

# DESAIN DAN KAJIAN TAPIS DAYA AKTIF SHUNT MELALUI PENDEKATAN PWM BOOST RECTIFIER

Slamet Riyadi<sup>\*)</sup>

Teknik Elektro, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang  
Jl. Pawiyatan Luhur IV-1 Semarang 50234, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail: s\_riyadi672003@yahoo.com

## Abstrak

Teknologi elektronika daya banyak diterapkan dalam berbagai sektor baik industri, perkantoran dan rumah tangga. Penggunaan konverter statis, kendali berbasis digital dan lampu hemat energi sangat dominan dalam aplikasi. Beban jenis ini selalu menimbulkan harmonik yang berdampak pada menurunnya kualitas daya listrik. Kandungan harmonik menyebabkan dampak negatif yang sangat serius sehingga perlu dilakukan mitigasi. Tapis daya aktif merupakan suatu solusi untuk melakukan reduksi harmonik. Untuk merancang skema kendali tapis daya aktif banyak kerumitan dijumpai. Pada makalah ini dipaparkan suatu pendekatan desain dan kajian dari tapis daya aktif shunt satu fasa melalui *PWM boost rectifier*. Analisis arus, tegangan dan daya dilakukan untuk mendekati desain. Akhirnya simulasi dan pengujian laboratorium dilakukan untuk verifikasi hasil analisis.

*Kata kunci: tapis daya aktif, harmonik, boost rectifier, beban tak linier*

## Abstract

Power electronics technologies are widely applied in various sectors such as industrial, office and household fields. The use of static converters, digital-based control and saving-energy lamps are very dominant in the recent applications. Such loads are always cause harmonics that result in declining the electric power quality. Harmonic contents have very serious negative impacts so they must be mitigated. Active power filtering is a solution to the harmonic reduction. Designing a control scheme of an active power filter encountered a lot of complexities. This paper describes a design approach and study of a shunt active power filter through a PWM boost rectifier. Analysis of current, voltage and power are taken to approach the design. Finally, simulation and laboratory testing conducted to verify the results of the analysis.

*Keywords: active power filter, harmonics, boost rectifier, nonlinear loads*

## 1. Pendahuluan

Penggunaan beban-beban tak linier dewasa ini sangat mendominasi aplikasi lapangan, baik pada sektor industri, perkantoran dan rumah tangga. Beban jenis ini dapat dijumpai dalam bentuk penggunaan kendali mesin listrik berbasis konverter statis, komputer, lampu hemat energi, tanur listrik dan lain-lain. Dikatakan tak linier karena beban jenis ini menarik arus sumber yang tidak sinusoidal (mengalami distorsi) [1],[2]. Dilihat dari spektrum gelombangnya maka akan muncul komponen harmonik, yaitu komponen gelombang dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamentalnya (50 Hz).

Komponen harmonik dapat mengakibatkan dampak negatif pada sistem, di antaranya umur peralatan bertambah pendek, pemanasan lebih pada trafo dan mesin listrik, kegagalan kendali, arus netral meningkat dan

lainnya [3]. Oleh karena itu, kandungan harmonik perlu direduksi. Penggunaan tapis daya pasif banyak mengalami kendala dalam aplikasi karena masalah resonansi, selain itu juga diperlukan jumlah cukup banyak bergantung pada orde harmonik yang akan direduksi. Perkembangan teknologi semikonduktor melalui saklar statis berkecepatan tinggi telah mendorong dikembangkannya tapis daya aktif (*Active Power Filter = APF*). Suatu APF merupakan konverter *bidirectional* yang dikendalikan untuk melakukan kompensasi arus/tegangan harmonik [4].

APF telah banyak dikembangkan baik satu fasa maupun tiga fasa. Untuk sistem tiga fasa terdapat sistem dengan tiga kawat atau empat kawat [5]-[7]. Hampir seluruh kajian APF didasarkan pada pendekatan inverter. Pada makalah ini dipaparkan pendekatan desain APF melalui suatu penyearah berunjuk kerja tinggi (*PWM boost*

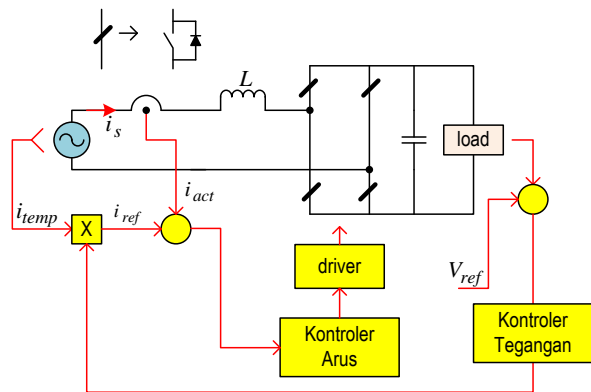
rectifier). Melalui penyearah jenis ini akan dikaji hubungan keseimbangan daya untuk memahami kendali APF. Verifikasi hasil analisis dilakukan melalui simulasi dan pengujian laboratorium.

## 2. Metode

Untuk memberi landasan dalam melakukan kajian dan desain tapis daya aktif, beberapa konsep dasar diberikan meliputi *PWM Boost Rectifier*, daya pada sistem terdistorsi dan penapisan aktif.

### 2.1. Topologi PWM Boost Rectifier

Pada Gambar 1 disajikan skema dari *PWM boost rectifier* satu fasa jenis *full-bridge* yang terdiri dari empat buah saklar statis, induktor pada sisi masukan dan kapasitor pada sisi keluaran. Penyearah ini memiliki tegangan keluaran DC yang lebih besar dari nilai puncak tegangan AC masukan. Arus masukan yang mengalir akan memiliki bentuk sinusoidal dan sefasa dengan tegangan masukan.



Gambar 1. PWM boost rectifier satu fasa jenis full-bridge dan rangkaian kendali

Jika  $V_s$ ,  $I_s$ ,  $V_o$ ,  $I_o$  adalah nilai RMS tegangan masukan, nilai RMS arus masukan, tegangan keluaran dan arus keluaran maka dapat diturunkan persamaan berikut

$$\begin{aligned} P_{in} &= P_{out} \\ V_s I_s &= V_o I_o \end{aligned} \quad (1)$$

Persamaan (1) menunjukkan hubungan keseimbangan daya antara sisi masukan dan sisi keluaran. Persamaan di atas valid karena tegangan dan arus masukan merupakan dua buah gelombang sinusoidal yang sefasa. Jika beban keluaran berupa beban resistif sebesar  $R_o$  maka diperoleh hubungan

$$I_o = \frac{V_o}{R_o} \quad (2)$$

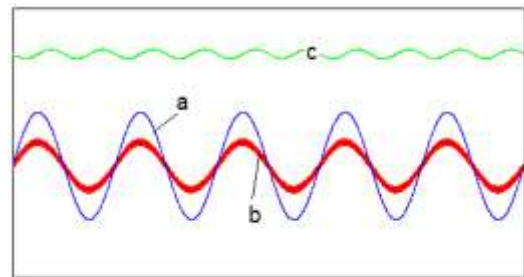
substitusi persamaan (2) ke dalam (1) menghasilkan

$$V_s I_s = \frac{(V_o)^2}{R_o}$$

$$I_s = \frac{(V_o)^2}{V_s R_o} \quad (3)$$

Persamaan (3) menunjukkan bahwa perubahan nilai beban keluaran akan mempengaruhi nilai arus masukan. Karena arus dan tegangan masukan merupakan gelombang sinusoidal sefasa maka hanya daya nyata yang dikirimkan oleh sumber ke sisi beban.

Dengan memperhatikan persamaan-persamaan di atas maka konsep kendali suatu *PWM boost rectifier* dapat dipahami. Agar supaya arus masukan memiliki bentuk sinusoidal dan sefasa dengan tegangan AC masukan maka suatu *template* berupa gelombang sinusoidal diperlukan. *Template* ini diambil dari deteksi tegangan AC masukan. Selanjutnya suatu kontroler tegangan akan meregulasi amplituda *template* menjadi referensi arus sumber  $i_{ref}$ . Selanjutnya nilai arus aktual  $i_{act}$  akan dikomparasi dengan nilai  $i_{ref}$ . Jika kontroler arus beroperasi secara optimal maka nilai  $i_{act}$  akan berfluktuasi pada nilai di sekitar  $i_{ref}$ . Perubahan pada tegangan referensi  $V_{ref}$  akan mengubah nilai  $i_{ref}$  sehingga hubungan keseimbangan daya selalu tercapai.



Gambar 2. Gelombang PWM boost rectifier satu fasa jenis full-bridge (a) tegangan masukan (b) arus masukan (c) tegangan keluaran

### 2.2. Konsep Daya pada Sistem Terdistorsi

Pada sistem dengan beban linier maka dikenal komponen daya nyata dan daya reaktif sedangkan pada sistem terdistorsi akan muncul komponen daya harmonik. Mengacu pada konsep daya pada sistem terdistorsi, jika tegangan terdistorsi dinyatakan dengan persamaan

$$\begin{aligned} v(t) &= \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t + \phi_1) \\ &+ \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}V_h \sin(h\omega t + \phi_h) \end{aligned} \quad (4)$$

Sedangkan persamaan arusnya dapat dinyatakan

$$\begin{aligned} i(t) &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \theta_1) \\ &+ \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \theta_h) \end{aligned} \quad (5)$$

Persamaan daya rata-ratanya dapat dirumuskan

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h - \theta_h) \quad (6)$$

di mana  $h$  = orde harmonik

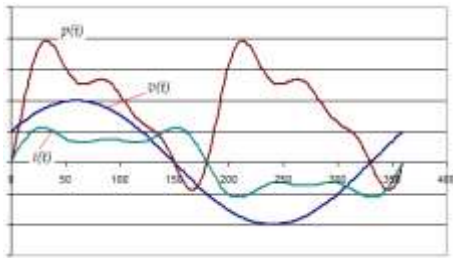
Daya semu pada sistem didefinisikan sebagai hasil perkalian nilai efektif tegangan dengan nilai efektif arus

$$S = \left( \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_h^2} \right) \left( \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_h^2} \right) \quad (7)$$

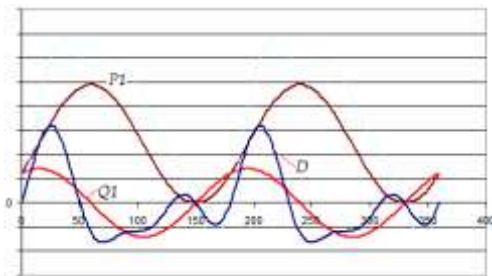
Jika diasumsikan tegangan sinusoidal dan arus terdistorsi maka dapat diturunkan

$$\begin{aligned} S^2 &= V_1^2 \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 = V_1^2 (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_h^2) \\ &= [V_1 I_1 \cos(\varphi_1 - \theta_1)]^2 + [V_1 I_1 \sin(\varphi_1 - \theta_1)]^2 \\ &\quad + V_1^2 (I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_h^2) \\ &= P^2 + Q^2 + D^2 \end{aligned} \quad (8)$$

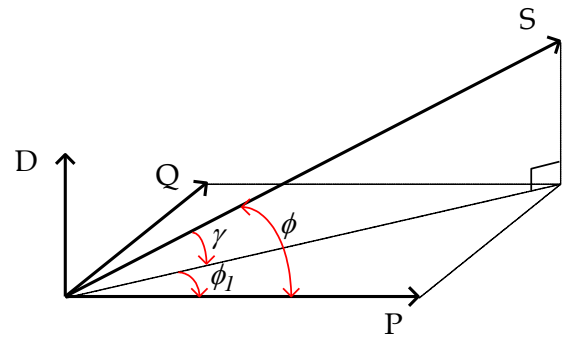
Visualisasi kasus di atas dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4 di mana daya sesaat  $p(t)$  akan diuraikan menjadi komponen daya  $P_1$  yang merupakan interaksi antara tegangan dan arus aktif fundamental, nilai rata-rata dari  $P_1$  sama dengan  $P$ . Komponen kedua adalah komponen  $Q_1$  yang merupakan interaksi antara tegangan dan arus reaktif fundamental, nilai puncak-puncak dari  $Q_1$  sama dengan  $Q$ . Sedangkan komponen daya lainnya adalah akibat interaksi antara tegangan dan komponen arus harmonik yang menghasilkan  $D$ .



Gambar 3. Gelombang tegangan, arus dan daya pada sistem terdistorsi



Gambar 4. Penguraian daya sesaat menjadi komponen komponen P1, Q1 dan D



Gambar 5. Tetrahedron daya

Berdasarkan persamaan-persamaan yang telah diuraikan di atas maka dapat diturunkan beberapa definisi sebagai berikut

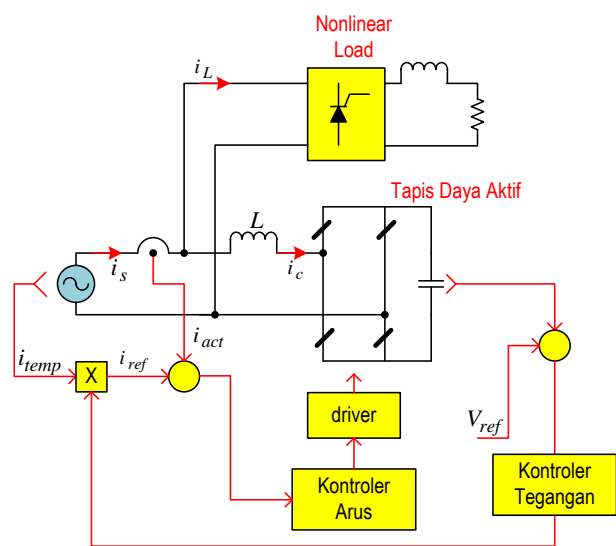
$$\text{displacement factor (fundamental PF)} = \cos \phi_1$$

$$\text{distortion factor} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S} = \cos \gamma$$

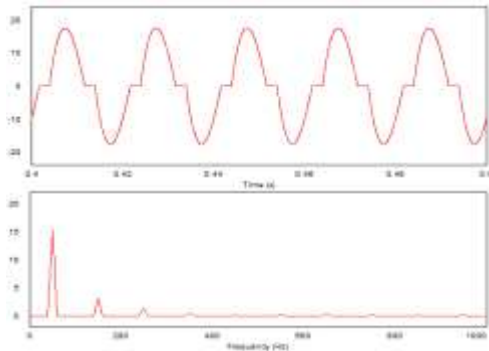
$$\text{total power factor} = \frac{I_1}{I} \cos \phi_1 = \cos \phi$$

### 2.3. Tapis Daya Aktif Shunt

Permasalahan kualitas daya akibat munculnya kandungan harmonik menimbulkan dampak negatif pada sistem sehingga perlu direduksi. APF merupakan solusi alternatif. Pada Gambar 6 disajikan suatu sistem dengan beban tak linier (*current-typed harmonic source*) sehingga arus sumber mengalami distorsi. Reduksi kandungan harmonik dilakukan dengan memasang APF secara paralel (*shunt*)



Gambar 6. Pemasangan tapis daya aktif shunt pada sistem terdistorsi



Gambar 7. Gelombang arus beban dan spektrumnya

Mengacu pada spektrum arus maka tampak bahwa arus beban memiliki dua komponen penyusun arus, yaitu komponen fundamental  $i_{Lf}$  dan harmonik  $i_{Lh}$  sehingga

$$i_L = i_{Lf} + i_{Lh} \quad (9)$$

Pada komponen arus fundamental terkandung arus aktif fundamental  $i_{Lfa}$ , yaitu arus sinusoidal yang sefasa dengan tegangan sumber dan arus reaktif fundamental  $i_{Lfr}$ , yaitu arus yang tergeser 90 derajat terhadap tegangan sumber. Tanpa pemasangan APF jenis shunt maka nilai arus sumber akan sama dengan arus beban

$$i_s = i_L = i_{Lfa} + i_{Lfr} + i_{Lh} \quad (10)$$

Untuk menjaga kualitas daya maka arus sumber harus dipaksa hanya memiliki komponen sinusoidal yang sefasa dengan tegangan sumber

$$i_s \approx i_{Lfa} \quad (11)$$

Dengan demikian maka APF jenis shunt harus menginjeksikan arus  $i_c$  sebesar

$$i_c \approx i_{Lfr} + i_{Lh} \quad (12)$$

Rangkaian pada Gambar 6 pada prinsipnya hampir mirip dengan rangkaian pada Gambar 2, perbedaan hanya terdapat pada penambahan beban tak linier dan penghilangan beban pada sisi keluaran *PWM boost rectifier*. Jika pada Gambar 2, adanya beban pada sisi keluaran *PWM boost rectifier* mengakibatkan munculnya daya nyata sehingga arus masukan (sumber) berbentuk sinusoidal dan sefasa dengan tegangan sumber. Sedangkan pada Gambar 6 hanya ada kapasitor pada sisi keluaran *rectifier* maka arus  $I_c$  akan terkait dengan daya reaktif dan harmonik.

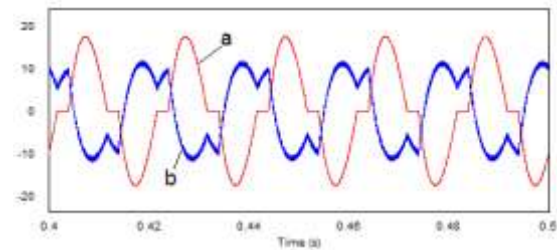
Secara analisis, arus kompensasi  $I_c$  merupakan arus yang nilainya sama dengan arus reaktif dan arus harmonik dari beban ( $I_{Lfr}+I_{Lh}$ ) tetapi dengan polaritas berlawanan. Jika keluaran dari kontroler arus merupakan sinyal pemodulasi atau pengali sebesar k, maka

$$i_s \approx i_{ref} = k.i_{temp} \quad (13)$$

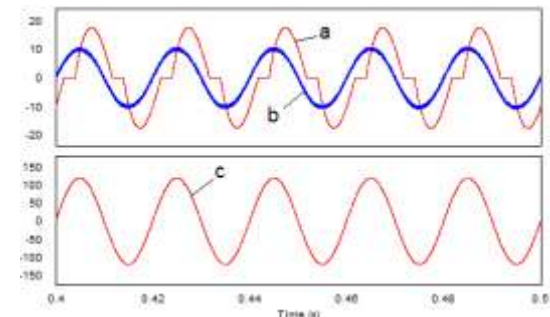
Persamaan (13) merupakan gelombang sinusoidal yang sefasa dengan tegangan sumber. Daya nyata hasil perkalian antara  $i_s$  dan  $v_s$  merupakan daya nyata yang diserap beban tak linier.

### 3. Hasil dan Analisa

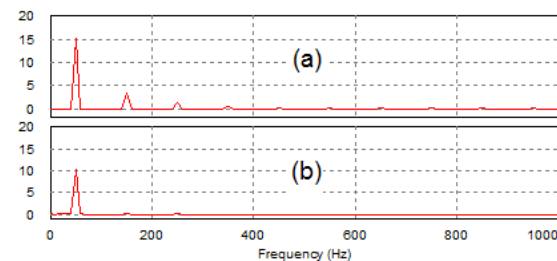
Untuk melengkapi kajian di atas maka dilakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak PSIM. Berdasarkan rangkaian pada Gambar 6, simulasi dijalankan untuk mengamati gelombang arus dan tegangan pada APF jenis *shunt*. Pada Gambar 8 ditunjukkan bentuk gelombang arus beban dan arus kompensasi yang diinjeksikan/diserap oleh *rectifier* sedangkan pada Gambar 9 disajikan gelombang arus beban dan arus sisi sumber beserta tegangannya.



Gambar 8. Hasil simulasi tapis daya aktif shunt (a) arus beban (b) arus injeksi/kompensasi



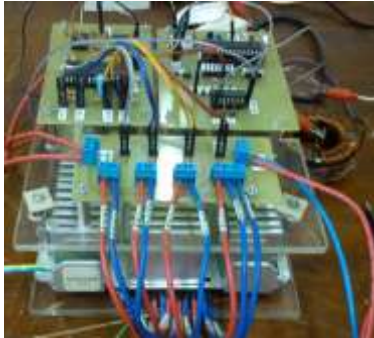
Gambar 9. Hasil simulasi tapis daya aktif shunt (a) arus beban (b) arus sumber (c) tegangan sumber



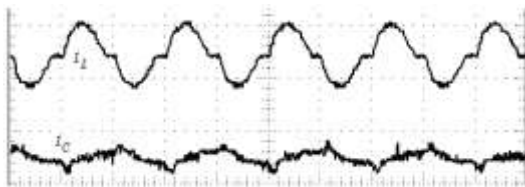
Gambar 10. Spektrum arus (a) arus beban (b) arus sumber

Selanjutnya suatu prototip dibuat untuk verifikasi hasil kajian dan simulasi (Gambar 11). Dari hasil pengujian laboratorium akan ditampilkan gelombang yang

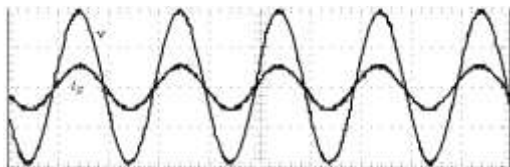
mendukung hasil simulasi. Pada Gambar 12 disajikan hasil pengukuran arus beban dan arus injeksi sedangkan pada Gambar 13 tampak bahwa arus sumber memiliki bentuk sinusoidal dan sefasa dengan tegangan sumber.



Gambar 11. Prototip tapis daya aktif shunt yang diturunkan berdasarkan PWM boost rectifier



Gambar 12. Hasil pengukuran arus beban dan arus kompensasi (skala : 10A/div – 10ms/div)



Gambar 13. Hasil pengukuran tegangan sumber dan arus sumber (skala : 50V/div,10A/div – 10ms/div)

Beban tak linier yang tersambung ke sistem mengakibatkan munculnya kandungan harmonik yang berdampak menurunnya kualitas daya listrik. Ditinjau dari sisi daya maka pada kondisi ini, sistem akan mengirimkan daya nyata, daya reaktif dan daya harmonik. Suatu APF jenis *shunt* akan mengambil alih transfer daya reaktif dan harmonik sehingga sisi sumber hanya akan mengirimkan daya nyata saja. Daya nyata yang dikirimkan oleh sumber dapat dilihat melalui gelombang arus sinusoidal yang sefasa dengan tegangan sumber. Peranan kapasitor pada sisi DC dari *rectifier* adalah untuk mengendalikan keseimbangan daya/energi. Jika rugi-rugi *rectifier* diabaikan maka karena hanya ada elemen kapasitor, daya nyata rata-rata diserap oleh APF sama dengan nol.

## 4. Kesimpulan

Suatu kajian tentang APF dan kendalinya telah dipaparkan melalui pendekatan *PWM boost rectifier*. Melalui simulasi disajikan bagaimana proses kompensasi dapat dilakukan sehingga menghasilkan arus sumber sinusoidal dan sefasa dengan tegangan sumber. Kontroler tegangan difungsikan untuk mengatur keseimbangan daya melalui tegangan kapasitor sedangkan kontroler arus berfungsi membentuk gelombang arus.

## Referensi

- [1]. Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1996; 32(6): 1312-1322
- [2]. Mossoba J, Lehn P. W. A Controller Architecture for High Bandwidth Active Power Filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2003; 18(1): 317-325
- [3]. Gruzs T. M. A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1990; 26(4): 719-725
- [4]. Peng F. Z. Application Issues of Active Power Filters. *IEEE Industry Applications Magazine*. 1998; 21-30
- [5]. Riyadi S, Fadel M, Haroen Y, Sugihartono, Sudirham S. Functioning a Shunt APF as a Power or Current Compensator. *European Journal of Electrical Engineering*. 2009; 11(1): 57-76
- [6]. Aredes M, Hafner J, Heumann K. Three-Phase Four-Wire Active Filter Control Strategies. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1997; 12(2): 311-318
- [7]. Chen C, Hsu Y. A Novel Approach to The Design of a Shunt Active Filter for an Unbalanced Three-Phase Four-Wire System under Nonsinusoidal Conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2000; 15(4): 1258-1264