

Integrasi Model Pembangkit Listrik Tenaga Angin pada Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga

Rudy Gianto

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

Abstrak—Makalah ini mengusulkan metode baru dalam memodelkan dan mengintegrasikan pembangkit listrik tenaga angin (PLTAN) pada analisis aliran daya. Model PLTAN yang diusulkan ini didasarkan pada perhitungan slip dari generator induksi yang digunakan pada PLTAN tersebut. Berbeda dengan beberapa metode yang ada sebelumnya dimana slip mesin dihitung setelah proses perhitungan (iterasi) selesai, pada metode yang diusulkan ini perhitungan slip dilakukan bersama-sama dengan besaran-besaran listrik lainnya secara iterasi. Cara ini memiliki keuntungan yaitu rumusan untuk tegangan rotor dari generator induksi (yang biasanya cukup rumit dan sering dinyatakan sebagai persamaan bi-kuadrat) tidak lagi diperlukan dalam pemodelan. Hasil validasi memperlihatkan bahwa metode yang diusulkan ini sangat akurat. Aplikasi dari model PLTAN pada analisis aliran daya sistem tenaga multi-bus serta pengaruhnya terhadap penampilan keadaan mantap (*steady state*) sistem juga ikut diselidiki dan disajikan pada makalah ini.

Kata kunci: *pembangkit listrik tenaga angin, analisis aliran daya, sistem tenaga, generator induksi, slip*

Abstract—This paper proposes a new method for modeling and integrating wind turbine generating system (WTGS) into power flow analysis. The proposed WTGS model is based on the slip calculation of the WTGS induction generator. Unlike some previous methods where machine slip is determined after the iteration process has been completed, in the proposed method, machine slip is included in the calculation or iteration process and computed together with other electrical quantities. In this way, the formulation for induction generator rotor voltage (which is usually complicated and often represented by bi-quadratic equation) is no longer needed in the modeling. Validation results show that the proposed method is accurate. The application of the WTGS model in load flow analysis of the multi-bus electric power system is also presented. In addition, the effect of WTGS installation on system steady-state performance is also investigated in this paper.

Keywords: *wind power plant, load flow analysis, power system, induction generator, slip*

Copyright © 2020 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Langkah pertama dalam pengintegrasian PLTAN pada analisis aliran daya adalah melakukan pemodelan dari PLTAN tersebut. Beberapa peneliti telah melakukan kajian tentang pemodelan dan integrasi PLTAN pada analisis aliran daya seperti yang dilaporkan pada Referensi [1]–[10].

Referensi [1] mengusulkan suatu model matematik dari PLTAN kecepatan tetap untuk analisis aliran daya sistem distribusi tenaga listrik. Model tersebut diturunkan dengan menggunakan persamaan bi-kuadrat, yaitu persamaan yang biasa digunakan untuk menentukan tegangan rotor generator induksi dari PLTAN. Hasil perhitungan tegangan ini kemudian digunakan untuk menentukan keluaran-keluaran daya PLTAN untuk berbagai nilai kecepatan angin dan tegangan terminal PLTAN. Pada [2], model matematik dari beberapa jenis PLTAN telah diusulkan. Model tersebut didasarkan pada representasi keadaan mantap dari generator induksi yang digunakan pada PLTAN. Pada

usulan model tersebut, persamaan-persamaan dari jaringan sistem tenaga dan generator induksi digabungkan menjadi satu set persamaan aljabar nonlinier. Metode Newton-Raphson kemudian digunakan untuk mencari solusi dari set persamaan-persamaan nonlinier tersebut.

Referensi [3] mengusulkan suatu model matematik dari PLTAN kecepatan tetap untuk analisis aliran daya sistem tenaga listrik. Langkah pertama dalam usulan model pada [3] adalah mengubah rangkaian-T dari generator induksi menjadi rangkaian ekivalen- Π dengan menggunakan transformasi Y- Δ . Perlu dicatat disini bahwa rangkaian-T dari generator induksi terbentuk dari rangkaian-rangkaian stator dan rotor serta rangkaian magnetisasi dari generator induksi. Selanjutnya, berdasarkan rangkaian ekivalen- Π tersebut, dilakukan penurunan model matematis dari PLTAN. Model matematis ini menghitung keluaran daya listrik dari PLTAN sebagai fungsi dari parameter-parameter mesin, tegangan-tegangan stator dan rotor, serta masukan daya mekanik dari turbin angin. Persamaan matematik ini kemudian diselesaikan secara iteratif untuk mendapat

solusi dari masalah aliran daya.

Model PQ yang diusulkan pada [4], [5] adalah mirip dengan model pada [3]. Sama seperti pada [3], model matematis untuk PLTAN kecepatan tetap pada [4], [5] juga menghitung keluaran daya listrik dari PLTAN sebagai fungsi dari parameter-parameter mesin, tegangan-tegangan stator dan rotor, serta masukan daya mekanik dari turbin angin. Namun demikian, formula matematis pada [4], [5] agak sedikit berbeda dengan formula matematis pada [3]. Perbedaan ini terjadi karena cara penurunan formulanya yang berbeda. Pada [4], [5], proses penurunan formulanya hanya menggunakan hukum-hukum Ohm dan Kirchoff. Sedangkan pada [3], rangkaian-rangkaian ekuivalen Thevenin dan Norton juga digunakan pada proses penurunan formulanya.

Pada [6], model dari PLTAN kecepatan tetap untuk analisis aliran daya telah diusulkan. Model matematis tersebut menghitung keluaran daya-aktif dan daya-reaktif dari PLTAN sebagai fungsi dari parameter-parameter generator induksi, masukan daya mekanik dari turbin angin, dan tegangan-tegangan terminal. Perlu juga ditambahkan bahwa pada [6], mirip seperti usulan model pada [1], tegangan rotor urutan positif dari generator induksi juga dinyatakan sebagai persamaan bi-kuadrat. Namun demikian, pada penurunan formulanya, [6] menggunakan rangkaian ekuivalen dari generator induksi yang lebih sederhana, sehingga hasilnya kurang akurat.

Referensi [7]-[10] mengusulkan suatu metode untuk mengikutsertakan model PLTAN kecepatan tetap kedalam program aliran daya standar. Model tersebut dinamai model tiga-simpul (*three-node model*). Disebut model tiga-simpul karena, untuk setiap unit PLTAN yang terhubung pada sistem tenaga listrik, terdapat penambahan tiga bus PQ dan tiga cabang virtual pada sistem tersebut. Ketiga bus tambahan ini terdiri dari: (i) bus dimana PLTAN terhubung; (ii) bus dimana cabang magnetisasi dari generator induksi terhubung; dan (iii) bus dimana beban yang merepresentasikan daya masukan turbin angin terhubung. Sedangkan tiga cabang tambahan tersebut terdiri dari: (i) impedansi rangkaian stator generator induksi; (ii) impedansi rangkaian rotor generator induksi; dan (iii) impedansi rangkaian magnetisasi generator induksi.

Dengan menggunakan metode pada [7]-[10], solusi aliran daya dapat dicari hanya dengan menggunakan program aliran daya standar. Yang perlu dilakukan hanyalah mengubah data input program (memasukkan data parameter-parameter generator induksi) dan tidak perlu mengubah kode program (*source code*) dari program aliran daya standar tersebut. Namun demikian, oleh karena model PLTAN yang diusulkan [7]-[10] menambah dua bus (simpul), dua elemen seri, satu elemen shunt dan satu beban pada jaringan sistem tenaga yang ada, maka hal ini mengakibatkan ukuran sistem menjadi bertambah besar dan jumlah persamaan yang harus diselesaikan juga semakin banyak.

Pada makalah ini, usulan model matematis dari PLTAN kecepatan tetap akan didasarkan pada perhitungan

slip generator induksi rotor sangkar (GIRS) dari PLTAN tersebut. Hal ini dilakukan karena dalam operasinya variasi nilai slip dari suatu PLTAN kecepatan tetap akan berada dalam rentang yang sangat kecil (maksimum hanya sekitar 2%). Dengan demikian, dalam proses perhitungan (iterasi) pada studi aliran daya, ia dapat diperlakukan sebagai salah satu besaran yang akan dicari (*unknown quantity*) karena nilai awalnya untuk memulai proses iterasi tersebut telah diketahui (yaitu suatu nilai antara 0 s/d $\pm 2\%$). Berbeda dengan beberapa metode yang ada sebelumnya dimana slip mesin dihitung setelah proses perhitungan (iterasi) selesai, pada metode yang diusulkan ini perhitungan slip dilakukan bersama-sama dengan besaran-besaran listrik lainnya secara iterasi. Cara ini memiliki keuntungan yaitu rumusan untuk tegangan rotor GIRS yang biasanya cukup rumit dan sering dinyatakan sebagai persamaan bi-kuadrat tidak lagi diperlukan dalam pemodelan. Untuk menyelidiki akurasi dari usulan model tersebut, proses validasi telah dilakukan dan dilaporkan pada tulisan ini. Disamping itu, penerapan dari model pada analisis aliran daya suatu sistem tenaga listrik multi-bus dan pengaruh dari PLTAN terhadap penampilan keadaan mantap sistem juga telah diinvestigasi dan disajikan pada makalah ini.

II. FORMULASI MASALAH ALIRAN DAYA

Studi aliran daya biasanya dilakukan untuk mengevaluasi penampilan keadaan mantap (*steady state*) suatu sistem tenaga listrik. Studi ini juga merupakan dasar untuk studi sistem tenaga lainnya (misalnya: studi kestabilan). Output dari studi aliran daya antara lain berupa: tegangan-tegangan busbar sistem dan pembangkitan-pembangkitan daya generator. Dapat ditunjukkan bahwa masalah aliran daya suatu sistem tenaga listrik memiliki formulasi sebagai berikut [11]:

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

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.

Terlihat bahwa dengan memisahkan bagian riil dan imajiner dari (1), akan terdapat dua buah persamaan untuk setiap bus sistem tenaga. Dapat diamati juga bahwa untuk setiap bus sistem, akan terdapat empat variabel yang belum diketahui nilainya (yaitu: P_G , Q_G , $|V|$ dan δ). Oleh karenanya, agar solusi unik terhadap (1) dapat dicari, dua dari empat variabel tersebut harus ditentukan nilainya. Untuk keperluan ini, hal yang umum dilakukan dalam analisis aliran daya adalah dengan mendefinisikan tiga jenis bus: (1) bus referensi (*slack*); (2) bus beban (PQ); dan (3) bus pembangkit (PV) (lihat Tabel 1).

Tabel 1 juga memperlihatkan variabel yang belum

diketahui (yang akan dihitung) dan variabel yang diketahui (yang ditentukan nilainya) pada formulasi dari masalah aliran daya. Dengan menggunakan definisi seperti diatas, jumlah variabel yang akan dihitung akan sama dengan jumlah persamaan sehingga set persamaan (1) tersebut dapat dicari solusinya.

III. PEMODELAN DAN INTEGRASI PLTAN

A. Turbin Angin

Turbin angin merupakan salah satu elemen utama dari suatu PLTAN dan berfungsi sebagai mesin penggerak generator untuk menghasilkan daya listrik. Dalam operasinya, turbin angin mengubah energi kinetik angin menjadi daya mekanik. Besar daya mekanik turbin angin ini dapat dihitung melalui [10, 12]:

$$P_m = 0,5\rho AV_w^3 C_p, \tag{2}$$

dimana ρ adalah kerapatan udara (kg/m^3), $A=\pi R^2$ (R adalah panjang bilah turbin dalam meter), V_w adalah kecepatan angin (m/detik), dan C_p adalah koefisien performansi turbin.

Untuk kondisi udara normal, nilai ρ akan berada disekitar $1,225 \text{ kg/m}^3$ [13]. Sedangkan nilai C_p , yang dalam prakteknya berada pada rentang $0,25-0,45$, dapat ditentukan berdasarkan data yang disediakan oleh pabrik pembuat turbin [13], [14]. Bahkan, banyak pabrik pembuat turbin angin juga menyediakan kurva daya (*power curve*) dari turbin yang diproduksinya. Kurva daya ini menggambarkan karakteristik-karakteristik dari daya

Tabel 1. Jenis bus dan variabel

No	Jenis Bus	Variabel Yang Ditentukan	Variabel Yang Dicari
1	Referensi (<i>Slack</i>)	$ V $ dan $\delta=0$	PG dan QG
2	Beban (PQ)	$PG=QG=0$	$ V $ dan δ
3	Pembangkit (PV)	PG dan $ V $	QG dan δ

Tabel 2. Data kurva daya dari turbin angin V47-500kW

Vw (m/detik)	Pm (kW)	Vw (m/detik)	Pm (kW)
0	0	13	494
1	0	14	498
2	0	15	500
3	0	16	500
4	3,1	17	500
5	43,8	18	500
6	96,1	19	500
7	163	20	500
8	242	21	500
9	325	22	500
10	400	23	500
11	452	24	500
12	481	25	500

mekanik turbin terhadap kecepatan angin. Contoh data kurva daya dari turbin angin V47-500kW diperlihatkan pada Tabel 2 [7].

B. Pemodelan PLTAN

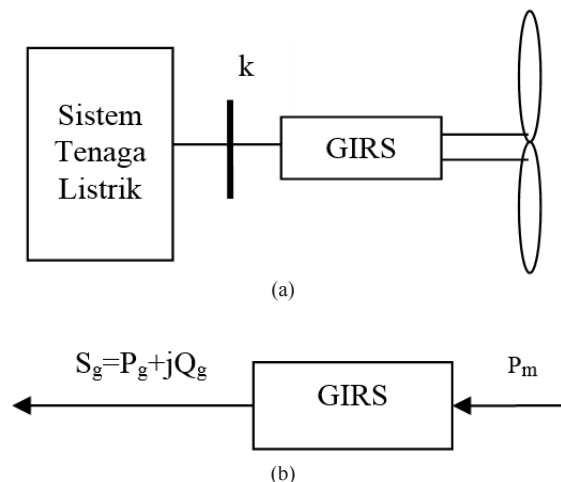
Subbab ini membahas mengenai pemodelan PLTAN kecepatan tetap untuk analisis aliran daya sistem tenaga listrik. Konfigurasi tipikal dari suatu PLTAN dengan generator induksi rotor sangkar (GIRS) diperlihatkan pada Gambar 1(a). Sedangkan masukan daya mekanik dari turbin angin (P_m) dan keluaran daya listrik GIRS (S_g) diperlihatkan pada Gambar 1(b) [7], [8].

Seperti yang telah diketahui bahwa untuk GIRS dari PLTAN kecepatan tetap, slip dan kecepatan rotornya bervariasi sesuai dengan besar daya yang dibangkitkan. Namun demikian, variasi kecepatan rotor ini sangat kecil dan nilai maksimumnya hanya sekitar 2% [12]. Hal ini yang menyebabkan ia disebut sebagai PLTAN kecepatan tetap. Perlu juga ditambahkan disini bahwa pada Gambar 1(a), PLTAN tersebut diasumsikan terhubung pada bus k dari sistem tenaga listrik.

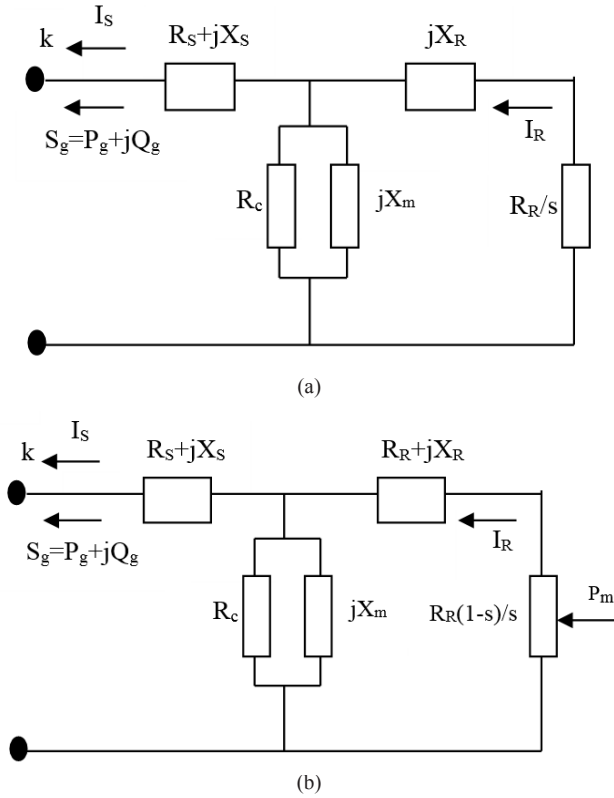
Berikut adalah penurunan model matematis dari PLTAN kecepatan tetap untuk digunakan pada analisis aliran daya sistem tenaga listrik. Penurunan model tersebut akan didasarkan pada perhitungan slip GIRS karena seperti yang telah diuraikan sebelumnya nilai maksimum dari slip ini telah diketahui berada disekitar $\pm 2\%$.

Gambar 2 memperlihatkan rangkaian ekuivalen keadaan-mantap dari GIRS. Pada gambar tersebut, R_s adalah resistansi stator, X_s adalah reaktansi bocor stator, R_r adalah resistansi rotor, X_r adalah reaktansi bocor rotor, R_c adalah resistansi rangkaian inti, X_m adalah reaktansi rangkaian inti, dan s adalah slip GIRS. Sedangkan I_s dan I_r berturut-turut adalah arus-arus stator dan rotor GIRS. Pada Gambar 2(b), $R_s(I-s)/s$ dapat dianggap sebagai resistansi variabel dimana daya mekanik P_m didisipasikan. Dengan melihat Gambar 2(b), daya yang didisipasikan tersebut adalah:

$$P_m = -R_r \frac{1-s}{s} I_r I_r^* \tag{3}$$



Gambar 1. PLTAN terhubung pada sistem tenaga



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen keadaan-mantap dari GIRS

Rangkaian ekuivalen GIRS yang dinyatakan dalam bentuk impedansi diperlihatkan pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 2 dan 3, impedansi-impedansi Z_S , Z_R , dan Z_M diberikan oleh:

$$\begin{aligned} Z_S &= R_S + jX_S \\ Z_R &= \frac{R_R}{s} + jX_R \end{aligned} \quad (4)$$

$$Z_M = jR_C X_m / (R_C + jX_m).$$

Dapat ditunjukkan bahwa formulasi-formulasi untuk daya yang dibangkitkan PLTAn ($S_g = P_g + jQ_g$) dan arus rotor GIRS (I_R) akan berbentuk:

$$S_g = -\frac{1}{Z_{ek}^*} V_S V_S^*, \quad (5)$$

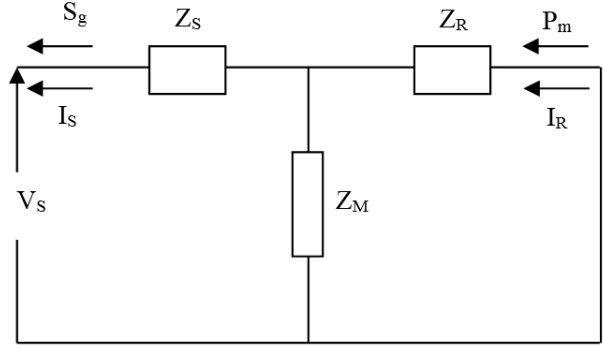
dan:

$$I_R = \frac{Z_S - Z_{ek}}{Z_R Z_{ek}} V_S. \quad (6)$$

Detil penurunan dari (5) dan (6) serta rumusan untuk Z_{ek} dapat dilihat pada Lampiran. Lebih lanjut, substitusi (6) pada (3), akan menghasilkan rumusan untuk daya mekanik sebagai berikut:

$$P_m = -R_R \frac{1-s}{s} \frac{Z_S - Z_{ek}}{Z_R Z_{ek}} \left(\frac{Z_S - Z_{ek}}{Z_R Z_{ek}} \right)^* V_S V_S^*. \quad (7)$$

Dengan demikian, berdasarkan (5) dan (7), usulan model matematis untuk PLTAn kecepatan tetap adalah:



Gambar 3. Rangkaian ekuivalen dari GIRS dalam bentuk impedansi

Tabel 3. Jenis bus dan variabel untuk sistem dengan PLTAn

No	Jenis Bus	Variabel Yang Ditentukan	Variabel Yang Dicari
1	Referensi (<i>Slack</i>)	$ V $ dan $\delta=0$	PG dan QG
2	Beban (PQ)	PG=QG=0	$ V $ dan δ
3	Pembangkit Konvensional (PV)	PG dan $ V $	QG dan δ
4	PLTAn	-	$ V $, δ , PG=P _g , QG=Q _g dan s

$$S_g + \frac{1}{Z_{ek}^*} V_S V_S^* = 0, \quad (8a)$$

$$P_m + R_R \frac{1-s}{s} \frac{Z_S - Z_{ek}}{Z_R Z_{ek}} \left(\frac{Z_S - Z_{ek}}{Z_R Z_{ek}} \right)^* V_S V_S^* = 0. \quad (8b)$$

Perlu dicatat bahwa tegangan stator GIRS (V_S) pada persamaan-persamaan di atas adalah juga merupakan tegangan terminal PLTAn. Integrasi dari usulan model tersebut pada analisis aliran daya akan dibahas pada subbab berikut.

C. Integrasi Model PLTAn pada Analisis Aliran Daya

Untuk sistem tenaga listrik yang mengandung PLTAn, solusi masalah aliran dayanya dapat dicari dengan penyelesaian persamaan-persamaan nonlinier (1) dan (8) secara simultan. Dalam pencarian solusi tersebut, variabel tambahan yang harus dicari nilainya adalah daya yang dibangkitkan oleh PLTAn (S_g) dan slip GIRS (s). Tabel 3 memperlihatkan variabel-variabel yang diketahui dan belum diketahui untuk sistem tenaga listrik yang mengandung PLTAn.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Validasi Model

Untuk memvalidasi model PLTAn yang diusulkan pada Bab III, hasil perhitungan yang diperoleh akan dibandingkan dengan hasil perhitungan dari model pada [4]. Data yang sama seperti pada [4] juga akan digunakan dalam proses validasi ini. Semua data adalah dalam perunit (pu) dan memiliki nilai sebagai berikut:

(i) Tegangan terminal PLTAn: $V_S = 1 \angle 0$

(ii) Parameter-parameter GIRS: $R_s = 0,00571, X_s = 0,06390, R_r = 0,00612, X_r = 0,18781, R_c = 30, X_m = 2,78$

Tabel 4 memperlihatkan hasil perhitungan daya PLTAn (S_g) untuk berbagai nilai daya mekanik P_m . Terlihat bahwa hasil yang diperoleh dari model yang diusulkan sangat sesuai dengan hasil dari model pada [4], [5]. Hal ini mengindikasikan bahwa model yang diusulkan tersebut akurat dan valid.

B. Aplikasi Model pada Sistem Tenaga Listrik Multi-Bus

Pada subbab ini, aplikasi dari model yang diusulkan pada studi aliran daya sistem tenaga listrik multi-bus akan diselidiki. Sistem tenaga yang digunakan dalam penyelidikan adalah sistem 3-bus yang diagram segarisnya diperlihatkan pada Gambar 4. Sistem yang telah dimodifikasi ini didasarkan pada sistem 3-bus 2

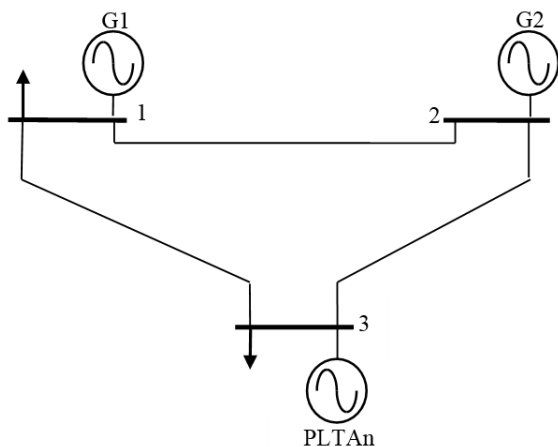
Tabel 4. Hasil validasi

Pm (pu)	Usulan Model		Model [4, 5]	
	s (%)	Sg (pu)	s (%)	Sg (pu)
1,0	-0,6774	0,9546-j0,6265	-	0,9546-j0,6265
0,5	-0,3230	0,4644-j0,4173	-	0,4644-j0,4173
0	0	-0,0326-j0,3516	-	-0,0326-j0,3516
-0,5	0,3292	-0,5357-j0,4192	-	-0,5357-j0,4192
-1,0	0,7077	-1,0461-j0,6432	-	-1,0461-j0,6432

Catatan: -: data tidak tersedia

Tabel 5. Impedansi seri dan admitansi shunt saluran

Sal.	Bus	Impedansi Seri (Z)	Admitansi Shunt (Ysh/2)
	p - q		
1	1 - 2	0,010+j0,050	0
2	1 - 3	0,015+j0,050	0
3	2 - 3	0,015+j0,050	0



Gambar 4. Sistem 3-bus

pembangkit [15]. PLTAn diasumsikan terhubung pada bus 3. Data-data sistem diberikan pada Tabel 5–7. Semua data adalah dalam pu pada dasar 100 MVA.

Hasil-hasil dari studi aliran daya diperlihatkan pada Tabel 8 dan 9. Perhitungan aliran daya tersebut dilakukan untuk berbagai nilai daya mekanik P_m (yaitu dari 0,1 pu s/d 1,0 pu) yang menggambarkan kondisi angin kecil sampai besar. Untuk lebih memudahkan pengamatan dan analisa, hasil-hasil tersebut juga disajikan dalam bentuk grafik (lihat Gambar 5–7).

Gambar 5 jelas memperlihatkan bahwa keluaran daya-aktif PLTAn naik secara linier dengan meningkatnya masukan daya mekanik turbin. Namun nilainya sedikit lebih kecil dari daya mekanik karena adanya rugi-rugi pada GIRS. Gambar 5 juga memperlihatkan variasi kebutuhan

Tabel 6. Tegangan dan daya bus

Bus	V	δ	Pembangkitan	Beban	Ket.
1	1,05	0	-	1,5+j0,5	Slack
2	1,03	-	1,0+j-	0	PV
3	-	-	0	2,0+j1,0	PLTAn

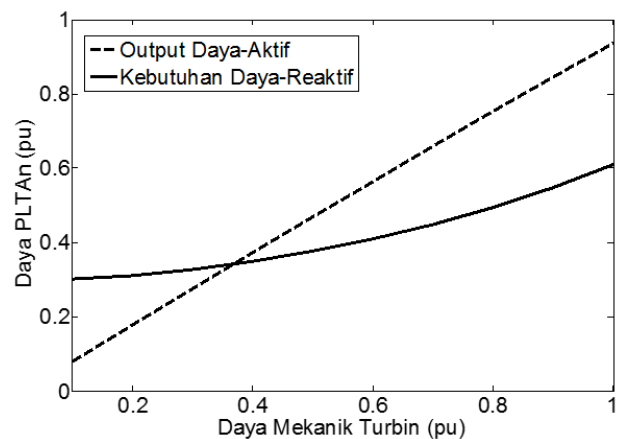
Ket: - = besaran yang akan dicari

Tabel 7. Parameter generator induksi dari PLTAn

Parameter	R1	X1	R2	X2	Rc	Xm
Nilai	0,02	0,10	0,018	0,18	50	3,2

Tabel 8. Slip GIRS, besar tegangan, dan pembangkitan daya PLTAn

Pm (pu)	Slip (%)	Besar Tegangan (pu)	Output Daya (pu)
0,1	-0,1937	0,9920	0,0793-j0,3018
0,2	-0,3856	0,9926	0,1780-j0,3118
0,3	-0,5770	0,9930	0,2759-j0,3275
0,4	-0,7691	0,9933	0,3730-j0,3490
0,5	-0,9631	0,9934	0,4692-j0,3763
0,6	-1,1602	0,9934	0,5646-j0,4095
0,7	-1,3621	0,9931	0,6591-j0,4490
0,8	-1,5703	0,9927	0,7527-j0,4951
0,9	-1,7870	0,9921	0,8452-j0,5483
1,0	-2,0148	0,9912	0,9366-j0,6094



Gambar 5. Variasi keluaran daya listrik PLTAn

Tabel 9. Daya listrik yang dibangkitkan G1+G2 dan rugi-rugi daya total saluran transmisi

Pm (pu)	Daya G1+G2 (pu)	Rugi-Rugi Daya (pu)
0,1	3,4646+j1,9508	0,0439+j0,1491
0,2	3,3634+j1,9526	0,0414+j0,1408
0,3	3,2633+j1,9613	0,0392+j0,1337
0,4	3,1644+j1,9768	0,0374+j0,1278
0,5	3,0666+j1,9993	0,0359+j0,1231
0,6	2,9701+j2,0290	0,0347+j0,1195
0,7	2,8748+j2,0662	0,0339+j0,1171
0,8	2,7808+j2,1111	0,0335+j0,1160
0,9	2,6878+j2,1636	0,0330+j0,1153
1,0	2,5962+j2,2242	0,0328+j0,1148

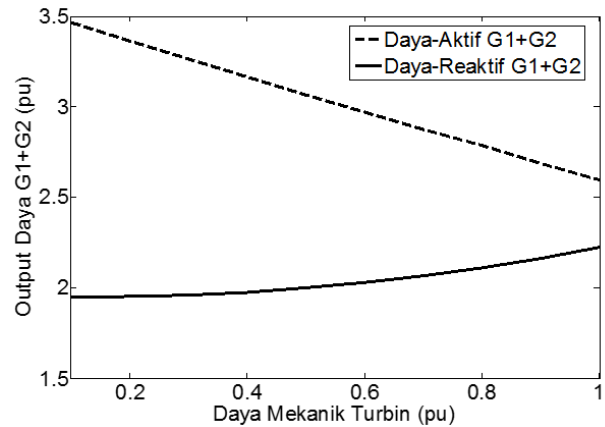
daya-reaktif PLTAn terhadap masukan daya mekanik. Terlihat bahwa kenaikannya lebih cepat dibandingkan kenaikan daya mekanik (tidak linier). Hal ini berarti bahwa dengan membesarnya atau meningkatnya keluaran daya aktif GIRS, GIRS tersebut akan membutuhkan daya-reaktif yang jauh lebih besar.

Pada Gambar 6, seperti yang diharapkan, meningkatnya keluaran daya-aktif PLTAn akan mengakibatkan turunnya daya-aktif total yang dibangkitkan generator G1 dan G2 karena sebagian beban disuplai oleh PLTAn. Namun demikian, daya-reaktif total yang dibangkitkannya meningkat akibat adanya kebutuhan daya-reaktif oleh PLTAn.

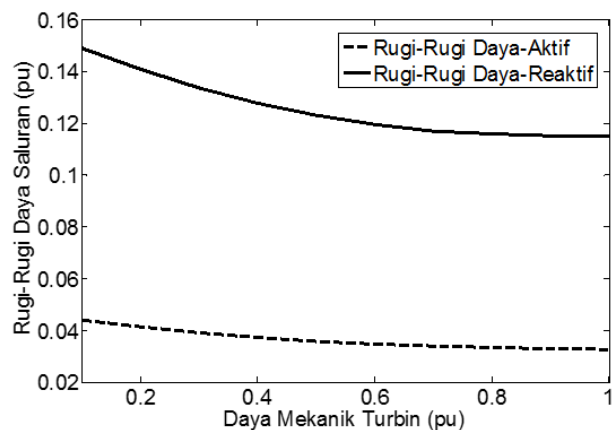
Gambar 7 memperlihatkan variasi daya mekanik turbin terhadap rugi-rugi daya saluran transmisi. Terlihat bahwa dengan meningkatnya daya mekanik (yang berarti keluaran daya-aktif PLTAn juga meningkat) akan mengakibatkan menurunnya rugi-rugi daya saluran transmisi. Penurunan rugi-rugi ini dikarenakan sebagian beban pada bus 3 disuplai secara lokal oleh PLTAn pada bus tersebut.

V. KESIMPULAN

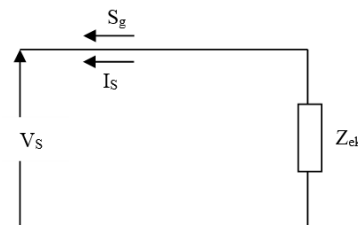
Pada makalah ini, model matematis dari PLTAn kecepatan tetap yang didasarkan pada perhitungan slip GIRS dari PLTAn telah diusulkan. Berbeda dengan beberapa metode yang ada sebelumnya dimana slip mesin dihitung setelah proses perhitungan (iterasi) selesai, pada makalah ini perhitungan slip dilakukan bersama-sama dengan besaran-besaran listrik lainnya secara iterasi. Hal ini dapat dilakukan karena dalam operasinya variasi nilai slip dari PLTAn kecepatan tetap ini berada dalam rentang yang sangat kecil (maksimum hanya sekitar 2%). Dengan demikian, pada proses perhitungan (iterasi) dalam studi aliran daya, ia dapat diperlakukan sebagai salah satu besaran yang akan dicari (*unknown quantity*) karena nilai awalnya untuk memulai proses iterasi tersebut telah diketahui (yaitu antara 0 s/d ±2%). Cara ini memiliki keuntungan yaitu rumusan untuk tegangan rotor GIRS yang biasanya cukup rumit dan sering dinyatakan sebagai persamaan bi-kuadrat tidak lagi diperlukan dalam pemodelan. Hasil validasi memperlihatkan bahwa metode



Gambar 6. Variasi keluaran daya listrik G1+G2



Gambar 7. Variasi rugi-rugi daya saluran transmisi



Gambar L.1. Rangkaian ekivalen GIRS yang disederhanakan

yang diusulkan ini sangat akurat. Aplikasi dari model PLTAn pada analisis aliran daya sistem tenaga multi-bus serta pengaruhnya terhadap penampilan keadaan mantap (*steady state*) sistem juga telah diselidiki dan disajikan pada makalah ini.

LAMPIRAN

Rangkaian ekivalen GIRS pada Gambar 3 dapat disederhanakan menjadi rangkaian pada Gambar L.1. Impedansi Z_{ek} pada Gambar L.1 tersebut diberikan oleh:

$$Z_{ek} = Z_s + \frac{Z_R Z_M}{Z_R + Z_M} \tag{L.1}$$

Berdasarkan Gambar L.1, arus stator GIRS:

$$I_s = \frac{1}{Z_{ek}} V_s \tag{L.2}$$

Sedangkan arus rotor (berdasarkan Gambar 3) adalah:

$$I_R = -\frac{1}{Z_R}V_S - \frac{Z_S}{Z_S}I_S. \quad (\text{L.3})$$

Substitusi (L.2) pada (L.3) dan mengaturnya kembali, arus rotor menjadi:

$$I_R = \frac{Z_S - Z_{ek}}{Z_R Z_{ek}}V_S. \quad (\text{L.4})$$

Dengan mengamati Gambar 2 dan 3, daya listrik yang dibangkitkan PLTAn dapat dirumuskan sebagai:

$$S_g = V_S I_S^*. \quad (\text{L.5})$$

Substitusi (L.2) pada (L.5) menghasilkan:

$$S_g = -\frac{1}{Z_{ek}^*}V_S V_S^*. \quad (\text{L.6})$$

REFERENSI

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Feijoo, A., Pazos, J.L, and Villanueva, D., "Conventional asynchronous wind turbine models – mathematical expressions for the load flow analysis," *International Journal of Energy Engineering*, vol. 3, no. 6, pp. 269-278, 2013.
- [4] Feijoo, A. and Villanueva, D., "A pq model for asynchronous machines based on rotor voltage calculation," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 31, no. 2, pp. 813-814, 2016.
- [5] Feijoo, A. and 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.
- [6] Ozturk, O, Balci, M.E. and Hocaoglu, M.H., "A new wind turbine generating system model for balanced and unbalanced distribution systems load flow analysis," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 502-518, 2018.
- [7] Haque, M.H., "Incorporation of fixed speed wind farms in power flow analysis", IET Renewable Power Generation Conference (RPC 2013).
- [8] 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.
- [9] Wang, J., Huang, C., and 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.
- [10] 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.
- [11] Gianto, R., and Khwee, K.H., "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.
- [12] Ackermann, T., *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons. Ltd., England, 2005.
- [13] Anaya-Lara, O., et al., *Wind Energy Generation: Modelling and Control*, 2009, John Wiley & Sons. Ltd., England.
- [14] Patel, M.R., *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press LLC, Florida, 1999.
- [15] Pai, M.A., *Computer Techniques in Power System Analysis*, McGraw- Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi, 1984.