

Unjuk Kerja Algoritma Aliran Daya BFS Baru Berbasis Struktur Data pada Jaringan Distribusi Bertopologi *Meshed*

Taqiyuddin

Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri Universitas Balikpapan
Jln. Pupuk Raya Gn. Bahagia Balikpapan 76114 INDONESIA
Email: taqiyuddin@uniba-bpn.ac.id

Abstract- Microgrid is defined as distributed energy resources and interconnected loads with clear electrical boundaries and acting as a controllable unit with respect to the electrical grid. Integration and control of a large number of sources in a microgrid cannot be done with general controls. New formulations are needed to provide appropriate power flow analysis for microgrids taking into account their specific operating philosophies. In this paper, a new power flow algorithm is evaluated on the performance and characteristics of a simple loop formulation proposed to produce an efficient and robust power flow algorithm based on BFS in mesh networks. The formation of the data structure is part of the initial procedure as a preparation stage before entering the power flow iteration stage. The mesh network equations are solved simultaneously based on a preformed data structure so that it is effective. The proposed algorithm is then tested on the standard IEEE 14 bus test system and compared with other methods to validate the accuracy of the proposed algorithm. Performance evaluation is then carried out to test the robustness of the algorithm based on error deviation, number of iterations and convergence time.

Abstrak- Mikrogrid didefinisikan sebagai sumber daya energi terdistribusi dan beban-beban yang saling berhubungan dengan batas-batas kelistrikan yang jelas dan bertindak sebagai satu kesatuan yang dapat dikontrol sehubungan dengan jaringan listrik. Integrasi dan pengendalian sejumlah besar sumber dalam mikrogrid tidak dimungkinkan dengan kontrol pada umumnya. Formulasi baru diperlukan untuk memberikan analisis aliran daya yang tepat untuk mikrogrid dengan mempertimbangkan filosofi operasi khususnya. Dalam makalah ini, suatu aliran daya baru dievaluasi kinerja dan karakteristik formulasi *loop* sederhana yang diusulkan untuk menghasilkan algoritma aliran daya yang efisien dan robust yang berbasis BFS pada jaringan *mesh*. Pembentukan struktur data menjadi bagian dari prosedur awal sebagai tahap persiapan sebelum masuk ke dalam tahap iterasi aliran daya. Persamaan jaringan *mesh* diselesaikan secara bersamaan berdasarkan struktur data yang telah dibentuk sebelumnya sehingga efektif. Algoritma yang diusulkan kemudian diuji pada sistem uji IEEE 14 bus dan dikomparasi dengan metode lainnya untuk memvalidasi akurasi dari algoritma yang diusulkan. Evaluasi kinerja kemudian dilakukan untuk menguji ketahanan dari algoritma berdasarkan deviasi kesalahan, jumlah iterasi dan waktu konvergensi.

Kata Kunci: *Backward-forward Sweep*, Jaringan Mesh, Mikrogrid, Struktur Data, Sumber Daya Energi Terdistribusi.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pembangkit tenaga listrik yang berbasis pada energi baru terbarukan (EBT) kini sedang berakselerasi dengan cepat. Berbagai jenis sistem tengah berusaha dikembangkan demi memaksimalkan potensi dan efektivitas dari sumber energi lokal yang digunakan. Salah satu jenis sistem yang banyak dikembangkan adalah Mikrogrid. Mikrogrid adalah sekelompok beban dan sumber daya energi terdistribusi yang saling berhubungan dan bertindak sebagai satu kesatuan yang dapat dikontrol sehubungan dengan jaringan listrik. Sistem yang dibangun berbasis sumber energi lokal yang digunakan untuk memberikan suplai demi memenuhi kebutuhan energi lokal. Hal ini dapat menghubungkan dan memutuskan sambungan dari jaringan untuk beroperasi dalam mode terhubung ke jaringan ataupun *islanded*. Perkembangan mikrogrid dan segala aspek yang melingkupinya haruslah dibarengi dengan perkembangan metode dan teknik analisis terhadap aliran daya dari sistem tersebut.

Studi aliran daya sangat penting untuk analisis, pengoperasian, optimasi, dan pengendalian dari jaringan sistem tenaga listrik. Alat dan program analisis aliran daya digunakan dalam perencanaan dan pengoperasian jaringan distribusi sistem tenaga [1]. Berbagai metode aliran daya klasik namun andal seperti Gauss-Seidel (GS), Newton Raphson (NR), dan fast decoupled (FD) digunakan dalam menganalisis aliran daya jaringan [2]-[6]. Namun demikian, teknik-teknik tersebut kadangkala menjadi tidak efisien atau sulit diterapkan secara langsung terutama ketika sistem yang diteliti dalam kondisi buruk (*ill-conditioned*) [7]-[8], sebagaimana halnya terjadi pada sistem distribusi.

Penelitian dengan metode yang khusus diciptakan untuk aliran daya pada sistem distribusi dan ditujukan pada jaringan bertopologi radial menggunakan pendekatan *backward-forward sweep* (BFS) berdasarkan teori jaringan tangga [9]-[10]. BFS melibatkan penghitungan impedansi ekuivalen setiap bus dan sapuan maju dan mundur digunakan untuk memperbarui tegangan dan arus. Pendekatan lain yakni dengan menentukan struktur data untuk membentuk indeks bus dan posisinya serta saluran yang menghubungkan antar bus di dalam sistem distribusi. Hal ini berguna untuk memudahkan penelusuran posisi bus dan saluran dari sistem, sehingga algoritma yang dihasilkan sangat efisien [11]. Namun demikian, pendekatan ini hanya diterapkan pada sistem satu fasa dan topologi radial murni. Penelitian lain dilakukan dengan menerapkan metode BFS pada jaringan *weakly meshed* sebagaimana pada jaringan

radial. Sistem yang berisi jaringan *meshed* diinjeksikan arus pada kedua sisi pada titik pemutusan (*breakpoint*) dengan perhitungan menggunakan teknik kompensasi dan matriks impedansi *breakpoint* [1],[8],[12], sehingga jaringan kembali menjadi seolah-olah sebagai jaringan radial. Di lain pihak, penelitian lainnya dalam studi aliran daya tiga fasa telah menggunakan metode hybrid yakni dengan menggabungkan pendekatan iteratif NR konvensional ke dalam algoritma BFS untuk menghitung aliran daya tiga fase secara efisien dalam mikrogrid berbasis *loop* [13].

Makalah ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan karakteristik formulasi *loop* sederhana yang diusulkan untuk menghasilkan algoritma aliran daya yang efisien dan *robust* yang berbasis BFS pada jaringan *mesh*. Pembentukan struktur data menjadi bagian dari prosedur awal sebagai tahap persiapan sebelum masuk ke dalam tahap iterasi aliran daya. Persamaan jaringan *mesh* diselesaikan secara bersamaan berdasarkan struktur data yang telah dibentuk sebelumnya sehingga efektif. Di samping itu, algoritma yang digunakan di dalam makalah ini, juga sekaligus mampu menangani keberadaan bus-PV secara efisien. Bus-PV merupakan bus generator dan dikenal juga sebagai bus pengontrol tegangan [14].

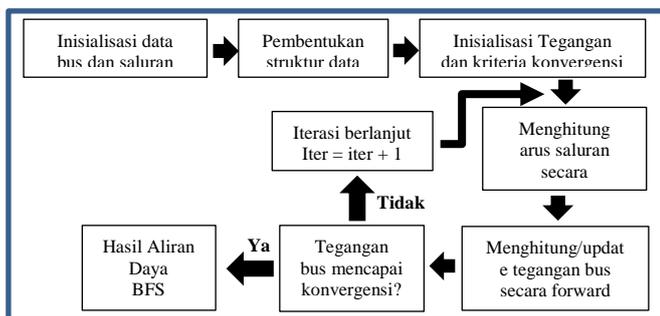
II. BACKWARD-FORWARD SWEEP (BFS)

Proses penerapan algoritma aliran daya berbasis *backward-forward sweep* (BFS) yang berbasis pada struktur data diuraikan pada sub-bagian berikut.

A. Prosedur Metode BFS

Prosedur penyusunan algoritma pada proses aliran daya dengan metode BFS berbasis struktur data dapat dilakukan sebagaimana ditampilkan secara blok diagram pada Gambar 1. Prosedur algoritma secara garis besar dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- pembacaan data sistem distribusi (data generator, beban dan saluran sistem)
- pembentukan struktur data
- pemrosesan aliran daya berdasarkan metode BFS.
- hasil aliran daya



Gambar 1. Blok diagram aliran daya BFS berbasis struktur data.

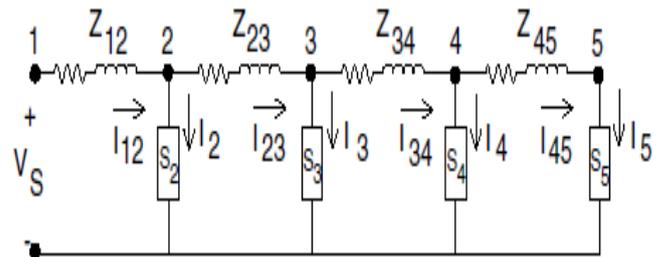
B. Pembentukan Struktur Data

Struktur data terbentuk dari hasil pembacaan data pada jaringan distribusi yang digunakan, yakni dengan cara mengklasifikasikan bus berdasarkan urutan dan jumlah bus, hubungan antar bus dan bus-bus yang terhubung sebagai *loop* serta *layer-layer* bus dalam sistem distribusi tersebut. *Layer*

suatu bus ditentukan berdasarkan “jarak” kekerabatan bus tersebut dari *substation*, sedangkan *substation* sendiri ditentukan berada pada posisi *layer 0*, seperti pada silsilah keluarga hubungan orang tua, anak, cucu, dan seterusnya ke keturunan berikutnya. Dalam hal ini, orang tua dipandang sebagai *layer 0*, seluruh anak berada pada *layer 1*, sedangkan semua cucu dari setiap anak dipandang sebagai *layer 2*, dan seterusnya. Setelah semua bus dipetakan ke dalam masing-masing indeks berupa nomor indeks simpul dengan indeks yang terkait dengannya meliputi: *layer* bus tersebut, jumlah bus yang berada pada *layer* sebelumnya, dan nomor indeks saluran yang menghubungkan bus ke bus yang berada pada *layer* sebelumnya. Demikian pula, dengan sendirinya dapat ditentukan pula jumlah *loop* dan anggota-anggotanya berupa bus yang terhubung dalam *loop* dari sistem tersebut. Hal inilah yang menjadi dasar proses penyusunan algoritma aliran daya BFS berdasarkan struktur data [15].

C. Proses Aliran Daya Berbasis Metode BFS

Aliran daya diawali dengan menentukan nilai tegangan awal sebagai nilai tetap yaitu $1\angle 0^\circ$ pu sebagai proses inisialisasi. Perhitungan aliran daya atau lebih spesifik perhitungan arus saluran dilakukan secara mundur (*backward*) dimulai dari bus-bus yang berada pada *layer* terbesar atau pada posisi kekerabatan terjauh dari *substation*, dalam hal ini bus 5 seperti terlihat pada Gambar 2 [16].



Gambar 2. Proses aliran daya BFS pada jaringan non-linier [16].

Berdasarkan Gambar 2. dengan menghitung arus beban pada setiap bus beban, berdasarkan persamaan (1) berikut:

$$I_n = \left(\frac{S_n}{V_n}\right)^* \tag{1}$$

Jadi dengan menggunakan hukum arus Kirchoff maka arus keseluruhan pada jaringan dapat diperoleh dari nilai tegangan inisiasi setiap bus yaitu nilai arus pada bus-bus pada *layer* sebelumnya dan juga nilai arus pada saluran yang menghubungkannya dapat diketahui. Proses perhitungan ini berlanjut hingga ke *substation*.

Sedangkan proses sebaliknya yaitu proses maju (*forward*) untuk menghitung dan mengupdate nilai tegangan pada setiap bus dapat dilakukan karena nilai arus pada setiap saluran telah diketahui dari proses *backward* sebelumnya. Hal ini dapat dilakukan dengan menerapkan hukum tegangan Kirchoff berdasarkan persamaan (2):

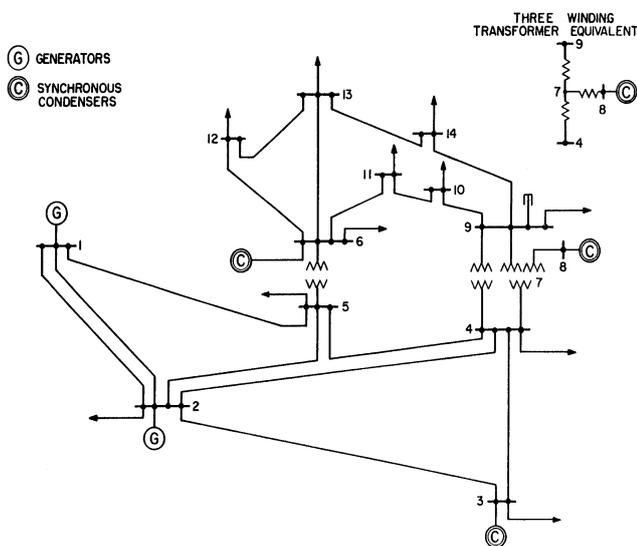
$$V_2 = V_s - Z_{12} \cdot I_{12} \tag{2}$$

Proses *forward* dimulai dari bus pada *layer 1* sampai dengan *layer* terbesar. Setiap kali proses *backward* dan *forward* dikenal dengan 1 (satu) iterasi. Pada setiap akhir iterasi, simpangan

kesalahan tegangan setiap bus dihitung dengan membandingkannya dengan nilai yang sama pada iterasi sebelumnya. Proses ini akan terulang kembali bila nilai deviasi tegangan masih lebih besar dari nilai eror yang telah ditentukan.

III. IMPLEMENTASI METODE BFS

Penerapan dan implementasi algoritma yang telah disusun kemudian diterapkan lebih lanjut pada sistem uji standar IEEE 14 bus dengan jaringan sistem sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3. Sistem uji IEEE 14 bus sendiri merupakan sistem yang mengandung jaringan *mesh* dan sejumlah generator pengontrol sebagai bus-PV atau secara garis besar dapat dinyatakan sebagai sistem yang terdiri dari: 14 bus, 20 saluran, 7 loop, dan 4 bus-PV.



Gambar 3. Diagram satu garis jaringan sistem standar IEEE14 bus

IV. HASIL DAN DISKUSI

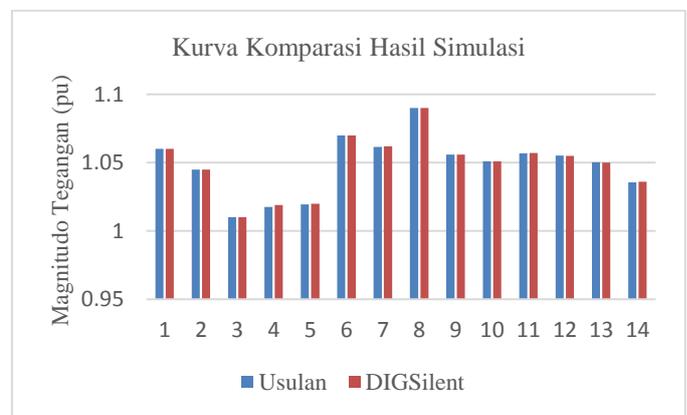
Simulasi diterapkan pada sistem uji standar IEEE 14 bus sebagai aliran daya 1 (satu) fasa dengan batas deviasi eror sebesar 1×10^{-4} . Hasil simulasi yang diperoleh ditampilkan pada Tabel 1.

Hasil yang diperoleh berdasarkan Tabel 1. Di atas, kemudian dilakukan validasi untuk menguji keakuratan hasil simulasi. Komparasi hasil simulasi yang diperoleh dibandingkan dengan hasil sampel simulasi pada sistem 14 bus dari perangkat lunak DIGSILENT [17], sebagaimana ditampilkan secara grafis pada Gambar 4.

Tabel 1. Hasil Simulasi pada sistem IEEE 14 bus

Bus		Tegangan		Beban		Pembangkit	
No	Tipe	Magnitudo	Sudut fasa	Daya P	Daya Q	Daya P	Daya Q
1	2	1.06	0	0	0	2.32	-0.169
2	1	1.045	-4.9825	0.217	0.127	0.4	0.424
3	1	1.01	-12.7254	0.942	0.19	0	0.234

Bus		Tegangan		Beban		Pembangkit	
No	Tipe	Magnitudo	Sudut fasa	Daya P	Daya Q	Daya P	Daya Q
4	0	1.0176	-10.3131	0.478	-0.039	0	0
5	0	1.0195	-8.7739	0.076	0.016	0	0
6	1	1.0699	-14.2216	0.112	0.075	0	0.122
7	0	1.0615	-13.3602	0	0	0	0
8	1	1.0899	-13.3602	0	0	0	0.174
9	0	1.0559	-14.9394	0.295	0.166	0	0
10	0	1.0509	-15.0982	0.09	0.058	0	0
11	0	1.0568	-14.7914	0.035	0.018	0	0
12	0	1.0551	-15.0764	0.061	0.016	0	0
13	0	1.0503	-15.1572	0.135	0.058	0	0
14	0	1.0355	-16.0347	0.149	0.05	0	0
Total				259	73.5	272.4	78.5



Gambar 4. Kurva komparasi dengan metode N-R dan DIGSILENT 14 bus

Dari grafik kurva komparasi yang ditampilkan pada Gambar 4. tersebut, tampak bahwa hasil yang diperoleh, khususnya terkait dengan magnitudo tegangan, memiliki nilai yang sangat mirip dengan hasil simulasi dari metode atau pendekatan lainnya yakni hasil dari perangkat lunak DIGSILENT, sehingga dapat dinyatakan bahwa algoritma yang telah disusun memiliki tingkat akurasi yang baik.

Unjuk kerja dari algoritma BFS yang diusulkan kemudian dievaluasi ketika sistem memiliki (4 bus-PV) dan tidak memiliki generator pengontrol atau bus-PV di dalam sistem. Evaluasi ini untuk membandingkan jumlah dan waktu konvergensi serta deviasi eror maksimum yang diperoleh. Hasil komparasi ini ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi hasil Simulasi pada sistem IEEE 14 bus

Standar Uji Sistem Kelistrikan	IEEE 14 bus	
	w Bus-PV	w/o Bus-PV
Jumlah Loop	7	
Jumlah Bus-PV	4	-
Konvergen pada iterasi	10	8

Standar Uji Sistem Kelistrikan	IEEE 14 bus	
	w Bus-PV	w/o Bus-PV
dvmax	6.E-05	4.E-05
Waktu iterasi (detik)	0.800781	0.632812

Berdasarkan Tabel 2., tampak bahwa deviasi eror (dvmax) yang diperoleh tidak memberikan pengaruh yang berarti ketika algoritma yang diusulkan dibebani dengan sejumlah maksimum generator pengontrol atau PV-bus, yakni 4 bus-PV, jika dibandingkan dengan tanpa bus-PV. Sedangkan ketika dibandingkan berdasarkan jumlah dan waktu konvergeni, tampak terjadi sedikit perbedaan, khususnya ketika dikaitkan dengan waktu komputasi dari hasil akhir simulasi. Dengan demikian, dibutuhkan komparasi lebih detail tentang pengaruh jumlah bus-PV ini, berdasarkan jumlah dan waktu konvergeni, ketika terjadi penambahan atau pengurangan jumlah generator pengontrol (bus-PV) di dalam sistem. Hasil ini dikomparasikan dan ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Komparasi berdasarkan jumlah PV-bus sistem IEEE 14 bus.

Jumlah Bus-PV	Sistem IEEE 14 Bus	
	iterasi	Waktu (dertik)
1	8	0.6875
2	9	0.671875
3	10	0.757812
4	10	0.800781

Berdasarkan Tabel 3. tersebut, tampak bahwa terjadi perubahan jumlah konvergeni yang cukup signifikan, ketika terjadi perubahan sistem karena adanya penambahan jumlah PV-bus yang terlibat di dalam sistem. Namun demikian, penambahan dari sisi waktu, berdasarkan hasil akhir waktu komputasi untuk mencapai konvergeni masih relatif kecil. Sehingga kinerja algoritma yang diusulkan memiliki sifat *robust* terkait dengan penanganan terhadap sejumlah bus-PV di dalam sistem. Dengan demikian, secara keseluruhan dapat dinyatakan bahwa algoritma yang diusulkan memiliki akurasi hasil dan bersifat *robust* dari unjuk kerja yang dimilikinya.

V. KESIMPULAN

Dalam makalah ini, pendekatan metode *backward-forward sweep* (BFS) berbasis struktur data digunakan untuk analisis aliran daya pada sistem uji IEEE 14 bus yang mengandung jaringan *mesh* dan juga adanya genrator pengontrol sebagai interpretasi terhadap penetrasi distributed generator (DG) di dalam sistem distribusi atau secara keseluruhan akan mewakili sistem jaringan mikrogrid. Hasil yang diperoleh berdasarkan nilai tegangan setiap bus memiliki tingkat akurasi yang baik setelah dibandingkan dengan hasil simulasi bawaan dari perangkat lunak DIGSilent. Unjuk kerja dari algoritma yang diusulkan kemudian dievaluasi lebih lanjut berdasarkan deviasi kesalahan, jumlah iterasi untuk mencapai konvergeni, dan

waktu konvergeni secara keseluruhan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa algoritma yang diusulkan memiliki sifat efisien dalam penanganannya dan *robust* terhadap keberadaan sejumlah generator pengontrol atau bus-PV pada jaringan yang bertopologi *mesh* dari sistem distribusi.

PENELITIAN LANJUTAN

Evaluasi kinerja dan penerapannya pada penelitian ini dilakukan pada sistem 1 (satu) fasa. Perluasan penerapan lebih lanjut dari algoritma aliran daya yang dikembangkan terkait dengan struktur data akan dilakukan pada penelitian selanjutnya, terutama pada jaringan distribusi dengan jumlah bus, *loop*, dan DG yang lebih banyak dan juga pada sistem tiga fasa yang tidak seimbang.

REFERENSI

- [1] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 2, pp. 671–679, May 1995.
- [2] K. A. Birt, J. J. Graffy, J. D. McDonald, and A. H. El-Abiad, "Three phase load flow program," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 95, no. 1, pp. 59–65, Jan. 1976.
- [3] A. Garcia and M. Zago, "Three-phase fast decoupled power flow for distribution networks," in IEE Proc. Gener. Transmiss. Distrib., vol. 143, no. 2, pp. 188–192, Mar. 1996.
- [4] X.-P. Zhang, "Fast three phase load flow methods," IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 3, pp. 1547–1554, Aug. 1996.
- [5] H. Le Nguyen, "Newton-raphson method in complex form," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 3, pp. 1355–1359, Aug. 1997.
- [6] F. Zhang and C. S. Cheng, "A modified newton method for radial distribution system power flow analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 1, pp. 389–397, Feb. 1997.
- [7] G.-X. Luo and A. Semlyen, "Efficient load flow for large weakly meshed networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 5, no. 4, pp. 1309–1316, Nov. 1990.
- [8] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlyen, and G. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, no. 2, pp. 753–762, May 1988.
- [9] J.R. Berg, E.S. Hawkins, and W.W. Pleines, "Mechanized calculation of unbalanced load flow on radial distribution circuits," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 86, 4. 1967.
- [10] S. Ghosh, and D. Das, "Method for load-flow solution of radial distribution networks, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, IET Journals & Magazines. 1999.
- [11] G.H.M. Sianipar, and F. Siahaan, "An Efficient Data Structure for Radial Distribution Load Flow, The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy- ICPERE. 2014.
- [12] R.D. Zimmerman, and H.D. Chiang, "Fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution systems," IEEE Transactions on Power Systems. IEEE Power & Energy Society, 10, 4. 1995.
- [13] Wang, M. Shahidehpour, C. Jiang, W. Tian, Z. Li, and Y. Yao, "Three-Phase Distribution Power Flow Calculation for Loop-Based Microgrids," IEEE Transactions on Power Systems, 33, 4. 2017.
- [14] H. Saadat, "Power System Analysis, The McGraw-Hill Publishing Company," New York, USA, page 211. 2001.
- [15] Taqiyuddin, Suwarno, Sianipar, G.H.M., and Nurdin, M., Backward Forward Sweep Algorithm for Unbalanced Three-Phase Power Flow Analysis in Distribution Systems Containing Voltage Regulator, The 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2021.
- [16] Kersting, Distribution System Modelling and Analysis, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [17] DIGSILENT PowerFactory, Additional Examples – Description of the 14 Bus System, DIGSILENT GmbH Gomaringen, Germany, pp 981-982, July 2014.