

Literature Review Skema Proteksi Jaringan Distribusi Yang Terhubung Dengan Pembangkit Tersebar

Herris Yamashika¹, Syafii², Adrianti³, Aulia⁴

[Submission: 26-12-2022, Accepted: 09-02-2023]

Abstract— Connecting distributed generation (DG) to the distribution network faces several challenges. One of them is related to the protection sistem scheme. The coordination of the existing protection sistem is unable to work properly with DG connected. Changes in short circuit current level, bidirectional power flow, blinding protection, false trip, and auto recloser failure are the problems presented in this paper. Several researchers have developed a protection scheme to overcome this problem. This article reviews some schemes that have been proposed previously. The article to be reviewed is only for AC systems and does not include signal processing methods due to the complexity of the implementation stage. The protection scheme under review consists of adaptive scheme, differential scheme, distance relay scheme, voltage scheme, fault current limiter (FCL) scheme, and overcurrent protection scheme. The results of the review show that the proposed scheme has not considered DG with an inverter interface. The use of expensive communication channels is still a mainstay in adaptive and differential schemes. Transient problems due to DG connection and disconnection, as well as unbalanced loading, are also encountered.

Keyword— distributed generation protection; AC microgrid; Distributed Generation/DG

Intisari— Penyambungan pembangkit tersebar (*Distributed Generation/DG*) ke jaringan distribusi menghadapi beberapa tantangan. Salah satunya terkait dengan skema sistem proteksi. Koordinasi sistem proteksi eksisting tidak mampu bekerja dengan baik dengan tersambung nya *DG*. Perubahan level arus hubung singkat, aliran daya dua arah, *blinding protection*, *false trip*, dan kegagalan *auto recloser* merupakan permasalahan yang disampaikan pada tulisan ini. Sejumlah peneliti telah mengembangkan skema proteksi untuk mengatasi permasalahan tersebut. Artikel ini melakukan review terhadap sejumlah skema yang ditelaah diusulkan sebelumnya. Artikel yang akan direview hanya untuk sistem dan jaringan distribusi AC, dan juga tidak memasukan metode pemrosesan sinyal karena pertimbangan kompleksitas tahap implementasi. Skema proteksi yang direview terdiri dari skema adaptif, skema differensial, skema *relay* jarak, skema tegangan, skema pembatasan arus

gangguan, dan skema proteksi arus lebih. Hasil review diperoleh bahwa skema yang diusulkan belum mempertimbangkan *DG* dengan antar muka inverter. Penggunaan saluran komunikasi yang mahal masih menjadi andalan pada skema adaptif dan differensial. Permasalahan transient karena penyambungan dan pemutusan *DG*, serta pembebanan yang tidak seimbang juga masih ditemui.

Kata Kunci— *distributed generation protection*; AC microgrid; pembangkitan tersebar.

I. PENDAHULUAN

Energi merupakan salah satu faktor penentu perkembangan ekonomi sebuah negara [1]. Peningkatan kebutuhan akan energi listrik dalam satu dekade terakhir menunjukan kenaikan yang signifikan. Menurut data dari US Energy Information Administration (US EIA) konsumsi energi listrik dunia pada tahun 2019 dicatatkan sebesar 23.773,286 TWh [2]. Konsumsi energi tersebut dihasilkan dari total produksi energi sebesar 25.608,2 TWh [3]. Dari jumlah produksi energi tersebut, produksi energi bahan bakar fosil mengambil porsi sebesar 62.53%. Sementara produksi energi dari sumber energi terbarukan (EBT) sebesar 27,22% dari total produksi energi pada tahun 2019. Data yang dikeluarkan oleh US EIA tersebut, juga mencatatkan bahwa produksi energi dari sumber EBT mengalami peningkatan yang cukup signifikan dalam dekade terakhir. Pada tahun 2010 produksi energi EBT tercatat sebesar 4.192,41 TWh atau setara dengan 20,48% dari seluruh pembangkitan pada tahun tersebut. Pertumbuhan produksi EBT pada kurun waktu 2010 sampai 2019 tersebut adalah sebesar 2.816,14 TWh dan setara 6,75% dari jumlah pembangkitan dalam kurun waktu tersebut. Dilain sisi produksi energi bahan bakar fosil mengalami penurunan dalam kurun waktu yang sama, dimana pada tahun 2010 persentase produksi energi fosil adalah 66,82%. Uraian diatas menunjukan bahwa kecenderungan peningkatan penggunaan sumber EBT mengalami peningkatan, dan sebaliknya persentase produksi energi fosil mengalami penurunan. Saat ini EBT merupakan pertimbangan utama terhadap kebijakan energi suatu negara [4].

Sistem tenaga listrik yang ada sekarang ini telah berkembang sejak tahun 1890an. Dimana kecenderungannya, sebuah pembangkit diletakan dekat dengan dengan sumber energi primer, dan membangkitkan daya dalam kapasitas besar. Daya tersebut akan disalurkan ke pusat beban yang membutuhkan penyaluran menggunakan tegangan tinggi, karena faktor jarak dan besarnya daya. Seiring dengan menipisnya cadangan bahan bakar fosil yang mendorong penurunan produksi energi bahan bakar fosil, sumber dari sumber daya baru dan terbarukan menjadi alternatif untuk memenuhi konsumsi energi yang terus tumbuh dari waktu ke waktu.

¹Program studi S3 Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas, Limau Manis, Padang – Sumatera Barat, INDONESIA.

¹Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, Bukittinggi – Sumatera Barat INDONESIA. (tel: 08128102015; email: herrisyamashika@umsb.ac.id)

^{2, 3, 4}Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas, Limau Manis, Padang – Sumatera Barat 25163 INDONESIA. (tel: 0751-72586; fax: 0751-72566; e-mail: syafii@eng.unand.ac.id, adrianti@eng.unand.ac.id, aulia@eng.unand.ac.id)



Penggunaan sumber EBT untuk membangkitkan daya listrik telah memunculkan istilah pembangkitan tersebar (*Distributed Generation/DG*). Pembangkit tersebut mempunyai kapasitas kecil, terhubung dengan saluran distribusi eksisting, dan terletak dekat dengan beban. EBT diantaranya berasal dari cahaya matahari, air, angin, biomassa, dan sebagainya. Penggunaan sumber energi alternatif tersebut memiliki sejumlah keuntungan, diantaranya tidak menimbulkan polusi, biaya pembangunan yang lebih rendah, dan juga mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan distribusi. Perkembangan teknologi elektronika daya memainkan peranan penting dalam perkembangan pembangkitan tenaga listrik [5]. Disamping itu, penyambungan *DG* ke jaringan distribusi eksisting juga tidak membutuhkan pembangunan jaringan baru.

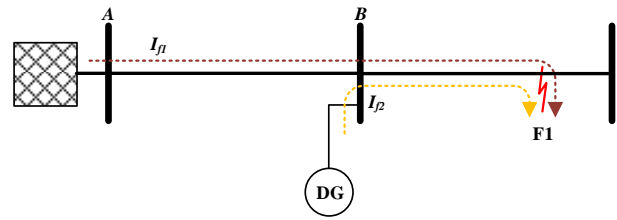
II. STUDI PUSTAKA

Disamping sejumlah manfaat yang disebutkan sebelumnya, penyambungan *DG* ke jaringan distribusi akan menimbulkan sejumlah permasalahan, diantaranya adalah sistem proteksi pada jaringan distribusi dimana *DG* tersebut tersambung. Kebutuhan terhadap sistem proteksi yang mampu menjaga kehandalan, keamanan, dan kontinuitas pasokan daya menjadi sebuah keharusan untuk diterapkan pada jaringan distribusi yang tersambung dengan *DG*. Dampak penyambungan *DG* pada jaringan distribusi dapat diukur secara kuantitatif menggunakan metode *Protection Coordination Index* [6].

Sistem proteksi tradisional pada jaringan distribusi akan bekerja jika arus gangguan yang dirasakan *relay* melebihi batasan arus yang telah ditentukan sebelumnya. Karakteristik arus gangguan pembangkit yang berbasis generator sinkron atau generator induksi, memiliki perbedaan dengan pembangkit yang terhubung dengan antarmuka inverter [7]. Kinerja sistem proteksi tradisional pada jaringan distribusi yang tersambung dengan *DG* juga tergantung pola operasi *DG* [8] [9], karena *DG* tidak selalu beroperasi dan tersambung ke jaringan distribusi. Sistem proteksi tradisional tersebut hanya cocok diterapkan pada jaringan distribusi yang memiliki aliran daya searah. Sehingga tidak lagi cocok diterapkan pada jaringan distribusi yang tersambung dengan *DG* [10].

A. Perubahan Level Arus Hubung Singkat

Selain beroperasi pada kondisi normal dengan *DG* terhubung ke jaringan distribusi, *DG* dapat beroperasi pada mode *islanded*, dimana sumber dari jaringan utama terputus dan hanya *DG* yang memasok daya ke beban. Ketika terjadi gangguan hubung singkat pada saat kondisi *islanded*, arus gangguan yang terjadi lebih kecil dibandingkan pada kondisi operasi normal [11]. Kondisi tersebut akan menyebabkan *relay* tidak bekerja pada kondisi *islanded*, karena pengaturan *relay* adalah untuk kondisi *DG* terhubung dengan jaringan distribusi. Seperti yang terlihat pada gambar 1, pada saat kondisi *DG* tersambung ke jaringan distribusi, arus gangguan berasal dari jaringan utama (I_{f1}) dan dari *DG* (I_{f2}). *Relay* yang terpasang di bus B akan merasakan arus dari kedua sumber tersebut. Akan tetapi pada kondisi *islanded*, dimana hanya *DG* yang tersambung ke jaringan distribusi, kontribusi arus gangguan hanya berasal dari *DG* saja (I_{f2}) dan nilai arus I_{f2} lebih kecil dari pada kondisi normal ($I_{f1} + I_{f2}$). Jika arus gangguan I_{f2} tersebut nilainya dibawah nilai batas pengaturan *relay* di bus B, maka *relay* tersebut tidak akan mendeteksi gangguan yang terjadi.



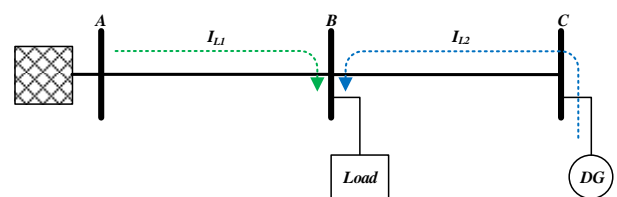
Gambar 1 : Gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi yang tersambung dengan DG

B. Aliran Daya Dua Arah

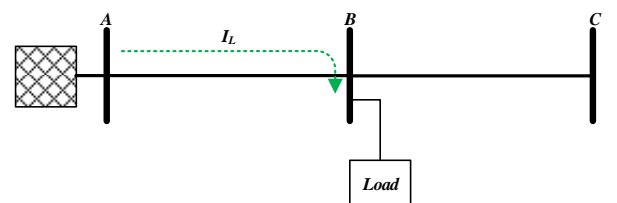
Penyambungan *DG* ke jaringan distribusi akan menimbulkan aliran daya dua arah pada jaringan distribusi radial. Sistem proteksi pada jaringan distribusi radial hanya dirancang untuk beroperasi pada satu arah aliran daya dan kemungkinan tidak akan bekerja dengan baik pada dua arah aliran daya [12]. Hal ini disebabkan karena arus yang dirasakan oleh *relay* yang terletak di pangkal jaringan distribusi, akan mengalami perubahan ketika ada atau tidak *DG* yang terhubung. Seperti yang terlihat pada gambar 2, ketika *DG* tersambung arus beban berasal dari jaringan utama (I_{L1}) dan *DG* (I_{L2}). Dimana telah disampaikan sebelumnya, bahwa *DG* tidak selalu beroperasi dan tersambung ke jaringan distribusi, sehingga arus beban hanya berasal dari jaringan utama (I_L) seperti yang terlihat pada gambar 3. Pada kondisi tersebut pengaturan nilai batas arus pada *relay* yang terletak di bus A harus dibedakan. Dimana nilai batas arus pada kondisi dengan *DG* terhubung lebih besar dibandingkan *DG* tidak tersambung.

C. Blinding Protection

Sistem dengan konfigurasi seperti pada gambar 1 juga akan menyebabkan kegagalan sistem proteksi. Kontribusi arus gangguan dari jaringan utama (I_{f1}) yang lebih kecil dibandingkan ketika *DG* tidak tersambung. Hal ini akan memperpendek zona jangkauan *relay* yang disebabkan oleh perubahan impedansi. Akibatnya *relay* akan memperlambat waktu tunda, atau bahkan bisa tidak bekerja sama sekali. Kejadian ini disebut sebagai *blinding protection* [13].



Gambar 2 : Aliran Daya pada jaringan distribusi yang tersambung dengan DG



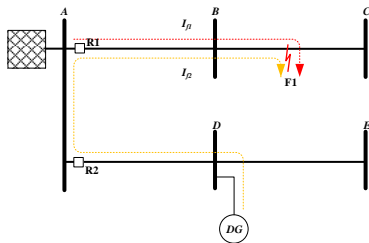
Gambar 3 : Aliran Daya pada jaringan distribusi yang tidak tersambung dengan DG

D. False Trip

Jaringan distribusi yang terdiri dari beberapa penyulang, dimana salah satunya tersambung dengan *DG* seperti yang terlihat pada gambar 4 dapat mengalami kejadian salah trip (*false trip*). Gangguan hubung singkat yang terjadi di F1, akan menyebabkan jaringan utama dan *DG* memberikan arus gangguan. Arus gangguan dari *DG* (I_{r2}) akan dirasakan oleh *relay* R2, apabila arus tersebut nilainya diatas batas pengaturan *relay*, maka R2 akan memberikan perintah trip. Kejadian ini tidak boleh terjadi, dimana *relay* yang hanya boleh bekerja adalah R2, karena gangguan F1 memang berada pada zona pengamanan R2, dan juga tidak masuk pada daerah pengamanan R1

E. Kegagalan auto recloser

Kehadiran *auto-recloser* (*AR*) pada jaringan distribusi yang tersambung dengan *DG* juga memiliki potensi masalah. *AR* bekerja untuk mengamankan gangguan non permanen, selama *AR* membuka diharapkan gangguan non permanen tersebut sudah tidak ada lagi. Ketika jaringan terhubung dengan *DG*, pada saat *AR* sudah memisahkan jaringan dengan jaringan utama, *DG* tetap memberikan kontribusi arus gangguan. Sehingga gangguan yang tadi bersifat tidak permanen akan menjadi gangguan permanen.



Gambar 4 : Jaringan distribusi paralel yang terhubung dengan *DG*

III. METODOLOGI

Proses review artikel diawali dengan mencari artikel penelitian atau review yang terkait langsung atau tidak dengan sistem proteksi pada jaringan distribusi. Pencarian artikel difokuskan pada metode yang terkait dengan skema-skema diatas. Sumber yang digunakan adalah basis data dari *Google Scholar*, *IEEE Explore*, *Science Direct*, *MDPI*, *IET*, *Wiley*. Artikel yang berkaitan dengan sistem DC dikecualikan dalam pencarian, karena artikel ini hanya difokuskan pada sistem AC. Skema yang menggunakan metode pemrosesan sinyal juga dikecualikan. Tahap selanjutnya adalah memisahkan artikel penelitian dan artikel review.

Sumber energi alternatif sebagai energi primer pada *DG* bisa diperoleh dari beberapa jenis sumber. Beberapa jenis energi primer tersebut tidak dikonversi oleh mesin listrik berputar seperti generator sinkron atau generator induksi dan membutuhkan inverter sebagai antarmuka dengan jaringan distribusi eksisiting. *DG* yang berbasis inverter ini memiliki kontribusi arus gangguan yang lebih kecil dibandingkan kontribusi arus gangguan dari mesin sinkron atau mesin induksi. Kontribusi arus gangguan dari inverter berkisar pada 1.0 sampai 2.0 per unit arus nominal inverter [14]. Sementara itu kontribusi arus gangguan dari generator sinkron adalah 8.0 –

10.0 per unit arus nominal inverter, dan 7.0 – 8.0 per unit arus nominal inverter dihasilkan dari kontribusi arus gangguan generator induksi [14]. Arus gangguan inverter yang relatif kecil tersebut akan membuat kinerja sistem proteksi menjadi tidak sensitif karena nilai arus gangguan lebih kecil daripada pengaturan batas arus pada *relay*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem proteksi pada jaringan distribusi yang terhubung dengan *DG* hendaknya memenuhi kriteria yang sesuai dinatara, yaitu handal, selektif, stabil, cepat, dan sensitif. Ketika jaringan distribusi tidak lagi tersambung dengan jaringan utama karena gangguan yang terjadi, jaringan tersebut beroperasi pada mode *islanded*, dan kriteria tersebut diatas juga harus dipenuhi mode operasi *islanded*. Dalam kurun waktu satu dekade terakhir telah banyak penelitian yang mengusukan metode untuk memenuhi kriteria sistem proteksi seperti yang disebutkan diatas. Metode tersebut dapat dikelompokkan berdasarkan skema yang digunakan sebagai berikut :

A. Skema Proteksi Adaptif

Operasi pada jaringan distribusi yang terhubung dengan *DG* memungkinkan terjadinya perubahan konfigurasi jaringan distribusi tersebut [15]. Konsep dari skema proteksi adaptif memungkinkan sistem proteksi menyesuaikan pengaturan dengan perubahan yang terjadi [16]. Pengembangan skema proteksi adaptif dengan seketika merubah pengaturan *relay* proteksi berdasarkan perubahan jaringan [17]. Metode *programmable logic* digunakan untuk mengembangkan skema adaptif menggantikan pengaturan internal *relay* proteksi [18]. Skema proteksi adaptif bisa dilakukan dengan mengelompokkan pengaturan *inverse time overcurrent* [19]. Sistem proteksi terpusat dengan fungsi-fungsi yaitu : memantau arus pada jaringan distribusi, mendeteksi gangguan yang terjadi, dan menyesuaikan pengaturan digunakan untuk mengatasi gangguan [20]. Penelitian [21] menyesuaikan pengaturan *relay* proteksi secara otomatis menggantikan pengaturan yang sebelumnya dipasangkan ke *relay*.

Skema adaptif pada [22] menggunakan *directional overcurrent relay* berdasarkan *superimposed* arus urutan positif dan negatif. Arus gangguan *steady state* digunakan untuk menyesuaikan pengaturan sistem proteksi utama dan cadangan [23]. Koordinasi recloser berbasis mikroprosesor dengan fuse dijaga menggunakan kombinasi karakteristik *inverse* dan *instantaneous* [24]. Untuk mencegah kegagalan koordinasi antara fuse dan recloser, nilai *time dial* dirubah pada pengaturan *relay* berdasarkan perbandingan arus penyulang dan *recloser* pada *relay* digital [25]. Pengaturan *overcurrent relay* disesuaikan berdasarkan lokasi *relay* proteksi dan karakteristik jaringan [26]. Penelitian [27], mengukur keserempakan fasa pada *overcurrent relay*. Model matematika digunakan untuk menentukan nilai *time multiplier* pada *relay overcurrent directional* numerik [28].

Terdapat beberapa kelemahan dari skema proteksi adaptif dalam penerapannya.

- Semua kemungkinan pola operasi harus dipertimbangkan.



- Perubahan pola operasi juga menjadi keterbatasan dalam perancangan, terutama yang terkait dengan mode operasi, pembebanan yang tidak seimbang, dan fenomena transient pada penyambungan atau pelepasan DG.
- membutuhkan saluran komunikasi dan pengukuran keserempakan yang menelan biaya besar.
- Gangguan dengan impedansi gangguan tinggi menyebabkan skema ini tidak handal.

B. Skema Differensial

Prinsip dasar *differensial relay* adalah membandingkan nilai arus pada kedua ujung zona yang diamankan. Sesuai hukum Kirchoff arus, bahwa jumlah aljabar arus pada sebuah nodal adalah nol. Pada saluran distribusi radial tanpa pencabangan arus pada masing-masing ujung adalah sama, sehingga arus differensial sama dengan nol. Ketika terjadi gangguan, arus pada kedua ujung saluran tersebut akan berbeda. Perbedaan arus yang melebihi nilai batas akan terdeteksi sebagai gangguan oleh *relay*, dan selanjutnya *relay* akan memberikan perintah trip.

Metode karakteristik *differensial* satu slope digunakan pada *differensial relay* berbasis mikroprosesor [29]. Skema differensial berbasis komponen simetris dikembangkan untuk proteksi *microgrid* [30]. Skema ini terbukti berhasil pada mode operasi mode *islanded*, sementara pada mode operasi *grid connected* dipengaruhi oleh fluktuasi voltase dan frekuensi. Untuk mengatasi kekurangan tersebut, artikel [31] mengoperasikan *relay* dalam 50 ms dengan mengontrol tegangan dan frekuensi agar *microgrid* dapat beroperasi pada kedua mode dengan handal. Kedua metode diatas memiliki kelemahan, dimana belum mampu bekerja dengan baik pada gangguan yang memiliki tahanan tanah yang tinggi (*high impedance faults/HIF*). Sebagai solusi, integrasi pengukuran fasor dan teknologi mikroprosesor lanjut dikembangkan oleh [32]. Koil Rogowski digunakan sebagai sensor untuk mendeteksi polaritas transien arus gangguan [33]. Polaritas awal arus transien yang diukur pada dua sisi zona dibandingkan untuk menentukan jika terjadi gangguan di dalam zona terlindungi. Pendekatan *Fuzzy rule based* untuk proteksi utama dan cadangan *microgrid* dilakukan oleh [34]. Skema yang diusulkan untuk proteksi utama dan cadangan dimulai dengan pemrosesan awal sinyal tegangan dan arus yang diambil pada kedua sisi feeder yang mengalami gangguan dan feeder yang berdekatan untuk menghitung nilai differensial.

Perkembangan skema differensial dilanjutkan dengan penggunaan saluran komunikasi. Skema differensial komponen simetris yang digabungkan dengan saluran komunikasi diusulkan oleh [35]. Skema proteksi menggunakan saluran komunikasi untuk differensial arus dengan proteksi tambahan diusulkan oleh [32]. Algoritma skema proteksi differensial untuk *microgrid* tegangan menengah dikembangkan oleh [36]. Artikel [37] mengusulkan kombinasi differensial dengan sistem berbasis Fuzzy-based Sistem with Hilbert Space Power (FHSP). Untuk mengurangi ketergantungan pada batas ambang dan meningkatkan kecepatan respons. Skema baru berdasarkan data mining diusulkan oleh [38] agar perbedaan topologi dan pola operasi yang berbeda dapat dinaturalisasikan. Transformasi Fourier berdasarkan filter pendeteksi perubahan dan indeks perubahan digunakan untuk mendeteksi gangguan, jenis gangguan, dan perkiraan lokasi terjadinya gangguan,

diusulkan oleh [39]. Di sini, *sparse Fourier kernel fast time frequency transform* digunakan untuk skema proteksi *spectral energy differential*. Metode lain yang dikembangkan adalah berdasarkan sinkronisasi fasor dan mikroprosesor oleh [40], dengan skema proteksi cadangan agar berfungsi jika terjadi kegagalan sistem komunikasi. Peningkatan *VMD (Variational Mode Decomposition)* yang digabungkan dengan metode berbasis transformasi *Hilbert* diusulkan oleh [41]. Skema ini berbasis proteksi differensial dengan peningkatan batas untuk *microgrid* dan bekerja dengan baik pada kondisi dan gangguan yang berbeda, tetapi memiliki kekurangan yang tidak dapat mendeteksi busur yang terjadi ketika tahanan gangguan besar dengan arus gangguan nol. Namun, skema differensial berbasis transformator daya menggunakan energi spektral dan proses jaringan syaraf tiruan diusulkan oleh [42]. Seluruh topologi tersebut memiliki masalah fleksibilitas pada tahap implementasi. Metode berbasis optimisasi diusulkan oleh [43], tetapi skema ini tidak memiliki kemampuan adaptasi. Ini dicapai dalam oleh [44] dengan menggunakan skema differensial yang dioptimalkan yang beroperasi berdasarkan modulasi sinyal arus gangguan.

Skema differensial bisa digunakan untuk proteksi *microgrid* karena dapat bekerja dalam waktu 5 ms, dan batas skema differensial dapat dengan mudah disesuaikan. Selain itu skema ini juga dapat berfungsi dengan baik pada mode operasi *grid connected* dan *islanded*. Namun dibalik itu semua ada beberapa kelemahan yang dihadapi oleh metode ini yaitu :

- Ketergantungan dengan saluran komunikasi sangat tinggi, sehingga dibutuhkan skema cadangan jika terjadi kegagalan saluran komunikasi.
- Prinsip kerja *differensial relay* yang membandingkan arus pada kedua sisi ujung zona yang diamankan memerlukan pemasangan peralatan pada kedua ujung tersebut dan saluran komunikasi, sehingga biaya yang ditimbulkan besar.
- Belum bias bekerja pada gangguan dengan impedansi gangguan tinggi.
- Tidak mampu bekerja dengan baik pada kondisi pembebanan yang tidak seimbang dan transient ketika proses penyambungan atau pemutusan DG.

C. Skema Distance Relay

Dalam saluran tiga fasa sesuai Hukum Ohm, jarak berbanding lurus dengan impedansi saluran sesuai. Ini adalah konsep *distance relay* untuk mendeteksi dan memisahkan gangguan pada sistem tenaga listrik [45]. *Relay* jarak efektif mendeteksi gangguan pada saluran transmisi dengan pengaturan jangkauan yang berbeda untuk gangguan didepan dan dibelakang *relay* [46]. *distance relay* sangat selektif, sehingga banyak digunakan untuk proteksi saluran transmisi [47]. Artikel [48] menggunakan aplikasi PSCAD dan MATLAB dengan mengevaluasi karakteristik Mho dan kinerja *distance relay* terhadap sistem distribusi radial untuk beban tidak seimbang, dan gangguan fasa-tanah, dua fasa -tanah, dan dua fasa. Skema ini digabungkan dengan proteksi berbasis time-inverse trip untuk mendeteksi dan mengisolasi gangguan. Skema ini berhasil diterapkan pada mode operasi *grid connected* dan *islanded*. Sistem kontrol terpusat berdasarkan konsep *distance relay* ini diusulkan oleh [49], karena pertimbangan sensitivitas dan selektifitas pengaturan *distance*

relay. Usulan tersebut membantu melakukan modifikasi struktural untuk menyesuaikan dengan keadaan DG dan pemutus tenaga yang digunakan. Sistem komunikasi cerdas antara skema berbasis multi agent diusulkan untuk merancang algoritma proteksi jaringan distribusi pada artikel [50]. Meskipun kinerjanya efektif, keterbatasan utama pendekatan ini adalah tidak efisien mengekstrak arus yang tidak terdistorsi dan admittansi saluran transmisi pendek. Karena perbedaan tingkat arus, ada lebih banyak kemungkinan maloperasi sistem proteksi [51]. Kesalahan ini akan mempengaruhi torsi dan impedansi karena metode ini mendeteksi gangguan menggunakan impedansi urutan negatif. Skema proteksi ini menyediakan skema cadangan membuatnya lebih mudah digunakan seperti yang dijelaskan oleh [40].

Beberapa tantangan dihadapi oleh skema ini diantaranya :

- Adanya komponen harmonik pada periode transien menyebabkan kesulitan untuk mengekstrak komponen arus dan tegangan.
- Penerapannya tidak efektif pada saluran pendek.
- Nilai tahanan gangguan akan mempengaruhi perhitungan impedansi, sehingga mengurangi selektifitas dan sensitifitas.

D. Skema Proteksi Tegangan

Algoritma yang dikembangkan untuk skema proteksi dengan menggunakan differensiasi tegangan diusulkan oleh [45], sehingga sistem dapat mengatasi gangguan internal maupun eksternal. Artikel [52] mengusulkan skema proteksi untuk microgrid pada kondisi *islanded* dengan mempertimbangkan inverter sebagai antarmuka dengan pembangkit mikro. Perbandingan tegangan tiga fasa pada berbagai kondisi sangat kompleks untuk dianalisa. Sehingga, transformasi *d-q* telah digunakan untuk mengubah tegangan AC menjadi komponen DC, dimana besaran tersebut digunakan untuk mendeteksi gangguan dan memisahkan gangguan yang terjadi [53]. Penggunaan tegangan busbar untuk mengembangkan algoritma dan relay proteksi menggunakan computer skala industry dilakukan oleh [54]. Perbandingan kinerja skema proteksi tegangan dengan *ROCOF* (*Rated of Change of Frequency*) pada jenis dan lokasi gangguan yang berbeda dilakukan oleh [55], dimana hanya skema proteksi tegangan yang mampu mendeteksi semua jenis gangguan yang diterapkan. Metode berbasis tegangan dapat digunakan dengan metode matematika seperti yang disampaikan oleh artikel [56]. Algoritma *STFT* (*Short-time Fourier Transform*) lanjutan digunakan untuk memproses tegangan input ke algoritma *decision tree*. Untuk mengurangi beban pada saat validasi data, pendekatan tipe relay berbasis tegangan diusulkan oleh [57]. Metode ini mampu memberikan sensitivitas proteksi yang baik pada microgrid.

Beberapa permasalahan pada skema proteksi tegangan adalah :

- Jatuh tegangan yang terjadi dapat mengakibatkan kerusakan peralatan proteksi.
- Kesulitan mendeteksi gangguan dengan impedansi gangguan tinggi.
- Sangat tergantung terhadap topologi jaringan.

- Keandalan dan sensitifitas pada mode operasi *grid connected* dan *islanded* menjadi permasalahan.

E. Skema pembatasan arus gangguan (*Fault Current Limiter/FCL*)

Artikel [58] mengusulkan pendekatan umum untuk menghitung indeks koordinasi proteksi dengan mempertimbangkan beberapa lokasi DG. Selain itu, FCL digunakan sebagai solusi untuk meningkatkan indeks koordinasi proteksi. Penggunaan FCL yang tidak membutuhkan pengaturan ulang *directional over current relay* tanpa mempertimbangkan DG dilakukan oleh [59]. Kapasitas dan lokasi penempatan FCL dirumuskan untuk mempertahankan koordinasi OCR dengan biaya minim. Pembatas arus gangguan searah (*Unidirectional Fault Current Limiter/UFCL*) diusulkan oleh [60] untuk mendapatkan interaksi yang sesuai antara hilir dan hulu. Pembatas arus gangguan superkonduktor (*Superconducting Fault Current Limiters/SFCL*) digunakan pada [61] untuk mengurangi dampak integrasi DG berbasis mesin sinkron pada saluran distribusi radial dengan proteksi recloser dan fuse. SFCL jenis Modified flux coupling diusulkan oleh [62] untuk mengamati koordinasi proteksi dan meningkatkan kemampuan DG pada *microgrid*. Skema yang diusulkan adalah *directional overcurrent* dan *diffrensial* untuk proteksi *microgrid*. Artikel [63] melakukan modifikasi SFCL menjadi *Superconducting Fault Current Controller/SFCC* hybrid agar bias digunakan pada *microgrid*. Dimana pengoperasian SFCC berdiri sendiri dan tidak tergantung kepada komponen dan peralatan pada suatu sistem.

Kelemahan dari penggunaan FCL diantaranya adalah :

- Diperlukan perhitungan kapasitas FCL dan formulasi penempatan FCL.
- Biaya FDCL yang mahal.
- Impedansi FCL harus mempertimbangkan perkembangan DG.

F. Skema Proteksi Arus Lebih

Beberapa skema arus lebih untuk proteksi microgrid digunakan untuk mencapai keandalan dan keamanan operasi microgrid dalam mode operasi *islanded*. Strategi perlindungan yang komprehensif diusulkan oleh [64]. Strategi ini menggunakan relay mikroprosesor untuk menghindari kehilangan beban kritis dan DG yang berlebihan. Penggunaan metode diagnosis gangguan dan clearing untuk gangguan simetris dan tidak simetris pada sistem distribusi mesh diusulkan oleh [65]. Artikel [66] mengamati Proteksi *directional over current* dan gangguan fasa tanah untuk proteksi jaringan mikro.

Pengembangan relay *directional overcurrent* baru untuk mencegah kesalahan peralatan proteksi yang menggunakan impedansi urutan negatif dan sudut untuk mendeteksi arah gangguan asimetris dilakukan oleh [51]. Sementara impedansi dan arus urutan positif serta sudut torsi digunakan untuk mendeteksi gangguan simetris. Relay digital yang menyertakan fungsi proteksi *diffrensial* untuk proteksi microgrid dari berbagai jenis gangguan dan gangguan impedansi tinggi pada



mode operasi *grid connected* dan *islanded* diusulkan oleh artikel [67].

Dua konsep untuk unit DG yang dikontrol tegangan digunakan di [68]. Yang pertama adalah skema proteksi arus lebih yang bergantung pada pengukuran tegangan untuk mendeteksi gangguan, pembatasan arus gangguan, penentuan arus gangguan, dan mekanisme kontrol untuk pemulihan. Yang kedua adalah skema proteksi overload. Artikel [69] mengusulkan sistem proteksi yang bertujuan untuk meningkatkan keandalan microgrid dan operasi adaptif. Skema ini menggunakan parameter tegangan, arus, dan fase sudut dengan tautan komunikasi untuk proteksi microgrid. Meskipun skema *arus lebih* mampu melindungi microgrid yang memiliki arus gangguan tinggi, namun skema tersebut menghadapi banyak tantangan:

- Karena sebagian besar DG dilengkapi dengan perangkat pembatas arus, arus gangguan terjadi dalam waktu singkat dan berada di luar kemampuan proteksi arus lebih untuk memutuskan gangguan dalam waktu singkat
- Menerapkan proteksi arus berlebih pada mode operasi *grid connected* dan *islanded*.
- Variasi pengoperasian DG menentukan kompleksitas pengaturan proteksi arus berlebih.

G. Skema Komponen Simetris

Komponen simetris menguraikan sistem tiga fasa yang tidak seimbang menjadi tiga urutan fasor, yaitu urutan positif, urutan negatif dan urutan nol. Komponen arus urutan nol digunakan untuk mendeteksi gangguan fasa tanah pada microgrid diusulkan oleh [70]. Sedangkan komponen arus urutan negatif digunakan untuk mendeteksi gangguan fasa-fasa. Skema proteksi berbasis komponen urutan positif menggunakan *Phasor Measurement Unit (PMU)* dan *relay* mikroprosesor dengan saluran komunikasi untuk proteksi microgrid diusulkan oleh [71].

Artikel [72] mengusulkan penggunaan N-Version Programming untuk proteksi microgrid. program tersebut digunakan untuk mendeteksi komponen simetris dan proteksi arus lebih. Artikel [73] mengusulkan skema proteksi berdasarkan komponen gangguan dan pembagian zona microgrid. zona dibagi berdasarkan pada pengaturan yang dapat diterima dari beban kritis dengan DG dan unit penyimpanan energi.

Skema proteksi komponen simetris memiliki beberapa kelemahan, diantaranya :

- Dibutuhkan peralatan tambahan untuk mendeteksi arus komponen urutan nol.
- Tidak mampu mendeteksi gangguan dengan impedansi gangguan tinggi.

V. KESIMPULAN

Skema yang telah diusulkan diatas secara umum telah memberikan solusi untuk permasalahan sistem proteksi jaringan distribusi yang terhubung dengan DG. Namun tidak semua skema mempertimbangkan DG dengan antarmuka inverter, seperti PV yang terhubung ke jaringan distribusi menggunakan inverter. Dimana DG jenis tersebut memiliki arus gangguan yang relatif kecil, sehingga tidak terdeteksi oleh sebagian besar *relay* proteksi. Skema difrensial memerlukan

saluran komunikasi untuk bisa bekerja. Saluran komunikasi diperlukan untuk mengirimkan pembacaan parameter utama pada masing-masing ujung saluran. Dengan demikian, saluran komunikasi dengan kehandalan tinggi tentu saja dibutuhkan. Saluran komunikasi tersebut membutuhkan biaya besar untuk diterapkan. Disamping itu skema proteksi cadangan diperlukan jika terjadi gangguan pada saluran komunikasi, yang semakin menelan biaya besar. Permasalahan lain yang dihadapi adalah fenomena transient pada saat menghubungkan dan memutuskan DG dengan jaringan distribusi, dan ketidakseimbangan beban.

Tahap berikutnya, disarankan mengembangkan skema proteksi yang mampu mengatasi gangguan dalam berbagai kondisi operasi dan gangguan. Penyambungan DG dengan antarmuka inverter harus menjadi perhatian utama. Penggunaan saluran komunikasi harus diminimalisir, agar tidak membutuhkan biaya besar.

REFERENSI

- [1] I. M. A. P. S, R. S. Hartati, and I. N. S. Kumara, "Simulasi Penggunaan Komponen Smart Building untuk Meningkatkan IKE di Gedung Rektorat Universitas Udayana," vol. 21, no. 2, pp. 237–244, 2022.
- [2] U.S. EIA, "International Electricity Data : Electricity-Consumption," 2022. <https://www.eia.gov/international/data/world/electricity/electricity-consumption>
- [3] U.S. EIA, "International Electricity Data : Electricity-Generation," 2022. <https://www.eia.gov/international/data/world/electricity/electricity-generation>
- [4] I. P. Riasa, R. S. Hartati, I. B. G. Manuaba, and D. A. S. Santuari, "Pengaruh PLTB Sidrap Terhadap Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 1, p. 27, 2020, doi: 10.24843/mite.2020.v19i01.p04.
- [5] G. Patrianaya Margayasa Wirsuyana, L. Linawati, I. Bagus Gede Manuaba, and R. Sari Hartati, "Literature Review Metode Reduksi Harmonisa Berbasis Kecerdasan Buatan pada Multilevel Inverter," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 21, no. 1, p. 53, 2022, doi: 10.24843/mite.2022.v21i01.p08.
- [6] H. H. Zeineldin, Y. A. R. I. Mohamed, V. Khadkikar, and V. Ravikumar Pandi, "A protection coordination index for evaluating distributed generation impacts on protection for meshed distribution systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1523–1532, 2013, doi: 10.1109/TSG.2013.2263745.
- [7] A. T. Moore, "DG Protection Overview ES 586b," 2008, [Online]. Available: [https://www.eng.uwo.ca/people/tsidhu/Documents/DG Protection V4.pdf](https://www.eng.uwo.ca/people/tsidhu/Documents/DG%20Protection%20V4.pdf)
- [8] A. Shobole, M. Baysal, M. Wadi, and M. R. Tur, "An adaptive protection technique for smart distribution network," *Elektron. ir Elektrotechnika*, vol. 26, no. 4, pp. 46–56, 2020, doi: 10.5755/J01.EIE.26.4.25778.
- [9] X. Zhang and S. P. Azad, "A Review of the Protection of Microgrids with Converter-Based Resources," in *2020 CIGRE Canada Conference*, 2020.
- [10] R. Sahu, P. K. Panigrahi, and D. K. Lal, "Control and protection of hybrid smart-grid power system: A review," in *Proceedings - 2020 IEEE International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security, iSSSC 2020*, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/iSSSC50941.2020.9358807.
- [11] S. A. Hosseini, H. A. Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, F. Razavi, and A. Nasiri, "An overview of microgrid protection methods and the factors involved," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 174–186, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.089.
- [12] M. Meskin, A. Domijan, and I. Grinberg, "Impact of distributed generation on the protection systems of distribution networks: Analysis and remedies – review paper," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 14, no. 24, pp. 5816–5822, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1652.
- [13] U. Shahzad, S. Kahrobaee, and S. Asgarpoor, "Protection of Distributed Generation: Challenges and Solutions," *Energy Power Eng.*, vol. 09, no. 10, pp. 614–653, 2017, doi: 10.4236/epe.2017.910042.

- [14] A. Chandra, G. K. Singh, and V. Pant, "Protection of AC microgrid integrated with renewable energy sources – A research review and future trends," *Electric Power Systems Research*, vol. 193. Elsevier Ltd, Apr. 2021. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107036.
- [15] M. Awaad, S. F. Mekhamer, and A. Y. Abdelaziz, "Design of an adaptive overcurrent protection scheme for microgrids," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2018, doi: 10.4314/ijest.v10i1.1.
- [16] L. Che, M. E. Khodayar, and M. Shahidehpour, "Adaptive Protection System for Microgrids: Protection practices of a functional microgrid system," *IEEE Electr. Mag.*, vol. 2, no. 1, pp. 66–80, Mar. 2014, doi: 10.1109/MELE.2013.2297031.
- [17] R. Sitharthan, M. Geethanjali, and T. Karpaga Senthil Pandey, "Adaptive protection scheme for smart microgrid with electronically coupled distributed generations," *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 3, pp. 2539–2550, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.aej.2016.06.025.
- [18] E. C. Piescirovsky and N. N. Schulz, "Comparison of Programmable Logic and Setting Group Methods for adaptive overcurrent protection in microgrids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 151, pp. 273–282, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.035.
- [19] E. C. Piescirovsky and N. N. Schulz, "Fuse relay adaptive overcurrent protection scheme for microgrid with distributed generators," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 2, pp. 540–549, Jan. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1144.
- [20] O. V. Gnana Swathika and S. Hemamalini, "Prims-Aided Dijkstra Algorithm for Adaptive Protection in Microgrids," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 4, no. 4, pp. 1279–1286, Dec. 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2016.2581986.
- [21] F. Coffele, C. Booth, and A. Dysko, "An Adaptive Overcurrent Protection Scheme for Distribution Networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 2, pp. 561–568, Apr. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2294879.
- [22] H. Muda and P. Jena, "Superimposed Adaptive Sequence Current Based Microgrid Protection: A New Technique," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 2, pp. 757–767, Apr. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2601921.
- [23] J. Ma, X. Wang, Y. Zhang, Q. Yang, and A. G. Phadke, "A novel adaptive current protection scheme for distribution systems with distributed generation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 1460–1466, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.07.024.
- [24] B. Hussain, S. M. Sharkh, S. Hussain, and M. A. Abusara, "An Adaptive Relaying Scheme for Fuse Saving in Distribution Networks With Distributed Generation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 2, pp. 669–677, Apr. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2224675.
- [25] P. H. Shah and B. R. Bhalja, "New adaptive digital relaying scheme to tackle recloser–fuse miscoordination during distributed generation interconnections," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 4, pp. 682–688, Apr. 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0222.
- [26] M. H. Cintuglu, T. Ma, and O. A. Mohammed, "Protection of Autonomous Microgrids Using Agent-Based Distributed Communication," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 1, pp. 351–360, Feb. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2551368.
- [27] Hengwei Lin, J. M. Guerrero, Chenxi Jia, Zheng-hua Tan, J. C. Vasquez, and Chengxi Liu, "Adaptive overcurrent protection for microgrids in extensive distribution systems," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2016, pp. 4042–4047. doi: 10.1109/IECON.2016.7793091.
- [28] M. N. Alam, "Adaptive Protection Coordination Scheme Using Numerical Directional Overcurrent Relays," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, no. 1, pp. 64–73, Jan. 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2834474.
- [29] S. F. Zarei and M. Parniani, "A Comprehensive Digital Protection Scheme for Low-Voltage Microgrids with Inverter-Based and Conventional Distributed Generations," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 1, pp. 441–452, Feb. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2566264.
- [30] H. Nikkhajoei and R. H. Lasseter, "Microgrid Fault Protection Based on Symmetrical and Differential Current Components," Power System Engineering Research Center, 2006.
- [31] H. Zeineldin, E. El-saadany, and M. A. Salama, "Distributed Generation Micro-Grid Operation: Control and Protection," in *2006 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, 2006, pp. 105–111. doi: 10.1109/PSAMP.2006.285379.
- [32] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "Differential protection of microgrids with central protection unit support," in *IEEE 2013 Tencon - Spring*, Apr. 2013, pp. 15–19. doi: 10.1109/TENCONSpring.2013.6584408.
- [33] A. Pathirana, A. Rajapakse, and N. Perera, "Development of a hybrid protection scheme for active distribution systems using polarities of current transients," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 152, pp. 377–389, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.07.022.
- [34] S. Kar, "A comprehensive protection scheme for micro-grid using fuzzy rule base approach," *Energy Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 449–464, Aug. 2017, doi: 10.1007/s12667-016-0204-x.
- [35] E. Casagrande, W. L. Woon, H. H. Zeineldin, and D. Svetinovic, "A Differential Sequence Component Protection Scheme for Microgrids With Inverter-Based Distributed Generators," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 29–37, Jan. 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2251017.
- [36] S. Ranjbar and S. Jamali, "Comprehensive protection of medium-voltage microgrids," in *2014 Smart Grid Conference (SGC)*, Dec. 2014, pp. 1–7. doi: 10.1109/SGC.2014.7150707.
- [37] A. H. Abdulwahid and S. Wang, "A new differential protection scheme for microgrid using Hilbert space based power setting and fuzzy decision processes," in *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Jun. 2016, pp. 6–11. doi: 10.1109/ICIEA.2016.7603542.
- [38] S. Kar, S. R. Samantaray, and M. D. Zadeh, "Data-Mining Model Based Intelligent Differential Microgrid Protection Scheme," *IEEE Syst. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 1161–1169, Jun. 2017, doi: 10.1109/JSYST.2014.2380432.
- [39] O. Dharmapandit, R. K. Patnaik, and P. K. Dash, "Detection, classification, and location of faults on grid-connected and islanded AC microgrid," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 27, no. 12, Dec. 2017, doi: 10.1002/etep.2431.
- [40] M. Gomes, P. Coelho, and C. Moreira, "Microgrid Protection Schemes," in *Microgrids Design and Implementation*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 311–336. doi: 10.1007/978-3-319-98687-6_12.
- [41] B. K. Chaitanya, A. Yadav, and M. Pazoki, "An improved differential protection scheme for micro-grid using time-frequency transform," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 111, pp. 132–143, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.04.015.
- [42] S. Afrasiabi, M. Afrasiabi, B. Parang, and M. Mohammadi, "Designing a composite deep learning based differential protection scheme of power transformers," *Appl. Soft Comput.*, vol. 87, p. 105975, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105975.
- [43] C. D. Prasad and M. Biswal, "Swarm intelligence-based differential protection scheme for wind integrated transmission system," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 86, p. 106709, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.compeleceng.2020.106709.
- [44] C. D. Prasad, M. Biswal, and A. Y. Abdelaziz, "Adaptive differential protection scheme for wind farm integrated power network," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 187, p. 106452, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106452.
- [45] S. Mirsaeidi, D. Mat Said, M. Wazir Mustafa, M. H. Habibuddin, and M. R. Miveh, "A Comprehensive Overview of Different Protection Schemes in Micro-Grids," *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 327–332, Jul. 2013, doi: 10.1515/ijepes-2013-0051.
- [46] X. Kang, C. E. K. Nuworklo, B. S. Tekpeti, and M. Kheshti, "Protection of micro-grid systems: a comprehensive survey," *J. Eng.*, vol. 2017, no. 13, pp. 1515–1518, Jan. 2017, doi: 10.1049/joe.2017.0584.
- [47] B. J. Brearley and R. R. Prabu, "A review on issues and approaches for microgrid protection," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 988–997, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.047.
- [48] M. Dewadasa, A. Ghosh, G. Ledwich, and M. Wishart, "Fault isolation in distributed generation connected distribution networks," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 10, p. 1053, 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0735.
- [49] H. Lin, C. Liu, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Distance protection for microgrids in distribution system," in *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 2015, pp. 000731–000736. doi: 10.1109/IECON.2015.7392186.
- [50] H. F. Habib, T. Youssef, M. H. Cintuglu, and O. A. Mohammed, "Multi-Agent-Based Technique for Fault Location, Isolation, and Service Restoration," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 3, pp. 1841–1851, May 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2671427.
- [51] A. Hooshyar and R. Iravani, "A New Directional Element for Microgrid



- Protection,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6862–6876, Nov. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2727400.
- [52] H. Al-Nasseri, M. A. Redfern, and R. O’Gorman, “Protecting micro-grid systems containing solid-state converter generation,” in *2005 International Conference on Future Power Systems*, 2005, pp. 5 pp. – 5. doi: 10.1109/FPS.2005.204294.
- [53] H. Al-Nasseri, M. A. Redfern, and F. Li, “A voltage based protection for micro-grids containing power electronic converters,” in *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006, p. 7 pp. doi: 10.1109/PES.2006.1709423.
- [54] X. Wang, Y. Li, and Y. Yu, “Research on the relay protection system for a small laboratory-scale microgrid system,” in *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Jun. 2011, pp. 2712–2716. doi: 10.1109/ICIEA.2011.5976056.
- [55] R. Ndou, J. I. Fadiran, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, “Performance comparison of voltage and frequency based loss of grid protection schemes for microgrids,” in *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESMG.2013.6672788.
- [56] S. Ranjbar, A. R. Farsa, and S. Jamali, “Voltage-based protection of microgrids using decision tree algorithms,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 4, Apr. 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12274.
- [57] P. T. Manditereza and R. C. Bansal, “Protection of microgrids using voltage-based power differential and sensitivity analysis,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 118, p. 105756, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105756.
- [58] L. Huchel, H. H. Zeineldin, and E. F. El-Saadany, “Protection Coordination Index Enhancement Considering Multiple DG Locations Using FCL,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 1, pp. 344–350, Feb. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2533565.
- [59] A. Elmitwally, E. Gouda, and S. Eladawy, “Optimal allocation of fault current limiters for sustaining overcurrent relays coordination in a power system with distributed generation,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 54, no. 4, pp. 1077–1089, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.aej.2015.06.009.
- [60] T. Ghanbari and E. Farjah, “Unidirectional Fault Current Limiter: An Efficient Interface Between the Microgrid and Main Network,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1591–1598, May 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2212728.
- [61] K. Wheeler, M. Elsamahy, and S. Faried, “Use of superconducting fault current limiters for mitigation of distributed generation influences in radial distribution network fuse–recloser protection systems,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 7, pp. 1605–1612, May 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.1156.
- [62] H. He *et al.*, “Application of a SFCL for Fault Ride-Through Capability Enhancement of DG in a Microgrid System and Relay Protection Coordination,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 7, pp. 1–8, Oct. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2599898.
- [63] M. Ebrahimpour, B. Vahidi, and S. H. Hosseinian, “A Hybrid Superconducting Fault Current Controller for DG Networks and Microgrids,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 5, pp. 5604306–5604306, Oct. 2013, doi: 10.1109/TASC.2013.2267776.
- [64] K. Lai, M. S. Illindala, and M. A. Haj-ahmed, “Comprehensive protection strategy for an islanded microgrid using intelligent relays,” in *2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Oct. 2015, pp. 1–11. doi: 10.1109/IAS.2015.7356952.
- [65] K. O. Oureilidis and C. S. Demoulias, “A Fault Clearing Method in Converter-Dominated Microgrids With Conventional Protection Means,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 6, pp. 4628–4640, Jun. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2476702.
- [66] A. H. A. Bakar, B. Ooi, P. Govindasamy, C. Tan, H. A. Illias, and H. Mokhlis, “Directional overcurrent and earth-fault protections for a biomass microgrid system in Malaysia,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 581–591, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.10.004.
- [67] M. A. Zamani, A. Yazdani, and T. S. Sidhu, “Investigations into the operation of an existing medium-voltage distribution feeder as a microgrid,” in *IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011)*, 2011, pp. 42–42. doi: 10.1049/cp.2011.0115.
- [68] A. H. Etemadi and R. Iravani, “Overcurrent and Overload Protection of Directly Voltage-Controlled Distributed Resources in a Microgrid,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 12, pp. 5629–5638, Dec. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2229680.
- [69] D. M. Bui, K.-Y. Lien, S.-L. Chen, Y.-C. Lu, C.-M. Chan, and Y.-R. Chang, “Investigate dynamic and transient characteristics of microgrid operation and develop a fast-scalable-adaptable algorithm for fault protection system,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 120, pp. 214–233, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2014.04.003.
- [70] Z. Akhtar and M. A. Saqib, “Microgrids formed by renewable energy integration into power grids pose electrical protection challenges,” *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 148–157, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.06.053.
- [71] S. Mirsaedi, D. M. Said, M. W. Mustafa, M. H. Habibuddin, and K. Ghaffari, “A Protection Strategy for Micro-Grids Based on Positive-Sequence Impedance,” *Distrib. Gener. Altern. Energy J.*, vol. 31, no. 3, pp. 7–32, Jun. 2016, doi: 10.1080/21563306.2016.11744002.
- [72] A. Hussain, M. Aslam, and S. M. Arif, “N-version programming-based protection scheme for microgrids: A multi-agent system based approach,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 6, pp. 35–45, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.segan.2016.02.001.
- [73] X. Lin, R. Zhang, N. Tong, X. Li, M. Li, and D. Yang, “Regional protection scheme designed for low-voltage micro-grids,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 526–535, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.07.050.