

Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Tetap Untuk Analisis Aliran Daya

Rudy Gianto*

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura

*Corresponding author, e-mail: rudygianto@gmail.com

Abstrak— Tulisan ini menyajikan metode sederhana dalam memodelkan pembangkit listrik tenaga angin kecepatan tetap untuk analisis aliran daya suatu sistem tenaga listrik. Model yang diusulkan tersebut diturunkan berdasarkan rangkaian ekuivalen keadaan-mantap dari generator induksi pembangkit listrik tenaga angin. Teori rangkaian listrik (hukum Kirchhoff dan Ohm) kemudian digunakan untuk mendapatkan model matematis yang dimaksud. Usulan model ini telah berhasil diterapkan pada sistem tenaga listrik 9-bus. Komparasi dengan model lain (model PQ) juga telah dilakukan untuk keperluan validasi. Hasil-hasil pengujian mengkonfirmasi bahwa metode yang diusulkan tersebut adalah akurat.

Kata Kunci : Pembangkit listrik tenaga angin, Analisis aliran daya dan Generator induksi

Abstract— A simple model of fixed-speed wind turbine generating system for load flow analysis of an electrical power system is proposed in this paper. The proposed model is derived based on steady-state equivalent circuit of induction generator of the wind turbine generating system. Electric circuit theory (i.e. Kirchhoff and Ohm laws) is then used to obtain the proposed mathematical model. The proposed model has successfully been applied to 9-bus power system. Comparison with other model (PQ model) has also been carried out for validation purpose. Test results confirm that the proposed method is accurate.

Keywords : Wind turbine generating system, Power flow analysis and Induction generator

1. Pendahuluan

Beberapatahun belakangan ini integrasi dari pembangkit listrik tenaga angin (PLT angin) pada sistem tenaga telah meningkat secara signifikan. Negara-negara Eropa merupakan negara yang paling banyak mengeksploitasi energi angin ini sebagai sumber energi listrik. Banyak negara Eropa memiliki PLT angin dengan kapasitas terpasang lebih dari 1 GW [1]. Salah satu negara yang memiliki teknologi turbin angin paling maju adalah Denmark. Denmark juga merupakan negara yang potensi energi anginnya terbaik didunia. Saat ini, sekitar 40% dari kebutuhan listrik Denmark disuplai oleh PLT angin [1].

Indonesia juga memiliki potensi energi angin yang terbilang tidak kecil. Data dari Kementerian ESDM menyebutkan bahwa energi angin di Indonesia berpotensi menghasilkan daya listrik sebesar kurang lebih 60 GW [2]. Oleh karenanya, pemerintah Indonesia telah berkomitmen untuk memaksimalkan pemanfaatan energi terbarukan

tersebut. Salah satunya adalah penerbitan peraturan yang dituangkan dalam PP Nomor 79 tahun 2014 mengenai Kebijakan Energi Nasional. Dalam peraturan tersebut disebutkan bahwa target penggunaan energi primer untuk pembangkit listrik pada tahun 2025 adalah dari energi terbarukan (45 GW atau 33%) dan dari energi tak terbarukan (90 GW atau 67%). Sedangkan target penggunaan energi angin untuk pembangkit listrik pada tahun 2025 adalah sebesar 1,8 GW [2].

Komitmen pemerintah terhadap pemanfaatan energi terbarukan tersebut sedikit banyak telah membuahkan hasil. Sebagai contoh, saat ini PLT angin dengan kapasitas 75 MW di Sidrap, Sulawesi Selatan telah secara resmi beroperasi [3]. Selain itu, terdapat beberapa proyek PLT angin yang tersebar di beberapa wilayah Indonesia sedang dilakukan pengembangan. Misalnya, PLT angin Jeneponto Tolo 72 MW yang saat ini sudah dalam tahap konstruksi [3]. Sedangkan yang masih dalam tahap rencana

Received date 2018-11-3, Revised date 2019-12-2, Accepted date 2019-2-13

<https://doi.org/10.25077/jnte.v8n1.605.2019>

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

antara lain berlokasi di Sukabumi di Jawa Barat 170 MW, Lebak dan Pandeglang di Banten (masing-masing 150 MW), Tanah Laut di Kalimantan Timur 90 MW, Jeneponto 175 MW, Sidrap Phase II 75 MW, Sidrap Phase III 200 MW, dan Timor Tengah Selatan 20 MW serta Bantul 50 MW [3].

Analisis aliran daya merupakan alat yang biasa digunakan untuk mengevaluasi operasi keadaan-mantap (*steady-state*) suatu sistem tenaga listrik [4]. Analisis aliran daya dapat didefinisikan sebagai perhitungan tegangan-tegangan bus sistem pada kondisi beban dan pembangkitan tertentu. Setelah tegangan-tegangan bus ini dihitung, selanjutnya besarnya pembangkitan daya, aliran daya dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi akan dapat dihitung. Pada analisis aliran daya, bus-bus yang ada pada sistem dikelompokkan kedalam tiga jenis yaitu: bus referensi (Slack), pembangkit (PV) dan beban (PQ). Pengelompokan ini dimaksudkan agar masalah aliran daya tersebut dapat dicari solusinya.

Bus-bus pembangkit konvensional yang menggunakan generator sinkron dapat dimodelkan sebagai bus PV. Namun demikian, untuk bus-bus pembangkit dengan PLT angin yang konverter energi listriknya biasanya berupa generator asinkron (generator induksi), model bus PV tersebut tidak lagi valid untuk digunakan. Hal ini disebabkan karena umumnya pembangkit-pembangkit listrik tipe ini tidak memiliki kemampuan untuk mengendalikan output daya aktif dan besar tegangan. Oleh sebab itu, pengembangan model dari PLT angin diperlukan agar analisis aliran daya dari sistem tersebut dapat dilakukan dan kondisi operasinya bisa dievaluasi.

Beberapa peneliti telah melakukan kajian tentang pemodelan PLT angin untuk analisis aliran daya, dimana beberapa diantaranya adalah seperti yang dilaporkan pada [5-14]. Pada [5-11], suatu model matematik dari PLT angin telah dikembangkan dimana kemudian persamaan matematik ini (bersama-sama dengan persamaan aliran daya yang telah ada) diselesaikan secara iteratif. Namun demikian, rumusan model matematik yang diusulkan tersebut cukup rumit. Sedangkan [12-14] mengusulkan suatu metode untuk mengikut-sertakan model PLT angin kedalam program aliran daya. Model PLT angin yang diusulkan tersebut menambah dua bus (simpul), dua elemen seri, satu elemen shunt dan

satu beban pada jaringan sistem tenaga yang ada. Hal ini mengakibatkan ukuran sistem menjadi bertambah besar dan jumlah persamaan yang harus diselesaikan juga semakin banyak.

Tulisan ini mengusulkan metode sederhana untuk memodelkan dan mengikut-sertakan PLT angin pada analisis aliran daya. Model yang diusulkan tersebut diturunkan berdasarkan rangkaian-T ekuivalen dari mesin asinkron yang digunakan pada PLT angin. Pembentukan model dilakukan dengan bantuan teori rangkaian listrik dimana hukum-hukum Kirchhoff dan Ohm digunakan dalam pembentukannya. Model yang diusulkan ini juga dapat dengan mudah diikut-sertakan pada analisis aliran daya suatu sistem tenaga listrik.

2. Perumusan Masalah Aliran Daya

Seperti yang telah diuraikan, analisis aliran daya dimaksudkan untuk mengetahui nilai-nilai dari besaran listrik seperti: tegangan bus (simpul), daya yang dibangkitkan oleh generator, aliran dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi.

Solusi dari masalah aliran daya dapat diperoleh dengan menyelesaikan secara simultan persamaan-persamaan nonlinier berikut:

$$S_{Gi} - S_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* = 0 \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

dimana:

$S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$: pembangkitan daya pada bus-i

$S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}$: pembebanan daya pada bus-i

$V_i = |V_i| \angle \delta_i$: tegangan pada bus-i

$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$: elemen-ij dari matriks admitansi

n : jumlah bus

Pada (1), nilai-nilai untuk S_{Li} biasanya diketahui karena analisis aliran daya umumnya dilakukan pada kondisi beban tertentu. Sedangkan nilai-nilai untuk Y_{ij} ditentukan dari matriks admitansi yang dihitung berdasarkan data jaringan sistem tenaga. Dengan demikian, terlihat bahwa setiap bus pada sistem tenaga akan dikarakterisasi melalui empat besaran yaitu: P_G , Q_G , $|V|$ dan δ . Sedangkan jumlah persamaan yang ada untuk setiap bus adalah dua persamaan

yang diperoleh dengan cara memisahkan bagian riil dan imajiner dari (1).

Agar supaya (1) dapat dicari solusinya, maka dua dari empat besaran pada setiap bus tersebut harus ditentukan atau dispesifikasi nilainya. Hal ini dapat dilakukan dengan mendefinisikan tiga tipe bus seperti yang diperlihatkan pada Tabel 1. Perlu dicatat bahwa karena bus beban tidak mengandung pembangkit, maka pembangkitan daya pada bus tersebut adalah nol ($P_G=Q_G=0$).

Pendefinisian tersebut mengakibatkan jumlah besaran yang akan dicari atau dihitung pada setiap bus akan menjadi sama dengan jumlah persamaan nonlinier yang ada atau yang akan diselesaikan. Hal ini berimplikasi bahwa (1) dapat dicari penyelesaiannya, sehingga analisis aliran daya menjadi mungkin untuk dilakukan, dan kondisi operasi keadaan mantap (*steady-state*) sistem bisa dievaluasi.

Tabel 1. Tipe Bus dan Besaran Listrik

No	Tipe Bus	Besaran Yang Dispesifikasi	Besaran Yang Dicari
1	Referensi (Slack)	$ V $ dan δ	P_G dan Q_G
2	Beban (PQ)	$P_G=Q_G=0$	$ V $ dan δ
3	Pembangkit (PV)	P_G dan $ V $	Q_G dan δ

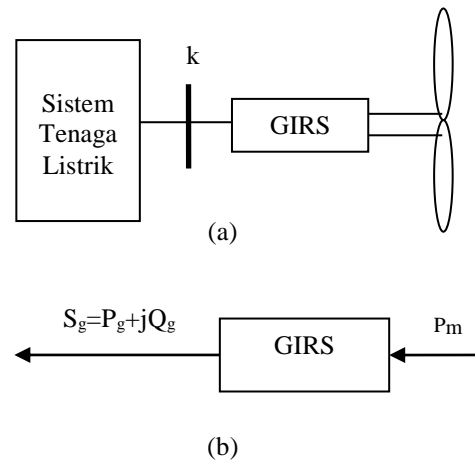
3. Pemodelan PLT Angin

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, bus-bus pembangkit dengan PLT angin tidak dapat dimodelkan sebagai bus PV karena pembangkit listrik tipe ini umumnya tidak memiliki kemampuan untuk mengendalikan output daya aktif dan besar tegangan. Oleh sebab itu, agar analisis aliran daya dari sistem yang mengandung PLT angin dapat dilakukan, model dari PLT angin tersebut perlu dibentuk terlebih dahulu. Hal ini akan dibahas secara lebih detail sebagai berikut.

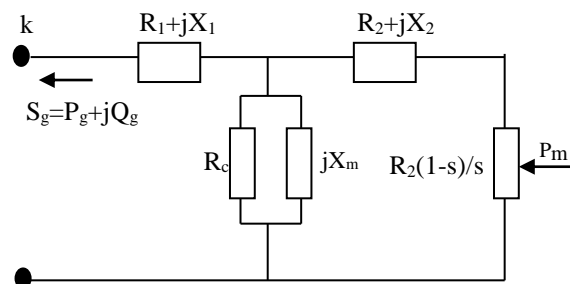
PLT angin dengan generator induksi rotor-sangkar (GIRS) yang terkoneksi pada suatu sistem tenaga listrik ditunjukkan pada Gambar 1a. Pada Gambar 1b, P_m merupakan masukan daya mekanik yang berasal dari turbin angin untuk GIRS, sedangkan S_g adalah keluaran daya listrik dari GIRS. Masukan daya mekanik ini biasanya diketahui nilainya karena pabrik pembuat turbin umumnya menyediakan nilai-

nilai untuk P_m sebagai fungsi dari kecepatan angin.

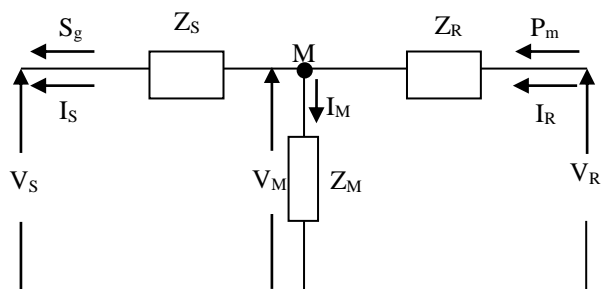
Gambar 2 memperlihatkan rangkaian pengganti dari GIRS, dimana R_1, X_1, R_2, X_2, R_c dan X_m berturut-turut menyatakan resistansi stator, reaktansi bocor stator, resistansi rotor, reaktansi bocor rotor, resistansi rugi-rugi inti dan reaktansi magnetik. Sedangkan $R_2(1-s)/s$ adalah resistansi dinamik, dimana daya yang diserap oleh resistansi ini menggambarkan masukan daya mekanik untuk GIRS.



Gambar 1. PLT angin terhubung pada sistem



Gambar 2. Rangkaian pengganti dari GIRS



Gambar 3. Rangkaian pengganti dari GIRS dalam bentuk impedansi

Gambar 3 juga merupakan rangkaian pengganti dari GIRS. Akan tetapi, pada Gambar 3, parameter-parameter dari GIRS dinyatakan dalam bentuk impedansi. Impedansi-impedansi Z_S , Z_R dan Z_M pada Gambar 3 tersebut diberikan oleh:

$$\begin{aligned} Z_S &= R_1 + jX_1 \\ Z_R &= R_2 + jX_2 \\ Z_M &= jR_c X_m / (R_c + jX_m) \end{aligned} \quad (2)$$

Dengan melihat Gambar 3, dan berdasarkan teori rangkaian listrik (hukum-hukum Kirchoff dan Ohm), dapat ditunjukkan bahwa arus-arus stator dan rotor berturut-turut adalah (penurunannya dapat dilihat pada Lampiran):

$$I_S = \frac{Z_M}{Z_S + Z_M} I_R - \frac{I}{Z_S + Z_M} V_S \quad (3)$$

$$I_R = \frac{I}{Z_R} V_R - \frac{I}{Z_R} V_S - \frac{Z_S}{Z_R} I_S \quad (4)$$

dimana V_S adalah tegangan stator dari GIRS yang juga merupakan tegangan pada bus PLT angin. Sedangkan $V_R = |V_R| \angle \alpha$ adalah tegangan rotor dari GIRS.

Sedangkan keluaran daya listrik dan masukan daya mekanik dari GIRS dapat dihitung melalui persamaan-persamaan berikut:

$$S_g = P_g + jQ_g = V_S I_S^* \quad (5)$$

$$S_m = P_m + j0 = V_R I_R^* \quad (6)$$

Berdasarkan (5) dan (6), arus stator sebagai fungsi keluaran daya listrik dan tegangan stator, serta arus rotor sebagai fungsi masukan daya mekanik dan tegangan rotor dapat dirumuskan sebagai:

$$I_S = \frac{S_g^*}{V_S^*} \quad (7)$$

$$I_R = \frac{P_m}{V_R^*} \quad (8)$$

Substitusi (7) dan (8) pada (3) dan (4), serta mengatur kembali hasilnya, akan diperoleh:

$$\frac{S_g^*}{V_S^*} - \frac{Z_M}{Z_S + Z_M} \frac{P_m}{V_R^*} + \frac{I}{Z_S + Z_M} V_S = 0 \quad (9)$$

$$\frac{P_m}{V_R^*} - \frac{I}{Z_R} V_R + \frac{I}{Z_R} V_S + \frac{Z_S}{Z_R} \frac{S_g^*}{V_S^*} = 0 \quad (10)$$

Persamaan (9) dan (10) merupakan usulan model matematis dari PLT angin untuk diintegrasikan pada analisis aliran daya suatu sistem tenaga listrik. Dengan demikian, untuk mendapatkan solusi masalah aliran daya dari sistem yang mengandung PLT angin, selain (1), persamaan tambahan yang harus diselesaikan adalah (9) dan (10). Sedangkan variabel tambahan yang harus dihitung adalah S_g dan V_R (lihat Tabel 2). Perlu dicatat bahwa pada Tabel 2, pembangkitan daya P_G dan Q_G untuk bus PLT angin adalah nol karena bus tersebut tidak mengandung pembangkit konvensional.

Tabel 2. Tipe Bus dan Besaran Listrik untuk Sistem dengan PLT Angin

No	Tipe Bus	Besaran Yang Dispesifikasi	Besaran Yang Dicari
1	Referensi (Slack)	$ V $ dan δ	P_G dan Q_G
2	Beban (PQ)	$P_G=Q_G=0$	$ V $ dan δ
3	Pembangkit (PV)	P_G dan $ V $	Q_G dan δ
4	PLT Angin	$P_G=Q_G=0$	$P_g, Q_g, V , \delta, V_R $, dan α

4. Metode Solusi Masalah Aliran Daya

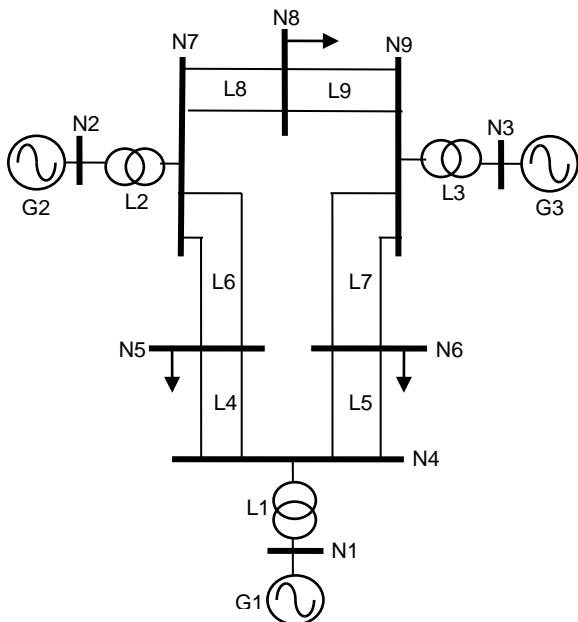
Dari uraian pada Bab 2 dan 3 terlihat bahwa rumusan dari masalah aliran daya adalah berbentuk persamaan-persamaan nonlinier. Penyelesaian terhadap set persamaan nonlinier tersebut biasanya dilakukan melalui teknik iteratif. Pada teknik ini, langkah pertama dalam proses perhitungan adalah memperkirakan atau mengestimasi nilai awal dari besaran-besaran yang akan dicari solusinya. Melalui suatu faktor koreksi, estimasi awal ini kemudian diperbaiki secara berulang-ulang (iteratif) sampai diperoleh solusi dengan akurasi yang diinginkan.

Faktor koreksi pada penyelesaian set persamaan nonlinier dapat dihitung dengan menggunakan cara langsung (seperti pada metode Newton-Raphson). Atau, faktor koreksi ini juga dapat dihitung melalui teknik optimisasi (seperti pada metode trust-region) [4].

5. Hasil dan Pembahasan

5.1. Sistem Test

Usulan model untuk PLT angin seperti yang dibahas di Bab 3 akan diverifikasi dengan menggunakan sistem pada Gambar 4. Sistem ini didasarkan pada sistem 9 bus [15], yang kemudian dimodifikasi dengan menambahkan PLT angin yang terhubung pada bus N8 melalui transformator. Data sistem, termasuk data GIRS dari PLT angin, diperlihatkan pada Tabel 3, 4 dan 5. Semua data dalam pu pada dasar 100 MVA. Perlu juga ditambahkan disini bahwa seluruh perhitungan pada tulisan ini dilakukan pada komputer pribadi (PC) dengan bantuan perangkat lunak MATLAB™.



Gambar 4. Sistem 3-mesin 9-bus

Tabel 3. Data Cabang (Saluran)

Sal.	Bus p - q	Impedansi Seri (Z)	Admitansi Shunt (Ysh/2)
1	1 - 4	j0,1184	0
2	2 - 7	j0,1823	0
3	3 - 9	j0,2399	0
4	4 - 5	0,0100+j0,0850	j0,0880
5	4 - 6	0,0170+j0,0920	j0,0790
6	5 - 7	0,0320+j0,1610	j0,1530
7	6 - 9	0,0390+j0,1700	j0,1790
8	7 - 8	0,0085+j0,0720	j0,0745
9	8 - 9	0,0119+j0,1008	j0,1045
10	8 - 10	j0,1000	0

Tabel 4. Data Bus (Simpul)

Bus	V	δ	Pembangkitan	Beban	Tipe
1	1,04	0	-	0	Slack
2	1,02	-	1,50+j-	0	PV
3	1,01	-	1,00+j-	0	PV
4	-	-	0	0	PQ
5	-	-	0	1,25+j0,50	PQ
6	-	-	0	0,90+j0,30	PQ
7	-	-	0	0	PQ
8	-	-	0	1,00+j0,35	PQ
9	-	-	0	0	PQ
10	-	-	-	0	PLT B

Keterangan: - = besaran yang akan dicari

Tabel 5. Data PLT Angin

Komponen	Parameter
GIRS	Stator: $R_1 = 0,020$; $X_1 = 0,100$
	Rotor: $R_2 = 0,018$; $X_1 = 0,180$
	Inti Magnetik: $R_c = 50$; $X_m = 3,2$
Transformator	Impedansi: $Z_T = j0,1$
Kapasitor Shunt	Kapasitas: $Q_{CAP} = 0,3$

5.2. Hasil dan Pembahasan

Hasil-hasil dari perhitungan aliran daya ditunjukkan pada Tabel 6 dan 7. Tabel 6 memperlihatkan hasil perhitungan besar tegangan (|V|) pada bus PLT angin (bus 10), sedangkan Tabel 7 memperlihatkan hasil perhitungan output daya listrik PLT angin ($P_g + jQ_g$). Perhitungan-perhitungan tersebut dilakukan pada berbagai nilai input daya mekanik P_m yaitu mulai 0,1 s/d 1,0 pu. Nilai-nilai input daya mekanik yang bervariasi ini

menggambarkan kondisi kecepatan angin rendah sampai tinggi.

Sebagai pembandingan, hasil perhitungan dari metode lain juga diperlihatkan pada Tabel 6 dan 7. Metode yang digunakan sebagai pembandingan pada tulisan ini adalah metode yang relatif baru yaitu model PQ [10, 11]. Dari tabel-tabel tersebut terlihat bahwa model PLT angin yang diusulkan adalah akurat dan sangat bersesuaian dengan hasil dari model PQ tersebut.

Hasil-hasil perbandingan tersebut diatas memperlihatkan bahwa model PLT angin yang diusulkan adalah valid, dan oleh karenanya dapat digunakan untuk mengintegrasikan PLT angin pada analisis aliran daya suatu sistem tenaga listrik.

Tabel 6. Besar Tegangan Pada Bus PLT Angin

P _m	Model Yang Diusulkan	Model PQ [10, 11]
0,1	0,9907	0,9907
0,2	0,9887	0,9887
0,3	0,9847	0,9847
0,4	0,9785	0,9785
0,5	0,9701	0,9701
0,6	0,9588	0,9588
0,7	0,9440	0,9440
0,8	0,9244	0,9244
0,9	0,8969	0,8969
1,0	0,8502	0,8502

Ket: besar tegangan adalah dalam pu

Tabel 7. Output Daya Listrik PLT Angin

P _m	Model Yang Diusulkan	Model PQ [10, 11]
0,1	0,0793-j0,3010	0,0793-j0,3010
0,2	0,1781-j0,3096	0,1781-j0,3096
0,3	0,2762-j0,3230	0,2762-j0,3230
0,4	0,3734-j0,3416	0,3734-j0,3416
0,5	0,4697-j0,3660	0,4697-j0,3660
0,6	0,5649-j0,3937	0,5649-j0,3937
0,7	0,6588-j0,4363	0,6588-j0,4363
0,8	0,7509-j0,4868	0,7509-j0,4868
0,9	0,8402-j0,5553	0,8402-j0,5553
1,0	0,9226-j0,6671	0,9226-j0,6671

Ket: output daya listrik adalah dalam pu

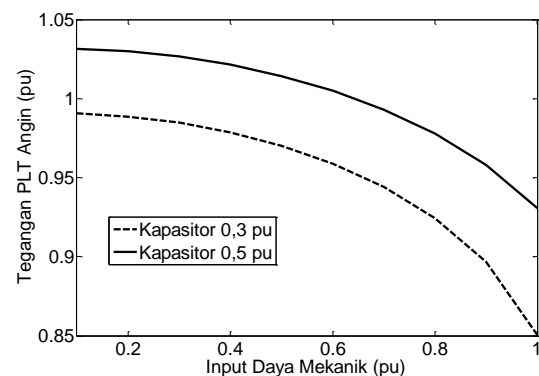
Perlu juga ditambahkan disini bahwa instalasi kapasitor shunt pada terminal PLT angin diperlukan untuk membantu catu daya reaktif

yang dibutuhkan oleh generator induksi dari PLT angin tersebut. Tabel 6 dan 7 diatas memperlihatkan hasil-hasil perhitungan untuk kapasitor shunt sebesar 0,3 pu. Pada tulisan ini juga akan diselidiki pengaruhnya terhadap penampilan sistem bila kapasitor yang terpasang tersebut memiliki kapasitas yang lebih besar. Tabel 8 memperlihatkan hasil perhitungan besar tegangan dan daya yang dibangkitkan PLT angin untuk kapasitor shunt dengan kapasitas 0,5 pu.

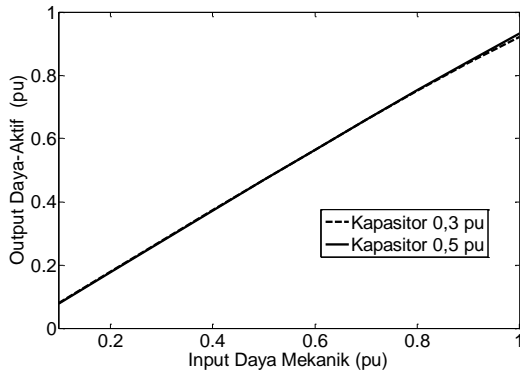
Untuk mengamati pengaruh dari pemasangan kapasitor tersebut secara lebih detail, hasil-hasil perhitungan diatas (Tabel 6 – 8) juga disajikan dalam bentuk grafik (lihat Gambar 5 – 7). Gambar 5 merupakan plot dari input daya mekanik (P_m) terhadap tegangan terminal PLT angin ($|V|$). Gambar 6 memperlihatkan plot dari input daya mekanik (P_m) terhadap output daya-aktif PLT angin (P_g). Sedangkan Gambar 7 memperlihatkan plot dari input daya mekanik (P_m) terhadap negatif dari output daya-reaktif PLT angin ($-Q_g$).

Tabel 8. Tegangan dan Output Daya Listrik PLT Angin Untuk Kapasitor Shunt Sebesar 0,5 pu

P _m	Besar Tegangan	Output Daya Listrik
0,1	1,0316	0,0776-j0,3259
0,2	1,0300	0,1765-j0,3339
0,3	1,0266	0,2747-j0,3464
0,4	1,0214	0,3722-j0,3636
0,5	1,0143	0,4688-j0,3860
0,6	1,0050	0,5645-j0,4141
0,7	0,9931	0,6591-j0,4490
0,8	0,9778	0,7524-j0,4924
0,9	0,9579	0,8438-j0,5475
1,0	0,9305	0,9323-j0,6214



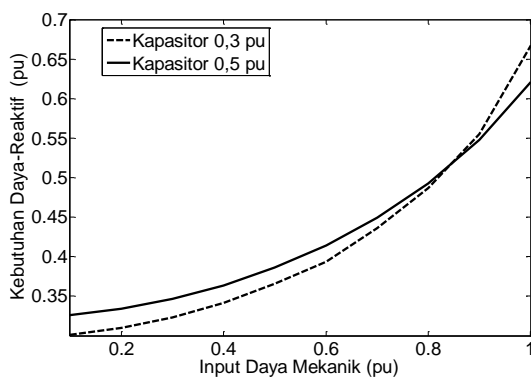
Gambar 5. Variasi tegangan PLT angin



Gambar 6. Variasi daya-aktif PLT angin

Gambar 5 jelas memperlihatkan bahwa kapasitor shunt dapat mendukung kebutuhan daya reaktif dari PLT angin. Hal ini terlihat dengan membaiknya profil tegangan untuk kapasitas kapasitor yang lebih besar. Walaupun nilainya sedikit lebih kecil dari masukan daya mekanik, daya aktif yang dibangkitkan oleh PLT angin selalu proporsional dengan masukan daya mekanik (lihat Gambar 6).

Namun, tidak demikian halnya untuk kasus variasi daya reaktif dari PLT angin. Dengan meningkatnya masukan daya mekanik, peningkatan daya reaktif dari PLT angin tidak terjadi secara proporsional akan tetapi terjadi secara hampir eksponensial (lihat Gambar 7). Dengan kata lain, meningkatnya keluaran daya aktif dari PLT angin akan membutuhkan suplai daya reaktif yang lebih besar.



Gambar 7. Variasi daya-reaktif PLT angin

6. Kesimpulan

Metode sederhana untuk memodelkan dan mengintegrasikan PLT angin pada analisis aliran daya sistem tenaga listrik telah diusulkan dan dibahas pada tulisan ini. Model yang diusulkan tersebut diturunkan berdasarkan rangkaian ekuivalen keadaan-mantap dari generator induksi yang digunakan oleh PLT angin tersebut. Model matematik ini kemudian diikuti-sertakan pada analisis aliran daya agar operasi keadaan-mantap sistem secara keseluruhan (termasuk PLT angin) dapat dievaluasi. Hasil-hasil pengujian mengkonfirmasi bahwa model PLT angin yang diusulkan adalah valid, dan oleh karenanya dapat digunakan sebagai cara untuk mengintegrasikan PLT angin pada analisis aliran daya suatu sistem tenaga listrik.

Daftar Pustaka

- [1] Pineda, I., dkk, "Wind in Power 2017: Annual Combined Onshore and Offshore Wind Energy Statistics", *WindEurope Report*, Brussels, Feb. 2018.
- [2] Hutapea, M., "Potensi Bisnis Energi Baru Terbarukan", *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*, Jakarta, Okt. 2017.
- [3] Potensi Pengembangan Listrik Tenaga Angin Indonesia. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/potensi-pengembangan-listrik-tenaga-angin-indonesia-berikut-sebaran-lokasinya> (diakses tanggal 14 Februari 2019).
- [4] Gianto, R., dan Khwee, K.H., "Solusi Aliran Daya untuk Sistem Distribusi Tak Seimbang dengan Menggunakan Metode Trust-Region", *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 13-20, 2016.
- [5] Divya, K.C., dan Nagendra Rao, P.S., "Models for Wind Turbine Generating Systems and Their Applications in Load Flow Studies", *Electric Power Systems Research*, vol. 76, pp. 844-856, 2006.
- [6] Zhao, M., Chen, Z., dan Blaaberg, F., "Load Flow Analysis for Variable Speed Offshore Wind Farms", *IET Renew. Power Gener.*, vol. 3, no. 2, pp. 120-132, 2009.
- [7] Eminoglu, U., Dursun, B., dan Hocaoglu, M.H., "Incorporation of New Wind Turbine Generating System Model into Distribution

- Systems Load Flow Analysis”, *Wind Energy*, vol. 12, pp. 375-390, 2009.
- [8] Castro, L.M., et al., “A Unified Approach for the Solution of Power Flows in Electric Power Systems Including Wind Farms”, *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 1859-1865, 2011.
- [9] Feijoo, A., Pazos, J.L dan Villanueva, D., “Conventional Asynchronous Wind Turbine Models – Mathematical Expressions for the Load Flow Analysis”, *International Journal of Energy Engineering (IJEE)*, Dec. vol. 3, no. 6, pp. 269-278, 2013.
- [10] Feijoo, A. dan Villanueva, D., “A PQ Model for Asynchronous Machines Based on Rotor Voltage Calculation”, *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 2, pp. 813-814, 2016.
- [11] Feijoo, A. dan Villanueva, D., “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.
- [12] Haque, M.H., “Evaluation of Power Flow Solutions with Fixed Speed Wind Turbine Generating Systems”, *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 511-518, 2014.
- [13] Wang, J., Huang, C. dan Zobaa, A.F., “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.
- [14] Haque, M.H., “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.
- [15] Anderson, P.M. dan Fouad, A.A., “Power System Control and Stability”, *Wiley-IEEE Press*, New Jersey, 2003.

Lampiran

L.1. Penurunan Rumus Arus Stator

Penerapan hukum Kirchhoff untuk arus pada simpul M dari rangkaian pada Gambar 3 menghasilkan:

$$I_S - I_R + I_M = 0 \quad (L.1)$$

Dengan menggunakan hukum Ohm, arus yang mengalir pada rangkaian inti magnetik GIRS adalah:

$$I_M = \frac{V_M}{Z_M} = \frac{V_S + Z_S I_S}{Z_M} \quad (L.2)$$

Substitusi (L.2) pada (L.1) dan mengatur kembali hasilnya akan menghasilkan:

$$\frac{Z_M + Z_S}{Z_M} I_S - I_R + \frac{1}{Z_M} V_S = 0 \quad (L.3)$$

Berdasarkan (L.3), arus stator GIRS dapat dirumuskan sebagai:

$$I_S = \frac{Z_M}{Z_M + Z_S} I_R - \frac{1}{Z_M + Z_S} V_S \quad (L.4)$$

L.2. Penurunan Rumus Arus Rotor

Dengan menggunakan hukum Kirchhoff untuk tegangan pada rangkaian Gambar 3 akan diperoleh:

$$V_R - V_S = Z_S I_S + Z_R I_R \quad (L.5)$$

Berdasarkan (L.5), rumusan dari arus rotor GIRS akan berbentuk:

$$I_R = \frac{1}{Z_R} V_R - \frac{1}{Z_R} V_S - \frac{Z_S}{Z_R} I_S \quad (L.6)$$

Biodata Penulis

Rudy Gianto, mendapatkan gelar S1, S2 dan S3 berturut-turut dari Universitas Tanjungpura tahun 1991, Institut Teknologi Bandung tahun 1995 dan University of Western Australia tahun 2008. Saat ini penulis terdaftar sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Tanjungpura Pontianak.