

ANALISIS PERBANDINGAN PENGGUNAAN TIPE PENYALAAAN KONTROL JARAK SAMA DAN SUDUT SAMA PADA PENYEARAH TERKENDALI TIGA PHASA

Sudirman S., dan Sri Kurniati A.

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Indonesia

E-mail: Sridirman@yahoo.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan pengaruh tipe penyalaaan kontrol jarak sama dan kontrol sudut sama pada penyearah tiga fasa terkendali dengan melihat harmonisa yang ditimbulkan pada input tegangan. Kemudian menghitung efisiensi penyearah dan perbandingan faktor kerja dari kedua tipe kontrol tersebut. Rangkaian penyearah menggunakan filter pasif dengan beban tahanan sebesar 11 ohm dan dianalisis dengan menggunakan simulasi program PSPICE versi 7. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan kontrol jarak sama menimbulkan harmonisa arus masukan pada orde ke-5 dan ke-7 sedangkan pada kontrol sudut sama menimbulkan harmonisa pada orde ke-3, 5 dan ke-7. Pada sisi keluaran tipe kontrol jarak sama menimbulkan riak tegangan pada orde 6, sedangkan pada tipe kontrol sudut sama menimbulkan riak tegangan pada orde ke-2 dan ke-6. Hasil perhitungan riak tegangan yang terjadi sebesar 3,5% dengan efisiensi 99,8% pada kontrol jarak sama, sedangkan pada kontrol sudut sama diperoleh riak tegangan sebesar 4% dengan efisiensi 99,7%. Selanjutnya pada sudut penyalaaan 30° diperoleh input THD sebesar 50,26% dengan faktor kerja sebesar 0,89 pada tipe kontrol jarak sama, sedangkan pada tipe kontrol sudut sama diperoleh input THD sebesar 53,831% dengan faktor kerja sebesar 0,87. Dari hasil ini menunjukkan bahwa penyalaaan thyristor dengan tipe kontrol jarak sama lebih baik dibandingkan dengan tipe sudut sama.

Abstract

Analysis of three phase controlled rectifier with the same distance control as compared to the same angle control. This research aim to compare the firing of the same distance and the same angle control at three phase controlled rectifier with seen generated harmonic at input (AC side). Then calculate of rectifier efficiency and power factor comparison from both the control type. The rectifier use passive filter with resistance 11 ohm and is analysed with program simulation using PSPICE version 7.1. Result of research indicate that use of the same distance control generates the 5th and 7th harmonics, while the same angle control generates the 3rd, 5th and 7th harmonics at the input (AC side). At the output (DC side), the same distance control type generates the 6th voltage ripples, while the same angle control generates the 2nd, and 6th voltage ripples. The result of calculation of voltage ripples that happened equal to 3.5% with efficiency 99.8% at same distance control, while at the same angle control obtained voltage ripples equal to 4% with efficiency 99.7%. At the firing angle 30° obtained by THD input equal to 50.26% with power factor equal to 0.89 at same distance control type, while the same angle control obtained by THD input equal to 53.831% with power factor to 0.87. From this result indicate that the firing of thyristor with the same distance better then is the same angle control.

Keywords: control type, voltage ripples, efficiency, power factor

1. Pendahuluan

Tenaga listrik memegang peranan yang penting dalam industri. Seringkali bahwa tenaga listrik ini harus dikontrol terlebih dahulu sebelum diberikan ke beban. Untuk mengontrol tenaga listrik biasanya digunakan

suatu konverter. Misalnya, untuk mengatur kecepatan motor DC, maka tenaga listrik AC yang tersedia harus diubah menjadi DC dengan tegangan yang variabel melalui konverter yang berupa penyearah terkendali [1,2]. Pada aplikasi ini biasanya digunakan komponen elektronika daya penyearah *thyristor*. Tegangan

keluaran penyearah thyristor bervariasi tergantung pada sudut penyalan dari *thyristor*.

Namun adanya penggunaan konverter dalam sistem akan menimbulkan tegangan atau arus yang non-sinusoidal. Bentuk tegangan atau arus yang non-sinusoidal tersebut akan menghasilkan arus harmonisa. Kadar harmonisa yang tinggi dalam sistem tidak dikehendaki, karena dapat menimbulkan beberapa kerugian. Diantaranya adalah naiknya distorsi terhadap input, kegagalan fungsi dari peralatan elektronik yang sensitif, menurunkan efisiensi dan yang lebih penting lagi adalah pemborosan energi listrik. Dengan demikian, kadar harmonisa yang terlalu tinggi harus diperkecil.

Beberapa upaya yang telah dilakukan untuk pengurangan harmonisa, diantaranya adalah dengan memasang *L/C tuned filter*, kompensasi fluks magnetik [3], dan juga dilakukan dengan cara menginjeksi harmonisa ke dalam sistem [4]. Kemudian dilanjutkan penelitian tersebut dengan menggunakan injeksi hubungan Z/D [5]. Untuk mendapatkan perbaikan faktor kerja juga dilakukan dengan menggunakan kompensasi kapasitor bank yang dikontrol secara otomatis [6], kemudian dikontrol secara otomatis dengan menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC) [7].

Berkaitan dengan rendahnya faktor kerja yang terjadi pada penyearah terkendali tiga fasa, maka Rashid M [2], menjelaskan bahwa pada dasarnya faktor daya rendah yang terjadi pada penyearah terkendali (*thyristor*) bergantung pada sudut delay dari kontrol fasa konverter. *Thyristor* kontrol fasa dihidupkan dengan pulsa pendek pada gerbangnya dan dimatikan melalui komutasi *natural* atau komutasi *line*, sehingga menghasilkan satu pulsa per setengah siklus dari arus masukan konverter. Beberapa teknik komutasi *thyristor* ini telah dikembangkan untuk meningkatkan power faktor daya masukan dan level harmonisa, salah satu diantaranya adalah komutasi paksa. Kemudian komutasi sudut paksa ini diklasifikasikan lagi menjadi, kontrol sudut simetris (sama), kontrol jarak sama dan kontrol modulasi lebar pulsa [1].

Dari ketiga tipe komutasi paksa, kontrol modulasi lebar pulsa atau *Pulse Width Modulation* (PWM) merupakan tipe kontrol yang sangat baik digunakan untuk meningkatkan faktor kerja penyearah dan mengurangi harmonik arus masukan [8-10]. Karena tipe kontrol PWM dapat dinyalakan dan dimatikan beberapa kali setiap setengah siklus. Dengan kata lain dapat menghasilkan beberapa pulsa per setengah siklus, sehingga dapat meredam harmonik yang timbul pada arus masukan. Sedangkan tipe kontrol jarak sama dan sudut sama tetap menghasilkan satu pulsa per setengah siklus dari arus masukan konverter, sehingga

menghasilkan harmonisa dengan orde terendah. Dalam praktek sangat sulit untuk melakukan penapisan arus harmonisa orde rendah dibanding dengan orde tinggi yang dihasilkan oleh tipe kontrol PWM [11].

Namun kenyataannya dengan pertimbangan ekonomis, masih banyak desain penyearah terkendali tiga fasa tipe jarak sama atau tipe sudut sama digunakan dengan alasan lebih murah dibanding dengan tipe PWM. Kemudian jika ditinjau dari desain dan prinsip kerjanya kedua tipe ini sangat berbeda dengan tipe PWM. Beberapa peneliti sebelumnya telah menggunakan kedua tipe kontrol ini untuk melakukan desain dalam penelitiannya. Diantaranya, [12] telah menggunakan tipe jarak sama untuk menganalisis kinerja penyearah terkendali tiga fasa dengan menggunakan filter hibrid. Kemudian [13, 14] telah menggunakan kedua tipe kontrol ini dalam penelitiannya, namun tidak melakukan perbandingan faktor kerja dari penyearah.

Oleh karena itu, tujuan dalam penelitian ini adalah mencoba menganalisis perbandingan faktor kerja konverter terkendali tiga fasa dengan menggunakan tipe kontrol jarak sama dan tipe kontrol sudut sama. Dengan demikian, diharapkan manfaat penelitian untuk waktu yang akan datang menjadi rujukan pada perancangan suatu konverter yang mempunyai faktor kerja yang baik dengan mempertimbangkan tipe kontrolnya.

2. Metode Penelitian

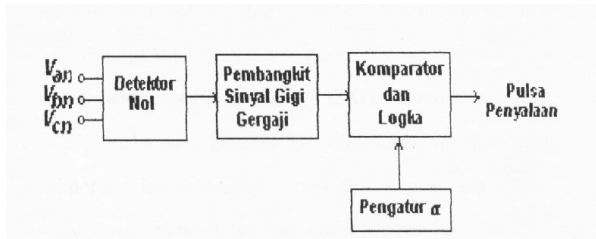
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah melakukan simulasi sesuai dengan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

- Merancang tipe penyalan kontrol jarak sama pada penyearah terkendali 3 fasa dengan filter pasif.
- Merancang tipe penyalan kontrol sudut sama pada penyearah terkendali 3 fasa dengan filter pasif.
- Melakukan simulasi pada kedua tipe penyalan *thyristor*.
- Melakukan analisis THD yang ditimbulkan oleh kedua tipe penyalan *thyristor*.
- Melakukan perhitungan untuk mendapatkan perbandingan nilai THD, kandungan riak dan faktor daya yang diperoleh antara kedua tipe penyalan *thyristor*. Analisis harmonisa untuk arus masukan dan tegangan keluaran tidak membuat persamaan fourier.

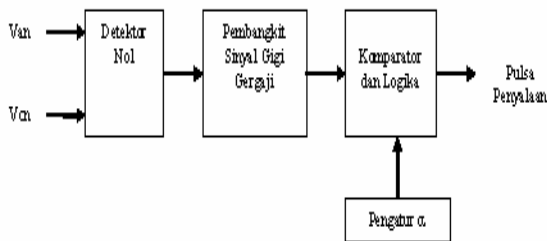
Desain Perangkat Keras

Tipe Penyalan Kontrol Sudut Sama

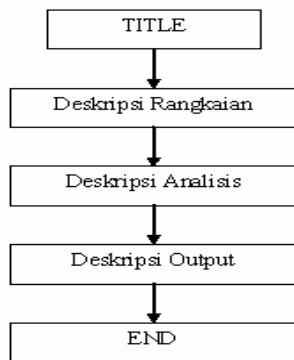
Blok diagram sudut penyalan sudut sama, awal switching ditentukan oleh *zero crossing* tegangan antara fasa dari tegangan sumber tiga fasa, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok pulsa penyalan berdasarkan zero crossing antara fasa



Gambar 2. Diagram Blok sudut penyalan jarak sama



Gambar 3. Diagram Alur pembuatan Listing PSPICE

Tipe penyalan Kontrol Jarak Sama

Sudut penyalan ditentukan oleh titik *zero crossing* antara tegangan masukan $V_{an} - V_{cn}$. Oleh karena itu untuk tegangan seimbang titik nolnya berada pada $\pi/6$ seperti yang diperlihatkan secara blok diagram pada Gambar 2.

Desain Perangkat Lunak

Desain perangkat lunak menggunakan program PSIPCE. Teknik pembuatan *Listing* PSPICE digunakan sistem *Netlist* seperti diagram alur seperti Gambar 3 [6]

Bahan dan Alat yang Digunakan

Bahan yang digunakan adalah komponen-komponen elektronik yang dibutuhkan dalam desain dan tersedia dipasaran dan dalam Toolbox program PSPICE.

Adapun parameter-parameter yang digunakan dalam rangkaian ini adalah:

- Tegangan masukan seimbang $V_{an} = 220V$, $V_{bn} = 220V$ dan $V_{cn} = 220V$.
- Resistansi dan induktansi masukan : $R_s = 0,1$ Ohm dan $L_s = 0,5$ mH.
- Thyristor tipe IR S18F
- Sudut penyalan (Alpha) menggunakan sampel 30 derajat.

Sedangkan alat yang digunakan untuk melakukan simulasi menggunakan perangkat keras komputer PC Pentium III dan perangkat lunak PSPICE Versi 7.1. Kemudian beban keluaran penyearah menggunakan sampel beban resistif sebesar 11 ohm. Walaupun dalam praktek terdapat beban induktif, atau gabungan keduanya. Hal ini dilakukan untuk memudahkan analisis dan simulasi dengan menggunakan program PSPICE dalam melakukan perbandingan kedua tipe kontrol yang akan diteliti.

Teknik Analisis Data

Sesuai dengan tujuan penelitian ini dan berdasarkan hasil olahan program, maka akan dilakukan analisis data berdasarkan kajian deskriptif berupa nilai persentase dan mencari harga rata-rata sesuai dengan hasil simulasi dari *Total Distorsi Harmonik* (THD). Selanjutnya dicari faktor kerja sesuai dengan Pers (1)

$$PF = \frac{1}{\sqrt{(1+THD^2)}} \cos \alpha \quad (1)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Pada tegangan sumber seimbang sesuai dengan Pers. (2-4) pergeseran sudut penyalan tipe sudut sama berdasarkan 6 titik deteksi nol, yaitu: $\pi/6$, $\pi/2$, $5\pi/6$, $7\pi/6$, $3\pi/2$, dan $11\pi/6$. Tegangan sumber tiga fasa, fasa netral :

$$V_{an} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$V_{bn} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (3)$$

$$V_{cn} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (4)$$

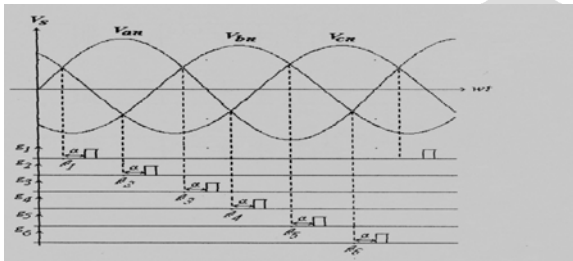
Apabila tegangan masukan tak seimbang, maka sudut penyalannya akan bergeser tergantung dimana titik nol berada. Tegangan masukan antara fasa didapat 6 tempat titik *zero crossing*, yaitu: θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 , θ_5 , dan θ_6 . Jadi sudut penyalan untuk 6 thyristor berturut-turut adalah: $\theta_1 + \alpha$, $\theta_2 + \alpha$, $\theta_3 + \alpha$, $\theta_4 + \alpha$, $\theta_5 + \alpha$, dan $\theta_6 + \alpha$ seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.

Sedangkan sudut penyalan tipe kontrol jarak sama ditentukan oleh titik *zero crossing* antara tegangan

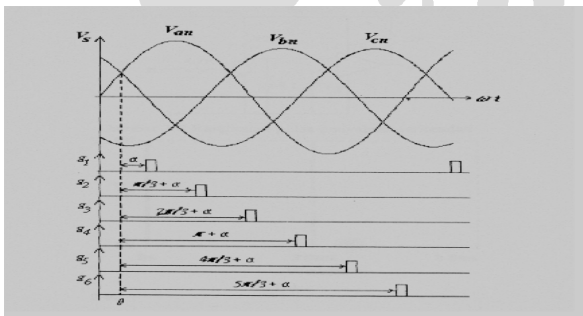
masukan $V_{an} - V_{cn}$. Hasil pulsa penyalan untuk 6 thyristor dengan sudut penyalan berturut-turut : $\theta + \alpha$, $\theta + \pi/3 + \alpha$, $\theta + 2\pi/3 + \alpha$, $\theta + \pi + \alpha$, $\theta + 4\pi/3 + \alpha$, dan $\theta + 5\pi/3 + \alpha$ diperlihatkan pada Gambar 5.

3.1. Bentuk harmonik Arus Masukan dan Tegangan masukan

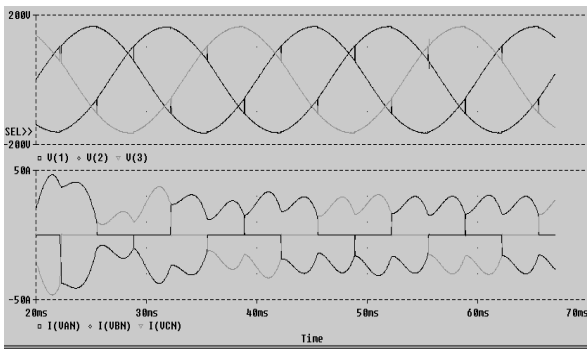
Setelah dilakukan simulasi dari kedua tipe kontrol penyearah terkendali tiga fasa, maka diperoleh hasil bentuk gelombang harmonik arus dan tegangan masukan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6.



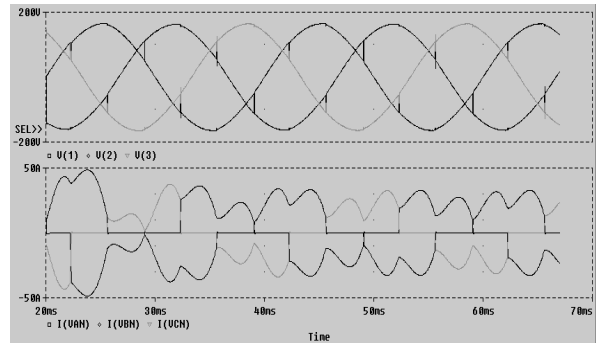
Gambar 4. Tipe penyalan sudut sama



Gambar 5. Hasil Tipe penyalan kontrol jarak sama



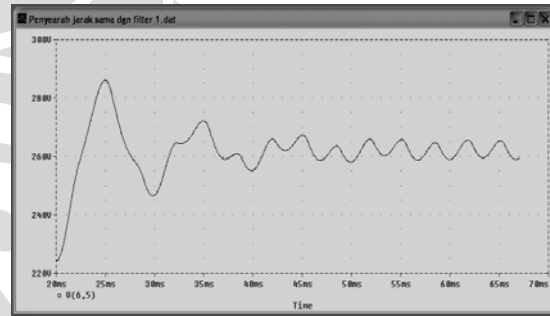
(a) Jarak sama



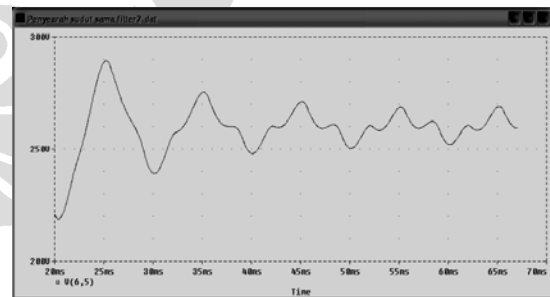
(b) Sudut sama

Gambar 6. Bentuk Gelombang Harmonik Arus dan tegangan pada sudut penyalan 30° .

3.2. Bentuk Gelombang Tegangan Beban Keluaran



(a) Jarak sama

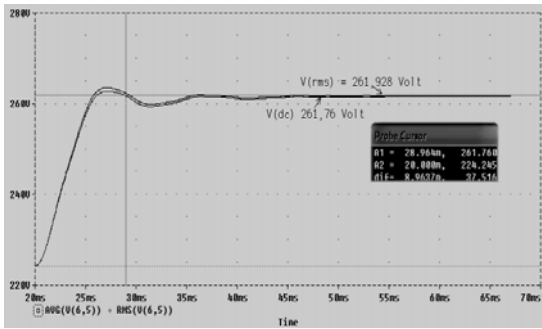


(b) Sudut Sama

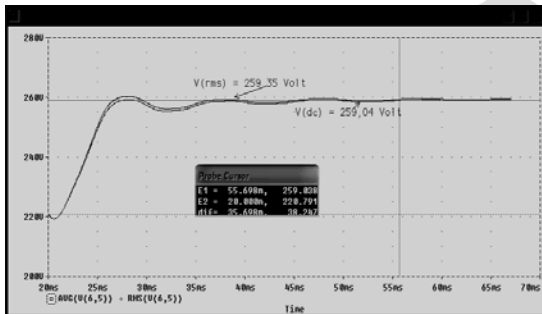
Gambar 7. Bentuk Gelombang Tegangan beban (V_{Load}) keluaran pada Sudut penyalan alpha 30°

3.3. Bentuk Gelombang Tegangan DC Rata-Rata dan Tegangan Efektif

Dari hasil olahan program pada Gambar 8 terlihat bahwa keluaran DC rata-rata (V_{DC}) pada sudut penyalan 30° (sampel) untuk tipe jarak sama = 261,76 Volt, dan tegangan efektif (Rms) = 261,928 Volt, sedangkan untuk sudut sama diperoleh $V_{(rms)} = 259,35$ Volt dan $V_{(dc)} = 259,04$ Volt. Kemudian dari hasil ini

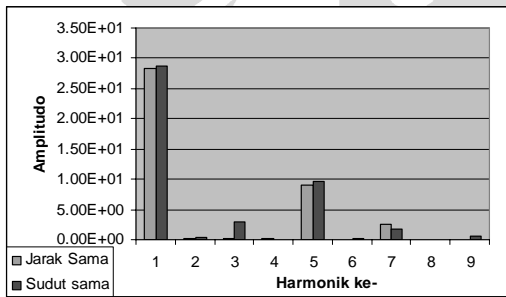


(a) Jarak sama



(b) Sudut sama

Gambar 8. Bentuk Gelombang Teg. DC Rata-rata dan tegangan efektif (RMS) pada sudut penyalan 30°



Gambar 9. Perbandingan Spektrum Harmonik arus masukan antara penyalan jarak sama dengan sudut sama

diperoleh nilai efektif (rms) komponen AC tegangan keluaran sesuai Pers. (5)

$$V_{ac} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2} \quad (5)$$

$$V_{ac} = \sqrt{(261,928^2 - 261,76^2)} = 9,37 \text{ Volt (untuk penyalan jarak sama)}$$

$$V_{ac} = \sqrt{(259,35^2 - 259,04^2)} = 12,67 \text{ (untuk penyalan sudut sama)}$$

Selanjutnya diperoleh kandungan riak tegangan atau factor ripple sesuai dengan rumus:

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} \times 100 \% \quad (6)$$

$$RF = \frac{9,37}{261,76} = 0,035 \times 100 = 3,5 \% \text{ (jarak sama)}$$

$$RF = \frac{12,67}{259,04} = 0,04 \times 100 = 4 \% \text{ (sudut sama)}$$

Kemudian diperoleh efisiensi tipe penyalan jarak sama

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \times 100 \% = \frac{261,76^2 / 11}{261,928^2 / 11} \times 100 \% = 99,8 \%$$

dan efisiensi tipe penyalan sudut sama

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \times 100 \% = \frac{259,04^2 / 11}{259,35^2 / 11} \times 100 \% = 99,7 \%$$

3.4. Bentuk Spektrum Harmonik Arus Masukan

Selain diperoleh bentuk gelombang, program PSPICE juga menghasilkan output komponen fourier arus masukan dan tegangan keluaran. Bentuk spektrum harmonik dari rangkaian penyearah terkendali dengan menggunakan filter LC dengan sudut penyalan 30 derajat dapat dilihat hasilnya Gambar 9.

3.5. Analisis Kandungan Riak dan Efisiensi

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan filter LC, terlihat bahwa kinerja penyearah ini menimbulkan harmonik pada orde ke-5 dan ke-7 (kontrol jarak sama) dan orde ke-3, ke-5 dan ke-7 (kontrol sudut sama). Hal ini juga terlihat dari bentuk gelombang harmonik arus masukan menjadi tidak sinuoidal lagi, atau mengalami pergeseran fasa sehingga menurunkan kinerja atau faktor kerja dari penyearah tersebut. Hal ini juga telah dikemukakan oleh [14] jika harmonisa yang timbul pada input tegangan semakin besar, maka bentuk arus gelombang akan menjadi tidak sinusoidal lagi. Dan ini merupakan salah satu kekurangan dari penggunaan filter pasif. Selanjutnya dari sisi keluaran menimbulkan riak tegangan pada orde ke-6 (kontrol jarak sama) dan orde ke-2 dan ke-6 (kontrol sudut sama).

Dari Gambar 7 terlihat bahwa keluaran penyearah mencapai kondisi steady state pada range 45 ms sampai 70 ms dan diperoleh perhitungan kandungan riak tegangan sebesar 3,5% dengan efisiensi 99,8% untuk tipe kontrol jarak sama. Sedangkan pada tipe kontrol sudut sama mengalami kondisi steady state pada range 55 ms sampai 70 ms atau mempunyai waktu yang lebih lama dibanding dengan tipe kontrol jarak sama dengan kandungan riak tegangan sebesar 4% dan efisiensi 99,7%.

3.6. Analisis Faktor Kerja

Untuk menganalisis faktor kerja penyearah terkendali dalam program PSPICE dapat dilakukan dengan menggunakan data harmonik arus masukan yang dihasilkan oleh hasil simulasi pada setiap tipe rangkaian. Adapun hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 untuk masing-masing tipe penyalan dengan mengambil satu sampel sudut penyalan (sudut 30°). Kemudian hasil analisis faktor kerja untuk berbagai sudut penyalan dapat dilihat pada Tabel 3. Dari Tabel 3 menunjukkan apabila sudut penyalan thyristor diperbesar, maka faktor kerja dari penyearah akan menurun sebanding dengan harmonisanya. Kemudian dari tabel ini juga menunjukkan bahwa faktor

kerja dari tipe kontrol jarak sama lebih baik dibandingkan dengan sudut sama.

Berdasarkan pada tabel hasil olahan program tersebut, maka dapat dihitung faktor kerja dari penyearah sebagai berikut:

$$PF = \frac{1}{\sqrt{(1 + 0,503^2)}} \times 0,99 = 0,89 \text{ Lagging}$$

Dengan menggunakan rumus yang sama, maka faktor kerja masukan dari penyearah dengan tipe kontrol sudut sama diperoleh 0,87.

Tabel 1. Harmonik arus masukan pada penyearah dengan menggunakan filter pasif untuk tipe penyalan jarak sama

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	2.567E+01	1.000E+00	4.597E-01	0.000E+00
2	1.000E+02	4.251E+00	1.656E-01	-1.380E+01	-1.426E+01
3	1.500E+02	6.907E+00	2.690E-01	-9.409E+01	-9.455E+01
4	2.000E+02	1.822E+00	7.097E-02	1.723E+02	1.718E+02
5	2.500E+02	9.516E+00	3.707E-01	1.205E+02	1.200E+02
6	3.000E+02	1.125E+00	4.380E-02	1.193E+02	1.188E+02
7	3.500E+02	1.937E+00	7.546E-02	1.427E+02	4.240E+01
8	4.000E+02	3.970E-01	1.546E-02	4.286E+01	4.240E+01
9	4.500E+02	1.303E+00	5.076E-02	3.943E-01	-6.542E-02
TOTAL HARMONIC DISTORTION = 5.026454E+01 PERCENT					

Tabel 2. Harmonik arus masukan pada penyearah dengan menggunakan filter pasif untuk tipe penyalan sudut sama

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	2792E+01	1.000E+00	3.015E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	4.884E+00	1.749E-01	-2.615E+01	-2.916E+01
3	1.500E+02	9.885E+00	3.540E-01	-1.085E+02	-1.115E+02
4	2.000E+02	1.654E+00	5.923E-02	1.608E+02	1.578E+02
5	2.500E+02	9.768E+00	3.498E-01	1.134E+02	1.104E+02
6	3.000E+02	1.057E+00	3.784E-02	1.127E+02	1.097E+02
7	3.500E+02	1.245E+00	4.459E-02	1.252E+02	1.222E+02
8	4.000E+02	3.807E-01	1.363E-02	5.331E+01	5.029E+01
9	4.500E+02	1.858E+00	6.655E-02	-9.179E+00	-1.219E+01
TOTAL HARMONIC DISTORTION = 5.383161E+01 PERCENT					

Tabel 3. Input THD dan Perhitungan PF dengan sudut penyalan (α) yang bervariasi

Alpha (Derajat)	Jarak sama		Sudut sama	
	THD(%)	PF	THD(%)	PF
15	38,74	0,90	46,84	0,88
30	50,26	0,89	53,83	0,87
45	55,32	0,86	56,92	0,85
60	64,92	0,83	68,75	0,82

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut: (1) Pada penyearah terkendali tiga fasa dengan tipe kontrol jarak sama menimbulkan harmonik arus masukan pada orde ke-5 dan ke-7, dengan riak tegangan keluaran pada orde ke-6. Sedangkan pada tipe kontrol sudut sama menimbulkan harmonik arus masukan pada orde ke-3, ke-5 dan ke-7 serta riak tegangan pada orde ke-2 dan ke-6. (2) Penggunaan tipe kontrol jarak sama menimbulkan riak tegangan pada penyearah terkendali tiga fasa sebesar 3,5% dengan efisiensi 99,8%. Sedangkan pada tipe kontrol sudut sama menimbulkan riak tegangan sebesar 4% dengan efisiensi 99,7%. (3) Pada sudut penyalan 30 derajat tipe jarak sama mempunyai input THD sebesar 50,26% dengan faktor kerja sebesar 0,89 sedangkan pada tipe kontrol sudut sama mempunyai input THD sebesar 53,83% dengan faktor kerja 0,87. (4) Dari hasil perbandingan kedua tipe penyalan thyristor ini, diperoleh bahwa tipe kontrol jarak sama lebih baik dibandingkan dengan tipe kontrol sudut sama.

Daftar Acuan

- [1] Muhammad Rashid. *Elektronika Daya*, PT Prenhallindo, Jakarta, 1993.
- [2] Muhammad Rashid. *SPICE for Power Electronics and Electric Power*. Prentice-Hall International, 1993.
- [3] Arrillaga, D.A. Bradley and Bodger. *Power System Harmonics Analyzer*, John Wiley and Sons, 1985.
- [4] Prasad N. Enjeti, et.al. *Analysis and Design of a New Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three Phase Four Wire Electric Distribution System*. IEEE Transaction on Industry Application. (1994) Vol 30 No. 6.
- [5] Yahya Chusna Arif. *Rancang Bangun DC Power Suplay Tiga Fasa dengan Harmonisa Rendah*. Jurnal EEPIS, 2001.
- [6] O. Penangsang, Wibowo. RS. *Analisis dan Simulasi Peningkatan Faktor Daya pada Sistem Kelistrikan yang Mengandung Harmonisa*. Studi Kasus Sistem Kelistrikan Pabrik semen Tuban I, II, III. Lembaga Penelitian ITS, 2002.
- [7] Yahya Chusna Arif. *Teknik Perbaikan Kualitas Daya pada Penyearah Terkontrol 3 Fasa dengan Menggunakan Sistem Simetri dan Injeksi harmonisa ketiga*. IES, 2002.
- [8] A.B. Plunkett. *A Current-Controlled PWM Transistor Inverter Drive*. IEEE/IAS Annual Meeting Conference Record. 1979.
- [9] B.K.Bose. *An Adaptive Hysterisis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System*, IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1990.
- [10] David. M. Brod. *Current Control of VSI-PWM Inverter*. IEEE Transactions on Industry Applications. 1985.
- [11] Sudirman S, dkk. *Analisis Perbandingan Kinerja Motor Arus Searah Dengan Menggunakan Sistem Kendali PWM dan Non-PWM*. Proceeding International Seminar on Electrical Power, Electronics, Communication, Control and Informataics (EECCIS). Universitas Brawijaya Malang. 2006.
- [12] Sri Kurniati A. *Analisis dan Simulasi Penyearah Tiga Fasa Terkendali Dengan Menggunakan Kombinasi Filter Pasif dan Aktif*. Tesis Unhas. 2006.
- [13] Nasrun Haryanto. *Analisis Kinerja Penyearah Tiga Fasa Terkendali Dengan Menggunakan PSPICE*. Tesis ITB, 1999.
- [14] Sri Kurniati A, dan Sudirman S. *Eliminasi Harmonik Pada Penyearah Terkendali Tiga Fasa Dengan Menggunakan Filter Hibrid*. Media Exacta Volume 8 No.1 Januari 2007.