

Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin yang Berbasis DFIG untuk Analisis Aliran Daya

Rudy Gianto

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Tanjungpura
Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak 78124
e-mail: rudy.gianto@ee.untan.ac.id

Abstrak—Kepopuleran dari Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTAn) kecepatan variabel yang berbasis *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) telah melampaui PLTAn kecepatan tetap. Kepopuleran ini disebabkan karena dalam operasinya, kecepatan rotasi generator dari PLTAn kecepatan variabel berbasis DFIG dapat bervariasi pada interval yang jauh lebih lebar dibandingkan PLTAn kecepatan tetap sehingga ekstraksi energi angin dapat dilakukan dengan lebih optimal. Untuk mengevaluasi performa keadaan mantap (*steady state*) dari suatu sistem tenaga listrik, seluruh komponen sistem (termasuk PLTAn) harus dimodelkan dengan baik dan benar. Makalah ini mengusulkan model keadaan mantap DFIG untuk analisis aliran daya sistem distribusi tenaga listrik. Usulan model tersebut diperoleh berdasarkan rumusan daya dari PLTAn yaitu: daya turbin, daya rotor dan stator DFIG, serta keluaran daya listrik PLTAn. Model yang diusulkan dapat diaplikasikan pada berbagai mode operasi faktor daya DFIG. Untuk verifikasi usulan model, makalah ini juga mengevaluasi kasus penerapan usulan model pada suatu sistem distribusi tenaga listrik. Hasil studi memperlihatkan pada kecepatan angin 5 m/d-12 m/d, keluaran daya aktif PLTAn bervariasi antara 0,09 MW-2,10 MW. Sedangkan keluaran daya reaktifnya bervariasi antara 0,03 MVAR-0,67 MVAR untuk faktor daya 0,95 *leading*, dan (-0,69 MVAR) -(-0,03 MVAR) untuk faktor daya 0,95 *lagging*. Hasil penyelidikan juga mengkonfirmasi validitas usulan model PLTAn berbasis DFIG tersebut.

Kata kunci: pembangkit listrik tenaga angin, analisis aliran daya, sistem distribusi tenaga listrik, DFIG

Abstract—The popularity of Doubly Fed Induction Generator (DFIG)-based variable speed WPP (Wind Power Plant) has exceeded that of fixed speed WPP. This popularity is mainly because, in operation, the generator rotational speeds of DFIG-based WPP are allowed to vary within an interval much wider than the fixed-speed WPP. This wider operational speed interval makes the extraction of energy from the wind can be carried out more optimally. It is well known that to enable proper evaluation of power system steady-state performance, all system components (including the WPP) must be correctly modeled. This paper proposes a DFIG-based WPP steady-state model for a load flow analysis of an electric power distribution system. The proposed model is developed based on the formulations of WPP power: turbine power, DFIG rotor and stator powers, and WPP power output. The proposed model can be applied to various DFIG power factor operation modes. This paper also discusses a case study to verify the proposed model. In the case study, the application of the model in a representative electric power distribution system is investigated. The study results show that at wind speeds of 5 m/s to 12 m/s, the active power output of WPP varies between 0.09 MW to 2.10 MW. Also, the reactive power output varies between 0.03 MVAR to 0.67 MVAR (for 0.95 leading power factor) and between -0.69 MVAR to -0.03 MVAR (for 0.95 lagging power factor). The results of the investigation also confirm the validity of the DFIG-based WPP model.

Keywords: wind power plant, load flow analysis, electric distribution power system, DFIG

I. PENDAHULUAN

Telah diketahui bahwa pemanfaatan energi angin melalui Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTAn) kecepatan variabel dapat dilakukan dengan lebih optimal bila dibandingkan dengan menggunakan PLTAn kecepatan tetap. Dua jenis generator yang sering digunakan pada PLTAn kecepatan variabel yaitu: generator induksi dan generator sinkron. Namun saat ini generator induksi lebih populer dibandingkan generator sinkron karena harganya lebih murah dan konstruksinya lebih sederhana. Pada PLTAn kecepatan tetap, frekuensi dari sistem dimana PLTAn tersebut dihubungkan akan menentukan kecepatan

rotasi dari generator PLTAn. Oleh karenanya, kecepatan generator dari PLTAn jenis ini hanya diijinkan untuk bervariasi pada interval yang sangat sempit (yaitu hanya sekitar 1% hingga 2% di atas kecepatan sinkron). Hal ini mengakibatkan pemanfaatan energi angin menjadi kurang optimal. PLTAn kecepatan tetap umumnya memanfaatkan Generator Induksi Rotor Sangkar (GIRS) untuk mengubah energi angin menjadi daya listrik [1]-[3].

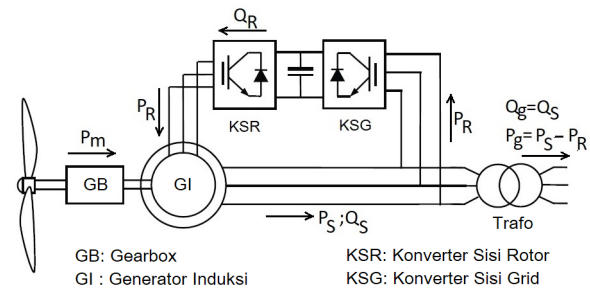
Kekurangan dari PLTAn kecepatan tetap di atas mengakibatkan penggunaan PLTAn kecepatan variabel semakin meningkat akhir-akhir ini. Pada PLTAn kecepatan variabel, konversi energi angin menjadi daya listrik biasanya dilakukan menggunakan DFIG atau *Permanent*

Magnet Synchronous Generator (PMSG). Namun saat ini DFIG lebih sering diaplikasikan karena harganya yang lebih murah. Dibandingkan PLTAn kecepatan tetap, PLTAn kecepatan variabel yang berbasis DFIG dapat beroperasi pada interval kecepatan yang jauh lebih lebar. PLTAn jenis ini, dapat memiliki variasi kecepatan rotasi generator antara 40% di bawah kecepatan sinkron sampai 30% di atas kecepatan sinkron. Hal inilah yang menyebabkan PLTAn kecepatan variabel yang berbasis DFIG dapat mengekstraksi lebih banyak energi angin dibandingkan PLTAn kecepatan tetap [3], [4].

Telah diketahui bahwa untuk mengevaluasi performa dari suatu sistem tenaga listrik, seluruh komponen-komponen sistem (termasuk PLTAn) harus dimodelkan dengan baik dan benar. Beberapa tahun terakhir, telah cukup banyak penelitian yang dilakukan dalam hal pemodelan dan integrasi PLTAn pada analisis keadaan mantap (atau analisis aliran daya) sistem tenaga listrik [5]-[21]. Referensi [5]-[15] mengusulkan metode-metode untuk mengikut-sertakan PLTAn kecepatan tetap pada analisis aliran daya. Sedangkan referensi [16]-[21] mengusulkan model-model dari PLTAn kecepatan variabel yang berbasis DFIG untuk digunakan pada studi-studi aliran daya. Namun demikian, metode-metode yang diusulkan pada [16]-[21] tersebut mengasumsikan bahwa DFIG beroperasi pada faktor daya satu. Lebih lanjut, pada [17]-[20], dua model yang berbeda harus digunakan untuk menyatakan DFIG pada kondisi sub-sinkron dan kondisi super-sinkron. Perlu dicatat bahwa, kondisi sub-sinkron terjadi pada saat kecepatan angin yang relatif rendah dan kecepatan putaran rotor generator di bawah kecepatan sinkron. Sedangkan kondisi super-sinkron terjadi pada saat kecepatan angin yang relatif tinggi dan kecepatan putaran rotor generator di atas kecepatan sinkron.

Makalah ini mengusulkan model PLTAn kecepatan variabel yang berbasis DFIG untuk analisis aliran daya sistem distribusi tenaga listrik. Usulan model tersebut diperoleh berdasarkan rumusan-rumusan daya dari PLTAn yaitu: daya turbin, daya-daya rotor dan stator DFIG, serta keluaran daya listrik PLTAn. Model yang diusulkan ini dapat diaplikasikan pada berbagai mode operasi faktor daya dan dapat mengakomodasi ketiga mode operasi faktor daya DFIG yaitu: faktor daya satu (*unity power factor*), faktor daya mendahului (*leading power factor*), dan faktor daya terbelakang (*lagging power factor*). Dengan demikian kontribusi utama dari makalah ini adalah:

- Berlainan dengan usulan metode pada [16]-[21] dimana faktor daya DFIG diasumsikan konstan sebesar satu, metode yang diusulkan pada makalah ini juga dapat mengakomodir operasi DFIG pada faktor daya mendahului dan terbelakang;
- Model pada makalah ini dapat diimplementasikan baik pada kondisi sub-sinkron maupun kondisi super-sinkron (perlu dicatat bahwa metode pada [17]-[20] menggunakan dua model matematik yang berbeda untuk merepresentasikan kedua kondisi tersebut).



Gambar 1. Konfigurasi dasar PLTAn berbasis PMSG

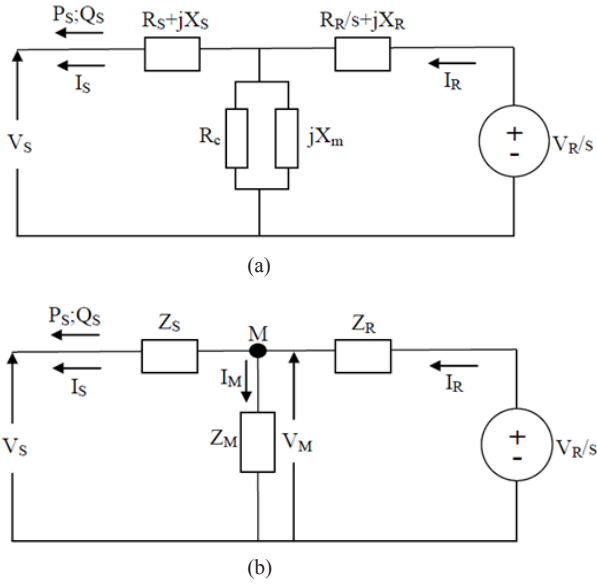
Untuk memverifikasi usulan model, makalah ini juga membahas studi kasus dimana penerapan usulan model pada suatu sistem distribusi dilakukan. Hasil-hasil penyelidikan dalam studi kasus ini mengkonfirmasi validitas usulan model PLTAn yang berbasis DFIG tersebut. Struktur dari penulisan makalah adalah sebagai berikut. Bab II membahas mengenai konfigurasi dasar dari PLTAn yang berbasis DFIG. Rangkaian ekuivalen keadaan mantap dari DFIG juga dibahas pada bab ini. Pemodelan PLTAn yang berbasis DFIG beserta integrasinya pada analisis aliran daya akan dibahas pada Bab III. Bab IV menyajikan studi kasus dimana pada studi tersebut dilakukan penyelidikan terhadap kapabilitas dari usulan metode dalam menyelesaikan masalah aliran daya sistem yang mengandung PLTAn berbasis DFIG. Beberapa kesimpulan penting yang diperoleh dari penelitian ini diberikan pada Bab V.

II. PLTAN YANG BERBASIS DFIG

Konfigurasi dasar dari PLTAn yang berbasis DFIG diperlihatkan pada Gambar 1 [21]-[25]. PLTAn berbasis DFIG biasanya menggunakan Generator Induksi Rotor Belitan (GIRB) untuk mengubah daya mekanik menjadi daya listrik. Pada Gambar 1, P_m adalah daya turbin, P_r adalah daya aktif rotor generator induksi, Q_r adalah daya reaktif yang diproduksi oleh rotor generator induksi, P_s adalah daya aktif generator induksi, Q_s adalah daya reaktif generator induksi, P_g adalah daya aktif PLTAn, dan Q_g adalah daya reaktif PLTAn.

Adanya peralatan Konverter Elektronika Daya (KSR dan KSG) mengakibatkan PLTAn yang berbasis DFIG memiliki kemampuan untuk mengirim atau menyerap daya reaktif ke atau dari sistem dimana PLTAn tersebut dihubungkan. Operasi dimana DFIG mengirim daya reaktif ke sistem biasa disebut sebagai operasi faktor daya mendahului (*leading*), sedangkan operasi dimana DFIG menyerap daya reaktif dari sistem biasa disebut sebagai operasi faktor daya terbelakang (*lagging*). Pada operasi faktor daya *leading*, daya reaktif yang dihasilkan DFIG dapat digunakan untuk mendukung kebutuhan daya reaktif sistem dan memperbaiki profil tegangan sistem tersebut.

Gambar 2 memperlihatkan rangkaian ekuivalen keadaan mantap dari GIRB. Pada Gambar 2, R_s adalah resistansi stator, X_s adalah reaktansi stator, R_r adalah resistansi rotor, X_r adalah reaktansi rotor, R_c adalah



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen GIRB

resistansi inti, X_m adalah reaktansi inti, V_s adalah tegangan stator, I_s adalah arus stator, V_r adalah tegangan rotor, I_r adalah arus rotor, dan s adalah slip generator induksi. Untuk mengikutsertakan daya turbin dan daya rotor kedalam rangkaian ekuivalen, rangkaian pada Gambar 2 dapat dimodifikasi menjadi rangkaian seperti pada Gambar 3. Pada Gambar 3, daya turbin tersebut dinyatakan melalui sumber tegangan $V_r(1-s)/s$ dan resistansi dinamik $R_r(1-s)/s$, sedangkan daya rotor dinyatakan melalui tegangan V_r .

III. PEMODELAN PLTAN BERBASIS DFIG

A. Rumus-Rumus Daya DFIG

Usulan model PLTAN akan diturunkan berdasarkan rumusan-rumusan daya dari PLTAN yaitu: daya turbin, daya-daya rotor dan stator DFIG, serta keluaran daya listrik PLTAN. Berdasarkan Gambar 3, daya turbin dan daya rotor dapat dirumuskan sebagai:

$$P_m = [V_r I_r^* - R_r I_r I_r^*] \frac{1-s}{s} \quad (1)$$

dan

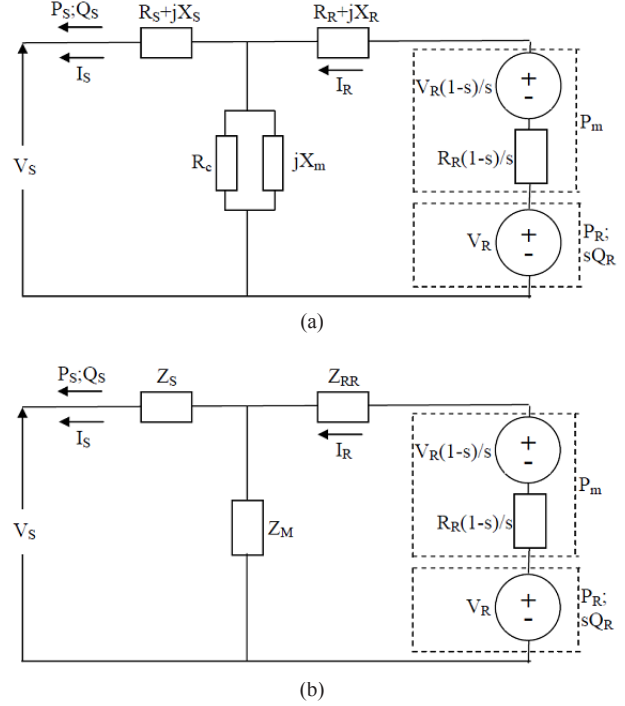
$$P_r + jsQ_r = V_r I_r^* \quad (2)$$

dimana seperti yang telah diuraikan sebelumnya P_r adalah daya aktif rotor, sedangkan Q_r adalah daya reaktif yang dihasilkan oleh rotor GIRB.

Lebih lanjut, dengan melihat Gambar 2 dan 3, daya pada stator GIRB memiliki formulasi:

$$P_s + jQ_s = V_s I_s^* \quad (3)$$

Kemudian, berdasarkan Gambar 1, keluaran daya aktif PLTAN adalah daya aktif stator dikurangi daya aktif rotor atau:



Gambar 3. Rangkaian ekuivalen GIRB (modifikasi)

$$Presisi = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

Sedangkan keluaran daya reaktif PLTAN adalah:

$$Q_g = Q_s = P_r \tan \phi \quad (5)$$

dimana ϕ adalah sudut faktor daya dari PLTAN.

Dengan menggunakan (2) dan (3) pada (4), keluaran daya aktif PLTAN menjadi:

$$P_g = \text{Re}(V_s I_s^*) - \text{Re}(V_r I_r^*) \quad (6)$$

Selanjutnya, dengan menggunakan (3) pada (5), keluaran daya reaktif PLTAN menjadi:

$$Q_g = P_g \tan \phi = \text{Im}(V_s I_s^*) \quad (7)$$

Rumusan-rumusan daya di atas akan digunakan dalam pembentukan model PLTAN. Usulan model ini beserta integrasinya pada analisis aliran daya akan dibahas pada sub-bab selanjutnya.

B. Pemodelan PLTAN

Berdasarkan (1), (2), (6) dan (7), usulan model keadaan mantap dari PLTAN yang berbasis DFIG adalah:

$$sP_m + (1-s)R_r I_r I_r^* - (1-s)\text{Re}(V_r I_r^*) = 0 \quad (8)$$

$$sQ_r - \text{Im}(V_r I_r^*) = 0 \quad (9)$$

$$P_g - \text{Re}(V_s I_s^*) + \text{Re}(V_r I_r^*) = 0 \quad (10)$$

$$P_g \tan \phi - \text{Im}(V_s I_s^*) = 0 \quad (11)$$

Pada analisis aliran daya, untuk setiap simpul (bus)

Tabel 1. Persamaan dan variabel

No	Jenis Bus	Pers.	Variabel Yang Diketahui	Variabel Yang Dicari
1	GI*	(9)	$ V $ dan $\delta = 0^\circ$	P_G dan Q_G
2	Beban	(9)	$P_G = Q_G = 0$	$ V $ dan δ
3	PLTAn	(8) & (9)	ϕ, s dan P_m	$ V = V_S , \delta = \delta_S, P_G = P_R, Q_R, \text{Re}(V_R)$ dan $\text{Im}(V_R)$

*GI: Gardu Induk (Substation)

yang mengandung PLTAn, model matematik (8) – (11) kemudian digabungkan dengan persamaan-persamaan simpul sistem tenaga listrik sebagai berikut [26]:

$$P_{Ci} - P_{Li} - \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (12)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0. \quad (13)$$

Tabel 1 memberikan detail dari persamaan-persamaan yang harus diselesaikan beserta variabel-variabel yang ditentukan/dispesifikasi dan yang akan dihitung/dicari nilainya pada analisis aliran daya dari sistem distribusi tenaga listrik yang mengandung PLTAn berbasis DFIG. Perlu dicatat bahwa I_S dan I_R pada (8) – (11) dapat dinyatakan sebagai fungsi dari V_S dan V_R sebagai berikut [21]:

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

dan:

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

dimana:

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

$$F = \frac{1 + Z_R / Z_M}{s(Z_S + Z_R + Z_R Z_S / Z_M)} \quad (17)$$

$$G = \frac{1 + Z_S / Z_M}{s(Z_S + Z_R + Z_R Z_S / Z_M)} \quad (18)$$

$$H = \frac{1}{Z_S + Z_R + Z_R Z_S / Z_M}. \quad (19)$$

Lebih lanjut, pada makalah ini penyelesaian (8)-(13) dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab (fungsi *fsolve*).

IV. STUDI KASUS

A. Sistem Test

Gambar 4 memperlihatkan diagram segaris dari sistem distribusi yang digunakan untuk menyelidiki aplikasi dari usulan model yang telah dibahas pada Bab III. Sistem ini

Tabel 2. Data sistem test

No Sal.	Bus Kir.	Bus Ter.	R (Ohms)	X (Ohms)	PL* (kW)	QL* (kVAR)
1	1	2	0,0005	0,0012	0	0
2	2	3	0,0005	0,0012	0	0
3	3	4	0,0015	0,0036	0	0
4	4	5	0,0251	0,0294	0	0
5	5	6	0,3660	0,1864	2,6	2,2
6	6	7	0,3810	0,1941	40,4	30
7	7	8	0,0922	0,0470	75	54
8	8	9	0,0493	0,0251	30	22
9	9	10	0,8190	0,2707	28	19
10	10	11	0,1872	0,0619	145	104
11	11	12	0,7114	0,2351	145	104
12	12	13	1,0300	0,3400	8	5
13	13	14	1,0440	0,3450	8	5,5
14	14	15	1,0580	0,3496	0	0
15	15	16	0,1966	0,0650	45,5	30
16	16	17	0,3744	0,1238	60	35
17	17	18	0,0047	0,0016	60	35
18	18	19	0,3276	0,1083	0	0
19	19	20	0,2106	0,0690	1	0,6
20	20	21	0,3416	0,1129	114	81
21	21	22	0,0140	0,0046	5	3,5
22	22	23	0,1591	0,0526	0	0
23	23	24	0,3463	0,1145	28	20
24	24	25	0,7488	0,2475	0	0
25	25	26	0,3089	0,1021	14	10
26	26	27	0,1732	0,0572	14	10
27	3	28	0,0044	0,0108	26	18,6
28	28	29	0,0640	0,1565	26	18,6
29	29	30	0,3978	0,1315	0	0
30	30	31	0,0702	0,0232	0	0
31	31	32	0,3510	0,1160	0	0
32	32	33	0,8390	0,2816	14	10
33	33	34	1,7080	0,5646	19,5	14
34	34	35	1,4740	0,4873	6	4
35	3	36	0,0044	0,0108	26	18,55
36	36	37	0,0640	0,1565	26	18,55
37	37	38	0,1053	0,1230	0	0
38	38	39	0,0304	0,0355	24	17
39	39	40	0,0018	0,0021	24	17
40	40	41	0,7283	0,8509	1,2	1
41	41	42	0,3100	0,3623	0	0
42	42	43	0,0410	0,0478	6	4,3
43	43	44	0,0092	0,0116	0	0
44	44	45	0,1089	0,1373	39,22	26,3
45	45	46	0,0009	0,0012	39,22	26,3
46	4	47	0,0034	0,0084	0	0
47	47	48	0,0851	0,2083	79	56,4
48	48	49	0,2898	0,7091	384,7	274,5

Tabel 2. Data sistem *test* (lanjutan)

No Sal.	Bus Kir.	Bus Ter.	R (Ohms)	X (Ohms)	PL* (kW)	QL* (kVAR)
49	49	50	0,0822	0,2011	384,7	274,5
50	8	51	0,0928	0,0473	40,5	28,3
51	51	52	0,3319	0,1114	3,6	2,7
52	9	53	0,1740	0,0886	4,35	3,5
53	53	54	0,2030	0,1034	26,4	19
54	54	55	0,2842	0,1447	24	17,2
55	55	56	0,2813	0,1433	0	0
56	56	57	1,5900	0,5337	0	0
57	57	58	0,7837	0,2630	0	0
58	58	59	0,3042	0,1006	100	72
59	59	60	0,3861	0,1172	0	0
60	60	61	0,5075	0,2585	1244	888
61	61	62	0,0974	0,0496	32	23
62	62	63	0,1450	0,0738	0	0
63	63	64	0,7105	0,3619	227	162
64	64	65	1,0410	0,5302	59	42
65	11	66	0,2012	0,0611	18	13
66	66	67	0,0047	0,0014	18	13
67	12	68	0,7394	0,2444	28	20
68	68	69	0,0047	0,0016	28	20

*Beban (perfasa) terhubung pada bus terima

Tabel 3. Data PLTAN

Turbin	Panjang bilah: 40 meter Rating daya: 2,5 MW Kecepatan: <i>Cut-in</i> : 5 m/d; <i>Rated</i> : 12 m/d; <i>Cut-out</i> : 23 m/d
Roda gigi	Rasio: 1/90
Generator	Tipe: DFIG Rating daya: 2,5 MW Pasang kutub: 2 Tegangan: 690 Volt Resistansi/Reaktansi (dalam pu): RS=0,01;XS=0,10; RR=0,01;XR=0,10; Rc=50;Xm=5
Transformator Step-Up	Impedansi: j0,001 pu

diadopsi dari [21], [26] dan memiliki tegangan 12,66 kV dengan beban tiga-fase total sebesar 11.405,67 kW and 8.082,30 kVAR. Data sistem dapat dilihat pada Tabel 2. Sedangkan data PLTAN diberikan pada Tabel 3. Semua data dalam pu memiliki dasar 1 MVA. Pada studi kasus ini, nilai tegangan pada GI diasumsikan sebesar 1,08 pu.

Tabel 4. Slip generator dan daya turbin

V_w (meter/detik)	s	P_m (MW)
5	0,4306	0,1578
6	0,3167	0,2727
7	0,2029	0,4330
8	0,0809	0,6463
9	-0,0249	0,9202
10	-0,1388	1,2623
11	-0,2526	1,6801
12	-0,3665	2,1812

Tabel 5. Aliran daya DFIG (PF = 1,0)

P_m (MW)	P_g (MW)	$Q_g = Q_s$ (MVAR)	P_s (MW)	P_r (MW)	Q_r (MVAR)
0,1578	0,0897	0	0,2106	0,1209	0,6808
0,2727	0,2040	0	0,3322	0,1282	0,6869
0,4330	0,3633	0	0,4758	0,1125	0,6966
0,6463	0,5752	0	0,6412	0,0660	0,7111
0,9202	0,8470	0	0,8285	-0,0185	0,7319
1,2623	1,1863	0	1,0375	-0,1487	0,7602
1,6801	1,6003	0	1,2683	-0,3320	0,7978
2,1812	2,0966	0	1,5207	-0,5759	0,8462

B. Perhitungan Slip dan Daya Turbin

Masukan daya mekanik turbin dan slip generator induksi dapat dihitung dengan menggunakan rumus-rumus berikut [21]:

$$P_m = 0.5(1.225)(\pi 40^2) V_w^3 (0.41) \tag{20}$$

$$s = 1 - \frac{(2)(7.95)V_w}{(100\pi)(1/90)(40)} \tag{21}$$

Pada perhitungan slip dan daya turbin di atas, nilai-nilai dari rasio *tip speed* dan koefisien performa turbin diasumsikan berturut-turut sebesar 7,95 dan 0,41. Berdasarkan (20) dan (21), nilai-nilai slip dan daya mekanik turbin untuk beberapa nilai kecepatan angin dapat dihitung (lihat Tabel 4). Nilai-nilai slip generator induksi dan masukan daya mekanik turbin ini akan digunakan dalam studi aliran daya yang akan dibahas pada sub-bab selanjutnya.

C. Hasil Studi Aliran Daya dan Pembahasan

Dengan menggunakan nilai-nilai slip dan daya turbin pada Tabel 4, studi aliran daya untuk sistem pada Gambar 4 kemudian dilakukan. Hasil-hasil dari studi ini disajikan pada Tabel 5-10. Pada studi tersebut, tiga mode operasi faktor daya DFIG seperti berikut akan dibahas dan diselidiki:

Tabel 6. Tegangan bus 69, output GI dan rugi saluran (PF = 1,0)

P_m (MW)	Teg. (kV)	Output GI		Rugi Saluran	
		MW	MVAR	MW	MVAR
0,1578	13,3074	11,8757	8,3368	0,5598	0,2545
0,2727	13,3172	11,7565	8,3345	0,5549	0,2522
0,4330	13,3308	11,5906	8,3314	0,5483	0,2491
0,6463	13,3489	11,3706	8,3276	0,5401	0,2453
0,9202	13,3720	11,0892	8,3230	0,5305	0,2407
1,2623	13,4007	10,7393	8,3179	0,5199	0,2356
1,6801	13,4355	10,3143	8,3126	0,5090	0,2303
2,1812	13,4770	9,8079	8,3074	0,4988	0,2251

Tabel 7. Aliran daya DFIG (PF = 0,95 lead)

P_m (MW)	P_g (MW)	$Q_g = Q_s$ (MVAR)	P_s (MW)	P_r (MW)	Q_r (MVAR)
0,1578	0,0895	0,0294	0,2105	0,1210	0,7127
0,2727	0,2034	0,0669	0,3319	0,1285	0,7596
0,4330	0,3623	0,1191	0,4752	0,1130	0,8265
0,6463	0,5734	0,1885	0,6403	0,0669	0,9176
0,9202	0,8442	0,2775	0,8270	-0,0172	1,0373
1,2623	1,1821	0,3885	1,0354	-0,1467	1,1904
1,6801	1,5943	0,5240	1,2653	-0,3290	1,3820
2,1812	2,0881	0,6863	1,5163	-0,5718	1,6176

- Operasi faktor daya satu (PF = 1,0)
- Operasi faktor daya *leading* (PF = 0,95 lead)
- Operasi faktor daya *lagging* (PF = 0,95 lag)

Pemakaian tiga mode operasi faktor daya di atas disebabkan karena untuk DFIG yang dioperasikan pada mode kontrol faktor daya (*power factor control mode*), mode operasi faktor daya satu biasanya sering digunakan. Namun demikian, nilai-nilai faktor daya dengan interval mulai dari 0,95 *leading* sampai 0,95 *lagging* juga sering diaplikasikan [27], [28].

Tabel 5 (kolom 3) memperlihatkan bahwa pada mode operasi faktor daya satu, *output* daya reaktif PLTAn adalah nol (tidak ada daya reaktif yang dikirim atau diserap oleh PLTAn). Pada mode operasi ini, semua daya reaktif yang dihasilkan rotor digunakan untuk keperluan magnetisasi generator induksi. Pada mode operasi faktor daya *leading*, *output* daya reaktif PLTAn selalu positif atau PLTAn selalu mengirimkan daya reaktif ke sistem (lihat Tabel 7 kolom 3). Pada mode operasi ini, sebagian besar daya reaktif digunakan untuk magnetisasi sedangkan sisanya dipakai untuk mendukung kebutuhan daya reaktif sistem.

Dilain pihak, pada mode operasi faktor daya *lagging*, *output* daya reaktif PLTAn selalu negatif atau PLTAn menyerap daya reaktif dari sistem (lihat Tabel 9 kolom 3). Pada mode operasi ini, daya reaktif untuk magnetisasi tidak hanya berasal dari rotor tapi juga berasal dari sistem.

Tabel 8. Tegangan bus 69, output GI dan rugi saluran (PF = 0,95 lead)

P_m (MW)	Teg. (kV)	Output GI		Rugi Saluran	
		MW	MVAR	MW	MVAR
0,1578	13,3085	11,8751	8,3070	0,5589	0,2541
0,2727	13,3196	11,7551	8,2667	0,5529	0,2513
0,4330	13,3351	11,5882	8,2107	0,5448	0,2475
0,6463	13,3557	11,3670	8,1366	0,5347	0,2427
0,9202	13,3820	11,0841	8,0419	0,5227	0,2370
1,2623	13,4147	10,7328	7,9243	0,5092	0,2306
1,6801	13,4543	10,3064	7,7820	0,4951	0,2237
2,1812	13,5015	9,7989	7,6128	0,4813	0,2168

Tabel 9. Aliran daya DFIG (PF = 0,95 lag)

P_m (MW)	P_g (MW)	$Q_g = Q_s$ (MVAR)	P_s (MW)	P_r (MW)	Q_r (MVAR)
0,1578	0,0900	-0,0296	0,2107	0,1208	0,6488
0,2727	0,2046	-0,0672	0,3325	0,1280	0,6142
0,4330	0,3643	-0,1197	0,4763	0,1120	0,5677
0,6463	0,5766	-0,1895	0,6419	0,0654	0,5079
0,9202	0,8489	-0,2790	0,8295	-0,0194	0,4342
1,2623	1,1886	-0,3907	1,0388	-0,1498	0,3462
1,6801	1,6030	-0,5269	1,2698	-0,3332	0,2438
2,1812	2,0994	-0,6901	1,5222	-0,5772	0,1275

Tabel 10. Tegangan bus 69, output GI dan rugi saluran (PF = 0,95 lag)

P_m (MW)	Teg. (kV)	Output GI		Rugi Saluran	
		MW	MVAR	MW	MVAR
0,1578	13,3063	11,8764	8,3668	0,5607	0,2549
0,2727	13,3147	11,7581	8,4027	0,5569	0,2532
0,4330	13,3264	11,5934	8,4529	0,5520	0,2509
0,6463	13,3419	11,3752	8,5199	0,5461	0,2481
0,9202	13,3617	11,0962	8,6062	0,5395	0,2449
1,2623	13,3863	10,7497	8,7145	0,5327	0,2416
1,6801	13,4161	10,3293	8,8477	0,5266	0,2385
2,1812	13,4516	9,8288	9,0085	0,5226	0,2362

Perlu juga dicatat bahwa pada ketiga mode operasi diatas, PLTAn akan selalu mengirimkan daya aktif (lihat kolom 2 dari Tabel 5, 7 dan 9).

Tabel 5, 7 dan 9 juga memberikan nilai-nilai daya aktif rotor (P_r) yang dihasilkan atau diserap oleh DFIG (lihat kolom-kolom 5). Dari tabel-tabel tersebut terlihat bahwa pada operasi sub-sinkron (yaitu operasi PLTAn pada kecepatan angin yang relatif rendah dan kecepatan putaran rotor generator dibawah kecepatan sinkron), P_r adalah positif atau daya aktif sebesar P_r akan diserap oleh rotor. Sedangkan pada operasi super-sinkron (yaitu operasi PLTAn pada kecepatan angin yang relatif tinggi

dan kecepatan putaran rotor generator di atas kecepatan sinkron), P_R adalah negatif atau daya aktif sebesar P_R akan dikirim oleh rotor. Hasil studi aliran daya juga memperlihatkan bahwa tegangan pada sisi sekunder trafo *step-up* PLTAn (bus 69) selalu di atas 13 kV. Hal ini terutama disebabkan karena pada studi aliran daya tersebut, tegangan pada GI (bus 1) diasumsikan sebesar 1,08 pu atau 13,67 kV.

V. KESIMPULAN

Pada makalah ini model PLTAn yang berbasis DFIG untuk analisis aliran daya sistem distribusi tenaga listrik telah diusulkan. Usulan model tersebut diperoleh berdasarkan rumusan-rumusan daya dari PLTAn yaitu: daya turbin, daya-daya rotor dan stator DFIG, serta keluaran daya listrik PLTAn. Model yang diusulkan ini dapat diaplikasikan pada berbagai mode operasi faktor daya DFIG yaitu mode operasi faktor daya satu, faktor daya mendahului, dan faktor daya terbelakang. Untuk memverifikasi usulan model, pada makalah ini juga telah dibahas studi kasus dimana penerapan usulan model pada sistem distribusi 69-bus dilakukan. Hasil studi memperlihatkan bahwa pada kecepatan-kecepatan angin antar 5 m/d sampai 12 m/d, keluaran daya aktif PLTAn bervariasi diantara 0,09 MW sampai 2,10 MW. Sedangkan keluaran daya reaktifnya bervariasi diantara 0,03 MVAR sampai 0,67 MVAR (untuk PF=0,95 leading), dan diantara -0,69 MVAR sampai -0,03 MVAR (untuk PF=0,95 lagging). Hasil-hasil penyelidikan dalam studi kasus ini juga mengkonfirmasi validitas usulan model PLTAn yang berbasis DFIG tersebut. Konfirmasi lebih lanjut dapat dilakukan dengan mengamati hasil-hasil studi aliran daya dimana daya GI ditambah daya PLTAn selalu sama dengan daya beban ditambah rugi-rugi daya saluran yang dihitung berdasarkan arus dan impedansi saluran.

REFERENSI

- [1] O. A. Lara, N. Jenkins, J. B. Ekanayake, P. Cartwright, and M. Hughes, *Wind Energy Generation: Modelling and Control*. England: John Wiley & Sons, 2009.
- [2] T. Ackermann. *Wind Power in Power Systems*. England: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] H. Li and Z. Chen, "Overview of different wind generator systems and their comparisons," *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, no. 2, pp. 123-138, 2008.
- [4] N. R. Babu and P. Arulmozhivarman, "Wind energy conversion system – A technical review," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 493-507, 2013.
- [5] M. H. Haque, "Evaluation of power flow solutions with fixed speed wind turbine generating systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 511-518, 2014.
- [6] 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, pp. 317-324, 2015.
- [7] J. Wang, C. Huang, and 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, pp. 135-141, 2015.
- [8] A. Feijoo and D. Villanueva, "A PQ model for asynchronous machines based on rotor voltage calculation," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 31, no. 2, pp. 813-814, 2016.
- [9] A. Feijoo and D. Villanueva, "Correction to 'A PQ Model for Asynchronous Machines Based on Rotor Voltage Calculation,'" *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 31, no. 3, pp. 1228-1228, 2016.
- [10] E. Gianto, "Model Ekuivalen-Pi dari pembangkit listrik tenaga angin dengan generator asinkron untuk analisis aliran daya," *TRANSMISI*, vol. 21, no. 4, pp. 96-102, 2019.
- [11] R. Gianto, K. H. Khwee, H. Priyatman, and M. Rajaguguk, "Two-port network model of fixed-speed wind turbine generator for distribution system load flow analysis," *TELKOMNIKA*, vol. 17, no. 3, pp. 1569-1575, 2019.
- [12] R. Gianto, "T-Circuit model of asynchronous wind turbine for distribution system load flow analysis," *International Energy Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 77-88, 2019.
- [13] R. Gianto and K. H. Khwee, "A new T-circuit model of wind turbine generator for power system steady state studies," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 550-558, 2021.
- [14] R. Gianto, "Integrasi model pembangkit listrik tenaga angin pada analisis aliran daya sistem tenaga," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 16, no. 3, pp. 161-167, 2020.
- [15] R. Gianto, "Model rangkaian-T pembangkit listrik tenaga bayu untuk analisis aliran daya tiga-fase," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 10, no. 1, pp. 91-99, 2021.
- [16] A. Dadhanian, "Modeling of doubly fed induction generators for distribution system power flow analysis," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, pp. 576-583, 2013.
- [17] Y. Ju, F. Ge, W. Wu, Y. Lin, and J. Wang, "Three-phase steady-state model of DFIG considering various rotor speeds," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 9479-9488, 2016.
- [18] V. S. S. Kumar and D. Thukaram, "Accurate modelling of doubly fed induction based wind farms in load flow analysis," *Electric Power Systems Research*, vol. 15, pp. 363-371, 2018.
- [19] S. Li, "Power flow modeling to doubly-fed induction generators (DFIGs) under power regulation," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3292-3301, 2013.
- [20] C. V. S. Anirudh and S. K. V. Seshadri, "Enhanced modeling of doubly fed induction generator in load flow analysis of distribution systems," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 1, pp. 1-10, 2021.
- [21] R. Gianto, "Steady state model of DFIG-based wind power plant for load flow analysis," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 8, pp.1724-1735, 2021.
- [22] V. Akhmatov, *Induction Generators for Wind Power*. United Kingdom: Multi-Science Publishing Co, 2007.
- [23] I. Boldea, *Variable Speed Generators*. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC, 2006.
- [24] B. Fox, L. Bryans, D. Flynn, N. Jenkins, D. Milborrow, M. O'Malley, R. Watson, O. A. Lara, *Wind Power Integration: Connection and System Operational Aspects*. United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2007.
- [25] M. R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*. Florida: CRC Press LLC, 1999.
- [26] R. Gianto and K. H. Khwee "A new method for load flow solution of electric power distribution system," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 11, no. 5, pp. 535-541, 2016.

- [27] R. R. Londero, J. P. A. Vieira, and C. M. Affonso, "Comparative analysis of DFIG based wind farms control mode on long-term voltage stability," in *Advances in Wind Power*, United Kingdom: Intech Open, 2012.
- [28] M. Kayikci and J. V. Milanovic, "Reactive power control strategies for DFIG-based plants" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 389-396, 2007.