

MODEL STEADY STATE PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN YANG BERBASIS PMSG UNTUK ANALISIS ALIRAN DAYA

Rudy Gianto^{*)}

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Tanjungpura
Jalan Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak 78124, Indonesia

^{*)}E-mail: rudy.gianto@ee.untan.ac.id

Abstrak

Akhir-akhir ini, kecenderungan penggunaan PLTAn (Pembangkit Listrik Tenaga Angin) kecepatan variabel yang berbasis PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) telah mengalami peningkatan. Meningkatnya penetrasi PLTAn pada sistem tenaga akan memperumit analisis aliran daya sistem tersebut. Pada analisis aliran daya, generator-generator atau pembangkit-pembangkit daya konvensional umumnya dimodelkan sebagai pembangkit dengan daya aktif dan besar tegangan konstan (biasa disebut sebagai model PV). Akan tetapi, oleh karena PLTAn biasanya tidak menggunakan generator sinkron konvensional, ia tidak bisa lagi dinyatakan sebagai model PV. Oleh karenanya, pengembangan model keadaan tunak PLTAn dan modifikasi terhadap analisis aliran daya tersebut perlu dilakukan agar evaluasi terhadap performa keadaan tunak sistem dapat dilaksanakan. Makalah ini mengusulkan metode sederhana untuk mengikutsertakan PLTAn yang berbasis PMSG pada analisis aliran daya sistem distribusi tenaga listrik. Usulan model tersebut diturunkan berdasarkan persamaan-persamaan yang menghitung: (i) tegangan dan arus pada rangkaian ekuivalen PMSG, (ii) daya-daya PLTAn (yaitu: masukan daya mekanik turbin dan keluaran daya listrik PMSG), dan (iii) rugi-rugi daya PLTAn. Dengan demikian, kerumitan dalam hal memodelkan peralatan elektronika daya tidak ditemukan dalam metode yang diusulkan tersebut. Makalah ini juga membahas hasil-hasil dari penerapan metode yang diusulkan pada suatu sistem distribusi tenaga listrik.

Kata Kunci: pembangkit listrik tenaga angin, PMSG, analisis aliran daya, sistem distribusi

Abstract

Recently, the use of PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator)-based variable speed wind power plant (WPP) has increased. The increase penetration of WPP in power system will obviously complicate the system power flow analysis. In power flow analysis, conventional power plants are generally expressed as generators with constant active power and voltage magnitude (known as PV models). However, WPPs do not normally use conventional synchronous generators, and consequently, they can not be represented as PV models. Therefore, development of the WPP model and modification to the traditional power flow analysis needs to be carried out so that the system steady state performance evaluation can properly be conducted. This paper proposes a simple method for incorporating PMSG-based WPP in the power flow study of electric power distribution systems. The proposed model is derived based on equations that calculate: (i) voltage and current in the PMSG equivalent circuit, (ii) WPP powers (i.e., turbine mechanical power input and PMSG electrical power output), and (iii) WPP power losses. Thus, the complexity in power electronics converter modeling is not found in the proposed method. The present paper also discusses the results of the proposed method application in an electric power distribution system.

Keywords: wind turbine generating system, PMSG, load flow analysis, distribution system

1. Pendahuluan

Dilihat dari kecepatan putarannya, Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTAn) dapat dibagi ke dalam dua kelompok yaitu: (i) PLTAn kecepatan tetap atau hampir tetap, dan (ii) PLTAn kecepatan variabel. Saat ini, penggunaan PLTAn kecepatan variabel telah mengalami peningkatan. Hal ini karena PLTAn jenis ini dapat menangkap atau mengekstraksi energi angin secara lebih optimal dibandingkan PLTAn kecepatan tetap. Dua jenis

generator yang sering diaplikasikan pada PLTAn kecepatan variabel adalah DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) dan PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) [1, 2].

Dibandingkan DFIG, PMSG memiliki kelebihan antara lain ia tidak memerlukan eksitasi arus searah (*DC*) karena medan magnetik yang dibutuhkan diperoleh dari magnet-magnet permanen. Dengan demikian, PMSG tidak memerlukan cincin-cincin slip (*slip rings*) dan sikat-sikat

(brushes) sehingga dapat mengurangi rugi-rugi daya dan mempermudah pemeliharaan. Lebih lanjut, PLTAn yang berbasis PMSG dapat beroperasi pada kecepatan rendah sehingga tidak memerlukan roda gigi. Hal ini mengakibatkan konstruksinya menjadi lebih sederhana, kokoh dan efisien serta biaya pemeliharaannya juga menjadi lebih murah [1, 2].

Analisis aliran daya memberikan informasi tentang kondisi-kondisi keadaan tunak sistem tenaga listrik seperti: tegangan-tegangan bus, pembangkitan-pembangkitan daya generator, aliran-aliran dan rugi-rugi daya saluran transmisi/distribusi. Seperti yang telah diuraikan, pada analisis aliran daya, pembangkit-pembangkit daya konvensional umumnya dimodelkan sebagai pembangkit dengan daya aktif dan besar tegangan konstan (model PV (*photovoltaic*)). Namun demikian, dengan adanya penetrasi PLTAn yang biasanya tidak menggunakan generator sinkron konvensional, model PV ini tidak bisa lagi digunakan untuk merepresentasikan PLTAn tersebut. Oleh karenanya, pengembangan model PLTAn dan modifikasi terhadap analisis aliran daya perlu dilakukan agar evaluasi terhadap performa keadaan tunak sistem tersebut (termasuk PLTAn) dapat dilaksanakan.

Beberapa usulan tentang pemodelan PLTAn untuk digunakan pada analisis aliran daya sistem tenaga listrik telah dibahas pada [3–17]. Referensi [3–5] mengusulkan suatu metode yang disebut sebagai model tiga-simpul dari PLTAn kecepatan tetap. Dengan menggunakan metode ini, teknik aliran daya konvensional dapat digunakan untuk menganalisis aliran daya sistem tersebut. Pada [6–12], model-model keadaan tunak dari PLTAn kecepatan tetap telah diusulkan. Model-model matematik ini kemudian dikombinasikan dengan persamaan-persamaan dari sistem tanpa PLTAn. Persamaan gabungan ini selanjutnya diselesaikan secara serempak atau simultan. Referensi [6–8] mengusulkan model yang diperoleh dari rangkaian ekuivalen generator induksi, yaitu rangkaian Π atau D. Sedangkan [9–12] mengusulkan model yang diturunkan berdasarkan rangkaian T atau Y dari generator induksi PLTAn.

Referensi [13–17] mengusulkan model-model dari PLTAn kecepatan variabel yang berbasis DFIG. Pada [13], suatu pendekatan iteratif untuk mengikut-sertakan DFIG dalam analisis aliran daya telah diusulkan. Usulan model tersebut diperoleh dari rangkaian ekuivalen generator induksi dimana model aliran daya dari bus PLTAn ditentukan berdasarkan acuan terhadap loop kontrol daya reaktif dari konverter sisi rotor. Referensi [14, 15] mengusulkan model DFIG untuk analisis aliran daya tiga fasa. Model pada [14, 15] tersebut diperoleh berdasarkan teori komponen-komponen fasa dan teori komponen-komponen urutan. Pengaruh kecepatan rotor yang berbeda-beda (sub-sinkron dan super-sinkron) juga dipertimbangkan dalam usulan model [15]. Referensi [16] mengusulkan model yang diturunkan berdasarkan

rangkaiannya ekuivalen keadaan tunak dari generator induksi. Pada [16], teknik iteratif penyapuan maju-mundur (*forward-backward sweeping*) digunakan dalam penyelesaian masalah aliran dayanya. Referensi [17] mengusulkan metode sederhana untuk memodelkan PLTAn yang berbasis DFIG untuk digunakan pada studi aliran daya sistem tenaga listrik.

Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang membahas pemodelan PLTAn kecepatan tetap yang berbasis SCIG (*Squirrel Cage Induction Generator*) [3–12] dan PLTAn kecepatan variabel yang berbasis DFIG [13–17], makalah ini membahas pemodelan PLTAn kecepatan variabel yang berbasis PMSG. Penelitian ini menyelidiki metode sederhana dalam memodelkan dan mengikut-sertakan PLTAn kecepatan variabel yang berbasis PMSG tersebut pada analisis aliran daya sistem distribusi tenaga listrik. Usulan model tersebut diturunkan berdasarkan persamaan-persamaan: (i) tegangan dan arus pada rangkaian ekuivalen PMSG, (ii) daya PLTAn (yaitu: masukan daya mekanik turbin dan keluaran daya listrik PMSG), dan (iii) rugi-rugi daya PLTAn yang terdiri dari rugi-rugi tembaga dan besi serta rugi-rugi pada peralatan elektronika daya. Dengan demikian, kerumitan dalam hal memodelkan peralatan elektronika daya tidak ditemukan dalam metode yang diusulkan tersebut. Lebih lanjut, makalah ini juga membahas studi kasus dimana pada studi tersebut dilakukan penyelidikan tentang aplikasi dari usulan model pada suatu sistem distribusi tenaga listrik.

2. Metode

2.1. Formulasi Masalah Aliran Daya

Formulasi umum dari masalah aliran daya suatu sistem distribusi tenaga listrik memiliki bentuk sebagai berikut [8–11, 18]:

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

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

dimana P_G/Q_G adalah pembangkitan daya aktif/reaktif, P_L/Q_L adalah kebutuhan daya aktif/reaktif, $|V|/\delta$ adalah besar/sudut tegangan, $|Y|/\theta$ adalah besar/sudut dari elemen matriks admitansi bus, i adalah nomor bus, dan n adalah jumlah total bus sistem.

Pada studi aliran daya sistem distribusi tenaga listrik, bus-bus yang ada pada sistem umumnya dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu: (1) bus substasiun atau gardu induk (GI), dan (2) bus beban (bus selain bus substasiun). Pengelompokan tersebut dimaksudkan agar penyelesaian terhadap (1) dapat dilakukan. Lebih lanjut, bus substasiun juga biasanya diambil sebagai bus referensi. Sehingga, pada bus ini tegangannya diketahui atau ditentukan

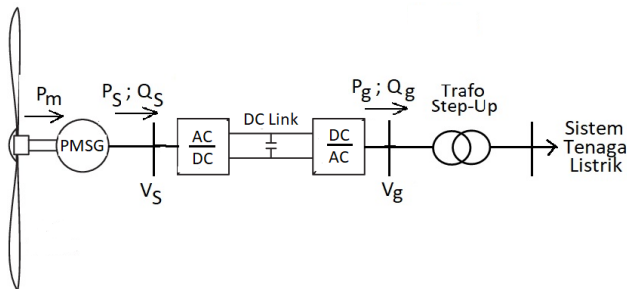
nilainya (biasanya besarnya 1,0 pu dengan sudut fasa 0°). Perlu dicatat bahwa oleh karena pada bus-bus beban tidak memiliki pembangkitan daya, maka pembangkitan daya pada bus-bus ini adalah nol (lihat Tabel 1).

Tabel 1. Bus dan Variabel

No	Jenis Bus	Variabel Yang Ditentukan	Variabel Yang Dicari
1	GI	$ V $ dan $\angle=0^\circ$	P_G dan Q_G
2	Beban	$P_G=Q_G=0$	$ V $ dan \angle

2.2. PLTAn Yang Berbasis PMSG

Gambar 1 memperlihatkan konfigurasi dasar dari PLTAn yang berbasis PMSG [1, 2, 19]. Peralatan-peralatan elektronika daya (seperti: konverter, inverter, dan dc link) berfungsi untuk menghubungkan PMSG dengan sistem tenaga listrik (atau *power grid*). Dengan adanya peralatan elektronika daya ini, kecepatan rotasi PMSG dapat dipisahkan dari frekwensi sistem dimana PLTAn tersebut terhubung. Pemisahan ini mengakibatkan PLTAn berbasis PMSG dapat beroperasi pada interval kecepatan generator yang cukup lebar sehingga tangkapan atau ekstraksi angin dapat dilakukan secara lebih optimal.



Gambar 1. Konfigurasi Dasar PLTAn Berbasis DFIG

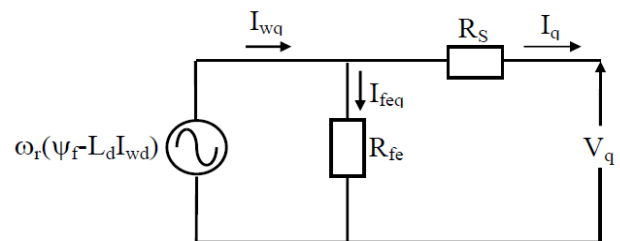
Umumnya, topologi peralatan elektronika daya untuk PLTAn yang berbasis PMSG seperti pada Gambar 1 menggunakan konverter-konverter daya yang berbasis IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Dapat ditambahkan bahwa pada Gambar 1, P_m adalah masukan daya mekanik turbin angin; P_s dan Q_s adalah keluaran daya aktif dan reaktif PMSG (daya pada stator PMSG); P_g dan Q_g adalah keluaran daya aktif dan reaktif dari PLTAn. Perlu juga diketahui bahwa PLTAn yang berbasis PMSG memiliki kemampuan untuk mengirim daya reaktif (*leading power factor operation*) dan menyerap daya reaktif (*lagging power factor operation*). Namun demikian, mode operasi faktor daya satu (*unity power factor operation*) lebih sering digunakan. Pada mode operasi ini, PLTAn tidak mengirim ataupun menyerap daya reaktif [19].

Gambar 2 memperlihatkan rangkaian ekuivalen keadaan tunak PMSG dalam kerangka acuan d-q [19-23]. Pada gambar tersebut, V_q dan V_d adalah tegangan terminal pada

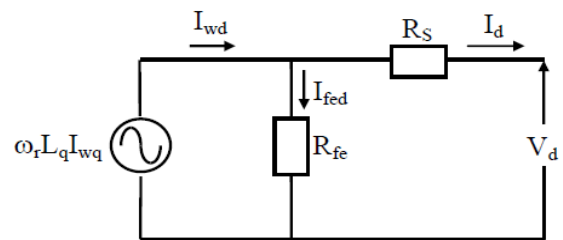
sumbu-q dan -d; I_q dan I_d adalah arus terminal pada sumbu-q dan -d; I_{wq} dan I_{wd} adalah arus torka pada sumbu-q dan -d; R_s adalah resistansi belitan stator; L_q dan L_d adalah induktansi pada sumbu-q dan -d; ω_r adalah kecepatan angular rotor; dan Ψ_f adalah fluks magnet permanen. Berdasarkan Gambar 2, tegangan terminal pada sumbu-q dan -d akan memiliki bentuk:

$$V_q = \omega_r(\Psi_f - L_d I_{wd}) - R_s I_q \quad (2a)$$

$$V_d = \omega_r L_q I_{wq} - R_s I_d \quad (2b)$$



(a)



(b)

Gambar 2. Rangkaian Ekuivalen PMSG

Lebih lanjut, R_{fe} dan R_s pada Gambar 2 digunakan berturut-turut untuk memodelkan rugi-rugi besi (*iron losses*) dan rugi-rugi tembaga (*copper losses*) dari PMSG. Rugi-rugi tembaga terjadi pada belitan stator PMSG, sedangkan rugi-rugi besi terjadi pada inti besi PMSG. Arus-arus I_{feq} dan I_{fed} digunakan untuk menyatakan arus-arus sumbu-q dan -d yang mengalir pada resistansi R_{fe} tersebut. Arus-arus ini dapat dihitung melalui:

$$I_{feq} = \omega_r(\Psi_f - L_d I_{wd}) / R_{fe} \quad (3a)$$

$$I_{fed} = \omega_r L_q I_{wq} / R_{fe} \quad (3b)$$

Dapat ditunjukkan bahwa besarnya rugi-rugi tembaga (P_{cu}) dan rugi-rugi besi (P_{fe}) tersebut dapat dihitung berturut-turut melalui [20, 21]:

$$P_{cu} = 0,5 R_s (I_q^2 + I_d^2) \quad (4a)$$

$$P_{fe} = 0,5R_{fe} \left(I_{feq}^2 + I_{fed}^2 \right) \quad (4b)$$

Substitusi (3) pada (4b) menghasilkan rumusan alternatif untuk rugi-rugi besi sebagai berikut:

$$P_{fe} = 0,5 \frac{\omega_r^2}{R_{fe}} \left[(\Psi_f - L_d I_{wd})^2 + (L_q I_{wq})^2 \right] \quad (5)$$

Perlu juga ditambahkan disini bahwa berdasarkan Gambar 2, besarnya arus-arus torka pada sumbu-q dan -d berturut-turut adalah:

$$I_{wq} = I_q + I_{feq} \quad (6a)$$

$$I_{wd} = I_d + I_{fed} \quad (6b)$$

Substitusi (3) pada (6), arus-arus torka pada sumbu-q dan -d tersebut menjadi:

$$I_{wq} = I_q + \omega_r (\Psi_f - L_d I_{wd}) / R_{fe} \quad (7a)$$

$$I_{wd} = I_d + \omega_r L_q I_{wq} / R_{fe} \quad (7b)$$

Dengan demikian, berdasarkan (7), arus-arus torka I_{wq} dan I_{wd} dapat dinyatakan sebagai fungsi dari arus-arus terminal I_q dan I_d sebagai berikut:

$$I_{wq} = \frac{R_{fe}^2 I_q + \omega_r R_{fe} \Psi_f - \omega_r R_{fe} L_d I_d}{R_{fe}^2 + \omega_r^2 L_q L_d} \quad (8a)$$

$$I_{wd} = \frac{R_{fe}^2 I_d + \omega_r^2 L_q \Psi_f + \omega_r R_{fe} L_q I_q}{R_{fe}^2 + \omega_r^2 L_q L_d} \quad (8b)$$

2.3. Daya Turbin Angin

Besarnya energi atau daya mekanik (dalam Watt) yang dapat ditangkap oleh turbin angin sangat tergantung pada laju angin seperti yang dinyatakan oleh persamaan berikut [17, 24, 25]:

$$P_m = 0,5 \rho \pi R^2 V_w^3 C_p \quad (9)$$

dimana:

- ρ : kerapatan udara (kg/m³)
- R : panjang bilah turbin (m)
- V_w : laju angin (m/detik)
- C_p : koefisien performa turbin

Koefisien performa turbin pada (9) biasanya dinyatakan sebagai fungsi dari *tip speed ratio* (λ) dan *pitch angle* (θ) sebagai berikut:

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \theta - c_3 \theta^{c_4} - c_6 \right) e^{-c_7 / \lambda_i} \quad (10)$$

dimana:

$$\lambda_i = \frac{I}{\frac{I}{\lambda + c_8 \theta} - \frac{c_9}{\theta^3 + 1}} \quad (11)$$

Konstanta-konstanta c_1 s/d c_9 pada (10) dan (11) ditentukan berdasarkan data dari manufaktur turbin angin. Sedangkan nilai *tip speed ratio* pada (11) dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{a_g \omega_r R}{p V_w} \quad (12)$$

dimana:

- a_g : rasio roda gigi turbin
- p : jumlah pasang kutub generator

Perlu dicatat bahwa nilai-nilai tipikal untuk *tip speed ratio* adalah 6 – 8, sedangkan untuk koefisien performa turbin adalah 0,4 – 0,5 [24, 25].

2.4. Pemodelan dan Integrasi PLTAn

Dengan memperhatikan Gambar 1, terlihat bahwa keluaran daya pada stator PMSG (P_S) merupakan masukan daya mekanik turbin (P_m) dikurangi rugi-rugi tembaga (P_{cu}) dan rugi-rugi besi (P_{fe}) dari PMSG, atau:

$$P_m = P_S + P_{cu} + P_{fe} \quad (13)$$

Perlu dicatat bahwa pada (13), rugi mekanik atau rugi gesekan akibat rotasi dari rotor PMSG telah diabaikan karena nilainya jauh lebih kecil dibandingkan rugi-rugi lainnya [19, 20]. Dilain pihak, keluaran daya pada stator PMSG juga dapat diformulasikan sebagai fungsi dari tegangan dan arus stator sebagai berikut [19-23]:

$$P_S = 0,5 (V_q I_q + V_d I_d) \quad (14a)$$

$$Q_S = 0,5 (V_q I_d - V_d I_q) = 0 \quad (14b)$$

Pada (14b), keluaran daya reaktif PMSG adalah nol karena seperti yang telah diuraikan sebelumnya PMSG umumnya beroperasi pada faktor daya satu, atau: $Q_S = Q_g = 0$. Substitusi (4) dan (14a) pada (13) menghasilkan:

$$P_m = 0,5(V_q I_q + V_d I_d) + 0,5R_s(I_q^2 + I_d^2) + 0,5 \frac{\omega_r^2}{R_{fe}} \left[(\Psi_f - L_d I_{wd})^2 + (L_q I_{wq})^2 \right] \quad (15)$$

Dengan demikian, berdasarkan (2), (14b) dan (15), usulan model dari PLTAn yang berbasis PMSG adalah:

$$V_q - \omega_r(\Psi_f - L_d I_{wd}) + R_s I_q = 0 \quad (16a)$$

$$V_d - \omega_r L_q I_{wq} + R_s I_d = 0 \quad (16b)$$

$$V_q I_d - V_d I_q = 0 \quad (16c)$$

$$2R_{fe} P_m - R_{fe}(V_q I_q + V_d I_d) - R_{fe} R_s (I_q^2 + I_d^2) - \omega_r^2 \left[(\Psi_f - L_d I_{wd})^2 + (L_q I_{wq})^2 \right] = 0 \quad (16d)$$

dimana arus-arus I_{wq} dan I_{wd} pada (16a), (16b) dan (16d) merupakan fungsi dari arus-arus I_q dan I_d dan dihitung melalui (8).

Dengan demikian, untuk sistem distribusi tenaga listrik yang mengandung PLTAn, solusi masalah aliran dayanya dapat dicari dengan penyelesaian persamaan-persamaan (1) dan (16) secara simultan. Tabel 2 memperlihatkan besaran-besaran yang diketahui (ditentukan nilainya) dan belum diketahui (akan dihitung) untuk sistem tenaga listrik yang mengandung PLTAn berbasis PMSG.

Tabel 2. Bus dan Variabel (Sistem Dengan PLTAn)

No	Jenis Bus	Variabel Yang Ditentukan	Variabel Yang Dicari
1	GI	$ V $ dan $\angle=0^\circ$	P_G dan Q_G
2	Beban	$P_G=Q_G=0$	$ V $ dan \angle
3	PLTAn	$\eta_r, P_m, R_s, R_{fe}, L_d, L_q,$ dan \angle_f	$ V = V_g , \angle, V_q, V_d, I_q,$ dan I_d

Perlu dicatat bahwa pembangkitan daya aktif dan reaktif (P_G dan Q_G) pada bus PLTAn adalah juga merupakan keluaran daya aktif dan reaktif PLTAn (P_g dan Q_g), atau:

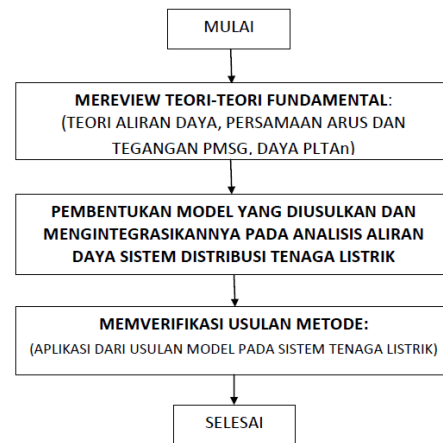
$$P_G = P_g = \eta_{PEC} P_S = 0,5 \eta_{PEC} (V_q I_q + V_d I_d) \quad (17a)$$

$$Q_G = Q_g = \eta_{PEC} Q_S = 0 \quad (17b)$$

dimana η_{PEC} adalah efisiensi dari peralatan konverter elektronika daya.

Sesuai *flowchart* penelitian pada Gambar 3, setelah membahas tentang pemodelan dan integrasi, langkah selanjutnya adalah memverifikasi usulan metode tersebut dengan cara mengaplikasikannya pada suatu sistem distribusi tenaga listrik. Penyelidikan tentang aplikasi dari usulan model ini dibahas pada subbab selanjutnya. Perlu

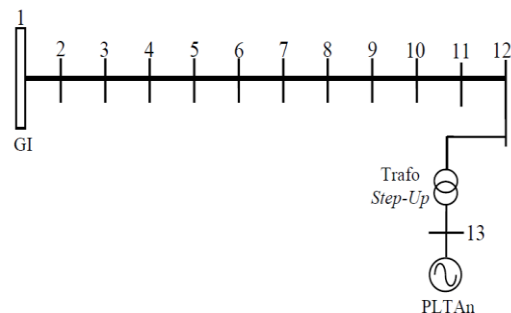
juga ditambahkan disini bahwa semua komputasi pada penelitian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB (algoritma dari metode yang diusulkan diimplementasikan sebagai kode MATLAB).



Gambar 3. Flowchart Penelitian

3. Studi Kasus

3.1. Sistem Test



Gambar 4. Sistem Test

Tabel 3. Data Sistem Test

No. Sal.	Bus Kirim	Bus Terima	R*	X*	P _L **	Q _L **
1	1	2	1,093	0,455	60	60
2	2	3	1,184	0,494	140	30
3	3	4	2,095	0,873	155	55
4	4	5	3,188	1,329	130	30
5	5	6	1,093	0,455	120	15
6	6	7	1,002	0,417	155	55
7	7	8	4,403	1,215	145	45
8	8	9	5,642	1,597	140	40
9	9	10	2,890	0,818	135	30
10	10	11	1,514	0,428	140	30
11	11	12	1,238	0,351	115	15

*Resistansi/reaktansi dalam ohm/fase

**Beban pada bus terima dalam kW dan kVAR (perfase)

Sistem distribusi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4 akan digunakan pada studi kasus untuk menyelidiki aplikasi dari usulan model pada sistem distribusi tenaga

listrik. Sistem pada Gambar 4 merupakan modifikasi terhadap sistem 12-bus yang diadopsi dari [18]. Sistem tersebut memiliki tegangan 11 kV dengan beban tiga-fasa total sebesar 4,305 MW dan 1,215 MVAR. Data sistem (termasuk data PLTAn) diperlihatkan pada Tabel 3 dan 4. Data dalam pu pada Tabel 4 memiliki dasar 1 MVA.

Tabel 4. Data PLTAn

Turbin	Panjang bilah turbin: 38 meter Rating daya: 2,0 MW Kecepatan: Cut-in: 3 m/d; Rated: 14 m/d; Cut-out: 23 m/d
Roda gigi	Tidak ada (<i>Direct drive</i>)
Generator	Tipe: PMSG Rating daya: 2,0 MW Jumlah pasang kutub: 26 Tegangan: 690 Volt Rating kecepatan: 585 rpm Resistansi/Induktansi/Fluks (pu): $R_s=0,02; R_r=80; L_d=2,0; L_q=3,0; I_r=2,3$
Konverter daya	Efisiensi: $\eta_{PEC} = 95\%$
Transformator Step-Up	Impedansi (pu): $j0,001$

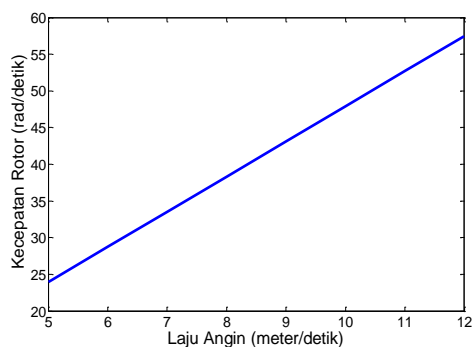
3.2. Daya Turbin dan Kecepatan Rotor

Daya mekanik turbin dan kecepatan rotor dapat dihitung melalui formula-formula pada Subbab 2.3. Dalam perhitungan tersebut diasumsikan bahwa kerapatan udara adalah normal sebesar $1,225 \text{ kg/m}^3$, *tip speed ratio* adalah 7,0 dan koefisien performa turbin adalah 0,4. Dengan demikian, berdasarkan (9), daya mekanik yang dihasilkan turbin sebagai fungsi dari laju angin adalah:

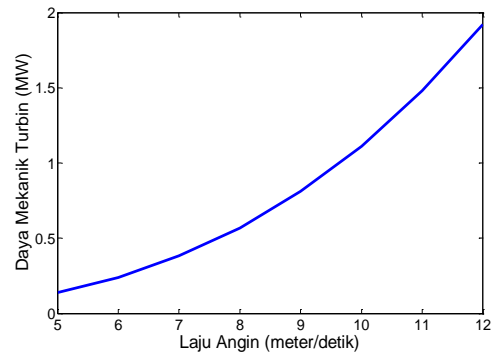
$$P_m = 0,5(1,225)(\pi 38^2) V_w^3 (0,4) \quad (18)$$

Lebih lanjut, berdasarkan (12), kecepatan rotor sebagai fungsi dari laju angin adalah:

$$\omega_r = \frac{(7,0)(26) V_w}{(1)(38)} \quad (19)$$



Gambar 5. Kurva laju angin vs kecepatan rotor



Gambar 6. Kurva laju angin vs daya mekanik turbin

Tabel 5 memperlihatkan hasil perhitungan daya mekanik turbin dan kecepatan rotor untuk nilai laju angin mulai dari 5 sampai 12 m/detik. Hasil tersebut juga ditampilkan dalam bentuk grafik (lihat Gambar 5 dan 6), dimana terlihat bahwa daya mekanik turbin dan kecepatan rotor akan semakin besar dengan meningkatnya laju angin.

Tabel 5. Daya Turbin dan Kecepatan Rotor

V_w (meter/detik)	ω_r (rad/detik)	P_m (MW)
5	23,9474	0,1389
6	28,7368	0,2401
7	33,5263	0,3812
8	38,3153	0,5691
9	43,1053	0,8102
10	47,8947	1,1114
11	52,6842	1,4793
12	57,4737	1,9206

3.3. Hasil Studi Aliran Daya dan Diskusi

Tabel 6 dan 7 memperlihatkan hasil-hasil studi aliran daya untuk berbagai nilai daya mekanik turbin seperti yang tercantum pada Tabel 5. Untuk mempermudah pembahasan, hasil-hasil tersebut juga disajikan dalam bentuk grafik (lihat Gambar 7 – 12). Terlihat bahwa dengan meningkatnya daya mekanik turbin, rugi-rugi daya PMSG juga meningkat (lihat Gambar 7). Hal ini dikarenakan dengan naiknya masukan daya mekanik turbin, keluaran daya generator juga akan naik dan akibatnya arus (serta rugi-rugi daya) generator ikut naik.

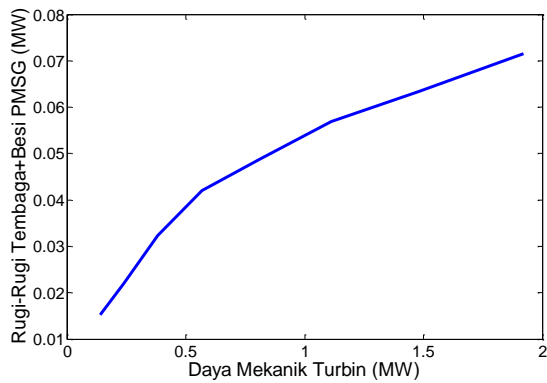
Tabel 6. Rugi daya PMSG dan keluaran daya PLTAn

P_m (MW)	P_{cu} (MW)	P_{fe} (MW)	P_s (MW)	P_g (MW)
0,1389	0,0002	0,0151	0,1236	0,1174
0,2401	0,0006	0,0215	0,2180	0,2071
0,3812	0,0011	0,0290	0,3511	0,3336
0,5691	0,0019	0,0371	0,5301	0,5036
0,8102	0,0032	0,0456	0,7614	0,7234
1,1114	0,0090	0,0479	1,0545	1,0018
1,4793	0,0133	0,0510	1,4150	1,3443
1,9206	0,0169	0,0546	1,8491	1,7566

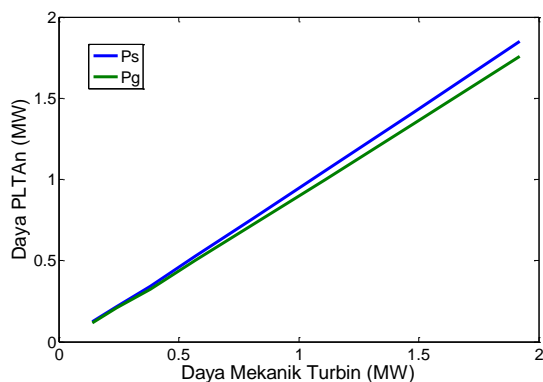
Tabel 7. Tegangan terminal PLTAn, daya substasiun dan rugi daya total saluran distribusi

P_m (MW)	V_g (pu)	Daya substasiun (MW, MVAR)	Rugi-rugi daya (MW, MVAR)
0,1389	0,9216	4,6434+j1,3901	0,4558+j0,1751
0,2401	0,9293	4,5197+j1,3777	0,4218+j0,1627
0,3812	0,9400	4,3492+j1,3616	0,3778+j0,1466
0,5691	0,9540	4,1266+j1,3423	0,3252+j0,1273
0,8102	0,9714	3,8489+j1,3208	0,2672+j0,1058
1,1114	0,9934	3,4959+j1,2977	0,1927+j0,0827
1,4793	1,0169	3,1197+j1,2784	0,1590+j0,0634
1,9206	1,0454	2,6622+j1,2620	0,1138+j0,0470

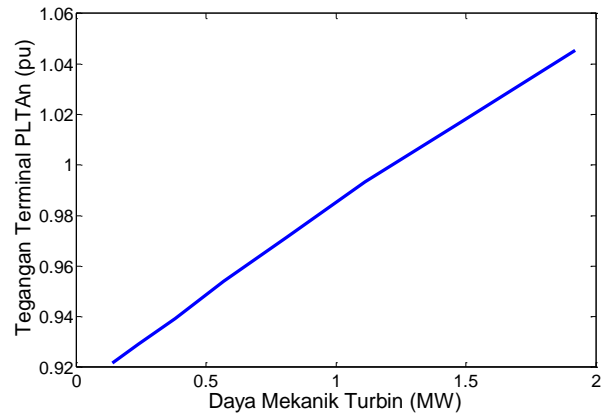
Hasil studi aliran daya juga menunjukkan bahwa keluaran daya PLTAn (P_g) sedikit lebih kecil dibandingkan keluaran daya PMSG (P_s) (lihat Gambar 8). Hal ini disebabkan oleh adanya rugi-rugi daya pada peralatan konverter elektronika daya dimana pada makalah ini telah diasumsikan bahwa konverter daya tersebut memiliki efisiensi sebesar 95%.



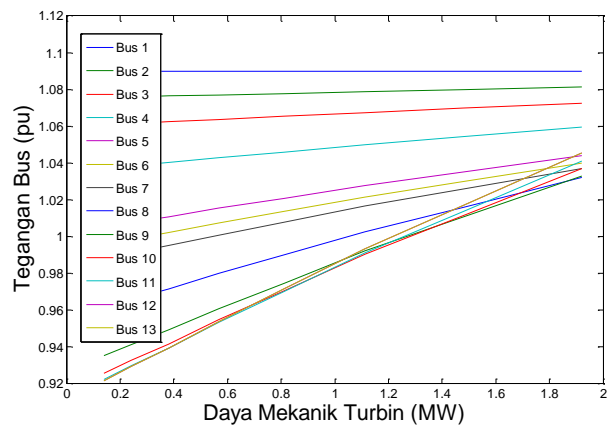
Gambar 7. Variasi rugi daya PMSG



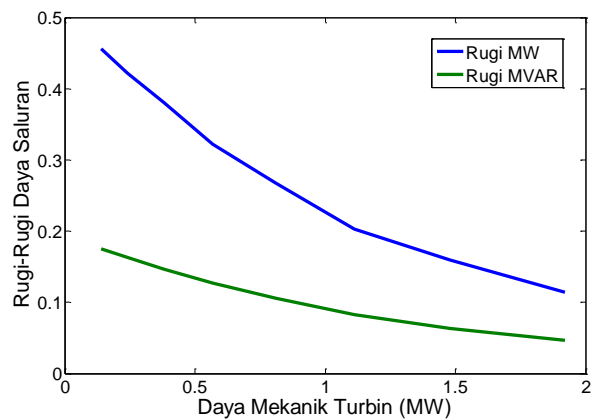
Gambar 8. Variasi keluaran daya PLTAn



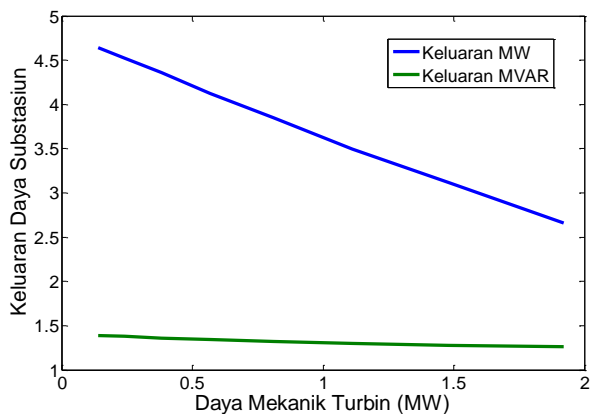
Gambar 9. Variasi tegangan terminal PLTAn



Gambar 10. Variasi tegangan-tegangan bus sistem



Gambar 11. Variasi rugi-rugi daya saluran



Gambar 12. Variasi keluaran daya substasiun

Hasil-hasil diatas juga memperlihatkan bahwa dengan meningkatnya daya PLTAn, profil tegangan akan lebih baik (lihat Gambar 9 dan 10). Hal ini ditandai dengan meningkatnya besar tegangan seiring dengan naiknya daya turbin dan keluaran daya PLTAn. Perbaikan tegangan ini dapat terjadi karena dengan meningkatnya keluaran daya PLTAn, injeksi daya pada bus PLTAn akan semakin besar, dan rugi-rugi daya pada saluran distribusi akan semakin berkurang (lihat Gambar 11). Berkurangnya rugi-rugi daya ini mengakibatkan profil tegangan sistem menjadi lebih baik.

Keuntungan lain dengan adanya PLTAn tersebut adalah dapat berkurangnya suplai daya dari substasiun sistem distribusi akibat meningkatnya daya PLTAn (lihat Gambar 12). Suplai daya ini biasanya berasal dari pembangkit-pembangkit daya konvensional yang menggunakan sumber energi tak-terbarukan. Perlu dicatat bahwa hasil-hasil diatas juga mengkonfirmasi validitas dari model yang diusulkan. Konfirmasi lebih lanjut terlihat dari hasil analisis aliran daya dimana keluaran daya substasiun (GI) plus keluaran daya PLTAn selalu sama dengan beban sistem total plus rugi-rugi daya saluran. Perlu dicatat bahwa rugi-rugi daya saluran dihitung berdasarkan impedansi-impedansi dan arus-arus saluran distribusi.

4. Kesimpulan

Pada makalah ini, metode sederhana dalam memodelkan dan mengikut-sertakan PLTAn kecepatan variabel yang berbasis PMSG pada analisis aliran daya sistem distribusi tenaga listrik telah diusulkan. Usulan model tersebut diturunkan berdasarkan persamaan-persamaan yang menghitung: tegangan/arus terminal PMSG, daya mekanik turbin, daya listrik PMSG, dan rugi-rugi daya PLTAn. Dengan demikian, kerumitan dalam hal memodelkan peralatan elektronika daya tidak ditemukan dalam metode yang diusulkan tersebut. Aplikasi dari usulan model pada sistem distribusi tenaga listrik juga telah diselidiki dan disajikan pada makalah ini. Hasil dari

penyelidikan yang dilakukan mengkonfirmasi model yang diusulkan tersebut. Konfirmasi lebih lanjut terlihat dari hasil analisis aliran daya dimana keluaran daya substasiun plus keluaran daya PLTAn selalu sama dengan beban sistem total plus rugi-rugi daya saluran.

Referensi

- [1]. Babu, N.R., dan Arulmozhivarman, P., "Wind Energy Conversion System – A Technical Review", *Journal of Engineering Science and Technology*, 2013, 3, (4), pp. 493-507.
- [2]. Samraj, D.B., dan Perumal, M.P., "Compatibility of Electrical Generators for Harvesting Extended Power from Wind Energy Conversion System", *Measurement and Control*, 2019, 52, (9-10), pp. 1-12.
- [3]. Haque, M.H., "Evaluation of Power Flow Solutions with Fixed Speed Wind Turbine Generating Systems", *Energy Conversion and Management*, 2014, 79, pp. 511-518.
- [4]. Haque, M.H., "Incorporation of Fixed Speed Wind Turbine Generators in Load Flow Analysis of Distribution Systems", *International Journal of Renewable Energy Technology*, 2015, 6, (4), pp. 317-324.
- [5]. 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*, 2015, 44, (2), pp. 135-141.
- [6]. Feijoo, A. dan Villanueva, D., "A PQ Model for Asynchronous Machines Based on Rotor Voltage Calculation", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 2016, 31, (2), pp. 813-814.
- [7]. Feijoo, A. dan Villanueva, D., "Correction to 'A PQ Model for Asynchronous Machines Based on Rotor Voltage Calculation'", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 2016, 31, (3), pp. 1228-1228.
- [8]. Gianto, R., "Model Ekuivalen-Pi dari Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan Generator Asinkron untuk Analisis Aliran Daya", *TRANSMISI*, 2019, 21, (4), pp. 96-102.
- [9]. Gianto, R., "T-Circuit Model of Asynchronous Wind Turbine for Distribution System Load Flow Analysis", *International Energy Journal*, 2019, 19, (2), pp. 77-88.
- [10]. Gianto, R., dan Khwee, K.H., "A New T-Circuit Model of Wind Turbine Generator for Power System Steady State Studies", *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2021, 10, (2), pp. 550-558.
- [11]. Gianto, R., "Integrasi Model Pembangkit Listrik Tenaga Angin pada Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga", *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 2020, 16, (3), pp. 161-167.
- [12]. Gianto, R., "Model Rangkaian-T Pembangkit Listrik Tenaga Bayu untuk Analisis Aliran Daya Tiga-Fase", *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 2021, 10, (1), pp. 91-99.
- [13]. Kumar, V.S.S., dan Thukaram, D., "Accurate Modelling of Doubly Fed Induction Based Wind Farms in Load Flow Analysis", *Electric Power Systems Research*, 2018, 15, pp. 363-371.
- [14]. Dadhanian, A., dkk., "Modeling of Doubly Fed Induction Generators for Distribution System Power Flow Analysis", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2013, 53, pp. 576-583.

- [15]. Ju, Y., Ge, F., Wu, W., Lin, Y., dan Wang, J., "Three-Phase Steady-State Model of DFIG Considering Various Rotor Speeds", *IEEE Access*, 2016, 4, pp. 9479-948.
- [16]. Anirudh, C.V.S, dan Seshadri, S.K.V., "Enhanced Modeling of Doubly Fed Induction Generator in Load Flow Analysis of Distribution Systems", *IET Renewable Power Generation*, 2021, vol. 15, no. 5, hal. 980-989.
- [17]. Gianto, R. "Steady State Model of DFIG-Based Wind Power Plant for Load Flow Analysis", *IET Renewable Power Generation*, 2021, vol. 15, no. 8, hal. 1724-1735.
- [18]. Gianto, R., dan Khwee, K.H., "A New Method for Load Flow Solution of Electric Power Distribution System", *International Review of Electrical Engineering*, 2016, 11, (5), pp. 535-541.
- [19]. Jain, A., Shankar, S., dan Vanitha, V., "Power Generation Using PMSG Based Variable Speed Wind Energy Conversion System: An Overview", *Journal of Green Engineering*, 2018, 17, (4), pp. 477-504.
- [20]. Urusaki, N., Senjyu, T., dan Uezato, K., "A Novel Calculation Method for Iron Loss Resistance Suitable in Modeling Permanent-Magnet Synchronous Motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, 18, (1), pp. 41-47.
- [21]. Cavallaro, C., dkk., "Efficiency Enhancement of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Online Minimization Approaches", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52, (4), pp. 1153-1160.
- [22]. Krause, P., dan Wasynczuk, O., *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, John Wiley & Sons. Inc., 2013.
- [23]. Boldea, I., *Variable Speed Generators*, Taylor & Francis Group LLC., 2006.
- [24]. Ackermann, T., *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons. Ltd., England, 2005.
- [25]. Anaya-Lara, O., et al., *Wind Energy Generation: Modelling and Control*, John Wiley & Sons. Ltd., England, 2009.