

Metode Komponen Simetris Untuk Perhitungan Alliran Daya Tak Seimbang Pada Sistem Tenaga Listrik

Nazaruddin¹, Mahalla², Fauzi³, Subhan⁴, Taufik⁵

^{1,2,3,4,5} Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe

Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA

¹nazaruddin@pnl.ac.id

Abstrak— Paper ini bertujuan untuk menghitung aliran daya untuk kondisi beban tak seimbang menggunakan metode komponen simetris. Pembebanan tak seimbang terjadi akibat permintaan daya oleh beban masing-masing fasa tidak sama besar, hal ini terjadi karena pemakaian daya setiap pelanggan tidak sama. Aliran daya tak seimbang merupakan suatu studi penyaluran daya untuk kondisi beban tak seimbang yang akan memberikan gambaran tentang kondisi tegangan, sudut fasa, arus, daya dan rugi-rugi daya tiap-tiap bus pada masing-masing fasa a, b dan c. Untuk kondisi beban tak seimbang perhitungan aliran daya dan tegangan sistem dilakukan masing-masing fasa, hal ini terjadi karena besaran-besaran yang diperoleh dari perhitungan aliran daya masing-masing fasa tidak sama. Perhitungan aliran daya untuk beban tak seimbang menggunakan metode komponen simetris yaitu dengan menguraikan sistem tiga fasa tak seimbang menjadi sistem tiga fasa yang seimbang. Proses komputasi akan dikerjakan dengan menggunakan bahasa pemrograman Matlab yang akan diuji pada sistem IEEE 5 bus. Hasil perhitungan aliran daya beban tak seimbang menggambarkan kondisi setiap bus per fasa. Komputasi mempunyai konvergensi pada iterasi ke 31 dengan bus 1 sebagai bus referensi (*slack bus*) menyuplai daya sebesar 78,75 MW untuk fasa a, 51,34 MW untuk fasa b dan 42,49 MW untuk fasa c. Sistem IEEE 5 bus mempunyai drop tegangan terbesar terjadi bus nomor 5 yaitu sebesar 6,74 %, 4,13%, dan 3,36 % masing-masing untuk fasa a, b dan c. Rugi-rugi daya terbesar terjadi pada saluran yang menghubungkan antara bus 1 dengan bus 3 yaitu sebesar 5,56 %, 3,49 % dan 2,86 % masing-masing untuk fasa a, b dan c.

Kata kunci— aliran daya, beban, tak seimbang, komputasi

Abstract— This paper aims to calculate the power flow for unbalanced load conditions using the symmetric component method. Unbalanced loading occurs due to power demand by consumers of each phase is not the same, this happens because the power consumption of each customer is not the same. Unbalanced load flow is a study of power distribution for unbalanced load conditions which will give an overview of the voltage, phase angle, current, power and losses conditions for each bus in each phase a, b and c. The calculation of power flow for unbalanced loads uses the symmetric component method by breaking down the unbalanced three phase system vector into a balanced three phase system. Computing will be done using the Matlab software which will be tested on the IEEE 5 bus system. The results of the calculation of unbalanced load flow illustrate the condition of each bus per phase. Computation has convergence at 31st iteration with bus 1 as a reference bus (*slack bus*) supplying power of 78.75 MW for phase a, 51.34 MW for phase b and 42.49 MW for phase c. The IEEE 5 bus system has the largest voltage drop occurs bus number 5 which is 6.74%, 4.13%, and 3.36% respectively for phases a, b and c. The biggest power losses occurred in the channel connecting bus 1 to bus 3 that was 5.56%, 3.49% and 2.86% respectively for phases a, b and c.

Keywords— power flow, load, unbalanced, computation

I. PENDAHULUAN

Studi aliran daya merupakan suatu studi yang dibutuhkan untuk mendapatkan gambaran mengenai aliran daya dan tegangan sistem dalam kondisi operasi tunak. Informasi ini sangat dibutuhkan guna mengevaluasi unjuk kerja sistem tenaga listrik dan menganalisa kondisi pembangkitan maupun pembebanan. Analisa ini memerlukan informasi aliran daya dalam kondisi normal maupun darurat[1].

Analisis aliran daya dalam sistem tenaga listrik memerlukan representasi atau pemodelan komponen sistem tenaga listrik. Suatu sistem kelistrikan tiga fasa yang seimbang selalu diselesaikan per fasa dan digambarkan dalam diagram satu garis yang sesuai dengan sistem tersebut. Diagram satu garis dapat memberikan semua informasi yang diperlukan antara lain tegangan masing-masing bus, arus, daya dan faktor daya.

Masalah aliran daya mencakup perhitungan aliran daya dan tegangan sistem pada terminal tertentu. Representasi tunggal selalu dilakukan karena sistem dianggap seimbang [2].

Analisis sistem tiga fasa yang seimbang lebih sederhana, transformasi komponen simetris akan memisahkan sistem tiga fase seimbang menjadi 3 sistem yang berdiri sendiri, yaitu rangkaian urutan positif, urutan negatif dan urutan nol. Selanjutnya dapat diselesaikan dalam bentuk fasa tunggal, digunakan hanya model urutan positif [3].

Beban dari fasa banyak seimbang adalah beban dimana arus yang mengalir pada beban-beban simetris dan beban tersebut dihubungkan pada tegangan yang simetris pula. Dalam menganalisa beban-beban seperti ini biasanya diasumsikan disuplai oleh tegangan simetris pula. Dengan demikian analisa dapat dilakukan secara per fasa saja[4]

Untuk kondisi beban tak seimbang perhitungan aliran daya dan tegangan sistem dilakukan masing-masing fasa, hal ini dilakukan karena besaran-besaran daya, tegangan dan arus-arus masing-masing fasa tidak sama besar. Sistem tiga fasa tak seimbang dapat diuraikan menjadi sistem tiga fasa yang seimbang dengan menggunakan komponen simetris [5].

Suatu sistem menjadi tidak seimbang diakibatkan oleh saluran transmisi yang tidak ditransposisi sehingga jaringan yang tidak simetris, perbedaan ratio tap masing-masing fasa pada transformator tiga fasa, atau operasi tidak normal yaitu lepasnya salah satu fase. Kondisi lain yang menyebabkan beban tak seimbang adalah pemakaian oleh konsumen [6].

Fokus penelitian ini membuat suatu formulasi aliran daya tiga fasa untuk beban tak seimbang, penguraian fasor tak seimbang menggunakan komponen simetris. Komputasi dilakukan dengan perangkat lunak Matlab, dengan objek penelitian adalah sistem IEEE 5 bus.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Metode komponen simetris

C. L. Fortescue (1918) menguraikan tiga fasor tegangan tak seimbang dari sistem tiga fasa menjadi tiga fasa yang seimbang dengan menggunakan komponen simetris. Komponen simetris tersebut yaitu urutan positif, negatif dan urutan nol [5],[7]-[8]. Gambar 1 menunjukkan tiga himpunan komponen simetris.



Gambar 1. Representasi komponen simetris

Dengan menggunakan operator komponen simetris (a) dengan $a = 1 \angle 120^\circ$, dan berpedoman pada gambar 1, maka berlaku hubungan tegangan fasa dengan tegangan komponen urutan simetris:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Misalkan:

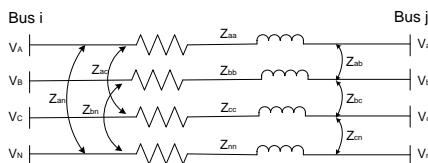
$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

dan:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (4)$$

B. Model sistem tiga fasa tak seimbang

Suatu jaringan tiga fasa antara bus i dan j seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2 Jaringan tiga fasa

Parameter jaringan dapat ditentukan berdasarkan metode yang dikembangkan oleh Carson (1926). Sebuah matriks 4x4 dengan memasukkan induktansi sendiri dan induktansi bersama, dapat dituliskan sebagai berikut [9]:

$$[Z_{abcn}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Untuk sistem yang diketanahkan, VN dan Vn seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2, diasumsikan sama dengan nol. Tanpa memasukkan pengaruh netral, persamaan (5) dapat digunakan untuk menghitung aliran daya tak seimbang.

$$[Z^{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Hubungan antara tegangan bus dan arus cabang dalam gambar 2 dapat dituliskan:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Aa} \\ I_{Bb} \\ I_{Cc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Berdasarkan teori komponen simetris maka impedansi urutan dari penghantar saluran transmisi dapat ditentukan perfasanya.

$$Z^{abc} = \frac{V^{abc}}{I^{abc}} \quad (8)$$

Berdasarkan persamaan (1), impedansi perfasa

$$Z^{abc} = \frac{AV^{012}}{AI^{012}} \quad (7)$$

Sehingga:

$$Z^{012} = A^{-1}Z^{abc}A \quad (8)$$

Persamaan (8) dapat ditulis dalam bentuk matriks:

$$Z^{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Untuk merubah kembali impedansi urutan menjadi impedansi per fasa:

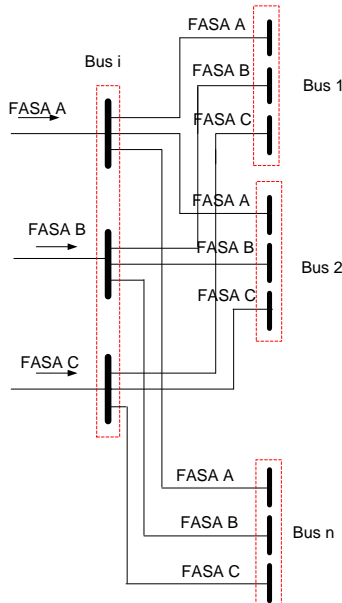
$$Z^{abc} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (10)$$

C. Persamaan aliran daya tiga fasa tak seimbang

Untuk menentukan arus yang mengalir antara bus i dan bus j pada masing-masing fasa pada Gambar 2, berdasarkan persamaan (1) dapat ditulis dalam bentuk:

$$\begin{bmatrix} I_{a_{ij}} \\ I_{b_{ij}} \\ I_{c_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Aa} \\ V_{Bb} \\ V_{Cc} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Misalkan saluran transmisi digambarkan dalam bentuk sistem tiga fasa seperti terlihat pada gambar 3[4],[10]:



Gambar 3 Model bus sistem tenaga tiga fasa

Dari gambar 3 persamaan arus tiga fasa pada bus i dapat ditulis:

$$I_i^p = \sum_{q=a,b,c} V_i^p \sum_{j=0}^n y_{ij}^{p,q} - \sum_{j=1}^n y_{ij}^{p,q} V_j^q \quad (13)$$

dengan $p=a,b,c$

Persamaan daya:

$$S_i^p = V_i^p I_i^{p*} \quad (14)$$

karena

$$S_i^p = P_i^p + jQ_i^p \quad (15)$$

maka

$$P_i^p + jQ_i^p = V_i^p I_i^{p*} \quad (16)$$

atau

$$I_i^p = \frac{P_i^p - jQ_i^p}{(V_i^p)^*} \quad (17)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (13) ke persamaan (17) maka diperoleh

$$\frac{P_i^p - jQ_i^p}{(V_i^p)^*} = V_i^p \sum_{q=a,b,c} \sum_{j=0}^n y_{ij}^{p,q} - \sum_{j=1}^n y_{ij}^{p,q} V_j^q \quad (18)$$

$j \neq i$

dengan $p = a, b, c$

Algoritma perhitungan

1. Data parameter jaringan (dalam bentuk komponen urutan), tegangan, sudut fasa, daya aktif dan daya reaktif (dalam bentuk fasa).
2. Transformasikan impedansi urutan ke dalam bentuk fasa (Z_{abc}) dengan menggunakan persamaan dengan menggunakan persamaan (10).

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

3. Ubah matriks impedansi [Z_{abc}] menjadi matriks admitansi [Y_{abc}].

$$Y_{abc} = \frac{1}{Z_{abc}}$$

4. Tetapkan nilai awal $V_i^{(0)} = 1,05+j0$ dan $V_j^{(0)} = 1+j0$.
5. Hitung tegangan masing-masing bus dengan cara iterasi dengan berdasarkan persamaan (18)

$$V_i^p = \frac{\frac{P_i^{p,sch} - Q_i^{p,sch}}{V_i^{p*}} + \sum_{j=1}^n y_{ij}^{p,q} V_j^q}{\sum_{q=a,b,c} \sum_{j=0}^n y_{ij}^{p,q}}$$

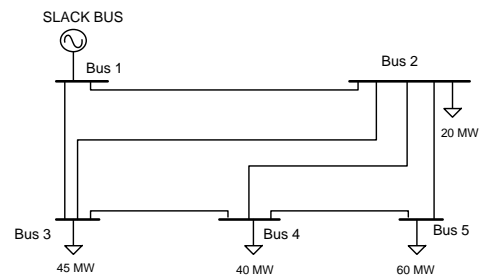
dengan $p = a, b, c$

6. Hitung V_i dan V_j sampai mencapai konvergen.
7. Hitung daya pada slack bus dengan menggunakan persamaan (16).
8. Hitung arus antar bus dengan menggunakan persamaan (17).
9. Hitung Aliran daya berdasarkan persamaan(18):
10. Hitung rugi-rugi daya aktif dan reaktif.

$$S_{loss \ ij}^p = S_{ij}^p + S_{ji}^p, \text{ dengan } p = a, b, c$$

D. Objek Penelitian

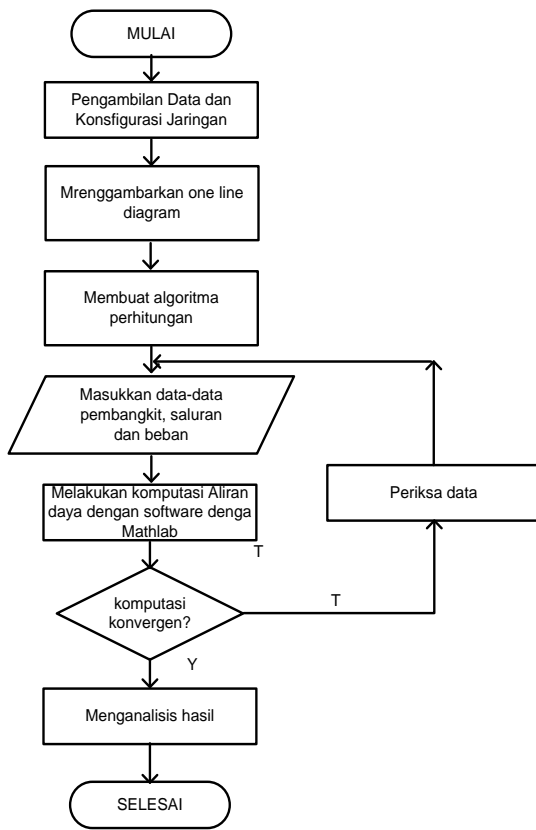
Objek penelitian dalam tulisan adalah sistem IEEE 5 bus [10], konfigurasi jaringan seperti ditunjukkan pada gambar 4:



Gambar 4 Konfigurasi Jaringan sistem IEEE 5 bus

E. Metode pengolahan data

Teknik pengolahan data adalah dengan melakukan komputasi dengan program Matlab, adapun langkah-langkah penelitian ini dapat dibuat dalam bentuk diagram alir seperti terlihat pada Gambar 5 berikut ini:



Gambar 5 Diagram alir penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

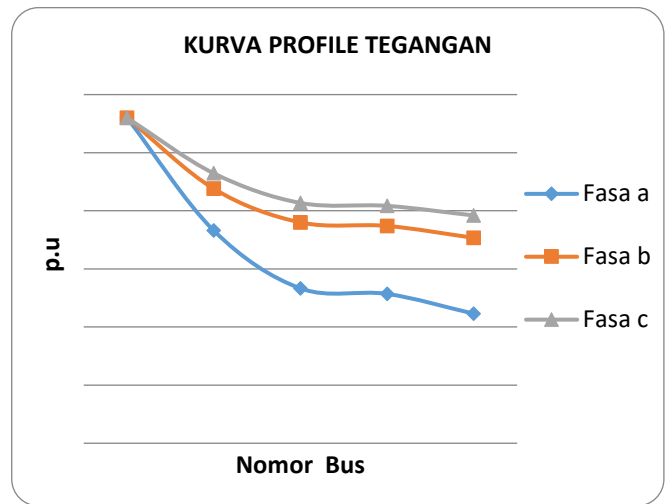
Pengujian dilakukan pada objek penelitian konfigurasi jaringan sistem *IEEE 5 bus* dengan nilai dasar (*base*) sebesar 100 MVA dan 150 kV, kemudian dilakukan komputasi aliran daya untuk beban tak seimbang (*unbalance power flow*) dengan *software* Matlab dengan asumsi beban tak seimbang.

Hasil dari aliran daya menunjukkan gambaran kondisi setiap bus yang meliputi tegangan, daya dan rugi-rugi jaringan masing-masing fasa yaitu fasa a, b dan c. Komputasi aliran daya beban tak seimbang mempunyai konvergensi pada iterasi ke-31. Hasil komputasi berupa profile tegangan setiap bus masing-masing fasa dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

TABEL I
PROFILE TEGANGAN PERFASE UNTUK SISTEM *IEEE 5 BUS*

No Bus	Voltage					
	Fasa a		Fasa b		Fasa c	
	Mag(pu)	Angl(deg)	Mag(pu)	Angl(deg)	Mag(pu)	Angl(deg)
1	0.612	0.000	0.612	0.000	0.612	0.000
2	0.573	-4.763	0.588	-3.093	0.593	-2.558
3	0.553	-8.008	0.576	-5.117	0.583	-4.213
4	0.551	-8.493	0.575	-5.415	0.582	-4.455
5	0.545	-9.771	0.571	-6.194	0.578	-5.008

Tabel 1 menunjukkan profile tegangan setiap bus masing-masing fasa tidak sama besar. Berikut ini hasil dari tabel 1 dapat dibuat dalam bentuk grafik, berturut-turut grafik magnitude tegangan pada tiap-tiap bus masing-masing fasa untuk sistem *IEEE 5 bus* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Kurva Profile Tegangan sistem *IEEE 5 bus*

Gambar 6 menunjukkan besarnya tegangan setiap bus masing-masing fasa untuk sistem *IEEE 5 bus*. Sumbu vertikal sebagai nilai tegangan dalam per unit (pu) dan sumbu horizontal adalah nomor bus., dengan bus nomor 1 dianggap sebagai bus referensi (*slack bus*) menyuplai daya sebesar 78,75 MW untuk fasa a, 51,34 MW untuk fasa b dan 42,49 MW untuk fasa c.

Hasil komputasi menunjukkan bahwa magnitude tegangan pada bus 1 (*slack bus*) yang merupakan tegangan referensi sebesar 100% (0,612 pu) untuk fasa a, b dan c. Nilai tegangan minimum terjadi pada bus nomor 5 yaitu sebesar 0,545 pu, 0,571 pu dan 0,578 pu masing-masing untuk fasa a, b dan c, sehingga pada bus tersebut mengalami drop tegangan sebesar 6,74 %, 4,13 %, dan 3,36 % masing-masing untuk fasa a, b dan c.

Hasil komputasi yang ditunjukkan dalam tabel 2 dan tabel 3 merupakan gambaran aliran daya dan rugi-rugi daya (*losses*) masing-masing fasa.

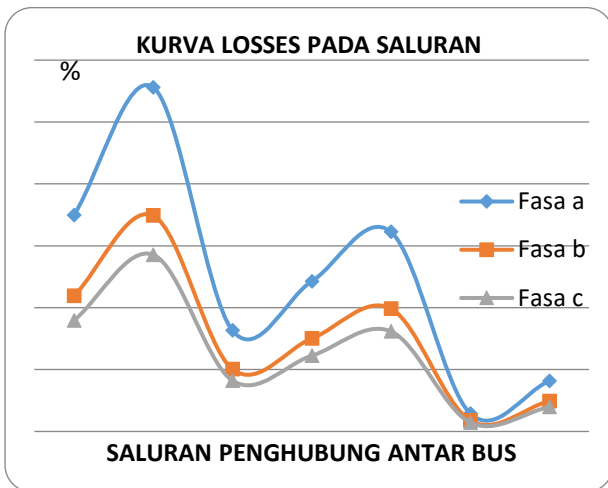
TABEL II
ALIRAN DAYA UNTUK SISTEM *IEEE 5 BUS*

Bus		Aliran daya					
dari	ke	MW(a)	MVAR(a)	MW(b)	MVAR(b)	MW(c)	MVAR(c)
1	2	56.158	22.837	36.616	12.708	30.311	9.971
1	3	22.592	8.815	14.721	4.863	12.183	3.804
2	3	7.874	2.886	5.212	1.764	4.335	1.431
2	4	12.483	3.176	8.239	1.872	6.845	1.500
2	5	24.839	6.388	16.363	3.665	13.588	2.909
3	4	8.832	0.648	5.867	0.369	4.884	0.293
4	5	2.986	0.588	1.972	0.339	1.639	0.270

TABEL III
LOSSES PADA SISTEM *IEEE 5 BUS*

Bus		Losses					
dari	ke	MW(a)	MVAR(a)	MW(b)	MVAR(b)	MW(c)	MVAR(c)
1	2	1.963	5.888	0.802	2.407	0.544	1.631
1	3	1.256	3.769	0.513	1.540	0.348	1.044
2	3	0.128	0.535	0.053	0.219	0.036	0.148
2	4	0.303	0.909	0.124	0.371	0.084	0.251
2	5	0.801	2.402	0.325	0.975	0.220	0.659
3	4	0.026	0.077	0.010	0.031	0.007	0.021
4	5	0.024	0.073	0.010	0.029	0.007	0.020

Hasil tabel 3 dapat dibuat dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 7.



Gambar 7 Karakteristik rugi-rugi daya sistem IEEE 5 bus

Gambar 7 menggambarkan karakteristik rugi-rugi daya (*losses*) pada masing-masing saluran penghubung antar bus pada sistem IEEE 5 bus, dengan rugi-rugi daya terbesar terjadi pada saluran yang menghubungkan antara bus 1 dengan bus 3 yaitu sebesar 5,56 % , 3,49 % dan 2,86 % masing-masing untuk fasa a, b dan c. Sedangkan rugi-rugi daya terkecil terjadi pada saluran yang menghubungkan antara bus 3 ke 4 yaitu sebesar 0,29 % , 0,18 % dan 0,15 % masing-masing untuk fasa a, b dan c.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil komputasi aliran daya untuk beban tak seimbang sistem IEEE 5 bus memberikan gambaran aliran

daya, *drop* tegangan dan rugi-rugi daya pada masing-masing fasa, dengan drop tegangan tertinggi terjadi pada bus nomo 5 yaitu sebesar 6,74 % , 4,13 % , dan 3,36 % masing-masing untuk fasa a, b dan c. Rugi-rugi daya (*losses*) terbesar terjadi pada saluran yang menghubungkan antara bus 1 dengan bus 3 yaitu sebesar 5,56 % , 3,49 % dan 2,86 % masing-masing untuk fasa a, b dan c. Total daya yang disuplai dari bus referensi (*slack bus*) yaitu sebesar 78,75 MW untuk fasa a, 51,34 MW untuk fasa b dan 42,49 MW untuk fasa c.

REFERENSI

- [1] Nazaruddin. 2010. *Simulasi Load Flow pada Jaringan Distribusi 20 KV Sistem Kelistrikan Lhokseumawe*. Prosiding Pekan Ilmiah, UISU, Medan
- [2] Powell, L., 2005, "Power System Load Flow Analysis", McGraw-Hill, USA.
- [3] Zhong, S. dan Abur, A.2002, "Effects of Nontransposed Lines and Unbalanced Loads on State Estimation" IEEE, 0-7803-7322-7/02, 975-979,
- [4] Nazaruddin. 2006. *Analisis Aliran Daya Tak Seimbang pada Sistem Tenaga Listrik Berdasarkan Komponen Simetris*. Tesis FT UGM Yogyakarta
- [5] Stevenson. Jr., 1993, *Analisa Sistem Tenaga Listrik*, Erlangga, Jakarta
- [6] Gupta, BR. 1998. *Power System Analysis and Design*. Wheeler Publishing. New Delhi
- [7] Pulungan, A.B., 2012, "Analisis Aliran Daya Terhadap Daya Tak Seimbang", Jurnal Teknik Elektro ITP, Vol. 1 No. 1, pp 36-40. Padang.
- [8] Saadat. H., 1999, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, New York.
- [9] Teng, J.H.,2000, *A Network-Topology-based Three-Phase Load Flow for Distribution System*, Proc. Natl. Sci. ROC(A), Vol. 24, No. 4, pp. 259-264.
- [10] Nazaruddin. 2018. *Gauss-Seidel Method for Calculation of Unbalance Load Flow*. I-COSINE, PNL, Sabang.