

# Basis Active Rectifier Tiga Fase pada Kontroler PI

Ahmad Faidlon<sup>1</sup>, Iwan Setiawan<sup>2</sup>, dan Hermawan<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang  
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia  
e-mail: faidlon.ahm@gmail.com

**Abstrak**— *Active Rectifier* merupakan pengubah tegangan AC menjadi tegangan DC dengan tegangan keluaran yang lebih tinggi dari tegangan masukan dan tegangan kelurannya dapat diatur sesuai kebutuhan. Untuk menghasilkan tegangan keluaran yang fleksibel dibutuhkan sebuah kombinasi dengan metode lain. Keleleksibelan tegangan sangat diperlukan untuk mempermudah pengoperasian pada suatu sistem *Rectifier*. Pada jaman sekarang yaitu era Industri 4.0 suatu sistem yang praktis dalam pengoperasannya banyak dibutuhkan. Pada penelitian ini dirancang sebuah sistem yang mampu memberikan sebuah solusi yaitu dengan menggunakan *Rectifier* yang disusun dari tegangan 3 fase 380VAC kemudian disearahkan secara aktif dengan metode kontrol *Proportional Integral (PI)*. Metode penelitian ini menggunakan studi pustaka dan simulasi pada *MATLAB-SIMULINK*. Pada penelitian membuktikan suatu *Rectifier* tiga fase yang didesain menggunakan metode kontrol *Proportional Integral (PI)* dapat mengatur sebuah tegangan keluaran DC yang lebih tinggi dari tegangan AC masukannya.

**Kata kunci:** Kontrol PI, *Active Rectifier*, 3 Fase, Industri 4.0, *MATLAB* simulink

**Abstract**— *The Active Rectifier is a converter of AC voltage into DC voltage with an output voltage that is higher than the input voltage and the output voltage can be adjusted as needed. To produce a flexible output voltage required a combination with other methods. Voltage flexibility is needed to upset a rectifier system. In today's era, the Industrial 4.0 era, a system that is practical in its operation is much needed. In this research, a system that is able to provide a solution is designed by using a rectifier which is composed of a 3-phase 380VAC voltage and then actively rectifies it with the Proportional Integral (PI) control method. The research method uses literature study and simulation on MATLAB-SIMULINK. Research has proven that a three-phase rectifier designed using the Proportional Integral (PI) control method can provide a DC output voltage that is higher than the input AC voltage.*

**Keywords:** *PI control, Active Rectifier, 3 Phase, Industry 4.0, MATLAB simulink.*

## I. PENDAHULUAN

*Active Rectifier* merupakan pengubah arus bolak balik menjadi arus searah yang lebih tinggi dari tegangan masukannya dan tegangan keluarannya dapat diatur sesuai kebutuhan, untuk membentuk tegangan keluaran searah yang fleksibel dibutuhkan sebuah kombinasi dengan metode *PI controller*, keleleksibelan tegangan searah sangat diperlukan untuk mempermudah pengoperasian pada suatu sistem *Rectifier*, pada jaman sekarang yaitu era Industri 4.0, suatu sistem yang praktis dalam pengoperasannya banyak dibutuhkan [1]–[3].

Pada penelitian sebelumnya tentang *Rectifier* yang menghasilkan tegangan *ouput* lebih tinggi dari tegangan *input* tetapi mempunyai kekurangan yaitu tegangan *output* tidak fleksibel karena tidak dapat diatur tegangannya, untuk itu perlu adanya teknologi yang dapat mengatur keluaran tegangan searah secara fleksibel [4]–[6]. *Active Rectifier* merupakan suatu penyearah tegangan arus bolak balik menjadi tegangan arus searah yang lebih tinggi dari tegangan masukannya, tegangan keluaran dapat diatur dengan

menggunakan metode kontrol *Proportional Integral (PI)*, pemilihan kontrol *Proportional Integral (PI)* karena metode komputasinya cepat (respon cepat) dan kekurangannya adalah menuju stabil lama [7]–[9], sedangkan *Passive Rectifier* adalah penyearah tegangan arus bolak balik menjadi tegangan arus searah. Berikut karakter dari *Passive Rectifier* [10]–[12] :

1. *Passive Rectifier* adalah penyearah tegangan arus bolak balik menjadi tegangan arus searah yang tegangan keluarannya lebih rendah dari tegangan masukannya dan tegangan keluarannya tidak dapat diatur.

2. *Passive Rectifier* adalah penyearah tegangan arus bolak balik menjadi tegangan arus searah yang tegangan keluarannya lebih rendah dari tegangan masukannya dan tegangan keluarannya dapat diatur.

3. *Passive Rectifier* adalah penyearah tegangan arus bolak balik menjadi tegangan arus searah yang tegangan keluarannya lebih tinggi dari tegangan masukannya dan tegangan keluarannya tidak dapat diatur. Hal ini berbeda dengan karakter *Active Rectifier*.

*Active Rectifier* disusun dari tegangan 3 fase 380VAC kemudian disearahkan secara aktif sehingga tegangan keluarannya dapat diatur sesuai kebutuhan dengan menggunakan metode kontrol *Proportional Integral* (PI) [13], [14].

Dari penelitian terdahulu maka peneliti ingin membuat sebuah *Rectifier* yang menghasilkan tegangan DC, suatu tegangan DC yang lebih tinggi dari tegangan (AC) masukannya, pengaturan tegangan keluarannya menggunakan metode kontrol *Proportional Integral* (PI).

## II. STUDI PUSTAKA

Referensi pertama [15] adalah *Control strategy based on Associative Memory Networks* (AMN) untuk mengontrol konverter sisi *grid* pada sistem pembangkit terbarukan *On-grid* dalam kondisi tegangan *grid* yang tidak seimbang.

*Control strategy based on Associative Memory Networks* (AMN) beroperasi dalam kerangka referensi sinkron berotasi, dalam hal ini control *Proportional Integral* (PI) standar digunakan pada *inner dual current loop* yang cepat untuk melacak referensi saat ini, kemudian pada *loop* luar, AMN difungsikan sebagai integrator adaptif *nonlinier* yang dikombinasikan dengan kontrol proporsional sederhana untuk pengaturan tegangan *DC link*. Dengan menggunakan simulasi maka dapat ditunjukkan bahwa *overshoot* dari sistem kontrol pada riset ini dalam keadaan transien lebih rendah dibandingkan dengan control *Proportional Integral* (PI) yang optimal, akibatnya tegangan lebih dari kapasitor *DC link* karena perubahan mendadak dari daya aktif yang dihasilkan oleh sistem pembangkit terbarukan di bawah kondisi tegangan jaringan seimbang dan tidak seimbang dapat secara efektif dihindari.

Kombinasi dari kontrol penguatan proporsional sederhana dan *B-Spline Associative Memory Networks* (AMN) untuk mengatur tegangan kapasitor *DC link* dari sistem energi terbarukan yang terhubung dengan jaringan di bawah kondisi tegangan *grid* yang tidak seimbang. Seperti pendekatan pada kendali lainnya, kinerja kontrol pada dasarnya tergantung pada beberapa parameter kontrol. Untuk urutan fungsi dasar yang dipilih, kinerja sementara dari sistem kontrol sangat tergantung pada keuntungan proporsional sederhana yang dipilih ( $K_p$ ) dan tingkat pembelajaran AMN ( $\alpha$ ). Dalam hal ini, parameter  $K_p$  ditentukan dengan menggunakan metode *Symmetric Optimum*.

Referensi kedua adalah [16] menggunakan metode kontrol untuk meredam osilasi pada filter LC *input* dari konverter PWM AC-DC. Osilasi pada filter LC *input* dari konverter PWM AC-DC diredam dengan menggunakan resistor virtual yang dapat dihubungkan secara seri atau paralel dengan induktor filter atau kapasitor. Tidak ada resistor nyata yang digunakan, efisiensi konverter tidak dikorbankan. Sensor tambahan yang diperlukan dan implementasi resistor virtual dalam algoritma kontrol sangat dipengaruhi oleh terhubungnya resistor virtual ke filter LC. Perlunya sensor arus tambahan jika resistor virtual terhubung secara seri ke filter induktor atau kapasitor dan sensor tegangan tambahan jika terhubung secara paralel.

Konsep baru resistor virtual bertujuan untuk meredam osilasi sementara pada filter input LC konverter PWM AC-DC. Resistor virtual dapat meredam osilasi sementara tanpa mengorbankan efisiensi konverter. Resistor virtual dapat dihubungkan secara seri ataupun paralel dengan induktor filter maupun kapasitor.

Referensi ketiga adalah [17] menggunakan metode control yang secara langsung dapat mengatur daya reaktif dan aktif sesaat dalam penyearah tipe penguat tiga fase sinkron. Sistem kontrol memastikan pengaturan tegangan *output* yang baik dan menjamin faktor daya ( $\cos \phi$ ) mendekati satu. Pengontrol dibangun berdasarkan ide-ide *Direct Torque Control* (DTC) yang terkenal untuk motor induksi. Pada riset ini daya aktif dan reaktif menggantikan amplitudo torsi dan fluks yang digunakan sebagai *output* terkontrol pada *Direct Torque Control* (DTC) sehingga memotivasi nama *Direct Torque Control* (DPC). Penelitian ini menunjukkan modifikasi sederhana pada algoritma asli membuat pemilihan kontrol lebih akurat. Untuk memformalkan teknik ini, peneliti menggunakan konsep sub ruang pengaturan keluaran. Modifikasi ditambahkan ke pengendali dasar untuk menangani gangguan seperti ketidakseimbangan dan distorsi pada tegangan sumber.

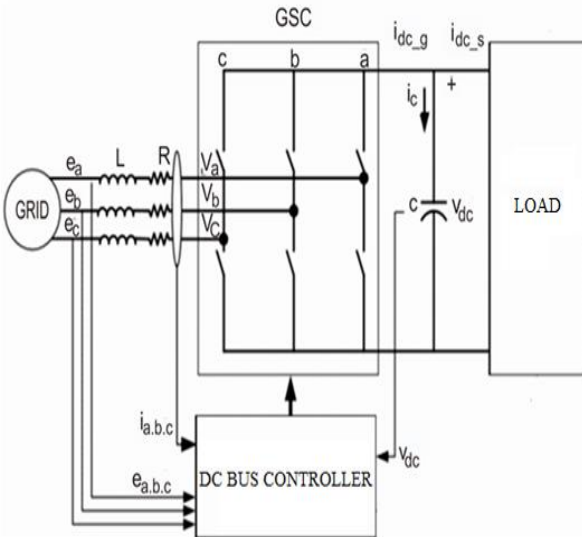
Penelitian ini menunjukkan bahwa prinsip-prinsip dasar yang digunakan untuk *Direct Torque Control* (DTC) dapat disimulasikan pada penyearah sinkron. Strategi ini dilambangkan sebagai kontrol ORS-DPC, di mana nama *Direct Torque Control* (DPC) didorong oleh fakta bahwa daya aktif dan daya reaktif langsung dikontrol, seperti halnya torsi dan fluks amplitudo yang berada pada DTC. Konsep *Output Regulation Subspaces* (ORS) ditinjau kembali dan digunakan untuk memformalkan strategi *switching* baru. *Direct Torque Control* (DTC) standar menggunakan *Output Regulation Subspaces* (ORS) yang diperkirakan. Strateginya adalah versi modifikasi dari *Direct Torque Control* (DTC) standar, yang mana memutar *Output Regulation Subspaces* (ORS) yang diprediksikan dengan sudut tertentu untuk mempertimbangkan *Output Regulation Subspaces* (ORS) yang tepat. Penelitian ini mempertahankan ide dasar *Direct Torque Control* (DTC) untuk memilih vektor *input* kontrol dengan menggunakan tabel pencarian. Beberapa modifikasi memungkinkan tergantung pada karakteristik sistem dan referensi yang diinginkan. Penelitian mengamati dari hasil percobaan bahwa kontrol menjamin pengaturan yang baik dari tegangan *output* dengan faktor daya unit dekat. Hal ini berlaku setelah perubahan beban mendadak dan menunjukkan kinerja ORS-DPC yang kuat.

## III. METODE

### A. Sistem *Active Rectifier*

Proses ini akan dilakukan setelah data diperoleh dan dianalisa terhadap metode yang ditetapkan. Perancangan ini menggunakan MATLAB *Simulink*.

Gambar 1. berikut adalah diagram blok dari sistem.

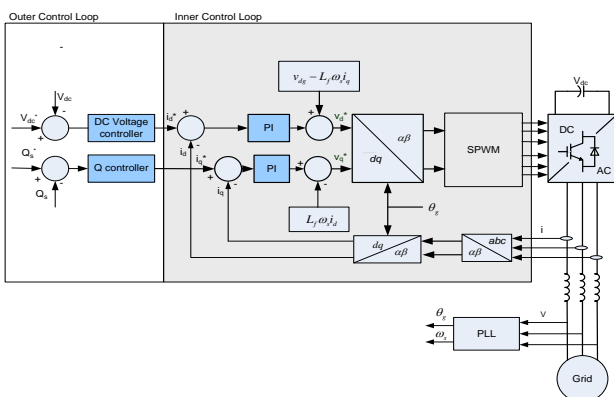


Gambar 1. Diagram blok sistem Active Rectifier

Pada gambar 1. ditunjukkan bahwa keluaran Grid  $e_{abc}$  adalah sumber tegangan 3 Fase, kemudian, tegangan  $e_{abc}$  diumpkan balikkan ke DC BUS Controller dan  $V_{dc}$  kapasitor juga diumpkan balikkan ke DC BUS Controller. DC BUS Controller terdiri dari Clark Transform, Park Transform, Phase Locked Loop, Proportional Integral sebagai pengendali Rectifier untuk mengatur tegangan output rangkaian. Sistem kerja model GSC dapat menggunakan Mosfet atau insulated gate bipolar transistor (IGBT), Sistem kontrol adalah close loop, pengontrol tegangan dan arus digunakan untuk mendapatkan tegangan umpan balik dari kapasitor sisi beban dan untuk mendapatkan umpan balik dari induktor (L) sisi sumber untuk mengontrol GSC.

#### A. Kontrol Proportional Integral (PI)

Teknik kendali Proportional Integral (PI) adalah pengendali yang merupakan kombinasi antara teknik kendali proportional (P) dengan teknik kendali integral (I), Proportional Integral (PI) mempunyai metode komputasi yang cepat [18]. Diagram blok teknik kendali Proportional Integral (PI) pada tiga fase Active Rectifier ditunjukkan pada gambar 2 [19].



Gambar 2. Diagram blok umum sistem PI Controller pada Tiga Fase

Untuk keperluan pemodelan, konverter pada Gambar 2. dapat dimodelkan sebagai sakelar dua arah yang ideal. Output tegangan konverter dapat direpresentasikan seperti yang ditunjukkan pada (1) [19]–[22].

$$\begin{bmatrix} v_{af} \\ v_{bf} \\ v_{cf} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dimana  $S_a$ ,  $S_b$  dan  $S_c$  adalah sinyal commads ke sisi atas konverter. Sedangkan  $V_{dc}$  adalah tegangan kapasitor link DC yang bergantung pada arus yang mengalir melalui kapasitor dan ini dapat direpresentasikan:

$$V_{DC} = \frac{1}{C} \int idt \quad (2)$$

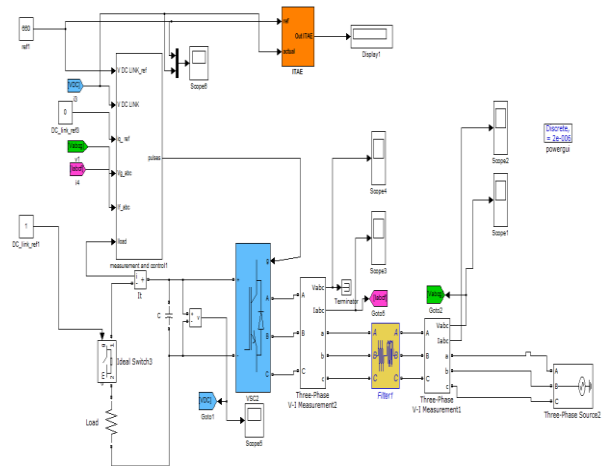
Dalam hal ini, arus yang melalui kapasitor dapat ditemukan:

$$i = i_{dc\_rotor} - i_{dc\_grid} \quad (3)$$

$$i_{dc\_grid} = S_a i_{ag} + S_b i_{bg} + S_c i_{cg} \quad (4)$$

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

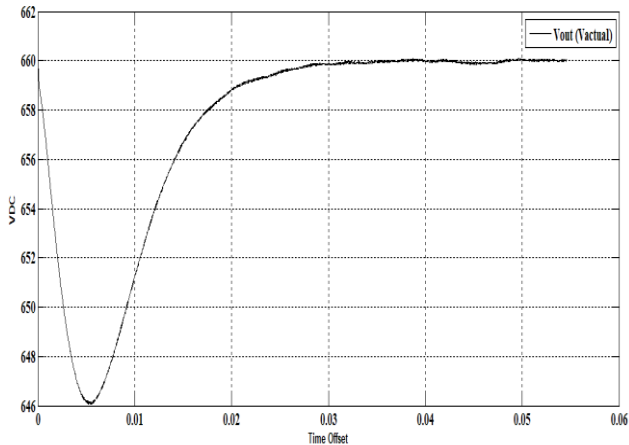
Pengujian Active Rectifier dengan simulasi MATLAB bertujuan untuk mengetahui tegangan referensi, tegangan actual, dan arus actual yang mendapatkan pengaruh akibat variasi resistansi beban dari sistem simulasi. Gambar pengujian Active Rectifier Menggunakan Metode Kontrol Proportional Integral (PI) ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Simulasi Active Rectifier menggunakan metode PI Controller

Pengujian penerapan metode Proportional Integral (PI) pada Active Rectifier dengan kombinasi nilai proportional (P) dan nilai integral (I).

Berikut adalah pengujian pertama, pada pengujian tegangan actual Active Rectifier pengukuran dilakukan untuk mengetahui berapa tegangan referensi diatur 660 VDC ketika mendapatkan Beban 100 Ohm. Hasil pengukuran tegangan actual pada Active Rectifier dengan beban 100 Ohm ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Hasil pengukuran tegangan aktual dengan referensi 660 VDC berbeban 100 Ohm

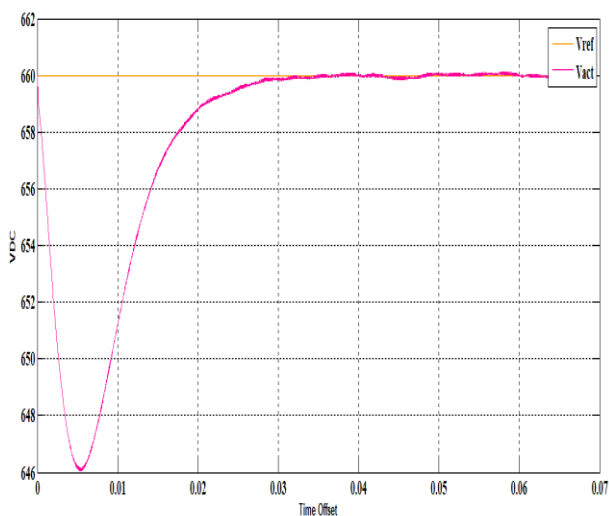
Tabel 1. Pengukuran tegangan aktual dengan referensi 660 VDC pada *Active Rectifier* beban 100 Ohm

Titik Pengukuran	Tegangan Output (Volt DC)
3 (Scope 5)	659.85-660.1

Besar tegangan aktual pada *Active Rectifier* ketika mendapatkan beban 100 Ohm adalah 659.85 VDC sampai 660.1 VDC.

Berikut adalah pengujian kedua, pada pengujian tegangan aktual dan tegangan referensi 660 VDC *Active Rectifier* pengukuran dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara kedua tegangan tersebut ketika mendapatkan beban 100 Ohm.

Hasil pengukuran tegangan aktual dan referensi pada *Active Rectifier* dengan beban 100 Ohm ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Hasil pengukuran tegangan aktual dan tegangan referensi 660 VDC dengan beban 100 Ohm

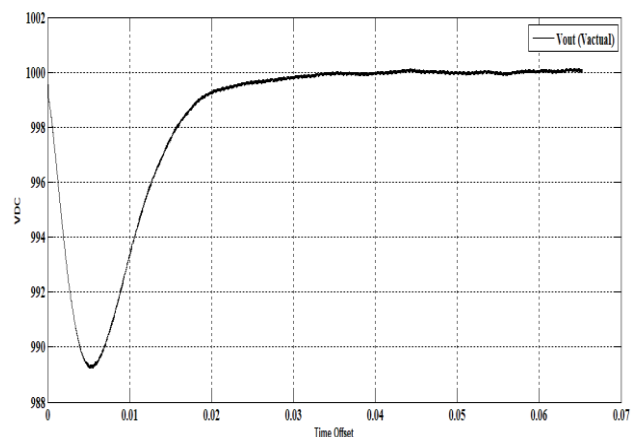
Tabel 2. Pengukuran tegangan aktual dan tegangan referensi 660 VDC pada *Active Rectifier* dengan beban 100 Ohm

Titik Pengukuran	Tegangan Output (Volt DC)
4 (Scope 6)	660 (Referensi)
4 (Scope 6)	659.85-660.1 (Aktual)

Besar tegangan referensi adalah 660 VDC dengan garis warna kuning dan tegangan aktual adalah 659.90 VDC sampai 660.08 VDC dengan garis warna ungu.

Berikut adalah pengujian ketiga, pada pengujian tegangan aktual *Active Rectifier* pengukuran dilakukan untuk mengetahui berapa tegangan referensi diatur 1000 VDC ketika mendapatkan beban 200 Ohm.

Hasil pengukuran tegangan aktual pada *Active Rectifier* dengan beban 200 Ohm ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil pengukuran tegangan aktual dengan referensi 1000 VDC berbeban 200 Ohm

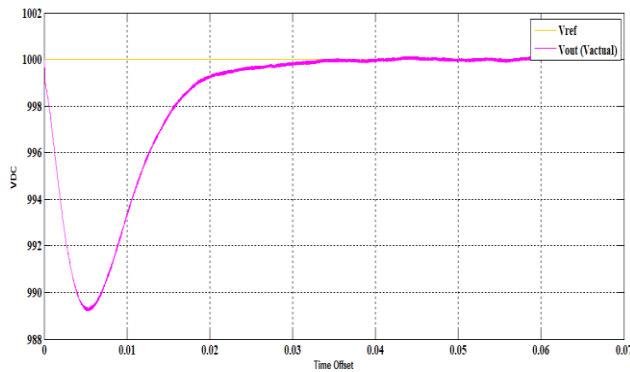
Tabel 3. Pengukuran tegangan aktual dengan referensi 1000 VDC pada *Active Rectifier* berbeban 200 Ohm

Titik Pengukuran	Tegangan Output (Volt DC)
3 (Scope 5)	999.9-1000.15

Besar tegangan aktual pada *Active Rectifier* ketika mendapatkan beban 200 Ohm adalah 999.9 VDC sampai 1000.15 VDC.

Berikut adalah pengujian keempat, pada pengujian tegangan aktual dan tegangan referensi 1000 VDC *Active Rectifier* pengukuran dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara kedua tegangan tersebut ketika mendapatkan beban 200 Ohm.

Hasil pengukuran tegangan aktual dan referensi pada *Active Rectifier* dengan beban 200 Ohm ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Hasil pengukuran tegangan aktual dan tegangan referensi 1000 VDC dengan beban 200 Ohm

Tabel 4. Pengukuran tegangan aktual dan tegangan referensi 1000 VDC pada *Active Rectifier* dengan beban 200 Ohm.

Titik Pengukuran	Tegangan Output (Volt DC)
4 (Scope 6)	1000 (Referensi)
4 (Scope 6)	999.9-1000.15 (Aktual)

Besar tegangan referensi adalah 1000 VDC dengan garis warna kuning dan tegangan aktual adalah 1000 VDC sampai 1000.15 VDC dengan garis warna ungu.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang telah dicapai selama perancangan dan pengujian simulasi pada penelitian ini, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

Tiga fase *Active Rectifier* menggunakan metode kontrol *Proportional Integral* (PI) dapat menghasilkan tegangan output DC > 3/2 x 380 volt dan *time offset* pada adalah 0.04 detik. Adapun saran dari Peneliti adalah Penelitian masih dapat dikembangkan lebih lanjut pada bentuk simulasi konverter dan Penelitian masih dapat dikembangkan lebih lanjut pada bentuk implementasi. *Active Rectifier* Menggunakan Metode *Proportional Integral* (PI).

## REFERENSI

- [1] D. M. A. H. Abhishek Kumar, "HVDC (High Voltage Direct Current) Transmission System," *Gyancity J. Eng. Technol.*, vol. 4, no.2, pp. 1–10, 2018.
- [2] S. . Lasisi, H., Olayemi, "Power Improvement of Transmission Line Using High Voltage Direct Current (Hvdc) Transmission System," *Am. J. Eng. Res.*, vol. 03, no. 04, pp. 66–75, 2014.
- [3] L. S. Dalenogare, G. B. Benitez, N. F. Ayala, and A. G. Frank, "The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 204, no. December 2017, pp. 383–394, 2018.
- [4] J. Sakamuri, Jayachandra N.; Cutululis, Nicolaos Antonio; Rather, Zakir Hussain; Rimez, "A New Coordinated Voltage Control Scheme for Offshore AC Grid of HVDC Connected Offshore Wind Power Plants," *CIGRÉ Canada Conf.*, 2015.
- [5] N. S. Manvendra Nandan, Arun Pachori, "HVDC Transmission System Using 6-Pulse IGBT Converter," *Int. J. Eng. Res. Dev.*, vol. 7, no. 7, pp. 37–44, 2013.
- [6] Tomasz Drobik, "High-voltage direct current transmission lines," *IEEE Conf. Publ.*, vol. 32, 2013.
- [7] S. Li, T. A. Haskew, Y. K. Hong, and L. Xu, "Direct-current vector control of three-phase grid-connected rectifier-inverter," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 2, pp. 357–366, 2011.
- [8] A. Bechouche, D. Ould Abdeslam, H. Seddiki, and A. Rahoui, "Neural Filter Based Integrator for Virtual Flux Estimation in Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifiers," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 7013–7018, 2017.
- [9] R. Guedouani, B. Fiala, E. M. Berkouk, and M. S. Boucherit, "New control strategy of three-phase five-level npc rectifier-inverter system for induction machine drive," *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 1382–1391, 2012.
- [10] M. Liserre, F. Blaabjerg, and A. Dell'aquila, "Step-by-step design procedure for a grid-connected three-phase PWM voltage source converter," *Int. J. Electron.*, 2004.
- [11] G. Gong, M. L. Heldwein, U. Drogenik, J. Miniböck, K. Mino, and J. W. Kolar, "Comparative evaluation of three-phase high-power-factor AC-DC converter concepts for application in future More Electric Aircraft," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2005.
- [12] C. Wang, "Hysteresis Analysis of Three Phase Voltage Source PWM Rectifier based on Feed Forward Decoupling," *Adv. Eng. Res.*, vol. 107, no. Meita 2016, pp. 20–26, 2017.
- [13] A. H. Bhat and N. Langer, "Supply perturbation compensated control scheme for three-phase neutral-point clamped bi-directional rectifier," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 17–25, 2014.
- [14] W. U. Tareen and S. Mekhilef, "Transformer-less 3P3W SAPF (three-phase three-wire shunt active power filter) with line-interactive UPS (uninterruptible power supply) and battery energy storage stage," *Energy*, vol. 109, pp. 525–536, 2016.
- [15] M. H. P. Iwan Setiawan, Ardyono Priyadi, "Control Strategy Based on Associative Memory Networks for a Grid-Side Converter in On-Grid Renewable Generation Systems Under Generalized Unbalanced Grid Voltage Conditions," *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 11, pp. 171–182, 2016.
- [16] Pekik Argo Dahono, "A Control Method to Damp Oscillation in the Input LC Filter of AC-DC PWM Converters," *IEEE.*, vol. 02, pp. 1630–1635, 2002.
- [17] A. M. S. Gerardo Escobar, "Analysis and Design of Direct Power Control (DPC) for a Three Phase Synchronous Rectifier via Output Regulation Subspaces," *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 18, pp. 823–830, 2005.
- [18] O. D. M. Walter Gil-González, "Passivity-based PI control of a SMES system to support power in electrical grids: A bilinear approach," *J. Energy Storage*, vol. 18, pp. 459–466, 2018.
- [19] R. J. Gang Ma, Guchao Xu, Yixi Chen, "Voltage stability control method of electric springs based on adaptive PI controller," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 95, pp. 202–212, 2017.
- [20] C. Msigwa, "IMPROVED PI BASED CONTROL OF SHUNT ACTIVE POWER FILTER FOR POWER QUALITY MITIGATION," *Int. J. Innov. Res. Adv. Eng.*, vol. 6, no. 07, pp. 565–571, 2019.
- [21] J. C. J. Thanh Cong Tran, "Development of Anti-windup PI Control and Bumpless Control Transfer Methodology for Feedwater Control System," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 131, pp. 233–241, 2019.
- [22] C. S. A. Nandar, "Robust PI control of smart controllable load for frequency stabilization of microgrid power system," *Renew. Energy*, vol. 56, pp. 16–23, 2013.