

Converter Ac-to-Ac With Additional Free-Wheeling Switches for Improving Power Factor and Reducing Harmonic Distortion

Mochamad Ashari¹

Abstract—This paper presents development of single phase AC-to-AC converter with additional free-wheeling switches for improving the power factor and reducing harmonic distortion. The proposed system uses 2 switching types: the main switch and additional switch. The main switch is for controlling the amplitude of the output voltage, while the additional switch is for releasing energy from inductive loads (free-wheeling switch). The main switch is controlled by pulse width modulation (PWM), and the additional switch is modulated using the line frequency, 50 Hz. An AC-to-AC converter was simulated and built for laboratory test purposes. A conventional system, using thyristor and called Phase Control, was simulated for the system comparison. Results from simulation and laboratory tests show that the proposed system works properly. Using the same loads, the conventional system presents power factor as 0,34–0,71 and the voltage THD as 62.1%. The proposed system provides an improved power factor at nearly unity, and presents the total harmonic distortion of the voltage as 2.45%.

Keywords— AC-to-AC converter, free-wheeling switches, sinusoidal PWM, inductive load, conventional phase controlled

I. PENDAHULUAN

Konverter AC-to-AC merupakan peralatan untuk menyediakan tegangan output AC variabel yang diolah dari tegangan AC jala-jala tanpa melalui DC-link. Konverter AC-to-AC banyak digunakan untuk aplikasi di industri dan di sistem transmisi, misalnya untuk mengatur temperature tanur listrik, pemanas air dan Static VAR Compensator (SVC). Pada mulanya sistem ini menggunakan thyristor yang dioperasikan sebagai Kontrol Fase [1] dan [2]. Metode ini mengatur arus atau tegangan dengan cara memperlambat penyulutan thyristor. Cara ini mampu memberikan arus variabel yang “smooth”, tetapi dihasilkan pula distorsi harmonisa yang cukup besar. Harmonisa-harmonisa dominan berada pada orde rendah, yaitu ke 5 dan 7, sehingga untuk meredamnya diperlukan filter dengan dimensi yang cukup besar.

Pada perkembangan berikutnya, pengatur tegangan AC menggunakan metode Pulse Width Modulation (PWM). Metode PWM ini telah banyak digunakan untuk aplikasi VAR kompensator [3], [5] maupun untuk uninterruptible power supply dan power quality conditioner [6]-[9]. Pada konverter AC-to-AC, metode ini mencacah tegangan AC menjadi pulsa-pulsa dengan periode pendek (frekuensi

tinggi). Arus atau tegangan termodulasi dikendalikan dengan cara mengatur lebar pulsa (duty cycle). Metode ini memberikan performansi yang lebih baik dibanding dengan Kontrol Fase.

Paper ini membahas pengembangan konverter AC-to-AC (disebut juga pengatur tegangan AC) menggunakan metode PWM, dimana ditambahkan saklar free-wheeling yang dikontrol khusus berfungsi untuk meningkatkan power faktor dan menurunkan distorsi harmonisa.

II. KONVERTER AC-TO-AC

Berdasarkan jenis saklar dan cara pengendaliannya, sistem pengatur tegangan AC dapat dikelompokkan menjadi 2 yaitu:

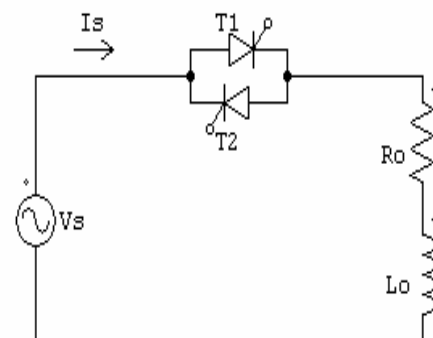
1. Sistem dengan bi-directional thyristor yang dikontrol melalui sudut fasa (Kontrol Fase)
2. Sistem dengan transistor yang dikontrol secara PWM

A. Sistem Dengan Bi-directional Thyristor

Kontrol Fase merupakan pengatur tegangan AC yang menggunakan bi-directional thyristor. Sistem konvensional ini masih banyak digunakan di industri, terutama untuk pengaturan SVC. Sistem ini sangat sederhana tetapi arus dan tegangan yang dibangkitkan berbentuk diskontinyu dan non sinusoida akibat pola penyalan thyristor. Faktor daya suatu control fase berubah-ubah proporsional terhadap sudut penyalan thyristor.

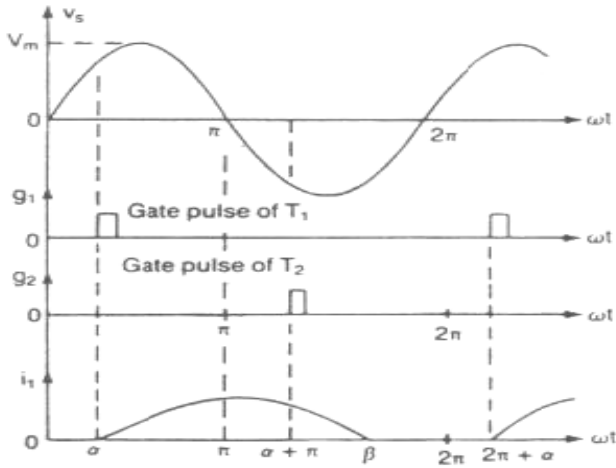
Kontrol Fase satu fasa terdiri dari sebuah bi-directional thyristor atau 2 buah thyristor seperti ditunjukkan pada Gambar 1. V_s adalah tegangan rms sumber, R_o dan L_o adalah beban induktif.

Pola penyalan thyristor dibuat simetri, dimana thyristor T_1 disulut pada α , sedangkan T_2 pada $\alpha + \pi$ seperti terlihat pada Gambar 2. Arus output yang diskontinyu dan tertinggal sebesar α akibat penyalan thyristor dapat diamati pada Gambar 2 bagian bawah.



Gambar 1. Rangkaian fase kontrol satu fasa

Naskah diterima 11 Desember 2006; selesai revisi pada 11 April 2008
¹ M. Ashari adalah dosen Jurusan Teknik Elektro, FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, INDONESIA (e-mail: ashari@ieee.org/ashari@ee.its.ac.id)



Gambar 2. Penyalan thyristor dan bentuk gelombang arus output

Persamaan tegangan output dapat dituliskan sebagai berikut [10]:

$$V_o = \left\{ \frac{2}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\beta} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right] \right\}^{1/2}$$

$$= V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\beta - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

Dengan α adalah sudut penyalan thyristor, β adalah sudut pemadaman thyristor yang besarnya tergantung pada perbandingan induktansi dan resistansi beban. Persamaan arus rms pada satu buah thyristor dapat dituliskan:

$$I_R = \left\{ \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\beta} i_1^2 d(\omega t) \right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$$= \frac{V_s}{Z} \left[\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \left\{ \sin(\alpha - \phi) - \sin(\alpha - \phi)e^{(R/L)(\alpha - \omega t)} \right\}^2 d(\alpha) \right]^{1/2}$$

Dengan $Z = [R_o^2 + (\omega L_o)^2]^{1/2}$ adalah impedansi beban dan $\phi = \tan^{-1}(\omega L_o / R_o)$.

Arus output atau arus beban rms merupakan gabungan dari arus rms masing-masing thyristor:

$$I_o = (I_R^2 + I_R^2)^{1/2} = \sqrt{2} I_R \quad (3)$$

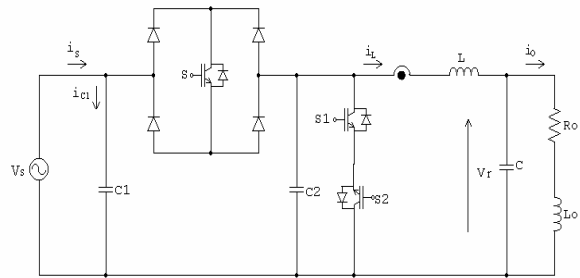
Persamaan-persamaan diatas menunjukkan bahwa:

1. Sudut penyalan harus $\alpha \geq \phi$ agar tidak terjadi kegagalan konduksi pada salah satu thyristor
2. Faktor daya untuk arus fundamental pada sisi input merupakan fungsi sudut penyalan thyristor, $pf_1 = \cos \alpha$
3. Bentuk gelombang tegangan dan arus adalah non sinusoida, kecuali pada saat $\alpha = \phi$.

B. Sistem PWM Dengan Free-Wheeling Switches

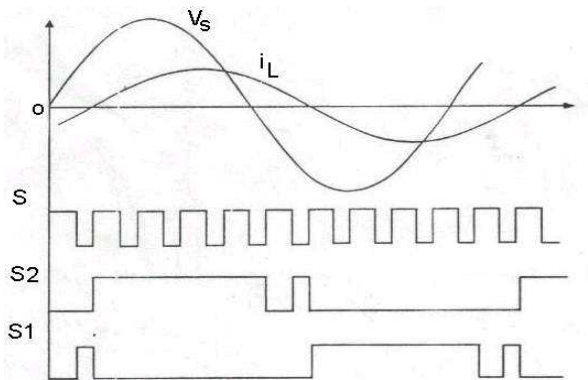
Rangkaian konverter AC-to-AC menggunakan teknik PWM dengan tambahan free-wheeling switches ditunjukkan pada Gambar 3. Sistem ini dirancang mempunyai 2 jenis pensaklaran, yaitu saklar utama (S) dan saklar tambahan (S₁ dan S₂). Saklar utama, S, dipasang seri terhadap beban berfungsi sebagai pencacah dengan frekuensi tinggi. Saklar ini akan mengatur amplitudo tegangan output. Transistor free-wheeling yaitu S₁ dan S₂ masing-masing dipasang paralel dengan sebuah diode. Transistor dan diode ini dihubungkan paralel terhadap beban untuk melepas energi yang tersimpan pada beban (induktif). Saklar S₁

merupakan komplemen S₂, dimana kedua saklar tersebut tidak boleh konduksi secara bersama-sama. Filter L dan C dipasang untuk mengurangi harmonisa akibat operasi penyaklaran.



Gambar 3. Rangkaian konverter AC-to-AC dengan Free-Wheeling switches

Pola pengoperasian 3 saklar tersebut ditentukan berdasarkan polaritas tegangan sumber (V_s) dan arus beban (I_L) seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Pola penyalan saklar pada pengatur tegangan AC PWM

Saklar S dioperasikan pada frekuensi tinggi dengan duty cycle D. Duty cycle adalah perbandingan antara T_{on} (waktu turn on transistor) dengan total periode modulasi T_s = T_{on} + T_{off}. Saklar S₁ dan S₂ dioperasikan berdasarkan kondisi sesaat arus dan tegangan beban.

a. Pola Pengoperasian Saklar Utama (S)

Saklar S dioperasikan pada frekuensi tinggi dengan metode PWM. Jembatan diode digunakan untuk mengubah tegangan negatif sumber menjadi positif, hal ini dapat menghemat jumlah transistor. Tegangan keluaran dari saklar S berupa gelombang sinusoida yang terpotong sebagai pulsa-pulsa. Pola operasi saklar S akan memberikan efek pengontrolan magnitudo tegangan dan faktor daya pada beban. Analisis secara matematis diberikan pada paragraf berikut.

Tegangan input suplai didefinisikan sebagai :

$$v_s(t) = V_{sm} \sin \omega t \quad (4)$$

dengan ω adalah frekuensi sudut dan V_{sm} adalah tegangan maksimum input. Ketika frekuensi switching ω_s dan konstanta *duty cycle* D diterapkan pada saklar S, maka fungsi switching F(t) dalam bentuk deret Fourier [4] adalah sebagai berikut:

$$F(t) = D + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin 2nD}{n\pi} \sin(n\omega_s t) \quad (5)$$

Tegangan output $V_r(t)$, yang merupakan tegangan input termodulasi, dapat diberikan sebagai berikut :

$$v_r(t) = F(t)v_s(t) = DV_{sm} \sin(\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{sm} \sin 2nD\pi}{n\pi} \sin(n\omega s \pm \omega)t \quad (6)$$

Dari persamaan (6) terlihat bahwa tegangan puncak dari komponen fundamental V_{rf} tergantung dari Duty Cycle D:

$$V_{rf} = DV_{sm} \quad (7)$$

Tegangan maksimum komponen harmonisa adalah:

$$V_{rh} = \sqrt{2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_{sm} \sin(2nD\pi)}{n\pi} \right)^2} \quad (8)$$

Untuk arus sumber I_s , dengan cara yang sama dapat diperoleh persamaan termodulasinya:

$$I_s = F(t)i_L(t) + i_{c1}(t) \approx F(t)i_o(t) + i_{c1}(t) \approx DI_o \sin(\omega t - \phi) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_o \sin 2nD\pi}{n\pi} \times \sin\{(n\omega_s \pm \omega)t \pm \phi\} + I_{c1} \sin(\omega t + \pi/2) \quad (9)$$

dengan i_L adalah arus pada sisi output sistem, i_o adalah arus beban dan i_{c1} adalah arus kapasitor yang terletak pada sisi input (terminal suplai). Arus $I_{c1} = \omega C_1 V_{sm}$, dan $\cos(\phi)$ adalah faktor daya beban.

Komponen fundamental arus input adalah:

$$I_{sf} = \sqrt{(DI_o)^2 + I_{c1}^2 - 2DI_o I_{c1} \sin(\phi)} \quad (10)$$

dan harga rms arus sumber adalah:

$$I_s = \sqrt{(DI_o)^2 + I_{c1}^2 - 2DI_o I_{c1} \sin(\phi) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_o \sin 2nD\pi}{n\pi} \right)^2} \quad (11)$$

Faktor daya input diekspresikan sebagai:

$$PF = \frac{I_{sf}}{I_s} \cos(\phi) \quad (12)$$

Persamaan (6) sampai (12) menunjukkan bahwa tegangan, arus output dan power faktor beban tergantung pada Duty Cycle pengoperasian saklar S.

b. Pola Pengoperasian Saklar Free-Wheeling

Pola pengoperasian S_1 dan S_2 diatur sedemikian sehingga proses pengosongan energi yang tersimpan pada beban (induktor L_o) digunakan untuk memperkecil beda fasa antara arus dan tegangan. Hal ini akan membawa efek terhadap perbaikan faktor daya. Mengacu pada Gambar 4, jika saklar S_2 sedang konduksi maka sisa energi dari beban L_o dialirkan melalui netral, saklar S_2 , diode paralel S_1 , induktor L dan kembali ke L_o . Pada kondisi ini arus pengosongan mempunyai polaritas yang sama dengan arus beban. Sebaliknya, jika S_1 sedang konduksi, maka proses pengosongan energi pada beban mengalir berlawanan dengan kondisi saat saklar S_2 konduksi, atau berbeda 180° terhadap arus beban.

Pengoperasian kedua saklar Free-Wheeling dilakukan dengan memperhatikan 3 parameter yaitu: Status saklar utama, S; Polaritas tegangan sumber (V_s); dan Polaritas arus beban (I_L)

Jika tegangan sumber dan arus beban keduanya positif, maka saklar S_2 dioperasikan dalam kondisi konduksi (on), sedangkan S_1 membuka (off). Pada saat S sedang konduksi maka akan terjadi pengisian pada in-

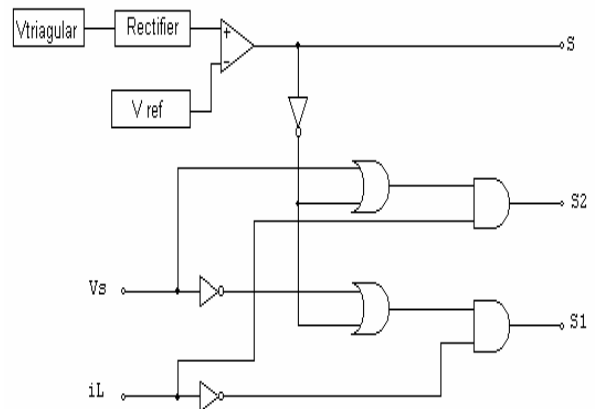
duktor beban L_o . Pada saat S membuka (off), maka arus pengosongan akan mempunyai polaritas yang sama dengan arus beban (positif). Proses ini akan membantu memperbaiki bentuk gelombang arus atau memperkecil Total Harminc Distortion. Pada kondisi yang lain yaitu saat $V_s < 0$ dan $i_L > 0$, maka S_1 selalu dioperasikan off, karena arus beban selalu diinginkan positif. Ketika S sedang konduksi maka S_2 harus dalam kondisi off agar tidak terjadi short circuit, sebaliknya pada saat S off maka S_2 dioperasikan on. Switching pengemudian selengkapnya diberikan pada Tabel 1.

TABEL 1
POLA OPERASI SAKLAR UTAMA DAN TAMBAHAN

Kondisi (state)	Saklar		
	S	S ₁	S ₂
$V_s > 0, i_L > 0$	1	0	1
$V_s < 0, i_L > 0$	1	0	0
$V_s < 0, i_L < 0$	1	1	0
$V_s > 0, i_L < 0$	1	0	0
$V_s > 0, i_L < 0$	0	1	0

Kondisi saklar : 0 → membuka, 1 → menutup

Dengan menggunakan gerbang-gerbang logika dan beberapa manipulasi untuk mendapatkan rangkaian yang paling sederhana, maka implementasi Tabel 1 menggunakan gerbang-gerbang logika disajikan oleh Gambar 5.



Gambar 5. Gerbang logika pengontrol saklar

III. HASIL PENGUKURAN DAN DISKUSI

Untuk mengetahui unjuk kerja masing-masing alat pengatur tegangan AC, maka dilakukan simulasi dan pengukuran sebagai verifikasi. Sebuah prototype konverter yang menggunakan metode PWM dan saklar Free-Wheeling telah dibuat dan diuji coba di laboratorium. Sebuah sistem konvensional yang menggunakan thyristor sebagai Kontrol Fase telah dilakukan simulasi, selanjutnya hasil simulasi digunakan sebagai pembandingan.

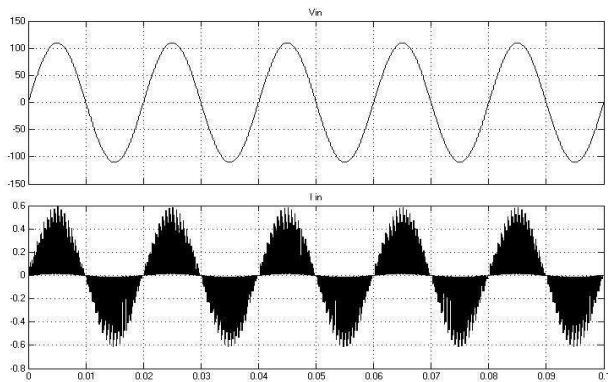
Gambar 6 adalah foto set up peralatan saat dilakukan test pada prototype konverter. Tegangan

sumber= 110 V_{peak}, 50 Hz. Saklar S di switching pada 5 kHz dengan duty cycle 80%. Beban berupa R_o=50Ω dan L_o=100 mH, atau cos φ= 0,85.

Hasil penelitian konverter PWM masing-masing dari simulasi dan test laboratorium ditunjukkan pada Gambar 7 dan 8.



Gambar 6. Prototype konverter PWM dengan saklar free-wheeling

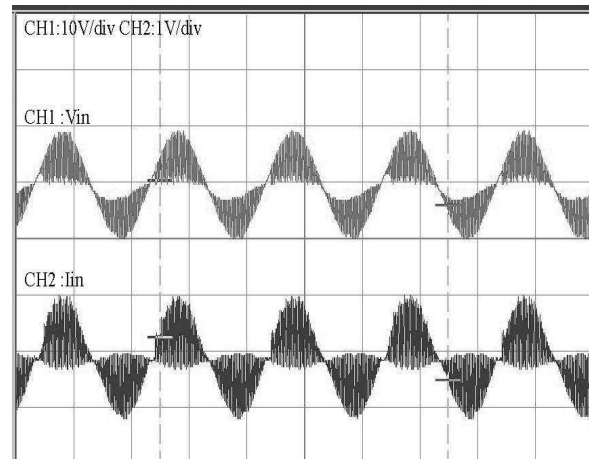


Gambar 7. Hasil simulasi metode PWM: bentuk tegangan dan arus input saat D=80%

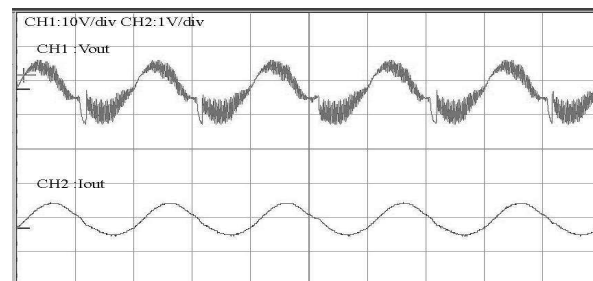
Tegangan input rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 7 terlihat sinusoida murni, sedangkan hasil pengukuran pada Gambar 8 menunjukkan bahwa tegangan input sistem masih mengandung frekuensi tinggi akibat efek pencacahan oleh saklar S. Hal ini disebabkan oleh kinerja filter yang kurang sempurna. Arus input terlihat sefase dengan tegangan baik pada hasil simulasi maupun hasil test. Beban yang digunakan dalam percobaan ini adalah induktif dengan faktor daya 0,85. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi perbaikan faktor daya oleh saklar free-wheeling dapat bekerja dengan baik. Faktor daya pada sisi input sistem mendekati 1 meskipun beban mempunyai faktor daya 0,85 tertinggal.

Pada sisi output rangkaian, yaitu terminal konverter yang terhubung dengan beban, bentuk gelombang tegangan dan arus diperlihatkan pada Gambar 9. Bentuk gelombang tegangan dan arus output terlihat tidak banyak terdistorsi frekuensi tinggi. Frekuensi tinggi yang ada telah diserap oleh filter LC yang dipasang parallel terhadap beban. Magnitudo tegangan terlihat lebih rendah 80% dibanding tegangan inputnya akibat Duty cycle yang dioperasikan pada saklar S. Arus output terlihat tertinggal

terhadap tegangan output karena beban berupa induktif dengan faktor daya 0,85.

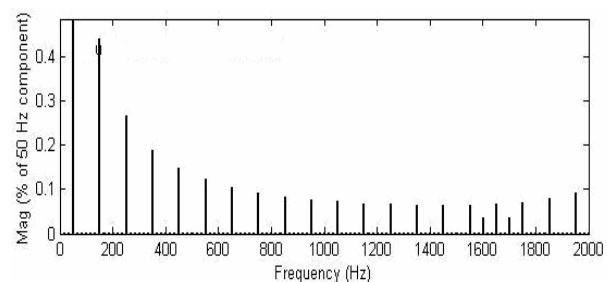


Gambar 8. Hasil test metode PWM: bentuk tegangan dan arus input (probe 1 skala 1/10, probe 2 skala 1/1) saat D=80%

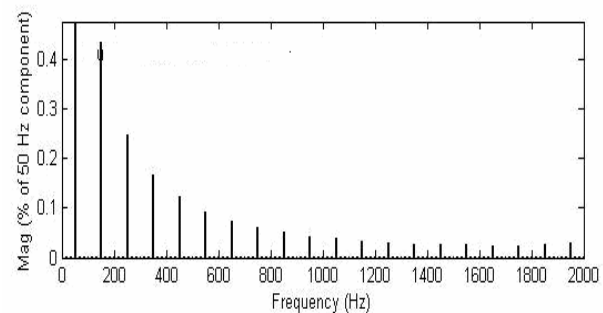


Gambar 9. Hasil test metode PWM: bentuk tegangan dan arus output saat D=80%

Spektrum harmonisa untuk tegangan dan arus output ditunjukkan pada Gambar 10 dan 11. Total Harmonic Distortion (THD) tegangan output adalah 2,45%, sedangkan THD arus output = 0,95%.



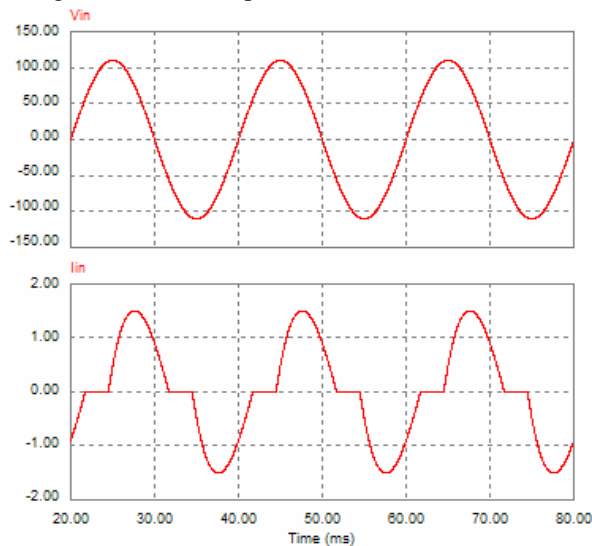
Gambar 10. Spektrum harmonisa tegangan output metode PWM, THD=2,45%



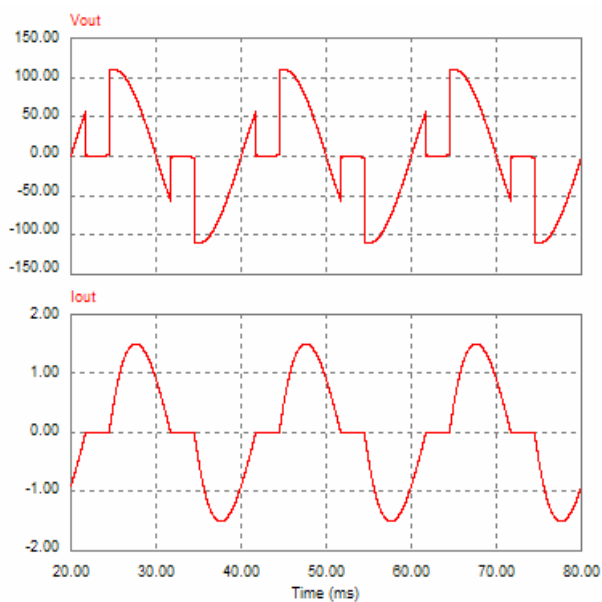
Gambar 11. Spektrum harmonisa arus output metode PWM, THD=0,95%

Unjuk kerja metode PWM terlihat lebih bagus jika dibandingkan dengan metode Kontrol Fase untuk kondisi yang sama. Bentuk gelombang tegangan dan arus input/output serta spectrum harmonisa untuk metode Kontrol Fase ditunjukkan pada Gambar 12 dan 13.

Tegangan output metode Kontrol Fase mempunyai bentuk gelombang non sinusoida dimana harmonisa dominan adalah orde rendah. THD tegangan pada 62,1%, sedangkan THD arus input = 29,4%.

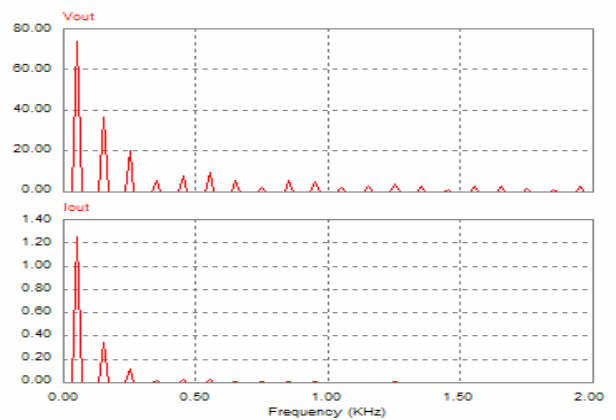


Gambar 12. Bentuk gelombang tegangan dan arus input metode Kontrol Fase

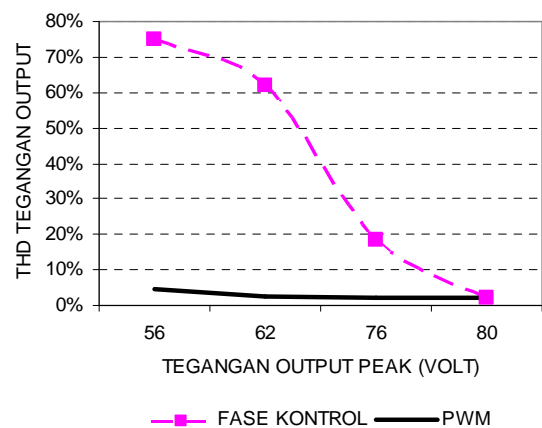


Gambar 13. Bentuk gelombang tegangan dan arus output metode Kontrol Fase

Perbandingan unjuk kerja THD tegangan output untuk konverter PWM dan Fase Kontrol disajikan pada Gambar 14. Terlihat bahwa konverter PWM dalam penelitian ini memberikan THD yang relatif rendah untuk pengaturan tegangan yang lebar. Sebaliknya Fase Kontrol mempunyai THD yang cukup besar pada saat tegangan output rendah dan menurun secara eksponensial saat tegangan output naik mendekati harga rms sumber.



Gambar 14. Spektrum harmonisa tegangan dan arus output metode Kontrol Fase



Gambar 15. THD tegangan output

Faktor kerja pada beban diatas untuk konverter PWM menghasilkan faktor daya mendekati 1, sedangkan metode Kontrol Fase menghasilkan 0,34 s/d 0,71.

IV. KESIMPULAN

Konverter AC-to-AC satu fasa menggunakan metode Pulse Width Modulation dengan saklar free-wheeling telah didesain, disimulasi dan dibuat prototypenya. Performansi THD dan faktor kerja menunjukkan hasil yang jauh lebih baik dibanding dengan metode konvensional, Kontrol Fase. Hasil simulasi dan pengukuran menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini mampu menurunkan total harmonic distortion (THD) tegangan dari 62.1% menggunakan sistem konvensional menjadi sebesar 2,45%. Perbaikan dalam hal faktor daya menunjukkan hasil yang cukup signifikan, yaitu dari 0,34–0,71 menggunakan sistem konvensional menjadi unity.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sasan Jalali, Ian Dobson, Robert H. Lasseter, and Giri Venkataramanan, "Switching Time Bifurcations in a Thyristor Controlled Reactor", *IEEE Transact on Circuits and Systems Fundamental Theory and Appl*, vol. 43, no. 3, March, 1996.
- [2] Mochamad Ashari, "Analisis Reaktansi dan Distrorsi harmonisa Thyristor Controlled Series Capacitor", *Seminar Sistem Tenaga Elektrik III, ITS Surabaya*, 8 Oktober 2002.
- [3] Ahmed, Nabil A., Kenji Amei, dan Masaaki Sakui, Member IEEE, "A New Configuration of Single-Phase Symmetrical

- PWM AC Chopper Voltage Controller”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 46, no.5, October 1999.
- [4] Choe, G. H., A. K. Wallace, dan M. H. Park, “An Improved PWM Technique for AC Chopper”, *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 4 pp. 496-505, Oct. 1989.
- [5] Luis AC Lopes, Geza Joos, “Pulse Width Modulated Capacitor For Series Compensator”, *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 16, pp 167-172, no. 2, March 2001
- [6] Ashari, M., C.V. Nayar and W.W.L. Keerthipala, “Optimum Operation Strategy and Economic Analysis of a PV-Battery-mains Hybrid Uninterruptible Power Supply”, *the International Journal of Renewable Energy*, vol. 22, Elsevier Science Publisher, Jan - Mar 2001, pp. 247-254.
- [7] Ashari, M., W.W.L. Keerthipala and C.V. Nayar, “A Single Phase Parallely Connected Uninterruptible Power Supply/ Demand Side Management System”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 15, No. 1, March 2000, pp.97-102.
- [8] Ashari, M., and C.V. Nayar, “An Optimum Dispatch Strategy Using Set Points for A PV/ Diesel/ Battery Hybrid Power System”, *the International Journal of Solar Energy*, vol. 66, No. 1, Elsevier Science Publisher, July 1999, pp.1-9.
- [9] Nayar, C.V., and M. Ashari, “Phase Power Balancing of a Diesel Generator Using a Bi-Directional PWM Inverter”, *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 19, no. 11, Nov 1999, pp.46-47.
- [10] Rashid, M. H., “Power Electronics:Circuits, Devices and Applications,” 2nd ed. *Englewood Cliffs: Prentice Hall*, 1993.