

PEMODELAN KOMPONEN BERBASIS ARUS INJEKSI UNTUK PERHITUNGAN ALIRAN BEBAN TAK SEIMBANG

Agus Ulinuha¹⁾, Hasyim Asy'ari²⁾, Agus Supardi³⁾

Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

¹⁾ email: Agus.Ulinuha@ums.ac.id

²⁾ email: Hasyim.Asy'ari@ums.ac.id

³⁾ email: Agus.Supardi@ums.ac.id

Abstract

Unbalanced power flow is essential calculation for analysis of unbalanced electrical distribution system. A number of analyses on the system use unbalanced power flow calculation as the backbone of analyses. Therefore the accuracy of the calculation is crucial for the results of analyses. Unbalanced power flow is carried by considering three-phase system of distribution system. One of important aspect on unbalanced power flow calculation is modelling of system components. This paper proposes a model of the components as bus injection current for unbalanced power flow calculation using the method of forward-backward propagation algorithm. The algorithm works directly on the system without modification and requires modeling of shunt components as current injection. The method is appointed due to the robust and good convergence characteristics. The system model and the algorithm are implemented on the IEEE 34-bus system and the generated results are analyzed. Furthermore, the algorithm is also employed for analyzing the system compensated by shunt capacitors and the system improvements are the discussed. The contribution of the paper is inclusion of unbalanced condition for power flow analyses.

Keywords: *unbalanced, system modeling, forward-backward algoritm, system compensation*

1. PENDAHULUAN

Tujuan operasional sistem tenaga listrik adalah memenuhi kebutuhan daya konsumen sesuai standar kualitas yang dapat diterima. Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem kelistrikan yang paling dekat dan berhubungan langsung dengan konsumen. Secara inheren, sistem distribusi merupakan sistem tak seimbang karena ketidaksetimbangan beban dan saluran. Untuk perhitungan dan analisis yang lebih akurat, maka ketidakseimbangan sistem perlu disertakan dalam analisis. Sejauh ini analisis terhadap sistem distribusi dilakukan dengan mengambil asumsi bahwa sistem dalam keadaan seimbang. Dengan demikian, perhitungan cukup dilakukan terhadap salah satu fasa dengan asumsi kedua fasa lainnya mempunyai parameter yang sepenuhnya sama dan hanya terpisah sebesar 120

derajat satu sama lain. Dengan mempertimbangkan realitas bahwa pembebanan pada tiap fasa sangat mungkin berbeda pada tiap saat serta konfigurasi saluran yang mungkin berbeda pada tiap rentang (segmen), maka melibatkan aspek ketidakseimbangan diperlukan untuk memperoleh hasil analisis yang lebih berbasis realitas.

Melakukan perhitungan dan analisis untuk sistem distribusi tak seimbang berimplikasi pada beban komputasi yang lebih berat dibandingkan pada system (yang diasumsikan) seimbang. Hal ini terutama karena ketiga fasa-nya harus diperhitungkan baik beban maupun parameter salurannya. Pemilihan metode perhitungan yang tepat akan memberikan kemungkinan hasil perhitungan yang akurat dengan beban komputasi yang dapat diterima.

Dalam makalah ini, algoritma propagasi maju-balik (*Forward-backward propagation algorithm*) diusulkan untuk perhitungan aliran beban system distribusi tak seimbang. Salah satu aspek penting dalam perhitungan aliran beban tak seimbang adalah pemodelan komponen shunt dalam sistem. Dalam makalah ini komponen sistem akan dimodelkan sebagai arus injeksi yang digunakan dalam perhitungan aliran beban tiga fasa tak seimbang. Dengan pemodelan ini algoritma perhitungan aliran beban dapat langsung bekerja pada sistem tanpa melakukan modifikasi pada sistem.

Hasil perhitungan aliran beban akan dapat dimanfaatkan untuk analisis sistem. Pemodelan dan algoritma yang diusulkan diimplementasikan simulasinya pada sistem standar IEEE 34 bus dan konsep yang dikembangkan dalam penelitian ini diharapkan dapat diimplementasikan pada sistem real dalam proses rencana operasi sistem dalam kurun 24 jam.

2. KAJIAN LITERATUR DAN PENGEMBANGAN HIPOTESIS

Hubungan antara parameter operasional sistem dengan variabel kendali pada sistem sangat tidak linier (*highly nonlinear*). Pemetaan hubungan tersebut dapat diperhitungkan secara teliti dengan analisis aliran beban (*load flow analysis*).

Pada umumnya perhitungan aliran beban dilakukan dengan mengambil asumsi bahwa sistem dalam keadaan seimbang dan perhitungannya cukup dilakukan untuk satu fasa dengan asumsi kedua fasa lainnya sama kecuali perbedaan fasa sebesar 120° . Ketidaksimetrian saluran dan ketidakseimbangan beban mengakibatkan ketidakseimbangan sistem dan dapat dianggap sebagai gangguan dengan tingkat yang perlu dikendalikan agar kompatibilitas elektromagnetik sistem dapat dipertahankan[1]. Dengan mengambil latar belakang tersebut, perhitungan aliran beban perlu dilakukan untuk ketiga fasa-nya untuk hasil perhitungan yang lebih akurat.

Karakteristik sistem distribusi pada umumnya mempunyai konfigurasi radial dengan rasio R/X yang tinggi sehingga dapat

mengakibatkan metode komputasi gagal untuk konvergen sehingga dibutuhkan metode komputasi lanjut untuk perhitungan tersebut [2]. Strategi untuk mengurai sistem tak seimbang agar mudah diselesaikan diklasifikasikan menjadi dua metode, yaitu: dekomposisi sistem tak seimbang menjadi komponen simetrisnya [3, 4], dan pemanfaatan arus injeksi untuk pelepasan kopling antar fasa [5-8]. Sedangkan teknik komputasi yang biasa digunakan untuk perhitungan aliran beban dikelompokkan menjadi dua metode, yaitu: Gauss-Seidel yang membutuhkan banyak iterasi dan progres kalkulasinya lambat [5, 9] dan Newton-Raphson yang meskipun mempunyai karakteristik konvergensi yang baik tetapi beban komputasi pada tiap iterasinya cukup rumit karena memerlukan perhitungan inverse pada Matriks Jacobian [6, 10, 11].

Dalam makalah ini, aliran beban sistem tak seimbang diusulkan menggunakan teknik algoritma propagasi maju-balik (*forward-backward propagation technique*). Metode ini bekerja langsung pada sistem tanpa adanya modifikasi, sehingga tidak memerlukan dekomposisi sistem menjadi komponen simetrisnya atau dekopling sistem kepada tiap fasanya [12]. Metode ini diketahui memiliki kemampuan konvergensi yang baik [2].

3. METODE PENELITIAN

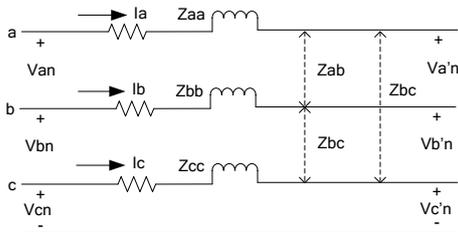
Dalam penelitian yang dilakukan, mula-mula dikembangkan program komputer untuk perhitungan aliran beban tiga fasa tak seimbang. Metode yang digunakan adalah algoritma propogasi maju-balik. Untuk keperluan perhitungan tersebut baik segmen saluran, beban serta komponen lainnya direpresentasikan dalam tiga fasa. Impedansi pada tiap segmen saluran dinyatakan dalam matriks 3×3 . Seluruh perhitungan dilakukan dalam bingkai perhitungan (*calculation frame*) tiga fasa.

Program perhitungan yang telah diselesaikan diimplementasikan pada sistem standar untuk diuji karakteristik konvergensinya. Setelah diyakini program perhitungan berjalan dengan baik maka

piranti lunak tersebut dapat dipergunakan untuk melakukan analisis sistem, diantaranya melihat pengaruh penambahan komponen kapasitor dalam sistem. Untuk keperluan tersebut, perhitungan kembali dilakukan untuk sistem yang sama setelah dilakukan modifikasi dengan menambahkan komponen kompensasi pada lokasi-lokasi tertentu. Hasil perhitungan untuk sistem yang telah dimodifikasi kemudian dianalisis pada perbaikan profil tegangannya dan penekanan susut daya.

3.1. Pemodelan Saluran

Akurasi terhadap hasil perhitungan aliran beban tiga fasa sangat tergantung pada model impedansi saluran yang digunakan. Karena itu, perlu terlebih dahulu ditentukan model saluran tiga fasa yang akan digunakan. Model saluran distribusi pada [13] akan dikembangkan dan digunakan dalam penelitian ini. Sebuah rangkaian ekuivalen bagian saluran tiga fasa adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1:



Gambar 1. Model saluran tiga fasa

Pemodelan saluran tiga fasa mula-mula dilakukan dengan menentukan impedansi sendiri dan impedansi bersama segmen saluran yang merupakan fungsi impedansi saluran dan jarak antar saluran. Persamaan Carson termodifikasi digunakan untuk menentukan impedansi sendiri dan bersama pada model yang digunakan dan dinyatakan dalam persamaan (1) dan (2).

$$z_{ij} = r_i + 0.0953 + j0.12134 \times [\ln(1/GMR_i) + 7.934] \Omega/\text{mi} \tag{1}$$

$$z_{ij} = 0.0953 + j0.12134 \times [\ln(1/D_{ij}) + 7.934] \Omega/\text{mi} \tag{2}$$

Dengan r_i resistansi penghantar (Ω/mile), GMR_i *geometric mean radius* penghantar (ft), dan D_{ij} jarak antara penghantar i dan j (ft).

Penerapan persamaan (1) dan (2) pada saluran tiga fasa pada Gambar 1. Menghasilkan matriks impedansi primitif 4×4 sebagaimana persamaan (3).

$$[Z_{prim}] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{an} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bn} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cn} \\ z_{na} & z_{nb} & z_{nc} & z_{nn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Matriks impedansi primitif tersebut akan direduksi menggunakan rumus reduksi Kron untuk menghasilkan matriks impedansi fasa 3×3 yang tiap elemennya dihitung menggunakan persamaan (4).

$$Z_{ij} = z_{ij} - z_{in}z_{nj}/z_{nn} \tag{4}$$

Matriks impedansi fasa yang dihasilkan adalah sebagaimana persamaan (5)

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \tag{5}$$

3.2. Pemodelan Beban

Beban sistem baik seimbang maupun tak seimbang dinyatakan dalam bentuk kesetaraan arus injeksi. Pemodelan beban sebagaimana pada [5] didopsi dalam makalah ini. Untuk beban tiga fasa terhubung bintang atau beban satu fasa ke netral, arus injeksi ekuivalen pada bus ke- k , dinyatakan pada persamaan berikut:

$$I_m^k = \frac{P_m^k - jQ_m^k}{V_m^{k*}}; m \in [a, b, c] : \text{fasa} \tag{6}$$

Dengan P_m, Q_m, V_m^* masing-masing adalah daya nyata, daya reaktif dan tegangan konjugasi kompleks untuk tiap fasa. Untuk beban tiga fasa yang terhubung delta atau beban satu fasa yang terhubung antar fasa, arus injeksi ekuivalen pada bus ke- k , dinyatakan sebagai:

$$I_a^k = \frac{P_{ab}^k - jQ_{ab}^k}{V_a^{k*} - V_b^{k*}} - \frac{P_{ca}^k - jQ_{ca}^k}{V_c^{k*} - V_a^{k*}}$$

$$I_b^k = \frac{P_{bc}^k - jQ_{bc}^k}{V_b^{k*} - V_c^{k*}} - \frac{P_{ab}^k - jQ_{ab}^k}{V_a^{k*} - V_b^{k*}} \tag{7}$$

$$I_c^k = \frac{P_{ca}^k - jQ_{ca}^k}{V_c^{k*} - V_a^{k*}} - \frac{P_{bc}^k - jQ_{bc}^k}{V_b^{k*} - V_c^{k*}}$$

Dengan $P_n, Q_n, n \in [ab, bc, ca]$, masing-masing menunjukkan beban daya nyata, reaktif yang terhubung antar masing-masing fasa dan $V_m^*, m \in [a, b, c]$ adalah tegangan konjugasi kompleks pada tiap fasa.

3.3. Pemodelan Admitansi Shunt

Kapasitor shunt dalam makalah ini dinyatakan sebagai arus injeksi ekivalen sebagaimana pada [5]. Dengan mengambil asumsi bahwa kapasitor bangku mempunyai hubungan bintang tanpa pentanahan, arus injeksi pada tiap fasa dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} I_a^{sh} &= \frac{y^{sh}}{3} (-2V_a^k + V_b^k + V_c^k) \\ I_b^{sh} &= \frac{y^{sh}}{3} (V_a^k - 2V_b^k + V_c^k) \\ I_c^{sh} &= \frac{y^{sh}}{3} (V_a^k + V_b^k - 2V_c^k) \end{aligned} \tag{8}$$

Dengan $y^{sh} = jQ^0/|V^0|^2$; Q^0 adalah nominal daya reaktif tiap fasa dan $|V^0|$ besaran nominal tegangan pada tiap fasa. Jika kapasitor bangku memiliki hubungan bintang dengan pentanahan, maka arus injeksi dinyatakan sebagai:

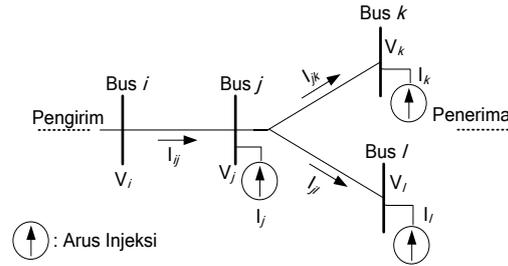
$$\begin{aligned} I_a^{sh} &= -y^{sh} V_a^k \\ I_b^{sh} &= -y^{sh} V_b^k \\ I_c^{sh} &= -y^{sh} V_c^k \end{aligned} \tag{9}$$

3.4. Perhitungan Aliran Beban Tiga Fasa

Untuk perhitungan aliran daya tiga fasa, mula-mula dilakukan pemetaan jaringan distribusi untuk menentukan jalur propagasi maju dan balik kemudian dilanjutkan dengan perhitungan arus saluran dan tegangan bus.

Arus percabangan diperhitungkan dengan menggunakan arus injeksi bus dengan mengambil acuan jalur propagasi balik. Arus percabangan tersebut dihitung secara urut dari ujung saluran menuju sumber daya sistem (*swing bus*). Untuk keperluan tersebut tegangan pada tiap bus mula-mula perlu ditentukan. Pada iterasi pertama, tegangan tiap bus ditentukan sebesar 1.0 pu dengan sudut 0, -120 dan 120, masing-masing untuk fasa *a, b, dan c*. Nilai-nilai tegangan ini kemudian diperbarui (*di-update*)

selama iterasi dan karenanya nilai arus injeksi juga ikut berubah.



Gambar 2. Bagian jaringan distribusi

Bagian dari jaringan sistem distribusi termasuk arus injeksi pada bus tertentu ditunjukkan pada Gambar 2. Perhitungan arus cabang dari arus injeksi bus dengan mengacu bentuk jaringan dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{jk} &= -I_k \\ I_{jl} &= -I_l \\ I_{ij} &= I_{jk} + I_{jl} - I_k \end{aligned} \tag{10}$$

Dengan I_{jk} arus cabang antara bus *j* dan bus *k*, serta I_j arus injeksi pada bus *j*.

Mengacu pada jalur propagasi maju, tegangan pada tiap bus dihitung menggunakan arus cabang yang diperoleh dan impedansi saluran. Tegangan diperhitungkan secara urut dari sumber daya (*swing bus*) menuju ujung saluran. Tegangan pada *swing bus* dipertahankan konstan pada $1.0 \angle 0^0$ pu, $1.0 \angle -120^0$ pu, dan $1.0 \angle 120^0$ pu masing-masing untuk fasa *a, b, dan c*. Untuk bagian sistem distribusi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, tegangan bus dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_j &= V_i - Z_{ij} I_{ij} \\ V_k &= V_j - Z_{jk} I_{jk} \\ V_l &= V_j - Z_{jl} I_{jl} \end{aligned} \tag{11}$$

Dengan V_j tegangan pada bus *j* dan Z_{jk} impedansi pada segmen saluran antara bus *j* dan *k*. Tegangan bus yang telah *di-update* kembali digunakan untuk menghitung arus injeksi bus yang kemudian digunakan untuk menghitung arus percabangan. Dengan demikian, satu iterasi perhitungan telah selesai. Seluruh langkah tersebut kemudian diulangi dan iterasi dihentikan setelah mencapai konvergensi. Kriteria konvergensi

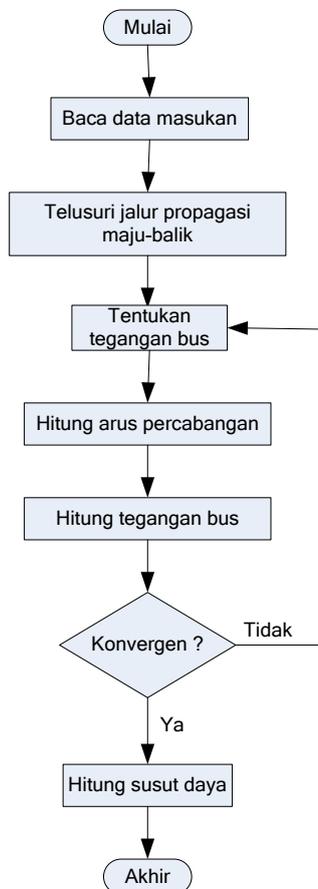
ditentukan sebagai perbedaan nilai tegangan untuk iterasi yang berurutan untuk tiap bus, tiap fasa yang tidak lebih besar dari toleransi yang ditetapkan. Perbedaan tegangan pada bus j sampai dengan iterasi ke- n , dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta V_j^n = V_j^n - V_j^{n-1} \text{ untuk fasa a, b, c}$$

$$\text{Re}(\Delta V_j^n) < \varepsilon; j \in \text{pada semua bus} \quad (12)$$

$$\text{Im}(\Delta V_j^n) < \varepsilon; j \in \text{pada semua bus}$$

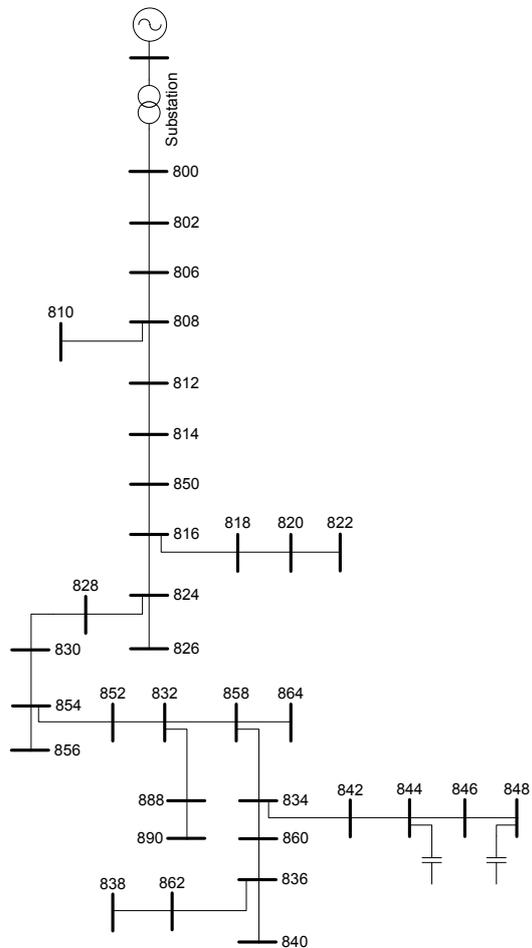
Dengan ε merupakan nilai toleransi yang ditetapkan. Jika kriteria konvergensi dipenuhi, maka iterasi dapat dihentikan dan jika belum dipenuhi maka iterasi perlu diulangi. Begitu kondisi konvergensi diperoleh, maka seluruh nilai arus percabangan dan tegangan bus diketahui. Dengan menggunakan nilai-nilai tersebut, susut daya sistem dapat diperhitungkan.



Gambar 3. Diagram alir perhitungan aliran beban tiga fasa tak seimbang

Diagram alir perhitungan Aliran Beban Tiga Fasa menggunakan Algoritma Propagasi Maju-Balik adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Perlu dicatat disini bahwa seluruh perhitungan dilakukan pada bingkai tiga fasa.

Untuk keperluan evaluasi kondisi operasi sistem karena kompensasi kapasitor shunt, maka program aliran beban yang telah dikembangkan digunakan untuk mengevaluasi sistem distribusi yang telah dipasang kapasitor. Untuk keperluan perbandingan, maka sistem tanpa kompensasi terlebih dahulu diperhitungkan. Evaluasi atas perbaikan kinerja sistem dilakukan dengan melihat perbaikan profil tegangan dan penurunan susut daya sistem distribusi yang dievaluasi.



Gambar 4. Sistem distribusi IEEE 34 bus

4. DATA SISTEM

Sistem distribusi IEEE 34 bus [14] tak seimbang digunakan untuk keperluan perhitungan aliran beban tak seimbang. Modifikasi minor pada sistem dilakukan untuk hanya menggunakan saluran tiga fasa tak simetris. Sedangkan data beban dan kapasitor dipertahankan tetap. Sistem distribusi dimaksud ditunjukkan pada Gambar 4.

Tabel 1 dan 2 menunjukkan data beban seimbang dan tak seimbang pada sistem distribusi. Sedangkan skema tiang distribusi yang sekaligus menunjukkan rentang jarak antar penghantar fasa dan antara penghantar fasa dengan kawat netral adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel1. Beban seimbang sistem distribusi

Bus #	Y/ Δ	Fasa A		Fasa B		Fasa C	
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
860	Y	19.91	15.94	19.91	15.94	19.91	15.94
840	Y	8.86	7.09	8.86	7.09	8.86	7.09
844	Δ	133.4	106.8	133.4	106.8	133.4	106.8
848	Y	19.45	15.57	19.45	15.57	19.45	15.57
890	Δ	27	21.62	27	21.62	27	21.62

Tabel 2. Beban tak seimbang sistem

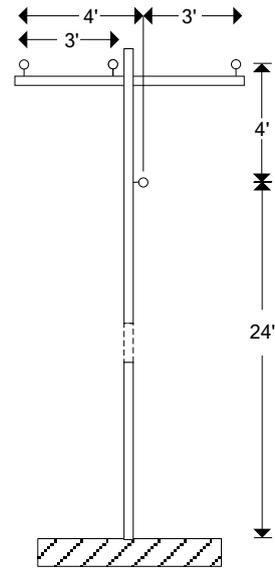
Bus #	Y/ Δ	Fasa A		Fasa B		Fasa C	
		kW	kVA	kW	kVA	kW	kVA
806	Y	0	0	31.2	16.1	26.07	13.8
810	Δ	0	0	15.8	8.21	0	0
820	Δ	33.9	17.5	0	0	0	0
822	Y	135.5	70.0	0	0	0	0
824	Y	0	0	0.39	0.2	0	0
826	Y	0	0	41.9	21.6	0	0
828	Δ	0	0	0	0	2.78	1.44
830	Δ	6.18	3.2	0	0	0	0
834	Y	3.99	2.06	12.5	6.49	12.82	6.63
836	Δ	27.37	14.1	10.5	5.45	42.05	21.7
838	Δ	27.61	14.2	0	0	0	0
840	Y	17.49	9.04	21.8	11.2	0	0
842	Y	0	0	0	0	0	0
844	Δ	9.12	4.71	0	0	0	0
846	Y	0	0	24.5	12.7	22.23	11.4
848	Y	0	0	22.6	11.7	0	0
856	Y	0	0	3.71	1.92	0	0
858	Δ	6.68	3.45	1.08	0.56	5.35	2.77
860	Y	15.66	8.09	20.8	10.7	111.1	57.4
862	Y	0	0	0	0	0	0
864	Δ	0.63	0.33	0	0	0	0

Catatan

1. Swing: bus 800
2. MVA base: 2.5 MVA

Konfigurasi penghantar diberikan pada tabel 3 (kolom ke-3) yang menunjukkan penghantar fasa yang secara urut dipasang mulai dari posisi paling kiri. Seluruh data

yang diperlukan untuk perhitungan juga ditampilkan pada Tabel tersebut.



Gambar 5. Skema tiang saluran distribusi

Tabel 3. Data percabangan sistem

Bus dari	Bus ke	Konfigurasi	pig (ft)	Kondktr fasa		Kondktr Netral	
				R	GMR	R	GMR
800	802	BACN	2580	1.69	0.00418	1.69	0.00418
802	806	BACN	1730	1.69	0.00418	1.69	0.00418
806	808	BACN	32230	1.69	0.00418	1.69	0.00418
808	810	BCAN	5840	2.55	0.00452	2.55	0.00452
808	812	BACN	37500	1.69	0.00418	1.69	0.00418
812	814	BACN	29730	1.69	0.00418	1.69	0.00418
814	850	BACN	10	1.69	0.00418	1.69	0.00418
816	818	ABCN	1710	2.55	0.00452	2.55	0.00452
816	824	BACN	10210	1.69	0.00418	1.69	0.00418
818	820	ABCN	48150	2.55	0.00452	2.55	0.00452
820	822	ABCN	13740	2.55	0.00452	2.55	0.00452
824	826	BCAN	3030	2.55	0.00452	2.55	0.00452
824	828	BACN	840	1.69	0.00418	1.69	0.00418
828	830	BACN	20440	1.69	0.00418	1.69	0.00418
830	854	BACN	520	1.69	0.00418	1.69	0.00418
832	858	BACN	4900	1.69	0.00418	1.69	0.00418
832	888	BACN	100	1.69	0.00418	1.69	0.00418
834	860	BACN	2020	1.69	0.00418	1.69	0.00418
834	842	BACN	280	1.69	0.00418	1.69	0.00418
836	840	BACN	860	1.69	0.00418	1.69	0.00418
836	862	BACN	280	1.69	0.00418	1.69	0.00418
842	844	BACN	1350	1.69	0.00418	1.69	0.00418
844	846	BACN	3640	1.69	0.00418	1.69	0.00418
846	848	BACN	530	1.69	0.00418	1.69	0.00418
850	816	BACN	310	1.69	0.00418	1.69	0.00418
852	832	BACN	10	1.69	0.00418	1.69	0.00418
854	856	BCAN	23330	2.55	0.00452	2.55	0.00452
854	852	BACN	36830	1.69	0.00418	1.69	0.00418
858	864	ABCN	1620	2.55	0.00452	2.55	0.00452
858	834	BACN	5830	1.69	0.00418	1.69	0.00418
860	836	BACN	2680	1.69	0.00418	1.69	0.00418
862	838	ACBN	4860	1.69	0.00418	1.69	0.00418
888	890	BACN	10560	1.12	0.00446	1.12	0.00446

Catatan : R dalam (Ω /mi) dan GMR dalam (ft)

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aliran beban tiga fasa untuk sistem sebagaimana Gambar 3 membutuhkan lima iterasi untuk konvergen. Jumlah iterasi ini dapat dikatakan cukup kecil untuk perhitungan aliran beban tiga fasa. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma yang dipilih cukup robust untuk sistem tak seimbang. Hasil perhitungan termasuk nilai dan sudut tegangan untuk tiap fasa adalah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Nilai susut daya nyata dan reaktif untuk sistem yang dimaksud masing-masing sebesar 8.18 kW dan 3.42 kVAr.

Tabel. 4 Perhitungan aliran beban tak seimbang sistem IEEE 34 bus pada Gambar 3

No Bus	Volt pd fasa a		Volt pd fasa b		Volt pd fasa c	
	Mag	sudut	Mag	sudut	Mag	sudut
800	100	0.00	100	-120.00	100	120.00
802	99.93	-0.01	99.94	-120.01	99.94	119.99
806	99.88	-0.02	99.89	-120.02	99.90	119.98
808	99.01	-0.22	99.19	-120.17	99.17	119.80
810	99.01	-0.22	99.18	-120.18	99.17	119.80
812	97.99	-0.45	98.38	-120.35	98.35	119.58
814	97.18	-0.64	97.75	-120.49	97.70	119.41
816	97.17	-0.64	97.74	-120.49	97.69	119.41
818	97.14	-0.64	97.74	-120.49	97.69	119.41
820	96.32	-0.66	97.84	-120.49	97.66	119.49
822	96.11	-0.67	97.88	-120.49	97.65	119.52
824	97.02	-0.69	97.50	-120.54	97.47	119.33
826	97.02	-0.69	97.49	-120.54	97.48	119.33
828	97.01	-0.69	97.48	-120.54	97.46	119.32
830	96.72	-0.81	97.08	-120.63	97.01	119.17
832	96.20	-1.02	96.36	-120.79	96.19	118.88
834	96.07	-1.08	96.17	-120.84	95.97	118.80
836	96.05	-1.08	96.15	-120.84	95.94	118.80
838	96.04	-1.08	96.14	-120.84	95.94	118.80
840	96.05	-1.08	96.15	-120.84	95.94	118.80
842	96.07	-1.08	96.17	-120.85	95.97	118.80
844	96.07	-1.09	96.16	-120.86	95.96	118.79
846	96.08	-1.11	96.15	-120.87	95.97	118.77
848	96.08	-1.11	96.16	-120.87	95.97	118.77
850	97.18	-0.64	97.75	-120.49	97.70	119.41
852	96.20	-1.02	96.36	-120.79	96.19	118.89
854	96.71	-0.81	97.07	-120.63	97.00	119.16
856	96.71	-0.81	97.06	-120.63	97.00	119.16
858	96.14	-1.05	96.27	-120.82	96.09	118.85
860	96.06	-1.08	96.16	-120.84	95.95	118.80
862	96.05	-1.08	96.15	-120.84	95.94	118.80
864	96.14	-1.05	96.27	-120.82	96.09	118.85
888	96.20	-1.02	96.36	-120.79	96.19	118.89
890	96.18	-1.02	96.34	-120.79	96.17	118.89

Untuk tujuan evaluasi pengaruh pemasangan kapasitor shunt pada sistem distribusi, program aliran beban mula-mula digunakan untuk melakukan analisis terhadap sistem tanpa kompensasi. Setelah itu, sistem kembali dianalisis dengan kompensasi dua buah kapasitor shunt. Jumlah kapasitor, nilai kapasitansinya dan lokasi pemasangannya ditentukan secara tentatif dan pengaruhnya terhadap kinerja sistem kemudian dianalisis.

5.1. Kasus 1: Sistem tanpa kompensasi

Pada sistem tanpa kompensasi, analisis dilakukan untuk sistem distribusi dengan tanpa komponen kapasitor yang terpasang. Pada kondisi tersebut, hasil perhitungan aliran beban memberikan nilai tegangan tiap bus dan tiap fasa. Nilai tegangan terendah untuk tiap fasa adalah sebagai berikut:

1. Fasa A: 94,81% pada bus 838
2. Fasa B: 94,81% pada bus 848
3. Fasa C: 94,64% pada bus 840

Hasil analisis atas sistem yang tidak terpasang padanya kompensator menunjukkan bahwa pada tiap fasa terdapat tegangan pada suatu bus yang lebih rendah dari nilai tegangan minimal yang diijinkan. Hasil selengkapnya tidak disampaikan disini karena keterbatasan tempat dan nilai tegangan minimum diidentifikasi dan dievaluasi untuk memastikan bahwa tidak terdapat nilai tegangan yang lebih rendah yang diabaikan dalam analisis. Hasil perhitungan juga mengindikasikan nilai tegangan minimum tiap fasa terjadi pada bus yang berbeda. Untuk keperluan pemasangan kapasitor shunt sebagai komponen kompensator, perlu dilakukan secara hati-hati terkait dengan hal tersebut, karena bisa jadi menaikkan tegangan fasa tertentu pada bus yang berkaitan dapat menaikkan tegangan pada fasa yang lain pada bus yang berbeda dan karenanya dapat terjadi tegangan lebih pada bus lainnya. Dengan melakukan perhitungan aliran beban, maka kondisi operasi sistem dapat secara komprehensif diketahui untuk memastikan kondisi-kondisi yang dapat diterima sebelum dilakukan pemasangan kompensator secara real. Hasil perhitung aliran beban juga memberikan nilai

susut daya nyata dan reaktif masing-masing sebesar 8,34 kW dan 6,02 kVAr.

Kasus 2: Sistem terkompensasi 2 kapasitor shunt

Sistem distribusi sekarang dikompensasi dengan dua buah kapasitor shunt yang dipasang pada bus 844 dan bus 848. Penunjukan kedua bus tersebut dilakukan secara tentatif, namun salah satu bus merupakan bus dengan nilai tegangan terendah. Detil kapasitor yang dipasang adalah sebagaimana Tabel 4

Tabel 4. Kapasitor pada sistem distribusi

No	Bus	Kapasitansi(kVAr)	Hubungan
1	844	100	Y – <i>ungrounded</i>
2	848	150	Y – <i>grounded</i>

Untuk sistem dengan kompensasi tersebut, hasil perhitungan aliran beban menunjukkan nilai tegangan terendah dan bus yang terkait sebagai berikut

1. Fasa A: 96,04% pada bus 838
2. Fasa B: 96,14% pada bus 838
3. Fasa C: 95,94% pada bus 840

Dari hasil analisis aliran beban dapat diamati bahwa dengan adanya kompensasi pada sistem distribusi, profil tegangan dapat diperbaiki dan susut daya dapat ditekan. Nilai tegangan terendah pada tiap bus untuk setiap fasanya dapat dipertahankan untuk memenuhi batas minimal 95%, sedangkan nilai susut daya real dan reaktif masing-masing adalah 8.18 kW dan 3.42 kVAR. Nilai susut daya ini lebih rendah dibandingkan terhadap susut daya sistem tanpa kompensasi.

6. SIMPULAN

Aliran beban tiga fasa untuk sistem tak seimbang dilakukan perhitungannya dengan teknik algoritma propagasi maju-balik. Untuk keperluan implementasi algoritma, pemodelan sistem berbasis ekivalensi arus injeksi bus perlu dilakukan. Pengaruh pemasangan kapasitor terhadap perbaikan kinerja sistem terkait perbaikan profil tegangan dan penekanan susut daya ditentukan juga dilakukan. Analisis aliran beban tiga dan implementasinya pada analisis kinerja sistem yang diimplementasikan pada sistem distribusi IEEE 34 bus dimaksudkan

untuk memberikan verifikasi bahwa pemodelan dan algoritma bekerja cukup baik. Kesimpulan dan rekomendasi yang bisa ditarik adalah sebagai berikut:

- Algoritma aliran beban menggunakan teknik propagasi maju-balik mempunyai kemampuan diimplementasikan secara langsung terhadap sistem dan karena tidak memerlukan transformasi sistem kedalam komponen simetrisnya atau *decouple* sistem tiga fasa ke dalam masing-masing fasanya sebagaimana metode lainnya,
- Untuk keperluan pemanfaatan algoritma propagasi maju-balik, diperlukan pemodelan komponen shunt sebagai arus injeksi ekivalen,
- Algoritma yang diterapkan menunjukkan kinerja yang robust dengan karakteristik konvergensi yang baik pada sistem distribusi radial,
- Algoritma yang berjalan efektif dapat dimanfaatkan untuk analisis sistem dengan berbagai modifikasinya termasuk analisis pengaruh pemasangan kompensator,
- Pemasangan komponen kompensasi kapasitif dapat memperbaiki profil tegangan sistem dan menekan susut daya nyata dan reaktif.

7. REFERENSI

1. Mayordomo, J.G., et al., *Compact and flexible three-phase power flow based on a full Newton formulation*. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002. **149**(2): p. 225-232.
2. A.Ulinuha, M.A.S. Masoum, and S.M. Islam. *Unbalance Power Flow Calculation for Radial Distribution System Using Forward-Backward Propagation Algorithm*. in *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. 2007. Perth, Australia: Curtin University of Technology.
3. Lo, K.L. and C. Zhang, *Decomposed three-phase power flow solution using the sequence component frame*. IEE Proceedings-Generation, Transmission

- and Distribution, 1993. **140**(3): p. 181-188.
4. Zhang, X.P. and H. Chen, *Asymmetrical three-phase load-flow study based on symmetrical component theory*. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1994. **141**(3): p. 248-252.
 5. Vieira, J.C.M., Jr., W. Freitas, and A. Morelato, *Phase-decoupled method for three-phase power-flow analysis of unbalanced distribution systems*. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004. **151**(5): p. 568-574.
 6. Lin, W.-M. and J.-H. Teng, *Three-phase distribution network fast-decoupled power flow solutions*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2000. **22**(5): p. 375-380.
 7. Cheng, C.S. and D. Shirmohammadi, *A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis*. IEEE Transactions on Power Systems, 1995. **10**(2): p. 671-679.
 8. Chen, T.H., et al., *Distribution system power flow analysis-a rigid approach*. IEEE Transactions on Power Delivery 1991. **6**(3): p. 1146-1152.
 9. Teng, J.-H., *A modified Gauss-Seidel algorithm of three-phase power flow analysis in distribution networks*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2002. **24**(2): p. 97-102.
 10. Garcia, P.A.N., et al., *Three-phase power flow calculations using the current injection method*. IEEE Transactions on Power Systems, 2000. **15**(2): p. 508-514.
 11. da Costa, V.M., M.L. de Oliveira, and M.R. Guedes, *Developments in the analysis of unbalanced three-phase power flow solutions*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2007. **29**(2): p. 175-182.
 12. Thukaram, D., H.M. Wijekoon Banda, and J. Jerome, *A robust three phase power flow algorithm for radial distribution systems*. Electric Power Systems Research, 1999. **50**(3): p. 227-236.
 13. Kersting, W.H. and W.H. Phillips, *Distribution feeder line models*. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995. **31**(4): p. 715-720.
 14. Kersting, W.H., *Radial distribution test feeders*. IEEE Transactions on Power Systems, 1991. **6**(3): p. 975-985.