

Analisis *Ripple* Masukan dan Keluaran PWM AC Chopper 3-Fasa pada Beban Motor Induksi 3-Fasa

Muhamad Luthfi, Harry Soekotjo Dachlan dan Wijono

Abstrak—Penggunaan chopper dalam sistem kelistrikan akan menimbulkan ripple pada tegangan keluarannya. Kebanyakan ripple difahami terbangkit pada sisi output. Pada penelitian ini ripple pada sisi input juga dianalisis. Disamping ripple, penggunaan chopper akan membangkitkan harmonisa yang akan menimbulkan rugi-rugi. Untuk memperkecil rugi-rugi tersebut, pada sisi input maupun output perlu dipasang filter LC. Penentuan nilai komponen filter ini dipengaruhi oleh ripple yang timbul. Dengan mengetahui magnitude ripple maka menentukan nilai komponen filter akan lebih akurat. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan simulasi dan hasil percobaan. Hasil percobaan menunjukkan adanya kesamaan dengan hasil simulasi menggunakan *Software PSIM*

Kata Kunci— Chopper, Filter, IGBT, PWM, Ripple..

I. PENDAHULUAN

SISTEM pengaturan sumber daya AC menggunakan beberapa variasi rangkaian, salah satu diantaranya adalah pengaturan tegangan AC dengan menggunakan pengaturan tegangan fasa yang menggunakan komponen Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT). Jenis pengaturan ini sederhana dan banyak digunakan pada pengaturan sistem berkapasitas daya besar. Namun, pengaturan daya dengan menggunakan IGBT ini menyebabkan turunnya faktor daya dan dapat menimbulkan harmonisa yang besar pada sisi masukan maupun sisi keluaran..

Pada umumnya pengaturan tegangan AC dapat diklasifikasikan menjadi dua metode yaitu *indirect-method* dan *direct-method*.

Pada *indirect-method*, tegangan input disearahkan dulu kemudian diubah lagi menjadi bolak-balik terkontrol. Keuntungan sistem ini adalah tegangan output secara independen dikontrol sehingga terdapat dobel konversi.

Pengaturan *direct-method* biasanya menggunakan PWM AC Chopper, sehingga proses konversinya hanya

Muhamad Luthfi adalah Mahasiswa Program Magister Teknik Elektro Universitas Brawijaya, Minat Sistem Tenaga Listrik dan dosen Politeknik Negeri Malang. Dapat dihubungi di HP: 082131222400; email luthfi-polinema@yahoo.ac.id.

Harry Soekotjo Dachlan adalah dosen Pascasarjana, Program Magister Teknik Elektro Universitas Brawijaya.

Wijono adalah dosen Pascasarjana, Program Magister Teknik Elektro Universitas Brawijaya.

sekali. Pada sistem langsung ini frekuensi output akan sama dengan frekuensi input.

Munculnya ripple pada sistem akibat banyaknya beban elektronika maupun beban mesin-mesin listrik. Ripple dapat mengakibatkan efisiensi sistem dan kualitas daya menjadi rendah.

Untuk menjaga agar sistem tetap baik, kemunculan ripple perlu diperhatikan. Pada beban motor listrik, yang startingnya menggunakan perangkat elektronika daya, kemunculan ripple dapat diminimalisir. Filter yang cocok untuk perangkat elektronika daya adalah filter tipe buck, yaitu terdiri dari filter input dan filter output yang terdiri dari komponen induktor dan kapasitor.

Analisis ripple, baik ripple input, maupun ripple output penting untuk di analisa dan kebanyakan dipakai dalam perancangan filter LC sehingga dengan mengetahui ripple yang timbul maka filter LC yang hendak dibuat, hasilnya akan lebih maksimal.

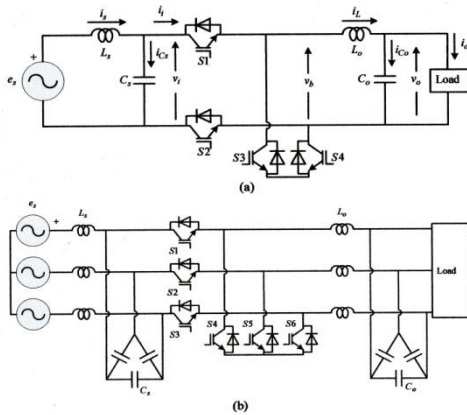
Dalam penelitian ini, manfaat yang diharapkan adalah dengan diketahuinya pengaruh ripple input maupun ripple output pada peralatan pengatur tegangan, maka perlu dirancang filter LC pada sisi input maupun sisi output. Dengan demikian daya pada beban lebih maksimal karena kualitas daya masukan lebih baik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Sebagaimana diketahui penggunaan komponen elektronika daya dalam sistem tenaga listrik semakin luas. Komponen elektronika daya tersebut seperti yang dimanfaatkan dalam sistem-sistem pengaturan akan menimbulkan ripple maupun harmonisa. Dengan timbulnya ripple maupun harmonisa ini, bentuk gelombang akan mengalami perubahan sehingga pada akhirnya akan berpengaruh pada daya yang disalurkan.

Berkaitan dengan bentuk gelombang tersebut, dari penelitian yang dilakukan oleh Jang [1] diketahui bahwa dengan pengaturan sudut penyalan dapat dilakukan untuk memperbaiki faktor daya. Dalam penelitian ini juga ditunjukkan bahwa ripple pada gelombang tegangan akan menurunkan nilai rms tegangan, sehingga akan berpengaruh pada penurunan daya. Penelitian lain yang dilakukan oleh Lefeuvre [2] dijelaskan bahwa harmonisa yang timbul cukup signifikan. Dari penelitian ini diperlihatkan bahwa harmonisa perlu direduksi dengan penggunaan filter yang tepat. Dengan memperhatikan hasil penelitian di atas maka dapat diambil kesimpulan bahwa penggunaan

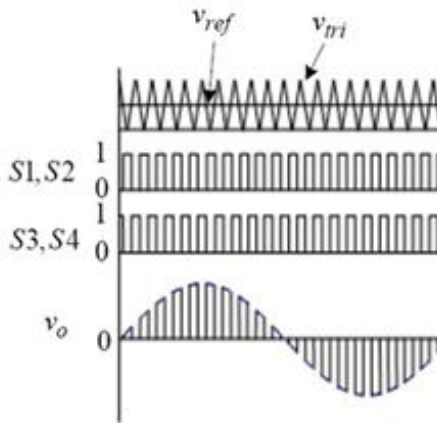
komponen elektronika pada sistem daya diperlukan perhitungan yang akurat untuk menghasilkan *ripple* yang rendah dan bisa memperbaiki sistem.



Gambar 1. (a) Rangkaian Choppers 1-fasa
(b) Rangkaian Choppers 3-fasa

Pada bagian berikut, analisis *ripple input* dan *output* pada *PWM AC Chopper* akan dibahas. Dalam analisis ini, diasumsikan bahwa:

- Frekuensi pembawa jauh lebih tinggi dari pada frekuensi sumber.
- Beban adalah beban linier.
- Switching diasumsikan sebagai saklar yang ideal.
- Parameter filter LC adalah konstanta.



Gambar 2. Bentuk Gelombang PWM AC Chopper 1-fasa

III. ANALISIS RIPPLE PWM AC CHOPPER 1-FASA

A. Analisis Ripple Input

Dalam analisis ini, diasumsikan bahwa arus *output* sinusoida murni,

$$\tilde{I}_{i,rms} = \sqrt{I_{i,rms}^2 - \bar{I}_i^2} = I_L \sqrt{\alpha(1-\alpha)} \quad (1)$$

$$\tilde{V}_{i,av} = \frac{I_L \alpha(1-\alpha)}{C_s f_s 2\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\tilde{I}_{s,av} = \frac{I_L \alpha(1-\alpha)}{12 f_s^2 L_o C_o} \sqrt{\frac{1+2\alpha-2\alpha^2}{5}} \quad (3)$$

Rumus diatas sangat berguna untuk merancang filter input LC.

B. Analisis Ripple Output

Analisis dibatasi hanya modus konduksi berkesinambungan. Untuk tujuan analisis *ripple output*, *ripple* tegangan pada *input* filter kapasitor diabaikan.

Hal ini juga diasumsikan bahwa tegangan *input* kapasitor, Cs, sama dengan sumber tegangan.

$$\tilde{V}_{o,av} = \frac{E_s \alpha(1-\alpha)}{12 f_s^2 L_o C_o} \sqrt{\frac{1+2\alpha-2\alpha^2}{5}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T_s} = \frac{V_{ref}}{V_{tri}} \quad (5)$$

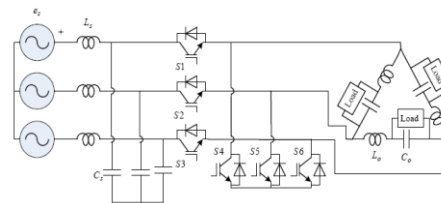
Adalah *duty factor* perangkat *switching*.

Hasil di atas menunjukkan bahwa *ripple* tegangan *output* berbanding terbalik dengan kuadrat frekuensi pembawa. hasil *ripple* tegangan *output* diperlukan dalam merancang filter *output* LC

C. Analisis Ripple AC Chopper 3-fasa

Dalam *chopper* 3-fasa perangkat *switching* S1,S2 dan S3 menerima sinyal ON dan *switching* S4, S5, dan S6 menerima sinyal OFF selama modus aktif. Di sisi lain selama modus *freewheeling*, perangkat *switching* S1, S2, dan S3 menerima sinyal OFF dan *switching* S4, S5, dan S6 menerima sinyal ON.

Untuk menyederhanakan analisis *ripple output*, *output* dari rangkaian *chopper* 3-fasa digambar ulang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dibawah ini.



Gambar 3. Rangkaian AC Chopper 3-fasa

Nilai induktansi dan kapasitansi filter *output* LC harus diubah yang sesuai.

Dengan menggunakan gambar ini, *ripple* arus induktor *output chopper* 3-fasa dapat diperoleh dengan cara yang sama untuk *ripple* arus *output chopper* 1-fasa. Karena kita menggunakan tegangan fasa sebagai referensi, sehingga hasil *ripple* arus *output* dalam hubungan segitiga akan sama dengan *ripple* arus *output* 1-fasa.

Jadi, *ripple* arus induktor adalah:

$$\tilde{I}_{L,av}^A = \frac{E_{ll} \alpha(1-\alpha)}{2\sqrt{3} f_s L_o} \quad (6)$$

Untuk mendapatkan *output ripple* arus induktor, dapat dihitung menggunakan 3 line antar fasa dalam sistem tiga fasa, sehingga mendapatkan *ripple* arus *output* sebesar:

$$\tilde{I}_{L,av} = \frac{E_{ll} \alpha(1-\alpha)}{2\sqrt{3} f_s L_o} \quad (7)$$

Metode yang sama dapat digunakan untuk menentukan tegangan *ripple output* kapasitor, hasilnya adalah :

$$\tilde{V}_{o,av} = \frac{E_{ll} \alpha(1-\alpha)}{12 f_s^2 L_o C_o} \left(\frac{1+2\alpha-2\alpha^2}{5} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Arus *input* dan tegangan *ripple* dari *chopper* 3-fasa dapat diperoleh menggunakan persamaan yang sama

seperti *chopper* 1-fasa.

D. Penentuan Filter LC

Induktansi dari filter *output* dapat ditulis sbb:

$$L_o = \frac{E_s \alpha (1-\alpha)}{12 f_s^2 C_o \bar{V}_{o,av}} \left(\frac{1+2\alpha-2\alpha^2}{5} \right)^{1/2} \quad (9)$$

Daya reaktif dapat dihitung:

$$P_r = \frac{\omega E_s F(\alpha)}{12 f_s^2 C_o \bar{V}_{o,av}} [(Re\{I_o\})^2 + (Im\{I_o\} - \omega C_o \bar{V}_o)^2] + \omega C_o \bar{V}_o^2 \quad (10)$$

Dimana:

$$F(\alpha) = \alpha(1-\alpha) \left(\frac{1+2\alpha-2\alpha^2}{5} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Setelah filter kapasitansi diperoleh, maka filter induktansi dapat dihitung dengan menggunakan rumus diatas. Sebuah metode yang sama digunakan untuk menentukan induktansi optimum dan kapasitansi filter LC *input*.

IV. BAHAN DAN ALAT

- *Software* : PSIM versi 4.1
- *Hardware* : - Rangkaian *Chopper*
- Rangkaian Filter LC
- Rangkaian beban
- Alat : - Oscilloscope Dual Chanel
- Power Suplai AC dan DC
- Volt-meter dan Amper-meter
- Generator Fungsi
- Laptop dan kamera

Foto pada saat pengambilan data:



Gambar 4. Foto Pengambilan Data Di Laboratorium

V. HASIL SIMULASI PSIM DAN HASIL PERCOBAAN

A. Rangkaian Percobaan PWM AC Chopper 1-Fasa

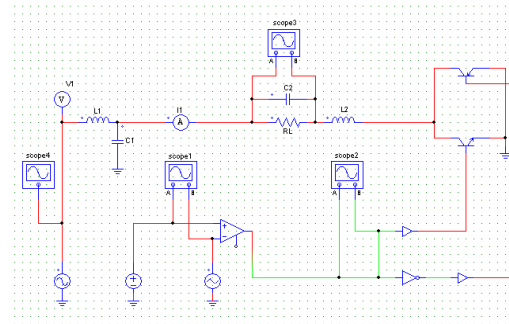
Untuk pembuktian bahwa *Chopper* bisa dilakukan pada gelombang AC, maka pada percobaan berikut ini adalah *Chopper* 1-fasa dengan *trigger* PWM. Pada setiap bagian dari *Chopper* dipasang *Oscilloscope*, tujuannya adalah untuk mengontrol bentuk gelombang tegangan dan besar frekuensi pada setiap bagian.

- Dengan filter input, L= 12,5 mH dan C= 16 uF
- Dan filter output, L= 12,5 mH dan C= 4 uF. R= 10 Ohm.

B. Cara Kerja Rangkaian

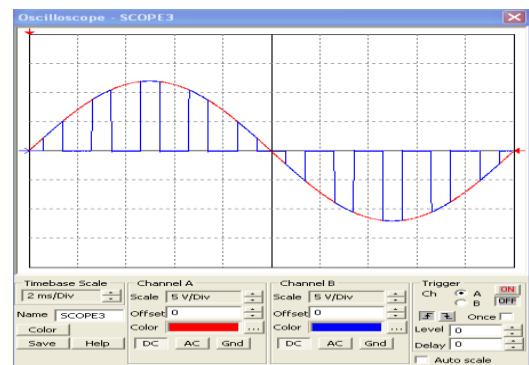
Tegangan AC 1-fasa sebesar 12 Volt (V *peak*)

dicacah dengan rangkaian *Chopper* berupa transistor yang dipasang saling komplemen negatif (tipe NPN dan PNP). Pensaklaran transistor NPN disulut dari pulsa *trigger* positif dan transistor PNP disulut dengan *trigger* negatif dari rangkaian PWM.

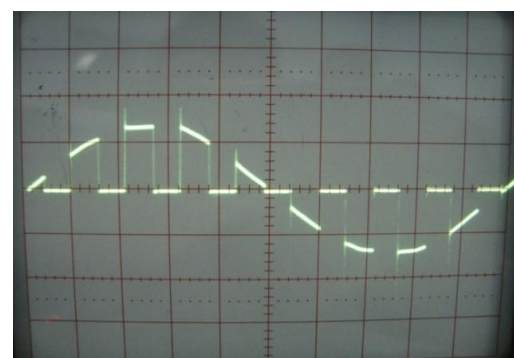


Gambar 5. Rangkaian Simulasi dan Percobaan PWM AC Chopper 1-Fasa

Pada percobaan ini menggunakan sumber AC 12 V_{peak}, hal ini disesuaikan dengan kemampuan komponen yang digunakan, namun tidak mengurangi/mengganggu prinsip kerja rangkaian secara utuh. Gambar 6-8 dibawah adalah hasil simulasi PSIM. Dan hasil Percobaan pada 3 macam frekuensi.



Gambar 6(a). Hasil Simulasi PSIM f=500Hz

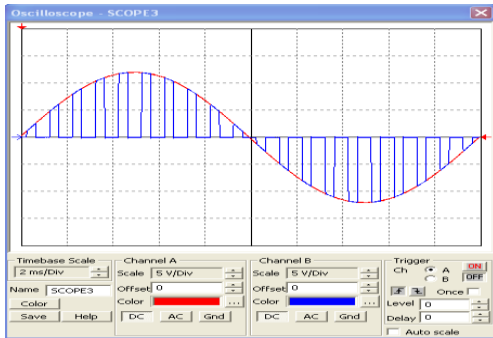


V/div=10 dan t/div=2mS
Gambar 6(b). Hasil Percobaan f=500Hz

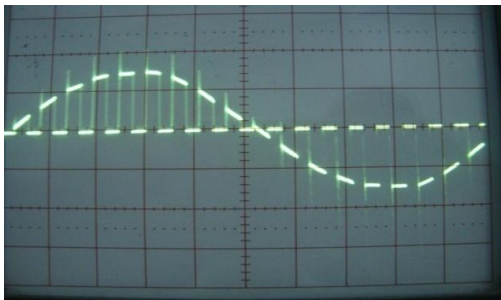
Gambar 6.(a)(b) sampai 8.(a)(b) adalah hasil simulasi PSIM dan hasil percobaan laboratorium untuk rangkaian *chopper* 1-fasa. Percobaan ini menggunakan modul transistor sebagai *switching*, dioperasikan pada frekuensi *switching* 500 Hz, 1.000 Hz dan 1.500 Hz.

L = 12,5 mH dan C = 16 uF digunakan sebagai filter LC *input* untuk memastikan bentuk gelombang sumber *input* yang baik, sedangkan L = 12,5 mH dan C = 4 uF digunakan sebagai filter LC *output*. Sebuah resistor 10

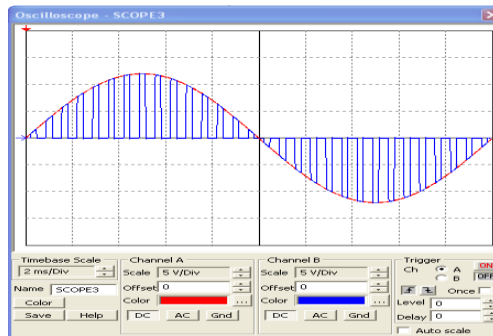
Ω digunakan sebagai beban *chopper* AC 1-fasa .
 Tegangan *input* tetap pada 12 V (50Hz), sedangkan tegangan *output* adalah variabel sebagai fungsi dari tegangan referensi.



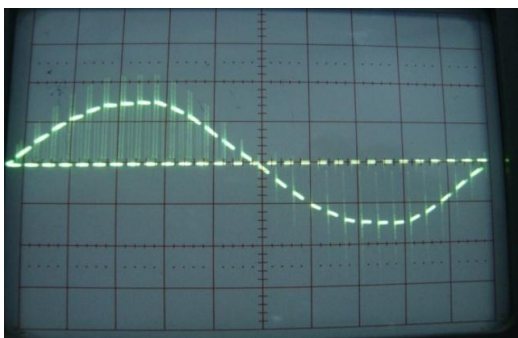
Gambar 7(a). Hasil Simulasi PSIM $f=1.000\text{Hz}$



$V/\text{div}=10$ dan $t/\text{div}=2\text{mS}$
 Gambar 7(b). Hasil Percobaan $f=1.000\text{Hz}$



Gambar 8(a). Hasil Simulasi PSIM $f=1.500\text{Hz}$

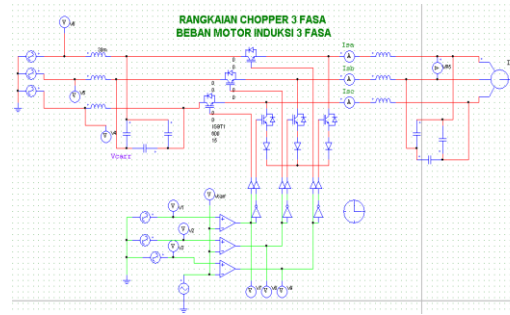


$V/\text{div}=10$ dan $t/\text{div}=2\text{mS}$
 Gambar 8(b):Hasil Percobaan $f=1.500\text{Hz}$

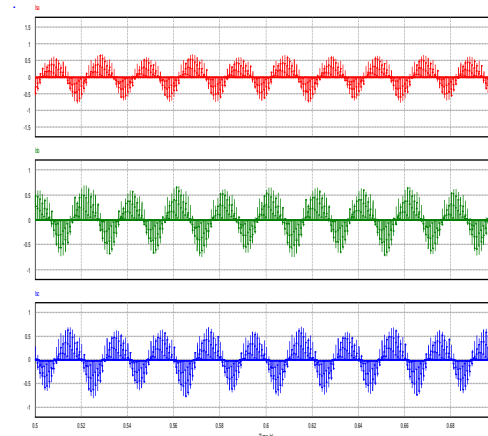
VI. SIMULASI

Perencanaan *PWM AC Chopper* dapat disimulasikan menggunakan *Software PSIM* Versi 4.1. Rangkaian simulasi PSIM dengan beban Motor Induksi 3-Fasa dapat dilihat pada Gambar 9. Keluaran dari simulasi

tersebut diperlihatkan dalam Gambar 10.



Gambar 9. Rangkaian Simulasi PSIM dengan beban Motor Induksi 3-Fasa



Gambar 10. Bentuk Gelombang Output Pada fasa RST dengan $f= 1.000 \text{ Hz}$

VII. ANALISA

A. Rangkaian 1-Fasa

Untuk pembuktian bahwa *chopper* bisa dilakukan pada gelombang AC, maka pada percobaan berikut ini adalah *chopper* 1-fasa dengan *trigger PWM*. Pada setiap bagian dari *chopper* dipasang *Oscilloscope*, tujuannya adalah untuk mengontrol bentuk gelombang tegangan dan besar frekuensi pada setiap bagian.

B. Hasil Simulasi PSIM dan Percobaan 1-Fasa

Pada bagian berikut ini akan ditunjukkan dan dibandingkan bentuk gelombang *output* dari *Software PSIM* dengan hasil percobaan laboratorium. Percobaan *Chopper* 1-fasa ini dicoba pada 3 macam frekuensi *switching*, yaitu 500Hz, 1.000Hz dan 1.500Hz. Gambar pada halaman berikut menunjukkan hasil tampilan *Software PSIM* dan hasil Percobaan Laboratorium.

Tegangan input tetap pada 12 V (50Hz), sedangkan tegangan output adalah variabel sebagai fungsi dari tegangan referensi.

Dari hasil simulasi PSIM, $f = 500 \text{ Hz}$ diperoleh:

$$V_{\text{peak}} = 2,4 \times 5 \text{ V/div} = 12 \text{ V}$$

Jadi persamaan gelombang sinus $V=12 \text{ Sin } \omega t$
 Sedangkan persamaan untuk *chopper* gelombang sinus adalah:

$$V = \alpha \times 12 \text{ Sin } \omega t$$

Dimana:

$$\alpha = T_{\text{ON}}/T_s$$

$$T_{on} = 2 \times 2\text{ms/div} = 4 \text{ ms}$$

$$\text{Sedangkan } T_{periode} = 10 \times 4\text{ms/div} = 40 \text{ ms}$$

$$\text{Maka: } \alpha = 4/40 = 0,1$$

Ripple tegangan dapat dicari dengan rumus (8):

Dimana:

$$E_{II} = 12 \text{ V}; f_s = 500 \text{ Hz}; L_o = L_2 = 12,5 \text{ mH} \text{ dan } C_o = C_2 = 4 \text{ uF}$$

$$\alpha = 0,3 \text{ (simulasi) dan } \alpha = 0,6 \text{ (percobaan).}$$

Maka ripple tegangan dari hasil simulasi,

$$\tilde{V}_{o,av} = \frac{12 \times 2(1 - 0,3)}{12 \times 500^2 \times 12,5 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^{-6}} \left(\frac{1 + 2 \times 0,3 - 2 \times 0,3^2}{5} \right)^{1/2}$$

$$\tilde{V}_{o,av} = 59,7$$

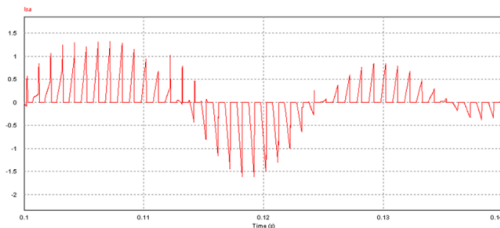
Sedangkan dari hasil percobaan *ripple* tegangan adalah,

$$\tilde{V}_{o,av} = \frac{12 \times 2(1 - 0,6)}{12 \times 500^2 \times 12,5 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^{-6}} \left(\frac{1 + 2 \times 0,6 - 2 \times 0,6^2}{5} \right)^{1/2}$$

$$\tilde{V}_{o,av} = 34,8$$

C. Ripple Arus Output Induktor pada rangkaian 3-fasa

Gambar di bawah adalah bentuk gelombang arus pada sisi *output* dengan beban motor induksi yang terhubung segitiga.



Gambar 11. Gelombang *Output* Beban Motor Induksi 3-Fasa

Untuk mendapatkan *output ripple* arus induktor, hanya dapat menggunakan 3 *line* antar fasa dalam sistem tiga fasa, sehingga *ripple* arus *output* dapat dihitung menggunakan rumus (7):

$$\text{Tegangan } \textit{line-line} = E_{II} = 35 \text{ Volt (tegangan fasa)} \times \sqrt{3} = 60,621 \text{ Volt}$$

Duty Factor perangkat *switching*,

$$\alpha = T_{ON} / T_s$$

$$= V_{ref} / V_{trigger}$$

Dari data fasa R $T_{ON} = 11 \text{ mS}$, dan $T_{periode} = 20 \text{ mS}$ (frekuensi 50Hz) maka nilai α adalah:

$$\alpha = T_{ON} / T_s = 14/20 = 0,7$$

$$\text{Sedangkan } f_s = 1.000\text{Hz}; L_2 = 10 \text{ mH}$$

Jadi besarnya *ripple* arus *output* induktor adalah:

$$\tilde{I}_{L,av} = \frac{60,621 \times 0,7 \times (1 - 0,7)}{2\sqrt{3} \times 10 \times 10^{-3}} = 0,368$$

D. Ripple Tegangan Output Kapasitor

Dari data fase R $T_{ON} = 14 \text{ mS}$, dan $T_{periode} = 20 \text{ mS}$ (frekuensi 50Hz) maka nilai α adalah: $\alpha = T_{ON} / T_s = 14/20 = 0,7$

$$\text{Sedangkan } f_s = 1.000\text{Hz}; L_2 = 10\text{mH}, C_2 = 250\text{uF.}$$

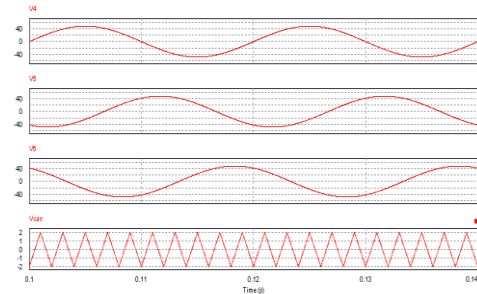
$$\tilde{V}_{o,av} = \frac{60,621 \times 0,7 \times (1 - 0,7)}{12 \times 1.000^2 \times 10 \times 10^{-3} \times 250 \times 10^{-6}}$$

$$\left(\frac{1 + (2 \times 0,7) - (2 \times 0,7^2)}{5} \right)^{1/2}$$

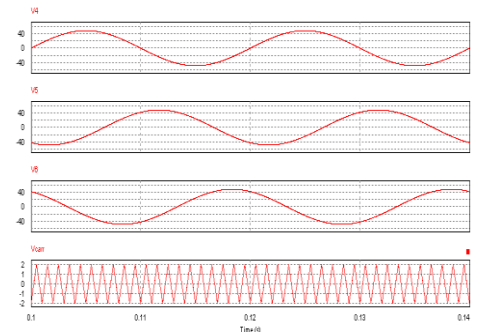
$$\tilde{V}_{o,av} = 0,226$$

E. Pengaruh Frekuensi Chopper Terhadap Frekuensi Sistem

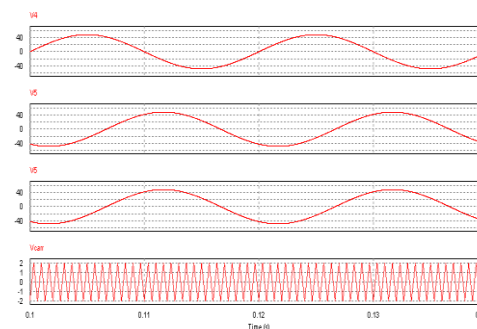
Frekuensi *chopper* bekerja jauh diatas frekuensi sistem, sistem bekerja pada frekuensi 50Hz, yaitu frekuensi sumber tegangan. Sedangkan *chopper* bekerja pada frekuensi 500Hz, 1.000Hz dan 1.500Hz. Dengan demikian maka kedua frekuensi tersebut berdiri sendiri-sendiri dan tidak saling mempengaruhi. Sedangkan frekuensi output adalah 50Hz, sama dengan frekuensi input. Hanya saja bentuk gelombangnya berbeda, tegangan input bentuknya sinusioda murni sedangkan tegangan outputnya berbentuk sinusioda yang dicacah. Untuk menjelaskan hal ini, gambar dibawah menunjukkan gelombang sistem dan gelombang *chopper*.



Gambar 12. Frekuensi sistem 50Hz dan frekuensi Chopper 500Hz



Gambar 13. Frekuensi sistem 50Hz dan frekuensi Chopper 1.000Hz



Gambar 14. Frekuensi sistem 50Hz dan frekuensi Chopper 1.500Hz

VIII. KESIMPULAN DAN SARAN

Adapun kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah :

1. Dari percobaan laboratorium, bentuk gelombang *output* pada frekuensi 500Hz, 1.000Hz maupun 1.500Hz hasilnya sama dengan hasil simulasi PSIM. Hal ini dikarenakan menggunakan beban R murni.
2. *Ripple* hasil simulasi lebih besar bila dibandingkan dengan hasil percobaan . Hal ini dikarenakan pada simulasi semua komponen ideal, sedangkan pada percobaan ada nilai toleransi komponen.g
3. Metode analisis yang dibahas sangat berguna dalam mendesain filter *input* dan filter *output* LC PWM AC Chopper 1-fasa maupun 3-fasa.
4. *Ripple* arus *output* induktor dan *ripple* tegangan *input* kapasitor berbanding terbalik dengan frekuensi *switching*.
5. Nilai kapasitor *output* dan *ripple* arus output kapasitor berbanding terbalik dengan kuadrat frekuensi *switching*.
6. Sebaiknya kriteria dalam mendesain berdasarkan daya reaktif minimum filter LC. Hasil analisis yang dibahas telah dicocokkan dengan hasil percobaan.

Pembahasan ini sangat berguna dalam merancang filter *input* maupun filter *output* pada PWM AC Chopper 3-fasa. Rangkaian PWM AC Chopper 1-fasa maupun 3-fasa dapat dikembangkan dan di aplikasikan untuk *starting* motor listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jang, DH, (2003.). " *Improvement of Power Factor in AC Choppers Using Asymmetrical PWM Technique* ".Journal.
- [2] Lefeuvre,E, (2005). " *Robust Two Level and Multilevel PWM AC Choppers* ".Journal.
- [3] Pekik Argo Dahono, 2008, Analysis of Input and Output Ripples of PWM AC Choppers, Journal ITB.
- [4] C.De La Rosa, Francisco, 2006. " *Harmonic and Power System* ",CRC Press, Boca Raton London, New York, Washington, D.C.
- [5] Espinoza, José R. 2001. " *Selective Harmonic Elimination and Current/VoltageControl in Current/Voltage-Source Topologies: A Unified Approach*,"IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 48, NO. 1.
- [6] Rashid, Muhammad. 2001." *Power Electronics Handbook*, " Academic Press.