

Simulasi Rancang Bangun *Gridside Converter* pada *Double Fed Induction Generator* Menggunakan *Fuzzy Logic*

Akbar Rusmanegara¹ dan Iradiratu Diah Prahmana Karyatanti²

^{1,2}Universitas Hang Tuah Surabaya

Jln. Arief Rachman Hakim No.150, Kota Surabaya, Jawa Timur, Kode Pos 60111

email : rusmanegara.akbar@hangtuah.ac.id

Abstrak - Pada zaman di mana energi terbarukan sudah mulai banyak digunakan, pembangkit listrik pun juga mulai beralih ke pembangkit dengan sumber energi yang terbarukan dan lebih ramah lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan yang biasa digunakan pada pembangkit listrik adalah angin. *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)* merupakan sistem pembangkit tenaga angin yang dapat mengubah tenaga kinetik menjadi tenaga listrik. Pada penerapan DFIG permasalahan yang ditemui adalah tegangan keluaran tidak stabil dikarenakan kecepatan angin yang selalu berubah-ubah. Hal ini sangat merugikan konsumen sehingga ketidakstabilan tegangan akan mengakibatkan ketidakseimbangan sistem, bahkan akan mengakibatkan *life time* peralatan listrik menjadi pendek. Dengan *control grid side* yang dilengkapi dengan *Fuzzy Logic* sebagai upaya pembangkit listrik dapat menghasilkan tegangan stabil sesuai yang diinginkan pada setiap kondisi kecepatan angin yang berubah-ubah. Sehingga kestabilan tegangan DC tetap terjaga. Hasil simulasi pengujian ini menunjukkan jika pengontrol *fuzzy logic* dapat menjaga kestabilan tegangan DC yang diinginkan yaitu 1100V.

Kata kunci : *Double Fed Induction Generator, Grid Side Converter, Fuzzy Logic*

Abstract - In an era where renewable energy has begun to be widely used, power plants have also begun to switch to generating energy sources that are renewable and more environmentally friendly. One of the renewable energy sources commonly used in electricity generation is wind. *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)* is a wind power generating system that can convert kinetic power into electric power. In the application of DFIG, the problem encountered is the unstable output voltage due to the constantly changing wind speed. This is very detrimental to consumers so that the voltage instability will result in an imbalance of the system, and will even shorten the life time of electrical equipment. With a *control grid side* that is equipped with *Fuzzy Logic*, as an effort to generate electricity, it can produce the desired stable voltage at any changing wind speed conditions. So that the stability of the DC voltage is maintained. The simulation results of this test show that the *fuzzy logic* controller can maintain the desired DC voltage stability, which is 1100V.

Keywords : *Double Fed Induction Generator, Grid Side Converter, Fuzzy Logic*

I. PENDAHULUAN

Pada zaman di mana energi terbarukan sudah mulai banyak digunakan, pembangkit listrik pun juga mulai beralih ke pembangkit dengan sumber energi yang terbarukan dan lebih ramah lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan yang biasa digunakan pada pembangkit listrik adalah angin. *Doubly Fed Induction Generator* merupakan sistem pembangkit tenaga angin yang dapat mengubah tenaga kinetik menjadi tenaga listrik. *Doubly-Fed Induction Generator* terdiri dari sebuah mesin induksi yang bekerja sebagai generator dan digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengkonversi energi mekanik dengan rating daya yang besar (Marcelo P. de Santana, 2014). Konstruksi DFIG disusun atas sebuah mesin induksi rotor belit yang dioperasikan sebagai

generator. *Doubly-Fed Induction* berisi dua belitan stator dengan pasangan kutub yang berbeda, salah satunya disebut *power winding (PW)*, yang lainnya disebut *control winding (CW)*. Pada penerapan DFIG permasalahan yang ditemui adalah tegangan keluaran tidak stabil dikarenakan kecepatan angin yang selalu berubah-ubah. Hal ini sangat merugikan konsumen sehingga ketidakstabilan tegangan akan mengakibatkan ketidakseimbangan sistem, bahkan akan mengakibatkan *life time* peralatan listrik menjadi pendek.

Pada sistem DFIG terdiri beberapa bagian, salah satunya adalah *back-to-back converter*, dimana konverter tersebut terdiri dari konverter sisi jaringan (*grid-side converter*) dan konverter sisi rotor (*rotor-side converter*). Kedua konverter tersebut dipisahkan oleh sebuah kapasitor

DC yang berfungsi sebagai media penyimpan energi sekaligus sebagai sumber tegangan dan daya [1]. *Grid-side converter* adalah konverter yang tersambung pada grid. Fungsi dari konverter ini adalah menjaga nilai tegangan agar tetap konstan.

Sebelum penerapan pembangkit listrik tenaga angin, diperlukan simulasi terlebih dahulu. Simulasi yang dilakukan harus dapat menggambarkan kondisi sistem yang sebenarnya. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan sistem pembangkit listrik tenaga angin menggunakan DFIG dengan konverter back-to-back. Gunakan perangkat lunak Matlab untuk pemodelan dan simulasi sistem. Sistem yang dirancang dilengkapi dengan *Fuzzy logic* pada bagian *grid side converter*, sehingga pembangkit listrik dapat menghasilkan tegangan yang maksimal dengan kecepatan angin berapapun. Pemodelan sistem ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk pengembangan prototipe pembangkit listrik tenaga angin di masa mendatang.

II. STUDI PUSTAKA

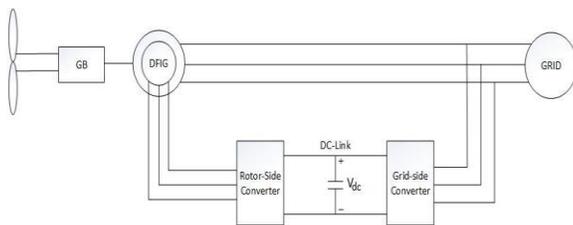
a. Double Fed Induction Generator

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat digunakan untuk menghasilkan listrik. Meskipun tingkat energi yang dihasilkan bervariasi dengan kecepatan angin, energi angin hampir selalu tersedia. Untuk mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi listrik, diperlukan turbin angin untuk mengubah energi angin menjadi energi mekanik, yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Total daya yang ditangkap oleh turbin angin merupakan fungsi dari kecepatan angin dan luas bilah turbin.

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

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)



Gambar 2.1 Topologi Pembangkit Tenaga Angin

DFIG terdiri dari motor induksi yang digunakan sebagai generator untuk menghasilkan energi listrik dengan mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin dengan daya pengenal yang lebih tinggi. Struktur DFIG terdiri dari mesin induksi rotor belitan yang beroperasi sebagai generator. Tujuan penggunaan motor

induksi rotor yang berkelok-kelok karena pada DFIG bagian rotor dari induksi terhubung ke konverter, sehingga pengaturan daya dapat dilakukan dari bagian rotor tersebut.

Tabel 1. Nilai Dasar Pada Motor

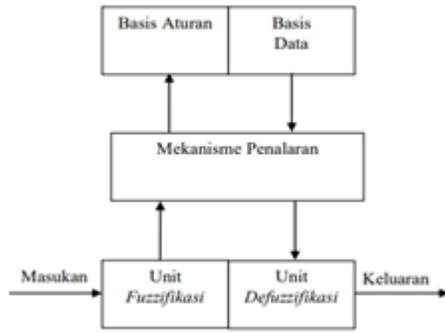
Nilai-Nilai Dasar	
Tegangan	$V_b = V_n$
Daya	$S_b = S_n$
Arus	$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}v_b}$
Impedansi	$Z_b = \frac{V_b^2}{S_n}$
Kecepatan	$\omega_b = 2\pi f_n$
Torsi	$T_b = \frac{S_b}{\omega_b/p}$
Fluks	$\psi_b = \frac{V_b}{\omega_b}$
Torsi	$T_b = \frac{S_b}{\omega_b^3/p}$

b. Fuzzy Logic

Kontrol logika *fuzzy* adalah evaluasi sekumpulan aturan bahasa sederhana yang digunakan untuk melakukan tindakan kontrol. Untuk mengembangkan aturan ppngontrol logika fuzzy, harus memiliki pemahaman yang baik tentang kontrol proses dan keluaran. Kontrol logika fuzzy tidak memerlukan permodelan matematika yang kompleks, hanya membutuhkan pemetaan masukan dan keluaran.

Konsep kendali logika fuzzy diperkenalkan pada tahun 1962 oleh Prof. Luo Fei Zadeh (Lotfi Zadeh). Kontrol logika fuzzy adalah metode sistem kontrol pemecahan masalah, cocok untuk sistem sederhana, sistem kecil, sistem tertanam, jaringan PC, sistem akuisisi dan kontrol data berbasis multi-channel atau workstation. (Malik dkk. 2013). Metode ini dapat diterapkan pada perangkat keras, perangkat lunak atau kombinasi keduanya. Dalam logika klasik, semuanya biner yang artinya hanya memiliki dua kemungkinan: "ya atau tidak", "benar atau salah", "baik atau buruk" dan lain-lain. Oleh karena itu, semua ini dapat memiliki nilai keanggotaan antara 0 dan 1. Namun, dalam logika fuzzy, memungkinkan nilai keanggotaan berada di antara 0 dan 1. Artinya, situasi tersebut mungkin memiliki dua nilai "Ya dan Tidak", "Benar dan Salah", dan "Baik dan Buruk" pada saat yang sama, tetapi nilainya bergantung pada bobot keanggotaan yang dimilikinya.

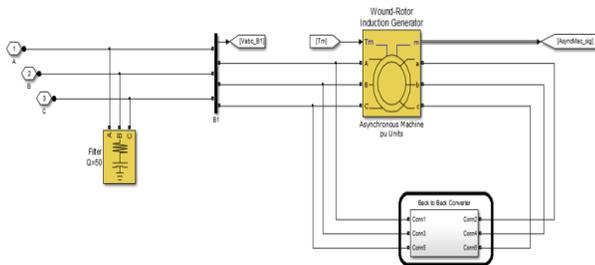
Teori dasar pengendalian logika fuzzy membahas tentang konsep-konsep dasar set kontrol logika fuzzy, diantaranya pembahasan set kontrol logika fuzzy, operasi logika pada kontroler logika fuzzy. Struktur dasar sistem berdasarkan kendali logika fuzzy ditunjukkan pada



Gambar 2.2 Struktur dasar sistem berbasis fuzzy logic control

III. METODE

Pada penelitian ini menggunakan blok diagram pemodelan Double Fed Induction Generator yang di tunjukkan pada gambar dibawah.

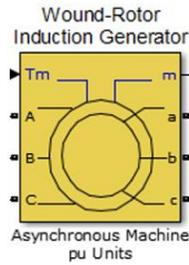


Gambar 3.1 Blok diagram sistem

Konstruksi sistem DFIG terdiri dari turbin angin, mesin induksi, dan *back to back converter*. DFIG (*Double Fed Induction Generator*) terdiri dari rotor 3 phase dan stator 3 phase. Rotor mengumpukan sinyal AC 3 phase untuk menginduksi arus AC pada belitan rotor, saat turbin angin berputar rotor akan ikut berputar sehingga menghasilkan medan magnet. Ketika kecepatan rotor sebanding dengan sinyal frekuensi AC menyebabkan induksi arus AC pada stator, fluks yang dihasilkan pada medan magnet akan mempercepat rotasi rotor, serta frekuensi AC yang dihasilkan akan sesuai. Dalam mengkonversi suatu energi kinetik menjadi energi listrik dapat menggunakan turbin angin yang dapat dikonversikan melalui generator. Selain itu, pada DFIG membutuhkan konverter untuk menstabilkan tegangan pada keluarannya. *Back to back converter* akan digunakan pada sistem DFIG ini. *Back to back converter* tersebut terpisah menjadi dua yaitu konverter pada sisi bagian jaringan (*grid-side converter*) dan konverter pada sisi bagian rotor (*rotor-side converter*). Penelitian ini akan fokus pada *grid side control* yang dimana *grid side control* adalah konverter yang dimana tersambung di sisi bagian jaringan. Fungsi konverter disini untuk menjaga nilai suatu tegangan DC tetap konstan dan bisa menyuplai tegangan pada sisi grid.

a. Generator

Generator AC yang digunakan merupakan generator induksi, dimana generator ini dapat bekerja dengan putaran yang sangat rendah maupun putaran yang tidak stabil. Sistem kerja generator induksi menggunakan prinsip elektromagnetik dengan hukum faraday. Tipe rotor yang dipakai adalah wound rotor, dengan parameter daya nominal, tegangan (line-line), dan frekuensi, induktansi timbal balik, konstanta inersia, faktor gesekan, pasangan kutub.

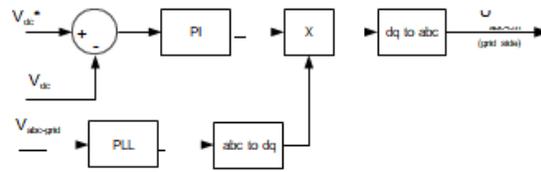


Gambar 3.2 Generator AC

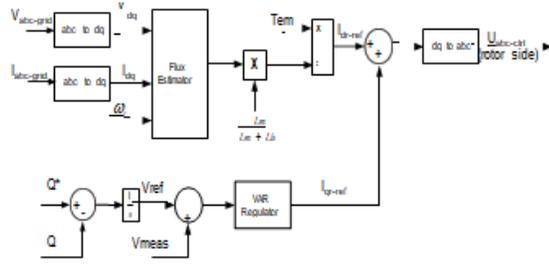
b. Back To Back Converter

Back-to-back converter pada sistem DFIG dibagi menjadi dua bagian, yaitu konverter sisi grid dan konverter sisi rotor. Setiap konverter adalah konverter tiga fasa yang terdiri dari enam sakelar semikonduktor dalam bentuk MOSFET. Kedua konverter tersebut dipisahkan oleh kapasitor DC yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi dan sumber tegangan.

Grid side converter adalah konverter terhubung ke jaringan. Fungsi konverter adalah untuk menjaga nilai tegangan DC yang konstan dan dapat menyuplai daya ke jaringan listrik. *Rotor side converter* adalah konverter yang terhubung ke koil rotor dari generator induksi. Fungsi konverter ini adalah untuk mengatur putaran rotor agar turbin angin dapat menghasilkan tenaga yang maksimal. Kedua konverter memiliki rangkaian kontrol terpisah untuk menjalankan fungsinya dengan benar; fungsi rangkaian kontrol konverter sisi jaringan adalah untuk mengontrol kerja konverter sisi jaringan untuk menjaga tegangan pada kapasitor DC



Gambar 3.3. Grid Side Converter



Gambar 3.4. Rotor Side Converter

Persamaan pada *back to back converter* :

$$\frac{dW_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} C \frac{d}{dt} V_{dc}^2 = P_{gc} - P_{rc} \quad (2)$$

Maka tegangan yang dihasilkan pada kapasitor DC Link dapat dinyatakan :

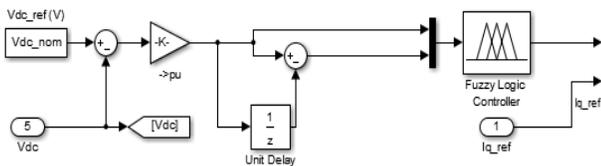
$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int I_{dc} dt \quad (3)$$

Dengan :

- C = kapasitas kapasitor.
- P_{gc} = daya pada konverter jaringan.
- P_{rc} = daya pada konverter rotor.

c. *Fuzzy Logic*

Pada *back to back konverter* di control agar keluaran tegangan stabil dan sesuai yang diinginkan, karena itu membutuhkan *fuzzy logic* sebagai kontrol tegangan pada konverter sisi jaringan.



Gambar 3.5 Grid Side Converter Menggunakan Fuzzy Logic

Pada penelitian ini menggunakan *fuzzy logic* dengan algoritma mamdani, yang dimana menggunakan range sesuai dengan error dan delta error untuk mendapatkan hasil output yang stabil.

e	NB	NS	ZE	PS	PB
Δe	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NS	ZE	PS	PB
NS	NS	ZE	PS	PB	PB
ZE	ZE	PS	PB	PB	PB
PS	PS	PB	PB	PB	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB

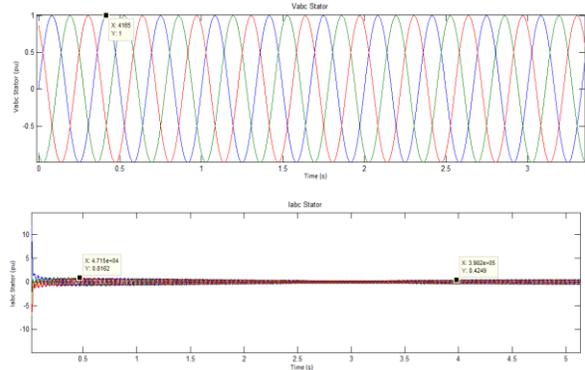
Gambar 3.6 Rule Base

Untuk penggunaan rule base pada penelitian ini menggunakan ordo 5 x 5 agar terjadi perubahan yang smooth pada sistem ditunjukkan pada gambar 3.6.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

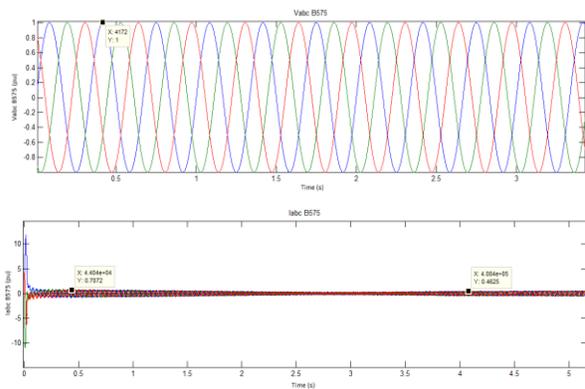
Simulasi di ambil dengan 3 percobaan angin yang berbeda agar mengetahui hasil dari tegangan grid, arus grid, tegangan stator, arus stator, tegangan dc, daya dan daya reaktif. Masing – masing percobaan pada kecepatan angina 13 m/s, 15 m/s dan 18 m/s.

- a. Percobaan pada kecepatan 13 m/s ditunjukkan pada gambar dibawah.



Gambar 4.1 Tegangan dan arus stator kecepatan 13 m/s

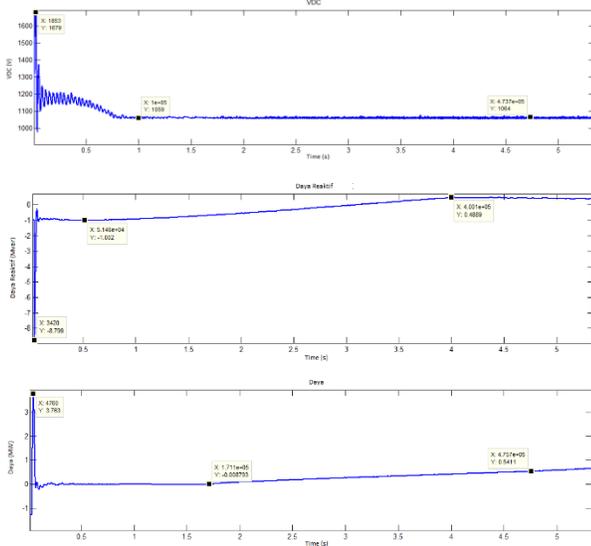
Pada kecepatan 13 m/s yang menggunakan *fuzzy logic* ditunjukkan pada gambar 4.1 Didapat bahwa tegangan bagian stator pada t = 1 sampai 5s konstan pada 1 pu. Arus mengalami overshoot hingga 11 pu pada t = 0 sampai 0,01s, dan pada t = 0,04s mengalami penurunan menjadi 0,8 pu, dan pada t = 2,4s terjadi penurunan pada arus menjadi 0,2 pu dan pada time ke 2,4s sampai 3,7s menjadi 0,2 pu, sedangkan pada t = 3,9 sampai 5s arus konstan pada 0,4 pu.



Gambar 4.2. Tegangan dan arus grid kecepatan 13 m/s

Pada pengujian dengan kecepatan 13 m/s menggunakan *fuzzy logic* ditunjukkan pada gambar 4.2. Tegangan bagian *grid* pada t = 1 sampai 5s konstan pada

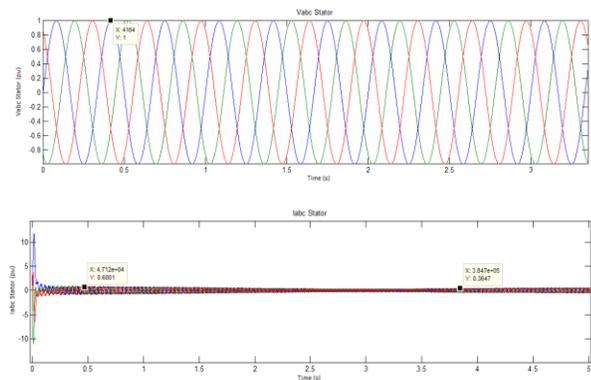
1 pu dan arus pada *grid* terjadi overshoot sampai 11 pu pada $t = 0,01s$ dan turun menjadi 0,7 pu, pada time $t = 0,04s$ terjadi penurunan arus hingga 0,2 pu saat $t = 2,5$ sampai 3,7s pada saat $t = 3,8s$ arus sudah konstan pada 0,4 pu.



Gambar 4.3 Tegangan DC, Daya Reaktif, Daya kecepatan 13 m/s

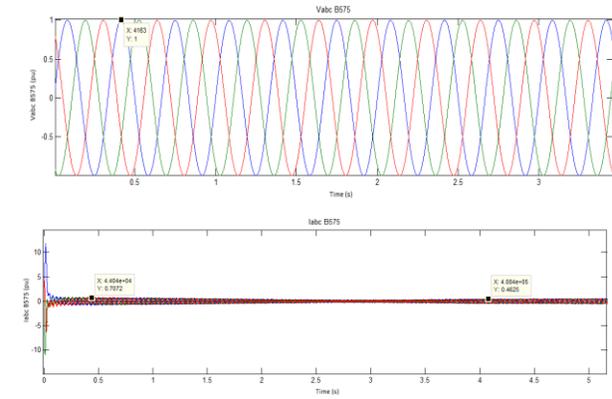
Pengamatan selanjutnya adalah pengamatan pada kecepatan angin 13 m/s menggunakan kontrol *fuzzy logic*, hasil respon system dapat ditunjukkan pada Gambar 4.15. Didapatkan bahwa tegangan DC pada $t = 0$ sampai 0,01s yaitu 1853V, dan terjadi peturunan pada $t = 1s$ sebesar 1059V dan konstan pada $t = 4,7s$ di nilai 1065V. Daya reaktif (Q) didapatkan sebesar -8,779 Mvar pada $t = 0,03s$, pada saat $t = 0,5s$ naik menjadi -1 Mvar dan terjadi peningkatan hingga $t = 4s$ menjadi 0,48 Mvar. Untuk daya (P) didapatkan hasil sebesar 3,7 MW saat $t = 0,04s$, pada 1,7s turun menjadi -0,008 MW dan terjadi kenaikan hingga 0,54 MW pada $t = 4,7s$.

b. Percobaan pada kecepatan 15 m/s ditunjukkan pada gambar dibawah.



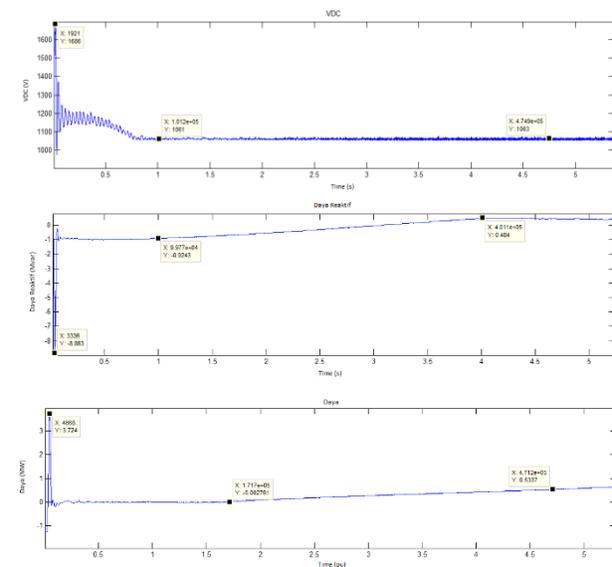
Gambar 4.4 Tegangan dan arus stator kecepatan 15 m/s

Pada kondisi kecepatan 15 m/s menggunakan controller *fuzzy logic* ditunjukkan pada gambar 4.4. Didapat bahwa tegangan sisi bagian stator dari $t = 1s$ sampai 5s konstan pada 1 pu. Arus yang didapatkan terjadi overshoot hingga 11 pu pada $t = 1s$ sampai 0,1s, pada time ke $t = 0,04s$ turun menjadi 0,6 pu, saat $t = 2,5s$ sampai 3,2s terjadi penurunan arus pada 0,1 pu, dan $t = 3,8s$ arus konstan pada 1 pu



Gambar 4.5 Tegangan dan arus grid kecepatan 15 m/s

Pada kondisi pengujian dengan kecepatan 15 m/s menggunakan *fuzzy logic* dapat ditunjukkan pada gambar 4.17 dimana tegangan sisi bagian *grid* dari $t = 1s$ sampai 5s konstan pada 1 pu. Sedangkan arus pada sisi jaringan terjadi *overshoot* sampai 11 pu pada $t = 0,01s$ dan turun menjadi 0,7 pu, saat $t = 2,5s$ sampai 3,7s terjadi penurunan arus hingga 0,1 pu, dan saat $t = 4s$ arus konstan pada 0,4 pu.

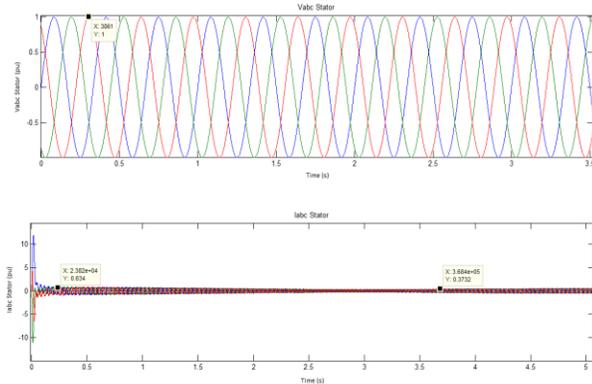


Gambar 4.6 Tegangan DC, Daya Reaktif, Daya kecepatan 15 m/s

Pada Gambar 4.6. ditunjukkan hasil pengamatan tegangan Vdc, daya reaktif dan daya aktif pada kondisi kecepatan angin 15 m/s menggunakan controller fuzzy

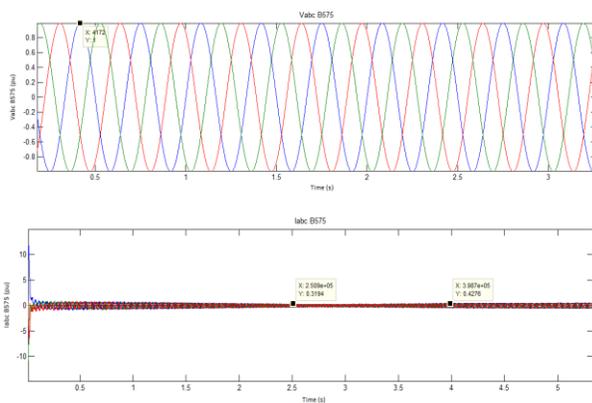
logic pada *grid side converter*. Didapatkan tegangan DC pada $t = 0,01s$ yaitu sebesar 1686V, pada time $t = 1s$ turun menjadi 1061V dan $t = 4,7s$ tegangan konstan di 1063V. Untuk daya reaktif (Q) didapatkan nilai sebesar -8,863 Mvar pada $t = 0,03s$, pada saat $t = 0,09s$ naik menjadi -0,92 Mvar dan terus meningkat hingga $t = 4s$ menjadi 0,48 Mvar. Untuk daya (P) didapatkan hasil 3,7 MW saat $t = 0,04s$, pada $t = 1,7s$ turun menjadi -0,002 Mvar, arus naik pada hingga 0,5 MW.

c. Percobaan pada kecepatan 18 m/s ditunjukkan pada gambar dibawah.



Gambar 4.7 Tegangan dan arus stator kecepatan 18 m/s

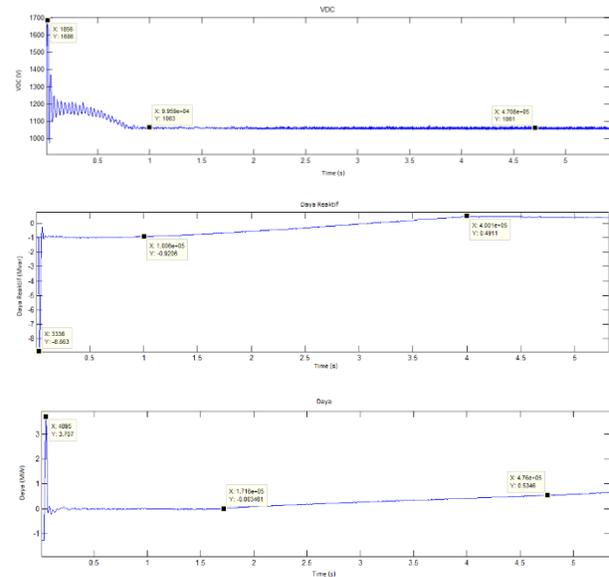
Hasil pengujian disajikan pada Gambar 4.7 dimana tegangan sisi bagian stator diperlihatkan bahwa pada $t = 1s$ sampai 5s konstan pada 1 pu. Arus mengalami overshoot hingga 11 pu pada $t = 0,01s$, dan pada $t = 0,02$ menjadi 0,6 pu, selanjutnya saat $t = 2,6s$ sampai 3,2s terjadi penurunan sebesar 0,1 pu, dan pada time $t = 3,6s$ arus konstan pada 0,3 pu.



Gambar 4.8 Tegangan dan arus grid kecepatan 18 m/s

Untuk mengamati tegangan dan arus sisi *grid* pada kecepatan angin sebesar 18 m/s menggunakan controller *fuzzy logic* ditunjukkan pada gambar 4.8. Terbaca bahwa tegangan sisi bagian jaringan pada time $t = 1s$ sampai 5s konstan pada 1 pu. Sedangkan arus pada sisi

grid terjadi overshoot sampai 11 pu pada $t = 0$ sampai 0,01s dan turun menjadi 0,7 pu saat $t = 0,2s$, terjadi penurunan arus hingga 0,3 pu, dan pada saat $t = 4s$ arus menjadi konstan pada 0,4 pu.



Gambar 4.8 Tegangan DC, Daya Reaktif, Daya kecepatan 18 m/s

Penggunaan controller fuzzy logic untuk mengontrol sisi *grid* pada kecepatan 18 m/s ditunjukkan pada gambar 4.8. Didapatkan tegangan DC pada $t = 0$ sampai 0,01s yaitu sebesar 1686V, dan terjadi penurunan pada $t = 1s$ menjadi 1063V dan pada $t = 4,7s$ tegangan konstan di 1061V. Daya reaktif (Q) didapatkan sebesar -8,863 Mvar pada $t = 0,03s$, saat $t = 1s$ naik menjadi 0,92 Mvar dan terus meningkat hingga $t = 4s$ menjadi 0,49 Mvar. Untuk daya (P) didapatkan hasil 3,7 MW saat $t = 0$ sampai 0,04s pada 1,7s turun menjadi -0,003 Mvar dan pada saat 4,7s arus naik menjadi 0,5 MW.

Tabel 4.1 Hasil perbandingan kontrol PI dan Fuzzy Logic

Percobaan	Kontroler	Nilai Steady	Time Steady
Angin			
Kecepatan Angin 13 m/s	PI Kontrol	902V	4s
	Fuzzy Logic	1064	2s
Kecepatan Angin 15 m/s	PI Kontrol	909V	4s
	Fuzzy Logic	1063V	2s
Kecepatan Angin 18 m/s	PI Kontrol	905V	4s
	Fuzzy Logic	1061V	2s

Dari pengamatan pada 3 kecepatan pada tabel 4.1 Penggunaan rata-rata kontroler fuzzy logic pada kecepatan percobaan tabel memiliki perbedaan yang signifikan dengan time steady 2s dengan target yang diinginkan 1100V pada masing-masing kecepatan.

V. Kesimpulan

Pengamatan tegangan DC menggunakan kontrol *fuzzy logic* pada *grid side converter* mendapatkan hasil output sebesar 1064V pada kecepatan angin 13 m/s, 1063V pada kecepatan angin 15 m/s dan 1061V pada kecepatan angin 18 m/s, dimana nilai tersebut mendekati nilai yang ditentukan yaitu sebesar 1100V. Sedangkan jika menggunakan kontroller PI menghasilkan nilai tegangan DC sebesar 902V pada kecepatan 13 m/s, 909V pada kecepatan 15 m/s, dan 905V pada kecepatan angin 18 m/s.

Dengan membandingkan penggunaan kontroller PI dan *Fuzzy logic* sebagai kontroller pada *grid side converter* dapat disimpulkan jika kontrol *fuzzy logic* lebih baik dibandingkan menggunakan kontrol PI karena menghasilkan output yang konstan sesuai dengan nilai yang ditentukan.

REFRENSI

- [1] HARUMWIDIAH, Anisa; KURNIAWAN, Adi. Simulasi sistem pembangkit listrik tenaga angin menggunakan Doubly Fed Induction Generator (DFIG) dengan Back-to-back Converter. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 2016, 5.2: 252-259.
- [2] RAMADAN, Abdelhady, et al. Design of Fuzzy Logic Control for Direct and Quadratic Components of DFIG's Rotor and Grid Side Control System Based Wind Turbines. In: *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. IEEE, 2018. p. 655-659.
- [3] FLANNERY, Patrick S.; VENKATARAMANAN, Giri. Evaluation of voltage sag ride-through of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid side converter. In: *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, 2007. p. 1839-1845.
- [4] ZHANG, Jianzhong; XU, Shuai. Application of Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Wind Energy Conversion System. *Fuzzy Logic-Tool for Getting Accurate Solutions*, 2015, 50-77.
- [5] LIAO, Yong, et al. Operation and control of a grid-connected DFIG-based wind turbine with series grid-side converter during network unbalance. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81.1: 228-236.
- [6] MOHAMMADI, Jafar, et al. Combined control method for grid-side converter of doubly fed induction generator-based wind energy conversion systems. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12.8: 943-952.
- [7] CHANDRASENA, R. P. S., et al. Grid side converter controller of DFIG for wind power generation. In: *2007 International Conference on Industrial and Information Systems*. IEEE, 2007. p. 141-146..
- [8] BEHERA, Ranjan K.; GAO, Wenzhong. A novel controller design for grid-side converter of doubly fed induction generator for wind power interface: an experimental investigation. *Electric Power Components and Systems*, 2010, 38.14: 1531-1545.
- [9] KALAIVANI, S., et al. Mitigation of voltage disturbances using fuzzy logic controller in a grid connected dfig for different types of fault. In: *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. IEEE, 2017. p. 1-7.
- [10] YALLAMILI, Ram Shankar; MISHRA, Mahesh K. Strategi kontrol konverter sisi jaringan paralel simetris sesaat untuk manajemen daya microgrid. *Transaksi IEEE tentang Energi Berkelanjutan*, 2018, 10.2: 682-692.
- [11] FLANNERY, Patrick S.; VENKATARAMANAN, Giri. Unbalanced voltage sag ride-through of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid-side converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, 45.5: 1879-1887.