

# Minimisasi riak arus keluaran penyearah daya-besar dengan menggunakan filter aktif

Pekik Argo Dahono

Laboratorium Penelitian Konversi Energi Elektrik, Jurusan Teknik Elektro,  
Institut Teknologi Bandung, Jul. Ganesa 10, Bandung 40132

Masuk: 11 Januari 1999; revisi masuk: 3 Juni 1999; diterima: 7 Desember 1999

## Sari

Suatu metode baru untuk meminimisasi riak arus keluaran penyearah daya besar dengan menggunakan filter aktif diusulkan dalam tulisan ini. Karena filter aktif terhubung paralel dengan beban, maka kapasitas arus filter aktif yang diperlukan menjadi sangat kecil, yaitu sebesar riak arus yang akan dikompensasi. Selain itu, karena filter aktif dihubungkan seri dengan filter pasif kapasitor yang ada, maka kapasitas tegangan filter aktif juga sangat kecil, yaitu sebesar riak tegangan yang dikompensasi. Teknik kendali filter aktif yang diusulkan dijelaskan dalam tulisan ini. Validitas metode yang diusulkan diuji dengan simulasi dan percobaan.

*Kata kunci:* filter aktif, penyearah, teknik kendali, minimisasi riak, sistem kendali

## Abstract

### Output current ripple minimization of high-power rectifiers by using active filter

A new method to minimize the output current ripple of high-power rectifiers by using a dc active power filter is presented in this paper. Because the active filter is connected in parallel to the load, the current rating of the filter is very small, that is as small as the ripple which is going to be compensated. Moreover, because the active filter is series connected to the existing passive filter capacitor, the voltage rating of the active filter is also very small, that is as small as the voltage ripple which is going to be compensated. A control technique for the active filter is proposed in this paper. Validity of the proposed method is verified by simulated and experimental results.

*Key words:* active filter, rectifier, control technique, ripple minimization, control system.

## 1 Pendahuluan

Penyearah daya besar banyak digunakan dalam industri sebagai pengisi baterai, catu-daya proses elektrokimia, pengendali kecepatan motor, proteksi katodik, dan catu-daya magnet. Untuk daya yang besar, penyearah yang digunakan biasanya penyearah *thyristor* (jika tegangan dc keluarannya harus terkendali) atau penyearah dioda (jika tegangan yang tetap cukup memadai). Karena riak tegangan dan arus keluaran dari penyearah semacam ini masih terlalu besar untuk banyak aplikasi, perlu dipasang filter untuk menguranginya. Filter yang digunakan umumnya berupa filter pasif LC. Akan tetapi, jika riak maksimum yang diizinkan sangat kecil, filter pasif yang diperlukan akan sangat besar dan mahal. Selain itu, filter pasif yang besar akan membuat efisiensi penyearah menurun serta mempunyai tanggapan yang lambat dan cenderung berosilasi. Penyearah dengan riak arus keluaran yang kecil banyak diperlukan dalam laboratorium dan catu-daya magnet [1-4].

Salah satu cara untuk mengurangi riak arus keluaran tanpa menggunakan filter pasif yang besar adalah dengan meningkatkan jumlah pulsa keluaran penyearah [5]. Jumlah pulsa yang digunakan umumnya 6, 12, 18, atau 24 pulsa. Sayangnya, cara ini hanya efektif jika sumber tiga-fasanya setimbang. Jika tegangan sumber tiga-

fasanya tidak setimbang, riak keluaran dengan frekuensi rendah akan tetap keluar, walaupun kita telah menggunakan penyearah pulsa banyak [6-7]. Akibatnya, filter pasif yang diperlukan masih tetap besar. Selain itu, penyearah pulsa banyak memerlukan trafo tiga-fasa yang kompleks dan mahal.

Cara lain untuk mengurangi riak keluaran tanpa menggunakan filter pasif yang besar adalah dengan menggunakan filter aktif [8-10]. Filter aktif konvensional direalisasikan dengan memasang suatu konverter elektronika yang terpasang seri dengan beban. Filter ini dikendalikan sedemikian rupa sehingga filter akan menghasilkan riak tegangan yang melawan riak tegangan yang dihasilkan penyearah. Filter aktif bisa direalisasikan dengan menggunakan konverter elektronika yang bekerja dalam mode linier [8-9] atau *switching* [10]. Kelemahan utama filter aktif konvensional ini adalah hubungan seri antara filter aktif dengan beban. Karena terhubung seri, kapasitas arus filter aktif paling tidak harus sama dengan kapasitas arus beban. Oleh sebab itu, cara ini tidak cocok untuk penerapan yang memerlukan arus besar.

Dalam tulisan ini diusulkan suatu topologi baru filter aktif. Filter aktif ini terhubung paralel dengan beban sehingga kapasitas arus filter aktif yang diperlukan tidak terlalu besar (sama dengan besar riak arus yang ingin dikompensasi). Selain itu, karena filter aktif ini dipasang seri dengan filter kapasitor yang biasanya sudah ada, kapasitas tegangan filter

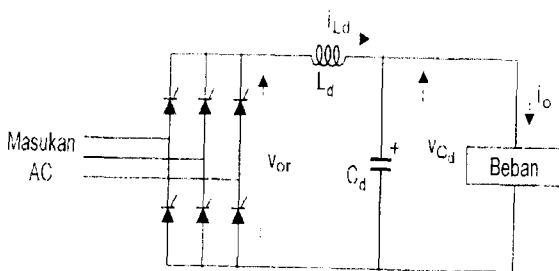
aktif yang diperlukan juga tidak terlalu besar (sama dengan riak tegangan yang dikompensasi). Karena tegangan dan arus filter aktif ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan tegangan dan arus beban, maka filter ini cocok untuk meminimumkan riak keluaran penyearah daya besar. Cara mengendalikan filter aktif ini diusulkan. Validitas metode yang diusulkan diuji dengan simulasi dan percobaan.

**2 Metode konvensional**

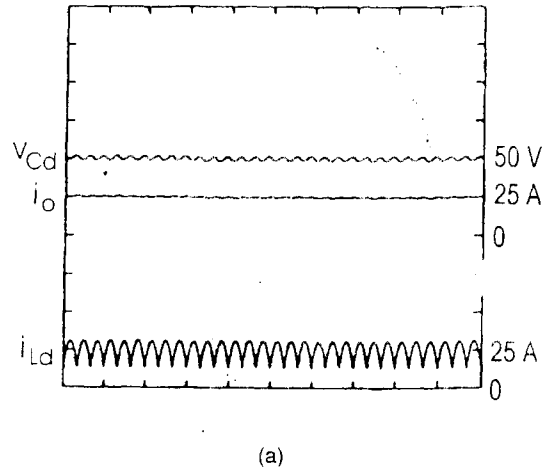
Sebelum membahas metode yang diusulkan, ada baiknya kita membahas lebih dulu metode konvensional. Gambar 1 memperlihatkan skema penyearah thyristor tiga-fasa enam-pulsa yang dilengkapi filter pasif LC di sisi keluarannya. Hasil simulasi tegangan dan arus keluaran penyearah pada tegangan sumber setimbang dan tak setimbang diperlihatkan di Gambar 2(a) dan (b). Data simulasi diberikan di Tabel 1. Gambar ini menunjukkan bahwa tegangan dan arus beban yang rata pada keadaan setimbang menjadi tidak rata saat tegangan sumber tak setimbang. Pada kondisi setimbang, frekuensi riak keluaran terendah adalah enam kali frekuensi sumber, yaitu 300 Hz. Akan tetapi, pada keadaan tak setimbang, frekuensi riak keluaran terendah bisa 50 atau 100 Hz (tergantung pada jenis ketidaksetimbangannya). Dalam simulasi, kondisi tak setimbang diciptakan dengan menyisipkan induktor 5 mH ke salah satu fasa sumber. Akibatnya, filter LC yang telah dirancang agar efisien dalam meredam riak frekuensi 300 Hz menjadi tidak efisien jika riak yang ada mengandung frekuensi 100 Hz. Akan tetapi, jika filter LC dirancang agar juga bisa meredam riak frekuensi rendah, ukuran filter LC yang diperlukan akan sangat besar.

**Tabel 1** : Data simulasi

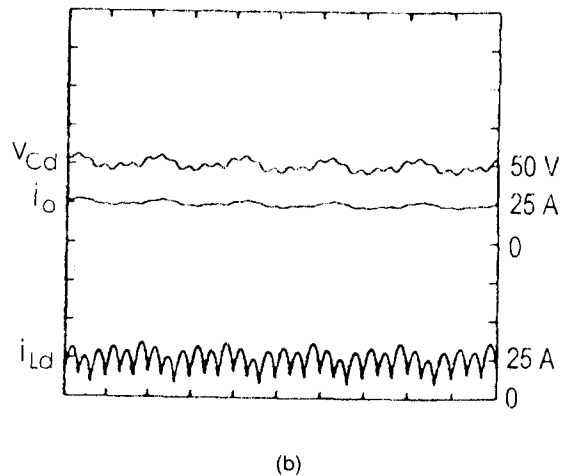
Tegangan sumber ac 50 Hz	100 V <sub>ac</sub>
Tegangan acuan dc	50 V <sub>dc</sub>
Induktansi filter $L_d$	5 mH
Kapasitansi filter $C_d$	50 $\mu$ F
Resistansi beban	2 ohm
Induktansi beban	5 mH



**Gambar 1** Skema penyearah tiga-fasa



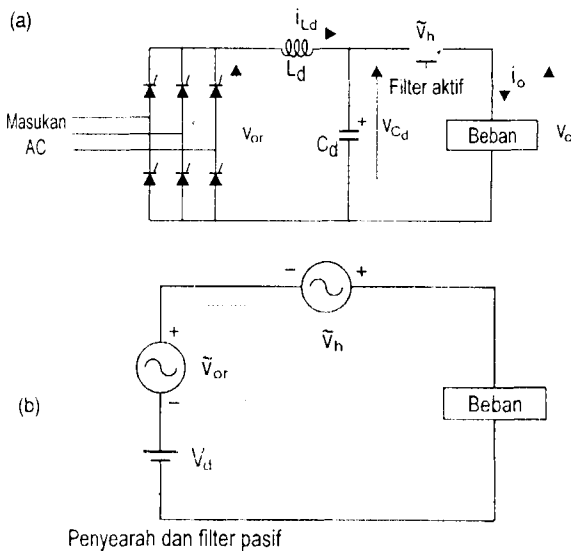
(a)



(b)

**Gambar 2** Hasil simulasi pada tegangan sumber (a) setimbang dan (b) tak setimbang

Untuk meminimisasi riak frekuensi rendah tanpa menggunakan filter LC yang besar, pemasangan filter aktif seperti yang terlihat di Gambar 3(a) telah diusulkan di pustaka [8-10]. Gambar 3(b) memperlihatkan rangkaian ekivalen sisi dc dari Gambar 3(a).  $V_d$  menyatakan nilai rata-rata (komponen dc) dan  $\tilde{v}_{or}$  menyatakan riak pada tegangan filter kapasitor. Jika filter aktif dikendalikan sedemikian rupa sehingga menghasilkan riak tegangan  $\tilde{v}_h = -\tilde{v}_{or}$  maka tegangan beban tidak lagi mengandung riak. Pada sistem ini, filter pasif LC berfungsi untuk mengurangi riak frekuensi tinggi dan filter aktif untuk mengurangi riak frekuensi rendah. Oleh sebab itu, ukuran filter pasif yang diperlukan tidak terlalu besar. Filter aktif ini bisa diimplementasikan dengan rangkaian konverter daya linier maupun *switching*. Seperti telah disinggung sebelumnya, hubungan seri antara filter aktif dengan beban menyebabkan kapasitas arus filter aktif paling tidak harus sama dengan arus maksimum beban, walaupun tegangannya sendiri rendah, yaitu sama dengan tegangan riak yang dikompensasi. Karena kapasitas arus yang diperlukan besar, penerapan metode ini untuk arus yang sangat besar akan kompleks dan tidak efisien.

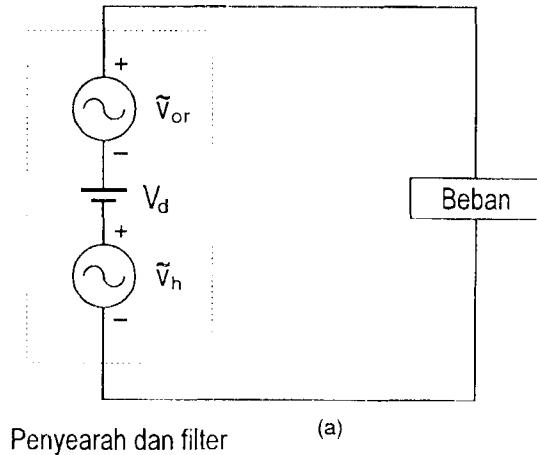


Gambar 3 Minimisasi riak arus keluaran dengan filter aktif konvensional (a) Skema dan (b) Rangkaian ekuivalen

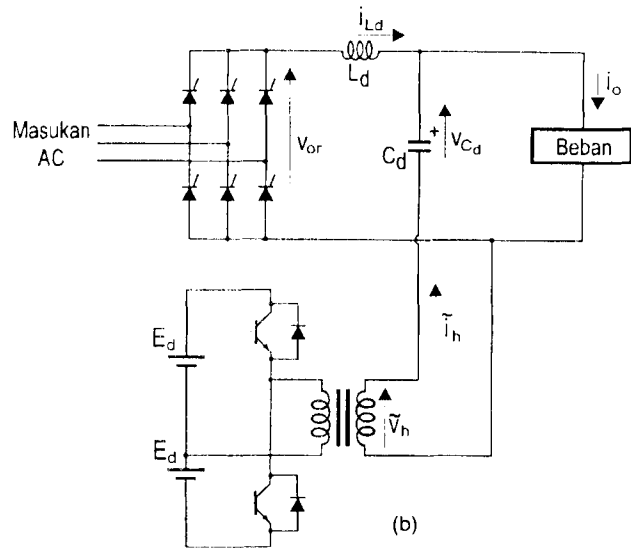
### 3 Metode yang diusulkan

Untuk memahami metode yang diusulkan, mari kita tinjau rangkaian pengganti di Gambar 3(b). Fungsi filter aktif adalah menghasilkan tegangan yang melawan tegangan riak yang dihasilkan di filter pasif kapasitor. Selama filter aktif secara efektif terhubung seri dengan kapasitor, maka posisi yang sebenarnya dari filter aktif tidak akan mengubah kinerja sistem. Oleh sebab itu, posisi filter aktif dapat dipindahkan ke posisi seperti terlihat di Gambar 4(a). Realisasi dari skema di Gambar 4(a) diperlihatkan di Gambar 4(b). Terlihat di gambar ini bahwa filter aktif terhubung seri dengan filter kapasitor. Jika filter aktif dikendalikan sedemikian rupa sehingga menghasilkan tegangan riak yang melawan tegangan riak di filter kapasitor, maka tegangan beban akan bebas dari riak. Akan tetapi, berbeda dengan Gambar 3, posisi filter aktif di Gambar 4 berada paralel dengan beban sehingga arus yang mengalir di filter aktif tidak sama dengan arus beban, tetapi hanya sebesar riak arus yang dikompensasi. Oleh sebab itu, tegangan dan arus dari filter aktif di Gambar 4 keduanya sama-sama kecil, yaitu sama dengan tegangan dan arus riak yang dikompensasi. Pada filter aktif di Gambar 3, arus keluaran filter aktif bersifat searah (dc), sedangkan tegangannya bolak-balik. Oleh sebab itu, filter aktif di Gambar 3 bisa direalisasikan dengan sebuah transistor yang bekerja dalam mode linier atau menggunakan *chopper* arus dua kuadran [10]. Berbeda dengan filter aktif di Gambar 3, filter aktif di Gambar 4 harus menghasilkan tegangan dan arus keluaran yang bolak-balik (ac). Oleh sebab itu, filter aktif di Gambar 4 harus direalisasikan dengan sebuah *inverter*. *Inverter* ini bisa

direalisasikan dengan menggunakan *amplifier (inverter)* linier maupun *switching*. Perlu dicatat bahwa sumber dc bagi filter aktif tidak harus benar-benar ada, tetapi bisa direalisasikan dengan hanya menggunakan sebuah kapasitor. Tegangan di kapasitor ini bisa dikendalikan dengan sedikit memodifikasi sinyal kendali filter aktif.

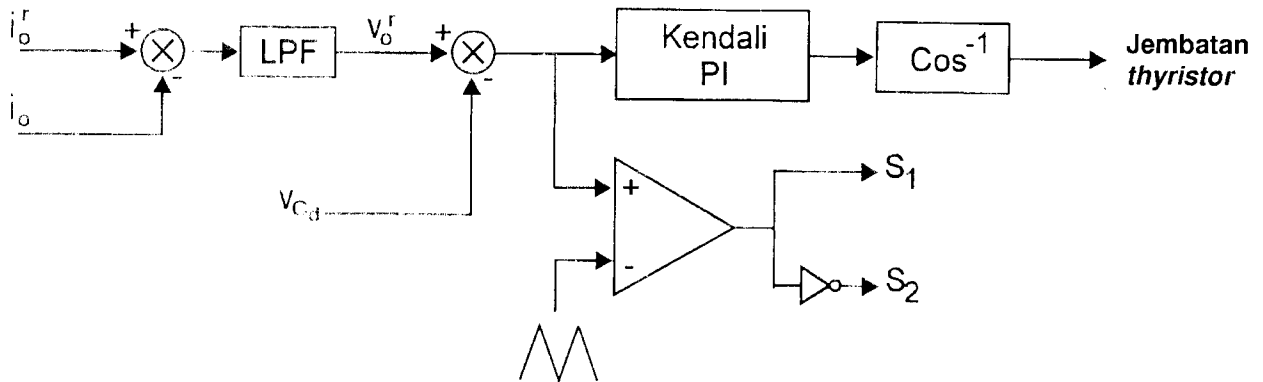


Penyearah dan filter (a)



Gambar 4 (a) Posisi alternatif dari filter aktif. (b) Skema filter aktif yang diusulkan

Skema sistem kendali dari filter aktif yang diusulkan di Gambar 4 diperlihatkan di Gambar 5. Sistem kendali ini ditujukan untuk menghasilkan penyearah dengan arus keluaran terkendali. Untuk menghasilkan arus keluaran yang terkendali, arus beban yang sebenarnya dibandingkan dengan arus acuan. Hasil perbandingan arus ini diolah oleh pengendali PI untuk menghasilkan tegangan acuan (tegangan beban atau tegangan di filter kapasitor yang diinginkan).

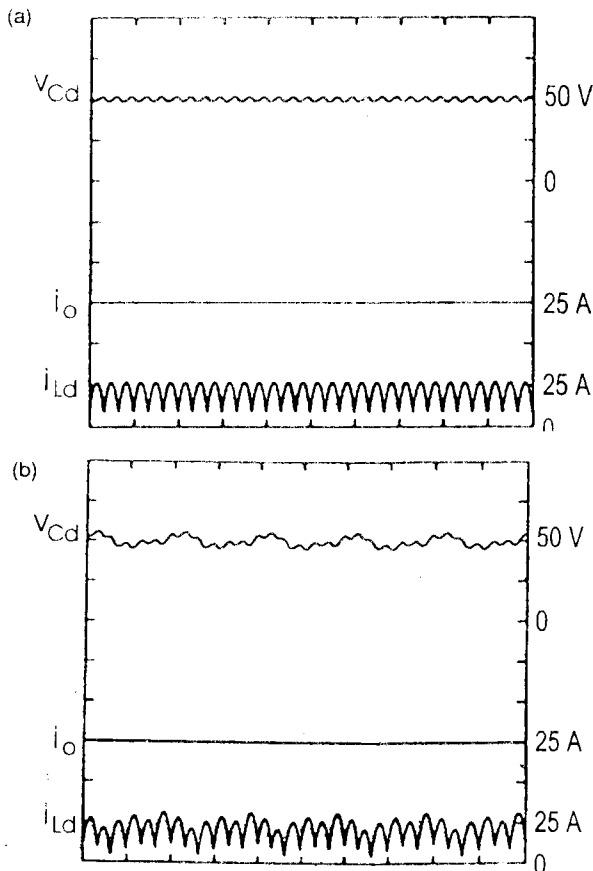


Gambar 5 Skema pengendalian penyearah dan filter aktif

Hasil perbandingan antara tegangan kapasitor yang sebenarnya dengan tegangan acuan diolah oleh pengendali PI untuk menentukan sudut penyalan *thyristor*. Dalam sistem ini, *thyristor* dikendalikan dengan algoritma *inverse cosine* agar penyearah mempunyai kinerja yang bersifat linier. Cara merancang pengendali penyearah semacam ini telah banyak dilaporkan di pustaka [11]-[12].

Sinyal bagi filter aktif juga didapat dari hasil perbandingan tegangan acuan dengan tegangan kapasitor. Pada keadaan mantap, selisih antara tegangan acuan dan tegangan sebenarnya menyatakan riak tegangan di kapasitor. Riak tegangan ini selanjutnya dibandingkan dengan sinyal segitiga frekuensi tinggi untuk menentukan sinyal penyalan transistor filter aktif.

Gambar 6 memperlihatkan hasil simulasi dari penyearah dengan data yang sama seperti terlihat di Tabel 1, tetapi sekarang dilengkapi filter aktif. Frekuensi *switching* filter aktif yang digunakan adalah 10 kHz. Tegangan sumber filter aktif diasumsikan sebesar 10 Vdc. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa arus di beban masih tetap mendekati de murni, walaupun tegangan sumbernya tak setimbang. Filter aktif bisa secara efektif meminimumkan riak frekuensi rendah yang dihasilkan penyearah.



Gambar 6 Hasil simulasi penyearah yang dilengkapi filter aktif pada tegangan sumber

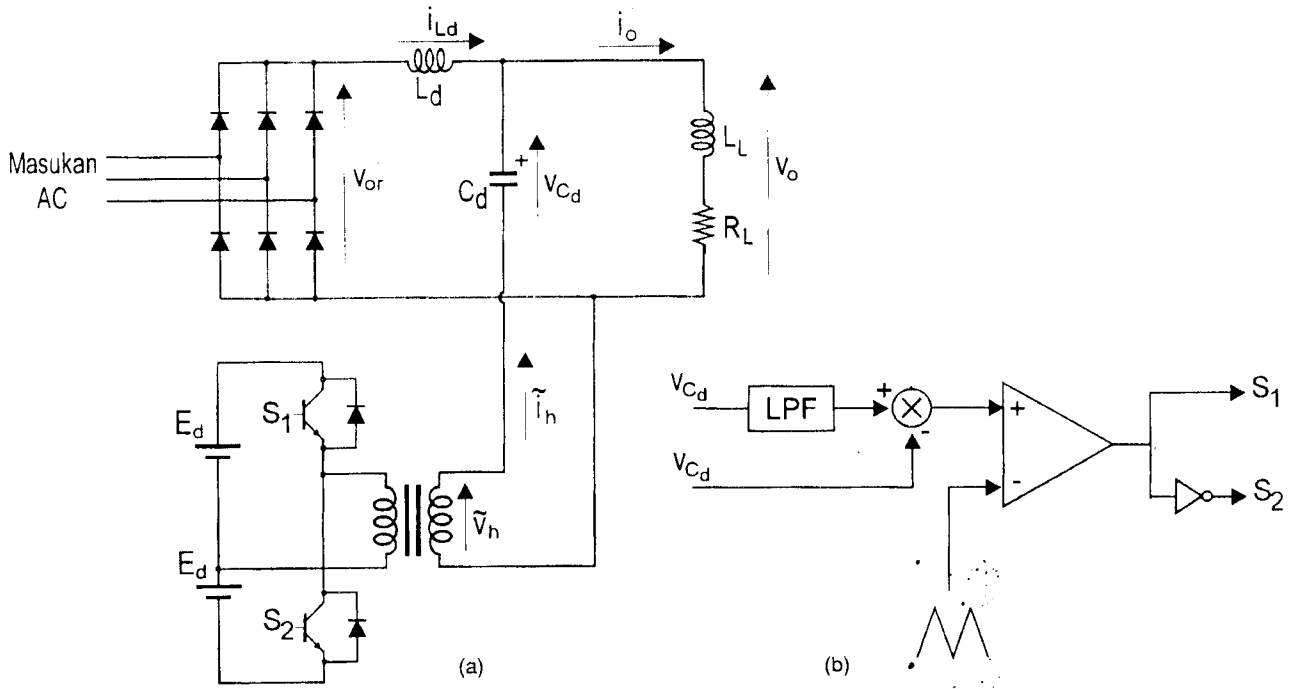
- (a) Tegangan sumber setimbang
- (b) Tegangan sumber tak setimbang

#### 4 Hasil percobaan

Untuk menguji validitas metode yang diusulkan, suatu sistem percobaan sederhana telah dilakukan dengan skema seperti terlihat di Gambar 7. Penyearah tiga-fasa yang digunakan adalah penyearah dioda tiga-fasa jembatan penuh. Filter aktif direalisasikan dengan inverter IGBT yang dioperasikan dengan frekuensi *switching* (*carrier*) 15 kHz. Sumber tegangan bagi filter aktif didapat dari penyearah dioda kecil satu-fasa. Data percobaan diberikan di Tabel 2. Ketidakseimbangan sumber diciptakan dengan menyisipkan induktor 3 mH di salah satu fasa sumber.

Tabel 2 Data percobaan

Tegangan sumber ac 50 Hz	25 V
Induktansi filter	3 mH
Kapasitansi filter	47 $\mu$ F
Tegangan sumber filter aktif	15 Vdc
Resistansi beban	10 $\Omega$
Induktansi beban	3 mH

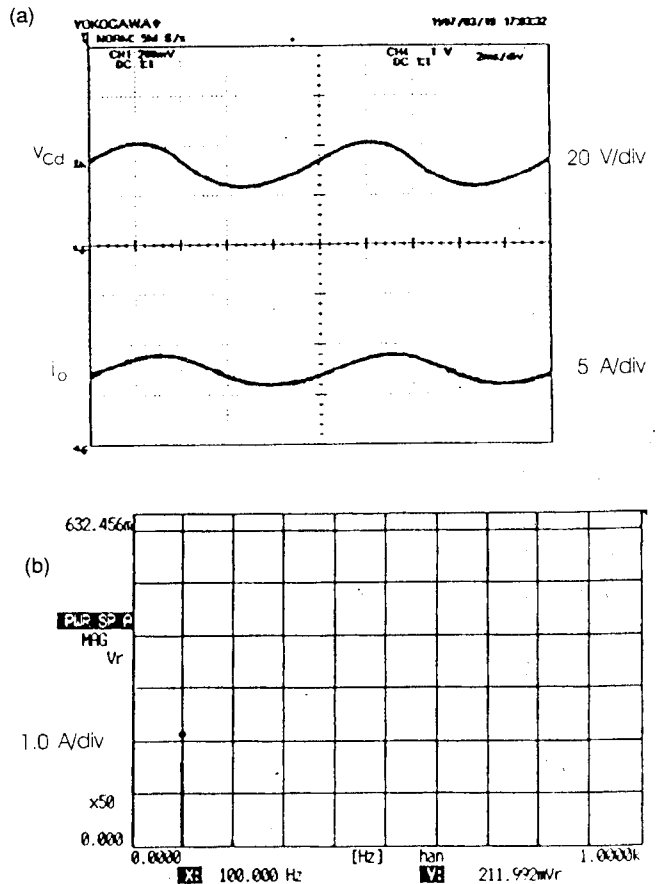


Gambar 7 (a) Skema percobaan (b) Rangkaian kendali

Filter aktif dikendalikan secara sederhana dengan menggunakan skema kendali seperti terlihat di Gambar 7. Tegangan di filter kapasitor dideteksi dan hasilnya diproses oleh filter *low-pass* untuk mendapatkan komponen dc-nya. Selisih antara komponen dc dan tegangan sebenarnya dari filter kapasitor menyatakan tegangan riak di kapasitor. Riak ini selanjutnya dibandingkan dengan sinyal segitiga frekuensi tinggi untuk mengendalikan penyalan transistor filter aktif.

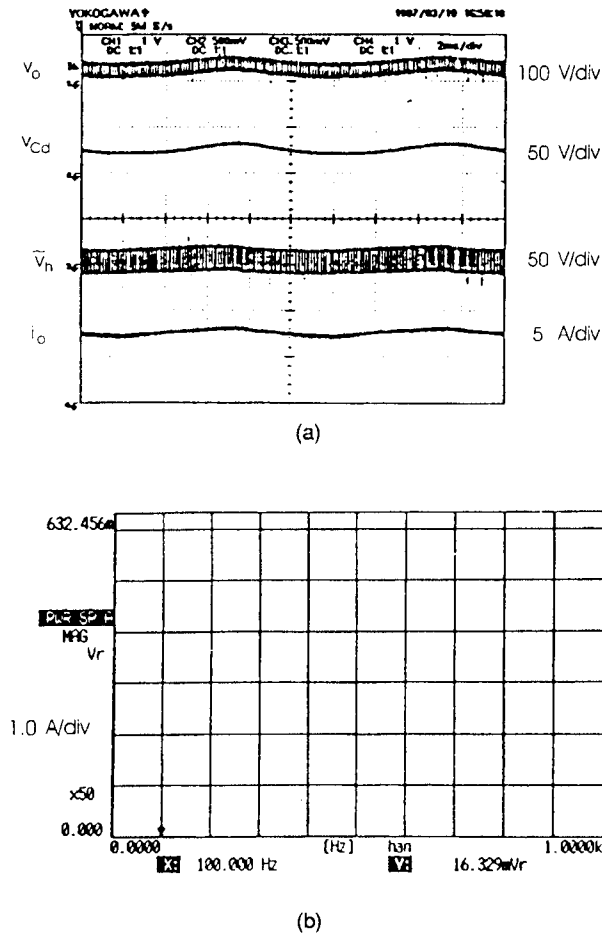
Gambar (8a) memperlihatkan tegangan dan arus beban pada tegangan sumber yang tak setimbang saat filter aktif belum dihubungkan ke rangkaian. Gambar 8(b) memperlihatkan spektrum arus beban. Gambar ini menunjukkan bahwa pada tegangan sumber yang tidak setimbang, arus beban mengandung riak frekuensi rendah (100 Hz) yang cukup besar. Riak frekuensi rendah ini tidak akan muncul jika tegangan sumbernya setimbang.

Gambar 9 (a) dan (b) menunjukkan hasil percobaan saat filter aktif dihubungkan ke penyearah. Gambar 9(a) menunjukkan tegangan beban, tegangan kapasitor, tegangan filter aktif, dan arus beban. Gambar (9b) menunjukkan spektrum arus beban. Gambar ini menunjukkan bahwa riak frekuensi rendah bisa secara efektif diminimisasi oleh filter aktif. Riak frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh filter aktif bisa dengan mudah diredam oleh induktansi beban.



Gambar 8 Hasil percobaan tanpa filter aktif.

- (a) Tegangan dan arus beban.
- (b) Spektrum beban



Gambar 9 Hasil percobaan dengan filter aktif.  
(a) Gelombang keluaran. (b) Spektrum arus beban.

## 5 Kesimpulan

Dalam makalah ini, suatu metode baru untuk minimisasi riak arus keluaran penyearah daya besar dengan menggunakan filter aktif telah diusulkan dan validitasnya diuji lewat simulasi dan percobaan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa filter aktif riak keluaran penyearah bisa diminimisasi sehingga menjadi sangat kecil, walaupun sumber tegangan penyearahnya tidak setimbang. Metode yang diusulkan cocok untuk penyearah daya besar karena kapasitas tegangan dan arus dari filter aktif yang diusulkan keduanya sangat kecil dibandingkan dengan kapasitas penyearah. Optimasi ukuran filter pasif LC dan filter aktif masih perlu diteliti lebih lanjut. Pengaruh filter aktif pada kinerja dinamik penyearah juga masih perlu diteliti lebih mendalam.

## 6 Ucapan terima kasih

Penelitian ini dibiayai oleh Hitachi Scholarship Foundation dan The Japan Society for Promotion of Science dan dilakukan di Tokyo Institute of Technology, Jepang. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Terua Kataoka dan Prof. Yukihiro Sato, keduanya dari Tokyo Institute of Technology, yang telah banyak membantu dalam penelitian ini.

## 7 Daftar pustaka

1. Cilyo, F.F., Design and Performance Aspects of a Precision High-Current Power Supply, *IEEE Trans. Nuclear Science*, **22**, 1238-1241 (1975).
2. Lisser, J. dan Bouwknecht, K., High-Speed High-Precision Programmable Magnet Power Supply for a Wide Range of Magnet Time Constants, *IEEE Trans. Nuclear Science*, **28**, 2859-2861 (1991).
3. Han, B.M., Karady, G.G. dan Thiessen, H.A., Tuning Magnet Current-Conditioning System for RF Cavity in a High-Intensity Proton Accelerator, *IEEE Trans. Nuclear Science*, **38**, 1005-1012 (1991).
4. Sato, H., et.al., Performance of the Main Ring Magnet Power Supply of the KEK 12 GeV Proton Synchrotron, *IEEE Trans. Nuclear Science*, **39**, 1490-1495 (1992).
5. Paice, D.A., *Power Electronic Converter Harmonics*, IEEE Press, New York, (1996).
6. Reeve, J. dan Baron, J.A., Harmonic DC Line Voltages Arising from HVDC Power Conversion, *IEEE Trans. Power App. Sys.*, **89**, 1619-1624 (1970).
7. Mathur, R. M. dan Sharaf, A.M., Harmonics on the DC Side in HVDC Conversion, *IEEE Trans. Power Appl. Sys.*, **96**, 1631-1637 (1977).
8. Kwon, B.H., Design of a Highly Stable Electromagnet Power Supply, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **39**, 149-158 (1992).
9. Boenig, H.J., et.al., Design and Operation of a 40-MW Highly Stabilized Power Supply, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **32**, 1146-1157 (1996).
10. Liang, R. dan Dewan, S.B., A Low-Ripple Power Supply for High-Current Magnet Load, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **30**, 1006-1015 (1994).
11. Olivier, G., Stefanovic, V.R. dan Jamil, M.A., Digitally Controlled Thyristor Current Source, *IEEE Trans. Ind. Electr. & Cont. Instr.*, **26**, 185-191 (1979).
12. McMurray, W., The Closed-Loop Stability of Power Converters with an Integrating Controller, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **18**, 521-531 (1982).