

Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Kecepatan Variabel untuk Analisis Aliran Daya

Rudy Gianto*

Intisari—Akhir-akhir ini, pemanfaatan energi angin melalui pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) kecepatan variabel untuk pembangkitan daya listrik telah mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Hal ini berbanding terbalik dengan PLTB kecepatan tetap yang penggunaannya semakin menurun. Pesatnya perkembangan PLTB kecepatan variabel ini terjadi terutama karena PLTB tersebut dapat mengekstraksi atau menangkap energi angin secara lebih optimal dibandingkan PLTB kecepatan tetap. Operasi kecepatan variabel pada suatu PLTB dapat dicapai melalui aplikasi *doubly fed induction generator* (DFIG) sebagai konverter energi utamanya. Untuk dapat menyelidiki atau menganalisis sistem tenaga yang mengandung PLTB, langkah penting pertama yang harus dilakukan adalah pemodelan dari seluruh komponen sistem tenaga (termasuk PLTB). Analisis terhadap sistem tenaga ini biasanya dilakukan untuk mengevaluasi kinerja atau penampilan sistem tenaga tersebut. Makalah ini membahas pemodelan PLTB kecepatan variabel yang berbasis DFIG untuk digunakan pada analisis aliran daya sistem tenaga listrik. Usulan model PLTB tersebut diperoleh berdasarkan formula-formula yang menghitung daya dan rugi-rugi daya dari PLTB. Pemodelan konverter elektronika daya dari DFIG yang biasanya cukup rumit tidak diperlukan dalam proses pembentukan model. Lebih lanjut, tidak seperti pada metode-metode yang sebelumnya telah dipublikasi, yaitu dua model yang berbeda harus digunakan untuk mengakomodasi analisis aliran daya pada kondisi subsinkron dan kondisi supersinkron, pada makalah ini PLTB yang berbasis DFIG tersebut cukup direpresentasikan melalui satu model matematis. Model tersebut dapat digunakan untuk menyatakan DFIG, baik pada kondisi subsinkron maupun kondisi supersinkron. Model ini kemudian diintegrasikan ke dalam analisis aliran daya untuk mengevaluasi kinerja keadaan mantap sistem. Hasil-hasil dari studi kasus juga disajikan pada makalah ini. Pada studi kasus tersebut, dilakukan penyelidikan terhadap aplikasi dari metode yang diusulkan pada sistem tenaga terinterkoneksi yang mengandung PLTB. Hasil penyelidikan mengonfirmasi validitas usulan model DFIG.

Kata Kunci—Pembangkit Listrik Tenaga Bayu, DFIG, Analisis Aliran Daya, Sistem Tenaga.

I. PENDAHULUAN

Penggunaan PLTB kecepatan variabel untuk pembangkitan tenaga listrik telah mengalami peningkatan akhir-akhir ini. Peningkatan ini terjadi terutama karena PLTB kecepatan variabel dapat mengekstraksi atau menangkap energi angin secara lebih optimal dibandingkan PLTB kecepatan tetap.

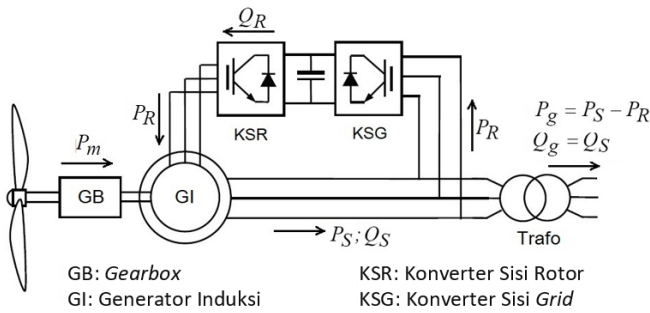
*Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Jln. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak 78124, INDONESIA (tel.: 0561-740186; email: rudygianto@gmail.com)

[Diterima: 24 April 2021, Revisi: 11 Maret 2022]

Operasi kecepatan variabel pada suatu PLTB dapat dicapai melalui penggunaan *doubly fed induction generator* (DFIG) atau *permanent magnet synchronous generator* (PMSG) sebagai konverter energi utamanya. Namun, saat ini aplikasi DFIG lebih populer karena harganya yang lebih murah dibandingkan PMSG [1]. Untuk dapat menyelidiki atau menganalisis sistem tenaga yang mengandung PLTB, diperlukan pemodelan komponen-komponen sistem tenaga tersebut (termasuk PLTB). Dalam konteks pemodelan PLTB untuk analisis aliran daya, beberapa teknik telah diusulkan. Referensi [2]-[16], misalnya, melaporkan beberapa metode terbaru. Dalam [2]-[4], model multisimpul dari PLTB yang berbasis generator asinkron untuk analisis aliran daya telah diusulkan. Metode yang diusulkan tersebut dapat diaplikasikan pada program-program aliran daya konvensional tanpa perlu adanya modifikasi terhadap kode-kode sumber (*source codes*) program tersebut. Akan tetapi, untuk dapat mengikutsertakan PLTB ke dalam analisis aliran daya, data masukan untuk program tersebut perlu dimodifikasi. Lebih lanjut, metode pada [2]-[4] ini hanya dapat digunakan untuk PLTB kecepatan tetap.

Diusulkan juga model PLTB yang berbasis generator asinkron untuk analisis aliran daya [5], [6]. Pada kedua penelitian tersebut, model PLTB dibentuk berdasarkan keseimbangan daya dari generator asinkron dalam sistem tenaga. Pada [7], model PLTB kecepatan tetap yang berbasis *squirrel cage induction generator* (SCIG) telah diusulkan. Model pada [7] dapat digunakan untuk analisis aliran daya sistem distribusi tak seimbang. Referensi [8]-[12] membahas berbagai model keadaan mantap dari PLTB kecepatan tetap untuk analisis aliran daya. Dalam metode yang diusulkan tersebut, model PLTB yang dikembangkan dikombinasikan dengan formulasi aliran daya sistem tanpa PLTB. Persamaan gabungan ini kemudian diselesaikan secara iteratif untuk mendapatkan solusi dari masalah aliran daya sistem secara keseluruhan. Sama seperti pada [2]-[4], metode-metode yang diusulkan pada [5]-[12] ini juga tidak dapat diaplikasikan pada PLTB kecepatan variabel.

Beberapa penelitian mengusulkan model PLTB yang berbasis DFIG untuk analisis aliran daya [13]-[16]. Telah diusulkan model keadaan mantap dari PLTB yang berbasis DFIG untuk analisis aliran daya tiga-fase [13], [14]. Model pada [13] dikembangkan berdasarkan komponen-komponen utama DFIG, yaitu turbin angin, konverter elektronika daya, dan generator induksi. Sementara itu, model pada [14] diturunkan dengan menggunakan teori komponen-komponen urutan. Penelitian lainnya mengusulkan pendekatan iteratif untuk mengintegrasikan PLTB berbasis DFIG pada analisis aliran daya [15], [16]. Model pada kedua penelitian tersebut diperoleh melalui rangkaian-rangkaian ekuivalen dari DFIG dan teknik *forward-backward sweeping* (FBS) telah digunakan



Gbr. 1 Konfigurasi PLTB berbasis DFIG.

untuk memperoleh solusi masalah aliran daya. Namun, pada [13]-[16], dua model yang berbeda harus digunakan untuk mengakomodasi analisis aliran daya pada kondisi-kondisi subsinkron dan supersinkron.

Makalah ini mengusulkan model keadaan mantap dari PLTB kecepatan variabel, yaitu PLTB yang menggunakan DFIG, untuk analisis aliran daya. Model ini diperoleh berdasarkan formula-formula yang menghitung daya dan rugi-rugi daya dari PLTB tersebut. Pemodelan konverter elektronika daya dari DFIG yang biasanya cukup rumit tidak diperlukan dalam proses pembentukan model. Lebih lanjut, kontribusi lainnya dari makalah ini adalah hanya satu model matematis yang digunakan untuk merepresentasikan DFIG, baik pada kondisi subsinkron maupun kondisi supersinkron. Model yang diusulkan ini kemudian diintegrasikan ke dalam analisis aliran daya untuk mengevaluasi kinerja keadaan mantap sistem tenaga secara keseluruhan (termasuk PLTB).

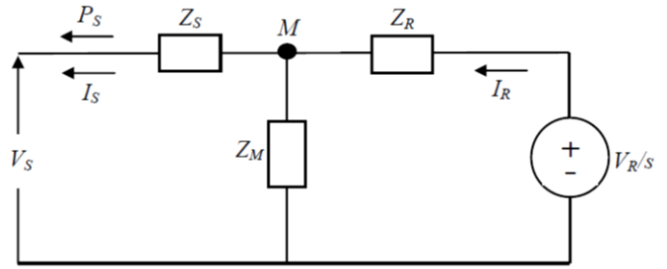
II. PLTB BERBASIS DFIG

A. Struktur dan Rangkaian Ekuivalen DFIG

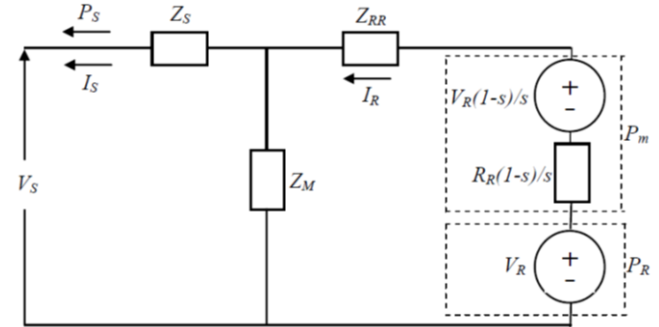
Saat ini, sistem DFIG merupakan jenis PLTB yang paling populer. Komponen utama DFIG adalah generator induksi rotor belitan (GIRB). Gbr. 1 memperlihatkan struktur dasar suatu PLTB yang berbasis DFIG [17]-[22]. Terlihat bahwa belitan stator GIRB terhubung langsung pada sistem tenaga, sedangkan belitan rotornya terhubung ke sistem tenaga melalui konverter elektronika daya via cincin slip (*slip rings*). Karena rangkaian rotor dikendalikan oleh konverter elektronika daya, DFIG memiliki kemampuan untuk mengimpor atau mengeksport daya reaktif.

Pada Gbr. 1, P_m adalah daya mekanik turbin, P_s dan Q_s adalah daya aktif dan reaktif pada stator GIRB, P_g dan Q_g adalah keluaran daya aktif dan reaktif dari DFIG, P_r adalah daya rotor atau daya yang diinjeksikan pada rotor, dan Q_r adalah daya reaktif yang dihasilkan oleh rotor GIRB. Daya reaktif ini digunakan untuk mengompensasi daya reaktif yang dibutuhkan GIRB untuk pemagnetan (magnetisasi) dan untuk mendukung keperluan daya reaktif pada operasi faktor daya konstan.

Perlu dicatat bahwa keluaran daya reaktif DFIG (Q_g) akan bertanda negatif atau positif jika DFIG mengimpor atau mengeksport daya reaktif (DFIG beroperasi pada faktor daya *lagging* atau *leading*). Jika $Q_g = 0$, tidak ada daya reaktif yang diimpor atau diekspor oleh DFIG (DFIG beroperasi pada faktor daya 1). Namun, DFIG pada umumnya dioperasikan pada



Gbr. 2 Rangkaian ekuivalen keadaan mantap DFIG.



Gbr. 3 Rangkaian ekuivalen keadaan mantap DFIG yang dimodifikasi.

faktor daya 1 [13]-[16], sehingga tidak ada pertukaran daya reaktif antara PLTB dan sistem tenaga (*power grid*). Sementara itu, arah daya rotor (P_r) tergantung pada kecepatan rotor GIRB. Pada kondisi supersinkron, rotor akan mengirim daya sebesar P_r . Akan tetapi, pada kondisi subsinkron, rotor akan menyerap daya sebesar P_r . Jika kecepatan rotor sama dengan kecepatan sinkron, $P_r = 0$, yang artinya tidak ada daya yang dikirim atau diserap rotor.

Rangkaian ekuivalen keadaan mantap dari GIRB diperlihatkan pada Gbr. 2 [19], [20]. Perlu dicatat bahwa pada Gbr. 2, rangkaian stator GIRB tidak mengandung daya reaktif karena seperti yang sebelumnya telah diuraikan, DFIG biasanya dioperasikan pada faktor daya 1 (atau $Q_g = Q_s = 0$). Pada Gbr. 2, V_s dan I_s adalah tegangan dan arus pada rangkaian stator, V_r dan I_r adalah tegangan dan arus pada rangkaian rotor, dan s adalah slip generator induksi. Lebih lanjut, Z_s , Z_r , dan Z_m adalah impedansi-impedansi dari rangkaian stator, rotor, dan inti magnetik, yang dihitung menggunakan (1).

$$\begin{aligned} Z_s &= R_s + jX_s \\ Z_r &= \frac{R_r}{s} + jX_r \\ Z_m &= jR_c X_m / (R_c + jX_m) \end{aligned} \tag{1}$$

dengan R_s dan X_s adalah resistansi dan reaktansi dari rangkaian stator, R_r dan X_r adalah resistansi dan reaktansi dari rangkaian rotor, serta R_c dan X_m adalah resistansi dan reaktansi dari rangkaian inti magnetik.

Gbr. 3 juga memperlihatkan rangkaian ekuivalen keadaan mantap dari GIRB [19], [20]. Pada Gbr. 3, modifikasi terhadap Gbr. 2 telah dilakukan untuk menyatakan daya mekanik turbin (P_m) dan daya rotor (P_r) pada rangkaian ekuivalen GIRB tersebut [19], [20]. Impedansi Z_{rr} pada Gbr. 3 dihitung dengan (2).

$$Z_{RR} = R_R + jX_R. \quad (2)$$

B. Rumusan Daya DFIG

Berdasarkan Gbr. 1, keluaran daya aktif dan reaktif dari PLTB adalah

$$P_g = P_S - P_R \quad (3)$$

dan

$$Q_g = Q_S = 0. \quad (4)$$

Kemudian, berdasarkan Gbr. 2 dan Gbr. 3, daya pada rangkaian stator GIRB dapat dirumuskan menggunakan (5).

$$P_S = \text{Re}(V_S I_S^*) \quad (5)$$

sedangkan daya aktif dan reaktif pada rangkaian rotor GIRB adalah sebagai berikut [19], [20].

$$P_R = \text{Re}(V_R I_R^*) \quad (6)$$

dan

$$Q_R = \text{Im}\left(\frac{V_R}{s} I_R^*\right) \quad (7)$$

dengan Q_R adalah daya reaktif rotor yang dilihat dari sisi stator.

Berdasarkan Gbr. 3, juga dapat diperoleh rumusan untuk daya mekanik turbin sebagai berikut [19], [20].

$$P_m = [\text{Re}(V_R I_R^*) - R_R I_R I_R^*] \frac{1-s}{s}. \quad (8)$$

Persamaan (8) menunjukkan bahwa daya turbin sebesar P_m telah dinyatakan melalui sumber tegangan dan resistansi dinamik pada rangkaian ekuivalen Gbr. 3.

C. Rumusan Arus dan Rugi-Rugi Daya DFIG

Dapat ditunjukkan bahwa penerapan hukum Kirchoff untuk arus pada simpul M dari rangkaian ekuivalen GIRB Gbr. 2 akan menghasilkan arus stator seperti pada (9).

$$I_S = \left(1 + \frac{Z_R}{Z_M}\right) I_R - \frac{1}{sZ_M} V_R \quad (9)$$

dan arus rotor:

$$I_R = \left(1 + \frac{Z_S}{Z_M}\right) I_S + \frac{1}{Z_M} V_S. \quad (10)$$

Lebih lanjut, penerapan hukum Kirchoff untuk tegangan pada *loop* rangkaian ekuivalen GIRB Gbr. 2 akan menghasilkan (11).

$$V_S - \frac{V_R}{s} + Z_S I_S + Z_R I_R = 0. \quad (11)$$

Berdasarkan (11), arus stator dan rotor juga dapat dinyatakan sebagai:

$$I_S = \frac{1}{sZ_S} V_R - \frac{1}{Z_S} V_S - \frac{Z_R}{Z_S} I_R \quad (12)$$

dan

$$I_R = \frac{1}{sZ_R} V_R - \frac{1}{Z_R} V_S - \frac{Z_S}{Z_R} I_S. \quad (13)$$

Dengan melakukan substitusi (13) pada (9) dan (12) pada (10) serta menyusun kembali hasilnya, arus stator dan rotor dapat

dinyatakan sebagai fungsi dari tegangan stator dan rotor seperti berikut.

$$I_S = EV_R - FV_S \quad (14)$$

dan

$$I_R = GV_R - HV_S \quad (15)$$

dengan

$$E = \frac{1}{s(Z_S + Z_R + Z_R Z_S / Z_M)} \quad (16a)$$

$$F = \frac{1 + Z_R / Z_M}{Z_S + Z_R + Z_R Z_S / Z_M} \quad (16b)$$

$$G = \frac{1 + Z_S / Z_M}{s(Z_S + Z_R + Z_R Z_S / Z_M)} \quad (16c)$$

$$H = \frac{1}{Z_S + Z_R + Z_R Z_S / Z_M} \quad (16d)$$

sedangkan rugi-rugi daya pada GIRB, berdasarkan Gbr. 3, adalah

$$S_{loss} = I_S I_S^* Z_S + I_R I_R^* Z_{RR} + (I_R - I_S)(I_R - I_S)^* Z_M \quad (17)$$

atau

$$S_{loss} = I_S I_S^* (Z_S + Z_M) + I_R I_R^* (Z_{RR} + Z_M) - (I_R I_S^* + I_S I_R^*) Z_M. \quad (18)$$

III. PEMODELAN PLTB

Bagian ini membahas pembentukan usulan model matematik PLTB yang berbasis DFIG. Penurunan model tersebut didasarkan pada rumusan daya dan rugi-rugi daya DFIG. Karena rugi-rugi daya aktif GIRB merupakan selisih antara masukan daya mekanik turbin (P_m) dan keluaran daya listrik PLTB (P_g), maka

$$P_m - P_g = \text{Re}(S_{loss}) \quad (19)$$

sedangkan daya reaktif yang diproduksi oleh rotor (Q_R) digunakan untuk mengkompensasi rugi-rugi daya reaktif GIRB ($\text{Im}(S_{loss})$), sehingga

$$Q_R = \text{Im}(S_{loss}). \quad (20)$$

Perlu dicatat bahwa pada (19) dan (20), rugi-rugi daya pada konverter elektronika daya diabaikan karena nilainya jauh lebih kecil dibandingkan rugi-rugi daya pada GIRB. Substitusi (3) pada (19) menghasilkan (21).

$$P_m - P_S + P_R = \text{Re}(S_{loss}). \quad (21)$$

Dengan menggunakan (5) dan (6) pada (21) serta (7) pada (20), akan diperoleh

$$P_m - \text{Re}(V_S I_S^*) + \text{Re}(V_R I_R^*) = \text{Re}(S_{loss}) \quad (22)$$

dan

$$\text{Im}(V_R I_R^*) = s \text{Im}(S_{loss}). \quad (23)$$

Dengan demikian, berdasarkan (22) dan (23), usulan model matematis PLTB kecepatan variabel yang berbasis DFIG adalah

$$P_m - \text{Re}(V_S I_S^*) + \text{Re}(V_R I_R^*) - \text{Re}(S_{loss}) = 0 \quad (24a)$$

TABEL I
JENIS BUS DAN BESARAN

Jenis Bus	Persamaan	Besaran yang Ditentukan	Besaran yang Dicari
Slack	(25)	$ Y , \theta, P_L, Q_L, V $, dan $\delta = 0^\circ$	P_G dan Q_G
PV	(25)	$ Y , \theta, P_L, Q_L, P_G$, dan $ V $	δ dan Q_G
PQ	(25)	$ Y , \theta, P_L, Q_L$, dan $P_G = Q_G = 0$	$ V $ dan δ
PLTB	(24) dan (25)	$ Y , \theta, P_L, Q_L, \phi, s$, dan P_m	$ V = V_S , \delta = \delta_S, Re(V_R)$, dan $Im(V_R)$

$$Im(V_R I_R^*) - s Im(S_{loss}) = 0. \quad (24b)$$

Perlu dicatat bahwa pada (24), S_{loss} dihitung melalui (18), sedangkan I_S dan I_R dihitung berdasarkan (14) dan (15). Karena I_S dan I_R merupakan fungsi dari tegangan stator dan rotor, S_{loss} juga dapat dinyatakan sebagai fungsi dari tegangan stator dan rotor. Dalam formulasi masalah aliran daya, tegangan stator dan rotor ini merupakan besaran-besaran yang akan dicari atau dihitung nilainya. Model matematis (24) ini kemudian diintegrasikan pada analisis aliran daya. Langkah pertama dalam proses integrasi tersebut adalah menggabungkan (24) dengan persamaan berikut.

$$P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (25a)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (25b)$$

dengan

P_{Gi}, Q_{Gi} = pembangkitan daya aktif dan daya reaktif pada bus ke- i ,

P_{Li}, Q_{Li} = kebutuhan (beban) daya aktif dan daya reaktif pada bus ke- i ,

$V_i = |V_i| e^{j\delta_i}$ = tegangan pada bus ke- i ,

$Y_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\theta_{ij}}$ = elemen ke- ij dari matriks admitansi bus,

N = jumlah bus sistem tenaga.

Persamaan (25) merupakan formulasi masalah aliran daya untuk sistem tanpa PLTB [23]. Langkah selanjutnya adalah menyelesaikan persamaan gabungan tersebut untuk mendapatkan solusi aliran daya yang diinginkan. Detail dari persamaan-persamaan yang akan diselesaikan dan besaran-besaran listrik yang akan dihitung diperlihatkan pada Tabel I. Karena tegangan stator GIRB ($V_S = |V_S| \angle \delta_S$) juga merupakan tegangan pada terminal PLTB ($V = |V| \angle \delta$), maka untuk setiap bus PLTB, $|V| = |V_S|$ dan $\delta = \delta_S$ juga merupakan besaran-besaran yang akan dihitung. Lebih lanjut, untuk setiap bus PLTB berlaku $P_G = P_g$ dan $Q_G = Q_g = 0$. Daya P_g dapat dihitung menggunakan (5) dan (6) pada (3) atau

$$P_g = Re(V_S I_S^*) - Re(V_R I_R^*). \quad (26)$$

IV. STUDI KASUS

A. Sistem Pengujian

Studi kasus didasarkan pada sistem 5-bus yang diadopsi dari penelitian sebelumnya [24]. Sistem tersebut memiliki beban total tiga-fase sebesar 810 MW dan 400 MVAR. Data sistem

TABEL II
DATA CABANG SISTEM 5-BUS (DALAM PU)

Saluran	Bus p - q	Impedansi Seri (Z)	Admitansi Shunt ($Y_{sh}/2$)
1	1 - 3	0,042+j0,168	0
2	1 - 4	0,031+j0,126	0
3	2 - 3	0,031+j0,126	0
4	2 - 4	0,053+j0,210	0
5	2 - 5	0,084+j0,336	0
6	4 - 5	0,063+j0,252	0

TABEL III
DATA BUS SISTEM 5-BUS (DALAM PU)

Bus	$ V $	δ	Pembangkitan	Beban*	Ket.
1	1,07	0	-	0,65+j0,30	Slack
2	1,06	-	1,8+j-	0,70+j0,40	PV
3	-	-	0	1,15+j0,60	PQ
4	-	-	0	0,85+j0,40	PQ
5	-	-	-	0,70+j0,30	PLTB

Ket.: - : besaran yang akan dicari

* : beban per fase

TABEL IV
DATA UNIT TURBIN-GENERATOR

Turbin	Daya: 3,0 MW Panjang bilah turbin: 40 m Kecepatan: <i>Cut-in: 4 m/s; Rated: 13 m/s; Cut-out: 23 m/s</i>
Roda gigi	Rasio: 1/90
Generator	Jenis: DFIG Jumlah kutub: 2 pasang Tegangan: 690 Volt Resistansi/Reaktansi (dalam pu*): $R_S = 1; X_S = 25; R_R = 1; X_R = 25; R_c = 3.000; X_m = 350$
Transformator pad mount	Impedansi (dalam pu*): j5

diperlihatkan pada Tabel II dan Tabel III. Sistem 5-bus ini kemudian dimodifikasi dengan menghubungkan PLTB pada bus 5 melalui transformator *step-up* dengan impedansi j0,05 pu (lihat Gbr. 4). PLTB tersebut terdiri atas seratus unit turbin generator identik. Konfigurasi PLTB diperlihatkan pada Gbr. 4, sedangkan data unit turbin generator diperlihatkan pada Tabel IV. Pada Tabel IV, data dalam pu memiliki dasar 200 MVA.

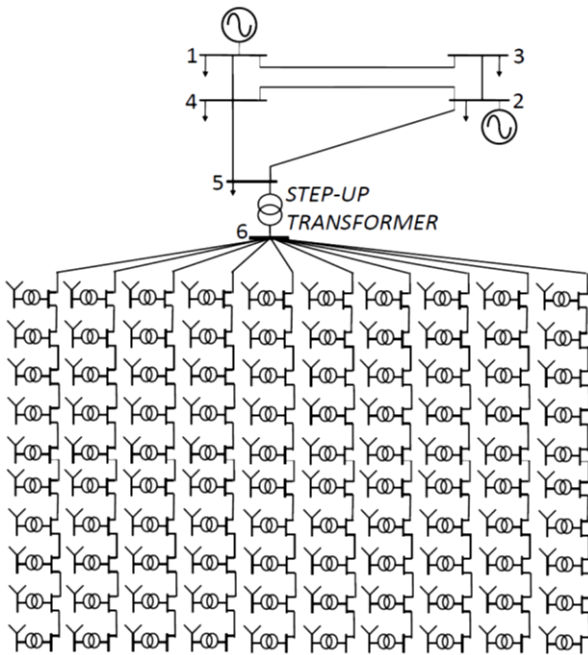
B. Perhitungan Slip dan Daya Turbin

Pada makalah ini diasumsikan bahwa nilai *tip speed ratio* (λ) turbin angin adalah 8 dan koefisien kinerja (*coefficient of performance*, C_p) sebesar 0,5, sehingga berdasarkan (L.1) pada bagian lampiran, daya mekanik turbin untuk berbagai kecepatan angin adalah

$$P_m = 0,5(1,225)(\pi 40^2)V_w^3(0,5) \quad (27)$$

sedangkan slip generator (s) dapat dihitung dengan menggunakan (L.4) pada lampiran, yaitu

$$s = 1 - \frac{pV_w \lambda}{2\pi f_s a_g R} \quad (28)$$



Gbr. 4 Sistem pengujian.

TABEL V
SLIP GENERATOR DAN DAYA MEKANIK TURBIN

V_w (m/s)	s	ΣP_m (MW)
5	0,4207	19,24
6	0,3125	33,25
7	0,1979	52,80
8	0,0833	78,82
9	-0,0313	112,22
10	-0,1459	153,94
11	-0,2605	204,89
12	-0,3751	266,00

atau

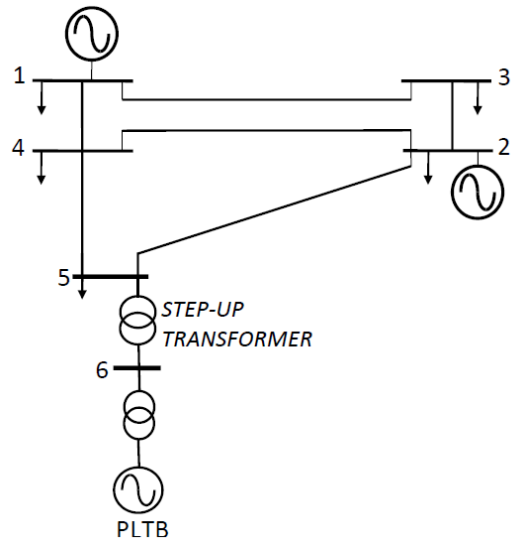
$$s = 1 - \frac{(2)(8)V_w}{(100\pi)(1/90)(40)} \quad (29)$$

Tabel V memperlihatkan hasil perhitungan daya mekanik turbin dan slip untuk kecepatan angin, mulai dari 5 m/s sampai dengan 12 m/s.

C. Agregasi PLTB

Untuk menyederhanakan analisis aliran daya, grup dari unit-unit mesin (turbin-generator) pada Gbr. 4 digabungkan menjadi mesin tunggal ekuivalen (teknik agregasi seperti yang diusulkan pada [4] digunakan untuk keperluan ini). Pada PLTB dengan representasi mesin tunggal tersebut (lihat Gbr. 5), parameter-parameter dari GIRB ekuivalen adalah

$$\begin{aligned} R_{S,ek} &= 1/100 = 0,01 \text{ pu} \\ X_{S,ek} &= 25/100 = 0,25 \text{ pu} \\ R_{R,ek} &= 1/100 = 0,01 \text{ pu} \\ X_{R,ek} &= 25/100 = 0,25 \text{ pu} \\ R_{c,ek} &= 3000/100 = 30 \text{ pu} \\ X_{M,ek} &= 350/100 = 3,5 \text{ pu} \end{aligned} \quad (30)$$



Gbr. 5 Sistem pengujian (PLTB direpresentasikan sebagai mesin tunggal).

TABEL VI
ALIRAN DAN RUGI DAYA AKTIF DFIG

ΣP_m (MW)	P_g (MW)	P_s (MW)	P_R (MW)	P_{Loss} (MW)
19,24	12,91	27,46	14,55	6,33
33,25	26,71	42,12	15,41	6,54
52,80	45,95	59,39	13,44	6,85
78,82	71,53	79,28	7,76	7,29
112,22	104,33	101,78	-2,55	7,89
153,94	145,27	126,89	-18,38	8,67
204,89	195,23	154,59	-40,64	9,66
266,00	255,06	184,89	-70,17	10,94

TABEL VII
ALIRAN DAN RUGI DAYA REAKTIF DFIG

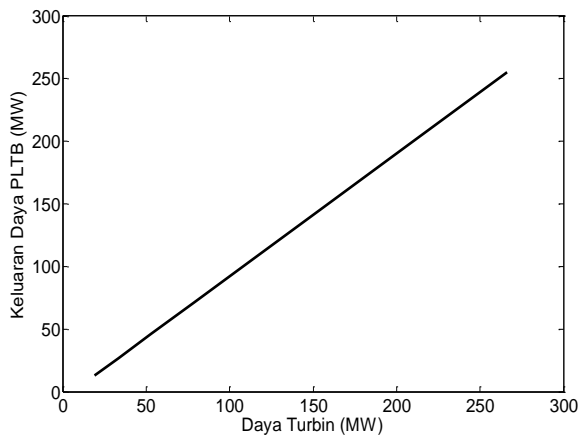
ΣP_m (MW)	$Q_g = Q_s$ (MVAR)	Q_R (MVAR)	Q_{Loss} (MVAR)
19,24	0	58,50	58,50
33,25	0	62,41	62,41
52,80	0	68,62	68,62
78,82	0	77,80	77,80
112,22	0	90,67	90,67
153,94	0	108,17	108,17
204,89	0	131,56	131,56
266,00	0	163,12	163,12

sedangkan impedansi dari transformator *pad mount* ekuivalen adalah

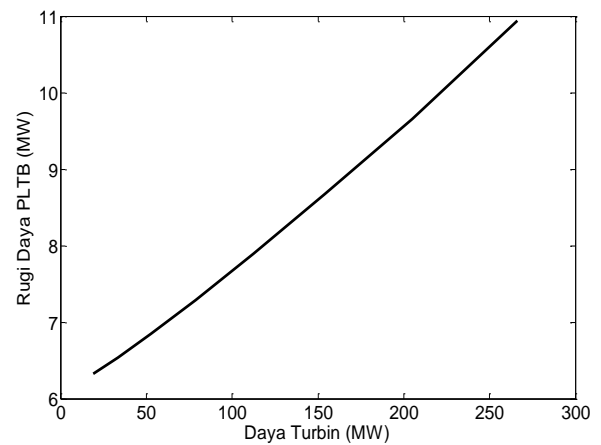
$$Z_{T,ek} = j5/100 = j0,05 \text{ pu.} \quad (31)$$

D. Hasil Perhitungan Aliran Daya

Studi aliran daya dilakukan pada sistem yang di dalamnya PLTB telah direpresentasikan sebagai mesin (turbin-generator) tunggal ekuivalen seperti yang diperlihatkan pada Gbr. 5. Nilai-nilai parameter PLTB tersebut adalah seperti yang dinyatakan oleh (30) dan (31). Hasil-hasil dari analisis aliran daya diperlihatkan pada Tabel VI sampai Tabel VIII. Untuk mempermudah pengamatan, beberapa hasil tersebut juga disajikan dalam bentuk grafik pada Gbr. 6 sampai Gbr. 8.



Gbr. 6 Variasi keluaran daya PLTB.



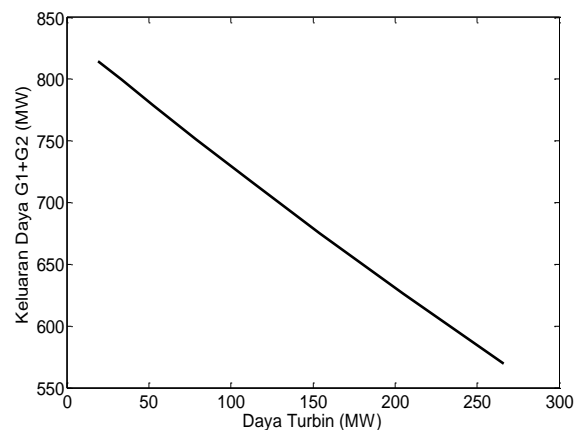
Gbr. 7 Variasi rugi daya PLTB.

TABEL VIII
TEGANGAN BUS PLTB, KELUARAN G1+G2, RUGI-RUGI SALURAN

ΣP_m (pu)	Teg. (pu)	Keluaran G1+G2		Rugi Saluran	
		MW	MVAR	MW	MVAR
19,24	0,9523	814,66	470,80	17,57	70,80
33,25	0,9566	799,51	465,69	16,22	65,69
52,80	0,9618	778,66	459,98	14,61	59,98
78,82	0,9674	751,40	454,78	12,92	54,78
112,22	0,9725	717,14	451,97	11,47	51,97
153,94	0,9756	675,46	454,32	10,73	54,32
204,89	0,9746	626,17	465,97	11,40	65,97
266,00	0,9654	569,47	493,37	14,53	93,37

Hasil studi aliran daya memperlihatkan bahwa DFIG selalu mengirimkan daya aktif (P_R) ke sistem (lihat kolom 2 di Tabel VI). Keluaran daya aktif ini semakin besar dengan meningkatnya daya mekanik turbin (P_m), tetapi nilainya sedikit lebih kecil dibandingkan daya mekanik turbin tersebut karena adanya rugi-rugi daya pada GIRB (lihat Gbr. 6). Keluaran daya aktif ini juga merupakan selisih antara daya aktif stator (P_S) dan daya rotor (P_R) dari GIRB. Perlu dicatat bahwa pada operasi subsinkron, P_R bernilai positif, atau daya sebesar P_R diserap oleh rotor GIRB. Sebaliknya, pada operasi supersinkron, P_R bernilai negatif, atau daya sebesar P_R dikirim oleh rotor GIRB (lihat kolom 4 di Tabel VI). Meningkatnya daya mekanik turbin dan keluaran daya aktif PLTB mengakibatkan membesarnya rugi-rugi daya DFIG akibat naiknya arus pada rangkaian GIRB (lihat Gbr. 7).

Karena DFIG beroperasi pada faktor daya 1, tidak ada pertukaran daya reaktif antara DFIG dan sistem tenaga, atau nilai $Q_g = 0$ (lihat kolom 2 di Tabel VII). Pada kondisi operasi ini, daya reaktif yang diproduksi rotor GIRB (Q_R) seluruhnya digunakan untuk mengompensasi daya reaktif yang dibutuhkan oleh GIRB untuk keperluan magnetisasi rangkaian inti generator induksi (lihat kolom 3 di Tabel VII). Hasil studi aliran daya juga memperlihatkan bahwa meningkatnya daya mekanik turbin akan membuat keluaran daya aktif PLTB juga meningkat dan pembangkitan daya aktif total G1 dan G2 akan berkurang (lihat Gbr. 8). Berkurangnya pembangkitan daya aktif G1 dan G2 terjadi karena sebagian beban dapat disuplai oleh PLTB.



Gbr. 8 Variasi keluaran daya G1+G2.

Hasil-hasil pada Tabel VI hingga Tabel VIII mengonfirmasi validitas model PLTB berbasis DFIG yang diusulkan. Validitas ini juga dapat diverifikasi dengan melihat hasil, yaitu daya G1+G2 ditambah daya PLTB ($P_g + jQ_g$) selalu sama dengan beban sistem total ditambah rugi-rugi saluran. Perlu dicatat bahwa rugi-rugi saluran pada Tabel VIII dihitung berdasarkan impedansi-impedansi saluran dan arus-arus yang mengalir pada saluran tersebut.

V. KESIMPULAN

Model keadaan mantap dari PLTB kecepatan variabel (PLTB yang menggunakan DFIG) untuk analisis aliran daya telah diusulkan pada makalah ini. Model ini diperoleh berdasarkan formula-formula yang menghitung daya dan rugi-rugi daya dari PLTB tersebut. Pemodelan konverter elektronika daya dari DFIG yang biasanya cukup rumit tidak diperlukan dalam pembentukan model. Lebih lanjut, usulan model tersebut dapat digunakan untuk mengakomodasi analisis aliran daya, baik pada kondisi subsinkron maupun kondisi supersinkron. Model ini kemudian diintegrasikan ke dalam analisis aliran daya untuk mengevaluasi kinerja keadaan mantap sistem tenaga secara keseluruhan, termasuk PLTB. Hasil-hasil dari studi kasus juga telah disajikan pada makalah ini. Pada studi kasus tersebut, aplikasi dari metode yang diusulkan pada sistem tenaga terinterkoneksi yang mengandung PLTB telah diselidiki.

Hasil penyelidikan mengonfirmasi validitas dari usulan model DFIG, baik pada kondisi subsinkron maupun supersinkron.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan.

LAMPIRAN

Telah diketahui bahwa turbin angin pada sistem PLTB berfungsi mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanis. Besar energi atau daya mekanis yang diekstrak atau ditangkap dari angin ini diberikan oleh (L.1) [17], [18].

$$P_m = 0,5\rho AV_w^3 C_p. \quad (L.1)$$

Pada (L.1), P_m adalah daya mekanis dalam watt, ρ adalah kerapatan udara dalam kg/m^3 (untuk kondisi udara normal, nilainya sekitar $1,225 \text{ kg/m}^3$), $A = \pi R^2$ (dengan R adalah panjang bilah turbin dalam meter), V_w adalah kecepatan angin (m/s), dan C_p adalah koefisien kinerja turbin.

Koefisien C_p merupakan fungsi dari *tip speed ratio* (λ) dan *pitch angle* (θ). *Tip speed ratio* ini memiliki nilai tipikal antara 6–8 [17]. Koefisien kinerja turbin memiliki rumusan umum sebagai berikut [18].

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \theta - c_4 \theta^2 - c_5 \right) e^{-c_6/\lambda_i} \quad (L.2)$$

dengan

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + c_8 \theta} - \frac{c_9}{\theta^3 + 1}} \quad (L.3)$$

dan

$$\lambda = \frac{a_g \omega_R R}{p V_w} = \frac{a_g \omega_S (1-s) R}{p V_w} \quad (L.4)$$

Pada (L.4), a_g adalah rasio roda gigi (*gear ratio*), p adalah jumlah pasang kutub (*pole-pair*) generator induksi, ω_R adalah kecepatan sudut rotor generator (rad/s), $\omega_S = 2\pi f$ (dengan f adalah frekuensi sistem), dan s adalah slip generator. Perlu juga dicatat di sini bahwa konstanta-konstanta c_1 sampai c_9 pada (L.2) dan (L.3) ditentukan berdasarkan data dari manufaktur turbin angin, sedangkan koefisien C_p dalam praktiknya biasanya berkisar antara 0,4–0,5 [22].

REFERENSI

- [1] N.R. Babu dan A. Arulmozhivarman, "Wind Energy Conversion System – A Technical Review," *J. Eng. Sci., Technol.*, Vol. 8, No. 4, hal. 493-507, Agu. 2013.
- [2] M.H. Haque, "Evaluation of Power Flow Solutions with Fixed Speed Wind Turbine Generating Systems," *Energy Convers., Manage.*, Vol. 79, hal. 511-518, Mar. 2014.
- [3] M.H. Haque, "Incorporation of Fixed Speed Wind Turbine Generators in Load Flow Analysis of Distribution Systems," *Int. J. Renew. Energy Technol.*, Vol. 6, No. 4, hal. 317-324, Jun. 2015.
- [4] J. Wang, C. Huang, dan A.F. Zobaa, "Multiple-Node Models of Asynchronous Wind Turbines in Wind Farms for Load Flow Analysis," *Electr. Power Compon., Syst.*, Vol. 44, No. 2, hal. 135-141, Des. 2015.
- [5] A. Feijoo dan D. Villanueva, "A PQ Model for Asynchronous Machines Based on Rotor Voltage Calculation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 31, No. 2, hal. 813-814, Jun. 2016.
- [6] A. Feijoo dan D. Villanueva, "Correction to 'A PQ Model for Asynchronous Machines Based on Rotor Voltage Calculation'," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 31, No. 3, hal. 818-818, Jun. 2016.
- [7] A. Koksoy, O. Ozturk, M.E. Balci, dan M.H. Hocaoglu, "A New Wind Turbine Generating System Model for Balanced and Unbalanced Distribution Systems Load Flow Analysis," *Appl. Sci.*, Vol. 8, No. 4, hal. 1-18, Mar. 2018.
- [8] R. Gianto, K.H. Khwee, H. Priyatman, dan M. Rajaguguk, "Two-Port Network Model of Fixed-Speed Wind Turbine Generator for Distribution System Load Flow Analysis," *TELKOMNIKA*, Vol. 17, No. 3, hal. 1569-1575, Jun. 2019.
- [9] R. Gianto, "T-Circuit Model of Asynchronous Wind Turbine for Distribution System Load Flow Analysis," *Int. Energy J.*, Vol. 19, No. 2, hal. 77-88, Jun. 2019.
- [10] R. Gianto, "Model Ekuivalen-Pi dari Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan Generator Asinkron untuk Analisis Aliran Daya," *TRANSMISI*, Vol. 21, No. 4, hal. 103-108, Okt. 2019.
- [11] R. Gianto, "Integrasi Model Pembangkit Listrik Tenaga Angin pada Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga," *J. Rekayasa Elektroika*, Vol. 16, No. 3, hal. 161-167, Des. 2020.
- [12] R. Gianto, "Model Rangkaian-T Pembangkit Listrik Tenaga Bayu untuk Analisis Aliran Daya Tiga-Fase," *J. Nas. Tek. Elektro, Teknol. Inf.*, Vol. 10, No. 1, hal. 91-99, Feb. 2021.
- [13] A. Dadhanian, B. Venkatesh, A.B. Nassif, dan V.K. Sood, "Modeling of Doubly Fed Induction Generators for Distribution System Power Flow Analysis," *Int. J. Elect. Power, Energy Syst.*, Vol. 53, hal. 576-583, Des. 2013.
- [14] Y. Ju, dkk., "Three-Phase Steady-State Model of DFIG Considering Various Rotor Speeds," *IEEE Access*, Vol. 4, hal. 9479-9488, Des. 2016.
- [15] V.S.S. Kumar dan D. Thukaram, "Accurate Modelling of Doubly Fed Induction Based Wind Farms in Load Flow Analysis," *Electric Power Syst. Res.*, Vol. 15, hal. 363-371, Feb. 2018.
- [16] C.V.S. Anirudh dan S.K.V. Seshadri, "Enhanced Modeling of Doubly Fed Induction Generator in Load Flow Analysis of Distribution Systems," *IET Renew. Power Gener.*, Vol. 15, No. 5, hal. 980-989, Apr. 2021.
- [17] O. Anaya-Lara, dkk., *Wind Energy Generation: Modelling and Control*. Chichester, Inggris: John Wiley & Sons. Ltd., 2009.
- [18] T. Ackermann, Ed., *Wind Power in Power Systems*, Chichester, Inggris: John Wiley & Sons. Ltd., 2012.
- [19] V. Akhmatov, *Induction Generators for Wind Power*. Brentwood, Inggris: Multi-Science Publishing Co. Ltd., 2007.
- [20] I. Boldea, *Variable Speed Generators*. Boca Raton, AS: CRC Press, 2005.
- [21] B. Fox, dkk., *Wind Power Integration: Connection and System Operational Aspects*. London, Inggris: The Institution of Engineering and Technology, 2007.
- [22] M.R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*. Boca Raton, AS: CRC Press, 1999.
- [23] R. Gianto dan K.H. Khwee, "A New Method for Load Flow Solution of Electric Power Distribution System," *Int. Rev. Electr. Eng.*, Vol. 11, No. 5, hal. 535-541, Okt. 2016.
- [24] W.D. Stevenson, *Elements of Power System Analysis*. New York, AS: Tata McGraw- Hill Book Co.Inc., 1992.