

MEMPERBAIKI KUALITAS DAN MENINGKATKAN EFISIENSI DAYA LISTRIK MELALUI BOOST RECTIFIER

To Improve The Quality and Electric Energy Efficiency by Using Boost Rectifier

Slamet Riyadi

(Laboratorium Elektronika Daya, Teknik Elektro–FTI, Unika Soegijapranata)

ABSTRACT

Krisis energi yang disebabkan keterbatasan tersedianya bahan bakar minyak memberikan dampak pada berbagai sektor kehidupan termasuk dalam konsumsi energi listrik. Bahkan pemerintah menyarankan upaya penghematan listrik kepada para konsumen. Penghematan listrik bagi dunia industri dan perkantoran sangat sulit dilaksanakan terkait produktivitas sehingga langkah lain dalam menghemat energi listrik perlu disarankan. Secara teknis, energi listrik dimanfaatkan oleh konsumen untuk diubah menjadi daya nyata (kerja), tetapi dalam realisasinya energi listrik juga diubah menjadi daya reaktif (daya yang tidak menjadi kerja) sehingga akan menurunkan efisiensi pemanfaatannya. Peralatan listrik yang digunakan dalam sektor industri, perkantoran maupun aplikasi rumah tangga banyak didominasi peralatan yang membutuhkan tegangan searah. Karena sumber daya listrik yang tersedia (oleh PLN) adalah tegangan bolak-balik maka dibutuhkan penyearah. Penyearah tradisional yang memanfaatkan dioda dan thyristor banyak digunakan karena kesederhanaan, tetapi merupakan pembangkit harmonisa yang mengakibatkan distorsi sehingga akan menurunkan kualitas daya listrik yang dapat menyebabkan dampak negatif terhadap peralatan lain yang terpasang pada instalasi. Dalam penelitian ini dikaji suatu langkah untuk memperbaiki kualitas dan meningkatkan efisiensi energi listrik melalui reduksi daya reaktif dan harmonisa. Langkah eliminasi daya reaktif dan harmonisa dilakukan oleh boost rectifier yang bekerja sebagai penyearah berunjuk kerja tinggi. Penyearah jenis ini mampu menyediakan tegangan searah yang teregulasi baik dengan tetap menyerap arus sumber sinusoidal sehingga distorsi arus sumber minimal. Kondisi demikian dapat meningkatkan kualitas daya listrik. Dengan hasil peneltian ini, langkah penghematan energi listrik secara signifikan dapat dilakukan tanpa mengurangi produktivitas dan kualitas daya dapat dijaga tetap baik sehingga dampak negatif terhadap peralatan lain mampu direduksi.

Kata Kunci : *boost rectifier, harmonisa, kualitas daya, efisiensi*

PENDAHULUAN

Dewasa ini permasalahan terkait ketersediaan energi sudah menjadi hal yang sangat serius dan harus dicari pemecahannya. Energi listrik sebagai salah satu bentuk energi yang terkait langsung dengan kehidupan masyarakat mendapat perhatian yang sangat khusus.

Di Indonesia, kesulitan dalam pengadaan bahan bakar minyak telah mempengaruhi kelangsungan penyediaan energi listrik. Bahkan pemerintah telah berulang kali menyerukan penghematan pemakaian energi listrik. Penghematan energi listrik sebenarnya dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain: mengurangi

pemakaian energi listrik melalui pemadaman peralatan konsumen pada waktu tertentu, menggunakan peralatan listrik yang memiliki efisiensi tinggi, memperbaiki kualitas daya listrik

Langkah penghematan energi listrik melalui pemadaman peralatan listrik hanya dapat dilakukan oleh konsumen rumah tangga tanpa terkena dampak ekonomis yang sebenarnya secara kapasitas tidak begitu signifikan dibandingkan dengan konsumen industri dan perkantoran. Jika diinginkan penghematan yang signifikan maka seharusnya dititikberatkan pada sektor industri dan perkantoran. Langkah penghematan yang sesuai bagi kedua sektor tersebut adalah dengan cara pemakaian peralatan listrik yang memiliki efisiensi tinggi dan memperbaiki kualitas daya sistem, karena kedua langkah ini tidak mempengaruhi produktivitas yang berdampak masalah ekonomis.

Hampir semua peralatan yang digunakan dalam sektor industri dan perkantoran selalu menggunakan komponen semikonduktor (berbasis teknologi elektronika daya) yang mengakibatkan terjadinya distorsi pada arus dan tegangan. Terjadinya distorsi akan menurunkan faktor daya sehingga untuk menghasilkan daya nyata dengan nilai tertentu selalu membutuhkan arus lebih besar yang berdampak nilai daya semu (VA) menjadi besar dan efisiensi pemakaian menurun.

Elektronika daya memegang peranan yang sangat penting dalam dunia industri maupun aspek lainnya. Banyak sekali proses perubahan energi listrik mengaplikasikan disiplin ini untuk memperoleh kualitas daya yang sangat baik. Salah satu aplikasi elektronika daya yang banyak digunakan adalah penyearah (*rectifier*). Penyearah dioda maupun penyearah dengan thyristor yang dikendalikan sudut fasanya telah banyak

dimanfaatkan. Salah satu kelebihan dari penyearah jenis ini adalah tidak membutuhkan rangkaian kontrol yang rumit. Tetapi penyearah jenis ini memiliki unjuk kerja yang kurang baik disebabkan munculnya harmonisa yang sangat signifikan.

Wu, dkk, (1990) menggunakan teknik PCFF (*predicted current control strategy with fixed switching frequency*) untuk mengontrol PWM *rectifier* yang memiliki kemampuan mengalirkan daya dua arah dengan unjuk kerja dinamis yang tinggi. Pada teknik ini, mula-mula akan dihitung tegangan yang dibutuhkan untuk mengatur arus masukan dan kemudian akan mengubahnya menjadi *quasi-optimal switching pattern* sehingga rugi-rugi pada komponen saklar dapat direduksi. Stihl dan Ooi (1988) menggunakan LPF (*low passed filter*) pada *loop* peregulasi tegangan untuk mengantisipasi adanya gelombang harmonisa dengan frekuensi dua kali frekuensi tegangan bolak-balik masukan, sehingga distorsi pada arus masukan dapat direduksi. Berbagai macam tipe PWM *boost rectifier* diuraikan [Ohnuki, dkk, 1996], begitu juga dengan berbagai macam teknik PWM meliputi *unipolar PWM*, *bipolar PWM* dan *phase adjusted unipolar PWM*. Pada penelitian ini diuraikan suatu PWM *boost rectifier* beserta metode pengendalian arus fasa masukan dengan cara mengaktifkan saklar-saklar yang terletak pada satu lengan. Konsep yang hanya mengoperasikan saklar-saklar pada satu lengan dalam interval waktu tertentu menghasilkan efisiensi lebih baik karena rugi-rugi pensaklaran dapat diturunkan. Hal ini yang menjadi keunggulan penelitian yang diusulkan.

BAHAN DAN METODE

Pada makalah ini dikaji suatu PWM *boost rectifier* tiga fasa yang

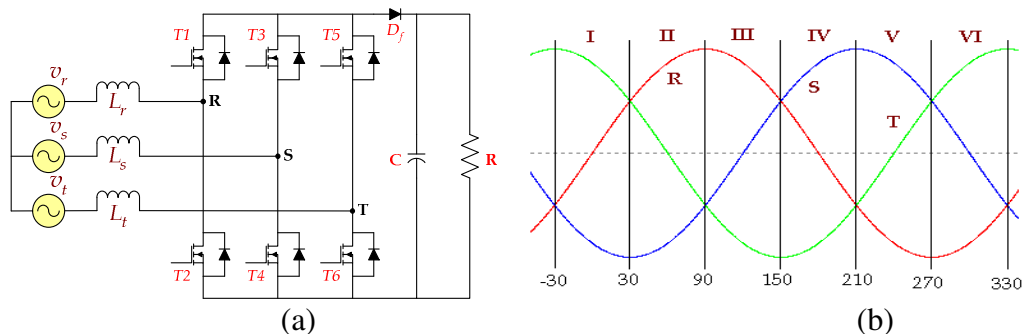
dikendalikan dengan suatu metoda baru untuk meningkatkan efisiensinya. Pada metoda standar umumnya setiap saat selalu terjadi pensaklaran tiga buah saklar statis, tetapi metoda yang diusulkan mengoperasikan hanya dua saklar sehingga rugi-rugi pensaklaran dapat dikurangi. Pada Gb-1a disajikan suatu topologi PWM boost rectifier tiga fasa yang memiliki enam buah saklar statis terpasang pada tiga lengan (tiap lengan memiliki dua buah saklar statis). Untuk memahami prinsip kerja metoda pengendalian yang diusulkan maka perlu diperhatikan Gb-1b. Pada interval-1, gelombang tegangan fasa R berada di antara tegangan fasa T dan fasa S $\{v_t(t) > v_r(t) > v_s(t)\}$. Pada interval ini, arus yang melalui fasa T dan fasa S

dikendalikan dengan menggunakan saklar-saklar yang berada pada lengan R (T_1 dan T_2). Gb-2a menunjukkan rangkaian ekuivalen untuk menaikkan arus pada fasa T dengan cara menghidupkan saklar T_1 , pada kondisi ini tegangan fasa T akan mendorong arus melalui loop induktor L_t , dioda D_5 , saklar T_1 , induktor L_r dan dan tegangan fasa R. Persamaan yang dapat diturunkan pada kondisi ini adalah sebagai berikut :

$$v_t - v_r = (L_r + L_t) \frac{di_t}{dt}$$

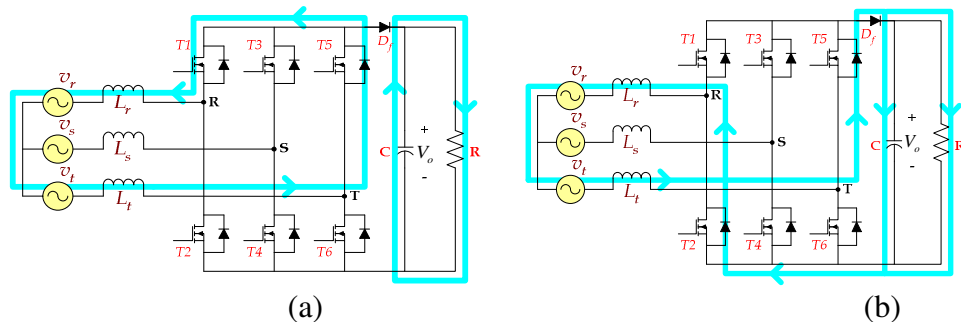
$$\frac{di_t}{dt} = \frac{v_t - v_r}{(L_r + L_t)}$$

(1)



Gb-1. (a) PWM boost rectifier tiga fasa (b) interval waktu operasi saklar-saklar stais

Sedangkan untuk menurunkan arus fasa T (i_t) dilakukan dengan membuka saklar T_1 (Gb-2b). Pada kondisi tegangan fasa T akan mendorong arus melalui induktor L_t , dioda D_5 , beban (tegangan V_o), dioda D_2 induktor L_r dan dan tegangan fasa R.



Gb-2. Aliran arus fasa T pada saat saklar T_1 ($-30^\circ \leq \omega t \leq 30^\circ$) (a) menutup (b) membuka

Persamaan yang dapat diturunkan pada kondisi ini adalah sebagai berikut

$$v_t - v_r = (L_r + L_t) \frac{di_t}{dt} + V_o$$

$$\frac{di_t}{dt} = \frac{(v_t - v_r) - V_o}{(L_r + L_t)}$$

(2)

Karena $|v_t - v_r| < |V_o|$ maka kemiringan arus pada persamaan (2) akan selalu negatif yang mengindikasikan bahwa arus berkurang.

Pada interval-1 tegangan fasa S berada pada posisi paling rendah, tegangan ini memiliki polaritas negatif sehingga arus yang mengalir pada fasa S juga akan negatif. Untuk mengendalikannya digunakan saklar T_2 . Pada Gb-3a disajikan aliran arus pada saat saklar T_2 menutup yang akan

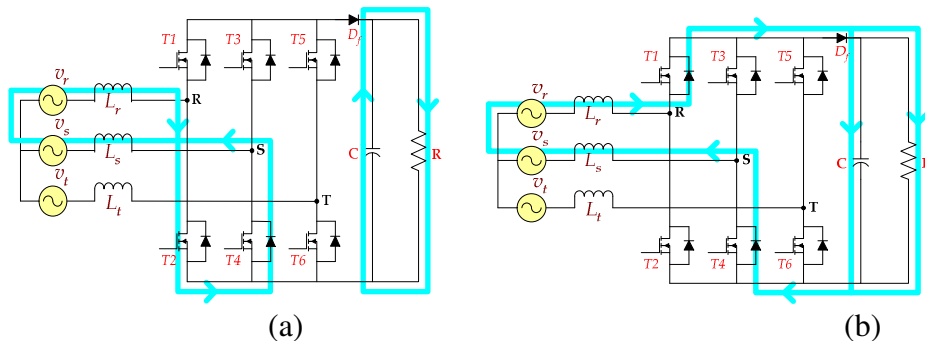
membentuk *loop* arus terdiri dari tegangan fasa R, induktor L_r , saklar T_2 , dioda D_4 , induktor L_s dan tegangan fasa S. Persamaan yang diperoleh pada kondisi ini adalah sebagai berikut

$$v_s - v_r = (L_r + L_s) \frac{di_s}{dt}$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{v_s - v_r}{(L_r + L_s)}$$

(3)

Sedangkan untuk menurunkan arus fasa S (i_s) dilakukan dengan membuka saklar T_2 (Gb-3b). Kondisi ini menyebabkan tegangan fasa R mendorong arus melalui induktor L_r , dioda D_1 , beban (tegangan keluaran V_o), dioda D_4 , induktor L_s dan tegangan fasa S.



Gb-3. Aliran arus fasa S pada saat saklar T_2 ($-30^\circ \leq \omega t \leq 30^\circ$) (a) menutup (b) membuka

Persamaan yang didapat pada kondisi ini adalah

$$v_s - v_r = (L_r + L_s) \frac{di_s}{dt} + V_o$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{(v_s - v_r) - V_o}{(L_r + L_s)}$$

(4)

Karena $|v_s - v_r| < |V_o|$ maka kemiringan arus pada persamaan (4) akan selalu negatif yang mengindikasikan bahwa arus berkurang. Pada interval waktu selanjutnya dapat dilakukan secara analogi.

HASIL

Analisis tentang PWM *boost rectifier* tiga fasa dengan pengendalian yang diusulkan telah diuraikan. Untuk melengkapi kajian maka dilakukan tahap simulasi dan pengujian laboratorium. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak PSIM sedangkan pengujian laboratorium dilakukan melalui pembuatan prototip PWM *boost rectifier* tiga fasa skala laboratorium.

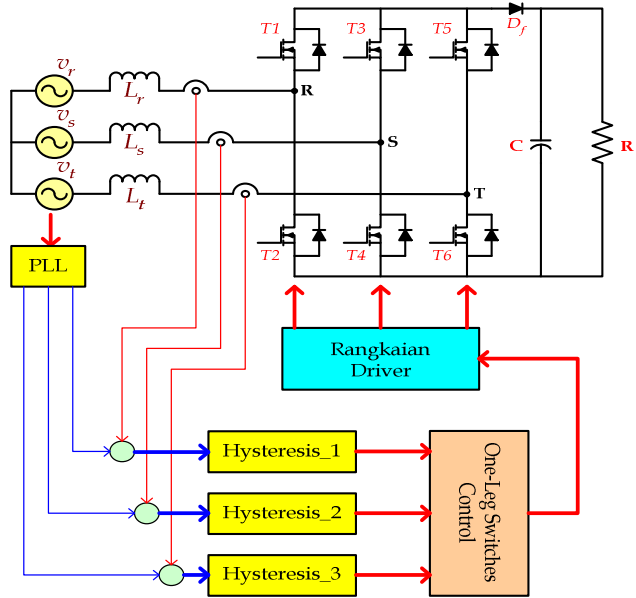
Pada Gb-4 disajikan suatu PWM *boost rectifier* tiga fasa yang digunakan untuk simulasi. Pada gambar tersebut terdapat tiga pasang saklar statis (tiga lengan), karena masing-masing saklar memiliki titik terminal *source* (S) yang berbeda maka untuk mengoperasikan saklar-saklar tersebut diperlukan rangkaian *driver* dengan sumber tersendiri (enam buah catu daya *driver* dengan titik *ground* yang terpisah). Untuk membangkitkan referensi arus sinusoidal tiga fasa digunakan rangkaian PLL (*Phase Locked Loop*). Selanjutnya nilai referensi dibandingkan dengan nilai arus sisi sumber melalui sensor arus guna menghasilkan *error* sebagai sinyal masukan bagi kontroler hysteresis. Untuk mengurangi rugi daya maka dibuat sedemikian rupa hingga setiap saat hanya saklar-saklar yang berada pada satu lengan yang konduksi (beroperasi), kondisi ini dicapai dengan menggunakan rangkaian *one-leg switches control*. Parameter rangkaian yang digunakan disajikan pada Tabel-1. Pada Gb-5 disajikan hasil simulasi dari arus fasa sumber yang mendekati bentuk gelombang sinusoidal. Karena tegangan

tiga fasa sumber yang digunakan merupakan gelombang sinusoidal yang saling tergeser 120 derajat maka arus sumber juga mendekati tiga buah gelombang sinusoidal yang saling tergeser 120 derajat juga. Untuk memperoleh efisiensi yang tinggi maka gelombang tegangan dan arus sumber harus memiliki sudut fasa yang sama. Pada Gb-6a ditunjukkan gelombang tegangan dan arus sumber yang sefasa.

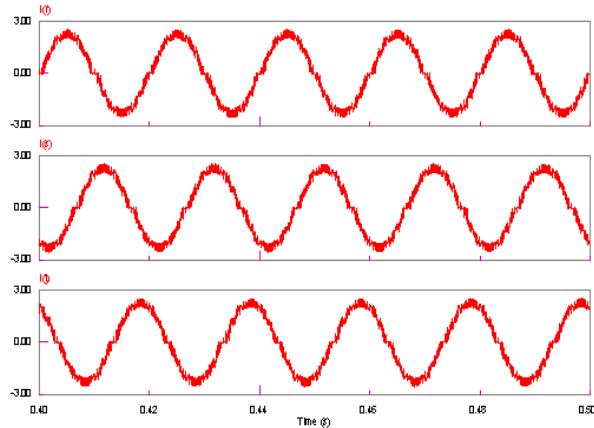
Tabel-1. Parameter rangkaian PWM Boost Rectifier tiga fasa untuk simulasi

Parameter	Nilai
Tegangan sumber	15 V (rms)
Induktansi sumber	1 mH
Tahanan keluaran	20 Ohm
Kapasitor keluaran	100 uF
Batas frekuensi switching	30 kHz
Jenis saklar	MOSFET IRFP 460

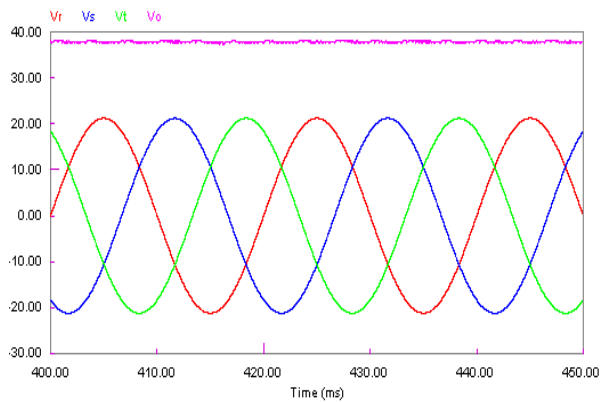
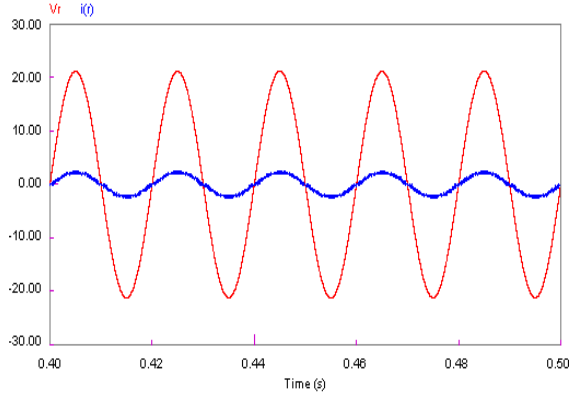
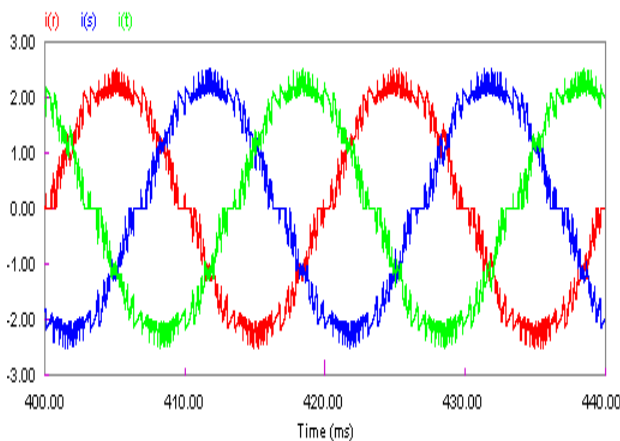
Pada gambar tersebut tampak dua buah gelombang sinusoidal dengan amplituda berbeda. Karena penyearah yang digunakan adalah jenis *boost* maka tegangan searah keluaran selalu lebih tinggi dari nilai puncak tegangan sumber (Gb-6b). Besarnya amplituda arus sumber ditentukan dengan menggunakan keseimbangan daya, yaitu daya pada sisi masukan akan selalu sama dengan daya pada sisi keluaran (dengan mengasumsikan sistem ideal). Hasil pengujian laboratorium untuk mendukung simulasi ditampilkan pada Gb-7 dan Gb-8.



Gb-4. Rangkaian PWM Boost Rectifier tiga fasa untuk simulasi

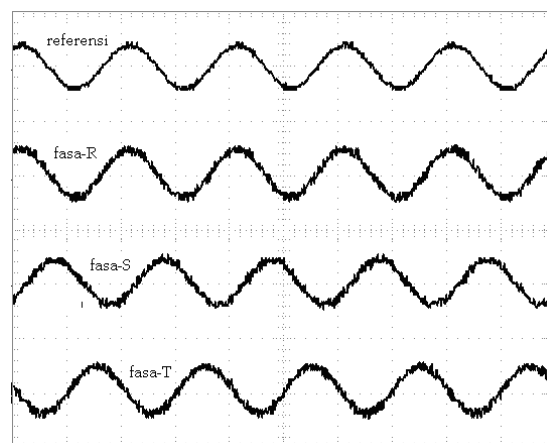


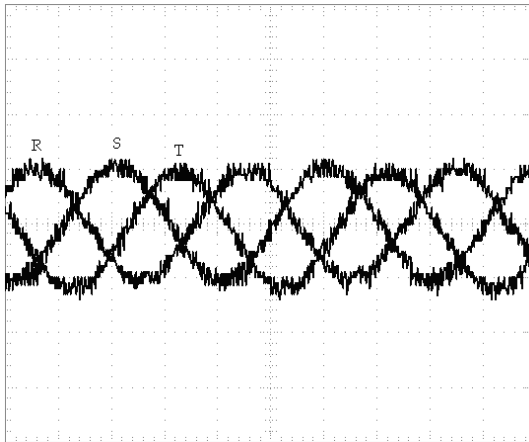
Gb-5. Hasil simulasi arus sumber fasa-r, fasa-s dan fasa-t



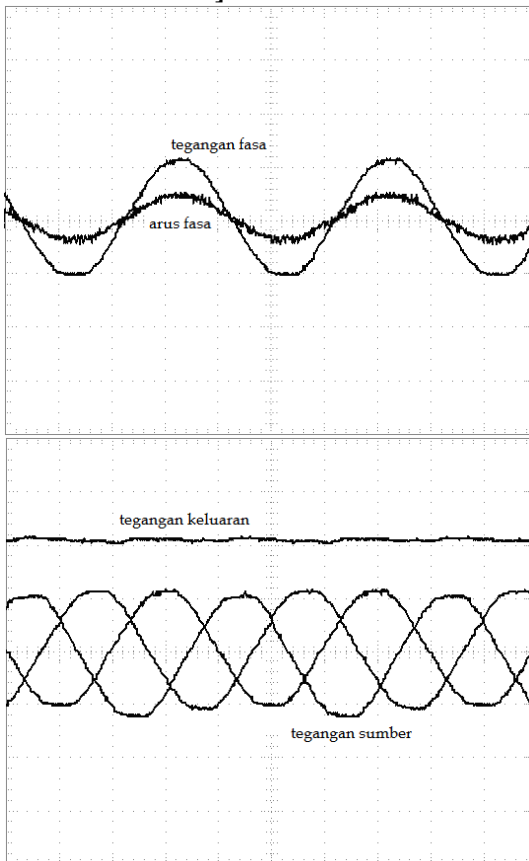
Gb-6. (a) Hasil simulasi arus fasa dan tegangan fasa (b) tegangan sumber dan tegangan searah keluaran

Sedangkan hasil pengujian laboratorium ditampilkan pada Gb-10 dan Gb-11.





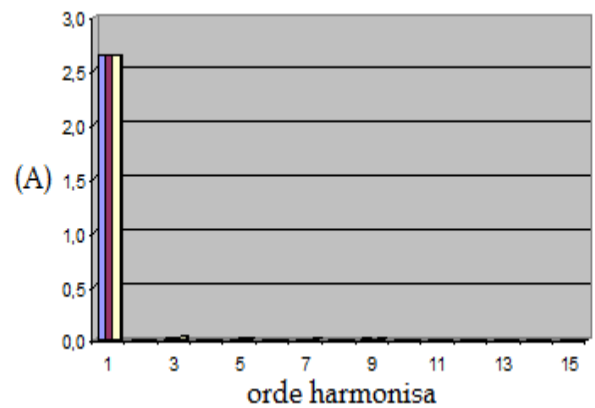
Gb-7. Hasil pengujian arus sumber (a) referensi fasa-r (b) arus aktual fasa-r (c) arus aktual fasa-s [skala : 5 A/div – 10 s/div] (d) arus aktual fasa-t [skala : 2 A/div – 5 s/div]



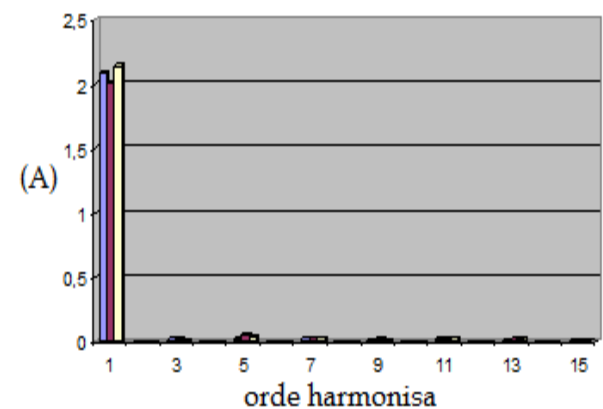
Gb-8. Hasil pengujian (a) tegangan dan arus fasa [skala : 20 V/div – 5 s/div] (b) arus fasa-r [skala : 5 A/div – 5 s/div] (b) tegangan sumber dan tegangan keluaran [skala : 20 V/div – 5 s/div]

PEMBAHASAN

Mengacu pada gelombang arus (Gb-5 dan Gb-7) maka dapat ditentukan spektrumnya seperti tampak pada Gb-9a dan Gb-9b di mana spektrum arus fasa sumber hasil simulasi memiliki THD 1,28% untuk fasa R, THD arus fasa S adalah 1,11% dan arus fasa T memiliki THD sebesar 1,75%. Sedangkan spektrum arus fasa hasil pengujian laboratorium memiliki THD 2,84% untuk fasa R, THD arus fasa S adalah 4,41% dan arus fasa T memiliki THD sebesar 3,19%.



(a)

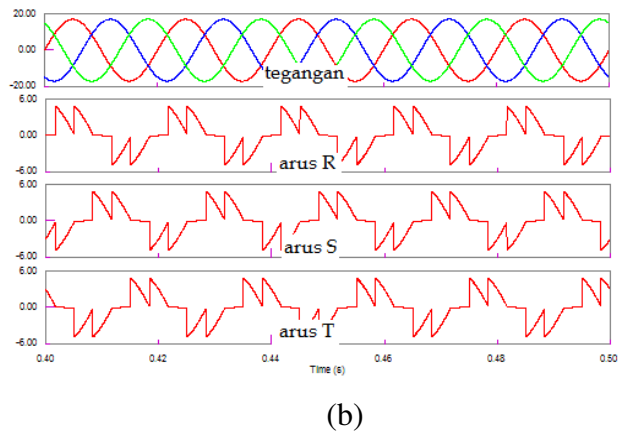
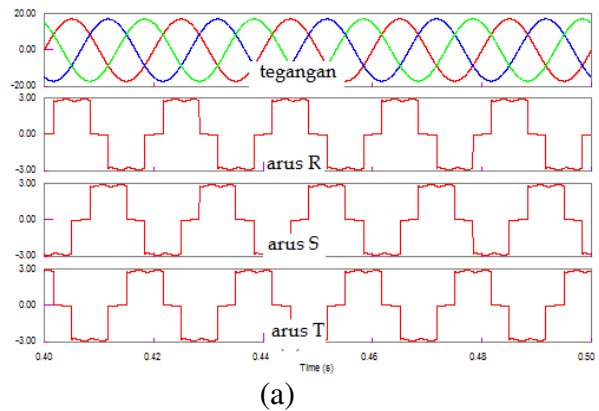


(b)

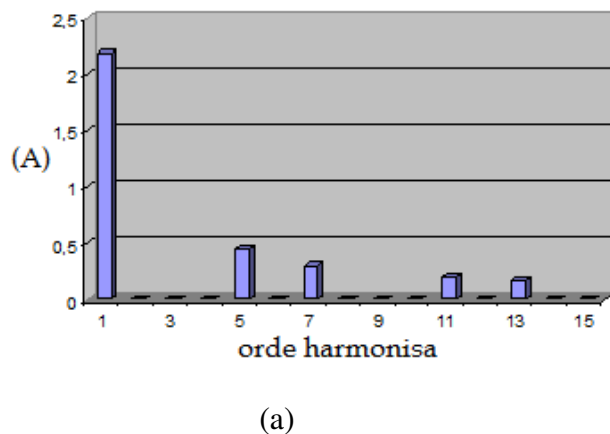
Gb-9. Spektrum arus sumber (a) hasil simulasi (b) hasil pengujian laboratorium

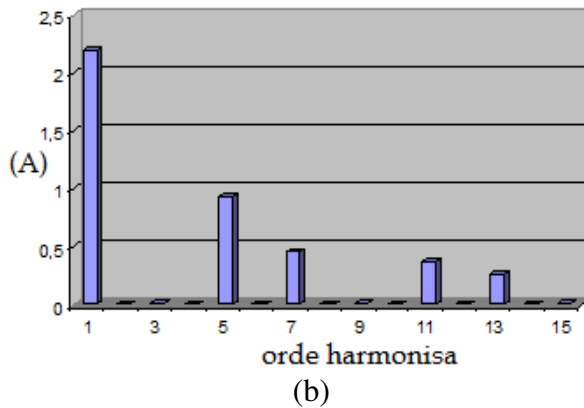
Gelombang arus sumber yang diperoleh dari hasil simulasi dan pengujian laboratorium menunjukkan bentuk gelombang yang mendekati sinusoidal tiga fasa. Gelombang tersebut berfluktuasi pada toleransi yang cukup kecil. Dengan melihat gelombang tegangan fasa dan arus fasa sumber tampak bahwa kedua gelombang tegangan dan arus memiliki fasa yang sama, pola demikian merupakan pola yang terbentuk pada pembebanan resistif. Pada kondisi ini akan dicapai kualitas dan efisiensi daya listrik yang paling baik. *Boost rectifier* yang dirancang juga mampu memberikan tegangan keluaran searah yang memiliki riak kecil. Dengan mengacu pada standard IEEE tentang batasan kandungan harmonisa untuk arus (batasan maksimal adalah 5%).

Sebagai perbandingan maka pada Gb-10a disajikan arus sumber penyearah dioda dengan beban induktif dan Gb-10b adalah arus sumber penyearah dioda berbeban kapasitif. Spektrum arus fasa dari kedua penyearah dioda ditunjukkan pada Gb-11a dan Gb-11b, kedua penyearah dioda memiliki tingkat distorsi yang masih tinggi sekitar 29,05% dan 54,09%. Pada Gb-12 ditunjukkan perbandingan spektrum arus fasa (dinormalisir) dari *boost rectifier*, penyearah dioda berbeban induktif dan kapasitif, dari gambar tersebut tampak bahwa pada penyearah dioda masih muncul komponen harmonisa sedangkan pada *boost rectifier* memiliki komponen harmonisa yang tereduksi secara signifikan.



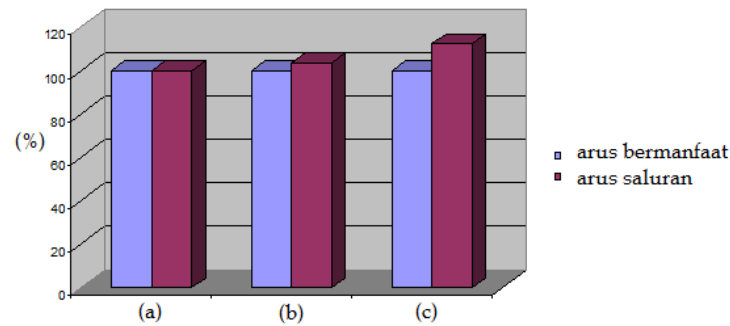
Gb-10. Gelombang pada penyearah dioda berbeban (a) induktif (b) kapasitif



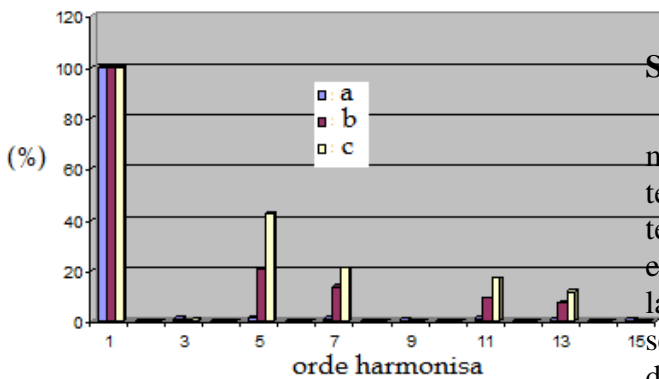


Gb-11. Spektrum arus fasa pada penyearah dioda berbeban (a) induktif (THD = 29,05%) (b) kapasitif (THD = 54,09%)

penyearah dioda memiliki kualitas dan efisiensi sangat rendah.



Gb-13. Perbandingan komponen arus fasa yang dinormalisir (a) boost rectifier (b) penyearah dioda berbeban induktif (c) penyearah dioda berbeban kapasitif



Gb-12. Perbandingan spektrum arus fasa yang dinormalisir (a) boost rectifier (b) penyearah dioda berbeban induktif (c) penyearah dioda berbeban kapasitif

Munculnya komponen harmonisa menyebabkan naiknya nilai efektif arus yang mengalir pada saluran. Pada Gb-13 menunjukkan bahwa pada *boost rectifier* arus yang mengalir pada saluran diubah seluruhnya menjadi daya yang bermanfaat sehingga tingkat efisiensi dan kualitas daya sangat tinggi, berbeda dengan penyearah dioda yang membutuhkan arus saluran lebih besar untuk mendapatkan daya yang sama dengan *boost rectifier* sehingga

SIMPULAN

Suatu kajian bagaimana meningkatkan kualitas dan efisiensi daya telah dilakukan. Verifikasi terkait analisis telah didukung dengan simulasi dan eksperimen melalui suatu prototip skala laboratorium. Dari penelitian yang telah selesai dilakukan, beberapa kesimpulan dapat diambil, yaitu: Suatu *boost rectifier* mampu membuat arus sumber mendekati sinusoidal (THD kecil) yang berarti bahwa kandungan harmonisa dapat direduksi secara signifikan, karena gelombang arus dan tegangan memiliki fasa yang sama maka faktor daya mendekati satu; Mengalirnya arus sumber yang sinusoidal mengakibatkan hanya daya nyata yang dicatu oleh sumber sehingga nilai efektif arus sumber menjadi minimal, kondisi ini dapat menurunkan rugi-rugi daya dan efisiensi sistem meningkat; *Boost rectifier* yang dirancang menggunakan kendali *loop* tertutup yang mampu memberikan tegangan keluaran teregulasi dengan tetap menjaga kualitas arus masukan; Penggunaan PLL (*Phase Locked Loop*)

pada kendali mampu membuat boost rectifier bekerja pada sumber tegangan tak ideal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balitbang Propinsi Jateng dan

LEMLIT Unika Soegijapranata atas support dana dalam menyelesaikan penelitian ini juga kepada Dekan FTI yang memberikan fasilitas laboratorium untuk digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Bendre, I. Wallace, J. Nord, G. Venkataramanan, "A Current Source PWM Inverter with Actively Commutated SCRs", IEEE Trans. on Power Electronics, vol-17, no-4, pp 461-468, July 2002
- Akagi, H. 1994. "Trends in Active Power Line Conditioner", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.9, no.3, 263-268.
- C. Qiao, K. M., Smedley. 2002. "A General Three-Phase PFC Controller for Rectifiers with a Series-Connected Dual-Boost Topology", IEEE Trans. on Industry Application, vol-38, no-1, pp 137-148, Jan/Feb
- G. Ledwich, "Current Source Inverter Modulation", IEEE Trans. on Power Electronics, vol-6, no-4, pp 618-623, Oct 1991
- J. C. Salmon. 1993. "Circuit Topology for Single Phase Voltage-Doubler Boost Rectifier", IEEE Trans. on Power Electronics, vol-8, no-4, pp 521-529
- J. C. Salmon, 1996. "Operating a Three Phase Diode Rectifier with a Low Input Current Distortion Using a Series-Connected Dual Boost Converter", IEEE Trans. on Power Electronics, vol-11, no-4, pp 592-603.
- J. C. Salmon. 1996. "Reliable 3-Phase PWM Boost Rectifier Employing a Stacked Dual Boost Converter Subtopology", IEEE Trans. on Industry Application, vol-32, no-3, pp 542-551,
- O. Stihl, B. T. Ooi. 1988. "A Single Phase Controlled-current PWM Rectifier", IEEE Trans. on Power Electronics, vol-3, no-4, pp 453-459
- R. Wu, S. B., Dewan, G. R. Slem. 1990. "A PWM AC to DC Converter with Fixed Switching Frequency", IEEE Trans. on Industry Application, vol-26, no-5, pp 880-885.
- T. Ohnuki, O. Miyashita, T. Haneyoshi, E. Ohtsuji. 1996. "High Power Factor PWM Rectifier with an Analog Pulsewidth Prediction Controller", IEEE Trans. on Power Electronics, vol-11 no-3, pp 460-465.
- Watanabe, E.H., Stephan, R.M., dan Aredes, M. 1993. "New Concepts of Instantaneous Active and Ractive Powers in Electrical Systems with Generic Loads", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.8, no.2, 697-703.