

Desain dan Simulasi Double Field Induction Generator (DFIG) dengan Software MATLAB

R. Akbar Nur Apriyanto
Program Studi Teknik Elektro
Politeknik Elektronika Negeri
Surabaya
Surabaya, Indonesia
akbarnurapriyanto@gmail.com

Era Purwanto
Program Studi Teknik Elektro
Politeknik Elektronika Negeri
Surabaya
Surabaya, Indonesia
Era@pens.ac.id

Hary Oktavianto
Program Studi Teknik Elektro
Politeknik Elektronika Negeri
Surabaya
Surabaya, Indonesia
hary@pens.ac.id

Gigih Prabowo
Program Studi Teknik Elektro
Politeknik Elektronika Negeri
Surabaya
Surabaya, Indonesia
gigih@pens.ac.id

Hanif Hasyier Fakhruddin
Program Studi Teknik Elektro
Politeknik Elektronika Negeri
Surabaya
Surabaya, Indonesia
hanifhasyier@gmail.com

Gamar Basuki
Program Studi Teknik Elektro
Politeknik Elektronika Negeri
Surabaya
Surabaya, Indonesia
gamarbasuki@gmail.com

Abstrak— Perkembangan teknologi sangat berimplikasi pada kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat. Kebutuhan energi listrik menjadi diskursus pembahasan seiring dengan ketersediaan energi listrik yang diprediksi tidak akan mampu memenuhi pasokan kebutuhan. Oleh karenanya diperlukan adanya pemanfaatan energi baru dan terbarukan dalam rangka memenuhi kebutuhan energi listrik tersebut. Energi angin yang merupakan salah satu energi baru terbarukan yang dapat diproyeksikan menjadi energi alternatif, memiliki peluang besar dalam membantu memenuhi kebutuhan energi listrik. Terlebih energi ini sangat mudah didapatkan dalam zonasi yang dekat dengan laut. Salah satu poin krusial dalam pemanfaatan energi angin untuk direalisasikan pada pembangkit listrik tenaga angin adalah DFIG (Double-Field Induction Generator). DFIG diperlukan desain yang baik untuk mendapatkan energi angin maksimum sebelum didistribusikan ke konsumen. Pada penelitian ini membahas desain dan simulasi DFIG (Double Field Induction Generator) Wind Energy. Penelitian ini dilakukan secara simulasi pada Simulink Matlab dengan memodelkan secara matematik DFIG dari equivalent circuit.

Kata kunci— Energi angin; DFIG; Simulink Matlab.

I. PENDAHULUAN

Indonesia diprediksi akan mengalami peningkatan kebutuhan energi nasional yang signifikan dalam berbagai sektor pada tahun 2050. Dari total pangsa kebutuhan energi nasional, energi listrik pada urutan kedua terbesar yakni 21,3% [1]. Pada era revolusi industri 4.0, energi listrik masih menjadi poin yang krusial mengingat perkembangan kemajuan teknologi yang semakin masif. Oleh karena itu, tidak berlebihan jika peningkatan energi listrik rata – rata per tahun digadang – gadang mencapai 6,0% sampai tahun 2050 [1].

Peningkatan kebutuhan energi listrik ini tentunya harus diimbangi dengan ketersediaan energi listrik yang ada. Batu bara yang menjadi sumber kebutuhan primer dalam

pembangkit listrik tenaga uap misalnya, berpotensi tidak akan mampu mengakomodir kebutuhan energi hingga tahun 2050 mengingat jenis sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui. Data Outlook Energi Indonesia BPPT 2018 memprediksi batu bara akan habis dengan kurun waktu 68 tahun lagi dan besaran produksi batu bara mencapai 417 juta ton mengalami penurunan 11,8% pada tahun 2015 [1]. Sehingga diperlukan adanya inovasi dengan memanfaatkan alam untuk menjadi energi terbarukan dalam memenuhi kebutuhan energi listrik nasional tersebut, seperti halnya energi angin.

Energi angin (wind energy) merupakan salah satu dari energi terbarukan yang memiliki potensi untuk dikembangkan di Indonesia, karena negara ini memiliki kecepatan angin yang cukup tinggi dengan ketersediaan energi angin yang mencapai 970 MW [1]. Untuk merealisasikan potensi ini, maka diperlukan berbagai rumusan – rumusan teknis dalam pembangunan pembangkit listrik tenaga angin secara efektif dan efisien. Meskipun tenaga angin sebagai prime mover yang memiliki sifat intermitten dan uncertainty [2].

Salah satu aspek penting dalam pembangkit listrik tenaga angin adalah DFIG (Double Field Induction Generator). DFIG adalah sistem yang digunakan untuk mengatur arus rotor untuk mencapai variable yang diperlukan guna mendapatkan energi maksimum dalam konversi tenaga angin (wind energy). Keuntungan adanya DFIG ialah dapat mengatur kecepatan generator, pengaturan decouple daya aktif dan daya reaktif, noise dapat dinimalisir, dan kualitas daya bisa meningkatkan [2]. Secara konstruksi DFIG wind energy conversion systems (WECS) terdiri dari sistem *wind turbine* yang terkoneksi dengan gearbox maksud meningkatkan daya mekanik dari aliran udara dan konversi ke elektrik [3]. Dalam berbagai penelitian terkait dengan DFIG, menyajikan pengaturan kecepatan rotor [2, 4], dimana dalam penelitian [4]

menggunakan back – to – back PWM converter. Sedangkan dalam penelitian [5] menjelaskan efek DFIG dengan analisa stabilitas transient pada *fault condition*.

Pada penelitian ini, akan membahas terkait dengan desain dan simulasi DFIG dalam pembangkit listrik tenaga angin menggunakan Simulink Matlab. Simulasi DFIG berangkat dari pemodelan matematik dengan rangkaian pengganti per phase. Model matematik akan menghasilkan parameter – parameter seperti nilai $a_{11}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, b_{21}, b_{22}$. Dari model matematik tersebut akan disimulasikan Simulink matlab untuk mendapatkan respon sinyal tegangan dc (Vdc), speed rotor, daya aktif (dalam pu(per unit)) , daya reaktif (dalam pu(per unit)), arus rotor, dan tegangan rotor.

II. METODOLOGI

A. Double Fed Induction Generator (DFIG)

Pemodelan Double Fed Induction Generator (DFIG) metode yang mirip dengan model matematika motor induksi dengan tipe sangkar tupai, hanya saja yang membedakan antara DFIG dengan motor induksi adalah pada metode DFIG nilai tegangan rotor tidak akan bernilai nol. Persamaan 1 sampai 4 merupakan perumusan dari DFIG.

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_s \bar{\Psi}_s \tag{1}$$

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \bar{\Psi}_r \tag{2}$$

$$\bar{\Psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r \tag{3}$$

$$\bar{\Psi}_r = L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s \tag{4}$$

Dimana,

- v_r : tegangan rotor
- v_s : tegangan stator
- ψ_r : fluks rotor
- ψ_s : fluks stator

Sedangkan untuk $R_r, R_s, L_r,$ dan L_s adalah nilai resistansi dan induktansi pada rotor dan stator. L_m merupakan representasi dari induktansi bersama. ω_r dan ω_s merupakan kecepatan sudut dari rotor dan sinkron.

Referensi rotasi dq pemodelan motor adalah sebagai berikut.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \tag{5}$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_s \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \tag{6}$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \tag{7}$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \tag{8}$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \tag{9}$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \tag{10}$$

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \tag{11}$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \tag{12}$$

Sehingga untuk dihasilkan torsi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds}) = \frac{3}{2} p L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \tag{13}$$

Dan model bagian mekanik adalah sebagai berikut:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{p}{J} (T_e - T_L) \tag{14}$$

Nilai dasar pada motor yang digunakan untuk model per unit, dapat menggunakan persamaan yang tertera pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Nilai – Nilai Dasar Pada Motor

Nilai-Nilai Dasar	
Tegangan	$V_b = V_n$
Daya	$S_b = S_n$
Arus	$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} V_b}$
Impedansi	$Z_b = \frac{V_b^2}{S_n}$
Kecepatan	$\omega_b = 2\pi f_n$
Torsi	$T_b = \frac{S_b}{\omega_b/p}$
Fluks	$\psi_b = \frac{V_b}{\omega_b}$
Torsi	$T_b = \frac{S_b}{\omega_b^2/p}$

Model per unit dari $\alpha\beta$ (xy) DFIG terhubung dengan sistem, lalu didefinisikan dengan persamaan-persamaan diferensial sebagai berikut:

$$\frac{d\phi_{sx}}{dt} = a_{11} \phi_{sx} + a_{12} u_{sx} i_{rx} \tag{15}$$

$$\frac{d\phi_{sy}}{dt} = a_{11} \phi_{sy} + a_{12} u_{sy} i_{ry} \tag{16}$$

$$\frac{di_{rx}^R}{dt} = a_{21} i_{rx} R + a_{22} \phi_{sx} R - a_{23} \omega_r \phi_{sy} R + b_{21} u_{rx} - b_{22} u_{sx} R \tag{17}$$

$$\frac{di_{ry}^R}{dt} = a_{21} i_{ry} R + a_{22} \phi_{sy} R - a_{23} \omega_r \phi_{sx} R + b_{21} u_{ry} - b_{22} u_{sy} R \tag{18}$$

$$\frac{d\gamma_{fir}}{dt} = \omega_r \tag{19}$$

$$\frac{d\gamma_{ksi}}{dt} = \omega_s - \omega_r \tag{20}$$

Sistem konstan a, b didefinisikan sebagai berikut:

$$a_{11} = -\frac{R_s}{L_s}, a_{21} = \frac{R_s L_m}{L_s} \tag{21}$$

$$a_{21} = -\frac{(L_s^2 R_s + L_m^2 R_s)}{L_s(L_s L_r - L_m^2)}, a_{22} = -\frac{L_m R_s}{L_s(L_s L_r - L_m^2)}, a_{23} = -\frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \tag{22}$$

$$b_{21} = -\frac{L_s}{L_s L_r - L_m^2}, b_{22} = -\frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \tag{23}$$

Dimana,

- u_s, i_s : vector-vektor tegangan dan arus stator
- R_s, L_s : resistansi stator dan induktansi stator
- ω_r, ω_s : kecepatan sudut rotor dan stator.

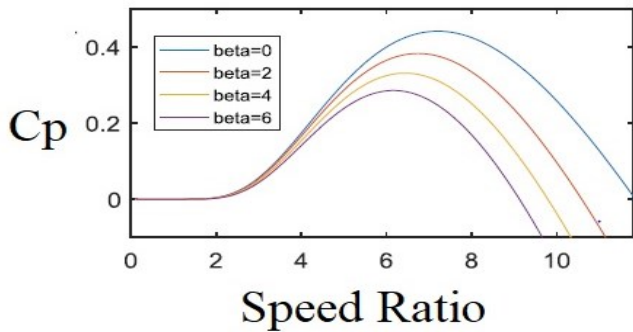
Sudut γ_{fir} adalah posisi sudut rotor, dan γ_{ksi} merupakan sudut diantara fluks stator dan kecepatan rotor [6].

B. Wind Turbine

Wind Turbine menghasilkan energi listrik dengan cara mengubah energi mekanik yang diperoleh dari energi kinetik yang ada pada angin [8]. Rumus dari energi mekanik didapat sebagai berikut [9]:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\alpha, \beta) \tag{24}$$

Dimana ρ , R^2 , v^3 , C_p adalah kepadatan udara, jari-jari rotor, kecepatan angin, koefisien daya.



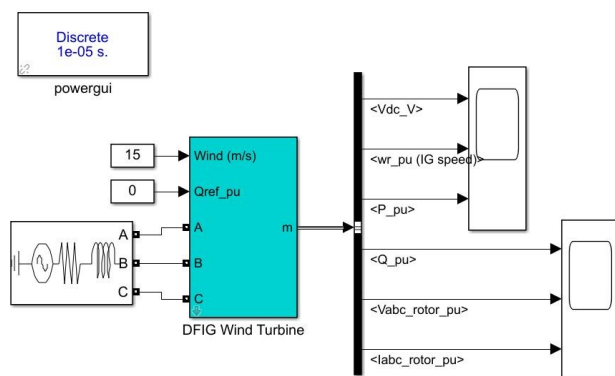
Gambar 1 Koefisien daya sebagai fungsi dari rasio kecepatan [10].

III. HASIL DAN ANALISA

Pengujian karakteristik DFIG menggunakan simulasi MATLAB 2019, dengan parameter pengujian pada Tabel 2. Rangkaian simulasi pada MATLAB 2019 disajikan pada Gambar 2, dengan parameter DFIG yang tertera pada Tabel 3.

Tabel 2. Parameter Pengujian Turbin Angin

Parameter	Nilai	Satuan
Kecepatan angin	15	m/s
Tegangan RMS Jaringan	25000	Volt
Frekuensi Jaringan	50	Hz
Resistansi Jaringan	0.8929	Ω
Induktansi Jaringan	16.58	mH



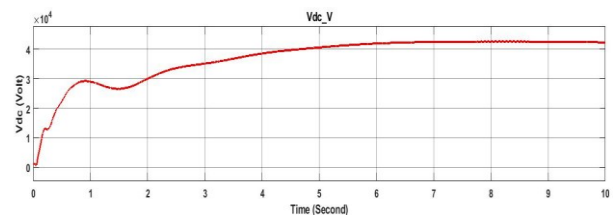
Gambar 2 Rangkaian Simulasi

Tabel 3 Parameter DFIG pada Simulasi

Parameter	Nilai	Satuan
Jumlah Turbin	3	Unit
Tegangan L-L	575	Volt
Daya Nominal	150.000/0.9	VA
Frekuensi	60	Hz
Resistansi Stator	0.023	Ω
Induktansi Stator	0.18	mH
Resistansi Rotor	0.016	Ω
Induktansi Rotor	0.16	mH
Induktansi Bersama	2.9	mH
Konstanta Inersia	0.685	kg m2
Konstanta Gaya Gesek	0.01	pu
Jumlah Pasang Pole	3	Unit

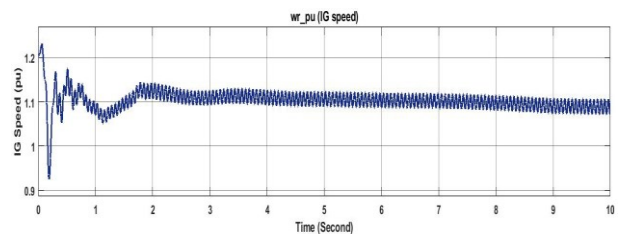
A. Pengujian Karakter Dinamis DFIG

Pengujian pertama adalah untuk mengamati Karakter Vdc pada DFIG ketika DFIG dalam kondisi transisi. Grafik Vdc keluaran DFIG terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 3. Pada Gambar 3 dapat dikatakan bahwa tegangan DC ketika kondisi transisi memiliki nilai yang tidak stabil hingga mendekati kondisi tunak. Nilai tegangan mendekati nilai nominal pada saat detik ke-4 yaitu ketika rotor mulai mendekati nilai acuan. Vdc disini adalah tegangan DFIG setelah disearahkan oleh rectifier dan DC link.



Gambar 3 Nilai Vdc DC link DFIG terhadap waktu

Grafik kecepatan putar rotor pada DFIG pada kondisi transisi ditunjukkan pada Gambar 4. Overshoot kecepatan DFIG pengujian adalah 9,17% dengan kecepatan steady rotor mendekati 1,1 pu. Kecepatan motor dijaga agar tetap berubah-ubah untuk menjaga agar tercipta medan magnet.

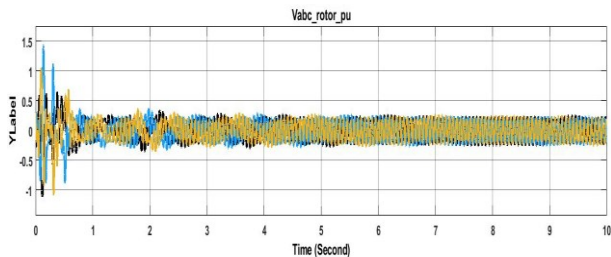


Gambar 4 Kecepatan angular rotor DFIG terhadap waktu

B. Pengujian Karakter Tegangan dan Arus Keluaran

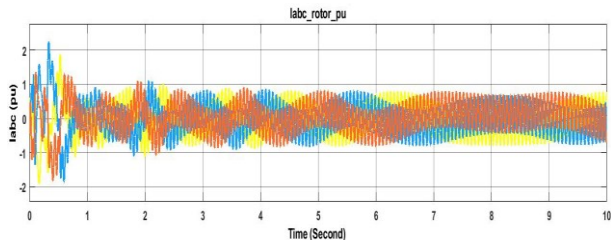
Pengujian kedua adalah untuk mengamati tegangan dan arus keluaran DFIG ketika dalam kondisi transisi. DFIG merupakan Generator 3 fase, sehingga tegangan dan arusnya antar fasenya memiliki perbedaan sudut sebesar 120 derajat. Tegangan keluaran DFIG pada kondisi transisi tidak stabil

dengan frekuensi yang tinggi akibat dari kecepatan rotor yang belum stabil. Hal ini mengakibatkan frekuensi pada masa tansisi sangat tinggi dan gelombang bersifat acak. Ketika detik 4 tegangan yang dihasilkan mulai mendekati sinus murni dengan beda fase 120° . Grafik tegangan keluaran DFIG ditunjukkan pada **Gambar 5**, tegangan yang diukur merupakan tegangan antar fasenya. Tegangan antar puncak keluaran DFIG sebesar 0,5 pu, sedangkan pada kondisi transisi bisa mencapai 1,5 pu.



Gambar 5 Tegangan antar fase keluaran DFIG terhadap waktu

Gambar 6 merupakan arus antar fase pada DFIG. Grafik arus pada DFIG ketika kondisi transisi memiliki nilai acak dengan frekuensi yang mendekati 50 Hz, akan tetapi masih belum sinus murni dikarenakan terlalu banyak noise ketika kondisi ini. Ketika kondisi tunak pada detik ke-4, arus antar fase sudah membentuk beda fase senilai 120° . Arus antar puncak keluaran DFIG adalah 0,5 pu, sedangkan saat transisi arus bisa mencapai 2,2 pu.



Gambar 6 Arus fase keluaran DFIG terhadap waktu

IV. KESIMPULAN

DFIG merupakan Generator yang banyak digunakan pada turbin angin. MATLAB Simulink mendukung simulasi DFIG untuk lebih mengetahui karakteristik DFIG pada kondisi transisi dan tunak. Dengan permodelan simulasi yang sesuai

dengan parameter sebenarnya, akan memudahkan untuk membangun pengendali DFIG berdasarkan karakternya. Hasil dari pengujian simulasi menunjukkan bahwa DFIG merupakan generator 3 fase. DFIG pada percobaan memiliki overshoot kecepatan sebesar 9,17%, waktu untuk kondisi tunak (rise time) sebesar 4 detik, kecepatan tunak 1,1 pu. Sedangkan untuk spesifikasi elektriknya DFIG memiliki tegangan dan arus keluaran puncak masing-masing 1,5 pu dan 2,2 pu, sedangkan ketika tunak masing-masing bernilai antar puncak 0,5 pu dan 0,5 pu. Frekuensi keluaran DFIG sebesar 50 Hz dan tegangan DC setelah penyearah sebesar 42.000 Volt.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Politeknik Elektronika Negeri Surabaya selaku institusi kami.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. P. D. P. T. INDONESIA, OUTLOOK ENERGI INDONESIA 2018, Jakarta: BPPT, 2018.
- [2] H. L. a. Z. D. J. Mwaniki, "A Concise Presentation of Doubly Fed Induction Generator Wind Energy Conversion Systems Challenges and Solutions," *Hindawi Journal of Engineering*, p. 13, 2017.
- [3] D. Kairous, R. Wamkeue and B. Belmadani, "Advanced Control of Variable Speed Wind Energy Conversion System with DFIG".
- [4] J. Mwaniki, H. Lin and Z. Dai, "A Condensed Introduction to the Doubly Fed Induction Generator Wind Energy Conversion Systems," *Hindawi Journal of Engineering*, p. 18, 2017.
- [5] H. Sun, Y. Ren, H. Li, Z. An, J. Liu, H. Hu and H. Liu, "DFIG Wind Power Generation Based on Back-to-back PWM Converter," in *International Conference on Mechatronics and Automation*, Changchun, China, 2009.
- [6] S. Soued, H. S. Ramadan and M. Becherif, "Effect of Doubly Fed Induction Generator on Transient Stability Analysis under Fault Conditions," *Energy Procedia*, no. 162, pp. 315-324, 2019.
- [7] H. Abu-Rub, A. Iqbal and J. Guzinski, *High Performance Control of AC Drives*, United Kingdom: Wiley, 2012.
- [8] Vajpayee Submay, Panda Nihar Ranjan, Behera Prasanjit, "Crowbar Protection of Grid Connected Double Field Induction Generator with Variable Speed Wind Turbine," in *International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, India, 2017.
- [9] Y.-K. Wu and W.-H. Yang, "Different Control Strategies on the Rotor Side Converter in DFIG-based Wind Turbines", *Energy Procedia*, vol. 100, pp. 551–555, Nov. 2016.
- [10] K.Noussi*, A.Abouloifa, H.Katir, I.Lachkar, "Modeling and Control of a Wind Turbine Based On a Doubly Fed Induction Generator," *World Conference on Complex Systems (WCCS)*, Ouarzazate, Morocco, 2017.