

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

FLEXIBASE

Inicijalna verzija modela mikromreže donje i gornje razine te popis
uočenih nepravilnosti

izv. prof. Hrvoje Pandžić
prof. Marko Delimar
prof. Juraj Havelka
izv. prof. Yuri Dvorkin
Mateo Beus, mag. ing.
Domagoj Badanjak, mag.ing.
Ivan Grečić, mag. ing.
Marija Miletić, mag. ing.



Europska unija
Zajedno do fondova EU



04-2021

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Dispeč mikromreže	2
2.1	Opis inicijalnog modela gornje razine	2
2.2	Opis inicijalne verzije modela zaštite mikromreže	4
3	Nepравilnosti	7
3.1	Popis uočenih nepravilnosti u upravljačkom modelu gornje razine	7
3.2	Popis uočenih nepravilnosti u upravljačkom modelu donje razine	8
4	Zaključna razmatranja	9
	Literatura	11

1. Uvod

Sigurnost i pouzdanost rada mikromreže može biti narušena tijekom prelaska iz mrežnog u otočni način rada. Pri takvoj tranziciji može doći do narušavanja frekvencijske stabilnosti te naponskih i strujnih ograničenja. Neplaniran prelazak je nepovoljniji oblik prelaska u otočni način rada, pri kojem dolazi do ozbiljnijeg narušavanja stabilnosti sustava. Takav prelazak najčešće uzrokuje djelovanje frekvencijske zaštite, odnosno prekid opskrbe određenog dijela tereta ili zaustavljanje proizvodnje generatora. Promjena radnog stanja također utječe na promjenu toka snage unutar mikromreže dovodeći do preopterećenja vodova ili promjene profila napona. Djelovanje nadstrujnih i naponskih releja pri navedenim pojavama je neizbježno, a za posljedicu opet ima prekid napajanja. Zbog navedenih razloga nužan je razvoj sustava za upravljanje energijom (engl. *Energy Management System* - EMS) koji u obzir uzima postavke zaštite mikromreže.

2. Dispeč mikromreže

Gornja razina upravljačkog modela, odnosno problem optimalnog nastup mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga, široko je istraživana tema u akademskoj zajednici. Shodno tome, primjetan je i zavidan broj članaka na temu algoritama ekonomskog dispeča, no s naglaskom kako se uglavnom ne obaziru na postavke sigurnosti mikromreža. Ipak, članci poput [1] i [2] su primjeri integracije ograničenja zaštite u okvir ekonomskog dispeča. Tako u [1] autori predstavljaju više-ciljni model optimalnog dispeča koji uzima ograničenja zaštite u obzir, dok su autori u [2] integrirali ograničenja koja brinu o frekvenciji u proceduru ekonomskog dispeča. S gledišta procedure dispeča mikromreža, danas je ustaljeno uvrštavati relativno jednostavne zahtjeve rezervi na bazi kapaciteta u probleme dispeča mikromreža u stvarnom vremenu (eng. *real-time*) [3, 4, 5]. Na taj je način ukupni zahtjev primarne rezerve prema mikromreži jednak kapacitetu najveće proizvodne jedinice unutar mikromreže ili fiksni postotak višnog tereta. Takva strategija uzrokuje neefikasan rad mikromreže. Štoviše, stabilnost frekvencije tijekom neplaniranih prijelaza na otočni rad ne može biti garantirana. U [6] i [7] autori su razvili mješoviti cjelobrojni nelinearni optimizacijski problem (eng. kratica *MINLP*). U oba članka *MINLP* se koristi kao alat sustava upravljanja energijom s glavnom svrhom takvog alata da osigura optimalan rad i raspored mikromreža.

Iako su mikromreže rješenje za eksploataciju distribuiranih izvora energije (DIE), njihov utjecaj na zaštitu distribucijskog sustava je značajan. Neki od načina na koji DIE utječe na zaštitu su [8]:

- Nemogućnost detekcije kvarova u otočnom načinu rada.
- Problemi s koordinacijom zaštite.
- Nepotrebno djelovanje zaštite.

Trenutačno je predloženo nekoliko zaštitnih shema za mikromreže. U [9] autor analizira postojeće zaštitne sheme izvedene u raznim projektima, dok je u [10] dan pregled zaštitnih metoda za mikromreže s velikim udjelom pretvarača u otočnom načinu rada. U [11] i [12] dan je pregled zaštitnih metoda za istosmjerne mikromreže. Posljednjih godina zaštita istosmjernih mikromreža dobiva na važnosti zbog sve češćeg korištenja hibridnih topologija mikromreža, odnosno kombiniranja izmjeničnog i istosmjernog dijela mikromreže preko dvosmjernih pretvarača.

2.1 Opis inicijalnog modela gornje razine

Gornja razina je bazirana na algoritmu dinamičkog ekonomskog dispeča (DED) čija ograničenja prelaska na otočni način rada uzimaju u obzir frekvenciju kako bi se održala frekvencijska stabilnost mikromreže i prilikom neplaniranih prijelaza na otočno način rada. Glavni cilj upravljačkog modela gornje razine jest minimizacija operativnih troškova uz osiguravanje mogućnosti

prelaska na otočni način rada u bilo kojem trenutku. Rezultati optimizacijskog problema gornje razine, optimalne radne točke upravljivih jedinica, se koriste kasnije kao ulazni parametri optimizacijskog problema donje razine. Sam problem je oblikovan na sljedeći način:

$$\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{g=1}^{N_g} k_{1,g} p_{g,t} + k_2 u_t \right) + \sum_{t=1}^T \left(\sum_{g=1}^{N_g} k_{3,g} r u_{g,t} + k_{4,g} r d_{g,t} \right) \quad (2.1)$$

s.t.

$$\sum_{g=1}^{N_g} p_{g,t} + P_{RES} \geq \sum_{l=1}^{L_c} C_{l,t} + N L_t \quad (2.2)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_c} C_{l,t} = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_c} L_{l,t} \quad (2.3)$$

$$U^{MIN} \leq u_t \leq U^{MAX} \quad (2.4)$$

$$P_g^{MIN} \leq p_{g,t} \leq P_g^{MAX} \quad (2.5)$$

$$p_{g,t+1} - p_{g,t} \leq R U_g^{MAX} \quad (2.6)$$

$$p_{g,t_1} - p_g^{INIT} \leq R U_g^{MAX} \quad (2.7)$$

$$p_{g,t-1} - p_{g,t} \leq R D_g^{MAX} \quad (2.8)$$

$$p_g^{INIT} - p_{g,t_1} \leq R D_g^{MAX} \quad (2.9)$$

$$p_g^{MIN} \leq p_{g,t} + r u_{g,t} \leq p_g^{MAX} \quad (2.10)$$

$$p_g^{MIN} \leq p_{g,t} - r d_{g,t} \leq p_g^{MAX} \quad (2.11)$$

$$P U P_g^{MIN} \leq r u_{g,t} \leq P U P_g^{MAX} \quad (2.12)$$

$$P D_g^{MIN} \leq r d_{g,t} \leq P D_g^{MAX} \quad (2.13)$$

$$rocof_t = \left(\sum_{g \in 1}^{N_g} p_{g,t} - D f_{t-1} - u_t \right) / 2H \quad (2.14)$$

$$rocof^{MIN} \leq rocof_t \leq rocof^{MAX} \quad (2.15)$$

$$f_t = f_{t-1} + rocof_t \tau \quad (2.16)$$

$$f^{MIN} \leq f_t \leq f^{MAX} \quad (2.17)$$

Prvi izraz u funkciji cilja (2.1) predstavlja trošak proizvodnje energije upravljivih jedinica, drugi izraz predstavlja trošak(/profit) interakcije s opskrbnom mrežom, dok treći izraz predstavlja trošak povezan s pružanjem primarne rezerve. Ograničenje (2.2) izražava jednadžbu ravnoteže snaga. Obzirom da upravljivi tereti imaju mogućnost pružanja usluga odziva potrošnje, ograničenjem (2.3) je osigurano da se ukupna energija tereta ne promijeni u promatranom horizontu. Jednadžbe (2.4) - (2.8) predstavljaju tehnička ograničenja koje svaka upravljiva jedinica mora zadovoljiti. Preciznije rečeno, (2.4) definira gornju i donju granicu snage koja može kolati između mikromreže i distribucijske mreže, a (2.5) ograničava izlaznu snagu svake od upravljivih jedinica. Ograničenja rampi prema gore i prema dolje određena su jednadžbama (2.6) i (2.7), odnosno (2.8) i (2.9). Jednadžbe (2.10) i (2.11), odnosno (2.12) i (2.12) definiraju mogućnosti pružanja rezervi prema gore i prema dolje svake od upravljivih jedinica. (2.14) - (2.17) predstavljaju frekvencijska ograničenja prema članku [2]. Ta ograničenja osiguravaju da procedura dispeča može garantirati stabilnost mikromreže nakon naglog prijelaza iz mrežnog u otočni režim rada. Popis svih parametara i varijabli se može pronaći u tablici 2.1.

2.2 Opis inicijalne verzije modela zaštite mikromreže

Proračun donje razine, odnosno proračun tokova snage u mikromreži se izvodi iterativnom Newton-Raphsonovom (NR) metodom. Primijenjena NR metoda koristi 0.1 MVA kao baznu vrijednost snage, preciznost je postavljena na 0.0001 te je maksimalan broj iteracija ograničen na 10000.

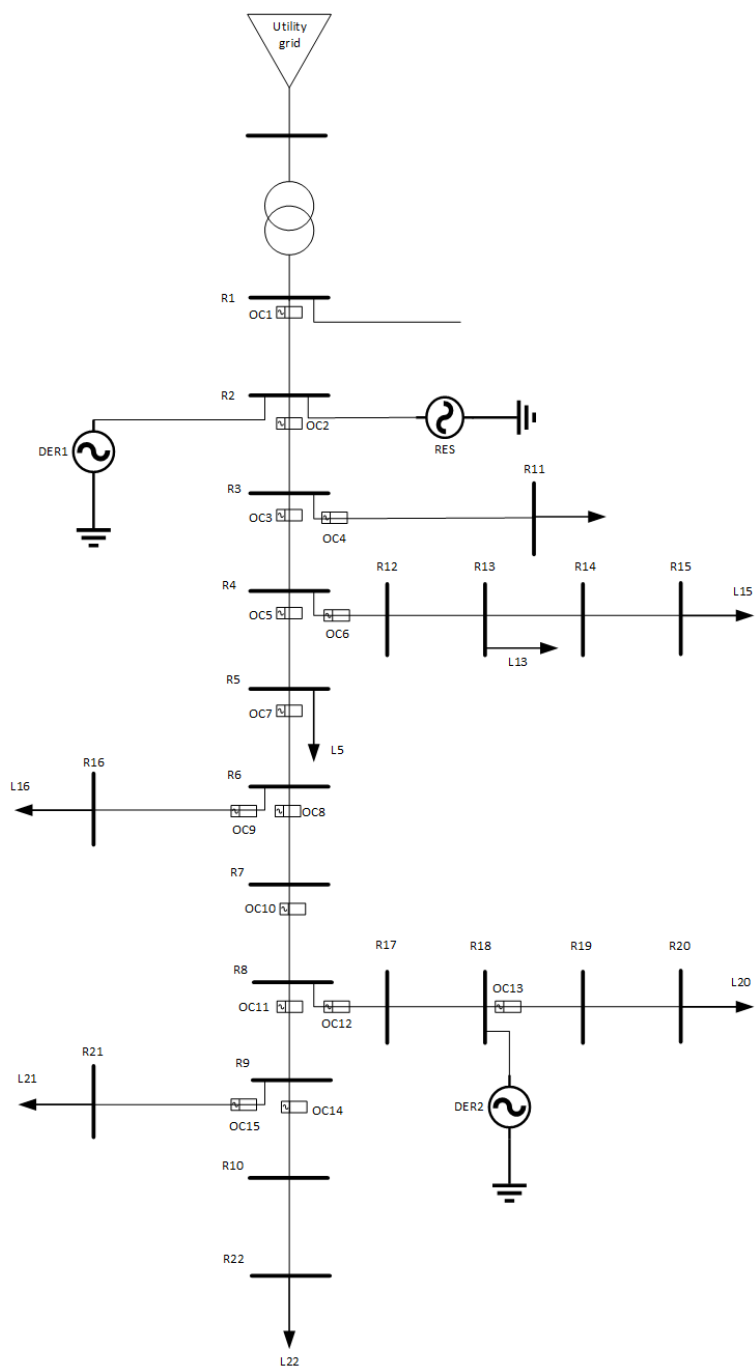
Temeljeno na proračunu tokova snaga donje razine, postavke nadstrujne te nad/podnaponske zaštite su postavljene na manje konzervativne vrijednosti tijekom određenog vremenskog perioda, ako je to potrebno. Preopterećenje vodova je dopušteno s obzirom da su vodovi projektirani da izdrže takve uvjete u određenom vremenskom trajanju. Određeno je da će nakon 15-minutnog perioda postavke nadstrujne i naponske zaštite biti postavljene na prijašnje postavke. Na ovaj je način moguće proširiti radno područje mikromreže, osiguravajući da zaštita ne uzrokuje prekid rada prilikom redispeča naređenog od strane gornjeg upravljačkog sloja. Nadstrujna zaštita je realizirana bazirano na IEC 60255 karakteristikama. Pozicije zaštitnih releja označene s OC1-OC15 su prikazane na slici 2.1. Vrijeme djelovanja za svaki relej se računa sljedećom jednadžbom:

$$T(I) = TMS \left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha} - 1 \right) \quad (2.18)$$

gdje je I_s postavna struja, I stvarna struja te k i α konstante koje određuju tip krivulje. U ovom slučaju je je korištena standardna inverzna krivulja, što znači da k iznosi 0.14, a α 0.02. TMS označava vremenski faktor množenja, te je njegova vrijednost postavljena na 0.5.

Tablica 2.1: Parametri i varijable gornje razine problema

Parametri	Opis
N_g	Broj izvora energije
N_l	Broj upravljivih tereta
NL	Ukupna potrošnja neupravljivih tereta [kW]
P_g^{MIN}	Minimalna snaga DIE [kW]
P_g^{MAX}	Maximalna snaga DIE [kW]
U^{MIN}	Min. snaga razmjenjena s distribucijskom mrežom [kW]
U^{MAX}	Maks. snaga razmjenjena s distribucijskom mrežom [kW]
f^{MAX}	Maksimalni dopušteni frekvencijski limit [Hz]
f^{MIN}	Minimalni dopušteni frekvencijski limit [Hz]
$rocof^{\text{MAX}}$	Maksimalni dopušteni rocof limit [Hz/s]
$rocof^{\text{MIN}}$	Minimalni dopušteni rocof limit [Hz/s]
H	Inercija mikromreže
D	Faktor prigušenja tereta
τ	Diskretizacijski korak [s]
PUP_g^{MAX}	Maksimalni limit gornje rezerve [kW]
PUP_g^{MIN}	Minimalni limit gornje rezerve [kW]
PD_g^{MAX}	Maksimalni limit donje rezerve [kW]
PD_g^{MIN}	Minimalni limit donje rezerve [kW]
RU_g^{MAX}	Limit rasta snage DIE [kW/h]
RD_g^{MAX}	Limit smanjenja snage DIE [kW/h]
P_{RES}	Ukupna proizvodnja OIE [kW]
L_l	Predviđena potrošnja upravljivih tereta [kW]
p_g^{INIT}	Mjerenje aktivne snage DIE [kW]
k_1	Cijena proizvodnje [EUR/kWh]
k_2	Cijena energije [EUR/kWh]
k_3	Cijena gornje rezerve [EUR/kWh]
k_4	Cijena donje rezerve [EUR/kWh]
Varijable	Opis
C_l	Potrošnja upravljivih tereta [kW]
p_g	Snaga DIE [kW]
u	Snaga razmijenjena s distribucijskom mrežom [kW]
ru_g	Gornja primarna rezerva [kW]
rd_g	Donja primarna rezerva [kW]



Slika 2.1: Topologija mikromreže

3. Nepravilnosti

Ovo poglavlje donosi pregled uočenih nepravilnosti u upravljačkim modelima gornje i donje razine. U nastavku je kao zasebno potpoglavlje prvo naveden popis nepravilnosti uočenih za gornju razinu, a zatim i zasebno potpoglavlje s tablicom koja sadrži popis nepravilnosti uočenih u donjoj razini.

3.1 Popis uočenih nepravilnosti u upravljačkom modelu gornje razine

Tablica 3.1: Nepravilnosti u upravljačkom modelu gornje razine

1.	Linearne nejednakosti koje modeliraju frekvencijska ograničenja ovisno o početnim uvjetima uzrokuju nemogućnost pronalaska optimalnog rješenja DED algoritma, tzv. neizvodljivost algoritma (engl. Infeasible solution)
2.	Linearne nejednakosti koja modeliraju primarnu rezervu ovisno o početnim uvjetima uzrokuje nemogućnost pronalaska optimalnog rješenja DED algoritma, tzv. neizvodljivost algoritma (engl. Infeasible solution)
3.	Brzina izvođenja optimizacijskog problema
4.	Određivanje maksimalnog dopuštenog vremena izračuna optimalnog rješenja
5.	Određivanje optimalne duljine predikacijskog horizonta
6.	Određivanje optimalnog vremenskog koraka izvođenja
7.	Prilagodba mjerenja snage u mikromreži prema vrijednosti parametara koji su definirani u optimizacijskom problemu, tj. pretvorba svih mjerenje na 1 kW bazu

Popis uočenih nepravilnosti u upravljačkom modelu gornje razine prikazan je tablicom 3.1. Sve poteškoće se mogu svrstati u kategorije izvodljivosti algoritma i/ili samog trajanja izvođenja optimizacijskog problema. Tako prva dva razloga predstavljaju glavne potencijalne uzroke neizvodljivosti algoritma. To je ovisnost o početnim uvjetima linearnih jednakosti koje modeliraju i) frekvencijska ograničenja i ii) primarnu rezervu. Nadalje, veoma bitan faktor je i brzina izvođenja optimizacijskog problema. Ona ne ovisi isključivo o veličini i kompleksnosti promatranog problema, nego i o korištenim metodama te formulaciji. Drugim riječima, velika pažnja se obraća kako zamišljena formulacija utječe na brzinu izvođenja te postoje li efikasnije metode koje odgovaraju zamišljenom modelu, a pritom pospješuju efikasnost izračuna. Nastavno na temu brzine izvođenja optimizacijskog problema dolazi i određivanje maksimalnog dopuštenog vremena izračuna optimalnog rješenja. Pritom treba imati na umu okvir u kojemu bi trebalo biti realno da se proračun izvrši te shodno tome nametnuti ograničenje trajanja izračuna. Duljina predikacijskog horizonta te vremenski korak izvođenja su veoma bitni faktori

koji utječu kako na brzinu izvođenja, tako i na samu izvodljivost optimizacijskog problema. Na posljeticu, isto vrijedi spomenuti da se, prema formulaciji optimizacijskog problema, sva mjerenja moraju pretvoriti na 1 kW bazu.

3.2 Popis uočenih nepravilnosti u upravljačkom modelu donje razine

Tablica 3.2: Nepravilnosti u upravljačkom modelu donje razine

1.	Određivanje početnih uvjeta za iterativni postupak izračuna tokova snaga koristeći Newton-Raphson postupak
2.	Određivanje maksimalnog broja iteracija koje neće ograničiti potrebnu brzinu izvođenja postupka proračuna tokova snaga u mikromreži
3.	Određivanje maksimalnog dopuštenog vremena izvođenja izračuna
4.	Određivanje minimalne potrebne preciznosti izračuna koja zaustavlja iterativni postupak
5.	Određivanje parametra koji definira ubrzanje izvođenje iterativnog postupka izvođenja proračuna tokova snaga
6.	Prilagodba mjerenja snage i napona u mikromreži prema baznoj snazi na koju su preračunati svi parametri mikromreže, tj. pretvorba svih mjerenja na 0.1 MVA bazu

Tablica 3.2 sadrži nedostatke donje upravljačke razine. S obzirom da se za proračun tokova snaga koristi Newton-Raphsonov algoritam, pod brojevima 1.–5. su nedostatci koji mogu produžiti vrijeme izvedbe algoritma. Određivanje prikladnih početnih uvjeta je problematično jer za to ne postoji algoritam već je potrebno krenuti s razumnom i prikladnom pretpostavkom koja će dovesti do bržeg pronalaska rješenja. Broj iteracija može značajno utjecati na trajanje izvedbe ukoliko se rješenje ne pronađe u prikladnom vremenu izvršavanja. Stoga je broj iteracija potrebno ograničiti, ali ne na prenisku razinu kako bi se rješenje moglo pronaći. Kao što je potrebno ograničiti broj iteracija potrebno je ograničiti i vremensko trajanje izvođenja algoritma na prihvatljivu vrijednost. Preciznost je vrlo bitan parametar jer određuje koliko je dobra aproksimacija rješenja. Naravno, prevelika zadana preciznost može zahtijevati dulje vrijeme izvedbe što nije poželjno. Određivanje parametra koji ubrzava izvođenje iterativnog postupka se također treba provesti pažljivo jer odabir prevelikog iznosa može za posljedicu imati nemogućnost konvergencije k rješenju. Posljednji problem je preračunavanje svih parametara mikromreže na baznu snagu radi formulacije optimizacijskog problema.

4. Zaključna razmatranja

Predstavljen je dvorazinski dispečnik mikromreže koji u obzir uzima postavke zaštite. Gornja razina dispeča je bazirana na dinamičnom ekonomskom dispečniku koji u obzir uzima frekvencijska ograničenja prilikom prelaska u otočni način rada, osiguravajući tako stabilnost frekvencije mikromreže. Donja razina je bazirana na Newton-Raphsonovu proračunu tokova snaga. Bazirano na ovom proračunu, postavke nadstrujne i naponske zaštite su postavljene na manje konzervativne vrijednosti tijekom 15-minutnog perioda kako bi se osigurao neprekinut rad mikromreže. Osnovne nepravilnosti koje su pri radu uočene su dokumentirane i navedene u tablicama, te će se kretati u smjeru rješavanja navedenih nedostataka te unaprjeđenju modela. Model će također biti testiran na različitim scenarijima pri čemu će se nastaviti poboljšavati njegove performanse.

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] Vahid Sarfi and Hanif Livani. An economic-reliability security-constrained optimal dispatch for microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6):6777–6786, 11 2018.
- [2] Yunfeng Wen, C. Y. Chung, Xuan Liu, and Liang Che. Microgrid dispatch with frequency-aware islanding constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(3):2465–2468, 5 2019.
- [3] Quanyuan Jiang, Meidong Xue, and Guangchao Geng. Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3):3380–3389, 2013.
- [4] Sohail Khan, Wolfgang Gawlik, and Peter Palensky. Reserve Capability Assessment Considering Correlated Uncertainty in Microgrid. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(2):637–646, 4 2016.
- [5] Carlos A. Hernandez-Aramburo, Tim C. Green, and Nicolas Mugniot. Fuel consumption minimization of a microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(3):673–681, 5 2005.
- [6] Mousa Marzband, Andreas Sumper, José Luis Domínguez-García, and Ramon Gumara-Ferret. Experimental validation of a real time energy management system for microgrids in islanded mode using a local day-ahead electricity market and MINLP. *Energy Conversion and Management*, 76:314–322, 2013.
- [7] Yen Haw Chen, Su Ying Lu, Yung Ruei Chang, Ta Tung Lee, and Ming Che Hu. Economic analysis and optimal energy management models for microgrid systems: A case study in Taiwan. *Applied Energy*, 103:145–154, 2013.
- [8] Mehdi Monadi, M. Amin Zamani, Jose Ignacio Candela, Alvaro Luna, and Pedro Rodriguez. Protection of ac and dc distribution systems embedding distributed energy resources: A comparative review and analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51:1578–1593, 2015.
- [9] J. Shiles, E. Wong, S. Rao, C. Sanden, M. A. Zamani, M. Davari, and F. Katiraei. Microgrid protection: An overview of protection strategies in north american microgrid projects. In *2017 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pages 1–5, 2017.
- [10] S. F. Zarei, H. Mokhtari, and F. Blaabjerg. Fault detection and protection strategy for islanded inverter-based microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(1):472–484, 2021.

- [11] D. M. Bui, S. Chen, C. Wu, K. Lien, C. Huang, and K. Jen. Review on protection coordination strategies and development of an effective protection coordination system for dc microgrid. In *2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pages 1–10, 2014.
- [12] A. A. Sheikh, S. A. Wakode, R. R. Deshmukh, M. S. Ballal, H. M. Suryawanshi, M. K. Mishra, and S. Kumar. A brief review on dc microgrid protection. In *2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, pages 1–6, 2020.