

SIMULASI SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGUNAKAN *DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR (DFIG)* DENGAN *BACK-TO-BACK CONVERTER*

Anisa Harumwidiah¹ dan Adi Kurniawan²

¹Program Studi Teknik Listrik Industri, Politeknik 17 Agustus 1945 Surabaya

²Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan,

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

^{1*}Corresponding author, e-mail: aharwid@gmail.com

Abstrak— Turbin angin merupakan salah satu solusi untuk mengatasi sumber energi fosil yang jumlahnya semakin terbatas. Salah satu generator yang digunakan untuk turbin angin adalah *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)*. Arus AC yang disuplai berasal dari belitan stator yang terhubung langsung dengan jaringan dan belitan rotor yang juga terhubung dengan jaringan melalui *power electronic converter* dengan jenis *back-to-back converter*. Pada penelitian ini dilakukan simulasi pembangkit listrik tenaga angin menggunakan DFIG yang dihubungkan ke jaringan melalui *back-to-back converter*. Konverter ini dioperasikan dengan tujuan mengontrol kecepatan rotor DFIG agar menghasilkan daya maksimum dan menjaga nilai tegangan kapasitor DC tetap konstan. Sistem dilengkapi dengan metode *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* untuk menghasilkan daya maksimum pada kecepatan angin yang berbeda-beda. Hasil simulasi untuk pengujian akurasi rangkaian kontrol menunjukkan nilai akurasi yang tinggi dibuktikan dengan nilai error dibawah 1% untuk semua kondisi kecepatan angin.

Kata Kunci : *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)*, *Back-to-back Converter*, dan energi terbarukan.

Abstract— Wind turbine is one of the solutions to overcome the decreasing amount of fossil fuel. One type of generator which can be used on wind turbine application is *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)*. The AC current is supplied from both stator winding which connected directly to the grid and rotor winding which connected to the grid through *back-to-back power electronic converter*. This paper provides simulation of wind turbine using DFIG connected to the grid through *back-to-back converter*. The *back-to-back converter* is operated in order to control the rotor speed of DFIG, so that the DFIG can generate maximum power and maintain constant voltage on DC link capacitor. The system is equipped with *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* method to generate maximum power on various wind speed condition. The simulation results show that the control system has high accuracy, proven with error value under 1% on various wind speed condition.

Keywords : *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)*, *Back-to-back Converter*, and renewable energy

Copyright © 2016 JNTE. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Selain sandang, pangan dan papan, listrik telah menjelma menjadi kebutuhan pokok manusia terutama di wilayah kota. Manusia tidak bisa lepas dari kebutuhan penerangan, pengawetan makanan dengan lemari es, hiburan dari televisi dan banyak hal lain yang membutuhkan listrik. Selain itu, industri juga sangat membutuhkan listrik. Berbagai peralatan listrik dibutuhkan oleh berbagai macam industri, baik skala kecil, menengah maupun besar. Dengan demikian, ketersediaan pasokan listrik harus terus dijaga agar kebutuhan masyarakat

dapat tetap terpenuhi.

Berdasarkan data tahun 2013, rasio elektrifikasi di Indonesia masih berkisar di angka 80.1%. Jadi, sekitar 19.9% penduduk Indonesia belum menikmati listrik [1].

Penyebab utama belum terpenuhinya kebutuhan listrik seluruh masyarakat Indonesia adalah sulitnya membangun jaringan transmisi listrik ke daerah pelosok. Jika pembangkit listrik berskala kecil yang menggunakan sumber energi minyak dibangun pada daerah pelosok, harga listrik akan menjadi sangat mahal karena tingginya biaya penyaluran bahan bakar [2]. Oleh karena itu, pembangunan pembangkit

listrik dengan sumber energi terbarukan yang ada di daerah tersebut harus mulai dilakukan.

Saat ini bahan bakar fosil juga masih berperan sebagai sumber energi utama pembangkit tenaga listrik. Bahan bakar fosil jumlahnya semakin menipis dan tidak dapat diperbarui. Karena kebutuhan listrik semakin hari semakin meningkat, penggunaan energi terbarukan sebagai sumber energi alternatif semakin diperlukan [3].

Salah satu sumber energi yang dapat diperbarui adalah angin. Dengan menggunakan turbin angin, energi angin dapat digunakan sebagai sumber pembangkit tenaga listrik. Sumber energi ini memiliki beberapa keuntungan yaitu ramah lingkungan dan tersedia dalam jumlah melimpah [4].

Untuk menghasilkan energi listrik dari energi angin dapat digunakan generator DC, generator sinkron dan generator induksi. Seperti halnya kelebihan motor induksi [5], generator induksi memiliki kelebihan yaitu harga lebih murah dan konstruksi lebih kuat. Generator induksi terdiri atas dua jenis yaitu *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) dan *Self Excited Induction Generator* (SEIG). SEIG lebih murah dibanding dengan DFIG [6], namun DFIG memiliki kelebihan dibandingkan SEIG yaitu rating daya yang dibutuhkan oleh konverter lebih kecil sebab daya yang diatur oleh konverter adalah daya dari rotor yang hanya bernilai sekitar 30% dari total daya generator [7].

Sebelum membuat aplikasi nyata pembangkit listrik tenaga angin, perlu dibuat simulasi terlebih dahulu. Simulasi yang dilakukan harus dapat menggambarkan kondisi sistem sebenarnya. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan sistem pembangkit listrik tenaga angin menggunakan DFIG dengan *back-to-back converter*. Pemodelan dan simulasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab. Sistem yang dirancang dilengkapi dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) agar pembangkit listrik dapat menghasilkan daya maksimum pada setiap kondisi kecepatan angin. Pemodelan sistem ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan prototipe pembangkit listrik tenaga angin di masa mendatang.

2. DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR (DFIG)

Energi angin merupakan salah satu jenis energi terbarukan yang dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik. Energi angin hampir selalu tersedia walaupun tingkat energi yang dihasilkan berbeda-beda berdasarkan kecepatan angin. Untuk mengkonversi energi kinetik dari angin menjadi energi listrik, diperlukan turbin angin untuk mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik sebelum dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Total daya yang ditangkap oleh turbin angin merupakan fungsi dari kecepatan angin dan luas dari baling-baling turbin [8]. Persamaan daya input turbin angin dapat dituliskan sesuai persamaan (1) sebagai berikut.

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V_w^3 \quad (1)$$

dengan:

P_{wt} = Daya input turbin angin, berupa daya mekanik (Watt)

R = Diameter turbin (m)

ρ = Kerapatan udara (Kg/m³)

V_w = Kecepatan udara (m/s)

Ada dua parameter yang diperlukan untuk menentukan efisiensi turbin angin. Parameter pertama adalah koefisien daya (C_p) yang merupakan perbandingan antara daya output turbin (P_m) dengan daya input turbin (P_{wt}) [9]. Secara matematis C_p dapat dituliskan sesuai persamaan (2) berikut.

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (2)$$

dengan:

C_p = Koefisien daya

β = Sudut baling-baling

$c_1 - c_6$ = Koefisien turbin

Pada persamaan (2) terdapat nilai λ yang merupakan rasio kecepatan ujung (*Tip Speed Ratio*). Rasio ini merupakan perbandingan antara kecepatan putar poros turbin terhadap kecepatan angin. Secara matematis, nilai λ dapat dihitung berdasarkan persamaan (3).

$$\lambda = \frac{\omega_r}{V_w} \quad (3)$$

dengan:

$$\lambda = \text{Tip speed ratio}$$

$$\omega_r = \text{Kecepatan poros rotor (rad/s)}$$

$$V_w = \text{Kecepatan angin (m/s)}$$

Dengan mengetahui nilai C_p dan λ , daya output mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dihitung menggunakan persamaan (4).

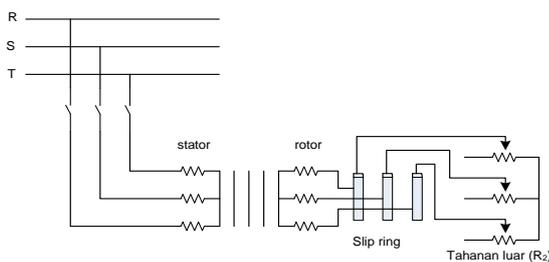
$$P_m = \frac{1}{2} \pi \rho C_p R^2 V_w^3 \quad (4)$$

selain daya, torka mekanik dari turbin angin juga dapat dihitung menggunakan persamaan (5).

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (5)$$

DFIG terdiri dari sebuah mesin induksi yang bekerja sebagai generator dan digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengonversi energi mekanik yang dihasilkan turbin angin dengan rating daya yang besar.

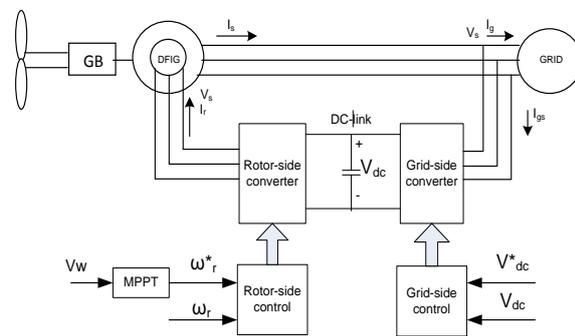
Konstruksi DFIG disusun atas sebuah mesin induksi rotor belit yang dioperasikan sebagai generator. Tujuan dari penggunaan mesin induksi rotor belit adalah karena pada DFIG, bagian rotor dari mesin induksi disambungkan dengan konverter sehingga pengaturan daya dapat dilakukan dari bagian rotor tersebut.



Gambar 1. Konstruksi Mesin Induksi Rotor Belit

Gambar 1 menunjukkan konstruksi mesin induksi rotor belit. Bagian stator terhubung dengan grid, sedangkan bagian rotor mempunyai output yang melalui slip ring. Pada gambar tersebut, slip ring yang tersambung dengan bagian rotor dihubungkan langsung dengan tahanan luar. Namun untuk aplikasi DFIG, slip ring tersebut dihubungkan dengan konverter yang selanjutnya terhubung dengan grid, sehingga pengaturan daya dapat dilakukan dari bagian rotor tersebut.

Topologi sistem pembangkit listrik tenaga angin dengan DFIG seperti ditunjukkan oleh Gambar 2 terdiri atas sebuah turbin angin, sebuah gear box (GB) yang berfungsi untuk mengkonversi kecepatan turbin menjadi kecepatan rotor generator, sebuah generator induksi wound rotor dimana belitan stator terhubung langsung dengan grid dan belitan rotor tersambung dengan back-to-back converter. Back-to-back converter ini terdiri atas rotor-side converter, sebuah kapasitor DC link dan grid-side converter yang terhubung dengan grid. Setiap konverter dilengkapi dengan perangkat kontrol. Perangkat kontrol rotor-side converter dilengkapi dengan maximum power point tracker untuk menghasilkan daya maksimum. Perangkat kontrol grid-side converter bertujuan untuk menjaga agar tegangan pada kapasitor DC bernilai konstan.



Gambar 2. Topologi Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan DFIG

Dalam sistem DFIG, energi listrik dihasilkan dari stator maupun rotor. Daya listrik yang dihasilkan oleh stator dapat dihitung menggunakan persamaan (6).

$$P_s = T_{em} \omega_s \quad (6)$$

dengan:

$$P_s = \text{Daya yang dihasilkan stator (Watt)}$$

$$T_{em} = \text{Torka elektromagnetik (N.m)}$$

$$\omega_s = \text{Kecepatan medan putar stator (rad/s)}$$

Pada saat kecepatan sudah stabil, torka elektromagnetik bernilai sama dengan torka mekanik turbin.

Total daya elektrik yang dihasilkan oleh generator bernilai sama dengan daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin. Dengan demikian, daya elektrik yang dihasilkan oleh rotor (P_r)

dapat dihitung berdasarkan persamaan (7) berikut.

$$P_r = P_m - P_s \quad (7)$$

Apabila dihubungkan dengan torka dan kecepatan, daya yang dihasilkan rotor juga dapat dihitung berdasarkan persamaan (8) berikut.

$$P_r = -T_m \left(\frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \right) \omega_s \quad (8)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (8) ke persamaan (7), maka dapat dinyatakan bahwa,

$$P_r = -sP_s \quad (9)$$

dimana

$$s = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} \quad (10)$$

Jika mesin induksi bekerja sebagai generator maka T_m bernilai positif dan kecepatan sudut stator bernilai konstan ketika frekuensi tegangan grid konstan. Berdasarkan persamaan (6), daya yang dihasilkan rotor adalah sebagian dari daya yang dihasilkan stator.

Daya yang dihasilkan rotor bergantung dari nilai slip. Jika slip bernilai negatif maka P_r bernilai positif dan ω_r lebih besar dibandingkan dengan ω_s . Jika slip bernilai positif maka P_r bernilai negatif dan ω_r lebih kecil dibandingkan dengan ω_s .

Polaritas slip juga mempengaruhi tegangan pada kapasitor DC. Ketika slip negatif, rotor akan menyalurkan daya ke DC bus sehingga tegangan kapasitor menjadi naik. Pada kondisi sebaliknya, yaitu ketika slip positif, rotor akan mengambil daya dari kapasitor sehingga tegangan kapasitor menjadi turun. Oleh karena itu, konverter dibutuhkan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan DC bus sehingga tegangan selalu bernilai konstan.

3. METODOLOGI

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan sistem pembangkit listrik tenaga angin menggunakan DFIG dan *back-to-back converter* pada perangkat lunak Matlab. Pemodelan dilakukan secara bertahap, mulai dari turbin angin, generator induksi serta *back-to-back*

converter dengan rangkaian kontrolnya. Validasi sistem dilakukan dengan melakukan simulasi selama 50 hingga 150 detik dengan tujuan sistem telah mencapai kondisi stabil.

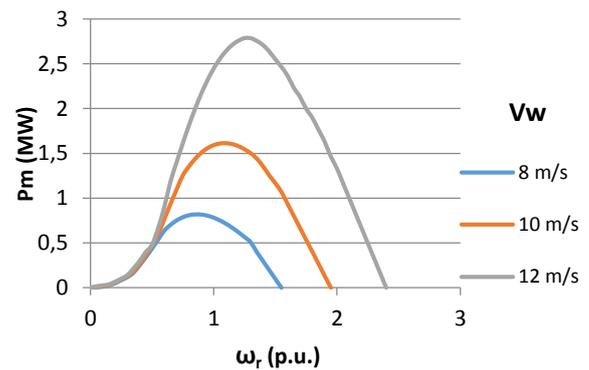
3.1. Pemodelan Turbin Angin

Pada sistem yang dirancang pada penelitian ini, digunakan sebuah turbin angin dengan daya rating sebesar 3 MW. Daya rating tersebut dapat dihasilkan pada kecepatan angin rating sebesar 13 m/s. Parameter-parameter turbin angin tersebut dituliskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Turbin Angin

Parameter	Nilai
P_m	3 MW
V_w	13 m/s
Inersia	320
C_1	0.645
C_2	116
C_3	0.4
C_4	5
C_5	21
C_6	0.00912

Kurva karakteristik antara kecepatan turbin yang digunakan dengan daya yang dihasilkan oleh turbin untuk kecepatan angin 8, 10 dan 12 m/s ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva Karakteristik Turbin Angin yang Digunakan

Dari kurva karakteristik tersebut dapat diperoleh daya maksimum pada tiap kecepatan angin serta kecepatan optimum turbin yang menghasilkan daya maksimum. Data kecepatan optimum dan daya maksimum turbin untuk berbagai kondisi kecepatan angin dituliskan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Kecepatan Optimum dan Daya Maksimum Turbin

Kec. Angin (Vw)	Kec. Optimum (ω_r)	Daya Maksimum (Pmaks)
7 m/s	0.75 p.u	0.545 MW
8 m/s	0.865 p.u	0.819 MW
9 m/s	0.975 p.u	1.173 MW
10 m/s	1.1 p.u	1.614 MW
11 m/s	1.2 p.u	2.153 MW
12 m/s	1.253 p.u	2.787 MW
13 m/s	1.3 p.u	3 MW

3.2. Pemodelan Generator Induksi

Generator induksi yang digunakan pada DFIG adalah generator induksi tipe rotor belit. Belitan stator terhubung langsung pada *grid* sedangkan belitan rotor terhubung pada *back-to-back converter* yang kemudian terhubung pada grid. Daya rating dari generator adalah 3 MW dengan frekuensi 50 Hz, faktor daya 0.9, tegangan nominal stator 380 V dan tegangan nominal rotor 1305 V. Parameter dari generator induksi tersebut dituliskan pada

Tabel 3. Parameter-parameter Generator Induksi

Parameter	Nilai
Nominal Power (P_m)	3MW
Power Factor (PF)	0.9
Stator Voltage Line-Line (V_{s_nom})	380 V
Rotor Voltage Line-Line (V_r_nom)	1305 V
Nominal Frequency (fn)	50 Hz
Stator (R_s, L_{ls})	0.023 p.u, 0.18 p.u
Rotor (R_r', L_{lr}')	0.016 p.u, 0.16 p.u
Magnetizing Inductance (L_m)	2.9 p.u
Moment Inertia (J)	10 kg.m ²
Friction factor (F)	0.01 p.u
<i>pole</i>	6

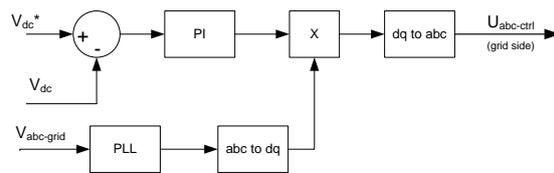
3.3. Pemodelan Back-to-back Converter

Back-to-back converter pada sistem DFIG dibagi menjadi dua bagian yaitu konverter sisi jaringan (*grid-side converter*) dan konverter sisi rotor (*rotor-side converter*). Setiap konverter tersebut merupakan konverter tiga fasa yang terdiri atas enam buah saklar semi konduktor berupa MOSFET. Kedua konverter tersebut dipisahkan oleh sebuah kapasitor DC yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi sekaligus sebagai sumber tegangan.

Konverter sisi jaringan adalah konverter yang tersambung pada grid. Fungsi dari konverter ini adalah menjaga nilai tegangan DC

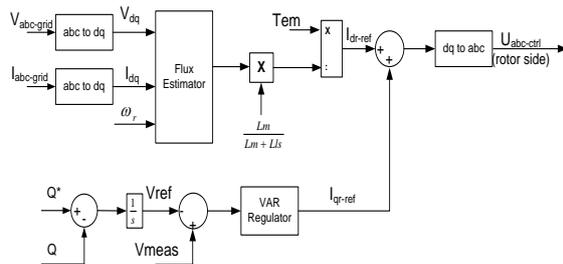
agar konstan dan dapat menyuplai daya ke grid. Konverter sisi rotor adalah konverter yang tersambung pada kumparan rotor generator induksi. Fungsi konverter ini adalah mengatur putaran rotor agar turbin angin dapat menghasilkan daya maksimum. Kedua konverter ini memiliki rangkaian kontrol yang terpisah agar dapat menjalankan fungsinya dengan baik.

Rangkaian kontrol konverter sisi jaringan berfungsi untuk mengontrol kerja dari konverter sisi jaringan agar dapat menjaga tegangan pada kapasitor DC. Pemodelan rangkaian kontrol konverter sisi jaringan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian Kontrol Konverter Sisi Jaringan

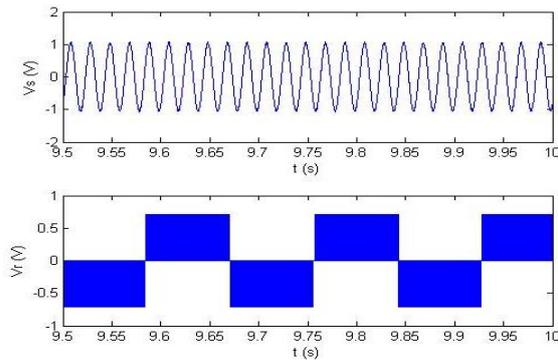
Rangkaian kontrol konverter sisi rotor berfungsi untuk mengontrol kerja dari konverter sisi rotor agar dapat menghasilkan daya maksimum. Pemodelan rangkaian kontrol konverter sisi rotor ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian Kontrol Konverter Sisi Rotor

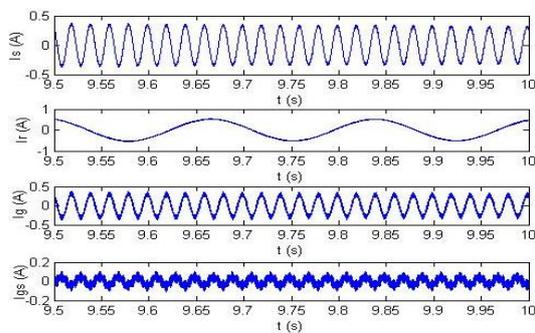
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi pertama dilakukan untuk melihat nilai tegangan stator dan rotor, serta arus pada grid, rotor, stator dan konverter pada saat kecepatan angin nominal sebesar 13 m/s. Waktu simulasi yang digunakan adalah 50 detik pada Matlab. Waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan 50 detik simulasi adalah 25 menit dan 2 detik. Hasil dari simulasi ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Tegangan Fasa-netral pada Stator (V_s) dan Rotor (V_r)

Gambar 6 menunjukkan potongan hasil simulasi antara detik 9,5 hingga detik ke-10. Pada waktu tersebut gelombang tegangan sudah menunjukkan nilai yang stabil. Bentuk tegangan pada rotor masih berupa sinyal kotak, namun tegangan yang masuk ke grid sudah bernilai sinusoidal murni.

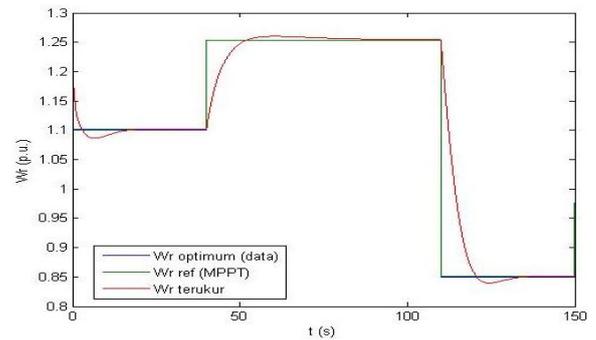


Gambar 7. Arus pada stator, rotor, grid dan konverter sisi grid

Gambar 7 menunjukkan berbagai arus pada waktu yang sama dengan tegangan. Arus pada konverter memiliki harmonisa cukup tinggi karena pengaruh pensaklaran. Seluruh arus yang timbul pada stator, pada konverter maupun pada grid memiliki frekuensi 50 Hz.

Simulasi kedua dilakukan dengan membuat variasi pada kecepatan angin. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk memvalidasi akurasi dan kecepatan respon dari MPPT yang digunakan, serta melihat kemampuan sistem untuk menyesuaikan dengan kecepatan angin. Total waktu simulasi yang digunakan adalah 150 detik. Kecepatan angin pada kondisi awal adalah 10 m/s, kemudian meningkat menjadi 12 m/s setelah 40 detik, kemudian berubah lagi menjadi

8 m/s setelah 70 detik berikutnya. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9 dan Gambar 10.



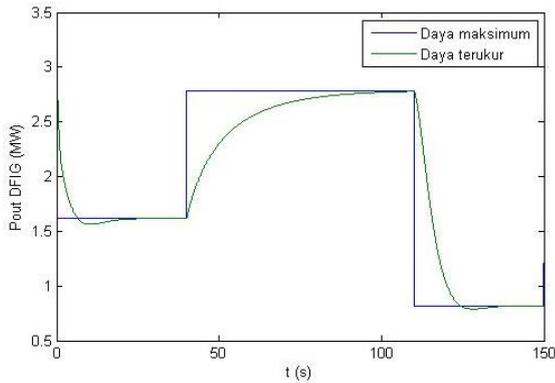
Gambar 8. Perbandingan Kecepatan Rotor Hasil Simulasi

Gambar 8 menunjukkan perbandingan antara kecepatan rotor optimum berdasarkan data, kecepatan rotor referensi yang dihasilkan blok MPPT dan kecepatan rotor yang terukur dari simulasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kecepatan rotor referensi yang dihasilkan oleh MPPT mempunyai nilai yang sangat mendekati nilai kecepatan rotor optimum berdasarkan data dengan respon yang sangat cepat. Perbandingan nilai dan galat tunak antara kecepatan rotor referensi MPPT dan kecepatan rotor optimum berdasarkan data ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Kecepatan Rotor Hasil Simulasi

Kecepatan Angin (V_w)	ω_r Data	ω_r Referensi	Galat Tunak
8 m/s	0.853 p.u	0.85 p.u	0.24 %
10 m/s	1.1 p.u	1.096 p.u	0.36 %
12 m/s	1.253 p.u	1.25 p.u	0.17 %

Hasil kecepatan rotor yang mampu menyamai nilai optimumnya membuat daya output yang dihasilkan oleh DFIG dapat mencapai nilai maksimal berdasarkan kondisi kecepatan angin. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 9. Pada gambar tersebut terlihat bahwa daya output terukur DFIG berdasarkan simulasi mampu menyamai nilai daya output maksimum berdasarkan data pada kecepatan angin yang berubah-ubah. Perbandingan nilai antara daya maksimum berdasarkan data dan daya yang terukur dari hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 5.

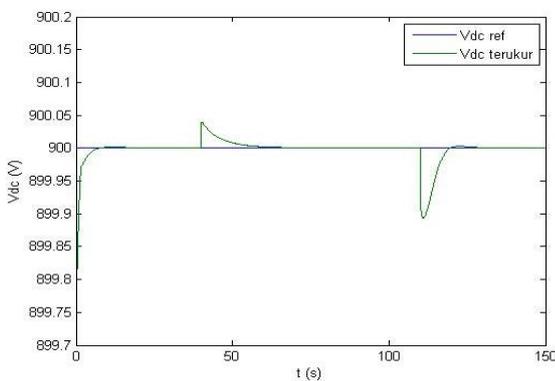


Gambar 9. Perbandingan Daya Output DFIG Hasil Simulasi

Tabel 5. Perbandingan Daya Output Hasil Simulasi

Kecepatan. Angin (V _w)	P _m Maksimum	P _m Terukur	Galat Tunak
8 m/s	0.819 MW	0.8182 MW	0.1 %
10 m/s	1.614 MW	1.6133 MW	0.04 %
12 m/s	2.787 Mw	2.780 MW	0.21 %

Selain pengaruh dari kecepatan rotor yang mampu menyamai nilai optimumnya, DFIG dapat menghasilkan daya maksimum karena tegangan pada kapasitor DC dapat dijaga konstan oleh rangkaian kontrol converter sisi jaringan walaupun terjadi perubahan kecepatan angin. Hasil simulasi tegangan kapasitor DC ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Tegangan pada Kapasitor DC Hasil Simulasi

Hasil dari Gambar 10 menunjukkan bahwa nilai tegangan kapasitor DC selalu dapat kembali mendekati nilai yang ditentukan yaitu 900 V walaupun sempat mengalami perubahan nilai saat terjadi perubahan kecepatan angin. Nilai

tegangan kapasitor DC yang dapat dipertahankan konstan membuat DFIG dapat mensuplai daya maksimum sesuai kecepatan angin. Perbandingan nilai dan galat tunak antara tegangan kapasitor DC yang terukur dengan tegangan referensinya ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Tegangan DC Hasil Simulasi

Kec. Angin (V _w)	V _{dc} Referensi	V _{dc} Terukur	Galat Tunak
8 m/s	900 V	900 V	0 %
13 m/s	900 V	899 V	0.11 %
11 m/s	900 V	900 V	0 %

5. KESIMPULAN

Hasil simulasi dari sistem yang diusulkan menunjukkan bahwa pembangkit listrik tenaga angin dengan DFIG mampu dikontrol dengan baik untuk menghasilkan energi listrik yang berkesinambungan. Sistem kontrol yang digunakan mempunyai akurasi yang tinggi dan respon yang cepat. Hal ini berdasarkan galat tunak antara kecepatan rotor optimum dengan kecepatan rotor referensi dari MPPT yang sangat kecil yaitu kurang dari 0.36%. Galat tunak antara daya maksimum berdasarkan data dengan daya yang dihasilkan oleh DFIG juga memiliki nilai yang sangat kecil yaitu kurang dari 0.53%. Salah satu faktor penyebab tingkat akurasi kecepatan rotor dan daya output adalah tegangan pada kapasitor DC yang dapat dijaga tetap konstan sesuai nilai yang dibutuhkan, yaitu sebesar 900 V.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2013, September) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. [Online]. <http://www2.esdm.go.id/berita/listrik/39-listrik/6592-per-september-2013-rasio-elektifikasi-801-persen.html>

[2] Heri Suryatomo, Adi Kurniawan, Feby A Pamuji, Nursalim, and IGP S Wijaya, "A Robust Frequency Control Approach in PV-Diesel Hybrid Power System," IPTEK, Journal of Proceeding Series, vol. 1, pp. 188-194, 2014.

- [3] Adi Kurniawan, "Maximum Power Point Tracking for Stand Alone Photovoltaic System with KY Converter," *International Journal of Electrical Electronics Research & Innovation*, vol. 1, no. 2, pp. 1-6, November 2012.
- [4] Ferdian Ronilaya, Hajime Miyauchi, and Adi Kurniawan, "PID-Type Fuzzy Controller for Grid-Supporting Inverter of Battery in Embedded Small Variable Speed Wind Turbine," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 151-160, April 2014.
- [5] Adi Kurniawan and Anisa Harumwidiah, "Strategi Kendali Kecepatan Motor Induksi Menggunakan PWM Inverter Berbasis Jaringan Saraf Tiruan," *Transmisi*, vol. 17, no. 2, pp. 83-88, 2015.
- [6] Dedet C. Riawan, Sumedha Rajakaruna, and CV Nayar, "Optimum power control strategy for SEIG-based variable speed WECS," in *International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Kandy, 2010, pp. 1-6.
- [7] Anisa Harumwidiah, Mochamad Ashari, and Dedet C. Riawan, "Modelling Back-to-Back Converter with Average Model in Wind Power System Using DFIG," *IPTEK Journal of Proceedings Series*, vol. 1, pp. 435-440, 2014.
- [8] Ramadoni Syahputra, Imam Robandi, and Mochamad Ashari, "Control of Doubly-Fed Induction Generator in Distributed Generation Units Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach," in *The 3rd International Seminar APTECS (Applied Technology, Science & Arts)*, Surabaya, 2011.
- [9] Feby A Pamuji and Soediby, "Desain Kontrol Multi – Input DC–DC Converter Sistem Hibrid Turbin Angin dan Sel Surya Menggunakan Kontrol Fuzzy Logic untuk Tegangan Rendah," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 4, no. 2, pp. 220-226, September 2015.

adalah teknik sistem tenaga, terutama mengenai konversi energi, termasuk energi terbarukan. Saat ini penulis aktif sebagai staf pengajar di Program Studi Teknik Listrik Industri, Politeknik 17 Agustus 1945 Surabaya.

Adi Kurniawan, mendapatkan gelar sarjana dari Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2011 dan gelar master dari jurusan yang sama pada tahun 2013 dengan bidang konsentrasi teknik sistem tenaga, khususnya mengenai konversi energi. Saat ini penulis aktif sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, sebagai anggota pada Laboratorium Listrik Kapal dan Otomatisasi.

Biodata Penulis

Anisa Harumwidiah, mendapatkan gelar sarjana dari Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2012 dan gelar master dari jurusan yang sama pada tahun 2014. Bidang yang dipelajari