

# Model Rangkaian-T Pembangkit Listrik Tenaga Bayu untuk Analisis Aliran Daya Tiga-Fase

## *(T-Circuit Model of Wind Power Plant for Three-Phase Power Flow Analysis)*

Rudy Gianto<sup>1</sup>

**Abstract**—Recently, penetration of wind power plant in electric power distribution system has increased significantly. The wind power plant penetration can affect the system's steady state and dynamic conditions. Furthermore, as the electric power distribution system is usually unbalanced, it has to be analyzed in a three-phase manner. Therefore, in order for the system conditions to be properly evaluated, development of a three-phase model of the system components (including wind power plant) is necessary. This paper proposes a simple method for modeling and integrating fixed-speed wind power plant for steady state analysis (i.e., power flow analysis) of the three-phase distribution system. The proposed method is based on the T-circuit model which has previously been successfully applied to single-phase electric power systems. In this study, the single-phase T-circuit model is modified and extended so as to facilitate three-phase power flow analysis under unbalanced system conditions. Application of the proposed model in two three-phase distribution systems (i.e. 33-node and 25-node systems) is also investigated and presented in this paper. Results of the investigation show that the proposed method is valid and accurate.

**Intisari**—Akhir-akhir ini, penetrasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) pada sistem distribusi tenaga listrik mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Penetrasi PLTB ini dapat memengaruhi kondisi keadaan mantap dan dinamik sistem tersebut. Lebih lanjut, sistem distribusi tenaga listrik biasanya tidak seimbang, sehingga harus dianalisis secara tiga-fase. Oleh karena itu, agar kondisi-kondisi sistem dapat dievaluasi dengan baik, pembentukan model tiga-fase dari komponen-komponen sistem (termasuk PLTB) merupakan hal yang sangat penting. Makalah ini mengusulkan metode sederhana dalam memodelkan dan mengintegrasikan PLTB kecepatan tetap untuk analisis keadaan mantap (atau analisis aliran daya) sistem distribusi tiga-fase. Metode yang diusulkan tersebut didasarkan pada model rangkaian-T yang sebelumnya telah berhasil diaplikasikan pada sistem fase-tunggal. Pada makalah ini, model rangkaian-T fase-tunggal tersebut dimodifikasi dan diperluas sehingga dapat memfasilitasi analisis aliran daya tiga-fase pada kondisi sistem tak-seimbang. Aplikasi usulan model pada dua sistem distribusi tiga-fase, yaitu sistem 33-simpul dan 25 simpul, juga diselidiki dan disajikan pada makalah ini. Hasil-hasil penyelidikan yang dilakukan pada sistem tersebut memperlihatkan bahwa metode yang diusulkan valid dan akurat.

**Kata Kunci**—Pembangkit Listrik Tenaga Bayu, Analisis Aliran Daya, Sistem Distribusi Tiga-Fase, Model Rangkaian-T.

### I. PENDAHULUAN

Secara umum, sistem distribusi tenaga listrik sangat tidak seimbang [1]. Ketidakseimbangan ini dapat terjadi karena beban pada setiap fase tidak sama dan saluran-saluran distribusi yang tidak ditransposisi. Oleh karena itu, untuk sistem-sistem tersebut, teknik fase-tunggal tidak dapat lagi diaplikasikan dan teknik tiga-fase harus digunakan untuk menganalisisnya. Lebih lanjut, akhir-akhir ini, integrasi dari pembangkit-pembangkit tersebar (*distributed generations*) pada sistem distribusi juga mengalami peningkatan yang cukup signifikan.

Pembangkit-pembangkit tersebar biasanya berukuran kecil dan tersebar pada sistem distribusi. Sumber-sumber energi utama untuk pembangkit tersebar dengan energi terbarukan adalah angin, matahari, dan air. Namun, di antara ketiga sumber energi tersebut, sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) lebih populer dan memiliki perkembangan teknologi yang lebih pesat [1].

Beberapa tahun terakhir ini, telah cukup banyak penelitian yang dilakukan dalam hal pemodelan dan integrasi PLTB pada analisis aliran daya sistem tenaga listrik. Sebagai contoh, telah mengusulkan metode-metode yang cukup menarik dalam mengintegrasikan PLTB kecepatan tetap pada analisis aliran daya [2]-[11]. Rangkaian ekuivalen generator induksi dari PLTB dikonversi menjadi model tiga-simpul, kemudian model tersebut diikutsertakan dalam analisis aliran daya [2]-[4]. Aplikasi dari model tiga-simpul ini akan mengubah analisis aliran daya karena adanya penambahan dua cabang dan dua simpul PQ pada sistem tenaga listrik tempat PLTB tersebut terhubung. Dengan metode ini, program aliran daya standar dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah aliran dayanya dan modifikasi terhadap kode program tidak perlu dilakukan.

Model-model matematik dari PLTB juga telah dikembangkan [5]-[11]. Persamaan-persamaan matematik ini kemudian, bersama-sama dengan persamaan aliran daya yang telah ada, diselesaikan secara iteratif. Referensi [5]-[7] mengusulkan model PLTB yang dibentuk dari persamaan yang diperoleh dari rangkaian ekuivalen- $\Pi$  atau D generator induksi PLTB. Referensi [8] mengusulkan suatu metode yang didasarkan pada teori jaringan dua-terminal. Sementara itu, telah diusulkan juga suatu model yang diperoleh berdasarkan rangkaian ekuivalen Y atau T dari generator induksi PLTB [9]-[11]. Model tersebut diturunkan hanya dengan menggunakan hukum-hukum Kirchhoff dan Ohm.

Model-model PLTB yang diusulkan mengasumsikan sistem adalah seimbang, sehingga teknik aliran daya fase-tunggal

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Jln. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak, INDONESIA (e-mail: rudygianto@gmail.com)

dapat digunakan untuk menganalisisnya [2]-[11]. Namun, seperti yang telah diuraikan sebelumnya, sistem distribusi tenaga listrik umumnya sangat tidak seimbang dan harus dianalisis menggunakan teknik aliran daya tiga-fase. Dengan melihat latar belakang tersebut, makalah ini mengusulkan model PLTB tiga-fase yang dapat digunakan pada sistem-sistem tak seimbang. Metode yang diusulkan ini didasarkan pada model rangkaian-T [9]. Pada makalah ini, modifikasi dan ekstensi terhadap model rangkaian-T [9] dilakukan, sehingga dapat memfasilitasi analisis aliran daya tiga-fase pada kondisi-kondisi sistem tak-seimbang. Perlu dicatat bahwa model pada [9] adalah lebih sederhana dibandingkan model pada [5]-[7] karena metode yang diusulkan pada [9] tidak memerlukan konversi dari rangkaian Y ke rangkaian D. Lebih lanjut, model pada [9] hanya membutuhkan satu set persamaan untuk merepresentasikan PLTB sehingga modifikasi dan ekstensinya pada sistem tiga-fase menjadi lebih mudah.

## II. ANALISIS ALIRAN DAYA SISTEM DISTRIBUSI TIGA-FASE

Masalah aliran daya biasanya diselesaikan menggunakan metode simpul dengan matriks admitans sering dipakai dalam analisisnya. Dalam bentuk besaran-besaran simpul, perilaku sistem distribusi tiga-fase dapat dijelaskan melalui (1).

$$\mathbf{I}^{abc} - \mathbf{Y}^{abc} \mathbf{V}^{abc} = \mathbf{0} \quad (1)$$

dengan

$\mathbf{I}^{abc}$  = vektor dari arus-arus simpul

$\mathbf{V}^{abc}$  = vektor dari tegangan-tegangan simpul

$\mathbf{Y}^{abc}$  = matriks admitans sistem.

Untuk sistem distribusi yang memiliki  $n$  buah simpul,  $\mathbf{I}^{abc}$ ,  $\mathbf{V}^{abc}$ , dan  $\mathbf{Y}^{abc}$  akan memiliki bentuk-bentuk sebagai berikut:

$$\mathbf{I}^{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1^{abc} \\ \mathbf{I}_2^{abc} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{I}_n^{abc} \end{bmatrix}; \mathbf{V}^{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^{abc} \\ \mathbf{V}_2^{abc} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{V}_n^{abc} \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\mathbf{Y}^{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11}^{abc} & \mathbf{Y}_{12}^{abc} & \Lambda & \mathbf{Y}_{1n}^{abc} \\ \mathbf{Y}_{21}^{abc} & \mathbf{Y}_{22}^{abc} & \Lambda & \mathbf{Y}_{2n}^{abc} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ \mathbf{Y}_{n1}^{abc} & \mathbf{Y}_{n2}^{abc} & \Lambda & \mathbf{Y}_{nn}^{abc} \end{bmatrix} \quad (2b)$$

dengan

$$\mathbf{I}_i^{abc} = \begin{bmatrix} I_i^a \\ I_i^b \\ I_i^c \end{bmatrix}; \mathbf{V}_i^{abc} = \begin{bmatrix} V_i^a \\ V_i^b \\ V_i^c \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$\mathbf{Y}_{ii}^{abc} = \begin{bmatrix} Y_{ii}^{aa} & Y_{ii}^{ab} & Y_{ii}^{ac} \\ Y_{ii}^{ba} & Y_{ii}^{bb} & Y_{ii}^{bc} \\ Y_{ii}^{ca} & Y_{ii}^{cb} & Y_{ii}^{cc} \end{bmatrix} \quad (3b)$$

$$\mathbf{Y}_{ij}^{abc} = \begin{bmatrix} Y_{ij}^{aa} & Y_{ij}^{ab} & Y_{ij}^{ac} \\ Y_{ij}^{ba} & Y_{ij}^{bb} & Y_{ij}^{bc} \\ Y_{ij}^{ca} & Y_{ij}^{cb} & Y_{ij}^{cc} \end{bmatrix}. \quad (3c)$$

Vektor arus simpul pada (1) dapat juga dinyatakan dalam bentuk tegangan dan daya simpul seperti berikut.

$$\mathbf{I}^{abc} = \left\{ \left[ \text{diag}(\mathbf{V}^{abc}) \right]^{-1} (\mathbf{S}_G^{abc} - \mathbf{S}_L^{abc}) \right\}^* \quad (4)$$

dengan

$\mathbf{S}_G^{abc}$  = vektor dari daya-daya yang menuju simpul atau daya yang dibangkitkan

$\mathbf{S}_L^{abc}$  = vektor dari daya-daya yang meninggalkan simpul atau daya beban.

Untuk sistem distribusi yang memiliki  $n$  buah simpul, formulasi untuk  $\mathbf{S}_G^{abc}$  dan  $\mathbf{S}_L^{abc}$  diberikan oleh

$$\mathbf{S}_G^{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{G1}^{abc} \\ \mathbf{S}_{G2}^{abc} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{S}_{Gn}^{abc} \end{bmatrix}; \mathbf{S}_L^{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{L1}^{abc} \\ \mathbf{S}_{L2}^{abc} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{S}_{Ln}^{abc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

dengan

$$\mathbf{S}_{Gi}^{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{Gi}^a \\ \mathbf{S}_{Gi}^b \\ \mathbf{S}_{Gi}^c \end{bmatrix}; \mathbf{S}_{Li}^{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{Li}^a \\ \mathbf{S}_{Li}^b \\ \mathbf{S}_{Li}^c \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Substitusi (4) pada (1) menghasilkan

$$\left\{ \left[ \text{diag}(\mathbf{V}^{abc}) \right]^{-1} (\mathbf{S}_G^{abc} - \mathbf{S}_L^{abc}) \right\}^* - \mathbf{Y}^{abc} \mathbf{V}^{abc} = \mathbf{0} \quad (7)$$

Persamaan (7) merupakan formulasi dari masalah aliran daya sistem distribusi tiga-fase. Semua besaran, baik yang diketahui (yang ditentukan) maupun yang tidak diketahui (yang akan dihitung), diperlihatkan pada Tabel I. Terlihat bahwa (7) adalah sekumpulan persamaan-persamaan nonlinier. Dalam analisis aliran daya, persamaan-persamaan ini harus diselesaikan secara simultan. Selanjutnya, hasil-hasil dari analisis aliran daya ini dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi-kondisi keadaan mantap dari sistem distribusi tersebut.

## III. MODEL RANGKAIAN-T DARI PLTB

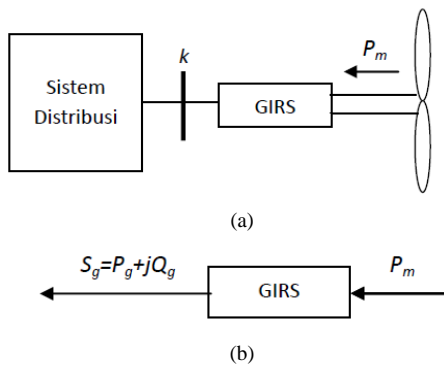
### A. Konfigurasi Dasar PLTB

Dilihat dari kecepatan putarannya, PLTB dapat dibagi ke dalam dua kelompok, yaitu PLTB kecepatan tetap atau hampir tetap dan PLTB kecepatan variabel. Gbr. 1 memperlihatkan PLTB kecepatan tetap yang menggunakan Generator Induksi Rotor Sangkar (GIRS) sebagai konverter energi listrik utamanya [2]-[11]. PLTB tersebut diasumsikan terhubung

TABEL I  
BESARAN-BESARAN DALAM FORMULASI MASALAH ALIRAN DAYA SISTEM  
DISTRIBUSI TIGA-FASE

Simpul	Besaran yang Diketahui	Besaran yang Dicari
GI	$Y^{abc}; S_{Li}^{abc}$ $V_i^{abc} = \begin{bmatrix} 1\angle 0^\circ \\ 1\angle -120^\circ \\ 1\angle 120^\circ \end{bmatrix}$	$S_G^{abc}$
Beban	$Y^{abc}; S_{Li}^{abc}$ $S_G^{abc} = [0 \ 0 \ 0]^T$	$V_i^{abc}$

GI = Gardu Induk



Gbr. 1 PLTB terhubung pada bus-k sistem distribusi.

pada simpul *k* suatu sistem distribusi. Pada Gbr. 1,  $P_m$  adalah masukan daya mekanik turbin dan  $S_g$  adalah keluaran daya listrik PLTB. Gbr. 2 memperlihatkan rangkaian ekuivalen per fase generator induksi PLTB.

Besaran-besaran  $R_s, X_s, R_r, X_r, R_c, X_m, R_r(1-s)/s$ , dan  $s$  pada Gbr. 2(a) berturut-turut menyatakan resistans rangkaian stator, reaktans rangkaian stator, resistans rangkaian rotor, reaktans rangkaian rotor, resistans rangkaian inti magnetik, reaktans rangkaian inti magnetik, resistans dinamik, dan slip generator. Lebih lanjut, besaran-besaran  $V_s, I_s, V_r, I_r$ , and  $I_m$  pada Gbr. 2(b) digunakan untuk menyatakan tegangan stator, arus stator, tegangan rotor, arus rotor, dan arus inti magnetik. Impedans-impedansi  $Z_s, Z_r$ , and  $Z_m$  pada gambar tersebut dapat dihitung melalui persamaan-persamaan berikut.

$$Z_s = R_s + jX_s \tag{8a}$$

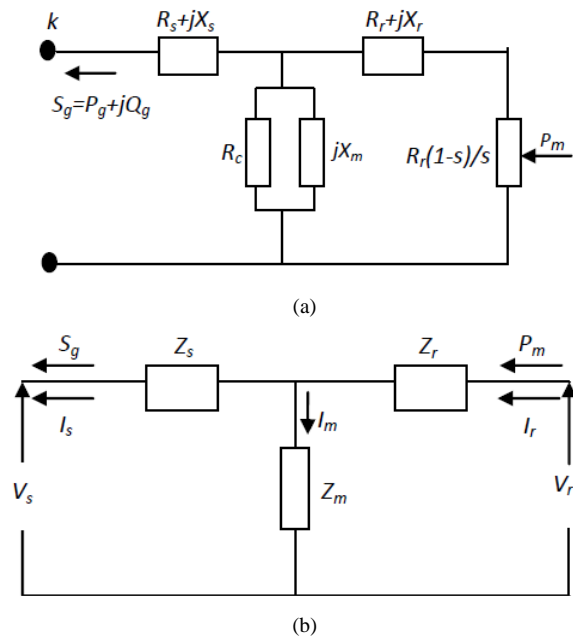
$$Z_r = R_r + jX_r \tag{8b}$$

$$Z_m = jR_c X_m / (R_c + jX_m) \tag{8c}$$

Perlu dicatat bahwa pada Gbr. 2(a), daya mekanik turbin ( $P_m$ ) dinyatakan sebagai daya aktif yang diserap oleh resistans dinamik ( $R_r(1-s)/s$ ), atau

$$P_m = -R_r \frac{1-s}{s} I_r I_r^* \tag{9}$$

Oleh karena itu, sumber daya konstan ekuivalen dapat digunakan untuk menyatakan resistans dinamik tersebut,



Gbr. 2. Rangkaian ekuivalen per fase GIRS.

seperti yang diperlihatkan pada Gbr. 2(b). Dengan demikian, (9) dapat dieliminasi dari persamaan aliran daya dan slip  $s$  dapat dikeluarkan dari perhitungan aliran daya. Perlu dicatat bahwa pabrik pembuat turbin angin biasanya menyediakan kurva daya mekanik turbin, sehingga untuk setiap kecepatan angin, besar daya mekanik turbin tersebut dapat ditentukan atau diketahui nilainya.

**B. Model Rangkaian-T dari PLTB**

Berdasarkan Gbr. 2, keluaran daya listrik PLTB adalah

$$S_g = P_g + jQ_g = V_s I_s^* \tag{10}$$

dan masukan daya mekanik turbin adalah

$$P_m = V_r I_r^* \tag{11}$$

Lebih lanjut, dari Gbr. 2, tegangan rangkaian rotor dirumuskan sebagai

$$V_r = V_s + I_s Z_s + I_r Z_r \tag{12}$$

sedangkan arus rangkaian rotor adalah

$$I_r = I_s + I_m \tag{13}$$

dan arus rangkaian magnetik adalah

$$I_m = \frac{V_s + I_s Z_s}{Z_m} \tag{14}$$

Substitusi (14) pada (13) menghasilkan arus rangkaian rotor sebagai

$$I_r = V_s \frac{1}{Z_m} + I_s \frac{Z_s + Z_m}{Z_m} \tag{15}$$

Dengan menggunakan (15) pada (12), tegangan rangkaian dengan rotor menjadi

$$V_r = V_s \left( 1 + \frac{Z_r}{Z_m} \right) + I_s \left( Z_s + Z_r + \frac{Z_s Z_r}{Z_m} \right). \quad (16)$$

Substitusi (16) dan (15) pada (11) dan mengaturnya kembali menghasilkan

$$P_m = \left( \frac{1}{Z_m^*} + \frac{Z_r}{Z_m Z_m^*} \right) V_s V_s^* + \left( 1 + \frac{Z_s^*}{Z_m^*} + \frac{Z_r}{Z_m} + \frac{Z_s^* Z_r}{Z_m Z_m^*} \right) V_s I_s^* + \left( \frac{Z_s}{Z_m^*} + \frac{Z_s Z_r}{Z_m Z_m^*} + \frac{Z_r}{Z_m^*} \right) V_s^* I_s + \left( Z_s + Z_r + \frac{Z_s Z_s^*}{Z_m^*} + \frac{Z_s Z_r}{Z_m} + \frac{Z_s Z_s^* Z_r}{Z_m Z_m^*} + \frac{Z_s^* Z_r}{Z_m^*} \right) I_s I_s^*. \quad (17)$$

Dengan menggunakan (10) pada (17), rumusan daya mekanik turbin menjadi

$$P_m = Z_{T1} V_v + Z_{T2} S_g + Z_{T3} S_g^* + Z_{T4} S_v \quad (18)$$

dengan

$$V_v = V_s V_s^* \quad (19a)$$

$$S_v = \frac{S_g S_g^*}{V_s V_s^*} \quad (19b)$$

$$Z_{T1} = \frac{1}{Z_m^*} + \frac{Z_r}{Z_m Z_m^*} \quad (19c)$$

$$Z_{T2} = 1 + \frac{Z_s^*}{Z_m^*} + \frac{Z_r}{Z_m} + \frac{Z_s^* Z_r}{Z_m Z_m^*} \quad (19d)$$

$$Z_{T3} = \frac{Z_s}{Z_m^*} + \frac{Z_s Z_r}{Z_m Z_m^*} + \frac{Z_r}{Z_m^*} \quad (19e)$$

$$Z_{T4} = Z_s + Z_r + \frac{Z_s Z_s^*}{Z_m^*} + \frac{Z_s Z_r}{Z_m} + \frac{Z_s Z_s^* Z_r}{Z_m Z_m^*} + \frac{Z_s^* Z_r}{Z_m^*}. \quad (19f)$$

Persamaan (10) merupakan model rangkaian-T fase-tunggal dari PLTB kecepatan tetap. Integrasi model ini pada analisis aliran daya suatu sistem distribusi tenaga listrik dapat dilihat secara lebih detail penelitian sebelumnya [9]. Berikut adalah uraian tentang modifikasi dan ekstensi model tersebut sehingga dapat digunakan untuk analisis aliran daya tiga-fase.

#### IV. MODEL RANGKAIAN-T UNTUK ALIRAN DAYA TIGA-FASE

Untuk sistem tiga-fase, (18) dapat dimodifikasi menjadi sebagai berikut.

$$P_m^{abc} = Z_{T1}^{abc} V_v^{abc} + Z_{T2}^{abc} S_g^{abc} + Z_{T3}^{abc} (S_g^{abc})^* + Z_{T4}^{abc} S_v^{abc} \quad (20)$$

dengan

$$P_m^{abc} = \begin{bmatrix} P_m / 3 \\ P_m / 3 \\ P_m / 3 \end{bmatrix}; S_g^{abc} = \begin{bmatrix} S_g^a \\ S_g^b \\ S_g^c \end{bmatrix} \quad (21a)$$

$$V_v^{abc} = \begin{bmatrix} V_s^a (V_s^a)^* \\ V_s^b (V_s^b)^* \\ V_s^c (V_s^c)^* \end{bmatrix}; S_v^{abc} = \begin{bmatrix} S_g^a (S_g^a)^* / V_s^a (V_s^a)^* \\ S_g^b (S_g^b)^* / V_s^b (V_s^b)^* \\ S_g^c (S_g^c)^* / V_s^c (V_s^c)^* \end{bmatrix} \quad (21b)$$

$$Z_{Ti}^{abc} = \begin{bmatrix} Z_{Ti}^a & 0 & 0 \\ 0 & Z_{Ti}^b & 0 \\ 0 & 0 & Z_{Ti}^c \end{bmatrix}; i = 1, 2, 3, 4. \quad (21c)$$

Elemen-elemen diagonal utama dari matriks  $Z_{Ti}^{abc}$  pada (21c) akan memiliki formulasi sebagai berikut.

$$Z_{T1}^p = \frac{1}{(Z_m^p)^*} + \frac{Z_r^p}{Z_m^p (Z_m^p)^*} \quad (22a)$$

$$Z_{T2}^p = 1 + \frac{(Z_s^p)^*}{(Z_m^p)^*} + \frac{Z_r^p}{Z_m^p} + \frac{(Z_s^p)^* Z_r^p}{Z_m^p (Z_m^p)^*} \quad (22b)$$

$$Z_{T3}^p = \frac{Z_s^p}{(Z_m^p)^*} + \frac{Z_s^p Z_r^p}{Z_m^p (Z_m^p)^*} + \frac{Z_r^p}{(Z_m^p)^*} \quad (22c)$$

$$Z_{T4}^p = Z_s^p + Z_r^p + \frac{Z_s^p (Z_s^p)^*}{(Z_m^p)^*} + \frac{Z_s^p Z_r^p}{Z_m^p} + \frac{Z_s^p (Z_s^p)^* Z_r^p}{Z_m^p (Z_m^p)^*} + \frac{(Z_s^p)^* Z_r^p}{(Z_m^p)^*} \quad (22d)$$

dengan  $p = a, b, c$ ; sedangkan impedans-impedans  $Z_s^p, Z_r^p$ , dan  $Z_m^p$  dihitung menggunakan (23).

$$\begin{aligned} Z_s^p &= R_s^p + jX_s^p \\ Z_r^p &= R_r^p + jX_r^p \\ Z_m^p &= jR_c^p X_m^p / (R_c^p + jX_m^p). \end{aligned} \quad (23)$$

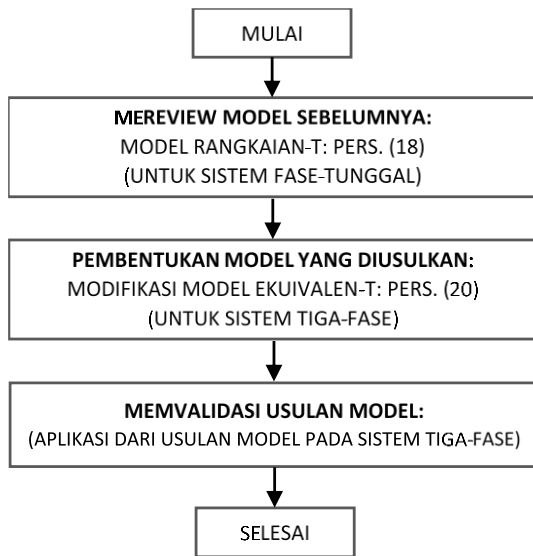
Untuk melakukan analisis aliran daya tiga-fase dari sistem yang mengandung PLTB, pertama-tama, (20) diatur atau ditulis kembali seperti (24).

$$P_m^{abc} - Z_{T1}^{abc} V_v^{abc} - Z_{T2}^{abc} S_g^{abc} - Z_{T3}^{abc} (S_g^{abc})^* - Z_{T4}^{abc} S_v^{abc} = 0. \quad (24)$$

Kemudian, untuk simpul-simpul yang mengandung PLTB, (24) digabungkan dengan (7). Gabungan persamaan ini, bersama-sama dengan persamaan-persamaan simpul lainnya, diselesaikan secara simultan. Tabel II memperlihatkan seluruh besaran dan persamaan dalam formulasi masalah aliran daya tiga-fase untuk sistem distribusi tenaga listrik yang

TABEL II  
 BESARAN-BESARAN DALAM FORMULASI MASALAH ALIRAN DAYA SISTEM  
 DISTRIBUSI TIGA-FASE YANG MENGANDUNG PLTB

Simpul	Pers.	Besaran yang Ditentukan	Besaran yang Dicari
GI	(7)	$Y^{abc}; S_{Li}^{abc}$ $V_i^{abc} = \begin{bmatrix} 1\angle 0^\circ \\ 1\angle -120^\circ \\ 1\angle 120^\circ \end{bmatrix}$	$S_G^{abc}$
Beban	(7)	$Y^{abc}; S_{Li}^{abc}$ $S_G^{abc} = [0 \ 0 \ 0]^T$	$V_i^{abc}$
PLTB	(7) dan (24)	$Y^{abc}; S_{Li}^{abc}$ $Z_s^p; Z_r^p; Z_m^p; p = a, b, c$	$V_i^{abc}; S_g^{abc}$



Gbr. 3 Diagram alir penelitian.

mengandung PLTB. Perlu dicatat bahwa pada formulasi tersebut, tegangan pada simpul PLTB atau tegangan terminal PLTB juga merupakan tegangan stator dari generator induksi PLTB, serta injeksi daya pada simpul PLTB juga merupakan keluaran daya PLTB, sehingga

$$V_j^{abc} = V_s^{abc} \tag{25a}$$

$$S_{Gj}^{abc} = S_g^{abc} \tag{25b}$$

dengan  $j$  adalah simpul tempat PLTB tersebut terhubung.

Persamaan (7) dan (24) merupakan formulasi lengkap masalah aliran daya dari sistem distribusi tiga-fase yang mengandung PLTB. Sesuai diagram alir pada Gbr. 3, langkah selanjutnya adalah melakukan validasi terhadap usulan model dengan cara menerapkannya pada sistem distribusi tiga-fase. Hal ini akan dibahas pada subbagian berikutnya.

TABEL III  
 DATA SISTEM 33-SIMPUL

Sal.	Simpul Kirim	Simpul Terima	Impedans*		Beban**	
			R (ohm)	X (ohm)	$P_L$ (kW)	$Q_L$ (kVAR)
1	1	2	0,0922	0,0470	100	60
2	2	3	0,4930	0,2511	90	40
3	3	4	0,3660	0,1864	120	80
4	4	5	0,3811	0,1941	60	30
5	5	6	0,8190	0,7070	60	20
6	6	7	0,1872	0,6188	200	100
7	7	8	1,7114	1,2351	200	100
8	8	9	1,0300	0,7400	60	20
9	9	10	1,0440	0,7400	60	20
10	10	11	0,1966	0,0650	45	30
11	11	12	0,3744	0,1238	60	35
12	12	13	1,4680	1,1550	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	120	80
14	14	15	0,5910	0,5260	60	10
15	15	16	0,7463	0,5450	60	20
16	16	17	1,2890	1,7210	60	20
17	17	18	0,7320	0,5740	90	40
18	2	19	0,1640	0,1565	90	40
19	19	20	1,5042	1,3554	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	90	40
22	3	23	0,4512	0,3083	90	50
23	23	24	0,8980	0,7091	420	200
24	24	25	0,8960	0,7011	420	200
25	6	26	0,2030	0,1034	60	25
26	26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	27	28	1,0590	0,9337	60	20
28	28	29	0,8042	0,7006	120	70
29	29	30	0,5075	0,2585	200	600
30	30	31	0,9744	0,9630	150	70
31	31	32	0,3105	0,3619	210	100
32	32	33	0,3410	0,5302	60	40

\*Impedans:  $Z^a = Z^b = Z^c = R + jX; Z^{ab} = Z^{bc} = Z^{ca} = 0$

\*\*Beban:  $S_L^a = S_L^b = S_L^c = P_L + jQ_L$

\*\*Beban terhubung pada simpul terima

V. STUDI KASUS

A. Sistem Test

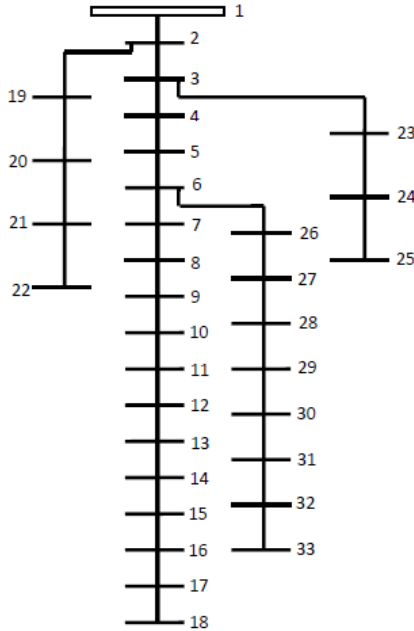
Untuk memvalidasi metode yang diusulkan pada bagian IV, dua sistem distribusi berikut akan digunakan.

1) *Sistem Distribusi 33-Simpul*: Diagram garis tunggal dari sistem 33-simpul diperlihatkan pada Gbr. 4 [8], [9], [12]. Sistem ini adalah sistem seimbang 12,66 kV dengan beban total tiga-fase sebesar 11.145 kW dan 6.900 kVAR (per fase: 3.715 kW dan 2.300 kVAR). Data sistem disajikan pada Tabel III. Karena seimbang, sistem dapat dianalisis dengan menggunakan teknik fase-tunggal. Namun, pada makalah ini sistem dianalisis menggunakan teknik tiga-fase untuk keperluan proses validasi dari metode yang diusulkan pada bagian IV. PLTB dengan rating daya 3 MW diasumsikan terhubung pada simpul 33. Data dari generator induksi PLTB diperlihatkan pada Tabel IV.

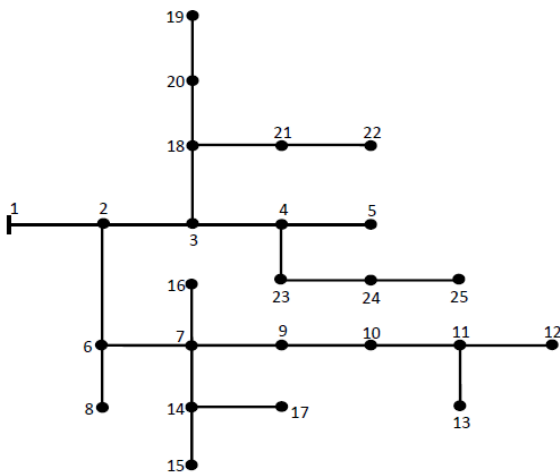
2) *Sistem Distribusi 25-Simpul*: Diagram garis tunggal dari sistem 25-simpul diperlihatkan pada Gbr. 5 [13], [14]. Tidak

TABEL IV  
DATA GIRS PLTB SISTEM 33-SIMPUL

Parameter	Nilai Resistansi/Reaktansi (ohm)
Rangkaian stator	$R_s^a = R_s^b = R_s^c = 1,602756$ $X_s^a = X_s^b = X_s^c = 8,013780$
Rangkaian rotor	$R_r^a = R_r^b = R_r^c = 1,602756$ $X_r^a = X_r^b = X_r^c = 8,013780$
Rangkaian inti magnetik	$R_c^a = R_c^b = R_c^c = 16,027,560$ $X_m^a = X_m^b = X_m^c = 801,378$



Gbr. 4 Sistem distribusi 33-simpul.



Gbr. 5 Sistem distribusi 25-simpul.

seperti sistem 33-simpul, sistem 25-simpul merupakan sistem tak-seimbang 4,16 kV dengan beban total tiga-fase sebesar 3.919,9 kW dan 2.884 kVAR (fase-a: 1.298,3 kW dan 957 kVAR; fase-b: 1.318,3 kW dan 967 kVAR; fase-c: 1.303,3 kW dan 960 kVAR). Data sistem diberikan pada Tabel V sampai Tabel VII. PLTB dengan rating daya 3 MW diasumsikan terhubung pada simpul 25. Data dari generator induksi PLTB diperlihatkan pada Tabel VIII.

TABEL V  
IMPEDANS SALURAN SISTEM 25-SIMPUL

Tipe Konduktor	a	Impedans (ohm/mil)		
		b	c	
1	a	0,3686+j0,6852	0,0169+j0,1515	0,0155+j0,1098
	b	0,0169+j0,1515	0,3757+j0,6715	0,0188+j0,2072
	c	0,0155+j0,1098	0,0188+j0,2072	0,3723+j0,6783
2	a	0,9775+j0,8717	0,0167+j0,1697	0,0152+j0,1264
	b	0,0167+j0,1697	0,9844+j0,8654	0,0186+j0,2275
	c	0,0152+j0,1264	0,0186+j0,2275	0,9810+j0,8648
3	a	1,9280+j1,4194	0,0161+j0,1183	0,0161+j0,1183
	b	0,0161+j0,1183	1,9308+j1,4215	0,0161+j0,1183
	c	0,0161+j0,1183	0,0161+j0,1183	1,9337+j1,4236

TABEL VI  
TIPE DAN PANJANG SALURAN SISTEM 25-SIMPUL

No.	Saluran	Tipe Konduktor	Panjang (ft)
1	1 – 2	1	1.000
2	2 – 3	1	500
3	2 – 6	2	500
4	3 – 4	1	500
5	3 – 18	2	500
6	4 – 5	2	500
7	4 – 23	2	400
8	6 – 7	2	500
9	6 – 8	2	1.000
10	7 – 9	2	500
11	7 – 14	2	500
12	7 – 16	2	500
13	9 – 10	2	500
14	10 – 11	2	300
15	11 – 12	3	200
16	11 – 13	3	200
17	14 – 15	2	300
18	14 – 17	3	300
19	18 – 20	2	500
20	18 – 21	3	400
21	20 – 19	3	400
22	21 – 22	3	400
23	23 – 24	2	400
24	24 – 25	3	400

B. Hasil dan Pembahasan

Hasil-hasil dari analisis aliran daya untuk sistem distribusi 33-simpul diperlihatkan pada Tabel IX sampai Tabel XII. Karena sistem bersifat seimbang, besaran-besaran listrik (besar tegangan terminal serta keluaran daya PLTB dan GI) pada setiap fase adalah sama. Perlu dicatat bahwa hasil-hasil pada Tabel IX sampai Tabel XII tersebut sangat sesuai dengan hasil-hasil pada penelitian sebelumnya [8], [9]. Hal ini mengindikasikan bahwa metode yang diusulkan valid dan akurat.

Tabel XIII sampai Tabel XVI menyajikan hasil-hasil analisis aliran daya untuk sistem distribusi 25-simpul. Karena sistem tak-seimbang, terlihat bahwa besaran-besaran listrik pada ketiga fase tidak sama. Hasil-hasil analisis aliran daya tersebut juga menunjukkan bahwa dengan meningkatnya

TABEL VII  
DATA BEBAN SISTEM 25-SIMPUL

Simpul	Fase-a		Fase-b		Fase-c	
	$P_L$ (kW)	$Q_L$ (kVAR)	$P_L$ (kW)	$Q_L$ (kVAR)	$P_L$ (kW)	$Q_L$ (kVAR)
2	0	0	0	0	0	0
3	35	25	40	30	45	32
4	50	40	60	45	50	35
5	40	30	40	30	40	30
6	40	30	45	32	35	25
7	0	0	0	0	0	0
8	40	30	40	30	40	30
9	60	45	50	40	50	35
10	35	25	40	30	45	32
11	45	32	35	25	40	30
12	50	35	60	45	50	40
13	35	25	45	32	40	30
14	50	35	50	40	60	45
15	133	100	133	100	133	100
16	40	30	40	30	40	30
17	40	30	35	25	45	32
18	40	30	40	30	40	30
19	60	45	50	35	50	40
20	35	25	40	30	45	32
21	40	30	35	25	45	32
22	50	35	60	45	50	40
23	120	90	100	80	100	70
24	140	100	180	128	160	120
25	120	90	100	60	100	70

TABEL VIII  
DATA GIRS PLTB SISTEM 25-SIMPUL

Parameter	Nilai Resistans/Reaktans (ohm)
Rangkaian stator	$R_s^a = R_s^b = R_s^c = 0,057685$ $X_s^a = X_s^b = X_s^c = 0,288427$
Rangkaian rotor	$R_r^a = R_r^b = R_r^c = 0,057685$ $X_r^a = X_r^b = X_r^c = 0,288427$
Rangkaian inti magnetik	$R_c^a = R_c^b = R_c^c = 576,85$ $X_m^a = X_m^b = X_m^c = 28,84$

TABEL IX  
TEGANGAN TERMINAL PLTB SISTEM 33-SIMPUL

$P_m$ (kW)	Fase-a (kV)	Fase-b (kV)	Fase-c (kV)
300	11,57 $\angle$ 1,03 <sup>0</sup>	11,57 $\angle$ -118,97 <sup>0</sup>	11,57 $\angle$ 121,03 <sup>0</sup>
600	11,63 $\angle$ 1,26 <sup>0</sup>	11,63 $\angle$ -118,74 <sup>0</sup>	11,63 $\angle$ 121,26 <sup>0</sup>
900	11,68 $\angle$ 1,48 <sup>0</sup>	11,68 $\angle$ -118,52 <sup>0</sup>	11,68 $\angle$ 121,48 <sup>0</sup>
1.200	11,74 $\angle$ 1,72 <sup>0</sup>	11,74 $\angle$ -118,28 <sup>0</sup>	11,74 $\angle$ 121,72 <sup>0</sup>
1.500	11,79 $\angle$ 1,95 <sup>0</sup>	11,79 $\angle$ -118,05 <sup>0</sup>	11,79 $\angle$ 121,95 <sup>0</sup>
1.800	11,84 $\angle$ 2,19 <sup>0</sup>	11,84 $\angle$ -117,81 <sup>0</sup>	11,84 $\angle$ 122,19 <sup>0</sup>
2.100	11,88 $\angle$ 2,43 <sup>0</sup>	11,88 $\angle$ -117,57 <sup>0</sup>	11,88 $\angle$ 122,43 <sup>0</sup>
2.400	11,93 $\angle$ 2,67 <sup>0</sup>	11,93 $\angle$ -117,33 <sup>0</sup>	11,93 $\angle$ 122,67 <sup>0</sup>
2.700	11,97 $\angle$ 2,91 <sup>0</sup>	11,97 $\angle$ -117,09 <sup>0</sup>	11,97 $\angle$ 122,91 <sup>0</sup>
3.000	12,01 $\angle$ 3,16 <sup>0</sup>	12,01 $\angle$ -116,84 <sup>0</sup>	12,01 $\angle$ 123,16 <sup>0</sup>

masukannya daya mekanik turbin, keluaran daya aktif PLTB ikut naik. Namun, nilai totalnya sedikit lebih kecil dibanding daya mekanik karena adanya rugi-rugi daya pada PLTB. Sementara itu, keluaran daya reaktif PLTB adalah negatif, yang artinya

TABEL X  
KELUARAN DAYA PLTB SISTEM 33-SIMPUL

$P_m$ (kW)	Fase-a (kW, kVAR)	Fase-b (kW, kVAR)	Fase-c (kW, kVAR)
300	91,24-j166,97	91,24-j166,97	91,24-j166,97
600	190,43-j172,45	190,43-j172,45	190,43-j172,45
900	289,17-j180,13	289,17-j180,13	289,17-j180,13
1.200	387,48-j189,94	387,48-j189,94	387,48-j189,94
1.500	485,36-j201,81	485,36-j201,81	485,36-j201,81
1.800	582,82-j215,70	582,82-j215,70	582,82-j215,70
2.100	679,88-j231,54	679,88-j231,54	679,88-j231,54
2.400	776,55-j249,29	776,55-j249,29	776,55-j249,29
2.700	872,83-j268,93	872,83-j268,93	872,83-j268,93
3.000	968,72-j290,42	968,72-j290,42	968,72-j290,42

TABEL XI  
KELUARAN DAYA GI SISTEM 33-SIMPUL

$P_m$ (kW)	Fase-a (kW, kVAR)	Fase-b (kW, kVAR)	Fase-c (kW, kVAR)
300	3.842,3+j2.613,5	3.842,3+j2.613,5	3.842,3+j2.613,5
600	3.732,6+j2.614,0	3.732,6+j2.614,0	3.732,6+j2.614,0
900	3.624,9+j2.615,8	3.624,9+j2.615,8	3.624,9+j2.615,8
1.200	3.519,0+j2.620,8	3.519,0+j2.620,8	3.519,0+j2.620,8
1.500	3.414,8+j2.628,9	3.414,8+j2.628,9	3.414,8+j2.628,9
1.800	3.312,4+j2.640,0	3.312,4+j2.640,0	3.312,4+j2.640,0
2.100	3.211,6+j2.654,0	3.211,6+j2.654,0	3.211,6+j2.654,0
2.400	3.112,5+j2.670,9	3.112,5+j2.670,9	3.112,5+j2.670,9
2.700	3.014,9+j2.690,6	3.014,9+j2.690,6	3.014,9+j2.690,6
3.000	2.918,9+j2.713,1	2.918,9+j2.713,1	2.918,9+j2.713,1

TABEL XII  
KELUARAN DAYA TIGA-FASE PLTB DAN GI SERTA RUGI-RUGI TOTAL SALURAN SISTEM 33-SIMPUL

$P_m$ (kW)	PLTB (kW, kVAR)	GI (kW, kVAR)	Rugi-Rugi (kW, kVAR)
300	273,72-j500,91	11.526,9+j7.840,5	655,62+j439,59
600	571,29-j517,35	11.197,8+j7.842,0	624,09+j424,65
900	867,51-j540,39	10.874,7+j7.847,4	597,21+j407,01
1.200	1.162,44-j569,82	10.557,0+j7.862,4	574,44+j392,58
1.500	1.456,08-j605,43	10.244,4+j7.886,7	555,48+j381,27
1.800	1.748,46-j647,10	9.937,2+j7.920,0	540,66+j372,90
2.100	2.039,64-j694,62	9.634,8+j7.962,0	529,44+j367,38
2.400	2.329,65-j747,87	9.337,5+j8.012,7	522,15+j364,83
2.700	2.618,49-j806,79	9.044,7+j8.071,8	518,19+j365,01
3.000	2.906,16-j871,26	8.756,7+j8.139,3	517,86+j368,04

PLTB tersebut menyerap daya reaktif dari sistem. Daya reaktif ini digunakan oleh generator induksi PLTB untuk keperluan magnetisasi rangkaian inti.

Konfirmasi lebih lanjut terhadap kevalidan metode yang diusulkan dapat ditunjukkan dengan memeriksa hasil-hasil pada Tabel XII dan Tabel XVI. Dari tabel-tabel tersebut terlihat bahwa keluaran daya GI ditambah PLTB selalu sama dengan beban sistem total ditambah rugi-rugi saluran total. Perlu dicatat bahwa rugi-rugi saluran dihitung berdasarkan impedans dan arus yang mengalir pada saluran tersebut.

TABEL XIII  
TEGANGAN TERMINAL PLTB SISTEM 25-SIMPUL

$P_m$ (kW)	Fase-a (kV)	Fase-b (kV)	Fase-c (kV)
300	3,83 $\angle$ 0,26 <sup>0</sup>	3,85 $\angle$ -119,54 <sup>0</sup>	3,89 $\angle$ 119,90 <sup>0</sup>
600	3,87 $\angle$ 0,74 <sup>0</sup>	3,89 $\angle$ -119,10 <sup>0</sup>	3,92 $\angle$ 120,35 <sup>0</sup>
900	3,90 $\angle$ 1,22 <sup>0</sup>	3,92 $\angle$ -118,65 <sup>0</sup>	3,94 $\angle$ 120,80 <sup>0</sup>
1.200	3,93 $\angle$ 1,70 <sup>0</sup>	3,95 $\angle$ -118,21 <sup>0</sup>	3,97 $\angle$ 121,25 <sup>0</sup>
1.500	3,96 $\angle$ 2,19 <sup>0</sup>	3,98 $\angle$ -117,76 <sup>0</sup>	3,99 $\angle$ 121,70 <sup>0</sup>
1.800	3,98 $\angle$ 2,67 <sup>0</sup>	4,01 $\angle$ -117,31 <sup>0</sup>	4,01 $\angle$ 122,16 <sup>0</sup>
2.100	4,01 $\angle$ 3,16 <sup>0</sup>	4,03 $\angle$ -116,86 <sup>0</sup>	4,03 $\angle$ 122,61 <sup>0</sup>
2.400	4,03 $\angle$ 3,65 <sup>0</sup>	4,06 $\angle$ -116,41 <sup>0</sup>	4,05 $\angle$ 123,07 <sup>0</sup>
2.700	4,05 $\angle$ 4,14 <sup>0</sup>	4,08 $\angle$ -115,96 <sup>0</sup>	4,07 $\angle$ 123,53 <sup>0</sup>
3.000	4,08 $\angle$ 4,63 <sup>0</sup>	4,10 $\angle$ -115,50 <sup>0</sup>	4,09 $\angle$ 124,00 <sup>0</sup>

TABEL XIV  
KELUARAN DAYA PLTB SISTEM 25-SIMPUL

$P_m$ (kW)	Fase-a (kW, kVAR)	Fase-b (kW, kVAR)	Fase-c (kW, kVAR)
300	91,10-j169,58	91,02-j171,31	90,86-j174,44
600	190,25-j176,26	190,17-j178,00	190,05-j180,58
900	288,97-j184,95	288,90-j186,69	288,81-j188,74
1.200	387,29-j195,56	387,23-j197,29	387,17-j198,82
1.500	485,21-j208,00	485,17-j209,70	485,14-j210,75
1.800	582,76-j222,19	582,74-j223,86	582,74-j224,46
2.100	679,96-j238,10	679,97-j239,70	679,97-j239,91
2.400	776,80-j255,65	776,84-j257,17	776,84-j257,05
2.700	873,30-j274,82	873,39-j276,22	873,36-j275,85
3.000	969,46-j295,57	969,61-j296,82	969,55-j296,28

TABEL XV  
KELUARAN DAYA GI SISTEM 25-SIMPUL

$P_m$ (kW)	Fase-a (kW, kVAR)	Fase-b (kW, kVAR)	Fase-c (kW, kVAR)
300	1.289,92+j1.221,32	1.312,99+j1.224,48	1.275,42+j1.222,18
600	1.185,24+j1.222,79	1.208,19+j1.225,68	1.172,66+j1.223,01
900	1.083,12+j1.224,38	1.105,94+j1.228,78	1.072,02+j1.225,75
1.200	983,40+j1.231,88	1.006,09+j1.236,58	973,41+j1.233,23
1.500	884,96+j1.243,09	907,52+j1.247,89	874,76+j1.244,29
1.800	790,71+j1.257,86	813,13+j1.262,56	781,98+j1.258,80
2.100	697,55+j1.276,05	719,83+j1.280,44	689,01+j1.276,66
2.400	606,41+j1.297,56	628,55+j1.301,44	597,81+j1.297,79
2.700	517,23+j1.322,28	539,22+j1.325,44	508,34+j1.322,10
3.000	429,96+j1.350,16	451,80+j1.352,39	420,56+j1.349,54

Hasil-hasil analisis aliran daya tersebut juga memperlihatkan bahwa dengan adanya PLTB pada sistem, salah satu keuntungan yang didapat adalah berkurangnya suplai daya dari GI sistem distribusi karena sebagian beban dapat disuplai oleh PLTB. Suplai daya dari GI ini biasanya berasal dari pembangkit-pembangkit konvensional dengan sumber energi tak-terbarukan (seperti bahan bakar fosil) yang tidak ramah lingkungan.

TABEL XVI  
KELUARAN DAYA TIGA-FASE PLTB DAN GI SERTA RUGI-RUGI TOTAL SALURAN SISTEM 25-SIMPUL

$P_m$ (kW)	PLTB (kW, kVAR)	GI (kW, kVAR)	Rugi-Rugi (kW, kVAR)
300	272,98-j515,33	3.878,33+j3.667,98	231,41+j268,65
600	570,47-j534,84	3.566,09+j3.671,48	216,66+j252,64
900	866,68-j560,38	3.261,08+j3.678,91	207,86+j234,53
1.200	1.161,69-j591,67	2.962,90+j3.701,69	204,69+j226,02
1.500	1.455,52-j628,45	2.667,24+j3.735,28	202,86+j222,83
1.800	1.748,24-j670,51	2.385,82+j3.779,22	214,16+j224,71
2.100	2.039,90-j717,71	2.106,39+j3.833,16	226,39+j231,45
2.400	2.330,48-j769,87	1.832,77+j3.896,78	243,35+j242,91
2.700	2.620,05-j826,89	1.564,79+j3.969,83	264,94+j258,94
3.000	2.908,62-j888,67	1.302,32+j4.052,08	291,04+j279,41

## VI. KESIMPULAN

Metode sederhana untuk mengintegrasikan PLTB pada analisis aliran daya sistem distribusi tiga-fase telah diusulkan pada makalah ini. Metode yang diusulkan tersebut didasarkan pada model rangkaian-T yang sebelumnya telah berhasil diaplikasikan pada sistem distribusi tenaga listrik fase-tunggal. Pada makalah ini, model rangkaian-T tersebut telah dimodifikasi dan diperluas menjadi model rangkaian-T tiga-fase. Model tersebut kemudian diikutsertakan ke dalam analisis aliran daya dari jaringan distribusi tak-seimbang. Metode yang diusulkan ini juga telah divalidasi dengan menggunakan dua sistem distribusi representatif, yaitu sistem 33-simpul dan 25-simpul. Hasil-hasil penyelidikan yang dilakukan pada sistem tersebut memperlihatkan bahwa metode yang diusulkan valid dan akurat.

## REFERENSI

- [1] J.H. Teng, "Modelling Distributed Generations in Three-Phase Distribution Load Flow," *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 2, No. 3, hal. 330-340, 2008.
- [2] M.H. Haque, "Evaluation of Power Flow Solutions with Fixed Speed Wind Turbine Generating Systems," *Energy Conversion and Management*, Vol. 79, hal. 511-518, 2014.
- [3] J. Wang, C. Huang, dan A.F. Zobaa, "Multiple-Node Models of Asynchronous Wind Turbines in Wind Farms for Load Flow Analysis," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 44, No. 2, hal. 135-141, 2015.
- [4] M.H. Haque, "Incorporation of Fixed Speed Wind Turbine Generators in Load Flow Analysis of Distribution Systems," *International Journal of Renewable Energy Technology*, Vol. 6, No. 4, hal. 317-324, 2015.
- [5] A. Feijoo, J.L. Pazos, dan D. Villanueva, "Conventional Asynchronous Wind Turbine Models – Mathematical Expressions for the Load Flow Analysis," *International Journal of Energy Engineering (IJEE)*, Vol. 44, No. 6, hal. 269-278, 2013.
- [6] A. Feijoo dan D. Villanueva, "A PQ Model for Asynchronous Machines Based on Rotor Voltage Calculation," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 31, No. 2, hal. 813-814, 2016.
- [7] A. Feijoo dan D. Villanueva, "Correction to 'A PQ Model for Asynchronous Machines Based on Rotor Voltage Calculation'," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 31, No. 3, hal. 1228-1228, 2016.
- [8] R. Gianto, K.H. Khwee, H. Priyatman, dan M. Rajagukguk, "Two-Port Network Model of Fixed-Speed Wind Turbine Generator for Distribution System Load Flow Analysis," *TELKOMNIKA*, Vol. 17, No. 3, hal. 1569-1575, 2019.



- [9] R. Gianto, "T-Circuit Model of Asynchronous Wind Turbine for Distribution System Load Flow Analysis," *International Energy Journal*, Vol. 19, No. 2, hal. 77-88, 2019.
- [10] R. Gianto, "Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Tetap untuk Analisis Aliran Daya," *Jurnal Nasional Teknik Elektro (JNTE)*, Vol. 8, No. 1, hal. 8-15, 2019.
- [11] R. Gianto, "Integrasi Model Pembangkit Listrik Tenaga Angin pada Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, Vol. 16, No. 3, hal. 161-167, 2020.
- [12] R. Gianto dan K.H. Khwee, "A New Method for Load Flow Solution of Electric Power Distribution System," *International Review of Electrical Engineering*, Vol. 11, No. 5, hal. 535-541, 2016.
- [13] E.R. Ramos, A.G. Exposito, dan G.A. Cordero, "Quasi-Coupled Three-Phase Radial Load Flow," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 19, No. 2, hal. 776-781, 2004.
- [14] V. Ganesh, S. Sivanagaraju, dan T. Ramana, "Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Unbalanced Distribution System Using Genetic Algorithm," *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, Vol. 3, No. 4, hal. 1050-1058, 2009.