj na okoliš.

Među obnovljivim izvorima energije, fotonaponski sustavi se ističu zbog svojih brojnih prednosti. Oni ne zahtijevaju skupa goriva jer koriste besplatno Sunčevu energiju, te su pouzdani i jednostavni za instalaciju. Fotonaponski sustavi također pružaju mogućnost neovisne uporabe, što znači da se mogu primjenjivati čak i na područjima koja nisu povezana sa standardnim električnim mrežama.

Unatoč mnogim prednostima, fotonaponski sustavi imaju i neke nedostatke. Njihova učinkovitost ovisi o osunčanosti, što ih čini manje pogodnima kao primarne izvore energije. Također, za izgradnju većih kapaciteta zahtijevaju velike površine, a i dalje postoje visoki troškovi pretvorbe Sunčeve energije u električnu energiju, posebno u proizvodnji.

Obnovljivi izvori energije proizlaze iz prirodnih procesa i neprestano se obnavljaju, bilo da je riječ o energiji vode, biomase, vjetra, geotermalnim izvorima, bioplinu ili drugim oblicima. Njihova popularnost raste zbog sposobnosti obnavljanja i minimalnog utjecaja na okoliš. Tradicionalni izvori poput hidro i biomase susreću se s konkurencijom novih obnovljivih izvora poput energije Sunca i vjetra, koje predstavljaju sve važniju komponentu elektroenergetskih sustava.

Da bi elektroenergetski sustavi radili učinkovito, ključno je koordinirati zaštitu u mreži i postrojenjima kako bi se izbjegli potencijalni problemi kao što su kratki spojevi. U tu svrhu, koristi se programski paket DIGSILENT Power Factory za modeliranje cijele mreže i analizu karakteristika kako bi se osigurala sigurna i optimalna funkcionalnost sustava.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

U ovom radu opisat će se princip rada fotonaponskih elektrana, dijelove FN elektrane i ostalu opremu. FN elektrana nazivne snage 350 kW je modelirana u DIGSILENT PowerFactory alatu te je napravljena pravilna koordinacija zaštite u sučelju sa mrežom. Prikazani su vremenski odzivi napona i struja za karakteristične kvarove i mjesta.

## 2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE FN ELEKTRANA

Fotonaponske elektrane predstavljaju sustave koji pretvaraju Sunčevu svjetlost u električnu energiju. Ova tehnologija koristi obnovljivi izvor energije, Sunčevu svjetlost, kako bi proizvela električnu energiju, a istovremeno ima niz ekoloških prednosti. Fotonaponske elektrane su ekološki prihvatljive jer ne proizvode štetne emisije ili onečišćenja zraka. Osim toga, zahtijevaju minimalno održavanje i imaju dug vijek trajanja [1].

Ove elektrane su skalabilne, što znači da mogu biti različitih veličina, od manjih kućnih sustava do velikih komercijalnih ili industrijskih instalacija. Koristeći fotonaponsku elektranu, vlasnici mogu smanjiti svoje račune za električnu energiju ili čak proizvoditi više energije nego što potroše, što može rezultirati povratom na mrežu ili smanjenjem računa.

Korištenjem solarne energije smanjuje se emisija stakleničkih plinova i doprinosi se smanjenju klimatskih promjena. Također, vlasnici postaju manje osjetljivi na fluktuacije cijena fosilnih goriva jer proizvode vlastitu energiju. U mnogim državama postoje poticaji i subvencije za instalaciju fotonaponskih elektrana kako bi se potaknula upotreba obnovljivih izvora energije.

Dodatno, fotonaponske elektrane su tihe u radu i imaju dug vijek trajanja, obično od 25 do 30 godina ili više. Sve te karakteristike čine fotonaponske elektrane privlačnim izborom za proizvodnju čiste i održive električne energije [1].

Primjer najveće fotonaponske elektrane u Hrvatskoj je SE Obrovac sa instaliranom snagom od 8,7 MW i priključnom snagom od 7,35 MW te je prikazana na slici 2.1.



Slika 2.1. Fotografija SE Obrovac [2]

U nastavku će biti objašnjena fotonaponska elektrana koja koristi fotonaponske panele za pretvaranje energije Sunčevih zraka u električnu energiju.

## 2.1. Princip rada

Pretvaranje svjetlosne energije u električnu energiju temelji se na fenomenu nazvanom fotoelektrični efekt. Kada su poluvodički materijali izloženi svjetlu, neki fotoni svjetlosnog zračenja apsorbiraju se od strane poluvodičkog kristala, što uzrokuje značajan broj slobodnih elektrona u kristalu. To je osnovni razlog za proizvodnju električne energije putem fotoelektričnog efekta.

Fotonaponska ćelija osnovna je jedinica sustava u kojem se fotoelektrični efekt koristi za proizvodnju električne energije iz svjetlosne energije. Silicij je najčešće korišteni poluvodički materijal za izradu fotonaponske ćelije. Kada svjetlosna zraka udari u materijale, neki dio svjetlosti se reflektira, neki dio prolazi kroz materijale, a ostatak se apsorbira od strane materijala [3].

Osnovni principi direktnog korištenja sunčeve energije uključuju:

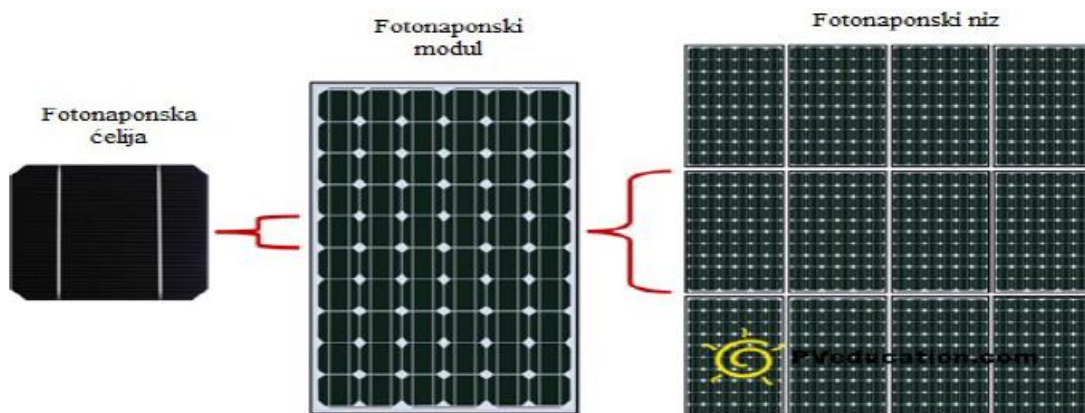
- Upotrebu solarnih kolektora za pripremu tople vode i zagrijavanje prostora.

- Korištenje fotonaponskih ćelija za izravnu pretvorbu sunčeve energije u električnu energiju.
- Fokusiranje sunčeve energije u velikim energetske postrojenjima [4].

Više pažnje će biti posvećeno objašnjenju kako se sunčeva energija koristi putem fotonaponskih ćelija, budući da se elektrana u ovom radu oslanja na tu tehnologiju za pretvorbu energije.

Fotonaponska ćelija predstavlja poluvodički element, odnosno, poluvodičku diodu. Na temelju fotonaponskog efekta, ova dioda omogućuje pretvorbu sunčevog zračenja u električnu energiju. Obično se izrađuje od silicija, no postoje različite varijante, uključujući monokristalni, polikristalni silicij, ili amorfni silicij. Osim silicija, koriste se i drugi materijali kao što su telur i kadmij [5].

Na slici 2.2. prikazan je primjer slaganja fotonaponskih ćelija.



Slika 2.2. Primjer slaganja fotonaponskih ćelija [6]

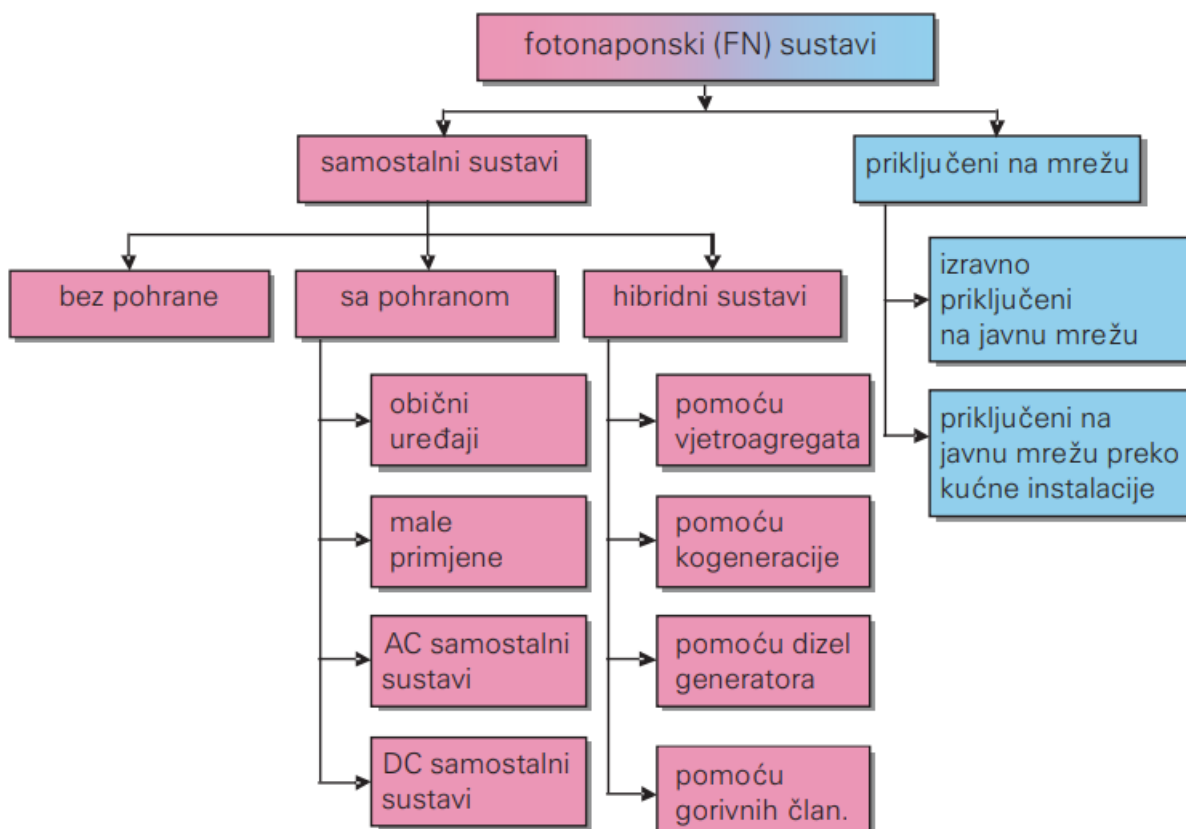
## 2.2. Fotonaponski sustavi

Solarni fotonaponski sustavi mogu se kategorizirati u dvije osnovne kategorije: fotonaponski sustavi koji nisu povezani s električnom mrežom, često nazivani i samostalnim sustavima, i fotonaponski sustavi koji su spojeni na javnu elektroenergetsku mrežu [7].

U samostalnim sustavima, električna energija koja se proizvodi mora biti pohranjena lokalno u baterijama ili akumulatorima. Nasuprot tome, u mrežnim sustavima nema potrebe za upotrebom



baterija ili akumulatora jer se električna energija koja se proizvodi direktno prenosi u elektroenergetski sustav. Detaljnija klasifikacija fotonaponskog sustava prikazana je na slici 2.3.



Slika 2.3. Podjela fotonaponskih sustava [7]

### 2.3. Izmjenjivač

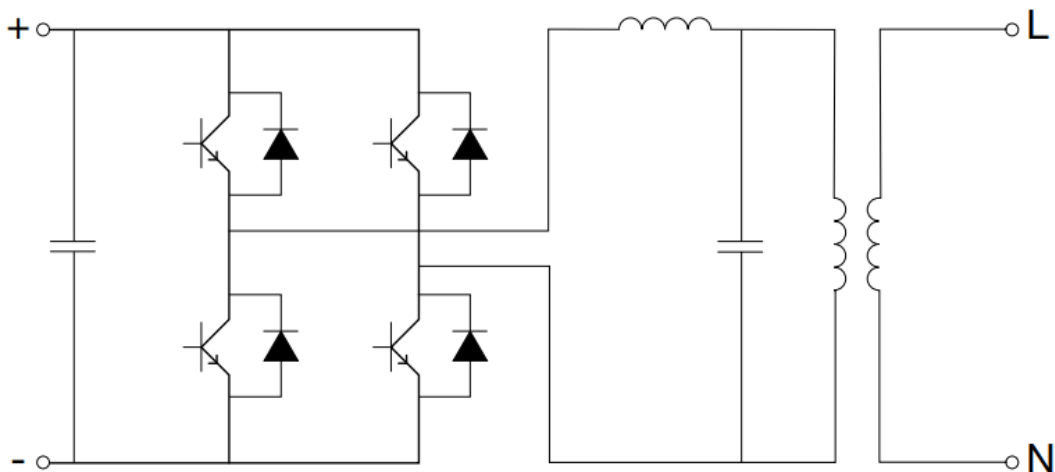
Za pretvaranje izvora istosmjernog napona ili struje u izmjeničnu mrežu s konstantnom razinom napona i frekvencijom, koristi se uređaj poznat kao izmjenjivač. Izmjenjivač je elektronički uređaj koji pretvara istosmjerni napon generiran od fotonaponskog modula u izmjenični napon koji je sinkroniziran s naponom električne mreže. Prilikom ovog pretvaranja, izmjenjivač osigurava da izlazni napon bude konstantan i iznosi 230 V, dok frekvencija ostaje stalna na 50 Hz [8].

Osim toga, izmjenjivač ima ugrađenu zaštitnu funkciju koja odvaja fotonaponski sustav od električne mreže u slučaju odstupanja naponskih ili frekvencijskih parametara izvan postavljenih granica. Te granice odstupanja su predefinirane od strane proizvođača i izmjenjivač prati različite parametre kao

što su napon, struja, frekvencija i impedancija mreže. Ako izmjenjivač detektira odstupanje izvan dopuštenih granica, aktivira se zaštitni mehanizam.

Postoje tri glavna tipa izmjenjivača u sustavima s fotonaponskim modulima: autonomni izmjenjivač, bidirekcijski pretvarač i mrežni izmjenjivač. Kombiniranjem ovih triju uređaja može se optimalno iskoristiti energija Sunca u fotonaponskim sustavima [8].

Osim svoje uloge u pretvaranju energije, izmjenjivač također nadzire kvalitetu električne energije koja se isporučuje u električnu mrežu putem ugrađenog L-C filtra unutar samog izmjenjivača, kako je prikazano na slici 2.4. Tranzistori koji djeluju kao prekidači u ovom kontekstu upravljaju se signalima koji ih otvaraju ili zatvaraju, što rezultira izlaznim signalom oblika pravokutnog vala [9].



Slika 2.4. Shema jednofaznog izmjenjivača [10]

### 3. ZAŠTITA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

Elektroenergetski sustav je kompleksan sustav koji se sastoji od proizvodnje, prijenosa, distribucije i potrošnje električne energije. Zaštita u elektroenergetskom sustavu odnosi se na skup mjera i uređaja koji osiguravaju sigurnost, pouzdanost i stabilnost sustava te štite opremu i osoblje od mogućih opasnosti i kvarova.

Osnovni ciljevi zaštite u elektroenergetskom sustavu uključuju:

- Otkrivanje kvarova: Zaštita je odgovorna za otkrivanje različitih vrsta kvarova, kao što su kratki spojevi, preopterećenja, naponski udari, zemljospoji i drugi problemi koji mogu nastati u elektroenergetskom sustavu.
- Brza reakcija: Nakon što se kvar otkrije, zaštita mora brzo reagirati i izolirati pogođeni dio sustava kako bi se spriječilo širenje problema i minimalizirala šteta.
- Održavanje stabilnosti sustava: Zaštita također ima ulogu u održavanju stabilnosti elektroenergetskog sustava. To uključuje zaštitu od nestabilnosti i poremećaja koji bi mogli dovesti do kolapsa sustava.
- Zaštita opreme: Zaštita štiti elektroenergetsku opremu od oštećenja uzrokovanih preopterećenjem, prenaponskim udarima i drugim neželjenim uvjetima. To pomaže u produženju životnog vijeka opreme i smanjenju troškova održavanja.

Neki od ključnih elemenata zaštite u elektroenergetskom sustavu uključuju:

- Releji: Releji su ključni uređaji za zaštitu. Oni detektiraju abnormalne uvjete u sustavu i aktiviraju odgovarajuće mjere kako bi izolirali problematični dio mreže.
- Prekidači: Prekidači omogućuju brzo prekidanje struje u slučaju kvara kako bi se spriječilo širenje problema.
- Senzori: Senzori mjere struju, napon i druge relevantne parametre u sustavu kako bi releji mogli donijeti odluke na temelju stvarnih uvjeta.
- Kontrolni sustavi: Ovi sustavi prate i upravljaju elektroenergetskim sustavom te osiguravaju optimalan rad uz maksimalnu učinkovitost i sigurnost.
- Automatsko ponovno uključivanje: Ova funkcija automatski ponovno povezuje napajanje na mrežu nakon što se kvar otkloni, osiguravajući minimalno vrijeme prekida u opskrbi.

Automatsko ponovno uključivanje je korisno za poboljšanje pouzdanosti opskrbe električnom energijom, jer se oštećeni dijelovi mreže mogu brže i automatski izolirati, a zatim ponovno uključiti kada se problem otkloni [11].

Važno je napomenuti da moderni elektroenergetski sustavi postaju sve složeniji i pametniji, uključujući integraciju obnovljivih izvora energije, pametnih mjerenja i sustava za upravljanje opterećenjima. Ovi napredni sustavi zahtijevaju napredne tehnologije za zaštitu i upravljanje, kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost.

Zaštita u elektroenergetskom sustavu obuhvaća nekoliko ključnih aspekata. To uključuje arhitekturu zaštite, gdje se sustavi projektiraju s različitim nivoima zaštite, uključujući primarnu, sekundarnu i tercijarnu zaštitu kako bi se osigurala hijerarhija u reakciji na različite vrste kvarova. Koordinacija zaštite je također od suštinske važnosti. Ona osigurava da se releji aktiviraju u pravilnom redoslijedu kako bi se izbjegli nepotrebni prekid i omogućila brza izolacija kvara.

Dodatno, zaštita od udara munje igra ključnu ulogu u sprečavanju oštećenja električne opreme i infrastrukture uzrokovanih munjama. Osim toga, zaštita od elektromagnetskih smetnji (EMI) sprječava neželjene smetnje u električnoj opremi i sustavima. U nekim regijama, zaštita od krađe električne energije predstavlja značajan izazov, pa su razvijene različite tehnologije i prakse kako bi se spriječila neovlaštena potrošnja električne energije.

Zaštita u elektroenergetskom sustavu je kontinuirani proces koji zahtijeva stalno praćenje, nadogradnju i održavanje kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost opskrbe električnom energijom. Uz razvoj novih tehnologija i inovacija, zaštita će nastaviti napredovati kako bi odgovorila na sve složenije izazove modernog elektroenergetskog sustava.

## 4. KOORDINACIJA ZAŠTITE U FN ELEKTRANAMA

### 4.1. Svrha i osnovni kriteriji relejne zaštite

Relejna zaštita je ključni sustav u elektroenergetskim mrežama i električnim sustavima koji ima zadaću otkrivanja i brze reakcije na električne smetnje, kvarove i anomalije kako bi se zaštitili ljudi, oprema i cjelokupan elektroenergetski sustav od šteta i neželjenih posljedica. Relejna zaštita ima presudnu ulogu u održavanju sigurnosti, stabilnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava, te sprečavanju mogućih prekida i štetnih događaja.

Temeljna svrha relejne zaštite je prepoznati abnormalne uvjete u električnom sustavu, poput preopterećenja, kratkih spojeva (kvarovi), niskog napon, previsokog napona ili gubitka faze, te aktivirati odgovarajuće zaštitne mjere kako bi se spriječile štete i minimizirali rizici [11].

Ključni elementi relejne zaštite su releji, koji su elektronički uređaji koji detektiraju odstupanja od normalnog rada sustava te pokreću akcije zaštite, poput isključenja oštećenog dijela mreže. Releji se postavljaju na različitim točkama u elektroenergetskom sustavu i odgovorni su za zaštitu specifičnih dijelova mreže, poput transformatora, kabela, generatora i linija.

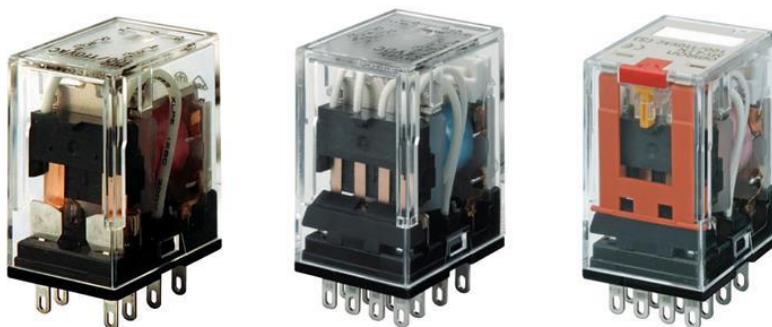
Relej je temeljni zaštitni uređaj u sustavu zaštite i njegova glavna uloga je neprestano nadziranje električnih ili neelektričnih parametara. Na temelju unaprijed postavljenih vrijednosti i odnosa između tih vrijednosti i prisutnih poremećaja, relej emitira signal za isključivanje prekidača. Električne veličine koje se nadziru uključuju napon, struju, frekvenciju, snagu i impedanciju, dok se neelektrične veličine kao što su brzina, tlak, temperatura i broj okretaja stroja također mogu kontrolirati [12].

Sadašnje tržište nudi obilje različitih releja za raznovrsne namjene te se mogu razvrstati na mnogo načina. Osnovna podjela prema vrsti izvedbe je:

- elektromehanički releji
- statički releji
- numerički releji [13].

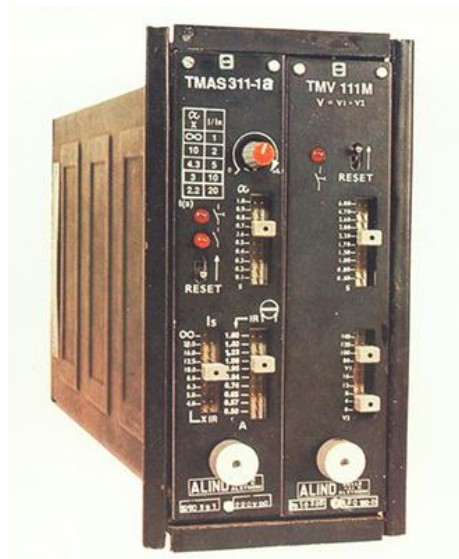
Elektromehanički releji su komponente koje omogućuju kontrolu električnih uređaja putem elektromagnetskog principa. Oni reagiraju na struju koja prolazi kroz njih tako da mehanički otvaraju

ili zatvaraju kontakte, omogućavajući ili prekidajući električnu vezu. Ovi releji su jednostavni za upotrebu, pouzdani i često se koriste za zaštitu i kontrolu električnih krugova. Slika 4.1. prikazuje pomoćni elektromehanički relej.



Slika 4.1. Prikaz elektromehaničkih pomoćnih releja [14]

Statički relej je elektronička komponenta koja obavlja iste funkcije kao i elektromehanički relej, ali nema pokretnih mehaničkih dijelova. Umjesto toga, koristi poluvodičke komponente i elektroničke sklopove za kontrolu električnih strujnih krugova. Statički releji su poznati po brzini reakcije, dugotrajnosti i odsustvu mehaničkog habanja, što ih čini pogodnima za mnoge aplikacije gdje je potrebna precizna i pouzdana kontrola struje. Slika 4.2. prikazuje standardni statički relej.



Slika 4.2. Prikaz statičkog releja[13]

Numerički releji su visoko sofisticirani uređaji koji kombiniraju elektroničke komponente i digitalnu obradu podataka kako bi precizno i brzo nadzirali električne sustave. Ovi releji mjere električne parametre u stvarnom vremenu pomoću senzora, kao što su strujni transformatori i naponski senzori, te digitalno obrađuju te podatke [13].

Koristeći numeričke algoritme, numerički releji analiziraju parametre i uspoređuju ih s unaprijed postavljenim pragovima. Kada otkriju abnormalne uvjete, kao što su preopterećenja, kratki spojevi ili nestabilnosti u električnom sustavu, numerički releji brzo donose odluke o isključenju odgovarajućih dijelova sustava kako bi se spriječile ozbiljne kvarove ili oštećenja.

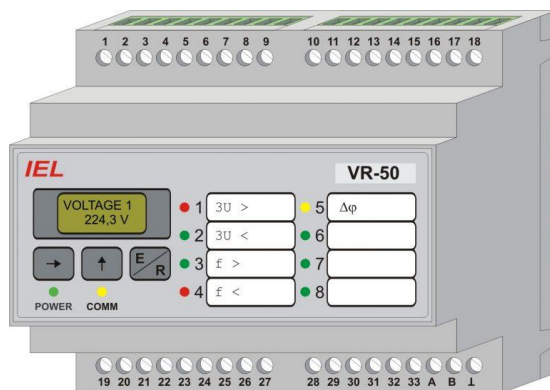
Osim toga, numerički releji često imaju mogućnost komunikacije s drugim uređajima i centralnim sustavima za daljinsko upravljanje i nadzor, što omogućuje daljinsku dijagnostiku i upravljanje električnim mrežama. Ovi releji su ključni za zaštitu i pouzdanost električnih sustava u širokom rasponu industrija, uključujući energetiku, industrijsku automatizaciju i transport [13].

Na slici 4.3. prikazan je jedan primjer numeričkog releja.



Slika 4.3. Prikaz numeričkog releja [15]

Primjer releja koji je korišten u ovom radu je IEL-VR50 (Slika 4.4.). Naponski relej VR-50 je numerički multifunkcionalni relej za nadzor sabirnica u niskonaponskim ili srednjenaponskim mrežama. Ako VR-50 otkrije odstupanje napona od postavljenih vrijednosti u skladu s odabranim zaštitnim funkcijama, izvodi signalizaciju i/ili signal za isključenje postrojenja. Naponski relej VR-50 koristi se za zaštitu i nadzor generatora, transformatora ili veza obnovljivih izvora energije s mrežom. Releji može pružiti zaštitu od preniskog i/ili previsokog napona, te od preniskih i/ili previsokih frekvencija. VR-50 omogućuje odabir dodatne funkcije za detekciju pomaka vektora kako bi se spriječio rad obnovljivog izvora energije u izoliranom načinu rada [16].



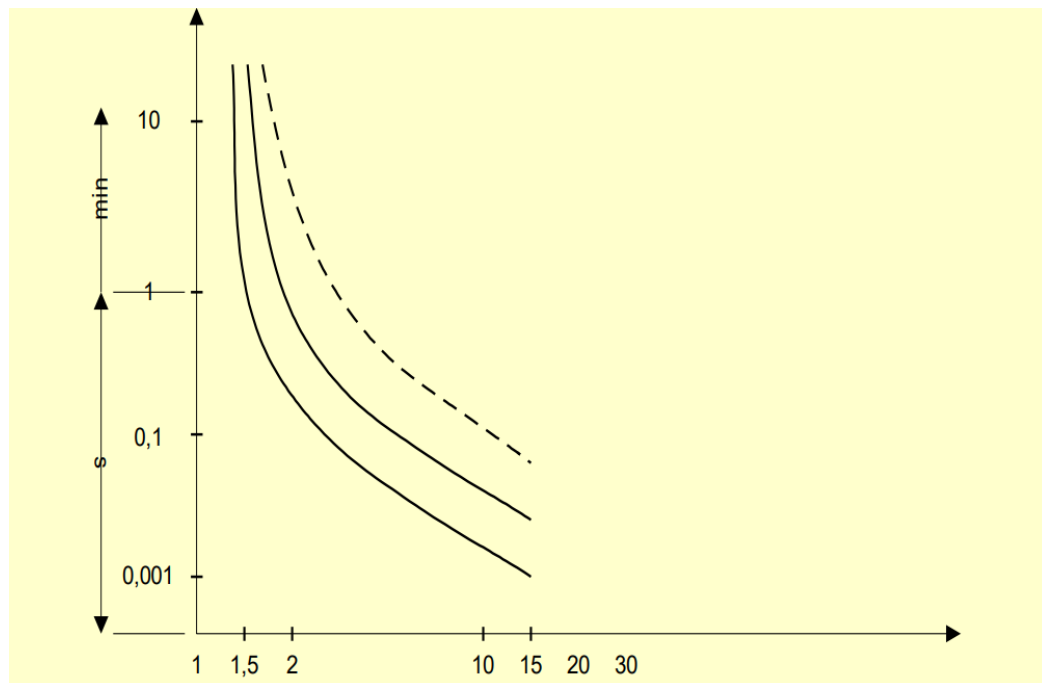
Slika 4.4. Releji IEL-VR50 [16]



## 4.2. Osigurači

Osigurači predstavljaju najstariji i najosnovniji oblik zaštite električnih sustava. Oni su pogodni za niske naponske mreže do 1000 V, ali se također proizvode za postrojenja s naponom do 35 kV. Važno je napomenuti da osigurači nisu tehnički zaštitni releji, ali imaju svoju ulogu u zaštiti električnih vodova od kratkih spojeva i pregrijavanja putem termičke reakcije [17].

Vremenska karakteristika osigurača prikazana je na slici 4.5.



Slika 4.5. Vremenska karakteristika osigurača [17]

Osnovni parametri osigurača su:

- nazivni napon osigurača  $U_n$
- nazivna struja uloška  $I_n$
- granična struja isključenja  $I_{gr}$
- vremenska karakteristika  $t(I)$

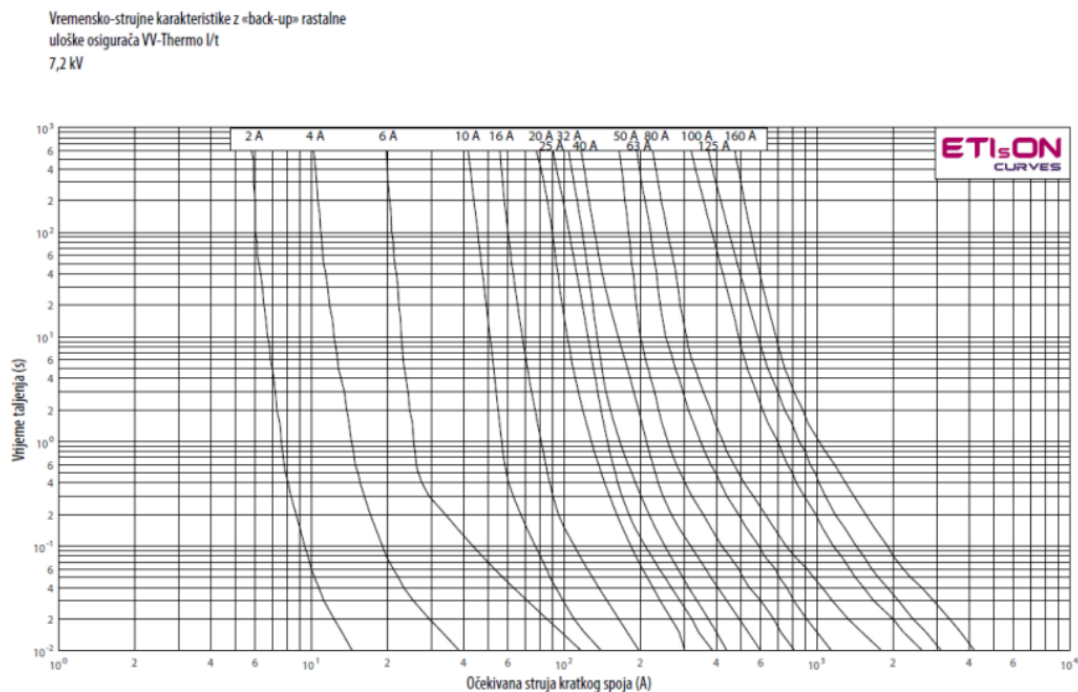
- nazivni napon utvrđuje oblik, izradu i dimenzije osigurača, dok se nazivna struja određuje putem standardnih testova minimalnih i maksimalnih nazivnih struja prekida tijekom jednog sata
- granična struja prekida je ona koju osigurač može prekinuti bez oštećenja poput eksplozije ili pucanja, i utvrđuje se na temelju razvijene topline u topljivom vodiču [17].

Podjela osigurača u različite kategorije:

- Srednjenaponski osigurači
- Niskonaponski osigurači

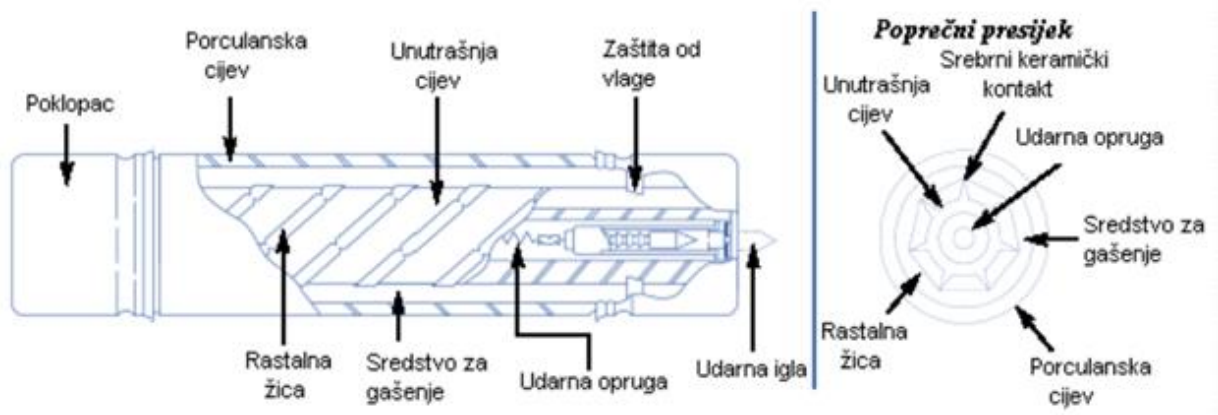
Srednjenaponski osigurači napona od 35 kV primjenjuju se kako bi prekinuli struju kratkog spoja prije nego što dostigne svoju maksimalnu vrijednost. Ovi osigurači se koriste u srednjenaponskim postrojenjima kako bi štitili naponske mjernike i energetske transformatore od struja kratkog spoja.

Slika 4.6. prikazuje karakteristiku srednjenaponskih osigurača.



Slika 4.6. Karakteristika srednjenaponskih osigurača [17]

Struktura srednjenaponskog osigurača od 35 kV (prikazano na slici 4.7.) uključuje porculansko tijelo u obliku cijevi koje sadrži više tankih srebrnih vodiča koji su paralelno povezani na posebnim držačima koji održavaju njihovu preciznu poziciju. Unutar tijela osigurača nalazi se kremenij pijesak koji pomaže u apsorpciji toplote, a služi i za gašenje električnog luka zahvaljujući svojem velikom toplinskom kapacitetu [18].



Slika 4.7. Prikaz srednjenaponskog osigurača [18]

Na krajevima tijela osigurača nalaze se metalne elektrode koje su povezane s unutarnjim srebrnim vodičima. Tijelo osigurača se ugrađuje između kontakata držača osigurača kako bi obavljao svoju funkciju zaštite u električnom sustavu [18].

Niskonaponski osigurači dolaze u različitim vrstama, veličinama i karakteristikama kako bi se prilagodili različitim aplikacijama i zaštitili električne krugove od potencijalnih opasnosti ili kvarova. Projektirani su za rad pri naponima do 1000 V. U tim uređajima s niskim naponom, fine granulacije punila smještene su oko bakrenog umetka. Njihova specifikacija odnosi se na struju od 630 ampera [18].

Postoje dvije osnovne kategorije niskonaponskih osigurača:

1. Rastalni osigurači
2. Automatski osigurači

Svi niskonaponski osigurači moraju biti dizajnirani tako da prekid strujnog kruga zbog preopterećenja ili kratkog spoja udovoljava sljedećim uvjetima:

- Prekid strujnog kruga, što uključuje rastapanje vodiča unutar osigurača, uvijek se događa u određenom dijelu osigurača koji je izrađen od materijala otpornog na vatru.
- Osigurač mora imati jasno vidljiv indikator koji signalizira prekid strujnog kruga.
- Osigurač mora biti konstruiran tako da se njegov dio gdje se događa prekid strujnog kruga ne može zamijeniti drugim dijelom namijenjenim za veća opterećenja [18].

Kod rastalnih osigurača, zaštita strujnih krugova postiže se namjernim smanjenjem presjeka žica unutar tijela osigurača. Za tu svrhu koriste se posebni materijali s precizno definiranim presjecima, prilagođeni određenoj nazivnoj struji osigurača. Kada dođe do taljenja jedne ili više žica unutar tijela osigurača, to rezultira prekidom strujnog kruga koji je osigurač namijenjen zaštititi. Vrijeme potrebno za prekid električne struje u zaštićenom strujnom krugu određeno je vremenom i vremenskom funkcijom struje.

Postoje različite izvedbe niskonaponskih rastalnih osigurača, uključujući:

1. Osigurače tipa D (DIAZED i NEOZED)
2. Niskonaponske visokoučinske osigurače tipa NH
3. Manje osigurače namijenjene električnim uređajima [18].

Automatski osigurači su uređaji koji funkcioniraju na temelju pojave sile koja se generira kada struja prolazi kroz teretni krug (ili u slučaju kratkog spoja). Ta sila djeluje protiv sile opruge unutar osigurača i prekida strujni krug u trenutku kada sila generirana strujom, što je proporcionalno intenzitetu teretne struje, postane veća od sile opruge. Ovi osigurači mogu se ponovno aktivirati ručno bez zamjene dijelova, ako je uzrok preopterećenja, odnosno kratkog spoja, uklonjen iz strujnog kruga [18].

Postoje različite vrste automatskih osigurača, uključujući:

1. Termičke osigurače
2. Nadstrujne osigurače
3. Naponske osigurače

#### 4.2.1. Odabir osigurača

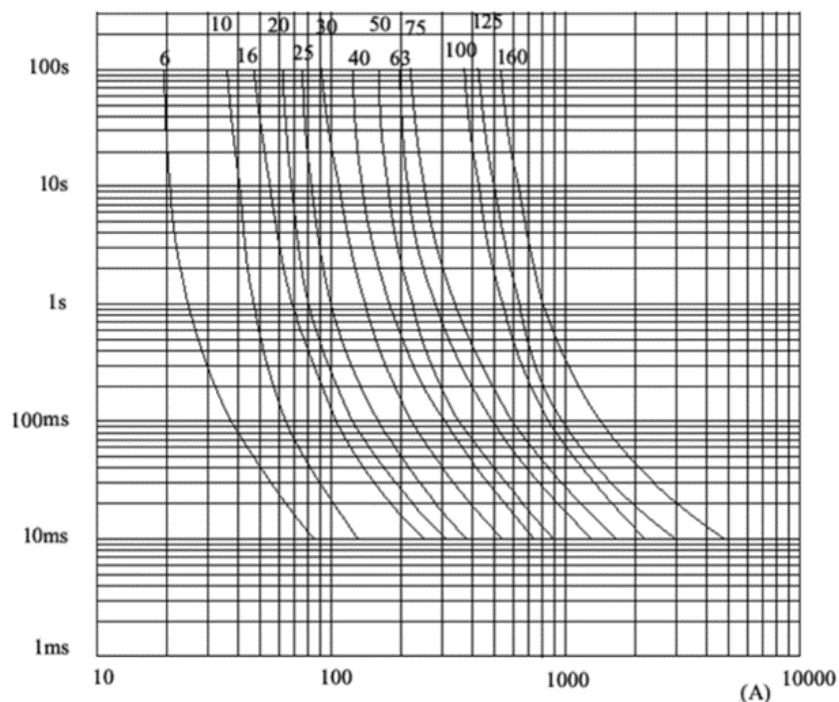
Odabir odgovarajućeg osigurača za određenu primjenu ključan je za pravilno funkcioniranje i sigurnost električnih sustava. Odabir osigurača ovisi o nazivnoj struji uređaja ili dijelu postrojenja koje će taj osigurač štititi.

Ako se osigurač koristi za zaštitu dalekovoda (što je rijetko), nazivna struja osigurača trebala bi biti veća od maksimalne struje koja se očekuje tijekom normalnog rada.

Kod osigurača namijenjenih zaštiti kablskih vodova, nazivna struja se određuje prema najvećoj dopuštenoj stalnoj struji, koja se određuje na temelju dopuštenog zagrijavanja izolacije kabela.

Nazivna struja osigurača za zaštitu energetskih transformatora određuje se na temelju nazivne struje samog transformatora. Obično se odabire nazivna struja osigurača koja je otprilike dva puta veća od nazivne struje transformatora kako bi se spriječilo pregrijavanje osigurača pri uključenju transformatora. Važno je paziti na selektivnost zaštite kako bi se osiguralo da će prvi osigurač između mjesta kvara (kratkog spoja) i izvora napona biti taj koji će prekinuti struju [18].

Slika 4.8. prikazuje karakteristiku niskonaponskog osigurača



Slika 4.8. Ovisnost vremena taljenja osigurača o veličini struje (Karakteristika NN osigurača) [17]

### 4.3. Prekidači

Prekidači su električni uređaji koji obavljaju funkcije uključivanja i isključivanja električnih krugova, istovremeno štiteći ih od kratkih spojeva ili preopterećenja. Osnovna svrha prekidača je brzo prekinuti električni krug kako bi se spriječila daljnja oštećenja. Za razliku od osigurača, prekidači se mogu

ponovno aktivirati, bilo ručno ili automatski, te nastaviti normalan rad. Prekidači se koriste za prekidanje struja kratkih spojeva, pogonskih struja, kapacitivnih i manjih induktivnih struja. Prekidač je ključni element u elektroenergetskim postrojenjima jer omogućuje kontrolirano uključivanje normalnih pogonskih struja te isključivanje i ponovno uključivanje struja kratkih spojeva [18].

Podjela prekidača prema nazivnom naponu :

- Niskonaponski (manje od 1 kV)
- Srednjenaponski (1 kV do 52 kV)
- Visokonaponski (66 kV do 756 kV)
- Za vrlo visoke napone (iznad 756 kV)

Niskonaponski prekidači se mogu klasificirati u dva osnovna tipa:

1. MCB (Miniature Circuit Breaker, minijaturni prekidač) - Nazivna struja koju mogu podnijeti iznosi do 100 A. U većini slučajeva, nije moguće prilagoditi struju koja će uzrokovati isključenje. Ovi prekidači funkcioniraju temeljem toplinskog ili toplinsko-magnetskog principa. Na slici 4.9. je prikaz MCB prekidača.



Slika 4.9. MCB prekidač[20]

2. MCCB (Molded Case Circuit Breaker, prekidač zalivenog kućišta) - Ovi prekidači mogu podnijeti nazivnu struju do 1000 A. Često je moguće prilagoditi struju koja će uzrokovati isključenje. I MCCB-ovi se temelje na termičko-magnetskom principu djelovanja. Na slici 4.10. je prikaz MCCB prekidača.



Slika 4.10. Prikaz MCCB prekidača[21]

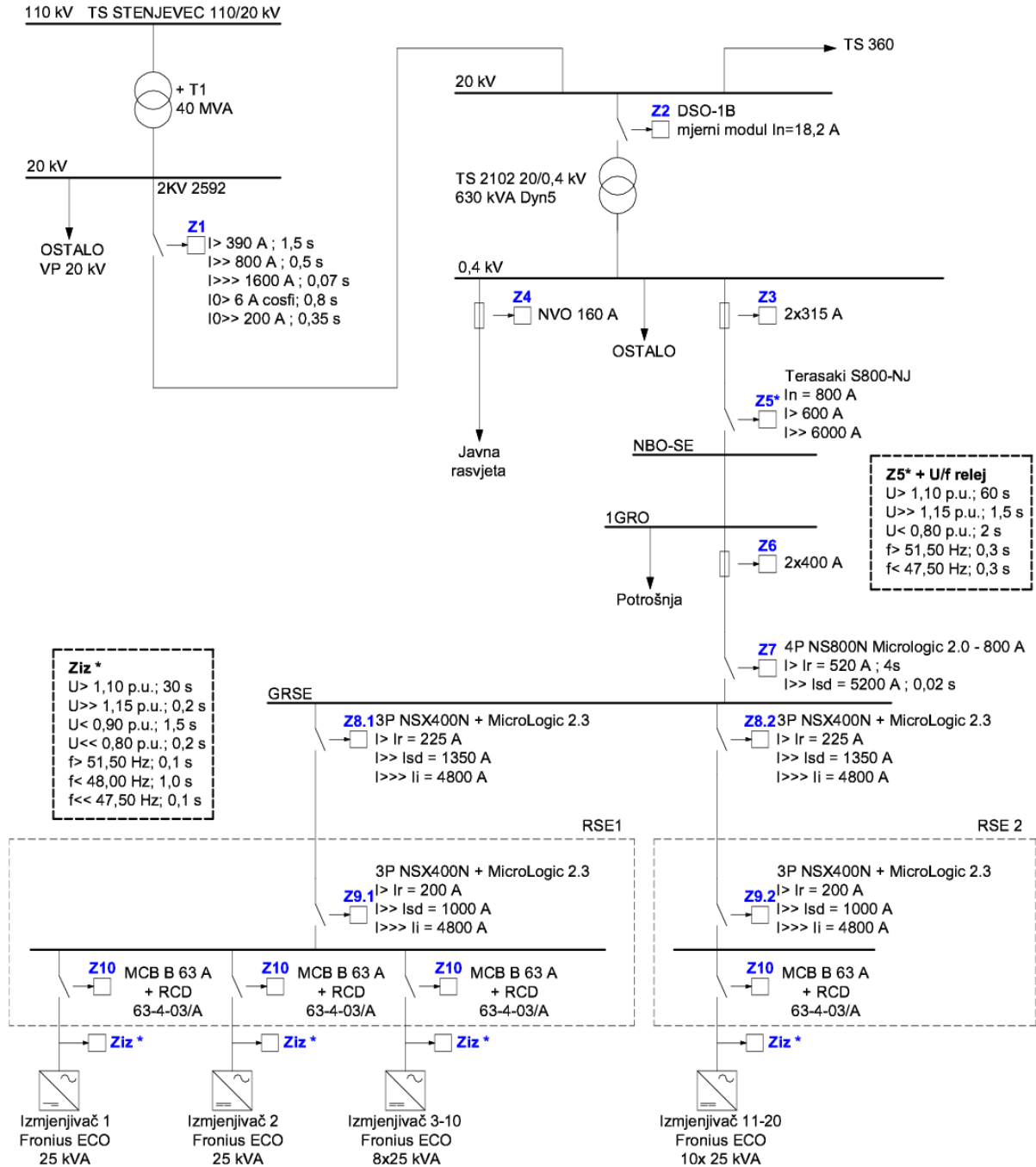
U domaćinstvima se obično koristi termički-magnetski MCB s nazivnom strujom od 10 A koji se montira na DIN šine.

Srednjenaponski prekidači su često vakuumski, uljni, zračni ili SF<sub>6</sub> prekidači. Trenutno se najčešće koriste vakuumski prekidači (do 35 kV) i SF<sub>6</sub> prekidači.

Visokonaponski prekidači se mogu podijeliti prema načinu upravljivosti na jednofazne i trofazne upravljive prekidače. U današnjem vremenu, najviše se koriste SF<sub>6</sub> prekidači. U takvim prekidačima, sumpor heksafluorid (SF<sub>6</sub>) se koristi kao sredstvo za gašenje električnog luka. Kontakti prekidača se otvaraju primjenom visokotlačnog strujanja plina SF<sub>6</sub> kako bi se ugasila električna iskra. Vodljivi slobodni elektroni unutar električnog luka brzo se kemijski vežu za molekule plina, stvarajući relativno nepokretne negativne ione. Ovaj proces brzo povećava izolacijsku čvrstoću, što dovodi do gašenja električnog luka. SF<sub>6</sub> prekidači su izuzetno efikasni za visoke snage i visoke naponske primjene. Ovi prekidači su dostupni u širokom spektru, uključujući primjene srednjeg i visokog napona, čak do 800 kV i više.

## 5. MODEL FN ELEKTRANE 350 KW

U programskom paketu DIGSILENT PowerFactory 2022 modelirana je fotonaponska elektrana nazivne snage 350 kW (Slika 5.1)



Slika 5.1. Nadomjesna shema sa ucrtanim zaštitnim elementima



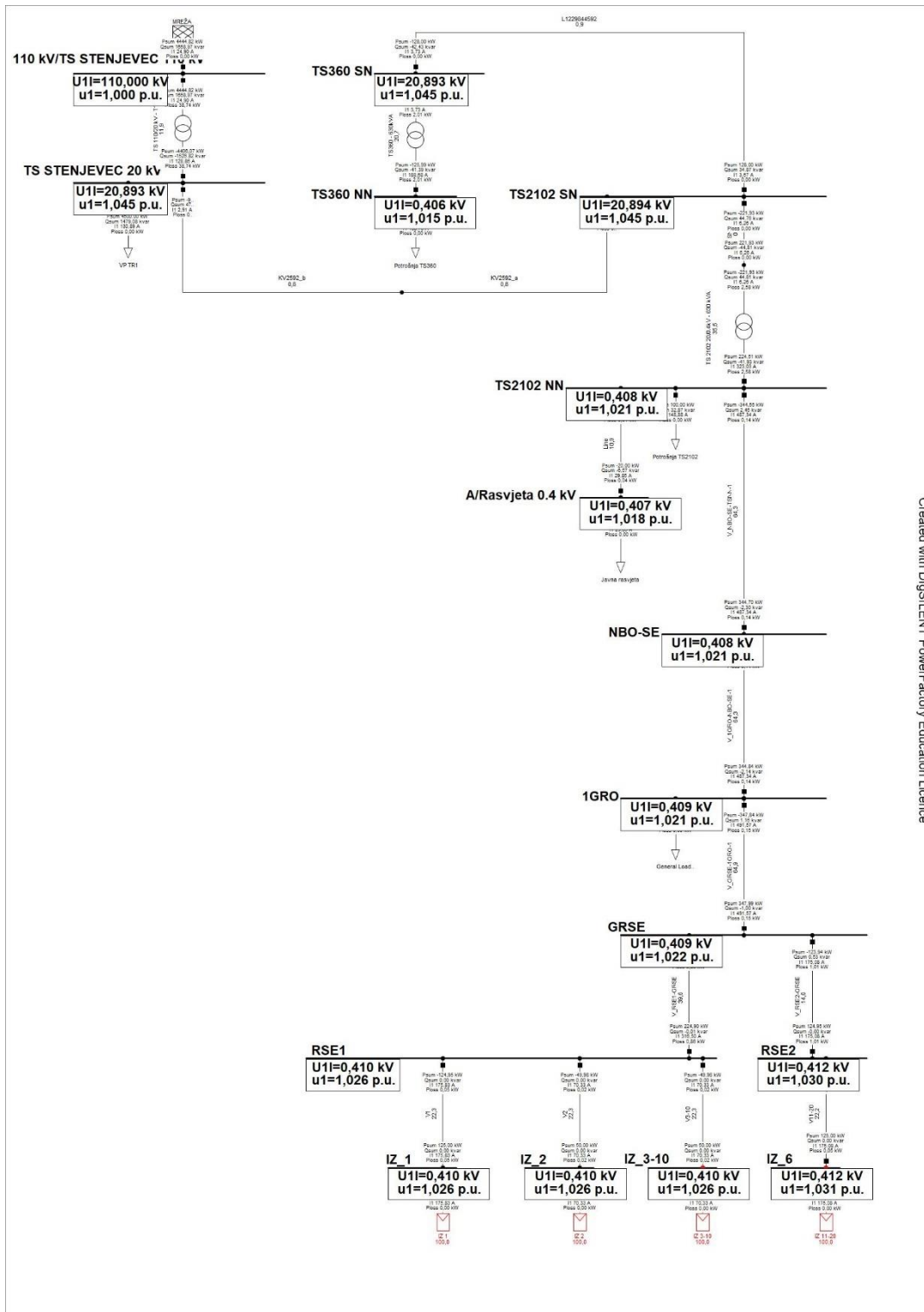
Cilj ovog istraživanja je odrediti vrijednosti karakterističnih parametara različitih vrsta kvarova koji se mogu javiti u sljedećim situacijama:

- U statičkim generatorima (izmjenjivačima).
- U niskonaponskom vodu kojim se elektrana povezuje na mrežu ili sabirnice srednjeg i niskog napona.
- U niskonaponskoj mreži koja je spojena na iste sabirnice niskog napona kao i elektrana.
- Na sučelju srednjeg napona s transformatorskom stanicom srednjeg/niskog napona na koju je povezana promatrana elektrana.
- Na sredjenaponskim vodovima povezanim s izvorom električne energije transformatorske stanice visokog napona (srednjeg napona) i srednje/niske napone sabirnice transformatorske stanice srednjeg/niskog napona, na koje je priključena promatrana elektrana.
- Na sredjenaponskim vodovima povezanim s transformatorskom stanicom visokog napona (srednjeg napona) i koji nisu povezani sa srednje/niskonaponskim sabirnicama transformatorske stanice srednjeg/niskog napona, na koje je priključena elektrana.

Na temelju vrijednosti karakterističnih veličina kvarova, rad treba provjeriti predloženo podešenje zaštite, te na temelju istraživanja predložiti potrebne promjene razine prorade (uzbude) i vremensko zatezanje djelovanja odgovarajuće zaštite.

Izbor razine prorade i vremensko zatezanje djelovanja odgovarajuće zaštite treba izabrati tako da budu zadovoljeni temeljni zahtjevi za djelovanjem zaštite (osjetljivost, brzina, selektivnost, rezerva) kada se mjesto kvara napaja sa strane mreže i elektrane suprotnim smjerom njihovog udjela i kada se mjesto kvara napaja sa strane mreže i elektrane istim smjerom njihovog udjela u ukupnoj struji na mjestu kvara. Cilj je utvrditi razinu potiskivanja struje kvara između mreže i elektrane i provjeru djelovanja zaštite s izabranim podešenjima u tim uvjetima.

Ispitivanje strujnih tokova kratkog spoja, kako minimalnih tako i maksimalnih, koji prolaze kroz doprinos mreže i elektrane, služi za prilagodbu nadstrujnih zaštitnih postavki ( $I>$ ;  $I>>$ ;  $I>>>$ ) u bilo kojoj konfiguraciji. Ovim postavkama osigurava se zadovoljenje osnovnih zahtjeva postavljenih pred svaku zaštitu od kratkog spoja. Osim toga, ove postavke su ključne kada se elektrana paralelno povezuje s mrežom i za učinkovito izdvajanje u neprikladnim situacijama paralelnog rada. Slika 5.2 prikazuje tokove snage FN elektrane 350 kW.



Created with DIGSILENT PowerFactory Education Licence

Slika 5.2. Tokovi snaga (početno stanje mreže u simulacijama)

Simulacije će se vršiti u programskom paketu DIGSILENT PowerFactory 2022.

RMS Simulacije su rađene sa početnim stanjem u mreži koje je prikazano na slici 5.2.

Prikaz postojeće zaštite FN elektrane 350 kW :

### **Zaštita Z1 - VP 20 kV 2592**

Podešenja zaštitnih članova:

- $I > 390 \text{ A}$  ; 1,5 s
- $I \gg 800 \text{ A}$  ; 0,5 s
- $i \gg \gg 1600 \text{ A}$  ; 0,07 s
- $I_0 > 6 \text{ A cosfi}$ ; 0,8 s
- $I_0 \gg 200 \text{ A}$ ; 0,35 s

### **Zaštita Z2 - DSO 1B; In=18,20 A:**

- U TS 2102 zaštita trafo polja je izvedena zaštitnim relejem DSO 1B; mjerni modul  $I_n=18,2\text{A}$

### **Zaštita Z3 - NVO 2x315A:**

- osigurači 2x315 A

### **Zaštita Z4 - NVO 160A:**

- osigurači 160 A

### **Zaštita Z5 - Terasaki S800-NJ In=800A (+U/f relej):**

- $I > 600\text{A}$
- $I \gg 6000 \text{ A}$

### **Podešenje U/f zaštitnog releja IEL-VR50:**

- $U > 1,10 \text{ p.u.}$  ; 60 s
- $U \gg 1,15 \text{ p.u.}$  ; 1,5 s
- $U < 0,80 \text{ p.u.}$  ; 2 s
- $f > 51,50 \text{ Hz}$  ; 0,3 s
- $f < 47,50 \text{ Hz}$  ; 0,3 s

**Zaštita Z6 - NVO 2x400A:**

- osigurači 400 A

**Zaštita Z7 - 4P NS800N Micrologic 2.0 - 800 A:**

- $I > I_r = 520 \text{ A} ; 4 \text{ s}$
- $I >> I_{sd} = 5200 \text{ A} ; 0,02 \text{ s}$

**Zaštita Z8.1 i Z8.2 - NSX400N + MicroLogic 2.3:**

- $I > I_r = 225 \text{ A}$
- $I >> I_{sd} = 1350 \text{ A}$
- $I >>> I_i = 4800 \text{ A}$

**Zaštita Z9.1 i Z9.2 - NSX400N + MicroLogic 2.3:**

- $I > I_r = 200 \text{ A}$
- $I >> I_{sd} = 1000 \text{ A}$
- $I >>> I_i = 4800 \text{ A}$

**Zaštita Z10 - MCB B 63A (Schneider Electric):**

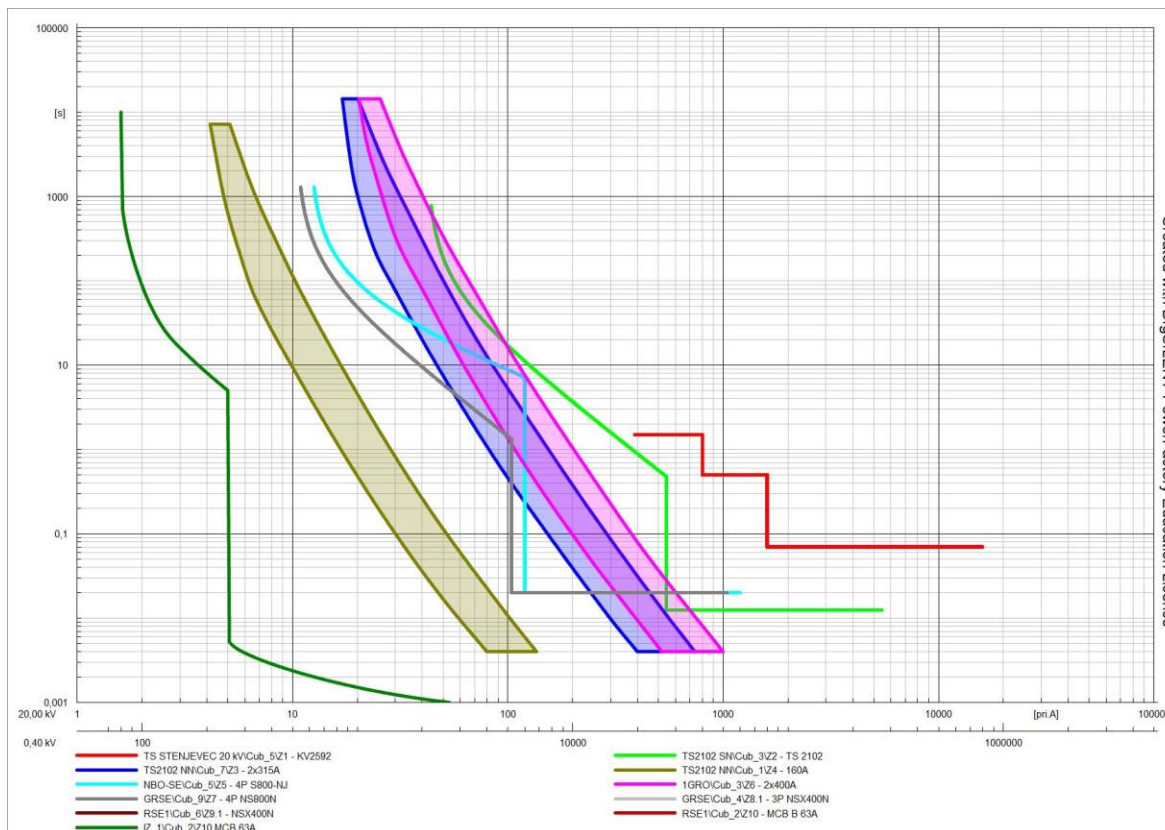
- Automatski prekidač B  $I_n = 63 \text{ A} + \text{RCD}$  uređaj 63-4-03/A (za svaki izmjenjivač posebno)

**Zaštita Ziz**

Zaštita u izmjenjivačima sa sljedećim podešenjem:

- $U > 1,10 \text{ pu} ; 30\text{s}$
- $U >> 1,15 \text{ pu} ; 0,2\text{s}$
- $U < 0,90 \text{ pu} 1,5 \text{ s}$
- $U << 0,80 \text{ pu} 0,2 \text{ s}$
- $f > 51,5 \text{ Hz} ; 0,1\text{s}$
- $f < 48,0 \text{ Hz} ; 1,0\text{s}$
- $f << 47,5 \text{ Hz} ; 0,1\text{s}$

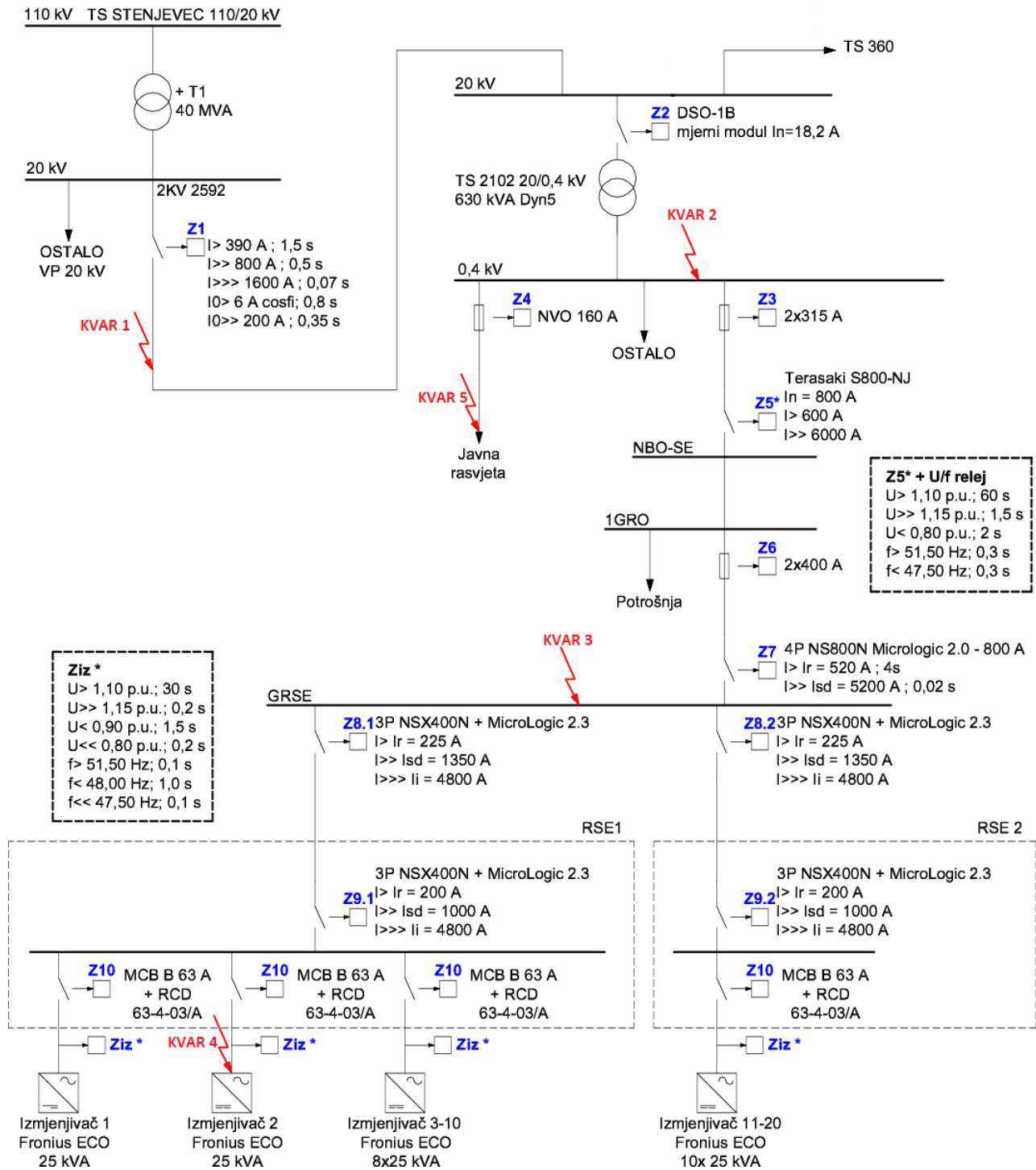
Slika 5.3. prikazuje isklopne karakteristike zaštitnih elemenata.



Slika 5.3. Prikaz I-t karakteristika pojedinih zaštita

Isklopne karakteristike zaštitnih elemenata odnose se na specifične parametre i postavke tih elemenata koji se koriste za kontrolu i zaštitu električnih sustava. Ove karakteristike igraju ključnu ulogu u osiguravanju pouzdanosti i sigurnosti elektroenergetskih instalacija.

U ovom radu analizirani su kvarovi koji su se pojavili na 5 različitim lokacija, a ti kvarovi su vizualno prikazani na slici 5.4. Ovim radom se detaljno proučavalo svaki od tih kvarova kako bi se bolje razumjela priroda i posljedice svakog pojedinog incidenta. Ovi analizirani kvarovi čine ključnu komponentu ovog diplomskog rada, pružajući dublji uvid u dinamiku elektroenergetskog sustava i njegovu zaštitu.



Slika 5.4. Nadomjesna shema sa označenim mjestima simulacije svih kvarova

U tablici označenoj kao tablica 5.1. prikazani su rezultati pojedinačnih simulacija kratkih spojeva (*Root Mean Square* - RMS). Ovi rezultati predstavljaju ključne podatke dobivene tijekom simulacija kratkih spojeva i služe kao temelj za daljnju analizu i razumijevanje ponašanja elektroenergetskog sustava u takvim situacijama.

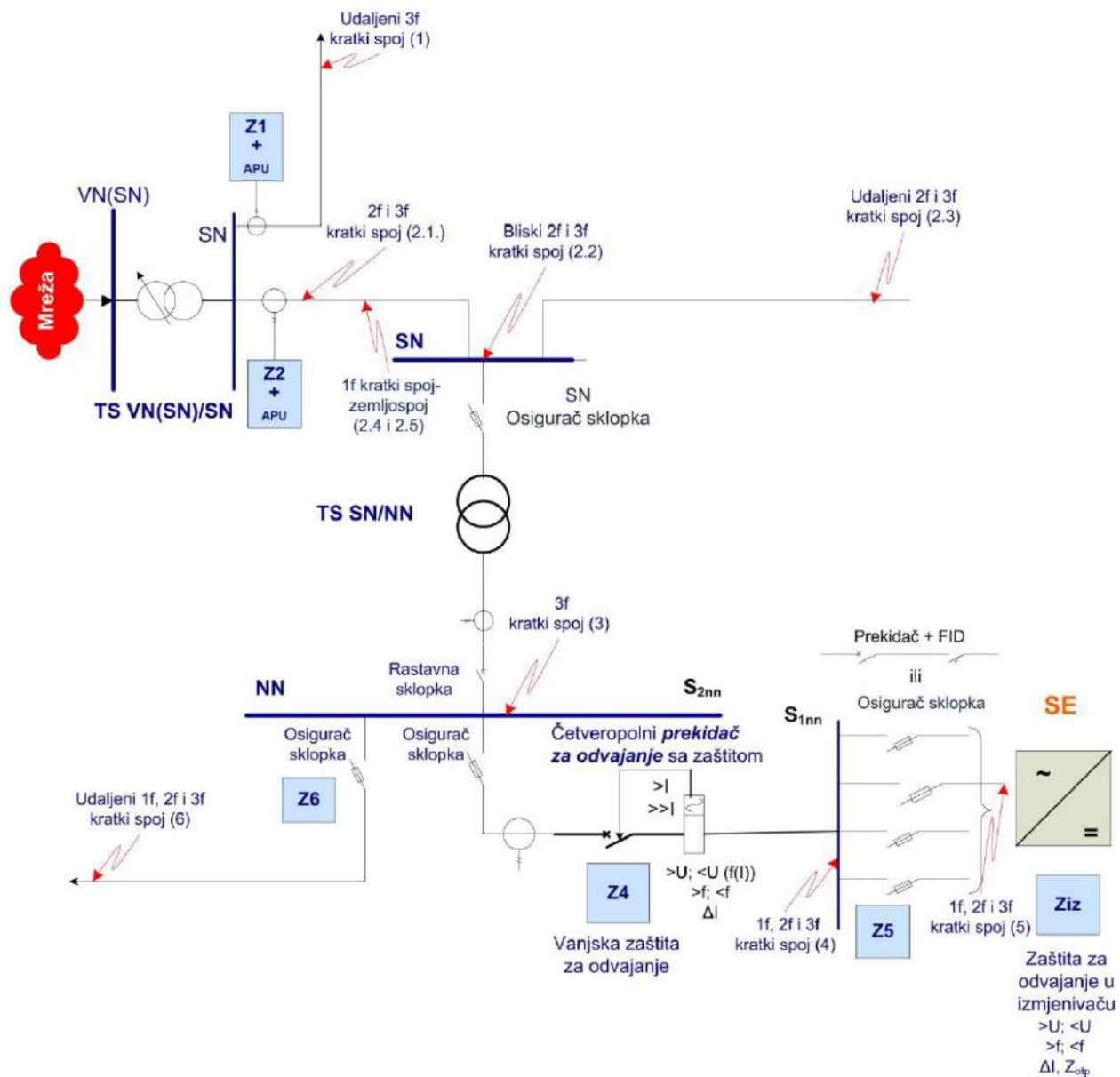
Oznaka prema smjernicama	Vrste kvara	Struja nadređene mreže 20 kV [A]	Struja elektrane [A]	Struja mjesta kvara [A]
<b>KS 1</b>	3f	8372,989	600,908	8384,004
<b>KS 2</b>	3f	450,402	570,854	23559,67
<b>KS 3</b>	3f	417,538	21306,68	21905,09
<b>KS 4</b>	3f	320,174	16228,63	16805,96
<b>KS 5</b>	3f	162,739	544,444	8500,677

Tablica 5.1. Rezultati pojedinih simulacija kratkih spojeva (RMS)

Sljedeća istraživanja su provedeni za trofazne kvarove čiji je cilj provjeriti uvjete za djelovanje osigurača kao nadstrujne zaštite i zaštite napona opasnosti za ljude kod pojave napona na uzemljivaču (strujno zaštitna sklopka).

Na slici 5.5. je načelni prikaz mreže i elektrane za snage > 100 kW. Ovaj je prikaz samo načelni i može se prilagoditi specifičnostima pojedinih elektroenergetskih sustava i vrstama elektrana.

Elektrane za snage veće od 100 kW obično su dio složenih elektroenergetskih mreža koje zahtijevaju precizno planiranje, upravljanje i zaštitu kako bi osigurale pouzdanu opskrbu električnom energijom.



Slika 5.5. Načelni prikaz mreže i elektrane za snage > 100 kW priključene na NN mrežu

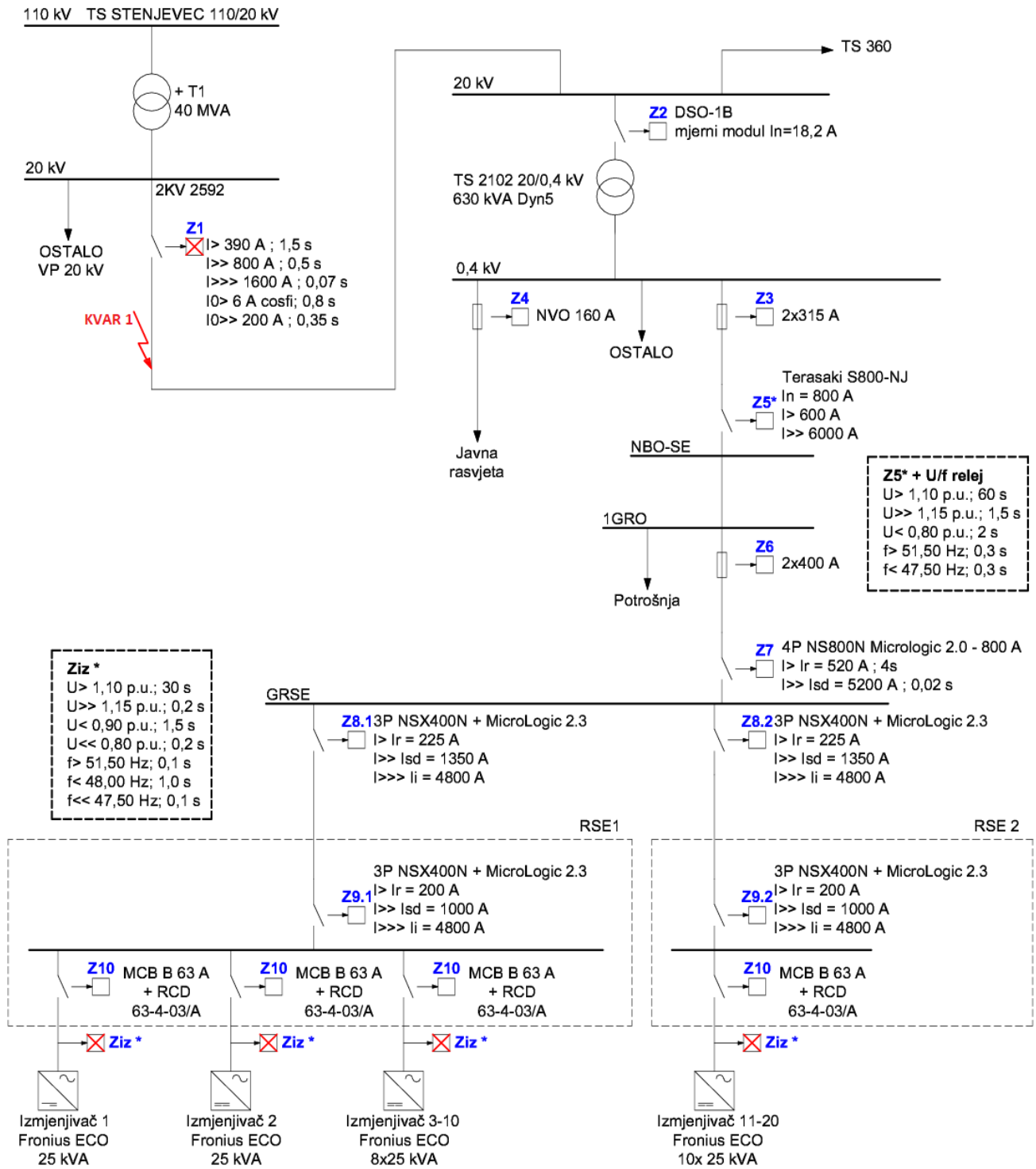
### 5.1. Kvar 1

Kvarovi na vodu od mrežnog izvora 110/20 kV prema promatranoj elektrani.

Ispitivanje učinkovitosti postavljenih zaštitnih mjera za trofazni kratak spoj na mjestu kvara 1 provodi se za situaciju gdje je impedancija kruga na mjestu kvara jednaka  $0 \Omega$ . Kratki spoj se odvija u trenutku  $t=100$  ms nakon početka simulacije, a trajanje same simulacije iznosi 500 ms.

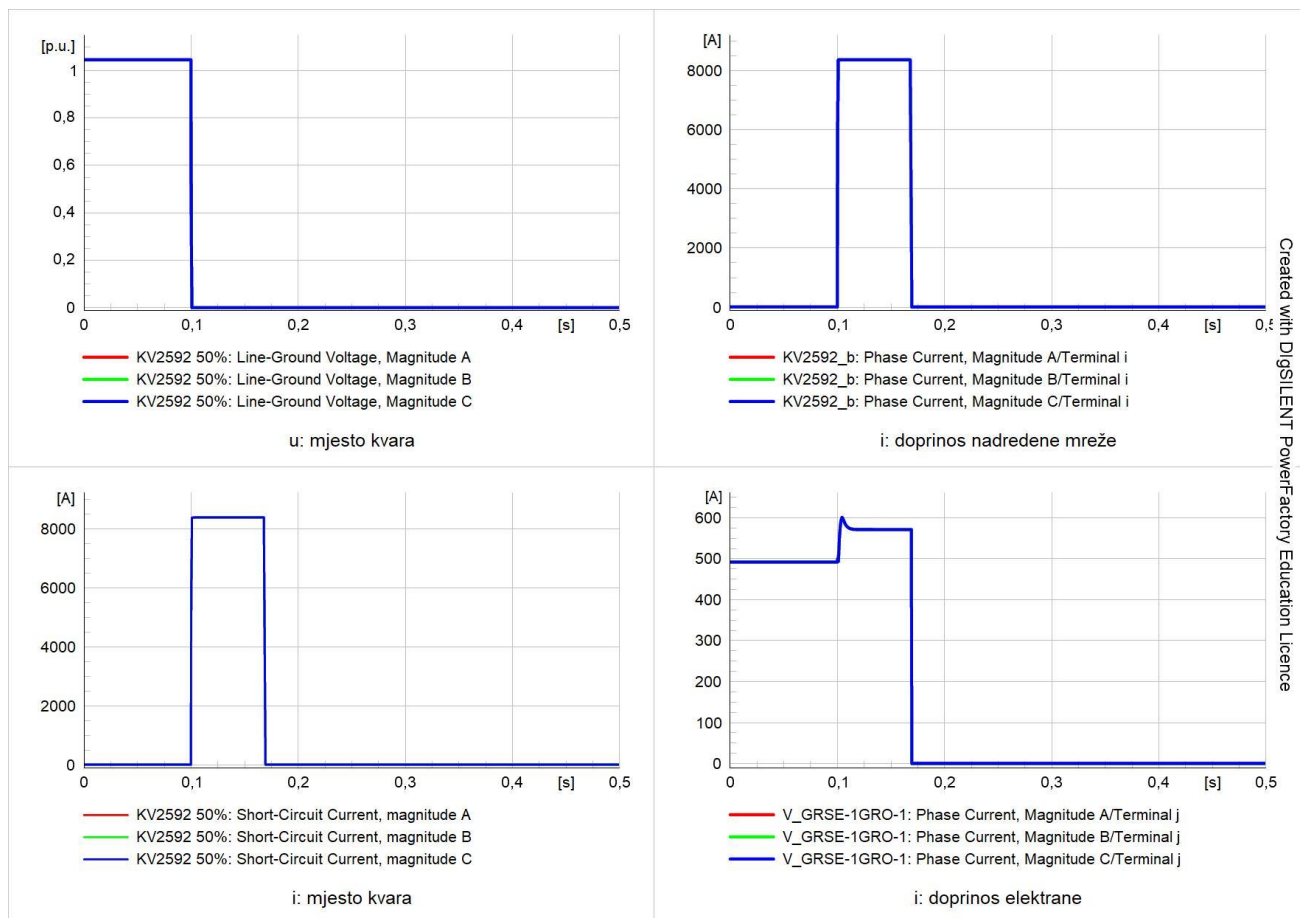
Na slici 5.6. je shematski prikaz simulacije za mjesto kvara 1, te je označeno koja je zaštita proradila.





Slika 5.6. Shematski prikaz simulacije za slučaj kvara 1

Rezultati dobiveni iz registratora događaja programskog paketa DIGSILENT PowerFactory 2022 prikazani su na slici 5.7. (RMS vrijednosti struja i napona).



Slika 5.7. RMS vrijednosti struja i napona: Kvar 1-3f

Na temelju ovih rezultata, dolazimo do sljedećih informacija :

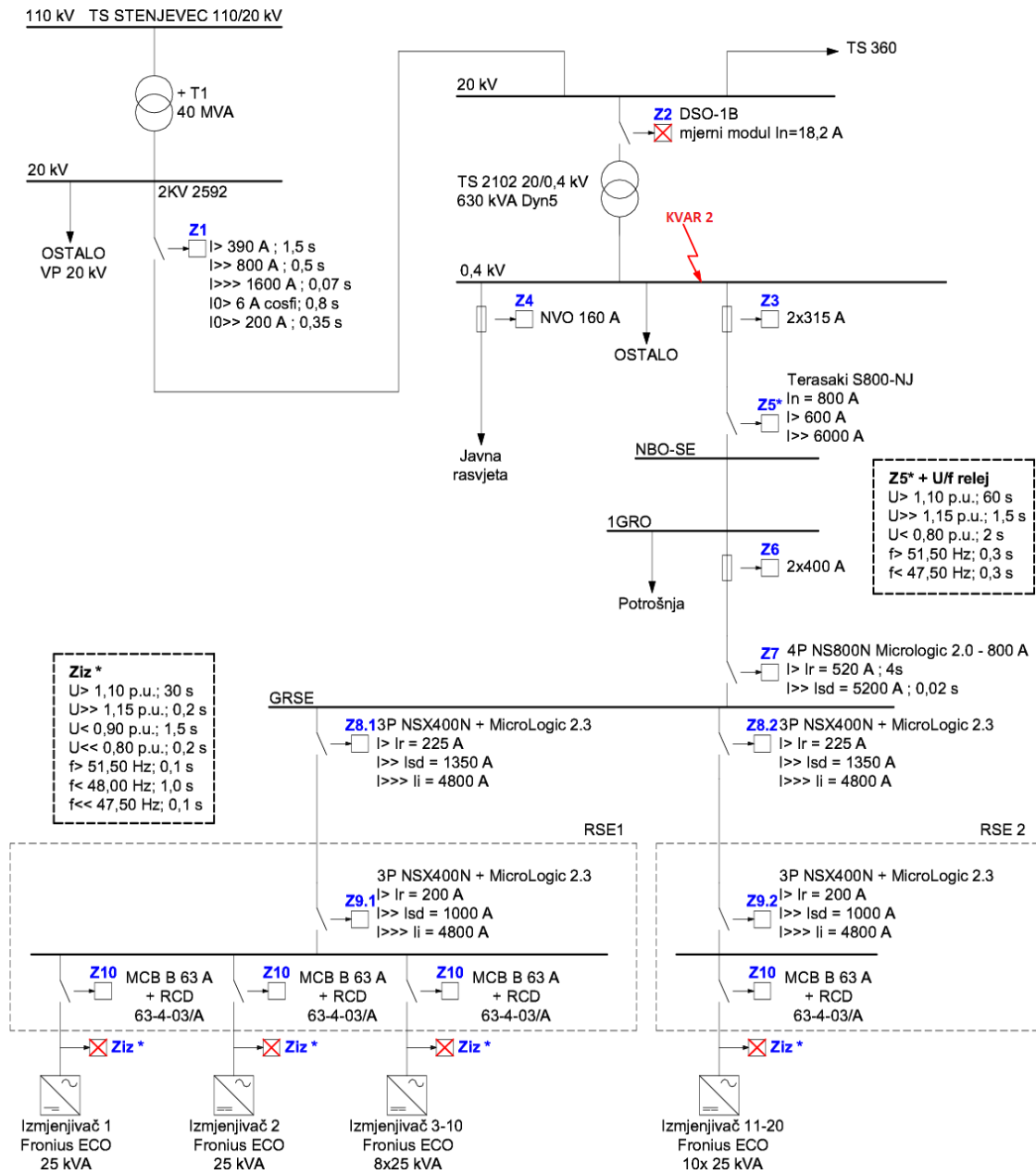
- Dolazi do pobude člana  $I \gg \gg$  u Z1 - VP KV2592. Releji šalje nalog za otvaranje kontakta prekidača u vodnom polju VP KV2592 - 20 kV
- Prekidač u vodnom polju otvara svoje kontakte
- Vrijeme odrade zaštite Z1 je 70 ms
- Izmjenjivači su povezani s elektroenergetskom mrežom i automatski se isključuju iz mreže nakon pojave problema u napajanju. Oni neće ponovno početi raditi sve dok se problem ne otkloni.

## 5.2. Kvar 2

Kvarovi na NN sabirnicama TS SN/NN u čijoj NN mreži je promatrana elektrana.

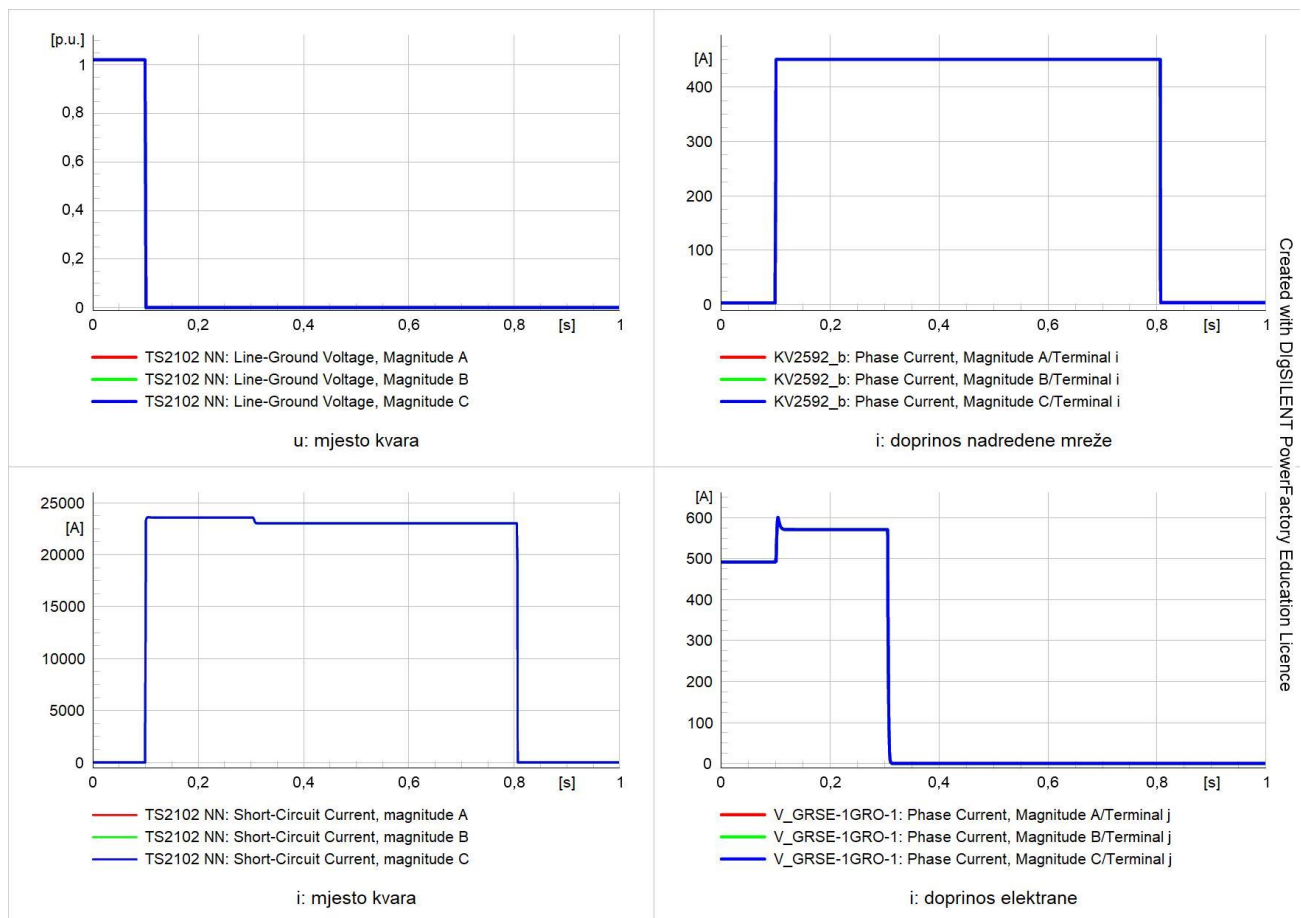
Ispitivanje učinkovitosti postavljenih zaštitnih mjera za trofazni kratak spoj na mjestu kvara 2 provodi se za situaciju gdje je impedancija kruga na mjestu kvara jednaka  $0 \Omega$ . Kratki spoj se odvija u trenutku  $t=100$  ms nakon početka simulacije, a trajanje same simulacije iznosi 1000 ms.

Na slici 5.8. je shematski prikaz simulacije za mjesto kvara 2, te je označeno koja je zaštita proradila.



Slika 5.8. Shematski prikaz simulacije za slučaj kvara 2

Rezultati dobiveni iz registratora događaja programskog paketa DIGSILENT PowerFactory 2022 prikazani su na slici 5.9. (RMS vrijednosti struja i napona).



Slika 5.9. RMS vrijednosti struja i napona: Kvar 2-3f

Na temelju ovih rezultata, dolazimo do sljedećih informacija :

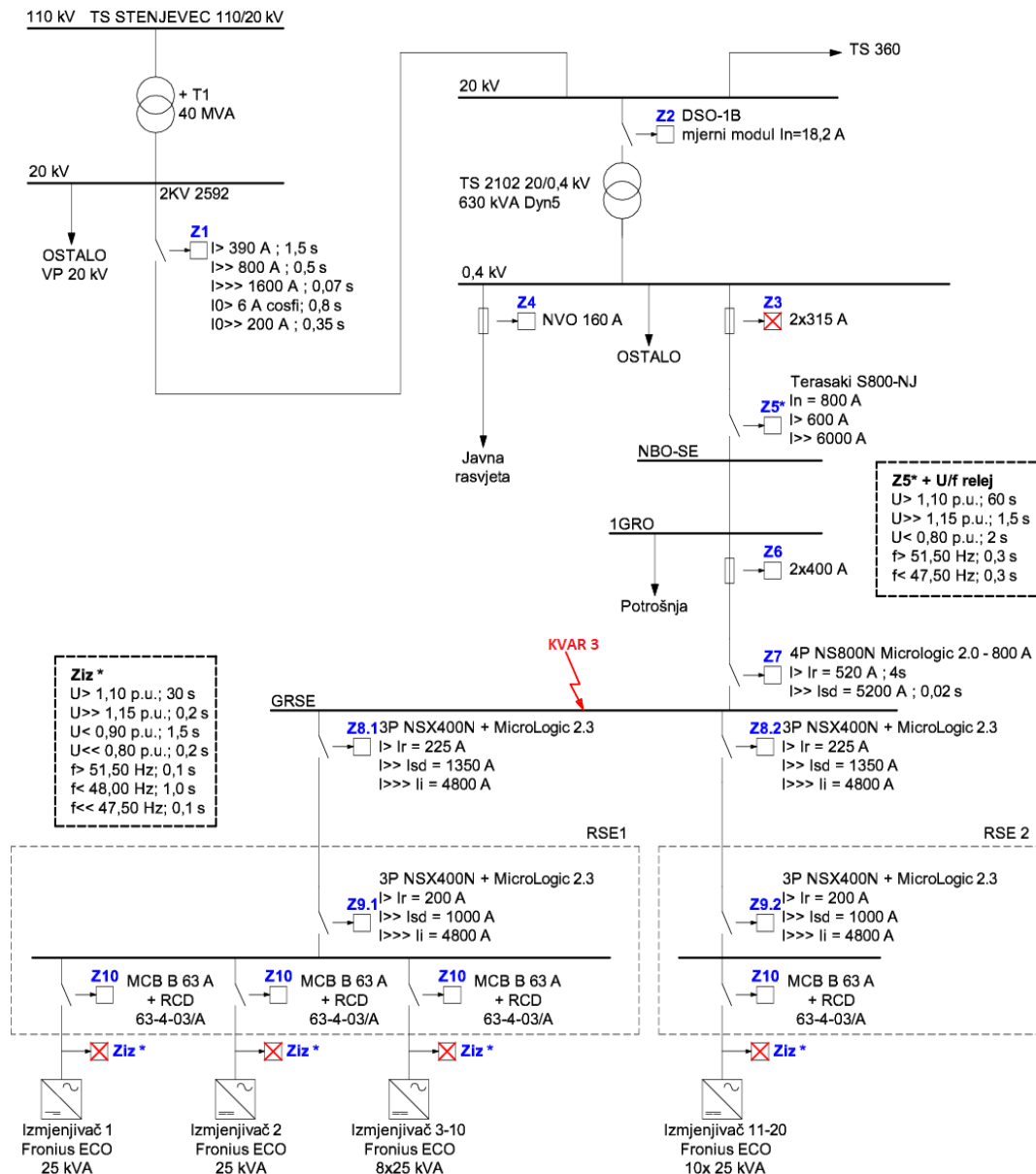
- Dolazi do prorade zaštite Z2 - DSO-1B u TP.
- Vrijeme odrade zaštite Z2 je 776 ms
- Izmjenjivačima se aktivira podnaponska zaštita i odvajaju se od mreže u vremenu od 0,2 s nakon nastanka kvara.

### 5.3. Kvar 3

Kvarovi na NN sabirnicama skupine izmjenjivača.

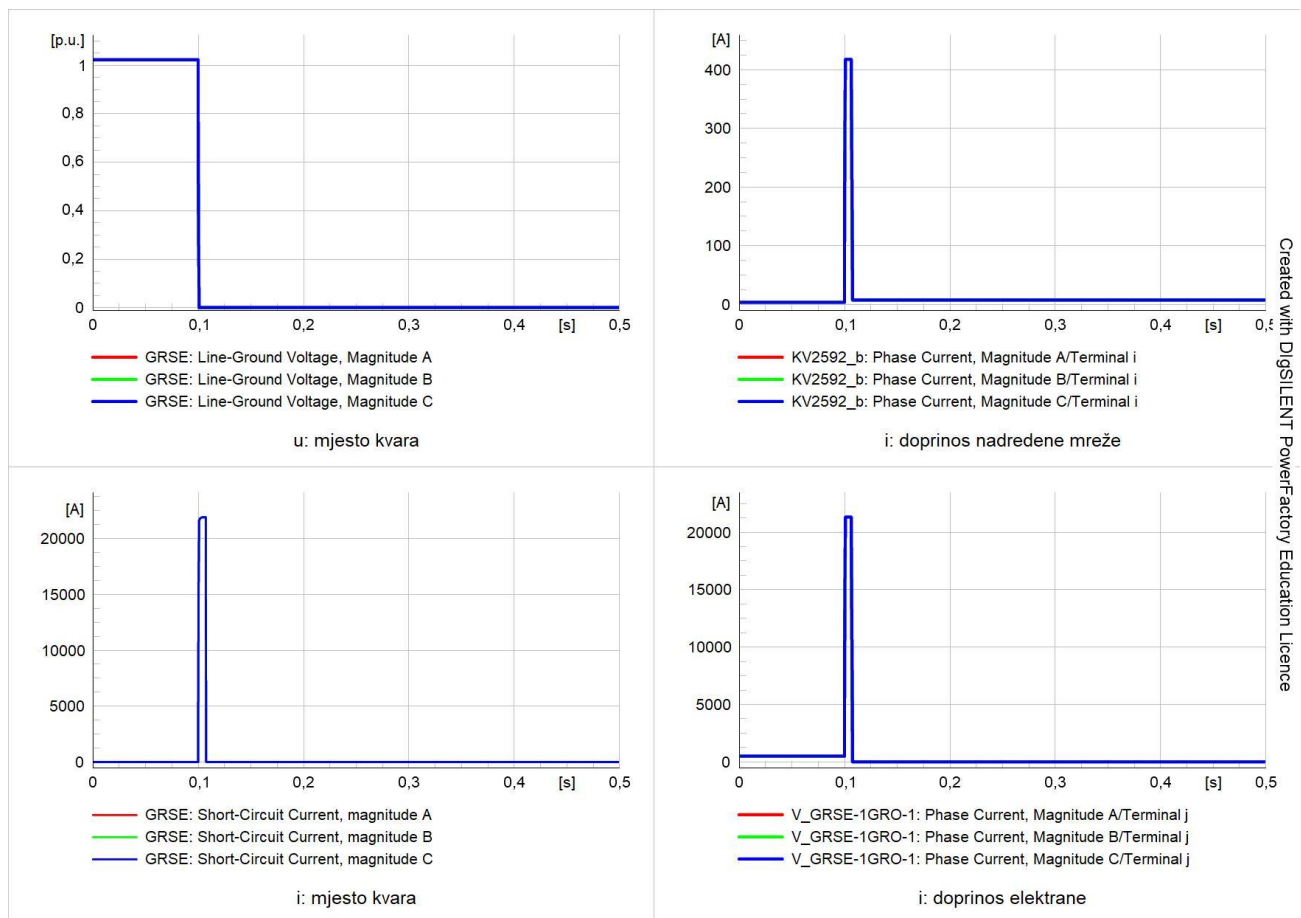
Ispitivanje učinkovitosti postavljenih zaštitnih mjera za trofazni kratak spoj na mjestu kvara 3 provodi se za situaciju gdje je impedancija kruga na mjestu kvara jednaka  $0 \Omega$ . Kratki spoj se odvija u trenutku  $t=100$  ms nakon početka simulacije, a trajanje same simulacije iznosi 500 ms.

Na slici 5.10. je shematski prikaz simulacije za mjesto kvara 3, te je označeno koja je zaštita proradila.



Slika 5.10. Shematski prikaz simulacije za slučaj kvara 3

Rezultati dobiveni iz registratora događaja programskog paketa DIGSILENT PowerFactory 2022 prikazani su na slici 5.11. (RMS vrijednosti struja i napona).



Slika 5.11. RMS vrijednosti struja i napona: Kvar 3-3f

Na temelju ovih rezultata, dolazimo do sljedećih informacija:

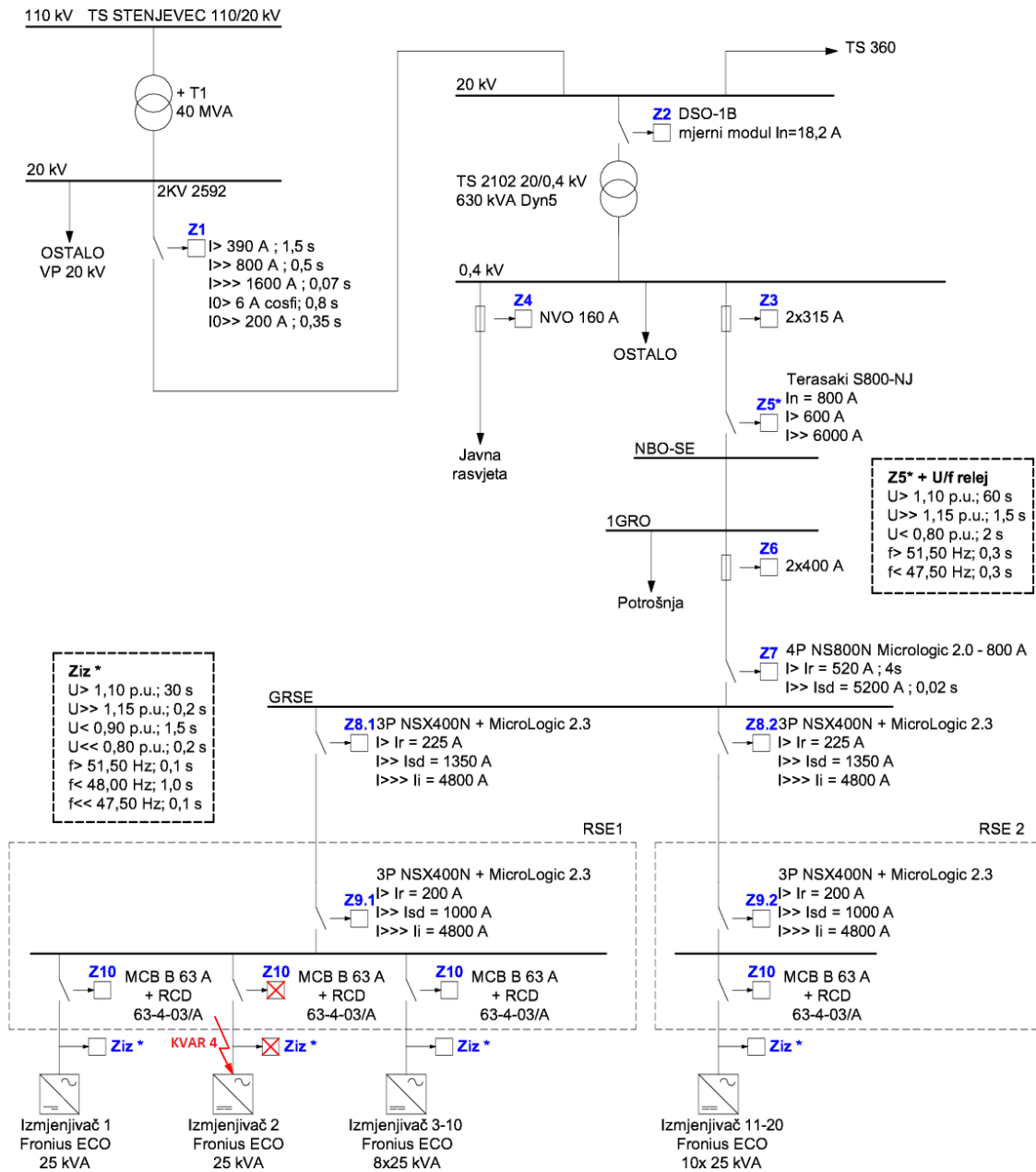
- Nakon 8 ms dolazi do prorade zaštite Z3
- Izmjenjivačima se aktivira podnaponska zaštita i odvajaju se od mreže u vremenu od 0,2 s nakon nastanka kvara.

## 5.4. Kvar 4

Kvarovi na stezaljkama izmjenjivača u elektrani : 3f kratki spoj na stezaljkama jednog izmjenjivača.

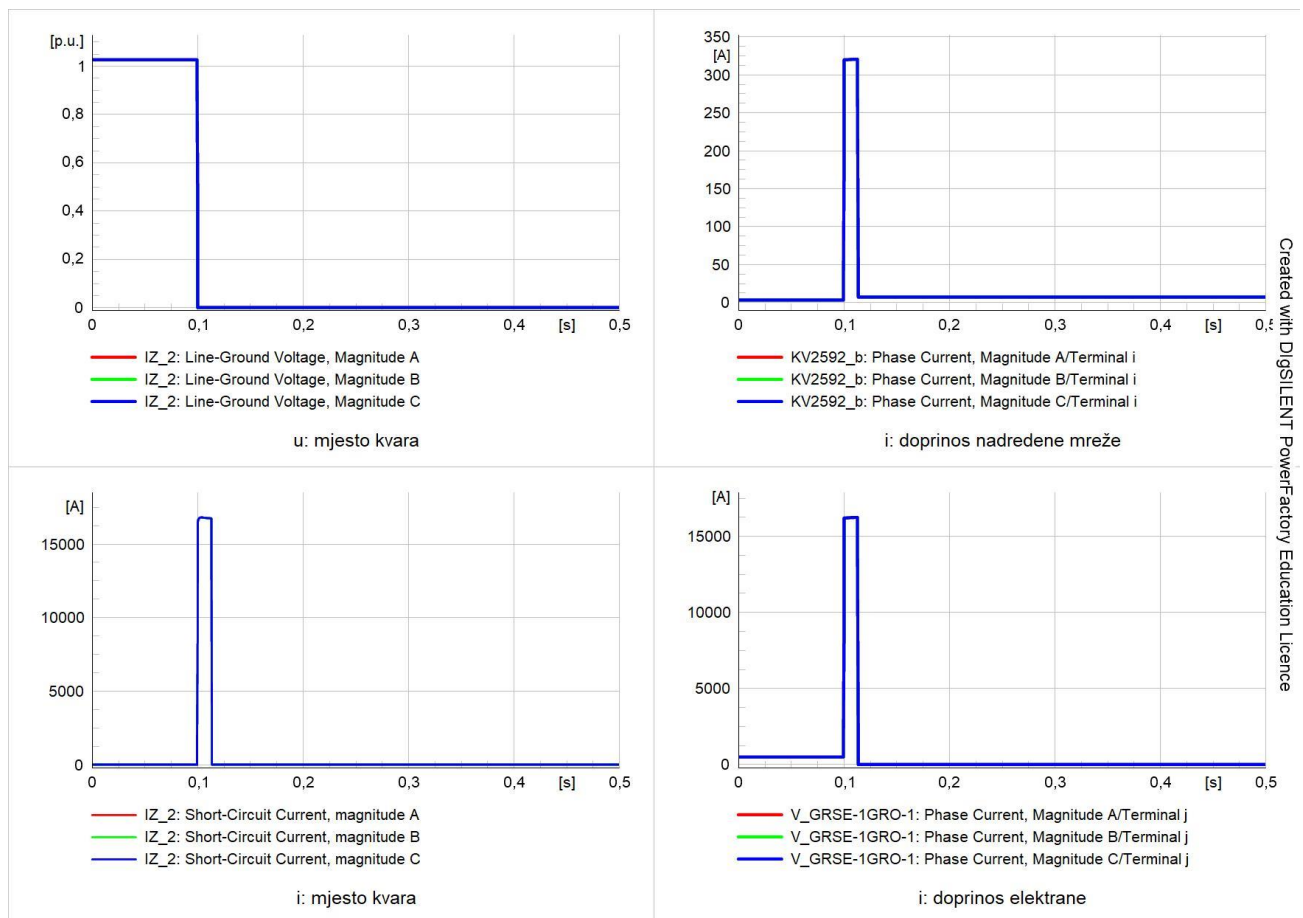
Ispitivanje učinkovitosti postavljenih zaštitnih mjera za trofazni kratak spoj na mjestu kvara 4 provodi se za situaciju gdje je impedancija kruga na mjestu kvara jednaka  $0 \Omega$ . Kratki spoj se odvija u trenutku  $t=100$  ms nakon početka simulacije, a trajanje same simulacije iznosi 500 ms.

Na slici 5.12. je shematski prikaz simulacije za mjesto kvara 4, te je označeno koja je zaštita proradila.



Slika 5.12. Shematski prikaz simulacije za slučaj kvara 4

Rezultati dobiveni iz registratora događaja programskog paketa DiGSILENT PowerFactory 2022 prikazani su na slici 5.13. (RMS vrijednosti struja i napona).



Slika 5.13. RMS vrijednosti struja i napona: Kvar 4-3f

Na temelju ovih rezultata, dolazimo do sljedećih informacija:

- Nakon 10 ms dolazi do isključenja automatskog prekidača Z10 63 A na izmjenjivaču 2.
- Izmjenjivač 2 neće startati dok se kvar ne otkloni, a ostali izmjenjivači neće registrirati da je došlo do KS na izmjenjivaču 2, te ostaju sinkronizirani na mreži.

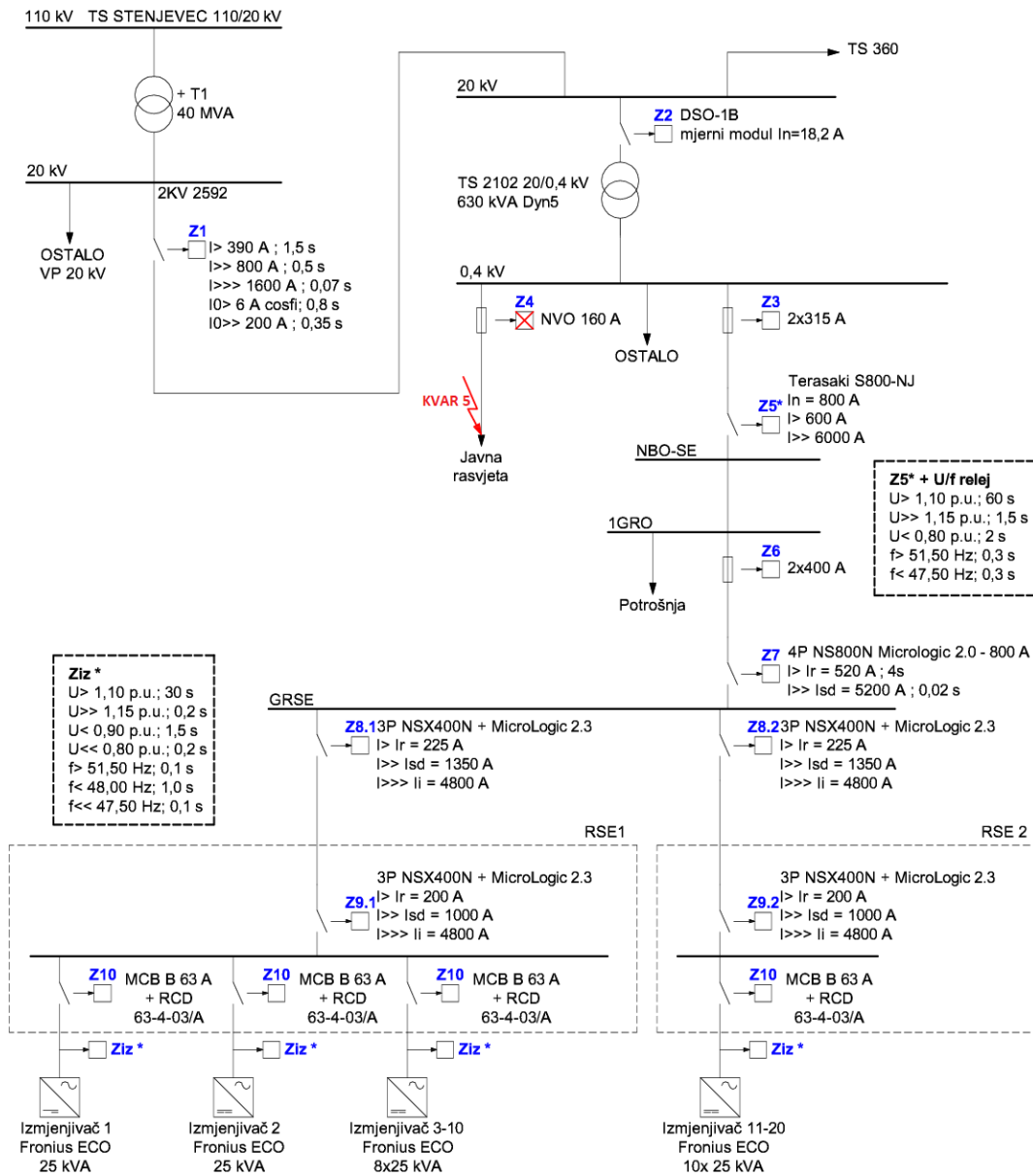


## 5.5. Kvar 5

Kvarovi na izabranom NN izvodu bez izvora iz TS SN/NN: 3f udaljeni kratki spoj na NN izvodu iz TS SN/NN na kojem nema elektrana.

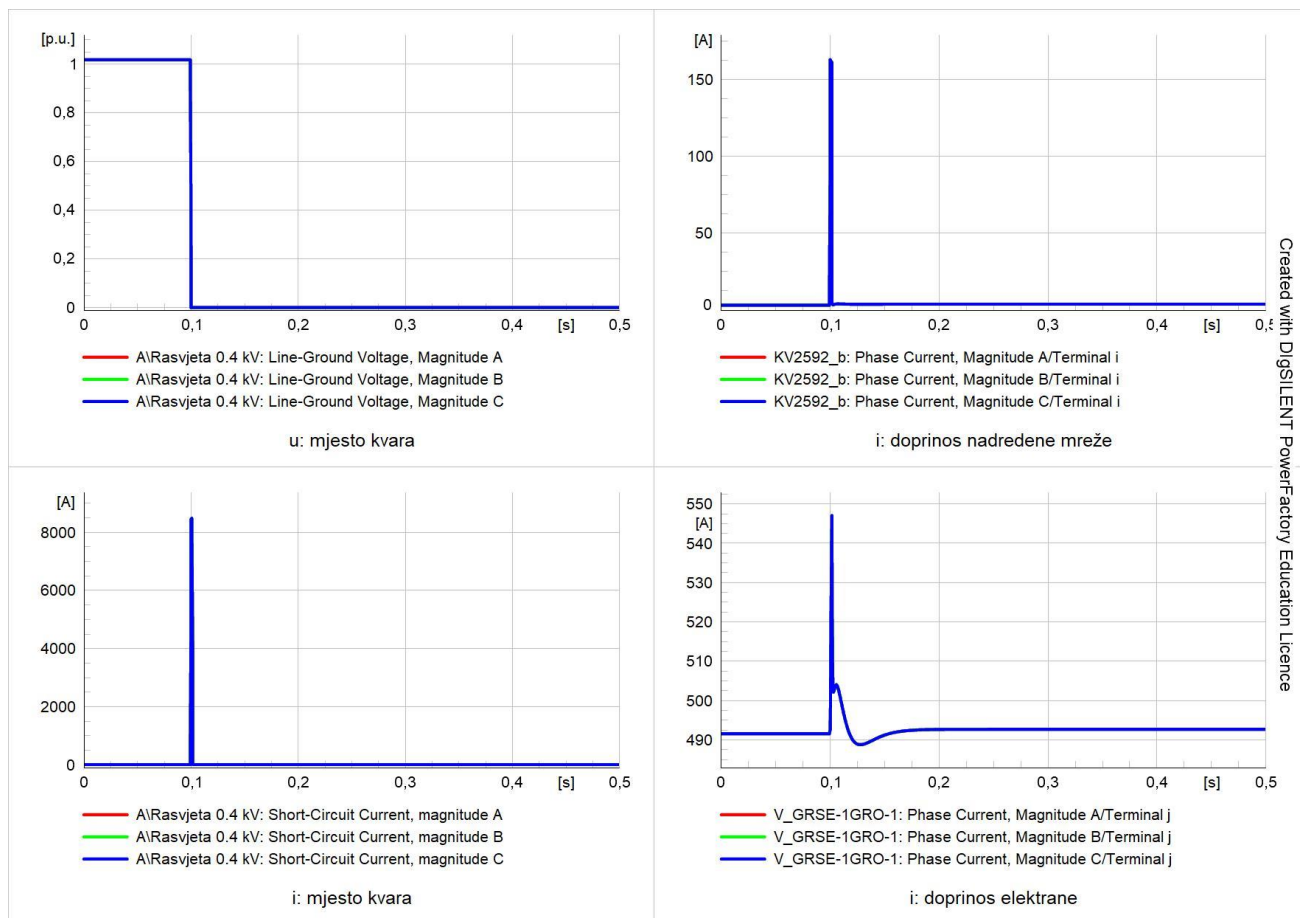
Ispitivanje učinkovitosti postavljenih zaštitnih mjera za trofazni kratak spoj na mjestu kvara 4 provodi se za situaciju gdje je impedancija kruga na mjestu kvara jednaka  $0 \Omega$ . Kratki spoj se odvija u trenutku  $t=100$  ms nakon početka simulacije, a trajanje same simulacije iznosi 500 ms.

Na slici 5.14. je shematski prikaz simulacije za mjesto kvara 5, te je označeno koja je zaštita proradila.



Slika 5.14. Shematski prikaz simulacije za slučaj kvara 5

Rezultati dobiveni iz registratora događaja programskog paketa DIGSILENT PowerFactory 2022 prikazani su na slici 5.15. (RMS vrijednosti struja i napona).



Slika 5.15. RMS vrijednosti struja i napona: Kvar 5-3f

Na temelju ovih rezultata, dolazimo do sljedećih informacija:

- Nakon 1,6 ms dolazi do pregaranja osigurača zaštite Z4 na odabranom NN izvodu
- Izmjenjivači neće registrirati da je došlo do kvara na odabranom NN izvodu i ostaju sinkronizirani na mreži

## 6. ANALIZA REZULTATA

U istraživanju kvara 1 analiziran je kvar na vodu od mrežnog izvora 110/20 kV prema promatranoj elektrani. Rezultati simulacije pokazali su da je član I>>> u zaštitnom releju Z1 - VP KV2592 bio aktiviran. Releji je ispravno detektirao problem i poslao nalog za otvaranje kontakta prekidača u vodnom polju VP KV2592 - 20 kV. Ovo otvaranje kontakta dogodilo se vrlo brzo, u roku od 70 ms nakon što je problem detektiran. Važno je napomenuti da su izmjenjivači povezani s elektroenergetskom mrežom i automatski se isključuju iz mreže nakon pojave problema u napajanju. Oni neće ponovno početi raditi sve dok se problem ne riješi. Ova dodatna razina zaštite pomaže u sprječavanju dodatnih oštećenja i poboljšava sigurnost elektroenergetskog sustava. Rezultati kvara 1 pokazuju da su postavljene zaštitne mjere djelotvorne i brzo reagiraju na kvarove, čime se osigurava sigurnost i pouzdanost elektrane i elektroenergetskog sustava.

U istraživanju kvara 2 analizirana je situacija gdje su se dogodili kvarovi na NN sabirnicama TS SN/NN, unutar čije NN mreže se nalazi promatrana elektrana. Zaštita Z2 - DSO-1B u TP djelovala je i proradila kako je predviđeno. Ova zaštita odigrala je ključnu ulogu u detekciji kvara i odvajanju odnosno izolaciji promatrane elektrane od mreže. Vrijeme odrade zaštite Z2 bilo je 776 ms, što ukazuje na učinkovito djelovanje te zaštite. Dodatna razina zaštite pružena je aktivacijom podnaponske zaštite na izmjenjivačima, što ih je odvojilo od mreže već 0,2 s nakon pojave kvara. Ovo dodatno osigurava integritet elektrane i smanjuje mogućnost širenja šteta.

U istraživanju kvara 3 analizirana je situacija gdje su se dogodili kvarovi na NN sabirnicama skupine izmjenjivača. Zaštita Z3 proradila je nakon samo 8 ms od pojave kvara. Brzi odziv zaštite znači da je kratak spoj brzo detektiran, što je ključno za minimiziranje potencijalnih šteta. Također, izmjenjivači su se efikasno odvojili od mreže, aktiviranjem podnaponske zaštite već 0,2 s nakon pojave kvara. Ovo brzo odvajanje doprinosi zaštiti elektrane i elektroenergetskog sustava.

U istraživanju kvara 4 analizirana je situacija gdje su se dogodili kvarovi na stezaljkama izmjenjivača u elektrani, točnije trofazni kratki spoj na stezaljkama jednog izmjenjivača. Nakon samo 10 ms od pojave kvara, automatski prekidač Z10 63 A na izmjenjivaču 2 isključen je. Ovo brzo isključenje pokazuje da je zaštita na izmjenjivaču 2 brzo detektirala kratki spoj i poduzela odgovarajuće korake za isključenje izmjenjivača. Ovaj siguran pristup osigurava da se izmjenjivač 2 neće aktivirati dok se problem potpuno ne riješi. Osim toga, ostali izmjenjivači ostaju sinkronizirani na mreži i ne registriraju kratki spoj na izmjenjivaču 2.

U istraživanju kvara 5 analizirana je situacija gdje su se dogodili kvarovi na izabranom niskonaponskom (NN) izvodu koji je izdvojen iz transformatorske stanice srednjeg napona (TS SN/NN), a na tom izvodu nema elektrana. Konkretno, bilo je riječ o trofaznom udaljenom kratkom spoju na NN izvodu iz TS SN/NN. Nakon samo 1,6 ms od pojave kvara, došlo je do pregorevanja osigurača zaštite Z4 na odabranom NN izvodu. Ovaj brzi odgovor zaštite ukazuje na to da su postavljene zaštitne mjere na mjestu i da su se aktivirale čim se detektirao kratki spoj. Unatoč brznoj reakciji zaštite, izmjenjivači nisu registrirali kvar na odabranom NN izvodu i ostali su sinkronizirani na mreži.

## 7. ZAKLJUČAK

Pravilna koordinacija fotonaponskih elektrana igra ključnu ulogu u osiguranju njihove učinkovitosti i pouzdanosti. Kroz ovaj rad, naglasak je stavljen na važnost održavanja pravilne zaštite FN elektrane kako bi se osigurala sigurnost električnog sustava i opreme. Kroz detaljno razmatranje elemenata i opreme, kao i modeliranje zaštite u programskom paketu DIGSILENT PowerFactory, može se bolje razumjeti kako pravilno koordinirati zaštitu fotonaponskih elektrana.

Iz provedenih simulacija kratkih spojeva dobiveni su rezultati koji se odnose na učinkovitost ugrađenih zaštitnih sustava. Na temelju tih rezultata, sigurno se zaključuje da oprema za zaštitu u FN elektrani pruža sveobuhvatnu sigurnost za sve komponente elektrane i osigurava zaštitu distribucijske mreže od mogućih utjecaja elektrane tijekom kvarova u mreži ili unutar postrojenja.

Evaluacija trenutnih relejnih zaštita u srednjenaponskoj (SN) mreži, uzimajući u obzir simulirane kvarove kako u SN tako i niskonaponskoj (NN) mreži, pokazala je da su ovi sustavi iznimno selektivni, brzi i dovoljno osjetljivi. Stoga nije potrebna nikakva promjena u trenutnim postavkama relejnih zaštita u SN mreži. Ovakav rezultat ukazuje na dobro koordiniran sustav zaštite koji je učinkovit u sprječavanju širenja kvarova i održavanju sigurnosti električnog sustava FN elektrane. Ova analiza potvrđuje visoku razinu pouzdanosti i stabilnosti električnog sustava.

## LITERATURA

[1] D. Yogi Goswami, Principles of Solar Engineering, Third Edition, 2015, CRC Press, Taylor & Francis

[2] Slika najveće sunčane elektrane u Hrvatskoj kod Obrovca

Slika preuzeta sa : <https://www.hep.hr/hep-kod-obrovca-pustio-u-rad-najvecu-suncanu-elektranu-u-hrvatskoj/3738> [04.09.2023]

[3] Princip rada fotonaponske ćelije, dostupno na : <https://www.electrical4u.com/working-principle-of-photovoltaic-cell-or-solar-cell/> [04.09.2023]

[4] Ezgeta Martina, Podešenje zaštite FNE snage 150 kW, Diplomski rad 2017, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek

[5] Hrvoje Apčag, Projektiranje fotonaponskih elektrana, Završni rad 2022, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek

[6] Slika primjera slaganja fotonaponskih ćelija, slika preuzeta sa: <https://pveducation.com/solar-concepts/solar-cells-modules-arrays/> [04.09.2023]

[7] Lj. Majdandžić, Fotonaponski sustavi, Priručnik, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu, Srednja škola Oroslavje

[8] Danko Barbara, Fotonaponski sustavi i sklopovi energetske elektronike za fotonaponske sustave, Diplomski rad 2016, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek

Dostupno na : <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1132/datastream/PDF/view>  
[04.09.2023]

[9] Mudrinić Đurađ, Zaštita fotonaponskih elektrana, Završni rad 2016, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek

Dostupno na : <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A884/datastream/PDF/view>  
[04.09.2023]

[10] ABB, Technical Application Papers, No.10, Photovoltaic plants

- [11] Network protection & automation guide, edition may 2011, Published by Alstom Grid
- [12] Ivkić, Ivan, Koordinacija nadstrujnih zaštita aktivnih distribucijskih mreža, Diplomski rad 2016, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
- Dostupno na: <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:1095/preview> [10.09.2023]
- [13] P. Sarajčev, R. Kosor, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni studijski centar za stručne studije, predavanja zaštita u elektroenergetskom sustavu
- Dostupno na :
- [https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file\\_attach/Za%C5%A1tita%20u%20elektroenergetskom%20sustavu%20-%20Robert%20Kosor.pdf](https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Za%C5%A1tita%20u%20elektroenergetskom%20sustavu%20-%20Robert%20Kosor.pdf) [10.09.2023]
- [14] Slika prikaza statičkog releja, slika preuzeta sa: [https://img2.exportersindia.com/product\\_images/bc-full/2020/7/2154824/electromechanical-relays-1594102780-5505189.jpeg](https://img2.exportersindia.com/product_images/bc-full/2020/7/2154824/electromechanical-relays-1594102780-5505189.jpeg) [10.09.2023]
- [15] Slika prikaza numeričkog releja, slika preuzeta sa: <http://www.koncar-inem.hr/proizvodi-i-usluge/energetika-2/zastitni-releji-i-sustavi/konpro/> [10.09.2023]
- [16] Dostupno na : <https://www.iel.hr/en/product-groups/protection-test-page/busbar-protection/voltage-relay-vr-50/> [13.09.2023]
- [17] S. Nikolovski, Koordinacija zaštite aktivnih distributivnih mreža, predavanje, 2018, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
- [18] M. Stojkov, Z. Baus, M. Barukčić, I. Provči, Električni sklopni aparati, Slavonski Brod / Osijek: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2015
- [19] Savić Srđan, Osigurači, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Diplomski rad 2019
- [20] Slika MCB prekidača, slika preuzeta sa: <https://exchange-engineering.co.uk/product/single-phase-240v-miniature-circuit-breaker-mcb/> [15.09.2023]

[21] Slika MCCB prekidača, slika preuzeta sa: <https://www.gses.com.au/molded-case-circuit-breakers/> [15.09.2023]



## SAŽETAK

Cilj diplomskog rada je upoznati se sa principom rada fotonaponskih elektrana (FN elektrana), istražuju se dijelovi i oprema koji čine FN elektranu, te se pravilno koordinira zaštita FN elektrane.

Kroz upotrebu DIgSILENT PowerFactory alata, omogućeno je modeliranje FN elektrane i izvođenje simulacija koje obuhvaćaju pet karakterističnih kvarova u sustavu. Tijekom simulacija, proučavani su vremenski odzivi napona i struje na različitim mjestima kvara. Pažnja je usmjerena na ispitivanju učinkovitosti postavljenih zaštitnih mjera i njihovoj selektivnosti u prepoznavanju i izolaciji kvarova

Ovaj rad ima za cilj pružiti bolje razumijevanje kako pravilno koordinirati zaštitu FN elektrana, što je ključno za održavanje stabilnosti elektroenergetskog sustava i sprečavanje ozbiljnih problema tijekom kvarova

**Ključne riječi:** fotonaponski sustavi, fotonaponska elektrana, relejna zaštita, osigurači, koordinacija zaštite

## ABSTRACT

The aim of the master's thesis is to familiarize oneself with the operation principles of photovoltaic power plants (PV power plants), explore the components and equipment that constitute a PV power plant, and coordinate the protection of the PV power plant properly. Using the DIgSILENT PowerFactory tool, it enables modeling of a PV power plant and conducting simulations involving five characteristic faults in the system. During the simulations, the time responses of voltage and current at different fault locations were studied. The focus was on testing the effectiveness of the protective measures and their selectivity in recognizing and isolating faults.

This paper aims to provide a better understanding of how to properly coordinate the protection of PV power plants, which is crucial for maintaining the stability of the power system and preventing serious issues during faults.

**Keywords:** photovoltaic systems, photovoltaic power plant, relay protection, circuit breakers, protection coordination.

## ŽIVOTOPIS

Marina Župan rođena je 27.03.1997. godine u Tourcoing, Francuska Republika. Osnovnu školu pohađala je u Halluin, te nakon preseljenja nastavlja osnovnu školu u Babinoj Gredi. Nakon osnovne škole upisuje srednju školu opća gimnazija u Županji. Srednju školu završava 2016.godine nakon čega upisuje preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Na drugoj godini studija odlučuje se za smjer elektroenergetike. Nakon završetka preddiplomskog studija 2020. godine s temom završnog rada „Razvoj i primjena svjetlovodnih materijala“ upisuje diplomski studij Elektroenergetski sustavi.