

# Model Tegangan Konstan dari Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Variabel yang Berbasis SCIG Untuk Analisis Aliran Daya

Rudy Gianto

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

**Intisari** — Belakangan ini, aplikasi pembangkit listrik tenaga angin (PLTAn) kecepatan variabel semakin populer dan telah melampaui penggunaan PLTAn kecepatan tetap. Kepopuleran ini terutama disebabkan karena PLTAn kecepatan variabel jauh lebih efisien dalam menangkap atau mengekstraksi energi angin dibandingkan PLTAn kecepatan tetap. Salah satu jenis PLTAn kecepatan variabel yang saat ini penggunaannya semakin meningkat karena biayanya yang relatif lebih murah adalah PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG (*Squirrel Cage Induction Generator*). PLTAn jenis ini biasanya dilengkapi dengan konverter elektronika daya untuk memperoleh rentang operasi kecepatan variabel yang lebih lebar. Agar dapat melakukan analisis dari suatu sistem tenaga listrik (termasuk analisis aliran daya), pemodelan komponen-komponen sistem tersebut sangat diperlukan. Makalah ini membahas model keadaan mantap PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG untuk analisis aliran daya sistem distribusi tenaga listrik. Model yang diusulkan ini dapat digunakan pada PLTAn kecepatan variabel berbasis SCIG dengan mode operasi kontrol tegangan. Model tersebut dikembangkan berdasarkan rumus-rumus yang menghitung input daya mekanik turbin dan output daya listrik PLTAn. Makalah ini juga membahas studi kasus dimana pada studi tersebut dilakukan penyelidikan tentang aplikasi dari usulan model pada suatu sistem distribusi tenaga listrik.

**Kata kunci** — Pembangkit Listrik Tenaga Angin, Kecepatan Variabel, SCIG, Analisis Aliran Daya, Sistem Distribusi Tenaga Listrik, Mode Operasi Kontrol Tegangan.

**Abstract** — In recent years, the application of variable speed wind power plants (WPPs) has become increasingly popular and surpassed fixed speed WPPs. This popularity is mainly because variable speed WPPs are much more efficient in capturing or extracting wind energy than fixed speed WPPs. One variable speed WPP currently being used more and more due to its relatively cheaper cost is the variable speed WPP based on SCIG (*Squirrel Cage Induction Generator*). This type of WPP is usually equipped with a power electronics converter to obtain a wider range of variable speed operations. Modeling the system components is undoubtedly necessary to perform an electric power system analysis (including load flow analysis). This paper discusses the steady state model of SCIG-based variable speed WPP for a load flow analysis of electric power distribution systems. This proposed model can be used for SCIG-based variable speed WPP with voltage control operating mode. The model was developed based on formulas that calculate the mechanical power input of the turbine and the electrical power output of the WPP. This paper also presents a case study in which an investigation is conducted on applying the proposed model to an electric power distribution system.

**Keywords**— Wind Power Plant, Variable Speed, SCIG, Load Flow Analysis, Electric Power Distribution System, Voltage Control Operation Mode.

## I. PENDAHULUAN

Belakangan ini penggunaan energi angin sebagai alternatif terhadap energi fosil untuk menghasilkan tenaga listrik semakin mengalami peningkatan. PLTAn dapat diklasifikasikan kedalam dua kelompok besar yaitu: PLTAn kecepatan tetap (atau hampir tetap) dan PLTAn kecepatan variabel. Oleh karena lebih efisien dalam mengekstraksi energi angin, saat ini PLTAn kecepatan variabel telah mulai menggantikan PLTAn kecepatan tetap.

Pada PLTAn kecepatan tetap, frekwensi 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 – 2 % diatas kecepatan sinkron). Hal ini mengakibatkan pemanfaatan energi angin menjadi kurang optimal. PLTAn kecepatan tetap umumnya memanfaatkan SCIG untuk mengubah energi angin menjadi daya listrik.

Secara alamiah, kecepatan angin selalu berubah dan tidak konstan. Dilain pihak, pada operasi PLTAn akan terdapat suatu kecepatan putaran generator untuk kecepatan angin tertentu dimana daya yang dihasilkan PLTAn akan maksimum. Hal inilah yang menyebabkan PLTAn kecepatan variabel dapat menangkap energi angin secara lebih optimal karena pada PLTAn tersebut kecepatan rotasinya dapat disesuaikan dengan kecepatan angin yang ada. PLTAn kecepatan variabel dapat diwujudkan dengan menggunakan DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*), PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) atau SCIG. Namun demikian, PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG memiliki keuntungan yaitu biayanya yang relatif lebih rendah. Lebih lanjut, PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG dapat dioperasikan pada rentang kecepatan yang cukup lebar yaitu 50% dibawah kecepatan sinkron hingga 10% diatas kecepatan sinkron.

Agar dapat melakukan analisis terhadap suatu sistem tenaga listrik, pemodelan dari komponen-komponen sistem tersebut merupakan hal yang sangat penting. Lebih lanjut, analisis aliran daya adalah analisis fundamental didalam studi-studi sistem tenaga listrik. Analisis ini biasanya dilakukan untuk keperluan asesmen terhadap performa keadaan mantap suatu sistem tenaga listrik. Dalam konteks pemodelan PLTAn untuk analisis aliran daya, beberapa metode telah diusulkan seperti yang dilaporkan pada [1-16]. Peneliti-peneliti pada [1-8] mengusulkan metode-metode yang dikhususkan untuk PLTAn kecepatan tetap, sedangkan metode-metode yang diusulkan pada [9-16] digunakan untuk PLTAn kecepatan variabel. Model keadaan mantap dari PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG untuk analisis aliran daya telah diusulkan pada [16]. Namun demikian, model tersebut tersebut mengasumsikan bahwa PLTAn beroperasi pada faktor daya konstan. Oleh karenanya, model tersebut tidak dapat digunakan untuk merepresentasikan PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG dengan mode operasi kontrol tegangan.

Makalah ini membahas model keadaan mantap dari PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG untuk analisis aliran daya

sistem distribusi tenaga listrik. Model tersebut dapat digunakan untuk PLTAn kecepatan variabel berbasis SCIG dengan mode operasi kontrol tegangan, dan dikembangkan berdasarkan formula-formula yang menghitung masukan daya mekanik turbin dan keluaran daya listrik PLTAn. Integrasi dari usulan model pada analisis aliran daya juga dibahas pada makalah ini. Lebih lanjut, pada makalah ini juga akan dilakukan studi validasi. Pada studi tersebut akan diperlihatkan bahwa usulan model mampu merepresentasikan PLTAn kecepatan variabel berbasis SCIG secara baik sehingga dapat digunakan untuk analisis aliran daya suatu sistem distribusi tenaga listrik.

## II. FORMULASI MASALAH ALIRAN DAYA

Dapat ditunjukkan bahwa masalah aliran daya suatu sistem tenaga listrik memiliki formulasi sebagai berikut [17]:

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

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

dimana:

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

$S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}$ : kebutuhan daya (beban) pada bus ke-i

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

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

$n$ : jumlah bus sistem tenaga

Tabel 1 memperlihatkan variabel-variabel yang nilainya diketahui (atau ditentukan) dan yang tak diketahui (akan dihitung) pada (1). Beberapa catatan penting untuk variabel-variabel tersebut adalah sebagai berikut: (i) Oleh karena analisis aliran daya dilakukan pada kondisi beban tertentu,  $P_L$  dan  $Q_L$  diketahui nilainya; (ii) Matriks admitansi bus  $Y$  dihitung berdasarkan konfigurasi jaringan dan impedansi/admitansi saluran; (iii) Bus GI biasanya dianggap sebagai bus referensi,

sehingga sudut tegangan pada bus ini adalah nol dan besar tegangannya dispesifikasi pada suatu nilai tertentu (misalnya 1,0 pu); (iv) Pada bus-bus beban,  $P_G$  dan  $Q_G$  adalah nol karena bus-bus ini tidak memiliki sumber pembangkit daya.

Tabel 1. Jenis Bus dan Variabel

No	Jenis Bus	Variabel Yang Diketahui	Variabel Yang Dicari
1	Gardu Induk (GI)	$P_L, Q_L, Y,  V $ dan $\delta=0$	$P_G$ dan $Q_G$
2	Beban	$P_L, Q_L, Y, P_G=Q_G=0$	$ V $ dan $\delta$

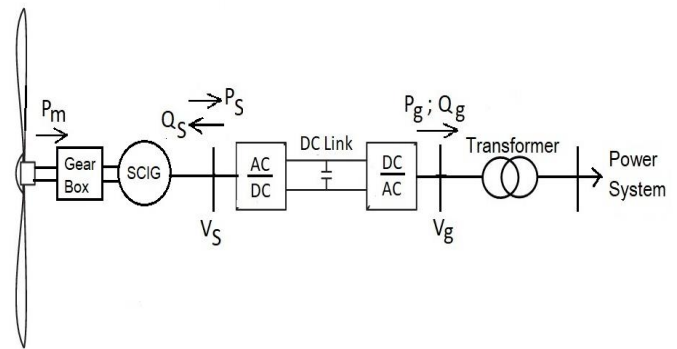
### III. PLTAN YANG BERBASIS SCIG

#### A. Konfigurasi PLTAn

Gambar 1 memperlihatkan konfigurasi dasar dari PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG [15, 16, 18-20]. Rotor SCIG dihubungkan ke turbin angin melalui roda gigi untuk mengubah kecepatan rotasi turbin menjadi kecepatan rotasi yang lebih tinggi yang dibutuhkan SCIG untuk menghasilkan daya listrik. SCIG kemudian akan menyalurkan daya ini (daya aktif) ke sistem tenaga (power grid) melalui konverter elektronika daya (KED) yang biasanya berupa konverter *back-to-back*. Konverter ini terdiri dari VSC (*Voltage Source Converter*) atau MSC (*Machine Side Converter*), DC (*Direct Current*)-link dan VSI (*Voltage Source Inverter*) atau GSC (*Grid Side Converter*). KED akan memisahkan kecepatan rotor dari frekwensi sistem sehingga turbin dapat beroperasi pada kecepatan yang lebih lebar. PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG dapat dioperasikan pada rentang kecepatan 50% dibawah kecepatan sinkron sampai 10% diatas kecepatan sinkron [19].

Pada Gambar 1,  $P_m$  adalah masukan daya mekanik turbin,  $P_s$  dan  $Q_s$  adalah daya aktif dan reaktif stator SCIG,  $P_g$  dan  $Q_g$  adalah keluaran daya aktif dan reaktif PLTAn,  $V_s$  adalah tegangan stator SCIG, dan  $V_g$  adalah tegangan terminal PLTAn. Perlu dicatat bahwa oleh karena SCIG dipisahkan oleh konverter elektronika daya, ia tidak dapat dieksitasi dari sistem atau grid. Pada PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG, daya untuk eksitasi ini biasanya berasal dari MSC

yang disalurkan melalui stator. Lebih lanjut, pada PLTAn jenis ini, GSC umumnya diatur untuk mengendalikan faktor daya atau tegangan tergantung pada strategi kontrol yang dipilih. Pada PLTAn yang beroperasi dengan pengendalian tegangan (*voltage control mode*), keluaran daya reaktif PLTAn dapat diatur sehingga regulasi tegangan dapat dilakukan.



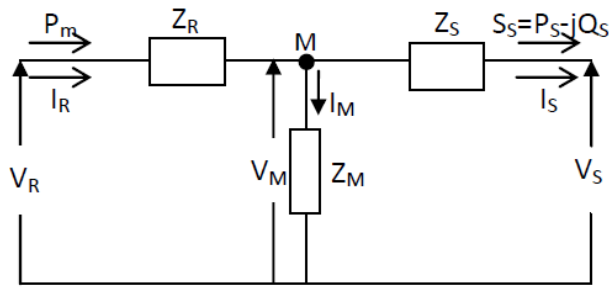
Gbr 1. Konfigurasi PLTAn Kecepatan Variabel Yang Berbasis SCIG

#### B. Rangkaian Ekuivalen SCIG

Gambar 2 memperlihatkan rangkaian ekuivalen keadaan mantap dari SCIG [1-8, 15, 16]. Pada Gambar 2,  $V_R$  dan  $I_R$  adalah tegangan dan arus rotor,  $V_M$  dan  $I_M$  adalah tegangan dan arus rangkaian inti magnetik,  $S_s$  dan  $I_s$  adalah daya dan arus stator. Lebih lanjut, pada Gambar 2,  $Z_s$ ,  $Z_R$  dan  $Z_M$  berturut-turut adalah impedansi-impedansi dari rangkaian stator, rotor, dan inti magnetik. Impedansi-impedansi ini dihitung melalui:

$$\begin{aligned} Z_s &= R_s + jX_s \\ Z_R &= R_R + jX_R \\ Z_M &= jR_c X_m / (R_c + jX_m) \end{aligned} \quad (2)$$

dimana  $R_s$ ,  $R_R$  dan  $R_c$  berturut-turut adalah resistansi-resistansi dari rangkaian stator, rotor dan inti magnetik;  $X_s$ ,  $X_R$  dan  $X_m$  berturut-turut adalah reaktansi-reaktansi dari rangkaian stator, rotor dan inti magnetik.



Gbr 2. Rangkaian Ekvivalen SCIG

Berdasarkan Gambar 2, daya listrik pada stator SCIG dan daya mekanik turbin dapat diformulasikan sebagai:

$$S_S = V_S I_S^* \quad (3)$$

dan:

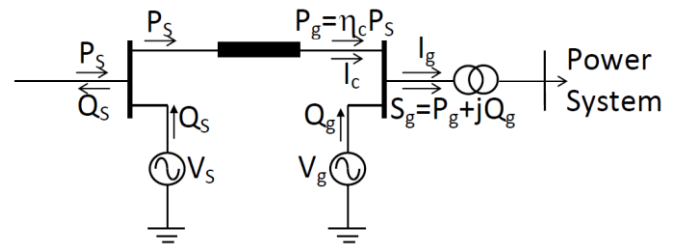
$$P_m = V_R I_R^* \quad (4)$$

Untuk memfasilitasi pembentukan model matematik dari PLTAn, daya mekanik turbin juga dapat dinyatakan dalam bentuk tegangan dan daya stator sebagai berikut (penurunannya dapat dilihat pada Lampiran):

$$P_m = V_S V_S^* Z_{T1} + S_S Z_{T2} + S_S^* Z_{T3} + \frac{S_S S_S^*}{V_S V_S^*} Z_{T4} \quad (5)$$

### C. Rangkaian Ekvivalen KED

Gambar 3 memperlihatkan model konverter elektronika daya dari PLTAn untuk analisis aliran daya [16]. Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, SCIG mengirim daya ke sistem atau grid melalui sistem konverter tersebut. Pada Gambar 3 juga dapat dilihat bahwa SCIG dieksitasi dari MSC melalui terminal stator. Banyaknya daya reaktif yang dibutuhkan untuk eksitasi ini disimbolkan dengan  $Q_S$ . Pada mode kontrol tegangan, GSC diatur untuk mengendalikan daya reaktif dan mengatur besar tegangan pada suatu nilai tertentu. Besarnya daya reaktif yang dibutuhkan untuk keperluan ini disimbolkan dengan  $Q_g$ . Perlu dicatat bahwa pada Gambar 3,  $V_S$  juga merupakan tegangan pada MSC, dan  $V_g$  juga merupakan tegangan pada GSC.



Gbr 3. Model KED Untuk Analisis Aliran Daya

Dengan melihat Gambar 3, rugi daya pada KED adalah:

$$P_{loss,pec} = (V_S - V_g) I_c^* = (1 - \eta_c) P_S \quad (6)$$

dimana  $I_c$  dan  $\eta_c$  berturut-turut adalah arus dan efisiensi dari konverter elektronika daya. Oleh karena:

$$I_c^* = \frac{P_g}{V_g} = \frac{\eta_c P_S}{V_g} \quad (7)$$

Maka, dengan mensubstitusi (7) ke (6), rugi daya konverter elektronika daya menjadi:

$$P_{loss,pec} = (V_S - V_g) \frac{\eta_c P_S}{V_g} = (1 - \eta_c) P_S \quad (8)$$

Berdasarkan (8), persamaan yang menghubungkan tegangan PLTAn dan tegangan stator SCIG dapat diperoleh sebagai berikut:

$$V_g = \eta_c V_S \quad (9)$$

### D. Usulan Model PLTAn

Berdasarkan (5) dan (9), usulan model aliran daya keadaan mantap dari PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG dapat diformulasikan sebagai:

$$\frac{V_g V_g^*}{\eta_c^2} Z_{T1} + S_S Z_{T2} + S_S^* Z_{T3} + \frac{\eta_c^2 S_S S_S^*}{V_g V_g^*} Z_{T4} - P_m = 0 \quad (10)$$

Dengan demikian, untuk mendapatkan solusi masalah aliran daya dari sistem

distribusi yang mengandung PLTAn kecepatan variabel yang berbasis SCIG, (1) dan (10) harus diselesaikan secara simultan. Tabel 2 memperlihatkan variabel-variabel (yang ditentukan/dispesifikasi dan yang akan dihitung) dalam formulasi lengkap dari masalah aliran daya tersebut. Perlu dicatat bahwa pembangkitan daya pada bus PLTAn ( $S_G$ ) juga merupakan keluaran daya PLTAn ( $S_g$ ), atau:

$$S_G = P_g + jQ_g = \eta_c P_S + jQ_G \quad (11)$$

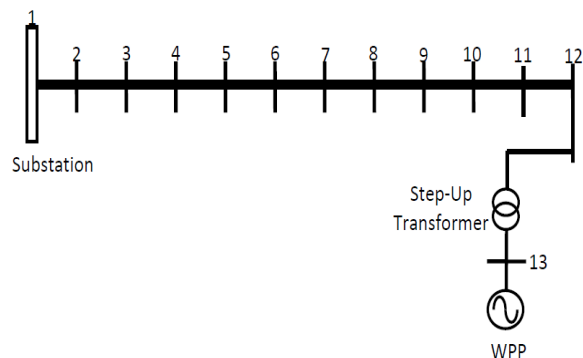
Tabel 2. Jenis Bus dan Variabel untuk Sistem dengan PLTAn

No	Jenis Bus	Variabel Yang Ditentukan	Variabel Yang Dicari
1	GI (Substation)	$P_L, Q_L, Y,  V $ dan $\delta=0$	$P_G$ dan $Q_G$
2	Beban	$P_L, Q_L, Y,$ $P_G=Q_G=0$	$ V $ dan $\delta$
3	PLTAn	$P_L, Q_L, Y,$ $ V = V_g $	$Q_g, \delta=\delta_g,$ $P_s, Q_s$

#### IV. STUDI KASUS

##### A. Sistem Test

Penerapan metode yang diusulkan dalam analisis aliran daya suatu sistem distribusi akan dibahas dalam studi kasus ini. Sistem pengujian yang digunakan dalam makalah ini didasarkan pada sistem distribusi 12 bus yang diadopsi dari [18]. Sistem 11 kV ini memiliki beban tiga fasa total sebesar 4.305 MW dan 1.215 MVAR. PLTAn kecepatan variabel berbasis SCIG diasumsikan terhubung ke bus 12 melalui sebuah transformator step-up (lihat Gambar 4). Data sistem distribusi dan PLTAn berturut-turut disajikan pada Tabel 3 dan 4.



Gbr 4. Sistem Test

Tabel 3. Data Sistem Test

Sal.	Bus Kir.	Bus Ter.	R*	X*	P <sub>L</sub> **	Q <sub>L</sub> **
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/fasa

\*\*Beban terhubung pada bus terima dalam kW dan kVAR (perfasa)

Tabel 4. Data PLTAn

Turbin	Panjang bilah turbin: 45 meter Daya rating: 3.5 MW Kecepatan: <i>Cut-in</i> : 6 m/s; <i>Rated</i> : 13 m/s; <i>Cut-out</i> : 23 m/s
Gear Box	Rasio: 1/60
Generator	Tipe: SCIG Daya rating: 3.5 MW Pasang kutub: 4 Tegangan: 690 Volt Resistansi/Reaktansi (dalam pu*): $R_s=0.01$ ; $X_s=0.1$ ; $R_r=0.1$ ; $X_r=0.2$ ; $R_c=500$ ; $X_m=50$
KED	Efisiensi: 95%
Step-Up Transformer	Impedansi (dalam pu*): j0.1

\*pu pada dasar 1 MVA

##### B. Daya Turbin

Tabel 5 memperlihatkan besar daya mekanik turbin untuk kecepatan angin mulai dari 6 m/detik sampai 13 m/detik [16].

Tabel 5. Daya Turbin

Kecepatan Angin (m/detik)	Daya Turbin (MW)
6	0.3367
7	0.5346
8	0.7980
9	1.3362
10	1.5586
11	2.0745
12	2.6933
13	3.4243

### C. Hasil dan Pembahasan

Tabel 6 – 11 memperlihatkan hasil-hasil analisis aliran daya untuk sistem pada Gambar 4. Untuk menyelidiki penampilan PLTAn pada mode operasi kontrol tegangan, tiga nilai tegangan PLTAn akan digunakan yaitu: 0,98; 1,0; dan 1,02 pu. Hasil-hasil pada Tabel 6, 8, dan 10 (kolom 4 dan 5) menunjukkan bahwa variasi tegangan PLTAn hampir tidak mempengaruhi keluaran daya aktif PLTAn. Namun, variasi tegangan ini cukup mempengaruhi keluaran daya reaktif PLTAn. Terlihat bahwa semakin tinggi tegangan PLTAn, keluaran daya reaktifnya semakin besar, dan PLTAn dapat mengirim lebih banyak daya reaktif (atau PLTAn tersebut akan menyerap lebih sedikit daya reaktif).

Tabel 6. Daya PLTAn ( $|V_g| = 0,98$  pu)

$P_m$ (MW)	$P_s$ (MW)	$Q_s$ (MVAR)	$P_g$ (MW)	$Q_g$ (MW)
0.3367	0,3265	-0,0742	0,3102	1,6137
0.5346	0,5187	-0,0898	0,4927	1,3085
0.7980	0,7706	-0,1210	0,7321	0,9434
1.3362	1,2724	-0,2202	1,2088	0,3087
1.5586	1,4748	-0,2748	1,4011	0,0809
2.0745	1,9333	-0,4312	1,8367	-0,3872
2.6933	2,4631	-0,6738	2,3400	-0,8585
3.4243	3,0598	-1,0400	2,9068	-1,3163

Tabel 7. Output GI dan Rugi-Rugi Saluran  
( $|V_g| = 0,98$  pu)

$P_m$ (MW)	Output GI		Rugi-Rugi	
	MW	MVAR	MW	MVAR
0.3367	4,4774	-0,1251	0,4826	0,2735
0.5346	4,1897	0,1175	0,3775	0,2111
0.7980	3,8495	0,4288	0,2766	0,1572
1.3362	3,2693	1,0302	0,1731	0,1240
1.5586	3,0649	1,2673	0,1610	0,1331
2.0745	2,6525	1,7946	0,1841	0,1924
2.6933	2,2488	2,3900	0,2838	0,3165
3.4243	1,8706	3,0460	0,4724	0,5147

Tabel 6, 8, dan 10 (kolom 2 dan 3) juga memperlihatkan bahwa dengan meningkatnya daya turbin, daya aktif stator SCIG juga semakin besar. Namun demikian, oleh karena adanya rugi-rugi daya dalam SCIG, daya aktif stator ini akan sedikit lebih kecil dibandingkan daya turbin. Sedangkan daya reaktif stator SCIG terlihat nilainya selalu negatif yang berarti bahwa SCIG tersebut

menyerap daya reaktif. Daya reaktif ini dibutuhkan oleh SCIG untuk menghasilkan medan magnet (proses magnetisasi). Perlu juga dicatat bahwa semakin besar daya aktif stator, daya reaktif yang dibutuhkan juga akan semakin tinggi.

Dari hasil analisis aliran daya, hal menarik lain yang dapat diamati adalah berkurangnya daya aktif GI bila keluaran daya PLTAn semakin besar (lihat Tabel 7, 9, dan 11). Pengurangan suplai daya aktif dari GI dapat terjadi karena sebagian beban sistem dapat dicatu dari PLTAn.

Tabel 8. Daya PLTAn ( $|V_g| = 1,00$  pu)

$P_m$ (MW)	$P_s$ (MW)	$Q_s$ (MVAR)	$P_g$ (MW)	$Q_g$ (MW)
0.3367	0,3264	-0,0764	0,3101	2,0601
0.5346	0,5188	-0,0914	0,4928	1,7319
0.7980	0,7712	-0,1214	0,7326	1,3412
1.3362	1,2743	-0,2170	1,2106	0,6654
1.5586	1,4774	-0,2695	1,4036	0,4235
2.0745	1,9381	-0,4201	1,8412	-0,0730
2.6933	2,4712	-0,6536	2,3477	-0,5730
3.4243	3,0733	-1,0051	2,9196	-1,0597

Tabel 9. Output GI dan Rugi-Rugi Saluran  
( $|V_g| = 1,00$  pu)

$P_m$ (MW)	Output GI		Rugi-Rugi	
	MW	MVAR	MW	MVAR
0.3367	4,5596	-0,4939	0,5646	0,3512
0.5346	4,2486	-0,2467	0,4365	0,2702
0.7980	3,8827	0,0698	0,3103	0,1960
1.3362	3,2617	0,6803	0,1673	0,1307
1.5586	3,0434	0,9206	0,1420	0,1291
2.0745	2,6031	1,4553	0,1393	0,1673
2.6933	2,1717	2,0593	0,2144	0,2713
3.4243	1,7658	2,7257	0,3804	0,4510

Tabel 10. Daya PLTAn ( $|V_g| = 1,02$  pu)

$P_m$ (MW)	$P_s$ (MW)	$Q_s$ (MVAR)	$P_g$ (MW)	$Q_g$ (MW)
0.3367	0,3263	-0,0787	0,3099	2,5467
0.5346	0,5189	-0,0931	0,4929	2,1913
0.7980	0,7717	-0,1220	0,7331	1,7711
1.3362	1,2761	-0,2141	1,2123	1,0492
1.5586	1,4799	-0,2468	1,4059	0,7917
2.0745	1,9425	-0,4099	1,8454	0,2644
2.6933	2,4789	-0,6347	2,3549	-0,2663
3.4243	3,0859	-0,9727	2,9316	-0,7835

Tabel 11. Output GI dan Rugi-Rugi Saluran  
( $|V_g| = 1,02$  pu)

$P_m$ (MW)	Output GI		Rugi-Rugi	
	MW	MVAR	MW	MVAR
0.3367	4,6755	-0,8762	0,6804	0,4555
0.5346	4,3371	-0,6236	0,5250	0,3527
0.7980	3,9414	-0,3012	0,3695	0,2549
1.3362	3,2744	0,3192	0,1817	0,1534
1.5586	3,0408	0,5631	0,1417	0,1399
2.0745	2,5702	1,1055	0,1106	0,1549
2.6933	2,1089	1,7182	0,1589	0,2370
3.4243	1,6737	2,3951	0,3003	0,37966

## V. PENUTUP

Pada makalah ini, model steady state PLTAn kecepatan variabel berbasis SCIG dalam mode kontrol tegangan untuk analisis aliran daya sistem distribusi tenaga listrik telah diusulkan. Model yang dikembangkan didasarkan pada rumus yang menghitung input daya mekanik turbin dan output daya listrik PLTAn. Integrasi model yang diusulkan dalam analisis aliran daya juga telah dibahas dan disajikan dalam makalah ini. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model yang diusulkan dapat merepresentasikan PLTAn kecepatan variabel berbasis SCIG dengan mode kontrol tegangan. Hasil ini menunjukkan bahwa model yang diusulkan tersebut dapat digunakan untuk analisis aliran daya sistem distribusi tenaga listrik yang mengandung PLTAn kecepatan variabel berbasis SCIG.

## LAMPIRAN

Berdasarkan Gambar 2, tegangan rotor, arus rotor dan arus rangkaian magnetik dapat dirumuskan sebagai:

$$V_R = V_S + I_S Z_S + I_R Z_R \quad (12)$$

$$I_R = I_S + I_M \quad (13)$$

$$I_M = \frac{V_M}{Z_M} = \frac{V_S + I_S Z_S}{Z_M} \quad (14)$$

Dengan mensubstitusi (14) pada (13), arus rotor menjadi:

$$I_R = V_S \frac{I}{Z_M} + I_S \frac{Z_S + Z_M}{Z_M} \quad (15)$$

Selanjutnya, dengan mensubstitusi (15) pada (12), tegangan rotor menjadi:

$$V_R = V_S \left( I + \frac{Z_R}{Z_M} \right) + I_S \left( Z_S + Z_R + \frac{Z_S Z_R}{Z_M} \right) \quad (16)$$

Substitusi (15) dan (16) pada (4) dan mengatur kembali hasilnya, daya mekanik turbin dapat dirumuskan sebagai:

$$P_m = V_S V_S^* Z_{T1} + V_S I_S^* Z_{T2} + V_S^* I_S Z_{T3} + I_S I_S^* Z_{T4} \quad (17)$$

dimana:

$$Z_{T1} = \frac{I}{Z_M^*} + \frac{Z_R}{Z_M Z_M^*} \quad (18a)$$

$$Z_{T2} = I + \frac{Z_S^*}{Z_M^*} + \frac{Z_R}{Z_M} + \frac{Z_S^* Z_R}{Z_M Z_M^*} \quad (18b)$$

$$Z_{T3} = \frac{Z_S}{Z_M^*} + \frac{Z_S Z_R}{Z_M Z_M^*} + \frac{Z_R}{Z_M^*} \quad (18c)$$

$$Z_{T4} = Z_S + Z_R + \frac{Z_S Z_S^*}{Z_M^*} + \frac{Z_S Z_R}{Z_M} + \frac{Z_S Z_S^* Z_R}{Z_M Z_M^*} + \frac{Z_S^* Z_R}{Z_M^*} \quad (18d)$$

Kemudian, dengan menggunakan (3) pada (17), daya mekanik turbin dapat dituliskan sebagai:

$$P_m = V_S V_S^* Z_{T1} + S_S Z_{T2} + S_S^* Z_{T3} + \frac{S_S S_S^*}{V_S V_S^*} Z_{T4} \quad (19)$$

## REFERENSI

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] O. Ozturk, M.E. Balci, and M.H. Hocaoglu, "A new wind turbine generating system model for balanced and unbalanced distribution systems load flow analysis," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 4, 2018.
- [5] R. Gianto, K.H. Khwee, H. Priyatman, and M. Rajagukguk, "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.
- [6] 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.
- [7] R. Gianto, "Steady state model of wind power plant for load flow study," in *Proceedings 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA 2020)*, pp. 119-122, 2020.
- [8] 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.
- [9] 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. 9479-9489, 2016.
- [10] V.S.S. Kumar, 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.
- [11] 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. 5, pp. 980-989, 2021.
- [12] 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.
- [13] R. Gianto, "Integration Of DFIG-Based Variable Speed Wind Turbine Into Load Flow Analysis," in *Proceedings 2021 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA 2021)*, pp. 63-66, 2021.
- [14] R. Gianto, "Steady State Load Flow Model of DFIG-Based Wind Turbine in Voltage Control Mode," in *Proceedings 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS 2021)*, pp. 232-235, 2021.
- [15] M. Benchagra, M. Hilal, Y. Errami, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, "Modeling and Control of SCIG based Variable Speed with Power Factor Control," *International Review of Modelling and Simulations*, vol. 4, no. 3, pp. 1-10, 2011.
- [16] A. Elbani, and R. Gianto, "Modeling of SCIG-Based Variable Speed Wind Turbine in Power Factor Control Mode for Load Flow Analysis," *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 5, no. 6, pp. 43-48, 2021.
- [17] 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.
- [18] M. Cheng, and Y. Zhu, "The State of the Art of Wind Energy Conversion Systems and Technologies: A Review," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 332-347, 2014.
- [19] V. Akhmatov, *Induction Generators for Wind Power*, Multi-Science Publishing Co. Ltd., 2007.
- [20] I. Boldea, *Variable Speed Generators*. Boca Baton, Taylor & Francis Group LLC., 2005.