

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

FLEXIBASE

Dokumentacija sustava koordinirane zaštite u mikromreži u otočnom
pogonu

izv. prof. Hrvoje Pandžić
izv. prof. Juraj Havelka
Mateo Beus, mag. ing.
Ivan Grcić, mag. ing.



Europska unija
Zajedno do fondova EU



09-2020

Sadržaj

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Uvod | 1 |
| 2 | Zaštitni uređaji | 2 |
| 2.1 | Zaštitni releji | 2 |
| 2.2 | Osigurači | 7 |
| 2.3 | Prekidači | 7 |
| 3 | Faktori sa značajnim utjecajem na zaštitu u mikromrežama | 14 |
| 3.1 | Vrsta distribuiranog izvora energije | 14 |
| 3.2 | Vrsta pretvarača | 17 |
| 3.3 | Uzemljenje | 20 |
| 3.3.1 | Izmjenične mikromreže | 20 |
| 3.3.2 | Istosmjerne mikromreže | 22 |
| 3.4 | Upravljačka struktura | 23 |
| 4 | Koordinacija i metode zaštite mikromreže | 25 |
| 4.1 | Koordinacija zaštite u otočnom načinu rada | 25 |
| 4.2 | Metode zaštite | 27 |
| 5 | Zaključna razmatranja | 30 |
| | Literatura | 35 |

1. Uvod

Sve češća implementacija distribuiranih izvora energije (DIE) u elektroenergetski sustav te pojava mikromreže kao koncepta uzrokovala je potrebu za razvojem novih vrsta zaštite i načina na koji se zaštita koordinira s distributivnim sustavom, ali i unutar same mikromreže. Zahtjevi s kojima se zaštita susreće su velika brzina reakcije, selektivnost kvarova, osjetljivost te pouzdanost. Svaki od navedenih zahtijeva ovisi o velikom broju parametara poput vrste sustava (istosmjerni ili izmjenični), topologiji mikromreže, vrste izvora i načina njegove integracije u mrežu. Na temelju navedenih ali i velikog broja navedenih parametara je potrebno odabrati zaštitne uređaje, metodu zaštite te naposljetku strategiju koordinacije. Tradicionalni zaštitni uređaji nisu sposobni izvršavati svoju funkciju u dinamičnom radu mikromreže. Razine i smjer struje se često mijenjaju, a razvojem učinkovite elektronike istosmjerni sustavi se počinju sve više koristiti. Stoga se potreba za naprednijim zaštitnim uređajima pojavljuje. Metode zaštite također zahtijevaju unaprjeđenje. Uobičajene metode postaju neprimjenjive, a moderne metode temeljene na transformacijama signala i inteligentnim klasifikatorima pronalaze svoju primjenu. Koordinacija zaštite, s rastom kompleksnosti topologija mikromreža, dobiva sve zahtjevniju ulogu. Za koordinaciju vrijedi isto kao i za zaštitne metode i uređaje. Potreban je razvoj kojim bi se povećala sigurnost, a smanjila potencijalna kompleksnost ovog sustava i samim time cijena.

2. Zaštitni uređaji

Uloga zaštitnih uređaja je odvajanje dijela sustava pod kvarom od ostatka elektroenergetskog sustava u svrhu očuvanja ljudskih života te sprječavanje kvarova opreme. U ovom poglavlju su opisani osnovni zaštitni uređaji:

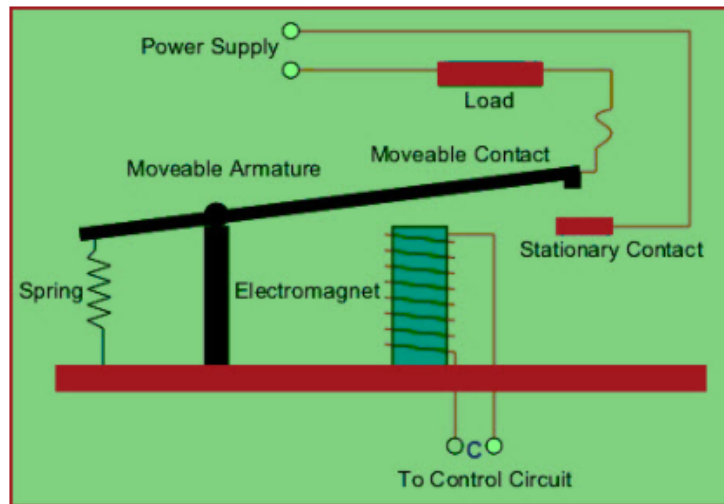
- Zaštitni releji
- Osigurači
- Prekidači.

2.1 Zaštitni releji

Zaštitni releji su uređaji koji na temelju mjerenja veličina sustava (napon, struja, snaga, itd.) određuju potrebu za reakcijom. Prvi releji su bili elektromehanički uređaji koji na temelju male električne ili mehaničke snage mogu uklopiti veću snagu [1]. Daljnjim razvojem elektroničkog sklopovlja koje zamjenjuje elektromehanički princip rada nastaju statički, digitalni te naposljetku numerički releji. Zaštitni releji se koriste u izmjeničnim i istosmjernim električnim sustavima.

Elektromehanički releji

Elektromehanički relej je uređaj korišten za zaštitu i upravljanje različitim uređajima, električnim krugovima, opremom te električnom mrežom. Osnovni dijelovi od kojih je načinjen su elektromagnet (zavojnica namotana oko željezne jezgre), opruga, pomična armatura s pomičnim kontaktom te nepomični kontakt. Slika 2.1 prikazuje dijelove releja (relej je isključen). Ako se elektromagnet pobudi dovodjenjem uzbude na kontrolni krug (označeno C na slici) pomični kontakt je povučen prema stacionarnom kontaktu, što omogućava napajanje tereta. Prednost ove vrste releja je što pružaju galvansko odvajanje ulaza i izlaza uz jednostavnost i pouzdanost izvedbe. Stoga su korišteni za jednostavne funkcije poput uključjenja/isključjenja.



Slika 2.1: Struktura elektromehaničkog releja [2].

Statički releji

Pojam statički ukazuje da relej nema pomičnih dijelova, no armatura je i dalje pomična. Ono na što se odnosi je zamjena pomičnih dijelova za kreiranje relejne karakteristike. Umjesto zavojnice odnosno magneta za stvaranje karakteristike se koriste analogni elektronički uređaji poput tranzistora. Napretkom elektronike analogne zamjenjuju digitalni uređaji sposobni za izvršavanje logičkih funkcija te obradu signala [3].

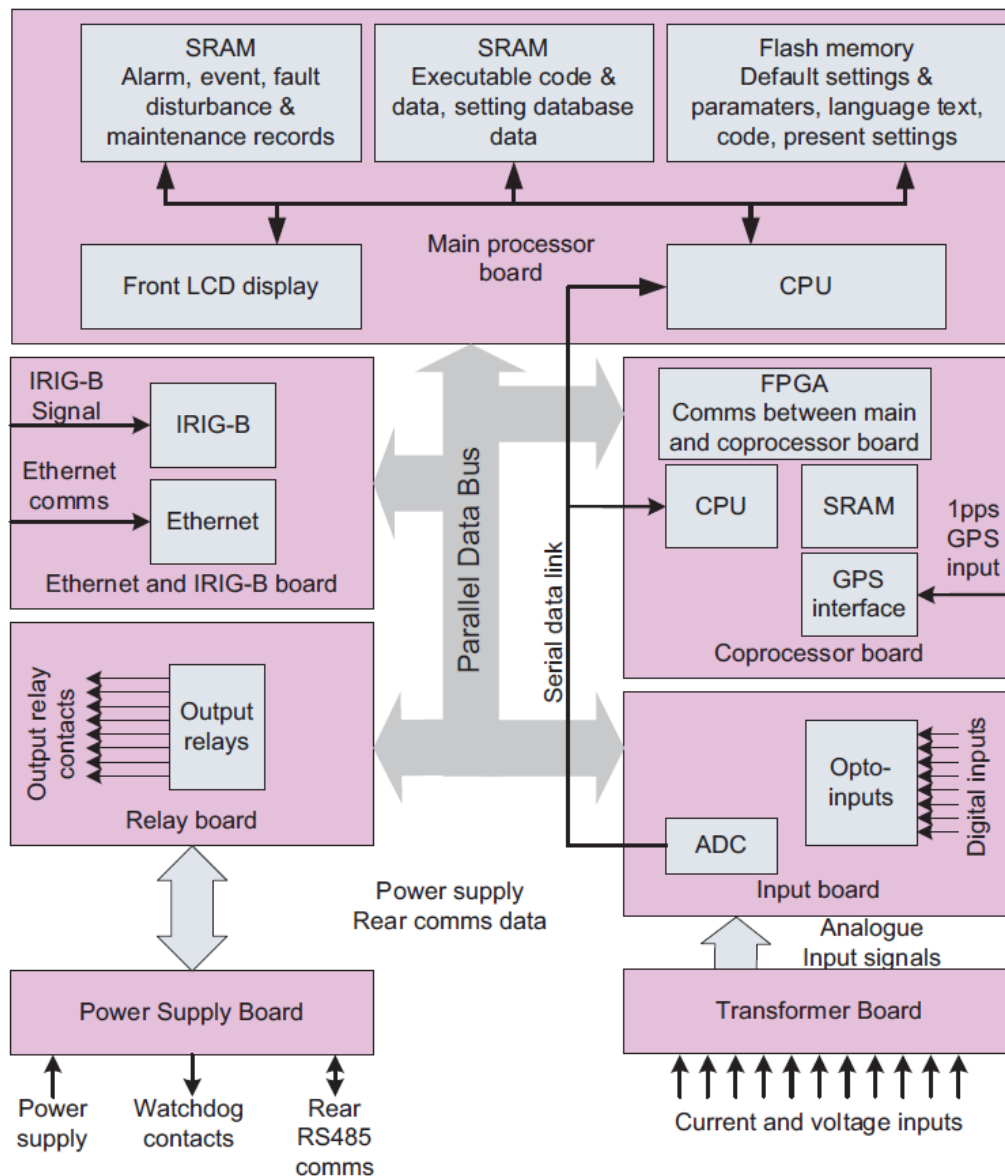
Digitalni releji

Implementacijom mikroprocesora releji dobivaju mnogo širi spektar funkcija koje mogu obavljati, poput brojanja ili diskretne Fourierove transformacije. Uspoređujući ih s elektromehaničkim i statičkim relejima, posjeduju širi raspon postavki, veću preciznost te mogućnost komunikacije. Ograničavajući faktor je malena obradbeno moć 8 ili 16-bitnih mikroprocesora te dodijeljena memorija. Samim tim je ograničen broj uzoraka po ciklusu koji se mogu mjeriti što može usporiti vrijeme reakcije [3].

Numerički releji

Numerički releji su prirodan nastavak razvoja digitalnih releja, poglavito zbog napretka u tehnologiji. Unaprjeđenja releja su u vidu digitalne obrade signala optimirane za rad u stvarnom vremenu te izvršavanje matematičkih algoritama za zaštitne funkcije. Ovakav relej može izvršavati mnoštvo funkcija što dovodi do pitanja pouzdanosti i dostupnosti.

Tipičan numerički relej ima ulaze za napajanje, analogno/digitalni (A/D) pretvornik u koji dolaze analogna mjerenja koja su zatim pretvaraju u digitalni oblik, digitalne ulaze, te Ethernet komunikaciju. Izlazi na vanjske kontakte releja prosljeđuju naredbe procesora. Procesor je centralni dio releja u kojem se vrše sve operacije te donose odluke o aktivaciji izlaza. Unutarnja komunikacija mora raditi velikom brzinom prijenosa te koristiti niske napone pri čemu mora biti imuna na smetnje.



Slika 2.2: Tipična arhitektura numeričkog releja [3].

U mikromrežama se najčešće primjenjuju sljedeće vrste releja, podijeljeni po funkciji [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

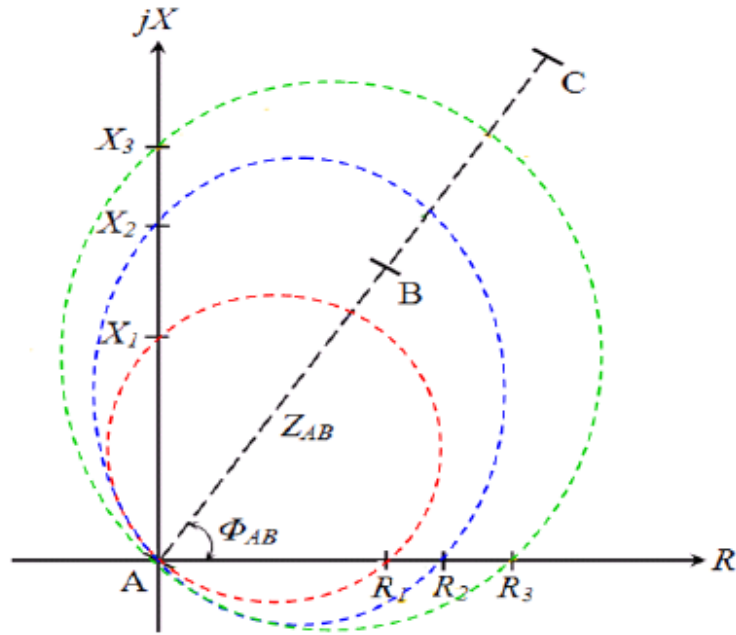
Distantni ili impedancijski relej mjeri impedanciju (omjer napona i struje) mreže. Prilikom normalnog rada impedancija je relativno visoka, dok se pri pojavi visoke struje kvara spušta na jako male vrijednosti. U [7] je predstavljena distantna zaštita za mikromrežu. Korišten je distantni relej s dvozonskom 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 najpoznatiji zaštitni uređaji zbog svoje široke primjene koja uključuje niskonaponske mreže u kućanstvima pa sve do visokonaponskih prijenosnih mreža. Iako su relativno jeftini, njihovo je ponašanje prilično kompleksno.

Osigurač se sastoji od relativno kratkog vodiča čiji je presjek nedovoljan da bi vodio struju velikog iznosa [14]. Prilikom pojave visoke struje kvara kroz osigurač, njegov namjerno oslabljen vodič će se zbog prevelikoga opterećenja rastopiti te prekinuti tok struje u strujnom krugu. Ostatak strujnog kruga na taj način neće biti predugo izložen struji koja bi ga mogla oštetiti. Osnovna podjela rastalnih osigurača je: instalacijski osigurači s vijkom (tip D), osigurači s lamelom (tip B), minijaturni te niskonaponski rastalni osigurači velike prekidne moći. Međutim, nedostatak osigurača je potreba mijenjanja umetka nakon svakog pregorjevanja.

Osigurači se mogu koristiti i u istosmjernim sustavima s niskim induktivitetom (visok di/dt) gdje je vrijeme reakcije minimalno. Glede pouzdanosti i jednostavnosti, osigurači nisu zadovoljavajuće rješenje za zaštitu istosmjernog sustava. Vrijeme reakcije osigurača uglavnom ovisi o impedanciji kvara [15]. 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 smanjena razvojem poluvodičkih osigurača, poznatijih pod nazivom ultra-brzi osigurači.

Osigurači se razlikuju prema karakterističnim svojstvima koja uključuju:

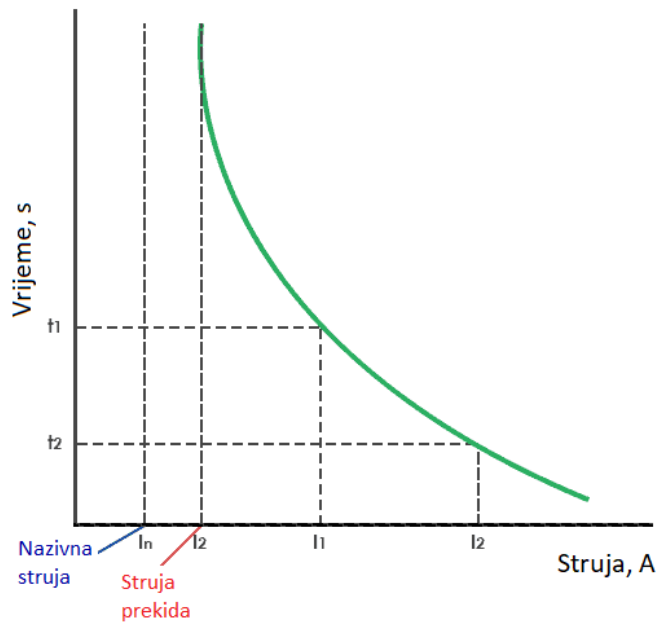
- Nazivnu struju - maksimalan iznos struje koju osigurač vodi bez da se vodič rastopi
- Nazivni napon - maksimalni napon na kojem može biti korišten
- Maksimalnu struju - maksimalna struja kratkog spoja koju može prekinuti
- Vremensko-strujnu karakteristiku - brzina reakcije osigurača pri određenoj struji.

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 [16].

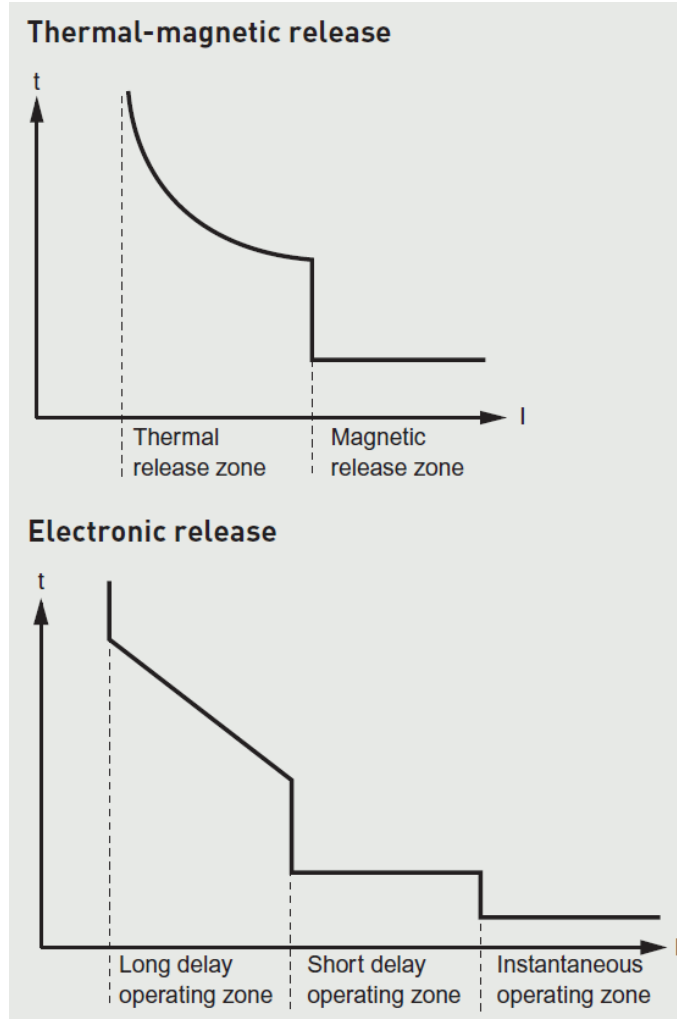
Termalna detekcija radi na principu bimetalne trake koja će se, kad je zagrijana, deformirati te na taj način razdvojiti kontakte. Vrijeme reakcije bimetalne trake je obrnuto proporcionalno



Slika 2.4: Vremensko-strujna karakteristika tipičnog osigurača.

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 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 [16].

Gašenje električnog luka u sustavu istosmjernog napona je teže u odnosu na njegovo gašenje u sustavu izmjeničnog napona. Izmjenični napon će tijekom ciklusa proći kroz nulu dok je istosmjerni napon konstantan što električni luk čini otpornijim na prekid. Stoga istosmjerni prekidači zahtijevaju dodatne mehanizme za produljenje i disipaciju luka. Postoje različite tehnologije istosmjernih prekidača: mehanički (engl. *Mechanical circuit breaker* - MCB), poluvodički (engl. *Solid state circuit breaker* - SSCB), hibridni (engl. *Hybrid circuit breaker* - HCB) te *Z-source* (ZSCB) [17].

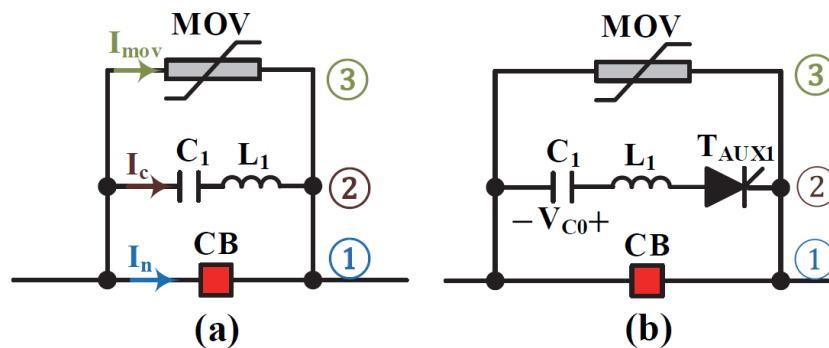
Mehanički istosmjerni prekidači

Uz osigurače, mehanički prekidači (MCB) su konvencionalni zaštitni uređaji za istosmjerne mreže niskog napona [18]. Prilikom otvaranja kontakata prekidača, prirodni prolazak izmjeničnog napona kroz nulu čini mehaničke prekidače pogodnima za primjenu u izmjeničnim sustavima. Međutim, kako je prije navedeno, istosmjerni električni luk je otporniji na prekid. Istosmjerni mehanički prekidači su zbog toga prošireni pasivnim i aktivnim rezonantnim krugom [17].

Pasivni komutacijski krug koji se sastoji od ispražnjenog kondenzatora u seriji sa zavojnicom (Slika 2.6). Prilikom normalnog rada struja teče preko prekidača čiji je otpor vrlo nizak. Pojavom kvara, odnosno visoke struje, kontakti prekidača se otvaraju te nastaje električni luk. Zbog napona luka struja počinje teći komutacijskim krugom, u kojem struja ima oscilatorno ponašanje. Ako su oscilacije dovoljno velike, struja kroz prekidač će prisilno biti provedena kroz nulu. Prvi prolazak kroz nulu bi trebao biti dovoljan da se luk ugasi. Zarobljena energija će se tada potrošiti na varistoru (engl. *Metal oxide varistor* - MOV).

Aktivni komutacijski krug u seriji sadrži nabijeni kondenzator, zavojnicu te tiristor. Prilikom pojave kvara kondenzator će trenutačno pustiti negativnu struju jednaku struji kvara kako bi stvorio prolazak struje kroz nulu.

Prednosti MCB-a su nizak gubitak snage te cijena, no bitni nedostaci su vrijeme odaziva te ograničen iznos struje koju može prekinuti [17].

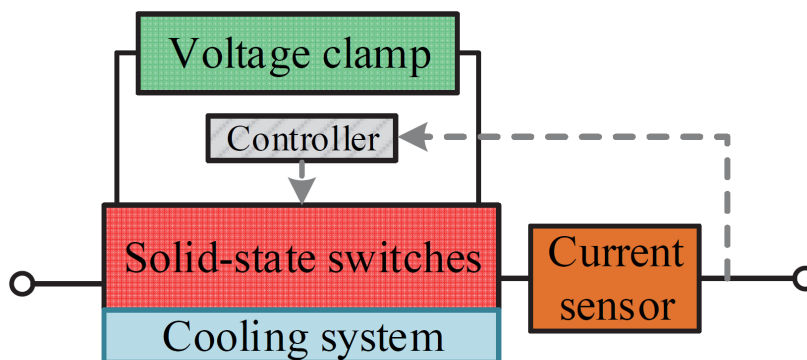


Slika 2.6: Mehanički istosmjerni prekidač s (a) pasivnim komutacijskim krugom, (b) aktivnim komutacijskim krugom [17].

Poluvodički istosmjerni prekidači

Primjena poluvodičke tehnologije za prekidače rezultirala je njihovom nadmoći nad elektromehaničkim i magnetskim prethodnicima. Rizici pojave električnog luka i mehaničkog trošenja su eliminirani, čime je produljen životni vijek prekidača. Visoke frekvencije uklapanja su također

ubrzale reakciju sa milisekundi na mikrosekunde [19]. Osnovni dijelovi ovog prekidača su: strujni senzor (engl. *Current sensor*), poluvodičke sklopke (engl. *Solid-state switches*) te modul za njihovo upravljanje (engl. *Controller*), graničnik napona (engl. *Voltage clamp*) te hladnjak (engl. *Cooling system*) (Slika 2.7).



Slika 2.7: Tipični poluvodički prekidač [17].

Izbor poluvodičke sklopke ovisi o njenim karakteristikama a neke od najvažnijih su: frekvencija uklapanja/isklapanja, upravljivost, sposobnost blokiranja visokog napona, nazivna snaga te gubitci vođenja.

Najčešće korištene poluvodičke sklopke su:

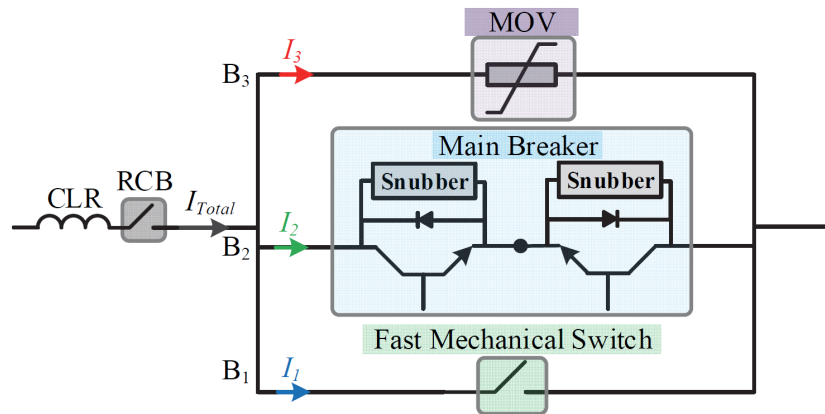
- IGBT (engl. *Insulated-gate Bipolar Transistor*)
- GTO (engl. *Gate-off Thyristor*)
- IGCT (engl. *Integrated Gate-Commutated Thyristor*)
- Tiristor (engl. *Thyristor*).

Tiristor ima najniže gubitke vođenja u odnosu na navedene sklopke što uvelike smanjuje potrebnu veličinu hladnjaka te općenito dugoročnu cijenu implementacije. Velika nazivna snaga omogućuje primjenu tiristora u istosmjernim prijenosnim mrežama. Međutim, tiristor nije potpuno upravljiv što onemogućuje aktivno gašenje struje. Ostale sklopke imaju mogućnost prisilne komutacije struje te mogu raditi na frekvenciji od 5 do 20 kHz. Nedostatak ostalih sklopki je relativno velik gubitak vođenja, posebno IGBT-a [20].

Hibridni istosmjerni prekidači

Hibridni prekidači su nastali kombinacijom MCB-a i SSCB-a kako bi iskoristili prednosti obadviju tehnologija. Rezultat je brzi prekidač s niskim gubitcima vođenja te bez pojave električnog luka na mehaničkim kontaktima.

Tipični hibridni prekidač ima tri glavna dijela: mehaničku sklopku (engl. *Mechanical Switch*), glavni prekidač (SSCB) (engl. *Main Breaker*) i varistor (Slika 2.8). Tijekom normalnog načina rada struja prolazi kroz mehaničku sklopku. Detekcijom kvara, mehanička sklopka otvara svoje kontakte te šalje signal glavnom prekidaču. Napon luka raste dok ne dosegne vrijednost pada napona glavnog prekidača. Tada će struja prirodno komutirati sa mehaničke sklopke na glavni prekidač. Prekidač nastavlja voditi sve dok sklopka ne uspije blokirati puni napon. Naposljetku struja komutira na varistor sve dok ne iščezne. Za visokonaponske primjene je u seriju s mehaničkom sklopkom potrebno dodati komutacijski krug. Razlog je nemogućnost prirodne komutacije struje sa sklopke na glavni prekidač [21].

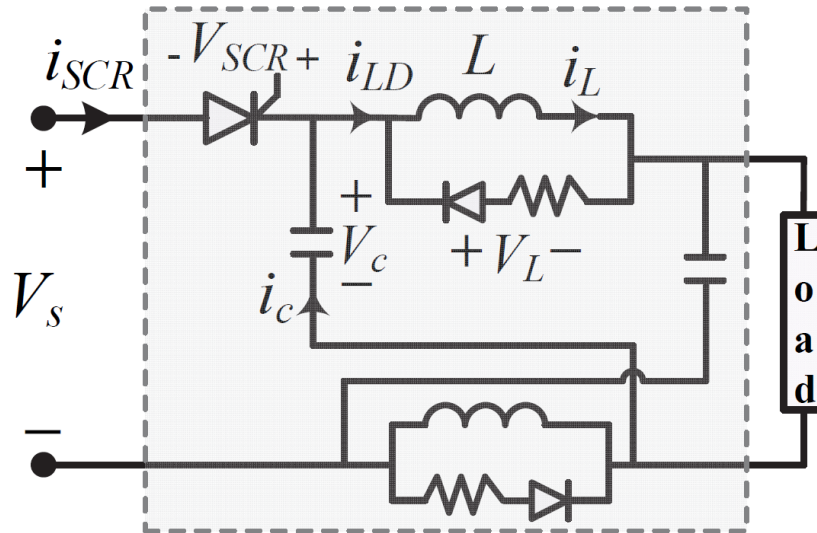


Slika 2.8: Tipični hibridni prekidač [17].

Z-source istosmjerni prekidači

Konvencionalni SSCB-i koriste pomoćne krugove kako bi struju sveli na nulu. Međutim, pomoćni krugovi moraju biti aktivno spremni reverzno polarizirati glavni prekidač prije nego li struja prijeđe iznos koji prekidač može prekinuti. Vremenska preciznost je stoga kritičan problem SSCB-ova. *Z-source* prekidači umanjuju ovaj problem. Još neke od prednosti su mu prirodna komutacija, automatsko odvajanje tereta, jednostavan upravljački krug te ograničavanje kvara [17].

Princip rada ZSCB-a je u preusmjeravanju dijela visoke struje kvara kroz kondenzatore da bi se struja SCR-a (engl. *Silicon-Controlled Rectifier*) približila nuli te da bi na taj način komutirala prirodno.



Slika 2.9: Tipični *Z-source* prekidač [17].

Tablica 2.1: Zaštitni uređaji korišteni u istosmjernim mikromrežama [17].

| Zaštitni uređaj | Nedostatci | Prednosti |
|-----------------------------|---|---|
| Osigurač | <ul style="list-style-type: none"> Nemogućnost razlikovanja tranzijenta i kvara Zamjena jezgre nakon uspješnog djelovanja | <ul style="list-style-type: none"> Niska cijena Jednostavna struktura |
| Mehanički prekidač | <ul style="list-style-type: none"> Dugo vrijeme djelovanja Ograničena mogućnost prekidanja struje | <ul style="list-style-type: none"> Relativno jeftin Nizak gubitak vođenja |
| Poluvodički prekidač | <ul style="list-style-type: none"> Visoka cijena Visoki gubici vođenja Nekompaktan zbog veličine hladnjaka | <ul style="list-style-type: none"> Brz odziv (<100 ms) Dug životni vijek |
| Hibridni prekidač | <ul style="list-style-type: none"> Vrlo visoka cijena | <ul style="list-style-type: none"> Nizak gubitak vođenja Brz odziv Nema pojave luka na mehaničkim kontaktima |
| Z-source prekidač | <ul style="list-style-type: none"> Potrebna visoka tranzijenta struja za aktivaciju Nemogućnost odgođene zaštite | <ul style="list-style-type: none"> Prirodna komutacija za kritične kvarove Niža cijena od poluvodičkog prekidača |

3. Faktori sa značajnim utjecajem na zaštitu u mikromrežama

Kvarovi u mikromreži se najčešće događaju na sabirnici ili kabelima/vodovima koji spajaju distribuirane izvore energije (DIE), pretvarače, ispravljače, izmjenjivače te spremnike energije. Svaki od navedenih dijelova mikromreže dolazi u različitim izvedbama ovisno o primjeni odnosno u vrsti izvora. DIE mogu biti rotacijski (vjetroatregat) ili statički (solarni paneli), a pretvarači različitih topologija ovisno o zadaći koju obavljaju. Nadalje, doprinos struji kvara će također ovisiti o načinu na koji je DIE spojen na mrežu (direktno ili posredstvom pretvarača). Uzemljenje svojom izvedbom utječe na razine struja prilikom kratkog spoja sa zemljom. Upravljačka struktura također može utjecati na razine struje kvara ako u svojoj strukturi sadržava dio koji ograničava zadane vrijednosti struje.

3.1 Vrsta distribuiranog izvora energije

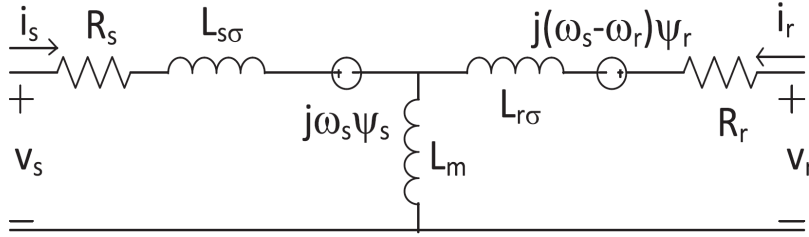
Asinkroni generator

Asinkroni generatori se uobičajeno koriste u vjetroatregatima čiji udio u proizvodnji energije može biti značajan [22]. Doprinos struji kvara ovisi o više faktora, uključujući električne parametre stroja te upravljanje [23].

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 [23]:

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

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.



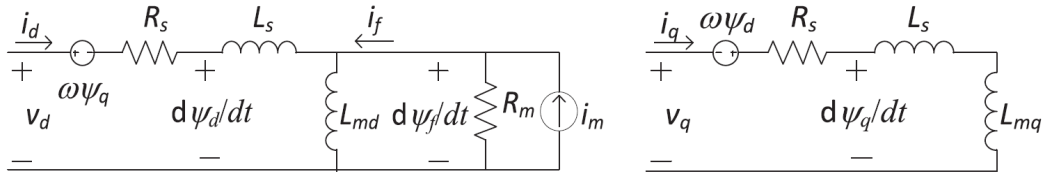
Slika 3.1: Nadomjesna shema asinkronog stroja [24].

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 [24] 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.



Slika 3.2: Nadomjesna shema sinkronog stroja u $d - q$ referentnom sustavu [24].

Solarni panel

Energija koju proizvede solarni panel direktno ovisi o osunčanosti i temperaturi. Jednadžba koja povezuje struju i napon solarnog panela glasi [24]:

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

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 [25]. Struja kratkog spoja baterije se može izraziti kao [17]:

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

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 [26]. 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 [24]. Izraz za struju kratkog spoja glasi:

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

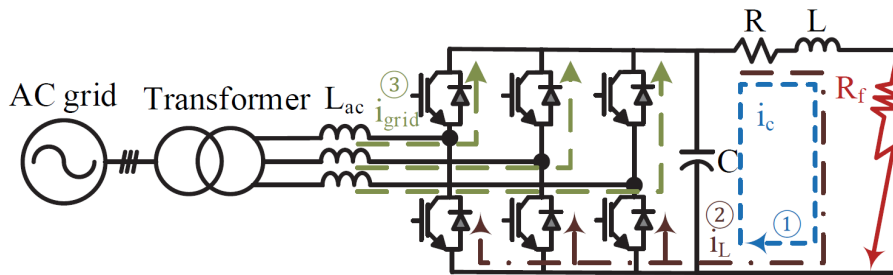
gdje su R_{Cap} i C_{eq} ekvivalentni serijski otpor i kapacitet, a V_{Cap} napon superkondenzatora.

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 [17].

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:

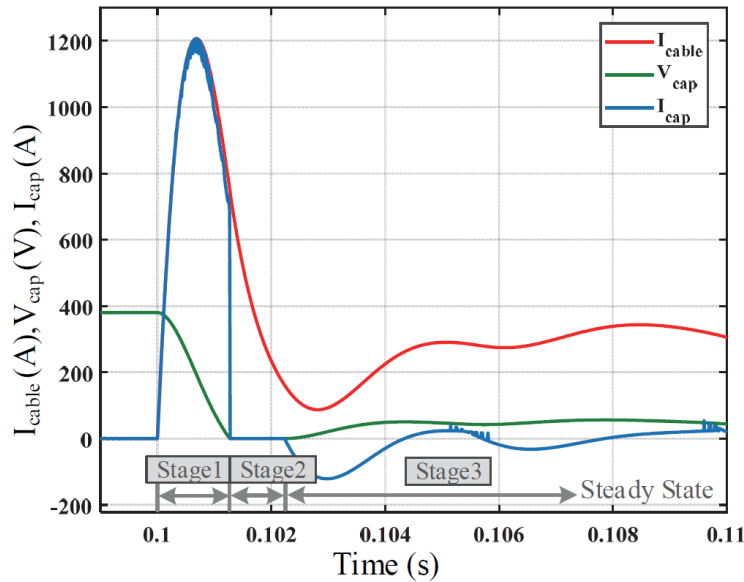
$$i_{ga} = I_g \sin(\omega_s t + \alpha - \phi) + I_{gn} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.13)$$

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

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

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

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

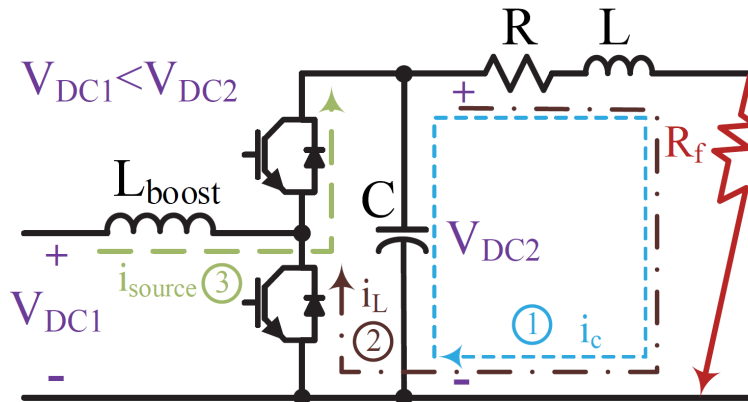


Slika 3.4: Struja i napon kondenzatora te struja kabela prilikom pojave kvara [17].

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.

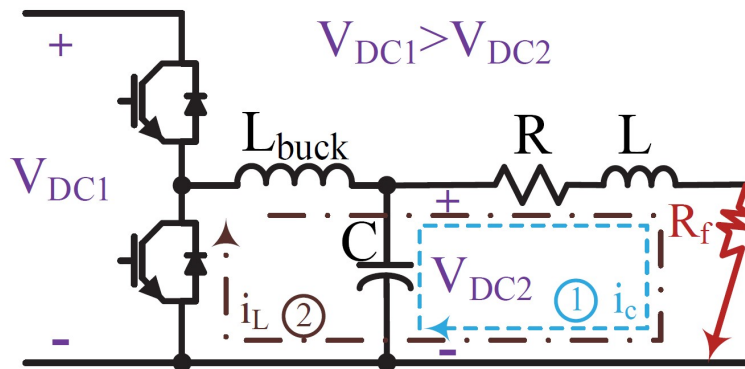
Na slici 3.5 je prikazan tradicionalni neizolirani uzlazni pretvarač s kratkospojenim izlaznim stezaljkama. Faze struje kvara su uglavnom iste kao kod pretvarača s utisnutim naponom, a uključuju pražnjenje kondenzatora, vođenje dioda te naposljetku doprinos struje izvora kvara. Strujne petlje po fazama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



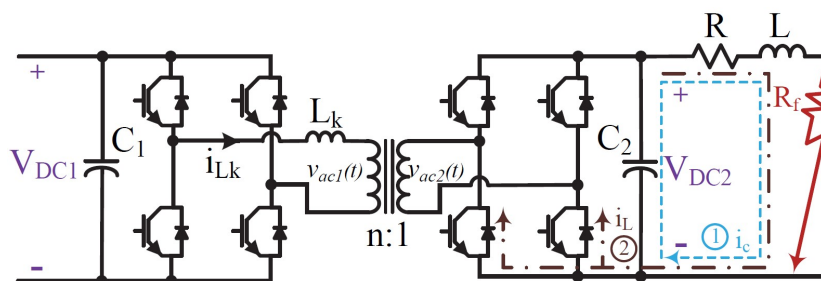
Slika 3.5: Uzlazni istosmjerni pretvarač [17].

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 [27].



Slika 3.6: Silazni istosmjerni pretvarač [17].



Slika 3.7: Pretvarač s dvostrukim mosnim spojem [17].

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 [28].

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

Struje spoja linije sa zemljom u ovakvim konfiguracijama neće uzrokovati problematične struje kratkog spoja. Prekidi rada zbog kvarova stoga neće biti česti, odnosno otklanjanje kvarova može biti odgođeno. Navedena svojstva daju prednost u primjenama gdje je pouzdanost opskrbe prioritet. Međutim, osim problema prenapona, lociranje mjesta kvara je otežano. Nadalje, strategije zaštite bazirane na mjerenjima napona nisu selektivna [29]. Još jedan od nedostataka je mogućnost nastanka kvarova između linija iz kvara linija-zemlja. Korištenje ove konfiguracije uzemljenja se zbog navedenih razloga, ne preporučuje. Iznimka je prilagodba pri spajanju na distributivnu mrežu koja ima navedeno uzemljenje [28].

Konfiguracija s jednim zemljospojem

Konfiguracija s jednim zemljospojem nema vlastito uzemljenje već je spojena na distribucijsku mrežu iste konfiguracije uzemljenja. Ovakva mikromreža neće biti podložna prenaponima ili otežanoj detekciji lokacije kvara kao što je to bio slučaj prije opisane konfiguracije. Međutim, prelaskom mikromreže u otočni način rada postaje neuzemljena. Djelomično rješenje problema je trenutno uzemljenje u jednoj točki nakon promjene režima rada, no i tad će biti podložna prenaponu prije nego li uređaj za uzemljenje odradi svoju zadaću. Stoga, niti ova konfiguracija nije preporučena [28].

Četverožična konfiguracija s jednim zemljospojem

Četverožična konfiguracija osigurava uzemljenje i nakon prelaska mikromreže u otočni način rada. Problem prenapona i pronalaska lokacije kvara je gotovo eliminiran [30]. Eventualna pojava porasta napona neutralne točke u slučaju lošeg uzemljenja može predstavljati problem.

Četverožična konfiguracija s više zemljospojeva

Ovakva konfiguracija ima mnogostruke prednosti: poboljšanje reakcije na tranzijente napona, optimirani zahtjevi veličine naponskih zaštitnih uređaja, manja nulta impedancija u odnosu na jednožični spoj, unaprijeđena sigurnost te mogućnost napajanja jednofaznog tereta [28]. Nedostaci su povišenje potencijala zemlje, visoke struje kratkog spoja sa zemljom, te otežana koordinacija zaštite. Kvarovi bi u ovakvim sustavima trebali biti što prije detektirani kako bi se spriječio nastanak štete i propad napona [31]. Neki od navedenih problema mogu biti riješeni uzemljenjem preko impedancija ili korištenjem naprednijih strategija zaštite. Ovakva metoda uzemljenja je prikladna za većinu mikromreža. Naravno, prilikom izbora konfiguracije potrebno je uzeti u obzir ostale faktore poput zaštite, pouzdanosti, kvalitete električne energije te cijene.

3.3.2 Istosmjjerne 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 [32].

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 [33]. 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 tirstora. Uzemljenje preko diode i tirstora je relativno nedavno predloženo [32]. 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. Tiris-tor pak kontrolira spoj negativnog pola i zemlje. Signal za okidanje tirstora je poslan kad napon negativnog pola dosegne određenu vrijednost.

Tablica 3.1: Usporedba sustava uzemljenja [17].

| 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:

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

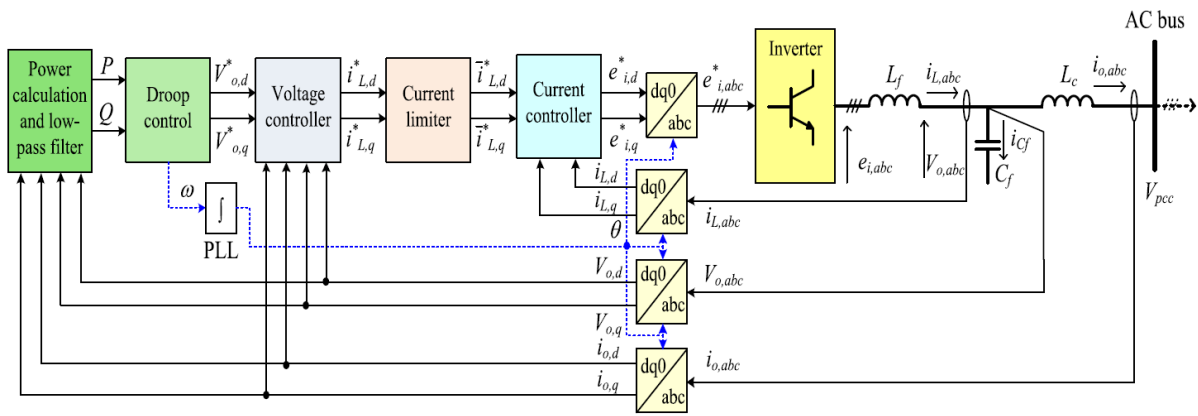
$$V_{o,abc,ref} = V_{o,abc}^* - n(Q - Q^*), \quad (3.20)$$

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 [24].

4. Koordinacija i metode zaštite mikromreže

4.1 Koordinacija zaštite u otočnom načinu rada

Primarna zaštita prva reagira na kvar u svojoj blizini. Rezervna zaštita se mora aktivirati u slučaju da primarna ne otkloni kvar. Koordinacija zaštite je stoga bitan faktor pri projektiranju zaštite sustava. Najčešće se izvodi vremenskom koordinacijom zaštitnih uređaja ili je zasnovana na komunikaciji, no postoje i ostale metode koje ne koriste vremensku niti komunikacijsku koordinaciju [34].

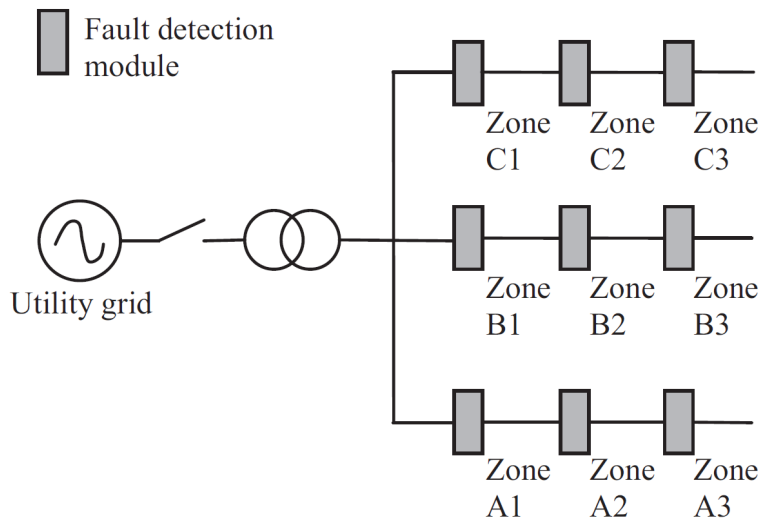
Vremensko stupnjevanje

Ako primarna zaštita ne otkloni kvar, vremenski koordinirana zaštita će pokušati to učiniti nakon određenog vremenskog kašnjenja. u [35] je razvijena koordinacijska strategija za mikromrežu s velikim brojem DIE spojenih posredstvom pretvarača. Slika 4.1 prikazuje radijalnu mikromrežu s više zaštitnih zona i modula za detekciju (označeni sivim pravokutnicima). Za detekciju i otklanjanje kvara je korištena nadstrujna zaštita. Svaki od nadstrujnih releja pojedine zone ima određeno kašnjenje u odnosu na podređenu zonu. U slučaju da kvar nije detektiran unutar određenog vremena, mikromreža će se odvojiti od distributivne. Tada će se pomoću mjerenja struje i napona modula za detekciju odrediti mjesto kvara. Zaštita bazirana na mikroprocesorskom releju za mikromrežu u otočnom i mrežnom načinu rada je predložena u [36]. Zaštita je koordinirana vremenskim stupnjevanjem a sadrži module za određivanje smjera struje kako bi se olakšalo određivanje lokacije kvara. Metoda ne koristi komunikaciju niti adaptivne zaštitne uređaje već je prilagođena različitim strujama i tipovima kvara. Međutim, zbog vremenskog stupnjevanja je vrijeme otklanjanja kvara relativno dugo.

Komunikacija

Koordinacija zaštite temeljena na komunikaciji koristi centralnu upravljačku jedinicu na koju su spojeni mjerni i zaštitni uređaji. Centralna jedinica analizira ulazne mjerne signale struje i napona te šalje signale za aktivaciju prekidača.

Autori su u [10] predložili zaštitnu shemu za spoj jedne faze sa zemljom koristeći digitalne releje i komunikaciju. Primarna zaštita je diferencijalna s uređajima za zaštitu na krajevima



Slika 4.1: Mikromreža s više zaštitnih zona i modula za detekciju [35].

vodova. Ako primarna zaštita ne otkloni kvar, signal je poslan susjednom releju na istoj sabirnici nakon određenog vremenskog perioda. U slučaju zakazivanja rezervne zaštite ili prekida u komunikaciji releji će za zaštitu koristiti metodu komparativnih napona. U otočnom načinu rada zaštita je sposobna detektirati kvarove visoke impedancije. Jako je pouzdana zbog petljaste konfiguracije i mogućnosti nastavka rada i prilikom prekida komunikacije. Međutim, postavljanje uređaja na svaki kraj voda je skupo, a ni utjecaj razlike mjerenja nije ispitan.

U [37] je predložena shema za radijalnu mikromrežu koja koristi integriranu zaštitnu i kontrolnu jedinicu. Jedinica je na mjerne i zaštitne uređaje spojena koristeći optički kabel. Za zaštitu vodova i sabirnice se koristi nadstrujna zaštitna metoda. Ova shema osigurava brzo otklanjanje kvarova, međutim slučaj prekida komunikacije nije analiziran.

Diferencijalna shema koja koristi komunikaciju za koordinaciju je predložena u [38]. Mikromreža bazirana na solarnim panelima je šticeana od trofaznih kvarova. Uređaji su s centralnim kontrolnim centrom povezani bežičnom mobilnom mrežom. Rezervna zaštita koristi mjerenja struje i globalni sustav za pozicioniranje (GPS) za lociranje i izoliranje kvara. Prekidi komunikacije nisu ispitani.

U [39] je implementirana diferencijalna zaštita potpomognuta komunikacijom na svakoj spojnoj točki mikromreže. Shema radi za kvarove unutar i izvan šticeane zone te je se prilagođava konfiguraciji mikromreže. Također, vrlo se precizno može odrediti mjesto kvara u velikim mikromrežama s dovoljno velikim padom napona na vodovima. Međutim, ne detektira kvarove visoke impedancije niti pruža rezervnu zaštitu susjednim vodovima. Kompleksnost proračuna za ovu metodu je visoka.

Strategija koja se može nositi s različitim strujama kvara, tipovima kvara, radnim stanjima mikromreže kao i s različitim tipovima DIE [40]. U predloženoj zaštitnoj strategiji glavni

zaštitni modul je spojen s modulima na sekcijama mikromreže. Prilikom pojave kvara signal za reakciju je poslan najbližem prekidaču, a kao rezervna zaštita se isti signal šalje na susjedne prekidače. Vremensko stupnjevanje je također implementirano kao dodatna sigurnost za slučaj prekida komunikacije.

Ostale metode

Primarna i rezervna zaštita predložena u [41] ne koristi komunikaciju niti vremensko stupnjevanje. Zaštitna strategija za zaštitu od spoja faze sa zemljom koristi diferencijalnu metodu za zone iznad, a detekciju pomoću komponenti nultog sustava struje za zone ispod. Za detekciju kvarova između linija je korišten inverzni sustav. Rezervna zaštita za oba slučaja kvara je I^2t . Za mikromrežu u otočnom radu je implementirana podnaponska zaštita. Trofazni kvarovi nisu razmatrani.

U [42] je predložena zaštita za niskonaponsku istosmjernu mikromrežu. Primarna zaštita pretvarača koristi derivaciju struje za detekciju. Zaštita istosmjernog međukruga je podnaponska, a baterije nadstrujna. Za zaštitu vodova od spoja sa zemljom mjere se struje uzemljenja baterije i pretvarača te uspoređuju s predodređenim vrijednostima. Rezervna zaštita su prekidači blizu pretvarača te osigurači kod baterije. Osigurači na izmjeničnoj strani pretvarača također pružaju rezervnu zaštitu pretvaraču. Kvarovi visokog napona se teško detektiraju zbog niskih struja kroz uzemljenje.

4.2 Metode zaštite

Impedancija je u istosmjernim mrežama vrlo niska što za posljedicu ima visoku devijaciju struje koja može doseći nekoliko stotina ampera u nekoliko milisekundi [17]. U odnosu na zaštitu izmjeničnog sustava, zaštita istosmjernog sustava zahtijeva bržu reakciju koja se ostvaruje sensorima s visokom frekvencijom uzorkovanja te brzom komunikacijom. Česte metode za zaštitu koje se koriste su: nadstrujna, brzina promjene struje, usmjerena nadstrujna, distantna, diferencijalna te praćenje harmonika. Moderne zaštite se temelje na transformacijama signala kako bi se dobile njegove značajke. Metode se evaluiraju prema navedenim karakteristikama:

- Brzina: Zaštitna metoda mora detektirati kvar u što bržem vremenu.
- Selektivnost: Metoda mora identificirati dio mreže pod kvarom, te ga razlikovati od kvara izvan zone koju štiti.
- Osjetljivost: Svi kvarovi, uključujući i kvarove visoke impedancije, moraju biti uspješno detektirani.
- Pouzdanost: Kvar mora biti izoliran i u slučaju propusta primarne zaštite ili prekida komunikacije.

Nadstrujna zaštita

Nadstrujna zaštita se aktivira kad razina struje dosegne određenu vrijednost. Da bi ovakva zaštita zadovoljavajuće radila nadstrujni releji moraju biti pravilno koordinirani. Pod pojmom koordinacije se podrazumijeva podešavanje vremensko-strujne karakteristike pojedinog releja. Relej koji je bliže potencijalnom mjestu kvara treba imati brže vrijeme reakcije. U [42] je izvedena nadstrujna zaštita istosmjerne mikromreže, međutim pokazuje se da bi za kompleksniju mikromrežu vrijeme otklanjanja kvara bilo produljeno te da bi prevelik dio mikromreže ostao bez napajanja. Jedno od rješenja je korištenje komunikacije između nadstrujnih releja kako bi se osigurala selektivnost [43]. Još jedan od nedostataka je

Praćenje brzine promjene struje

Prilikom pojave kvara struja naglo poraste. Ovakva detekcija kvara može biti jako brza, međutim odabir praga reakcije može biti problematičan. Naime, brzina promjene struje će ovisiti o duljini i opterećenju kabela te impedanciji kvara. Da bi se ovaj problem riješio predloženo je praćenje prve i druge derivacije struje kvara [44]. Također su potrebni senzori s visokom frekvencijom uzorkovanja te filtriranje signala.

Usmjerena nadstrujna zaštita

Poznavanjem smjera struje se može povećati selektivnost zaštite u odnosu na običnu nadstrujnu zaštitu. U [45] je predložena ova metoda zaštite u istosmjernom sustavu, bazirana na komunikaciji. Poznavajući smjer i iznos struja u svim granama, određivanje mjesta kvara je olakšano.

Distantna zaštita

Distantna zaštita se temelji na mjerenju impedancije kabela. U normalnom radu, impedancija je relativno visoka, dok prilikom pojave kvara jako pada. U [46] su mjereni napon i struja, a lokacija kvara je dobivena nakon više iteracija proračuna. Nedostatak metode je nemogućnost detekcije prilikom kvara visoke impedancije te prilikom pojave kvara na kratkim segmentima kabela od mjesta mjerenja do mjesta kvara.

Diferencijalna zaštita

Diferencijalna zaštita mjeri struju na obje strane određenog dijela mreže i uspoređuje vrijednosti. U [47] je analiziran kvar istosmjernog sustava s visokim udjelom pretvarača kako bi se ispitala tranzijentna stanja sustava. Poglavitito je analiziran utjecaj brze promjene struje na zaštitu. Analiza je kvantificirala potrebne parametre za brzu i preciznu zaštitu, što je omogućilo dizajniranje zaštitnog uređaja.

Tablica 4.1: Usporedba osnovnih zaštitnih metoda [17].

| | Nadstrujna | Brzina promjene struje | Nadstrujna usmjerena | Distantna | Diferencijalna |
|---------------------|----------------|------------------------|----------------------|-----------------|----------------|
| Brzina | Umjereno | Visoko | Umjereno | Sporo | Visoko |
| Selektivnost | Umjereno | Nisko | Visoko | Visoko | Visoko |
| Osjetljivost | Nisko/Umjereno | Visoko | Nisko/Umjereno | Nisko/Umjereno | Visoko |
| Pouzdanost | Nisko/Umjereno | Nisko/Umjereno | Umjereno/Visoko | Umjereno/Visoko | Nisko |
| Cijena | Nisko | Nisko | Umjereno | Umjereno | Visoko |

Praćenje harmonika

Kvarovi su u ovoj metodi detektirani praćenjem faktora harmoničke distorzije (engl. *Total harmonic distortion* - THD). U većini studija autori prate THD napona na pretvaraču koji spaja DIE s mrežom. Prilikom normalnog rada THD napona je približno nula, dok prilikom kvara raste [48]. Još jedna od varijanti praćenja harmonika je predstavljena u [49]. Prati se nulta komponenta struje u odnosu na njen peti harmonik. Međutim, pošto se koristi nulta komponenta struje detektabilni su samo kvarovi linija-zemlja.

Moderne metode

Transformacija zasnovana na valićima (engl. *Wavelet transform* - WT) izlučuje značajke iz tranzijentnih stanja signala. WT podijeli signal u seriju "valića" od kojih svaki odgovara signalu vremenske domene koji pokriva specifičan frekvencijski pojas. Za dekompoziciju se koriste brzi algoritmi. Primjer korištenja WT-a za detekciju poremećaja DIE je predstavljen u [50].

S-transformacija je vremensko-frekvencijska distribucija nastala kao hibridna metoda vremenski ograničene Fourierove transformacije (engl. *Short Time Fourier Transform* - STFT) i WT-a. Ova transformacija prebacuje signal iz vremenske u frekvencijsku domenu koristeći frekvencijski ovisan Gaussov prozor (funkciju). Prednost nad WT-om je što S-transformacija, zbog povezanosti s Fourierovom transformacijom, može prikazati frekvencijski spektar signala.

Navedene metode se mogu koristiti zajedno s inteligentnim klasifikatorima za detekciju kvarova. U [51] je korišten WT zajedno sa stablom odluke (engl. *Decision tree* - DT). Inteligentni klasifikator će na temelju značajki signala koje mu preda neka od transformacija pronaći "skriveno" poveznice.

5. Zaključna razmatranja

Odabir zaštitnih uređaja, metode zaštite te načina koordinacije zaštite nije trivijalno. Primarni faktor koji utječe na sam smjer odabira navedenih zahtjeva je vrsta električnog sustava. Izmjenični sustav zahtijeva manje napredne zaštitne uređaje od istosmjernog u kojem je problem pojave električnog luka istaknut. Sami istosmjerni uređaji zahtijevaju pomoćne krugove za gašenje luka koji su bazirani na pasivnim komponentama (zavojnice, kondenzatori) ili na poluvodičkim sklopkama. Distribuirani izvor energije različito doprinose struji kvara ovisno o tipu izvora i načinu na koji su spojeni na mrežu (direktno ili posredstvom pretvarača). Pretvarači se razlikuju po topologijama, pa neke vrste prirodno ograničavaju struju kratkog spoja. Uzemljenje će utjecati na razine struja kvara pri spoju sa zemljom, na izolaciju i na samu sigurnost ljudi i opreme. Upravljačka struktura sustava može ograničavati struje kvara upravljanjem pretvarača. Navedeni faktori utječu na odabir metode zaštite, koja može biti temeljena na već isprobanim metodama (npr. nadstrujna) ili na modernijim poput S-transformacije. Koordinacija zaštite mora uzeti u obzir sve prije navedeno kako bi se uspješno pružila rezervna zaštita svim dijelovima sustava. Osim pouzdanosti, sustav koordinacije zaštite bi trebao biti ekonomski isplativ i što manje kompleksan.

Pošto je sigurnost uvijek najbitniji faktor predlaže se korištenje koordinacije bazirane na komunikaciji s rezervnom zaštitom koja će pružati zaštitu sustavu i u slučaju smetnji ili prekida komunikacije. Ova je metoda provjerena, a brojni radovi raznih autora daju naslutiti da će se u budućnosti nastaviti razvijati.

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] A. Wright, P.G. Newbery, and Institution of Electrical Engineers. *Electric Fuses*. IEE power and energy series. Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [15] J. P. Brozek. Dc overcurrent protection-where we stand. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29(5):1029–1032, 1993.
- [16] Legrand. *Breaking and protection devices*. Power guide. 2009.
- [17] 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.
- [18] R. Cuzner, D. MacFarlin, D. Clinger, M. Rumney, and G. Castles. Circuit breaker protection considerations in power converter-fed dc systems. In *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, pages 360–367, 2009.
- [19] Kovacevic B. *Solid state circuit breakers*. Appl. Note 5. 1997.
- [20] C. Meyer, S. Schroder, and R. W. De Doncker. Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(5):1333–1340, 2004.
- [21] W. Wen, Y. Huang, Y. Sun, J. Wu, M. Al-Dweikat, and W. Liu. Research on current commutation measures for hybrid dc circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(4):1456–1463, 2016.
- [22] Juan Gómez, Sebastian Nesci, and Franco Barbero. Short-circuit currents supplied for induction generators. pages 1 – 4, 07 2009.
- [23] Ahmed Elnaggar. *Standard Calculation of Fault Current Contribution of Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Turbine*, pages 277–301. 07 2016.
- [24] 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.
- [25] Deepak Chandran and Anwar Master. Microgrid battery energy storage systems (bess) approach. 05 2018.

- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] J. Mohammadi, F. Badrkhani Ajaei, and G. Stevens. Grounding the ac microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1):98–105, 2019.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Sachit A. Gopalan, Victor Sreeram, and Herbert H.C. Iu. A review of coordination strategies and protection schemes for microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32:222 – 228, 2014.
- [35] T. Loix, T. Wijnhoven, and G. Deconinck. Protection of microgrids with a high penetration of inverter-coupled energy sources. In *2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System*, pages 1–6, 2009.
- [36] M. A. Zamani, T. S. Sidhu, and A. Yazdani. A protection strategy and microprocessor-based relay for low-voltage microgrids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(3):1873–1883, 2011.

- [37] Bin Li, Yongli Li, Zhiqian Bo, and A. Klimek. Design of protection and control scheme for microgrid systems. pages 1 – 5, 10 2009.
- [38] M. P. Nthontho, S. P. Chowdhury, S. Winberg, and S. Chowdhury. Protection of domestic solar photovoltaic based microgrid. In *11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)*, pages 1–6, 2012.
- [39] Xinyao Li, Adam Dyško, and G.M. Burt. Application of communication based distribution protection schemes in islanded systems. 01 2010.
- [40] M. A. Zamani, A. Yazdani, and T. S. Sidhu. A communication-assisted protection strategy for inverter-based medium-voltage microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4):2088–2099, 2012.
- [41] H. Nikkhajoei and R. H. Lasseter. Microgrid protection. In *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pages 1–6, 2007.
- [42] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino. Protection of low-voltage dc microgrids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3):1045–1053, 2009.
- [43] M. Monadi, C. Koch-Ciobotaru, A. Luna, J. I. Candela, and P. Rodriguez. A protection strategy for fault detection and location for multi-terminal mvdc distribution systems with renewable energy systems. In *2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, pages 496–501, 2014.
- [44] A. Meghwani, S. C. Srivastava, and S. Chakrabarti. A non-unit protection scheme for dc microgrid based on local measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1):172–181, 2017.
- [45] A. A. S. Emhemed, K. Fong, S. Fletcher, and G. M. Burt. Validation of fast and selective protection scheme for an lvdc distribution network. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(3):1432–1440, 2017.
- [46] J. Yang, J. E. Fletcher, and J. O’Reilly. Short-circuit and ground fault analyses and location in vsc-based dc network cables. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(10):3827–3837, 2012.
- [47] S. D. A. Fletcher, P. J. Norman, K. Fong, S. J. Galloway, and G. M. Burt. High-speed differential protection for smart dc distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(5):2610–2617, 2014.
- [48] H. Al-Nasseri and M. A. Redfern. Harmonics content based protection scheme for microgrids dominated by solid state converters. In *2008 12th International Middle-East Power System Conference*, pages 50–56, 2008.

- [49] M. Petit, X. Le Pivert, and L. Garcia-Santander. Directional relays without voltage sensors for distribution networks with distributed generation: Use of symmetrical components. *Electric Power Systems Research*, 80(10):1222 – 1228, 2010.
- [50] Prakash K. Ray, Soumya R. Mohanty, and Nand Kishor. Disturbance detection in grid-connected distributed generation system using wavelet and s-transform. *Electric Power Systems Research*, 81(3):805 – 819, 2011.
- [51] S. Samantaray, D. Mishra, and G. Joos. A combined wavelet and data-mining based intelligent protection scheme for microgrid. In *2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*, pages 1–1, 2018.