

Hrvatska zaklada za znanost
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
Zavod za visoki napon i energetiku

FLEXIBASE

Dokumentacija modela zaštite mikromreže

prof. dr. sc. Hrvoje Pandžić
prof. dr. sc. Marko Delimar
izv. prof. Juraj Havelka
doc. dr. sc. Mateo Beus
Ivan Grcić, mag. ing.
Domagoj Badanjak, mag. ing.



Europska unija
Zajedno do fondova EU



05-2023

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Zaštitni uređaji i metode zaštite	2
2.1	Zaštitni uređaji	2
2.2	Osigurači	7
2.3	Prekidači	7
3	Faktori sa značajnim utjecajem na zaštitu u mikromrežama	10
3.1	Vrsta distribuiranog izvora energije	10
3.2	Vrsta pretvarača	13
3.3	Uzemljenje	16
3.3.1	Izmjenične mikromreže	16
3.3.2	Istosmjerne mikromreže	18
3.4	Upravljačka struktura	19
4	Laboratorijski postav mikromreže	21
5	Model zaštite	24
6	Zaključna razmatranja	27
	Literatura	30

1. Uvod

U svijetu koji sve više teži prema održivosti i smanjenju emisija stakleničkih plinova, mikromreže postaju sve popularniji koncept. Mikromreže su decentralizirani električni sustavi koji omogućavaju lokalnu proizvodnju, distribuciju i uporabu električne energije. Načini rada mikromreža mogu varirati ovisno o specifičnim potrebama i uvjetima. Postoje dva osnovna načina rada mikromreža: mrežni u kojem je mikromreža povezana s vanjskom mrežom te autonomni način rada u kojem je mikromreža neovisna o vanjskoj mreži. Povezane mikromreže koriste vanjsku mrežu kao izvor energije u kombinaciji s lokalnom proizvodnjom. Kada lokalna proizvodnja premaši potrebe, višak energije se može distribuirati u glavnu mrežu. U slučaju nestanka energije iz glavne mreže, povezana mikromreža se može prebaciti na autonomni način rada. Autonomne mikromreže koriste lokalne izvore energije, kao što su solarna energija, vjetroenergija ili hidroenergija, za proizvodnju električne energije koja zadovoljava sve potrebe unutar mikromreže. U ovom načinu rada, mikromreža je potpuno neovisna o glavnoj mreži i može pružiti sigurnost napajanja u područjima koja su udaljena ili loše povezana s glavnom mrežom. Mikromreže tako iskorištavaju lokalne izvore energije i povezanost s glavnom mrežom. To omogućava optimalno korištenje dostupnih izvora energije i osigurava stabilnost napajanja čak i u slučaju fluktuacija lokalne proizvodnje ili nestanka energije iz glavne mreže.

Obnovljivi izvori energije igraju ključnu ulogu u mikromrežama jer omogućavaju proizvodnju čiste energije na lokalnoj razini. Solarna energija je čest izvor u mikromrežama jer je široko dostupna i može se lako integrirati s drugim sustavima, kao što su baterije za pohranu energije. Vjetroenergija također može biti korisna u područjima sa stalnim vjetrovima, dok hidroenergija može biti iskorištena u područjima s rijekama ili padovima vode. Baterije za pohranu energije postaju ključni element mikromreža jer omogućavaju pohranu viška energije za korištenje u slučaju nestašice ili sati u kojima je proizvodnja obnovljive energije smanjena. Baterije također mogu pomoći u održavanju stabilnosti i ravnoteže u mikromreži.

2. Zaštitni uređaji i metode zaštite

2.1 Zaštitni uređaji

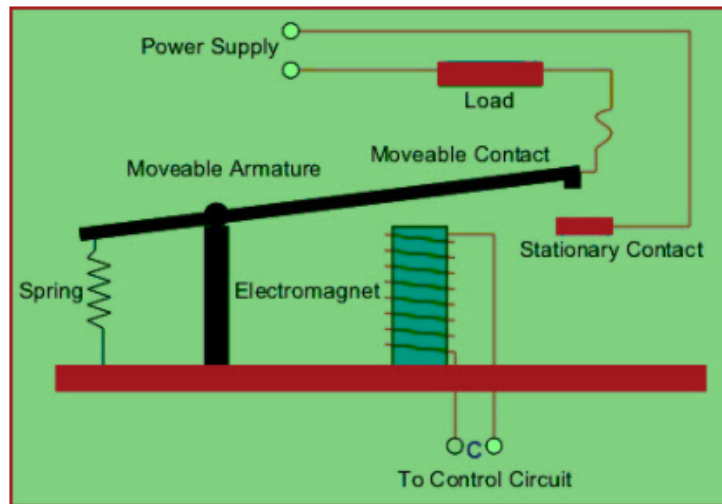
Zaštitni uređaji imaju važnu funkciju u očuvanju sigurnosti u elektroenergetskim sustavima. Njihova uloga je odvajanje dijela sustava koji je pod kvarom od ostatka sustava kako bi se zaštitili ljudski životi i spriječila oštećenja opreme. Zaštitni releji su uređaji koji se koriste za određivanje potrebe za reakcijom na temelju mjerenja različitih veličina sustava, poput napona, struje, snage, itd. Prvobitno su se koristili elektromehanički releji koji su mogli kontrolirati veću snagu koristeći manju električnu ili mehaničku snagu [1]. Kroz daljnji razvoj elektroničkih sklopova, elektromehanički princip zamijenjen je statičkim, digitalnim i na kraju numeričkim relejima. Ti zaštitni releji koriste se kako u izmjeničnim tako i u istosmjernim električnim sustavima.

Elektromehanički releji

Elektromehanički relej je uređaj koji se koristi za zaštitu i upravljanje različitim uređajima, električnim krugovima, opremom i električnim mrežama. Sastoji se od osnovnih dijelova koji uključuju elektromagnet (zavojnica namotana oko željezne jezgre), oprugu, pomičnu armaturu s pomičnim kontaktom i nepomični kontakt. Na slici 2.1 prikazani su dijelovi releja (relej je isključen). Kada se elektromagnet aktivira primjenom kontrolnog signala na kontrolni krug (označeno C na slici), pomični kontakt se povlači prema nepomičnom kontaktu, čime se omogućuje napajanje tereta. Prednost ovog tipa releja je u tome što pruža galvansko odvajanje između ulaza i izlaza, uz jednostavnost i pouzdanost izvedbe zbog čega su često korišteni za jednostavne funkcije poput uključivanja/isključivanja.

Statički releji

Pojam "statički" ukazuje na to da relej nema pomične dijelove, ali armatura i dalje ima mogućnost pokretanja. Ono što se pod time misli je zamjena tradicionalnih pomičnih dijelova kako bi se postigla relejna funkcionalnost. Umjesto korištenja zavojnice ili magneta za stvaranje karakteristike, koriste se analogni elektronički uređaji poput tranzistora. S razvojem elektronike, analogni uređaji postupno su zamijenjeni digitalnim uređajima koji su sposobni



Slika 2.1: Struktura elektromehaničkog releja [2].

za izvršavanje logičkih funkcija i obradu signala [3]. Ova digitalna tehnologija omogućava stvaranje statičkih releja koji ne zahtijevaju mehaničko pokretanje. Umjesto toga, elektronički sklopovi i logika se koriste za kontrolu i izvršavanje relejnih funkcija, što rezultira većom preciznošću, bržim odzivom i većom pouzdanošću.

Digitalni releji

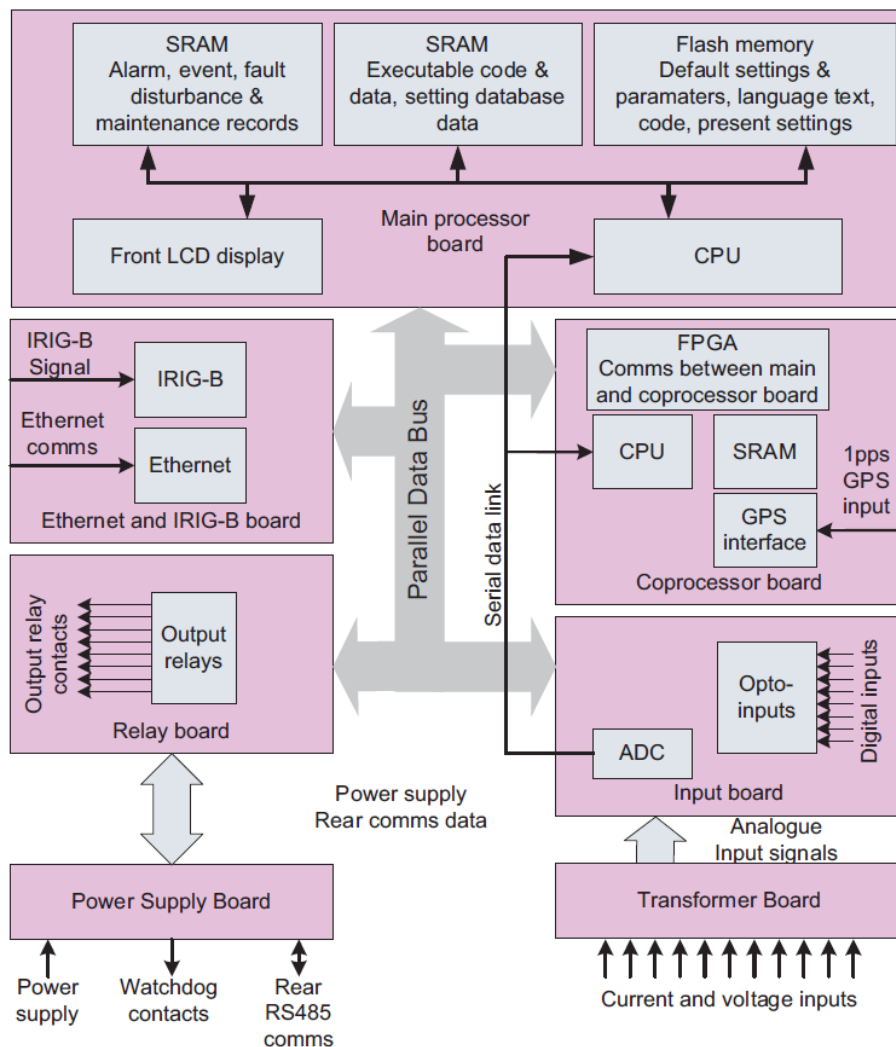
Implementacijom mikroprocesora, releji dobivaju mnogo širi spektar funkcija koje mogu obavljati, kao što su brojanje ili diskretna Fourierova transformacija. U usporedbi s elektromehaničkim i statičkim relejima, mikroprocesorski releji imaju veći raspon postavki, veću preciznost i sposobnost komunikacije. Međutim, ograničavajući faktor mikroprocesorskih releja je mala obradna moć 8 ili 16-bitnih mikroprocesora, kao i ograničena dodijeljena memorija. To može rezultirati ograničenim brojem uzoraka koje se mogu mjeriti u svakom ciklusu, što može usporiti vrijeme reakcije releja [3].

Numerički releji

Numerički releji predstavljaju prirodni nastavak razvoja digitalnih releja, posebno zbog napretka tehnologije. Unaprjeđenja u ovim relejima uključuju digitalnu obradu signala optimiziranu za rad u stvarnom vremenu i izvršavanje matematičkih algoritama za zaštitne funkcije. Ovakvi releji imaju sposobnost izvršavanja različitih funkcija, što može dovesti do pitanja pouzdanosti i dostupnosti. S obzirom na sve veći broj funkcija koje se mogu izvršavati u numeričkim relejima, važno je osigurati da su pouzdani i da su uvijek dostupni kako bi pravilno obavljali svoje

zaštitne funkcije.

Tipičan numerički relej sadrži nekoliko ključnih komponenti koje omogućuju njegov rad. Ima ulaze za napajanje, analogni/digitalni (A/D) pretvornik koji prima analogna mjerenja i pretvara ih u digitalni oblik, digitalne ulaze te Ethernet komunikaciju. Izlazi releja povezani su s vanjskim kontaktima i koriste se za prosljeđivanje naredbi koje donosi procesor. Procesor je središnji dio releja u kojem se obavljaju sve operacije i donose odluke o aktivaciji izlaza. Unutarnja komunikacija u numeričkom releju radi s visokom brzinom prijenosa podataka te koristi niske napone, pri čemu mora biti otporna na smetnje i elektromagnetske interferencije. To je važno kako bi se osigurala pouzdanost i ispravno funkcioniranje releja u zahtjevnim uvjetima električnih sustava.



Slika 2.2: Tipična arhitektura numeričkog releja [3].

U mikromrežama se najčešće primjenjuju sljedeće vrste releja, podijeljeni po funkciji, odnosno vrsti zaštite koju pružaju [4]:

- Nadstrujni releji
- Distantni releji
- Naponski releji
- Diferencijalni releji
- Admitancijski releji
- Inteligentni releji.

Nadstrujni releji

Nadstrujni su releji jedan od najčešće korištenih uređaja u tradicionalnim distribucijskim mrežama [4]. Princip rada je jednostavan, kad struja dosegne vrijednost iznad zadanog praga aktivirati će se zaštita. Međutim, poznato je da prisustvo distribuiranog izvora energije (DIE) ili prelazak mikromreže u otočni način rada može uzrokovati promjenu iznosa struje kvara [5]. Stoga je potrebno implementirati adaptivne postavke ovisne o načinu rada i prilikama u mreži [6].

Distantni releji

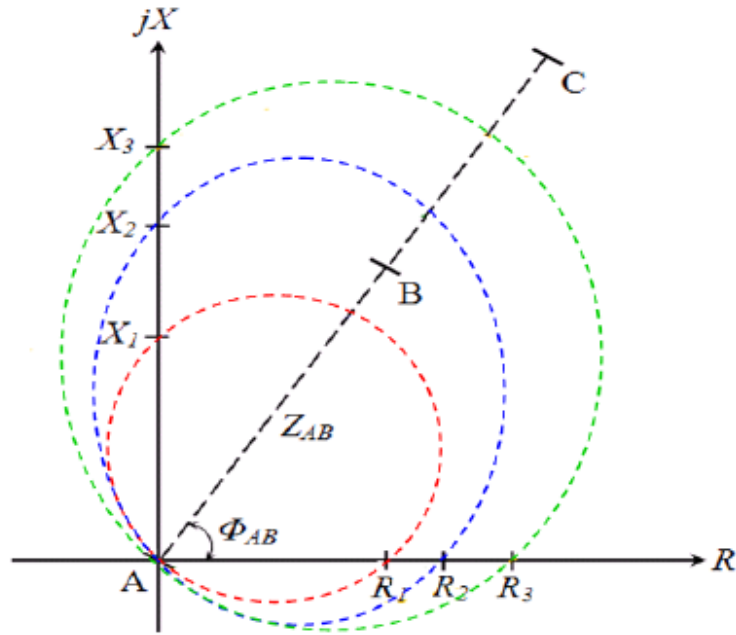
Distantni ili impedancijski relej mjeri impedanciju (omjer napona i struje) mreže. Prilikom normalnog rada impedancija je relativno visoka, dok se pri pojavi visoke struje kvara spušta na jako male vrijednosti. U [7] je predstavljena distantna zaštita za mikromrežu. Korišten je distantni relej s dvozonskom admitantnom radnom karakteristikom, no pokazalo se da su pravila koordinacije zaštite narušena.

Naponski releji

Naponski releji reagiraju na određene primjene napona na dijelu mreže ili izvora koji štite, a najčešće je to pojava prenapona ili podnapona. U [9] je korištena pod/pre-naponska zaštita za solarne DIE te mreže s različitim razinama napona (visoki, srednji, niski).

Diferencijalni releji

Diferencijalni releji uspoređuju istovremene veličine i mjere njihovu razliku [1]. Ukoliko razlika prijeđe zadani prag relej će reagirati. Autori su u [10] primijenili diferencijalni relej za zaštitu mikromreže. Ovakva vrsta zaštite se pokazala izuzetno efektivna za detekciju kvarova visoke impedancije (engl. *High impedance fault* - HIF).



Slika 2.3: Admitantna radna karakteristika distantnog releja [8].

Admitancijski releji

U [11] je korišten relej koji mjeri admitanciju (inverz impedancije) linije. Prekidna karakteristika je dobivena iz normalizirane admitancije te glasi [12]:

$$t_p = \frac{A}{Y_r^\rho - 1} + k \quad (2.1)$$

gdje je t_p prekidno vrijeme, Y_r^ρ normalizirana admitancija koju mjeri relej, dok su A , ρ i k konstante. Konstantne vrijednosti su odabrane ovisno o lokaciji releja te zahtjevima zaštite. Ako mreža ima različite tipove zaštitnih uređaja konstante mogu poslužiti u svrhu koordinacije.

Inteligentni releji

U [10, 13] autori su predložili metode za zaštitu mikromreže implementirane u mikroprocesorski inteligentni relej. Ova vrsta releja je sposobna spremati mjerenja te ih obrađivati u svrhu dobivanja kompleksnih informacija o sustavu. Relej predložen u [10] štiti mikromrežu u mrežnom načinu rada dok relej u [13] štiti samo u otopnom načinu. Predložene metode zaštite se temelje na promatranju simetričnih komponenti struje za detekciju kvara te komponenti struje i napona za pronalazak lokacije kvara.

2.2 Osigurači

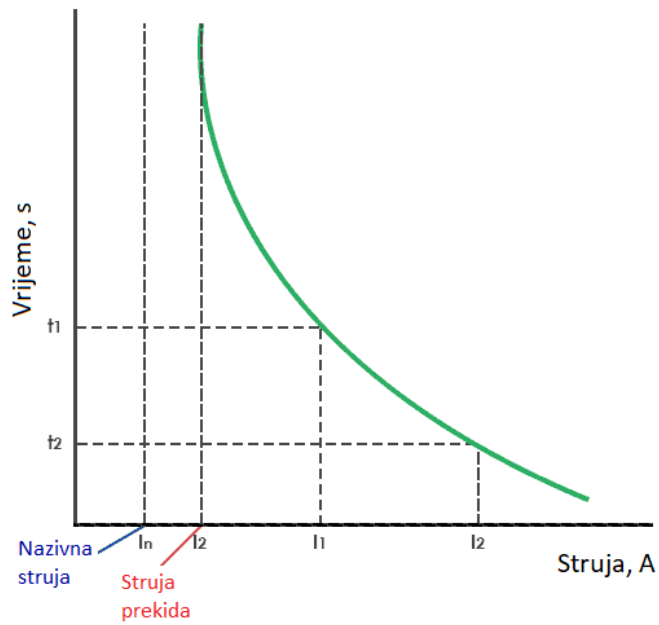
Osigurači su zaštitni uređaji koji se koriste u električnim strujnim krugovima kako bi se osigurala sigurnost i zaštita od preopterećenja i kratkih spojeva. Njihova funkcija je prekinuti strujni krug kada se pojavi visoka struja koja bi mogla oštetiti električnu opremu ili izazvati požar. Osigurači se sastoje od vodiča (obično metalne žice ili trake) čiji je presjek namjerno dimenzioniran kako bi mogao provoditi normalne radne struje. Međutim, kada se pojavi prevelika struja zbog preopterećenja ili kratkog spoja, osigurač dolazi do svoje granice. U takvim situacijama, vodič u osiguraču se zbog otpora zagrijava, a kad temperatura postane dovoljno visoka, vodič se rastapa ili "pregori", prekidajući strujni krug. Osnovna podjela osigurača je prema načinu rada i konstrukciji. Postoje rastalni osigurači, koji koriste vodiče koji se namjerno rastapaju pod visokim strujama kako bi prekinuli krug. Također postoje i prekidnički osigurači, koji koriste mehaničke prekidače kako bi prekinuli strujni krug pod visokim strujama. Važno je odabrati odgovarajući osigurač za svaki strujni krug, uzimajući u obzir struju koja se očekuje da će prolaziti kroz taj krug. Prevelik osigurač može izazvati oštećenje opreme ili stvaranje rizika od požara, dok premali osigurač može nepotrebno prekidati strujni krug i ometati normalan rad. Jedan od nedostataka osigurača je potreba za zamjenom nakon aktiviranja, budući da se vodič rastapa i postaje neupotrebljiv.

Osigurači se također koriste i u istosmjernim sustavima s niskim induktivitetom (visok di/dt) gdje je vrijeme reakcije minimalno, no glede pouzdanosti i jednostavnosti, osigurači nisu zadovoljavajuće rješenje za zaštitu istosmjernog sustava. Vrijeme reakcije osigurača uglavnom ovisi o impedanciji kvara [14]. Na primjeru istosmjerne mikromreže, odabir osigurača kao zaštitnog uređaja ovisi o komponentama mikromreže, razini zaštite te karakteristici kvara. Spor odziv te nemogućnost razlikovanja prijelazne pojave i kvara je donekle smanjena razvojem poluvodičkih osigurača, poznatijih pod nazivom ultra-brzi osigurači.

2.3 Prekidači

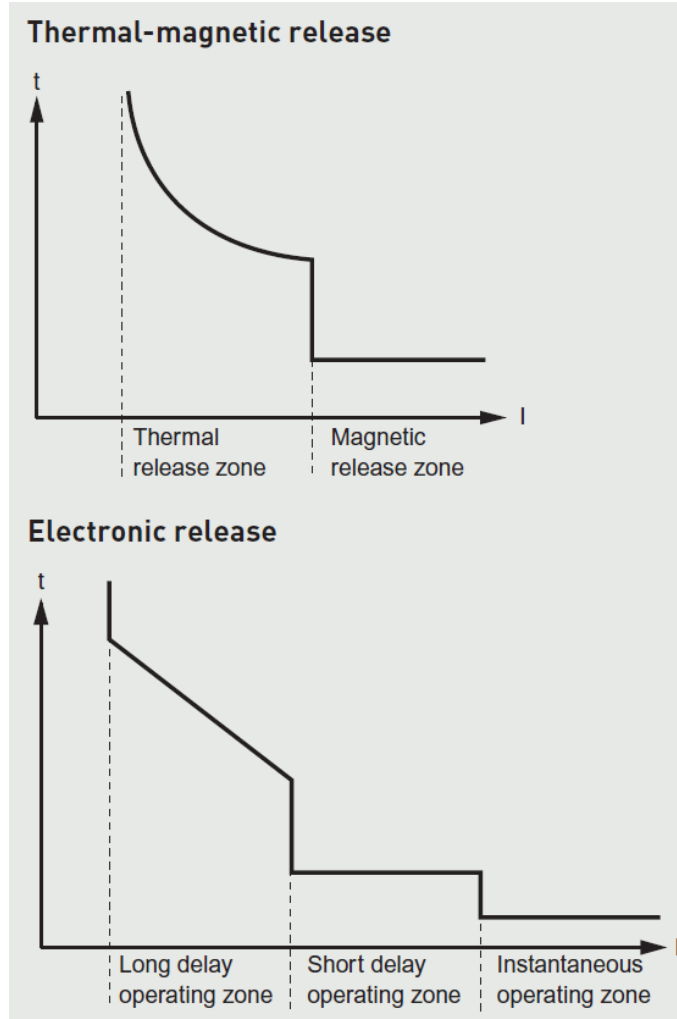
Prekidač je uređaj koji može prekinuti nazivnu struju te automatski prekinuti struju kratkog spoja u svrhu zaštite. Nadstruja se može detektirati na tri načina: termalno za preopterećenje, magnetski za slučaj kratkog spoja te u elektroničkoj izvedbi koja je sposobna detektirati oba kvara. Termalna i magnetska detekcija su uobičajeno kombinirane. Takvi su prekidači provjereni i pouzdani ali manje fleksibilni od elektroničkih [15].

Termalna detekcija radi na principu bimetalne trake koja će se, kad je zagrijava, deformirati te na taj način razdvojiti kontakte. Vrijeme reakcije bimetalne trake je obrnuto proporcionalno jakosti struje. Zbog toplinske inercije će detekcija svakog sljedećeg preopterećenja biti brža, što unapređiva zaštitu. Magnetska detekcija se sastoji od magnetske petlje koja će pobuditi razdvajanje kontakata prilikom pojave visokih struja. Vrijeme reakcije je jako nisko, oko desetine sekunde. Pri elektroničkoj detekciji će elektronički modul obraditi mjerenje struje te zaključiti



Slika 2.4: Vremensko-strujna karakteristika tipičnog osigurača.

je li potrebna reakcija. Takav će sklop imati tri operativne zone: trenutnog djelovanja, djelovanja s kratkim vremenskim zatezanjem te zona s dužim vremenskim zatezanjem (Slika 2.5). Karakteristična svojstva prema kojima se razlikuju prekidači su ista kao i ona osigurača, uz dodatne parametre koji se odnose na zadržavanje dielektričkih svojstava prekidača.



Slika 2.5: Vremensko-strujna karakteristika tipičnog prekidača s termo-magnetskom (gore) i elektroničkom (dolje) detekcijom [15].

3. Faktori sa značajnim utjecajem na zaštitu u mikromrežama

Kvarovi u mikromreži obično se javljaju na sabirnici ili kabelima/vodovima koji povezuju distribuirane izvore energije (DIE), pretvarače, ispravljачe, izmjenjivače i spremnike energije. Svaki od ovih dijelova mikromreže dolazi u različitim izvedbama, ovisno o specifičnoj primjeni i vrsti izvora. Distribuirani izvori energije mogu biti rotacijski, poput vjetroagregata, ili statički, poput solarnih panela. Pretvarači dolaze u različitim topologijama, ovisno o njihovoj namjeni i zadatku koji obavljaju. Također, doprinos struji kvara uvelike ovisi o načinu na koji je distribuirani izvor energije povezan s mrežom, bilo izravno ili putem pretvarača. Uzemljenje mikromreže ima utjecaj na razine struje prilikom kratkog spoja s tlom. Ovisno o izvedbi sustava uzemljenja, struja kvara može se razlikovati. Upravljačka struktura mikromreže također može utjecati na razinu struje kvara, posebno ako sadrži komponente koje ograničavaju struju na zadane vrijednosti. Važno je pažljivo projektirati mikromrežu i odabrati odgovarajuće komponente kako bi se minimizirao rizik od kvarova i osigurala sigurnost i pouzdanost rada sustava. Ukratko, kvarovi u mikromreži mogu se dogoditi na različitim dijelovima sustava, a njihova pojava ovisi o specifikaciji distribuiranih izvora energije, pretvarača, ispravljачa i drugih komponenti. Uzemljenje, kao i upravljačka struktura, također mogu utjecati na razine struje kvara. Projektiranje mikromreže treba uključivati odgovarajuće mjere zaštite i sigurnosti kako bi se minimizirali rizici i osigurala pouzdanost sustava.

3.1 Vrsta distribuiranog izvora energije

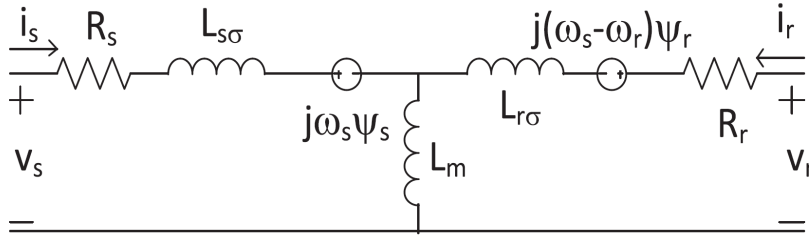
Asinkroni generator

Asinkroni generatori se uobičajeno koriste u vjetroagregatima čiji udio u proizvodnji energije može biti značajan [16]. Doprinos struji kvara ovisi o više faktora, uključujući električne parametre stroja te upravljanje [17].

Struja kratkog spoja asinkronog generatora se određuje na vanjskim stezaljkama statorskog namota. Iz nadomjesne sheme (Slika 3.1) se može doći do jednadžbe za struju kratkog spoja jedne faze koja glasi [17]:

$$i_{ks} = \frac{\sqrt{2}V_s}{X_s^-} \left[e^{-\frac{t}{T_s^-}} \cos(\alpha) - (1 - \sigma) e^{j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r^-}} \cos(\omega_s t + \alpha) \right], \quad (3.1)$$

gdje je V_s efektivni fazni napon statora, X_s^- statorska tranzijentna reaktancija, T_s^- i T_r^- su statorska i rotorska vremenska konstanta za prigušenje istosmjerne komponente u namotima te faktor prigušenja σ . Maksimalna vrijednost struje se pojavljuje u $t = T/2$ gdje je T vremenski period struje. Međutim, u proračunima kratkog spoja metodom simetričnih komponenti (IEC 60909) definirani su preduvjeti kad je moguće zanemariti doprinos asinkronog stroja struji kvara.



Slika 3.1: Nadomjesna shema asinkronog stroja [18].

Sinkroni generator

Sinkroni generator ima istu ulogu u pretvorbi energije kao i asinkroni generator, no zbog drugačijeg principa rada ima i različit doprinos struji kratkog spoja. U [18] izveden je izraz za struju kratkog spoja sinkronog generatora s trajnim magnetima:

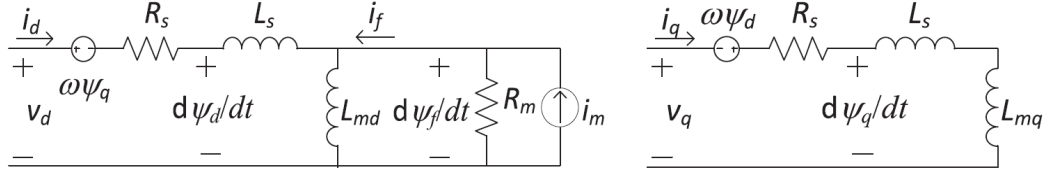
$$i_{ks,m} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_m \left(\frac{\omega L_{md}}{\omega^2 L_d L_q + R_s^2} \right) \sqrt{(\omega L_q)^2 + R_s^2}, \quad (3.2)$$

gdje je i_m je rotorski magnet modeliran kao strujni izvor, L_{md} magnetski induktivitet u d osi, L_d i L_q indktiviteti dobiveni zbrajanjem sinkrone reaktancije i L_{md} odnosno L_{mq} te R_s otpor statorskog namota.

Solarni panel

Energija koju proizvede solarni panel direktno ovisi o osunčanosti i temperaturi. Jednadžba koja povezuje struju i napon solarnog panela glasi [18]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{nkTN_s}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{N_s R_{sh}}, \quad (3.3)$$



Slika 3.2: Nadomjesna shema sinkronog stroja u $d - q$ referentnom sustavu [18].

gdje su I_{pv} i V_{pv} izlazni napon i struja solarnog panela, N_s broj serijski spojenih ćelija, R_s ukupni serijski otpor u ohmima, k Boltzmannova konstanta, n diodni faktor, q naboj elektrona u eV, R_{sh} otpor shunta u ohmima, T temperatura u Kelvinima, I_{ph} fotostruja ovisna o temperaturi a I_O reverzna struja zasićenja. Struje I_{ph} i I_O se dobivaju iz pokusa praznog hoda i kratkog spoja. Tada se mogu izvesti jednadžbe za struju kratkog spoja i napona otvorenog kruga:

$$I_{ks} = I_{ks(SIU)}(1 + K_i(T - T_s)), \quad (3.4)$$

$$V_{ok} = V_{ok(SIU)}(1 + K_v(T - T_s)), \quad (3.5)$$

gdje su K_i i K_v ($\%/^{\circ}C$) temperaturni koeficijenti struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga u standardnim ispitnim uvjetima (SIU), T_s standardna temperatura ($25^{\circ}C$), te $I_{ks(SIU)}$ i $V_{ok(SIU)}$ struja i napon pri standardnim ispitnim uvjetima.

Baterija

Doprinos struje baterije direktno spojene na mikromrežu struji kratkog spoja je potrebno analizirati zbog sve češćeg korištenja baterijskih spremnika energije u mikromrežama [19]. Struja kratkog spoja baterije se može izraziti kao [20]:

$$i_{bat}(t) = \frac{V_{bat}}{R_{bat} + R_{vod}} \left(1 - e^{-t \left(\frac{R_{bat} + R_{vod}}{L_{bat} + L_{vod}} \right)} \right), \quad (3.6)$$

gdje su R_{bat} i L_{bat} unutarnji otpor i induktivitet baterije, R_{vod} i L_{vod} otpor i induktivitet dijela voda od baterija do mjesta kvara te V_{bat} napon baterije.

Superkondenzator

Superkondenzatori također mogu naći primjenu u mikromrežama [21]. Struja kratkog spoja superkondenzatora može biti vrlo velika, s kratkom vremenskom konstantom koja ovisi o njegovom kapacitetu. Stoga je vrlo važno što prije odvojiti ga od ostatka mreže pri pojavi kvara

[18]. Izraz za struju kratkog spoja glasi:

$$i_{Cap}(t) = \frac{V_{Cap}}{R_{Cap}} \left(e^{-\frac{t}{R_{Cap}C_{eq}}} \right), \quad (3.7)$$

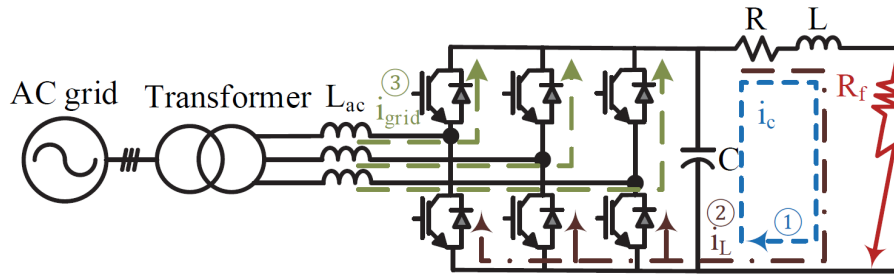
gdje su R_{Cap} i C_{eq} ekvivalentni serijski otpor i kapacitet, a V_{Cap} napon superkondenzatora.

3.2 Vrsta pretvarača

Pretvarač s utisnutim naponom

Pretvarač povezuje izmjeničnu mrežu preko zavojnica i istosmjerni dio preko kondenzatora (Slika 3.3). Struja kratkog spoja je podijeljena na tri faze:

1. Pražnjenje kondenzatora
2. Vođenje dioda
3. Napajanje iz mreže.



Slika 3.3: Nadomjesna shema pretvarača pod kratkim spojem na istosmjernoj strani [20].

Prilikom pojave kvara kondenzator će se krenuti prazniti kroz impedanciju kabela. U ovoj fazi struja može narasti i na 100 puta veću vrijednost od nazivne struje pretvarača, ovisno o unutrašnjem otporu i kapacitetu kondenzatora te impedanciji kabela od kondenzatora do mjesta kvara. Odziv struje se dobije iz ekvivalentnog RLC kruga:

$$i(t) = \frac{v_C(0)}{L(s_2 - s_1)} [e^{-s_1 t} - e^{-s_2 t}] + \frac{i_L(0)}{s_2 - s_1} [-s_1 e^{-s_1 t} + s_2 e^{-s_2 t}], \quad (3.8)$$

gdje su $s_{1,2}$ korijeni karakteristične jednadžbe:

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}. \quad (3.9)$$

α i ω_0 su faktor prigušenja i rezonantna frekvencija definirani kao:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (3.10)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_f}}. \quad (3.11)$$

Druga faza započinje kad se kondenzator isprazni ($V_C = 0$). Struja će tada komutirati kroz paralelne diode. Struja kroz pojedinu diodu će iznositi:

$$i_{kabel} = I(0)e^{-\frac{R}{L}t}; i_{diode} = i_{kabel}/3. \quad (3.12)$$

Pošto struja $I(0)$ može biti i 10 puta veća od nazivne struje pretvarača, postoji opasnost oštećenja dioda.

U trećoj fazi pretvarač se ponaša kao kao nekontrolirani ispravljač i doprinosi struji kvara preko dioda. Struja kvara u ovoj fazi dobije zbrajanjem struja pojedinih grana. Struja jedne faze mrežne struje iznosi:

$$i_{ga} = I_g \sin(\omega_s t + \alpha - \phi) + I_{gn} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.13)$$

$$\phi = \arctan \left[\frac{\omega_s (L_{ac} + L)}{R} \right] \quad (3.14)$$

$$\tau = \frac{L_{ac} + L}{R} \quad (3.15)$$

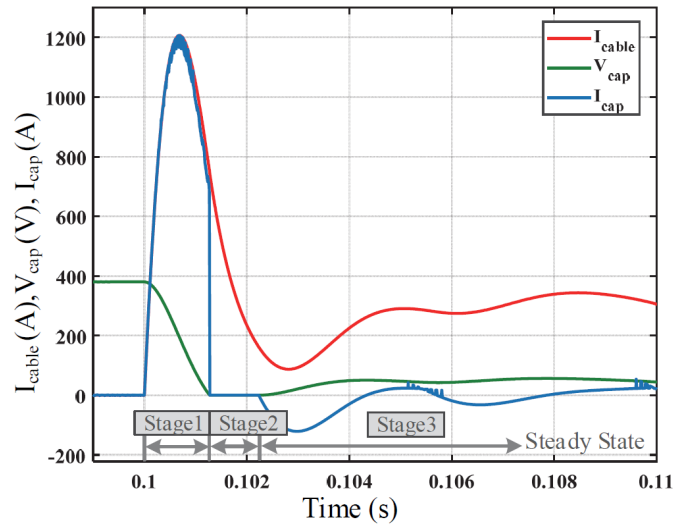
$$I_{gn} = [I_{g|0|} \sin(\alpha - \phi_0) - I_g \sin(\alpha - \phi)] \quad (3.16)$$

gdje $I_{g|0|}$ predstavlja početnu amplitudu struje mreže, ϕ_0 početni fazni kut te L_{ac} induktivitet mrežne strane.

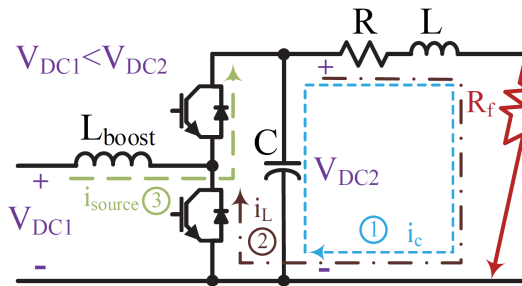
Istosmjerni pretvarači

Istosmjerni pretvarači u mikromrežama se koriste za mijenjanje razine napona, bilo s niže razine na višu (uzlazni pretvarač) ili više na nižu (silazni pretvarač). Također, postoji izvedba istosmjernog pretvarača koja ima sposobnost podizanja i snižavanja napona nazvana silazno-uzlazni pretvarač. Topologije navedenih pretvarača se razlikuju, baš kao i njihova reakcija na kvar.

Na slici 3.5 je prikazan tradicionalni neizolirani uzlazni pretvarač s kratkospojenim izlaznim stezaljkama. Faze struje kvara su uglavnom iste kao kod pretvarača s utisnutim naponom, a uključuju pražnjenje kondenzatora, vođenje dioda te naposljetku doprinos struje izvora kvaru. Strujne petlje po fazama su označene brojevima 1-3.



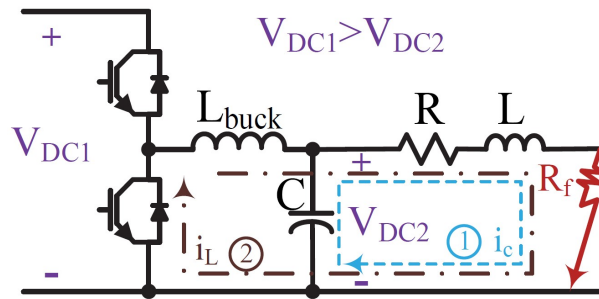
Slika 3.4: Struja i napon kondenzatora te struja kabela prilikom pojave kvara [20].



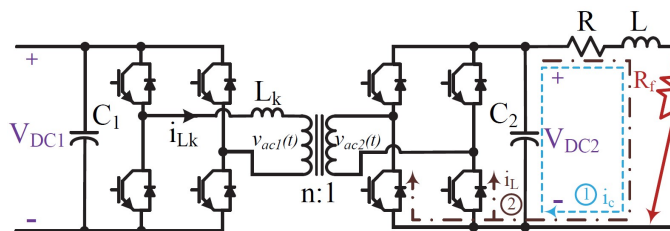
Slika 3.5: Uzlazni istosmjerni pretvarač [20].

Na slici 3.6 je prikazan tradicionalni neizolirani silazni pretvarač. Odmah se može uočiti da struja kratkog spoja ima dvije faze, jednu manje nego struja kratkog spoja uzlaznog pretvarača. Prva faza u kojoj se kondenzator prazni im je zajednička, međutim u drugoj fazi slobodnog vođenja dioda struja je ograničena strujom zavojnice koja se ne može promijeniti trenutačno. Ovakva topologija čini silazni pretvarač prirodno otpornim na kratke spojeve. Prilikom projektiranja, induktivitet i kapacitet se mogu odabrati tako da se struja kratkog spoja ograniči na specifičnu vrijednost.

Izolirani silazno-uzlazni pretvarač poznatiji kao pretvarač s dvostrukim mosnim spojem (Slika 3.7). Struja kvara se također događa u dvije faze, pražnjenje kondenzatora u prvoj te slobodno vođenje dioda u drugoj fazi. Kvar je izoliran od izvora, pošto transformator između dva mosna spoja osigurava galvansku izolaciju pa nije potreban dodatni brzi upravljač za izolaciju kvara [22].



Slika 3.6: Silazni istosmjerni pretvarač [20].



Slika 3.7: Pretvarač s dvostrukim mosnim spojem [20].

3.3 Uzemljenje

Uzemljenje mikromreže utječe na odziv struje kvara pri kratkom spoju linije i zemlje, sigurnost osoblja i opreme, pouzdanost opskrbe, zahtjeve izolacije te uvjete zaštite. Odabir uzemljenja je stoga bitan faktor pri projektiranju i radu mikromreže, a posebno pri postavljanju njene zaštite [23].

3.3.1 Izmjenične mikromreže

Postoje četiri konfiguracije uzemljenja u trofaznim mikromrežama:

1. Bez spoja sa zemljom
2. S jednim zemljospojem
3. Četverožično s jednim zemljospojem
4. Četverožično s više zemljospojeva

Konfiguracija bez spoja sa zemljom

U ovakvim konfiguracijama, struje spoja linije sa zemljom neće izazvati problematične struje kratkog spoja, što rezultira rijetkim prekidima rada zbog kvarova. To također može rezultirati odgađanjem popravaka kvarova. Ova svojstva daju prednost u primjenama gdje je pouzdanost opskrbe električnom energijom prioritarna. Međutim, osim problema s prenaponima, pronalaženje mjesta kvara može biti otežano. Također, strategije zaštite temeljene na mjerenju napona nisu selektivne, što može predstavljati nedostatak [24]. Još jedan nedostatak je mogućnost nastanka kvarova između linija u slučaju kvara između linije i zemlje. Stoga, iz navedenih razloga, ne preporučuje se upotreba ove konfiguracije uzemljenja. Izuzetak je prilagodba pri spajanju na distribucijsku mrežu koja koristi takvo uzemljenje [23].

Konfiguracija s jednim zemljospojem

Konfiguracija s jednim zemljospojem podrazumijeva da mikromreža nema vlastito uzemljenje, već je spojena na distribucijsku mrežu s istom konfiguracijom uzemljenja. U ovoj konfiguraciji, mikromreža neće biti izložena prenaponima i lakše će se detektirati mjesto kvara u usporedbi s prethodno opisanom konfiguracijom. Međutim, kada mikromreža prelazi u otočni način rada, postaje neuzemljena. Kako bi se djelomično riješio taj problem, moguće je trenutno uzemljenje u jednoj točki nakon prelaska u otočni način rada. Ipak, čak i tada će mikromreža biti izložena prenaponima prije nego što uređaj za uzemljenje uspješno obavi svoju funkciju. Stoga, ni ova konfiguracija nije preporučljiva [23].

Četverožična konfiguracija s jednim zemljospojem

Četverožična konfiguracija osigurava uzemljenje i nakon prelaska mikromreže u otočni način rada čime je problem s prenaponima i pronalaskom lokacije kvara je gotovo eliminiran [25]. Međutim, pojava porasta napona neutralne točke u slučaju lošeg uzemljenja može predstavljati problem.

Četverožična konfiguracija s više zemljospojeva

Ova konfiguracija donosi brojne prednosti, uključujući poboljšanu reakciju na tranzijente napona, optimizirane zahtjeve za naponske zaštitne uređaje, manju nultu impedanciju u usporedbi s jednožičnim spojem, poboljšanu sigurnost te mogućnost napajanja jednofaznog tereta [23]. Međutim, postoji nekoliko nedostataka, kao što su povećanje potencijala zemlje, visoke struje kratkog spoja sa zemljom i otežana koordinacija zaštite. U takvim sustavima, važno je što brže detektirati kvarove kako bi se spriječila šteta i održao stabilan napon [26]. Neki od ovih problema mogu se riješiti primjenom uzemljenja preko impedancija ili upotrebom naprednih strategija zaštite. Ova metoda uzemljenja je prikladna za većinu mikromreža. Naravno, pri od-

abiru konfiguracije treba uzeti u obzir i druge čimbenike poput zaštite, pouzdanosti, kvalitete električne energije i cijene.

3.3.2 Istosmjerne mikromreže

Uzemljenje u istosmjernom sustavu je prema IEC 60364-1 podijeljeno na pet tipova: Terre-Terre (TT), Terre-Neutre (TN) kojem pripadaju tri podskupine te Isolated-Terre (IT). Prvo slovo u skraćenici označava spoj sa zemljom, a drugo uzemljenje izloženog vodljivog materijala u odnosu na nulti vod.

U TT sustavu uzemljenja neutralni vodič pretvarača i vodič za uzemljenje tereta su odvojeno spojeni sa zemljom. Sustav je jednostavan za izvedbu i kvar se ne prenosi na ostale dijelove mreže no postoji opasnost od struja izjednačenja i prenapona [27].

TN je najčešće korišten sustav uzemljenja. Srednja točka pretvarača je direktno uzemljena, a izloženi vodljivi dijelovi spojeni na uzemljeni nulti vodič. Vodiči za uzemljenje mogu biti PE (engl. *Protective Earthing*), nulti ili kombinirani PE i nulti - PEN. Prednost sustava je postojanje dovoljno velikih struja kvara, što omogućava detekciju, niska impedancija uzemljenja te mogućnost ograničavanja struje kvara promjenom impedancije uzemljenja, no u visokonaponskim primjenama je visok napon dodira [28]. Kako je prije navedeno ovaj sustav ima tri podskupine: TN-C, TN-S i TN-C-S. TN-C kombinira dva vodiča u PEN vodič čime se smanjuje trošak uzemljenja. TN-S razdvaja PE i nulti vodič te tako osigurava najveću elektromagnetsku kompatibilnost (engl. *Electromagnetic Compatibility* - EMC) među ostalim TN podskupinama. Dodatna prednost koja je korisna u informacijskim i komunikacijskim sustavima je nastavak rada zaštite iako dođe do odvajanja vodiča. TN-C-S kombinira dobra svojstva TN-S i TN-C sustava. Međutim, identifikacija kvara će biti otežana u slučaju odvajanja nultog vodiča.

IT sustav nije uzemljen, dok je teret uzemljen odvojeno. Prednost je niska struja kvara i mogućnost nastavka opskrbe tereta, no lociranje kvara te nepredvidljivost struja kvara je otežano.

Iz perspektive istosmjernog izvora uzemljenje sustava je podjeljeno na neuzemljeno (plutajuće), direktno uzemljenje, uzemljenje preko otpora, paralelnih otpora, diode i tiristora. Uzemljenje preko diode i tiristora je relativno nedavno predloženo [27]. Prilikom uzemljenja preko diode negativni pol je uzemljen. Kad napon dosegne određenu vrijednost negativni pol će automatski biti uzemljen. Prilikom ovakvog uzemljenja, korozija uzrokovana strujom je neizbježna. Tiristor pak kontrolira spoj negativnog pola i zemlje. Signal za okidanje tiristora je poslan kad napon negativnog pola dosegne određenu vrijednost.

Tablica 3.1: Usporedba sustava uzemljenja [20].

Sustav uzemljenja	Prednosti	Nedostatci
Neuzemljen	<ul style="list-style-type: none"> • Nastavak rada mikromreže nakon spoja jednog pola sa zemljom • Niske struje izjednačenja • Jednostavan i jeftin 	<ul style="list-style-type: none"> • Visok napon dodira • Otežana detekcija kvara • Spoj drugog pola sa zemljom rezultira značajnim kvarom
Direktno uzemljen	<ul style="list-style-type: none"> • Nizak napon dodira • Zahtijeva niži stupanj izolacije • Jednostavna detekcija kvarova 	<ul style="list-style-type: none"> • Visoke struje kvara • Visoka struja izjednačenja
Uzemljen preko diode	<ul style="list-style-type: none"> • Nizak do srednje visok napon dodira 	<ul style="list-style-type: none"> • Pojava korozije • Srednje do visoka struja izjednačenja
Uzemljen preko tiristora	<ul style="list-style-type: none"> • Niska do srednja struja izjednačenja 	<ul style="list-style-type: none"> • Srednji do visoki napon dodira

3.4 Upravljačka struktura

Utjecaj upravljanja na kvarove je opisan na primjeru upravljanja izmjenjivačem pri otopnom načinu rada mikromreže. U otopnom načinu izmjenjivač je upravljan tako da održava napon i frekvenciju sustava stabilnima. Na slici 3.8 je izlazni napon izmjenjivača, odnosno napon na kondenzatoru izlaznog filtera C_f označen $V_{o,abc}$, a napon zajedničke sabirnice $V_{o,abc}$. Otpor linije između izmjenjivača i sabirnice je zanemariv u usporedbi s reaktancijom induktiviteta filtera. Izlazna radna i jalova snaga su zadane izrazima:

$$P = \frac{V_{o,abc}V_{o,abc}}{X_c} \sin(\delta_{abc} - \delta_{pcc}) \quad (3.17)$$

$$Q = \frac{V_{o,abc}V_{o,abc} \cos(\delta_{abc} - \delta_{pcc}) - V_{pcc}^2}{X_c}. \quad (3.18)$$

Snaga se može regulirati promjenom razlike kutova $\delta_{abc} - \delta_{pcc}$ ili amplitude $V_{o,abc}$. Proporcionalno (engl. *Droop*) upravljanje je zadano sa:

$$\omega_{ref} = \omega^* - m(P - P^*) \quad (3.19)$$

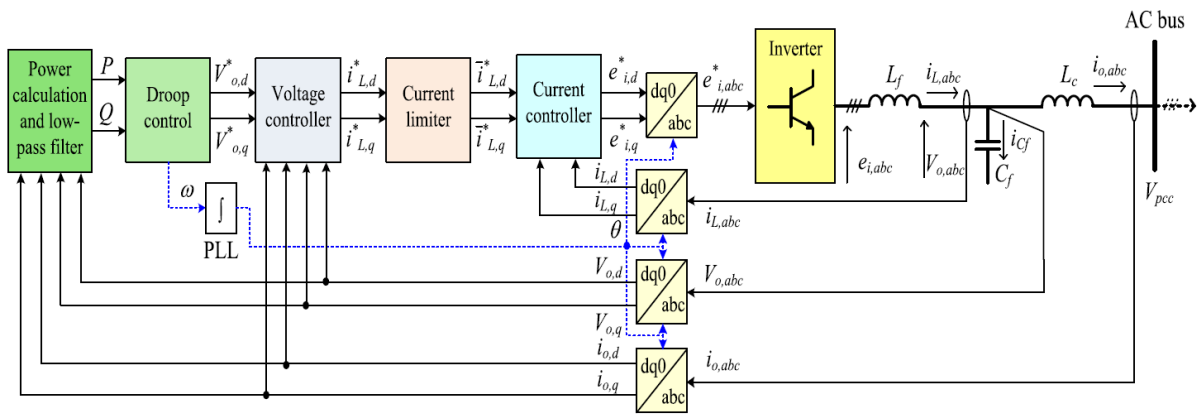
$$V_{o,abc,ref} = V_{o,abc}^* - n(Q - Q^*), \quad (3.20)$$

gdje su P^* i Q^* radna i jalova snaga, ω^* i $V_{o,abc}^*$ izlazna frekvencija i amplituda napona, ω_{ref} i $V_{o,abc,ref}$ referentne vrijednosti frekvencije i napona izmjenjivača, a m i n nagibi karakteristike proporcionalnog upravljanja. Nadalje, regulatori frekvencije i napona su zadani:

$$\delta\omega = k_{p\omega}(\omega_{ref} - \omega) + k_{i\omega} \int (\omega_{ref} - \omega) dt \quad (3.21)$$

$$\delta V = k_{pV}(V_{o,abc,ref} - V_{o,abc}) + k_{iV} \int (\omega^* - \omega) dt. \quad (3.22)$$

$k_{p\omega}$, $k_{i\omega}$, k_{pV} i k_{iV} proporcionalni i integralni parametri PI regulatora. Također, $\delta\omega$ i δV moraju biti ograničeni kako se ne bi prekoračile maksimalna dozvoljena devijacija napona i frekvencije. Izlazi regulatora napona su referentne vrijednosti izlazne struje u $d - q$ referentnom sustavu, $i_{L,d}^*$ i $i_{L,q}^*$. Reference vrijednosti struje su ulazi u blok za ograničavanje struje (engl. *Current limiter*). Zadaća ovog bloka je da spriječi visoke referentne vrijednosti struje prilikom kvara u mikromreži.

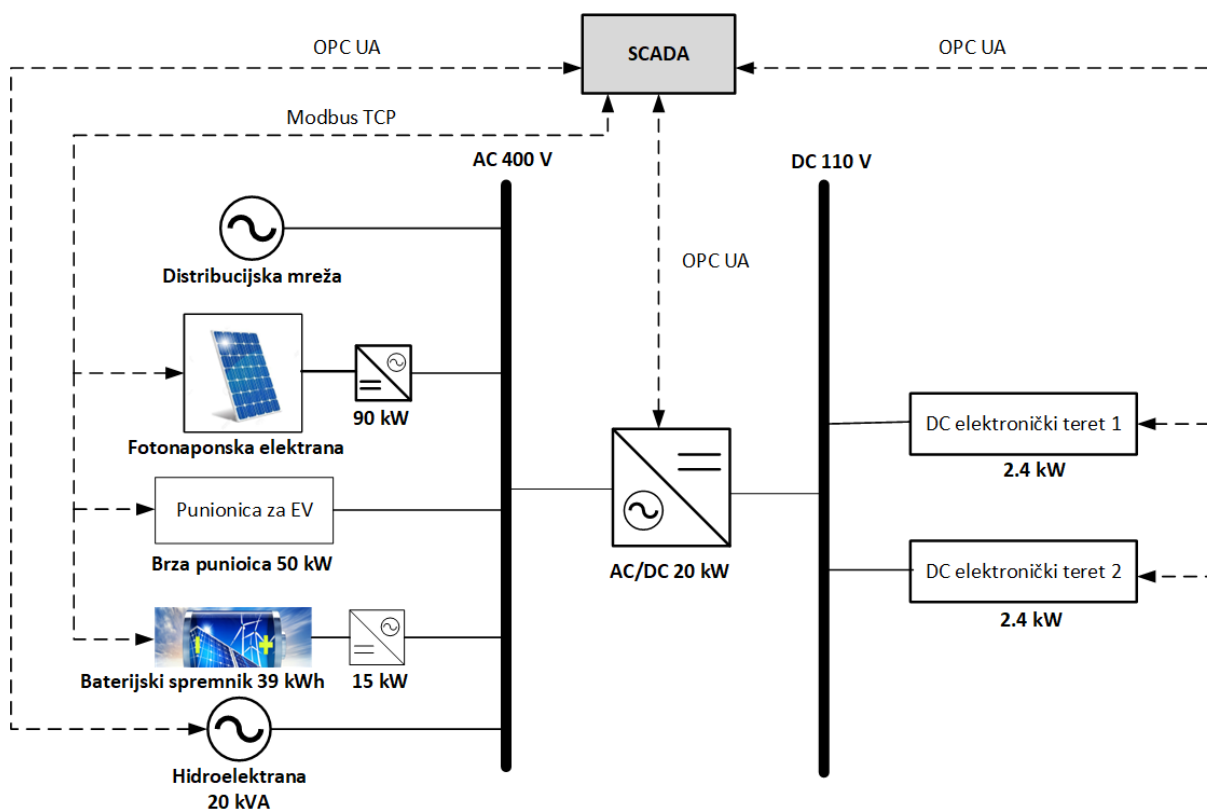


Slika 3.8: Upravljački dijagram izmjenjivača pri otopnom načinu rada mikromreže [18].

4. Laboratorijski postav mikromreže

U svrhu provedbe eksperimentalne validacije razvijenih algoritama u sklopu projekta, korišten je laboratorijski postav mikromreže koja se nalazi u sklopu Laboratorija za napredne elektroenergetske mreže (engl. *Smart Grid Laboratory* - SGLab) koji se nalazi na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva.

U nastavku ovoga poglavlja detaljno je opisan korišteni laboratorijski postav mikromreže. Struktura laboratorijske mikromreže prikazana je na Slici 4.1.



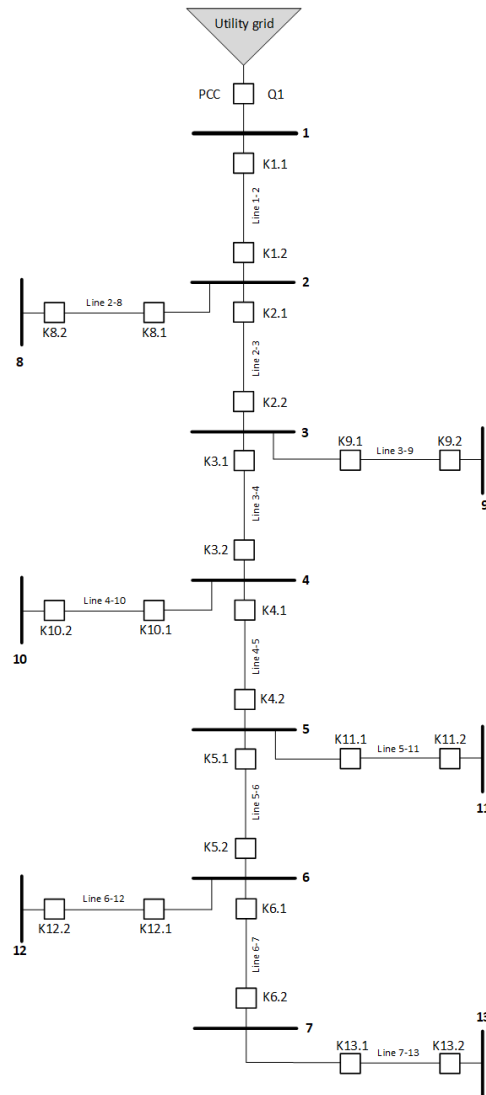
Slika 4.1: SGLab - struktura laboratorijske mikromreže.

Na Slici 4.1 vidljivo je da je korišten laboratorijski postav hibridne mikromreže, tj. mikromreže koja se sastoji od izmjeničnog AC i istosmjernog DC dijela koji su međusobno povezani korištenjem dvosmjernog pretvarača. Nadalje, na Slici 4.1 izmjenični dio mikromreže zbog jednostavnosti prikaza prikazan je samo jednim čvorištem iako u stvarnosti izmjenični dio mikromreže ima 13 čvorišta. Nadalje, sve komponente mikromreže integrirane su centralni nadzorni i upravljački sustav mikromreže (engl. Supervisory Control and Data Acquisition System - SCADA) koji služi kao aplikacijska platforma za integraciju i testiranje razvijenog EMS sustava. U nastavku su detaljno objašnjene sve komponente laboratorijskog postava.

Arhitektura komunikacijske mreže je distribuirana što znači da se nadzorni i upravljački sustav (engl. Supervisory Control and Data Acquisition System - SCADA) pokreće na serveru različitom od onog na kojem se pokreće sustav za upravljanje energijom (engl. Energy Managements System - EMS). Za komunikaciju su korišteni komunikacijski protokoli OPC UA te Modbus TCP. Za pristup parametrima zaštitnih funkcija generatora koristi se IEC 61850.

Izmjenični dio mikromreže je radijalne strukture, s vrijednostima parametara kabela koje se mogu tipično pronaći u Republici Hrvatskoj, međutim druga konfiguracija kabela odgovara vrijednostima niskonaponske CIGRE mreže. Svaka dionica napona ima mjerenja faznog i linijskog napona, struje, frekvencije, hramoničkog izobličenja, radnih i jalovih snaga, te nesimetrije faza. Jednopolna shema izmjeničnog dijela je prikazana na slici 4.2.

Na izmjeničnoj strani mikromreže nalaze se različiti izvori energije, trošilo i baterijski spremnik energije. Laboratorijska hidroelektrana sastoji se od sinkronog generatora snage 20 kVA. Rotacijski generator pruža brojne prednosti za mikromrežu, uključujući održavanje frekvencije i povećanje stabilnosti mikromreže. Osim toga, hidroelektrana je upravljivi izvor energije. Fotonaionska elektrana predstavlja neupravljivi izvor energije ukupne snage 108 kW. Da bi se omogućio spoj solarnih panela istosmjernog napona na izmjenični dio mikromreže, koriste se pretvarači (inverteri) snage 10 kW. Trošilo koje je povezano s izmjeničnom stranom mikromreže je punionica za električna vozila. Punionica ima nazivnu snagu od 50 kW s mogućnošću brzog punjenja za istosmjerne priključke, dok je izmjenični priključak snage 43 kW. Baterijski spremnici energije ukupne snage 113 kWh podijeljeni su na 6 modula i spojeni na mrežu putem pretvarača snage 2,5 kW. Svaki baterijski spremnik upravlja se vlastitim sustavom za upravljanje baterijom (engl. Battery Management System - BMS). Na istosmjernom dijelu mikromreže nalaze se dva elektronička tereta koja su spojena preko dvosmjernog pretvarača. Pretvarači imaju mogućnost upravljanja naponom istosmjerne sabirnice i izlaznom snagom. Nazivna snaga tereta iznosi 2,4 kW, dok pretvarač može isporučivati snagu u rasponu od 0 do 20 kW.



Slika 4.2: SGLab - jednopolna shema izmjeničnog dijela mikromreže.

5. Model zaštite

Sustav zaštite mikromreže ima za cilj sprječavanje štetnih posljedica za ljude i opremu prilikom kvarova. Njegova funkcija je da brzo reagira na kvarove, minimizirajući njihov utjecaj na mikromrežu. Sustav zaštite treba biti brz i selektivan, te djelovati samo na dio mikromreže koji je pogođen kvarom, ili na cijelu mikromrežu ako je to nužno. Osim brzine i selektivnosti, važno je osigurati pouzdanost zaštite. Pouzdanost zaštite odnosi se na sposobnost prepoznavanja kvarova i razlikovanje od privremenih pojava na koje zaštita ne bi trebala reagirati. Nepotrebno djelovanje zaštite može rezultirati prekidom opskrbe električnom energijom krajnjim korisnicima i financijskim gubicima za opskrbljivača.

Korišteni model zaštite mikromreže djeluje na principu relaksacije fiksnih granica zaštite prilikom graničnog pogona mikromreže. Takav pristup osigurava povećanje fleksibilnosti mikromreže u određenom vremenskom intervalu koji je ograničen tehničkim svojstvima vodova/kabela mikromreže. Potrebnu fleksibilnost zaštite se može osigurati adaptacijom naponskih i strujnih ograničenja zaštite. Konkretno, razine na kojima bi zaštita reagirala su pomaknute u pozitivnom ili negativnom smjeru od prethodno definiranog praga djelovanja. Tehnička ograničenja vodova dozvoljavaju preopterećenje tijekom specificiranog vremenskog intervala koji se neće prelaziti. Detaljan opis modela zaštite je prikazan u sljedećem algoritmu. Naponska i strujna ograničenja zaštita su relaksirana u razdoblju od 15 minuta, međutim, trajanje ovog intervala može biti prilagođeno specifičnim tehničkim uvjetima mikromreže na koju se algoritam primjenjuje. Nadalje, modifikacija algoritma je moguća tako da se djeluje na samo jednu ili kombinaciju ponuđenih zaštita - nadstrujne, nadnaponske ili podnaponske čime se osigurava fleksibilnost mikromreže u samo jednom smjeru ako je to potrebno. Detaljan opis modela zaštite slijedi u ostatku poglavlja.

Prije pogona zaštite potrebno je zadati parametre algoritma koji je zadužen za optimalan rad mikromreže (Offline točka 1). Ovaj algoritam osigurava da mikromreža zadovoljava potrebe korisnika električne energije po najnižem trošku. Kao što se može pretpostaviti, u pozadini je optimizacijski problem koji ima za zadatak minimizirati trošak pogona. Pri tom se pretpostavlja da je dio izvora (i trošila) električne energije u mikromreži upravljiv. Korisnik bira kakav algoritam će koristiti, u ovom slučaju je odabran DED (engl. Dynamic Economic Dispatch). Kompleksniji algoritmi mogu biti odabrani, no da bi se pokazale mogućnosti modela zaštite osnovni DED algoritam je odabran. Algoritam zahtijeva postavljanje ograničenja poput maksimalne i minimalne snage izvora, brzine promjene snage, frekvencije, itd., koje korisnik mora unijeti prije pokretanja algoritma u stvarnom vremenu. Nadalje, potrebno je unijeti

početne parametre zaštite za mrežni i otočni način rada (Offline točka 2). Ovi parametri se odabiru prema nekom od važećih standarda za zaštitu mikromreža. Parametri ovise o topologiji, veličini ili vrsti mikromreže te je njihov sam odabir prilično zahtjevan. Naravno, poseban set parametara se mora odabrati za otočni način rada pošto se u njemu mijenjaju razine struja prilikom normalnog pogona ali i prilikom pojave kvarova. Tek nakon postavljanja svih potrebnih parametara se Online dio algoritma može pokrenuti.

Nakon pokretanja dispeča, odnosno postavljanja zastavice u True, algoritam se izvršava u beskonačnoj petlji. Istekom vremena od posljednjeg poziva, kod unutar if petlje se izvršava. U ovom slučaju je odabrano vrijeme od 15 minuta, međutim trajanje se može povećati ili smanjiti ovisno o želji korisnika i tehničkim ograničenjima sustava. Prvo štp će se izvršiti unutar petlje je uzimanje mjerenja iz mjernog sustava kako bi se odredila radna točka mikromreže. Pri tom nam pomažu mjerenja proizvodnje izvora, potrošnje, te koliko se snage uzima iz mreže. Sljedeća su očitavanja frekvencije i promjene frekvencije (točka 2) koja govore o stabilnosti mikromreže. Dobivanje navedenih mjerenja je preduvjet za izvođenje DED algoritma koji daje postavke proizvodnje za novu radnu točku (točka 3). Postavke se tada šalju na svaku upravljivu jedinicu (točka 4) i očitavaju se naponi sa svake sabirnice u mikromreži (točka 5). Isti se naponi koriste za proračun tokova snaga koji će dati struje svake grane (točka 6). Ako struja nadilazi inicijalno ograničenje nadstrujne zaštite, ograničenje će se povećati za 20 % kako bi ne bi došlo do djelovanja zaštite (točka 7). Ovako je osigurano da se algoritam izvrši a mikromreža ostane u pogonu. Isti princip je ustanovljen za naponsku zaštitu ako se napon neke od sabirnica poveća preko inicijalno dopuštenoga (točka 8). U oba slučaja, ako dođe do promjene ograničenja, postavlja se zastavica kako bi se označilo da su ograničenja promijenjena i spriječilo isto pri idućem pozivu algoritma pošto se želi spriječiti preopterećenje vodova i smanjiti utjecaj na izolaciju. U posljednjem koraku (točka 9) se ispituje je li isteklo određene vrijeme od promjene postavki zaštite kako bi se vratile na početno stanje i pripremili uvjeti za ponavljanje algoritma.

OFFLINE:

1. Definiraj parametre DED algoritma.
2. Definiraj parametre zaštite za mrežni i otočni način rada.

ONLINE:

```
while Dispeč je omogućen do
  if 15 minuta prošlo od zadnjeg poziva then
    1. Pročitaj inicijalna mjerenja aktivne snage i odredi radnu točku mikromreže  $p_g^{\text{INIT}}$ ,
       $P_{RES}$ ,  $C_l$ ,  $NL$ 
    2. Pročitaj inicijalnu frekvenciju  $f$  i rocof
    3. CALL DED algoritam
    4. Pošalji rješenja DED algoritma (optimalne radne točke) za svaku upravljivu jedinicu
      LF algoritmu
    5. Pročitaj i pošalji mjerenja napona za svaku sabirnicu MG
      LF algoritmu
    6. CALL LF algoritam
    7. if struja prijede ograničenje i zastavica je 0 then
      | 7.1. Povećaj prag djelovanja nadstrujne zaštite za 20%
      | 7.2. Postavi zastavicu u 1
    end
    8. if napon prijede ograničenje i zastavica je 0 then
      | 8.1. Povećaj prag djelovanja pod/nadnaponske zaštite za 20%
      | 8.2. Postavi zastavicu u 1
    end
    9. if 15 minuta prošlo otkad je zastavica postavljena u 1 then
      | 9.1. Postavi zastavicu u 0
      | 9.2. Postavi početne vrijednosti zaštite
    end
  end
end
```

Algorithm 1: Model zaštite.

6. Zaključna razmatranja

Ovaj dokument pruža detaljan opis modela zaštite mikromreže u kontekstu mrežnog i otočnog načina rada, kao i parametara koji utječu na njegovo ponašanje. Razumijevanje zaštite mikromreže zahtijeva analizu različitih faktora, a jedan od ključnih faktora je vrsta izvora energije koja je integrirana u mikromrežu. U dokumentu se detaljno objašnjava kako različiti tipovi izvora utječu na struju kvara i koje mjere zaštite su potrebne kako bi se minimizirali rizici. Posebna pažnja posvećena je analizi odgovora baterije na kvarove u mikromreži. Baterijski sustavi igraju važnu ulogu u osiguravanju kontinuirane opskrbe energijom, stoga je ključno razumjeti kako će se baterija ponašati tijekom kvara i kako će to utjecati na zaštitne mjere koje se primjenjuju. U dokumentu se također proučava utjecaj upravljanja mikromrežom i njezinog uzemljenja na sustav zaštite. Upravljanje mikromrežom, uključujući kontrolu i regulaciju izvora energije, može imati značajan utjecaj na zaštitne mehanizme. Također se analizira kako različite konfiguracije uzemljenja mikromreže mogu utjecati na učinkovitost zaštite i kako se mogu optimizirati za bolju sigurnost i zaštitu. Sve navedene teme pružaju dublje razumijevanje zaštite mikromreže i pomažu u razvoju efikasnih i pouzdanih zaštitnih strategija.

Mišljenja, nalazi i zaključci ili preporuke navedene u ovom materijalu isključiva su odgovornost autora i ne odražavaju nužno stajališta Hrvatske zaklade za znanost, Ministarstva znanosti i obrazovanja i Europske komisije.

Literatura

- [1] H. Požar. *Visokonaponska rasklopna postrojenja*. Tehnička knjiga, 1967.
- [2] elprocus. Electromechanical relay construction with working.
- [3] Bergstrom M. et al Bamber M. *Network Protection and Automation Guide*. Alstom Grid, 2011.
- [4] Seyed Amir Hosseini, Hossein Askarian Abyaneh, Seyed Hossein Hesamedin Sadeghi, Farzad Razavi, and Adel Nasiri. An overview of microgrid protection methods and the factors involved. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64:174 – 186, 2016.
- [5] Jackson John Justo, Francis Mwasilu, Ju Lee, and Jin-Woo Jung. Ac-microgrids versus dc-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24:387 – 405, 2013.
- [6] C. Buque, O. Ipinnimo, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury. Modeling and simulation of an adaptive relaying scheme for a microgrid. In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–8, 2012.
- [7] Manjula Dewadasa, Arindam Ghosh, and Gerard Ledwich. Distance protection solution for a converter controlled microgrid. 01 2008.
- [8] Mohamed Zellagui and Abdelaziz Chaghi. Impact of svc devices on distance protection setting zones in 400 kv transmission line. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, 75:249–262, 06 2013.
- [9] J.C. Hernández, J. De la Cruz, and B. Ogayar. Electrical protection for the grid-interconnection of photovoltaic-distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 89:85 – 99, 2012.
- [10] E. Sortomme, S. S. Venkata, and J. Mitra. Microgrid protection using communication-assisted digital relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4):2789–2796, 2010.
- [11] Ritwik Majumder, Manjula Dewadasa, Arindam Ghosh, Gerard Ledwich, and Firuz Zare. Control and protection of a microgrid connected to utility through back-to-back converters. *Electric Power Systems Research*, 81(7):1424 – 1435, 2011.

- [12] M. Dewadasa, A. Ghosh, and G. Ledwich. Fold back current control and admittance protection scheme for a distribution network containing distributed generators. *IET Generation, Transmission Distribution*, 4(8):952–962, 2010.
- [13] K. Lai, M. S. Illindala, and M. A. Haj-ahmed. Comprehensive protection strategy for an islanded microgrid using intelligent relays. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(1):47–55, 2017.
- [14] J. P. Brozek. Dc overcurrent protection-where we stand. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29(5):1029–1032, 1993.
- [15] Legrand. *Breaking and protection devices*. Power guide. 2009.
- [16] Juan Gómez, Sebastian Nesci, and Franco Barbero. Short-circuit currents supplied for induction generators. pages 1 – 4, 07 2009.
- [17] Ahmed Elnaggar. *Standard Calculation of Fault Current Contribution of Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Turbine*, pages 277–301. 07 2016.
- [18] Duong Minh Bui and Shi-Lin Chen. Fault protection solutions appropriately proposed for ungrounded low-voltage ac microgrids: Review and proposals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75:1156 – 1174, 2017.
- [19] Deepak Chandran and Anwar Master. Microgrid battery energy storage systems (bess) approach. 05 2018.
- [20] S. Beheshtaein, R. M. Cuzner, M. Forouzesh, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero. Dc microgrid protection: A comprehensive review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, pages 1–1, 2019.
- [21] P. J. Binduhewa, A. C. Renfrew, and M. Barnes. Ultracapacitor energy storage for microgrid micro-generation. In *2008 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, pages 270–274, 2008.
- [22] Y. A. Harrye, K. H. Ahmed, and A. A. Aboushady. Dc fault isolation study of bidirectional dual active bridge dc/dc converter for dc transmission grid application. In *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 003193–003198, 2015.
- [23] J. Mohammadi, F. Badrkhani Ajaei, and G. Stevens. Grounding the ac microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1):98–105, 2019.
- [24] S. Teimourzadeh, F. Aminifar, M. Davarpanah, and J. M. Guerrero. Macroprotections for microgrids: Toward a new protection paradigm subsequent to distributed energy resource integration. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 10(3):6–18, 2016.

- [25] Duong Minh Bui, Shi-Lin Chen, Keng-Yu Lien, Yung-Ruei Chang, Yih-Der Lee, and Jheng-Lun Jiang. Investigation on transient behaviours of a uni-grounded low-voltage ac microgrid and evaluation on its available fault protection methods: Review and proposals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75:1417 – 1452, 2017.
- [26] Keng-Yu Lien, Duong Minh Bui, Shi-Lin Chen, Wei-Xiang Zhao, Yung-Ruei Chang, Yih-Der Lee, and Jheng-Lun Jiang. A novel fault protection system using communication-assisted digital relays for ac microgrids having a multiple grounding system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 78:600 – 625, 2016.
- [27] J. Park and J. Candelaria. Fault detection and isolation in low-voltage dc-bus microgrid system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(2):779–787, 2013.
- [28] J. Mohammadi, F. B. Ajaei, and G. Stevens. Dc microgrid grounding strategies. In *2018 IEEE/IAS 54th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I CPS)*, pages 1–6, 2018.