

Pengendalian Shunt Active Power Filter (SAPF) Berbasis Fuzzy-Neural Network

Awan Uji Krismanto dan Yusuf Ismail Nakhoda
Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Malang
e-mail: awan_krismanto@fti.itn.ac.id

Abstrak—Penggunaan beban non linier yang semakin meningkat menyebabkan timbulnya arus harmonisa. Cara konvensional yang banyak digunakan untuk meminimalisasi pengaruh harmonisa adalah dengan pemasangan pasif filter. Akan tetapi, pemasangan pasif filter memiliki beberapa kekurangan terkait dengan selektifitas tuned frekuensi dan fleksibilitas yang terbatas. Untuk mengatasi kelemahan pasif filter, maka digunakan konfigurasi filter aktif yaitu *shunt active power filter* (SAPF). Aktif filter memiliki tingkat fleksibilitas yang tinggi sehingga dapat digunakan untuk beban-beban dinamis dengan karakteristik harmonisa yang bervariasi. Metode kendali SAPF berbasis kecerdasan buatan seperti Fuzzy dan Neural Network mampu meningkatkan kinerja SAPF dibandingkan dengan kendali yang ada sebelumnya. Hal ini ditunjukkan dengan nilai THD arus yang berkurang dari 19,27% sebelum pemasangan SAPF menjadi berkisar antara 3,36% pada beban status dan dari 27,71% menjadi 3,57% pada beban yang berfluktuasi.

Kata Kunci— Harmonisa, SAPF, Fuzzy, Neural Network

I. PENDAHULUAN

Penggunaan beban non linier yang semakin meningkat seperti *variable speed drives*, peralatan berbasis elektronika daya untuk sistem konversi dan peralatan berbasis mikrokontroller menyebabkan timbulnya arus harmonisa pada sistem tenaga listrik. Arus harmonisa merupakan masalah utama dalam bidang industri dan sistem tenaga listrik. Harmonisa menimbulkan berbagai pengaruh yang merugikan pada sistem tenaga listrik. Kenaikan tegangan yang melebihi batas dan kegagalan fungsi peralatan-peralatan sensitif, kenaikan panas pada mesin-mesin elektrik dan kenaikan rugi-rugi. Berbagai pengaruh negatif ini apabila dibiarkan akan menurunkan efisiensi sistem serta kualitas daya yang mempengaruhi penurunan kinerja sistem tenaga secara keseluruhan. Di sisi konsumen, munculnya harmonisa akan menyebabkan kenaikan biaya tagihan listrik dan berkurangnya umur peralatan.

Berbagai cara telah dilakukan untuk meminimalkan pengaruh harmonisa pada sistem tenaga listrik. Cara konvensional yang banyak digunakan adalah dengan pemasangan pasif filter untuk mereduksi harmonisa pada frekuensi tertentu. Akan tetapi, pemasangan pasif filter memiliki beberapa kekurangan. Pasif filter mempengaruhi nilai impedansi sistem sehingga justru dapat memperkuat harmonisa pada frekuensi yang tidak difilter. Kelemahan yang lain terkait dengan fleksibilitas pasif filter yang terbatas sehingga hanya dapat digunakan untuk beban-beban statis yang menimbulkan harmonisa yang sama, pasif filter tidak menunjukkan kinerja yang baik jika digunakan untuk meminimalisasi harmonisa pada beban-beban dinamis. Untuk mengatasi kelemahan pasif filter, maka digunakan

konfigurasi baru yaitu *shunt active power filter* (SAPF). Aktif filter memiliki tingkat fleksibilitas yang tinggi sehingga dapat digunakan untuk beban-beban dinamis dengan karakteristik harmonisa yang bervariasi. Kinerja SAPF sangat bergantung dari sistem kendali yang digunakan.

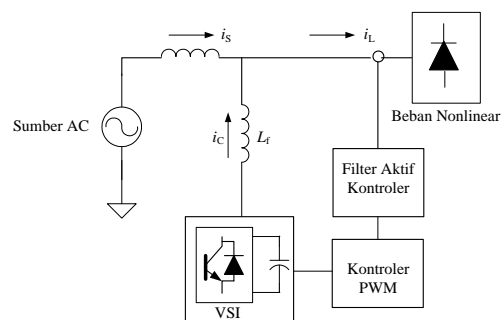
Metode kendali berbasis kecerdasan buatan seperti Fuzzy dan Neural Network merupakan metode pengendalian yang mengalami perkembangan pesat. Metode ini berkembang karena kemampuannya untuk memberikan pengendalian yang fleksibel dan memiliki tanggapan peralihan yang cepat sehingga sangat sesuai digunakan pada kondisi yang bervariasi.

Dari latar belakang di atas, paper ini membahas kendali berbasis Fuzzy-Neural Network pada SAPF. System kendali ini digunakan untuk memonitor kondisi arus harmonisa dan meminimalisasi arus harmonisa sebagai dapat meningkatkan efisiensi system tenaga listrik.

II. DASAR TEORI

A. Shunt Active Power Filter (SAPF)

SAPF terdiri atas dua bagian utama. Bagian pertama adalah PWM konverter sebagai pengolah daya dan bagian kedua adalah pengendali untuk pengolah sinyal. PWM konverter bertanggung jawab untuk memproduksi arus kompensasi yang nantinya akan diinjeksikan ke sistem jaringan tenaga listrik. Bagian pengendali berfungsi memproses sinyal arus masukan untuk menentukan arus referensi secara real time yang kemudian diteruskan ke PWM konverter. Gambar 1 menunjukkan konfigurasi dasar SAPF untuk kompensasi arus harmonisa pada beban nonlinear.



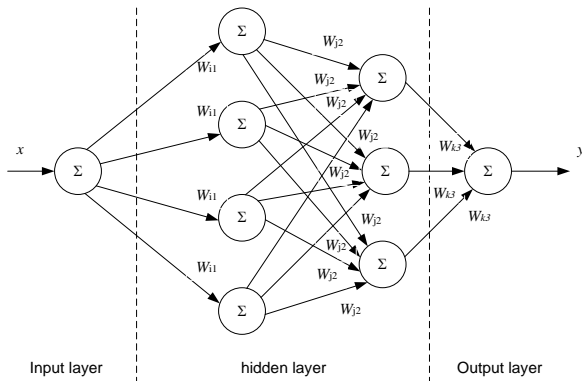
Gambar 1. Konfigurasi Dasar SAPF.

SAPF bekerja dalam loop tertutup, secara kontinyu mendeteksi arus beban i_L , dan menghitung referensi arus kompensasi i_c untuk PWM konverter. Pada kondisi ideal, PWM konverter diasumsikan sebagai amplifer daya linier yang menghasilkan arus kompensasi i_c secara tepat.

B. Jaringan Syaraf Tiruan Tipe MLP

Multi Layer Perceptron (MLP) merupakan tipe jaringan syaraf tiruan yang pertama. Pada dasarnya, ANN tersebut terdiri atas lapisan masukan (*input layer*), lapisan tersembunyi (*hidden layer*) dan lapisan keluaran (*output layer*). Untuk menyelesaikan permasalahan yang sederhana, satu hidden layer dirasa sudah cukup tetapi untuk permasalahan yang lebih kompleks, penambahan hidden layer dapat digunakan pada jaringan. Konfigurasi dasar MLP ditunjukkan pada Gambar 2.

ANN tipe MLP ditraining dengan menggunakan algoritma Lavenberg-Marquardt Back Propagation (LMBP). Algoritma tersebut menggunakan pendekatan differensial orde kedua tanpa melibatkan perhitungan matriks Hessian sehingga proses pelatihan menjadi lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional Back Propagation untuk mendapatkan perbaikan bobot jaringan. Algoritma LMBP memiliki proses maju (*forward*) dan proses mundur (*backward*). Proses maju menghitung kesalahan pada output yang terjadi pada tiap set bobot (*weight*) yang telah ditentukan. Bobot yang telah didapatkan diperbaiki secara terus menerus pada proses mundur (*backward*) untuk mendapatkan nilai keluaran yang diinginkan.



Gambar 2 Jaringan Syaraf Tiruan Tipe MLP.

Algoritma LMBP dijelaskan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Inisialisasi: semua bobot dan bias ditentukan melalui proses random yang terdistribusi secara merata.
- 2) Training set ditentukan dengan persamaan $\{[p(1), t(1)], [p(2), t(2)], \dots [p(K), t(K)]\}$, dimana K menunjukkan sekumpulan set data dan p, t masing-masing merupakan input dan output yang diinginkan. Vektor masukan $p(n)$ diimplementasikan pada layer masukan yang terdiri atas node-node dan vector keluaran yang diinginkan $t(n)$ diletakkan pada output layer. Potensial aktivasi $v_{ij}(n)$ dan sinyal aktivasi $a_{ij}(n)$ dari jaringan dihitung dengan proses maju melewati lapisan demi lapisan:

$$\bar{a}^0(k) = \bar{p}(k) \text{ untuk layer masukan} \quad (1)$$

$$\bar{a}^{l+1}(k) = \bar{f}^{l+1}(W^{l+1}\bar{a}^l(k) + \bar{b}^{l+1}) \quad (2)$$

$$l = 0, 1, \dots, M-1 \text{ and } k = 1, 2, \dots, k$$

$$\bar{e}(k) = t(k) - \bar{a}^M(k)$$

Dimana \bar{e} merupakan vektor error dan k mengacu pada pola masukan jaringan. W^{l+1} merupakan matriks bobot yang menghubungkan lapisan l^{th} dan $(l+1)^{th}$ dan \bar{b}^{l+1} merupakan vektor busa untuk layer $(l+1)^{th}$.

- 3) Jumlah error (Sum Square Error) V pada semua masukan dihitung dengan menggunakan persamaan (3).

$$V = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \bar{e}^T(k) \bar{e}(k) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{S_M} e_{j,k}^2 \quad (3)$$

- 4) Error dilewatkan dalam proses mundur (*backward process*) dan bobot diperbaiki lapisan demi lapisan. Untuk mencapai nilai bobot yang optimal, sensitivitas atau turunan dari fungsi aktivasi terhadap bobot dihitung. Gradien V dalam bentuk Jacobian ditunjukkan dalam persamaan (4).

$$\frac{\partial V}{\partial \bar{x}} = J^T(\bar{x}) e(\bar{x}) \quad (4)$$

dengan \bar{x} merupakan vector bobot dan bias dan $J(\bar{x})$ merupakan Jacobian matriks $T \times C$ yang dinyatakan dalam persamaan (5).

$$J(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\bar{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1(\bar{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_1(\bar{x})}{\partial x_C} \\ \frac{\partial e_2(\bar{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_2(\bar{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_2(\bar{x})}{\partial x_C} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_T(\bar{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_T(\bar{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_T(\bar{x})}{\partial x_C} \end{bmatrix} \quad (5)$$

T dalam persamaan (5) merupakan perkalian jumlah pasangan input/output dan dimensi dari vector keluaran ANN S_M . C merupakan jumlah total koefisien ANN. Vektor error keluaran $e(\bar{x})$ dinyatakan dalam persamaan (6).

$$e(\bar{x}) = [e_1(\bar{x}) \ e_2(\bar{x}) \ \dots \ e_T(\bar{x})]^T \quad (6)$$

Perhitungan matriks Jacobian di atas merupakan langkah penting dalam algoritma LMBP. Matriks Jacobian merupakan matriks derivatif parsial pertama dari setiap vector yang ada. Matriks tersebut dapat dibentuk dengan mengambil derivatif parsial dari setiap output terhadap bobotnya. Dalam implementasinya pada algoritma LMBP, matriks Jacobian dibentuk dengan menggunakan derivatif dengan batas-batas tertentu (*finite derivative*). Dalam jaringan syaraf tiruan, matriks Jacobian dapat dihitung dengan menggunakan aturan rantai dalam kalkulus dan turunan pertama pada fungsi aktivasi, sehingga persamaan derivatif (6) terhadap variable x_C , yang merupakan salah satu elemen dari Jacobian matriks ditunjukkan pada persamaan (7).

$$J_{T,c}(\bar{x}) = \frac{\partial e_T(k)}{\partial x_C} = \frac{\partial (t_T(k) - a_T^M(k))}{\partial x_C} = -\frac{\partial a_T^M}{\partial x_C} \quad (7)$$

x_C dapat dinyatakan sebagai $w_{i,j}^{l+1}$ or b_i^{l+1} , dengan $T = 1, 2, \dots, T$, $c = 1, 2, \dots, C$, dan $l = 1, 2, \dots, S_M$ (jumlah neuron pada layer masukan). Untuk neuron keluaran q , jumlah masukan (v_q^M) pada fungsi transfer dinyatakan dalam persamaan (8).

$$v_q^M = \sum_{j=1}^{S_M-1} w_{q,j}^M a_j^{M-1} + b_q^M \quad (8)$$

dengan $a_q^M = f(v_q^M)$, kita mengambil derivatif parsial terhadap $w_{q,j}^M$ dan b_q^M .

$$\frac{\partial a_q^M}{\partial w_{q,j}^M} = \frac{\partial f(v_q^M)}{\partial w_{q,j}^M} = \frac{\partial f(v_q^M)}{\partial v_q^M} \cdot \frac{\partial v_q^M}{\partial w_{q,j}^M} = \dot{f}(v_q^M) a_j^{M-1} \quad (9)$$

$$\frac{\partial a_q^M}{\partial b_q^M} = \frac{\partial f(v_q^M)}{\partial b_q^M} = \frac{\partial f(v_q^M)}{\partial v_q^M} \cdot \frac{\partial v_q^M}{\partial b_q^M} = \dot{f}(v_q^M) \quad (10)$$

$\dot{f}(v_q^M)$ merupakan derivatif dari fungsi aktivasi pada layer keluaran terhadap masukan. $\sigma_{i,q}^{l+1}(k)$ didefinisikan sebagai salah satu elemen dari matriks sensitivitas $\bar{\sigma}^{l+1}(k)$ sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (11).

$$\sigma_{i,q}^{l+1} = \frac{\partial a_q^M(k)}{\partial v_i^{l+1}(k)} = \frac{\partial f(v_q^M(k))}{\partial v_i^{l+1}(k)} \quad (11)$$

Pada algoritma ini, matriks sensitivitas dibentuk pertama kali pada layer keluaran yang merupakan derivatif pertama terhadap fungsi aktivasinya,

$$\bar{\sigma}^M = \dot{F}^M(\bar{v}^M(k)) \quad (12)$$

$\bar{v}^M(k)$ merupakan vector input terhadap fungsi transfer dan

$$\dot{F}^M(\bar{v}^M(k)) = \text{diag}[\dot{f}(v_1^M(k)), \dot{f}(v_2^M(k)), \dots, \dot{f}(v_{S_M}^M(k))] \quad (13)$$

Setelah menurunkan semua persamaan di atas, Jacobian matriks pada persamaan (5) dapat disusun dengan menggunakan persamaan (6), (5), (7) dan (8).

- 5) Akhirnya semua bobot dan bias diperbaiki dengan menggunakan persamaan (14)

$$\Delta \bar{x} = [J^T(\bar{x})J(\bar{x}) + \mu I]^{-1} J^T(\bar{x})e(\bar{x}) \quad (14)$$

μ dalam persamaan (14) merupakan faktor/ konstanta pengali dan $e(\bar{x})$ vector kesalahan. Untuk pengendalian SAPF, MLP didesain dengan tiga input

dan tiga output serta beberapa hidden layer. Fungsi aktivasi yang digunakan pada hidden layer adalah log-sigmoid.

C. Logika Fuzzy

Pengertian paling dasar dari logika Fuzzy adalah metode untuk menangani segala sesuatu yang bersifat tidak pasti, ambigu dari suatu sistem. Logika fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Zadeh pada tahun 1965. Logika Fuzzy merupakan generalisasi dari semua teori yang konvensional, sehingga akibatnya logika Fuzzy tetap menjadi bidang yang membutuhkan keahlian analisis dan matematis yang sangat baik. Logika Fuzzy mencoba untuk menyelesaikan hal-hal yang tidak pasti dalam bidang teknik dengan mengikutsertakan semua parameter yang pasti yang nantinya digunakan untuk membuat pernyataan menjadi jelas. Logika Fuzzy merupakan suatu metode yang tepat untuk memetakan ruang input ke dalam ruang output. Sehingga dengan menggunakan logika Fuzzy ini, output yang diinginkan merupakan hasil pengejawantahan dari input yang ada dengan menggunakan aturan-aturan yang terkait.

Sebagai suatu metode logika, logika Fuzzy mempunyai beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan metode logika lainnya seperti:

- Logika Fuzzy lebih mudah untuk dimengerti
- Sifatnya yang lebih fleksible
- Toleran yang cukup besar terhadap data yang tidak pasti
- Dapat digunakan untuk sistem nonlinear dan kompleks, terutama untuk sistem yang tidak dapat dengan mudah dibuat model matematis antara masukan dan keluaran sistem.
- Bahasa yang dipakai dalam logika Fuzzy adalah bahasa yang biasanya dipakai oleh manusia (variable linguistic) sehingga akan lebih mudah untuk dipahami.

III. PERANCANGAN KONTROL SAPF BERBASIS FUZZY-NEURAL NETWORK

Sistem pengendalian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sistem kontrol SAPF berbasis Fuzzy-Neural Network yang bertujuan untuk mengeliminasi osilasi pada daya aktif, memperbaiki faktor daya dan pada akhirnya menghilangkan komponen harmonisa yang dihasilkan oleh beban-beban nonlinear. Algoritma kendali SAPF ditunjukkan pada Gambar 3.

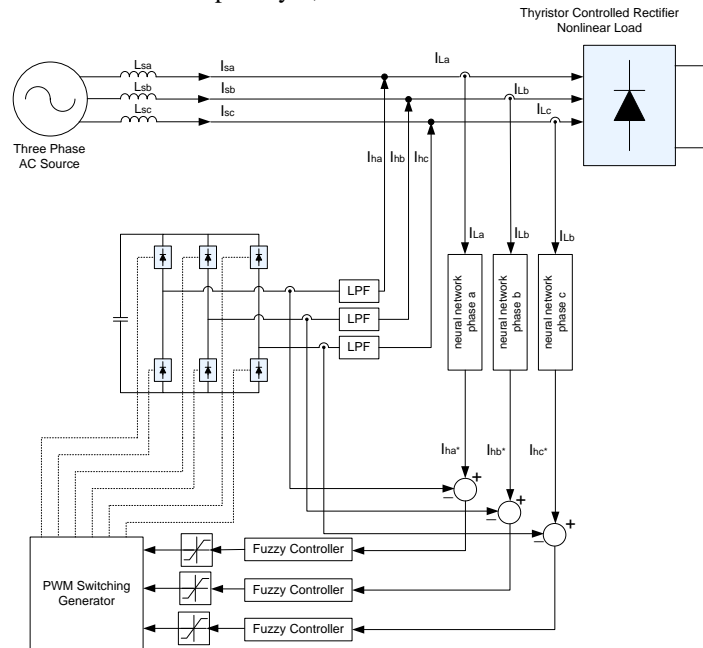
Arus beban non linier yang terdeteksi digunakan sebagai parameter masukan neural network. Ekstraksi arus harmonisa dan komponen fundamental terjadi pada blok neural network sehingga keluaran dari blok tersebut adalah komponen arus harmonisa saja. Komponen arus harmonisa I_{ha}^* , I_{hb}^* dan I_{hc}^* dari setiap fasa digunakan sebagai arus referensi bagi PWM yang akan menghasilkan sinyal penyalan gerbang konverter. Konverter sumber tegangan (VSI) akan menghasilkan arus kompensasi I_{ha} , I_{hb} , and I_{hc} berdasarkan arus referensi I_{ha}^* , I_{hb}^* dan I_{hc}^* yang dihasilkan oleh neural network.

Error didapatkan dari perbedaan arus referensi I_{ha}^* , I_{hb}^* and I_{hc}^* dan umpan balik atau arus yang dihasilkan oleh konverter, I_{ha} , I_{hb} , and I_{hc} . Error (e) dan differensial error (Δe) ini merupakan masukan untuk pengendali fuzzy untuk meningkatkan performa SAPF. *Interface low pass filter* dihubungkan antara konverter dan sistem untuk

menghilangkan harmonisa orde yang tinggi yang dihasilkan oleh SAPF.

Neural Network yang digunakan adalah Multi Layer Perceptron (MLP) yang merupakan type neural network yang pertama. Pada dasarnya MLP terdiri atas input layer,

hidden layer dan output layer. MLP neural network dilatih dengan menggunakan algoritma Lavenberg-Marquardt Back Propagation (LMBP).



Gambar 3. Sistem kontrol SAPF berbasis Fuzzy Neural Network.

MLP digunakan untuk memperkirakan besarnya komponen arus harmonisa berdasarkan arus beban non linear yang terdeteksi. Keluaran dari MLP akan digunakan sebagai sinyal referensi untuk PWM konverter.

Untuk memperkirakan komponen harmonisa pada setiap fasa, MLP mempunyai 3 buah masukan dan tiga buah keluaran yang masing-masing mewakili arus beban non linier dan komponen arus harmonisa. Teori daya sesaat (p-q theory) digunakan sebagai dasar untuk memisahkan antara komponen fundamental dan harmonisa dari arus beban nonlinear. Data training didapatkan dengan menentukan komponen harmonisa arus beban nonlinear. Jumlah neuron pada layer/ lapisan masukan/ input adalah tiga neuron yang masing-masing terdiri atas 200 sampling sinyal arus terdistorsi dari beban nonlinear pada fasa a, b, dan c.

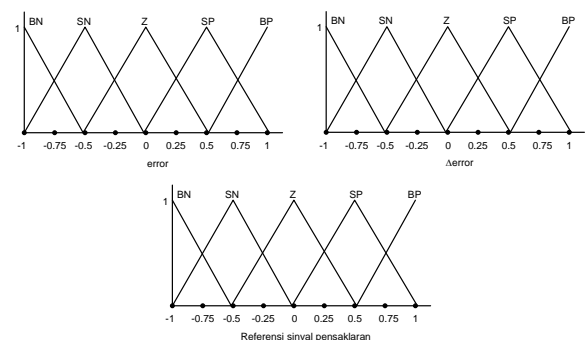
Sesuai dengan jumlah input maka jumlah neuron pada layer/ lapisan output juga tiga yang masing-masing merupakan komponen arus harmonisa dari beban nonlinear pada fasa a, b dan c yang terdiri atas 200 sampling data harmonisa arus. Untuk mempercepat proses pelatihan maka setiap arus beban yang terdeteksi akan melalui proses normalisasi terlebih dahulu dan keluaran dari MLP akan melalui proses denormalisasi sehingga kompoen arus harmonisa yang dihasilkan sesuai dengan komponen harmonisa arus yang terdeteksi.

Perancangan Kontroler Logika Fuzzy (Fuzzy Logic Controller) atau KLF berfungsi untuk mengatur sinyal gerbang bagi peralatan elektronika daya yang ada di dalam SAPF. Logika Fuzzy menggantikan controller PID yang biasanya digunakan dalam kendali SAPF.

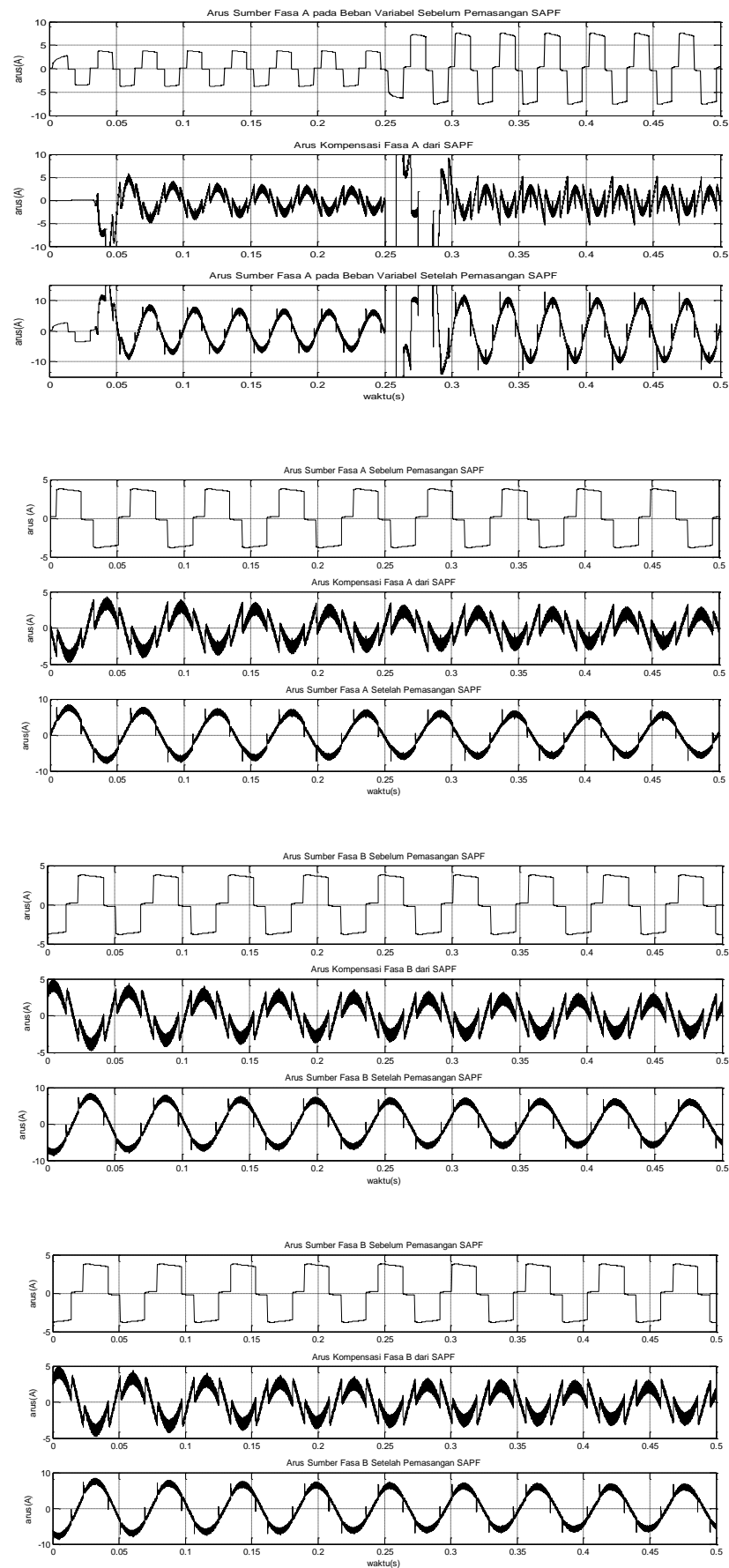
Input fuzzy berupa nilai variable error (e) dan perubahan error (Δe) dari nilai arus yang diinjeksikan oleh SAPF yang diset disesuaikan dengan arus referensi yang dibangkitkan leh neural network. Keluaran fuzzy berupa sinyal

pensaklaran bagi PWM yang akan berfungsi sebagai kendali SAPF yang nantinya akan menghasilkan arus kompensasi komponen harmonisa yang akan diinjeksikan ke sistem.

Pengendali Logika Fuzzy yang digunakan adalah tipe MAMDANI dan operator yang digunakan adalah operator AND. Pada tahap defuzzifikasi akan dipilih suatu nilai dari suatu variable solusi yang merupakan konsekuen dari daerah fuzzy. Metode yang digunakan adalah metode *centroid*, karena metode ini memiliki tingkat daerah yang sensitive yang sangat tinggi, maka diharapkan proses tuning mendapatkan hasil dengan *error* yang sangat kecil. Fungsi membership pada variabel input yang terdiri atas error dan $\Delta error$ dan variabel output yang berupa variabel referensi sinyal pensaklaran masing-masing memiliki lima fungsi membership antara interval $[-1,1]$ yaitu Big Negative (BN), Small Negative (SN), Zero, Small Positive (SP) dan Big Positif (BP). Gambar 4 menunjukkan diagram fungsi keanggotaan input dan output pada kendali Fuzzy.



Gambar 4 Diagram fungsi keanggotaan input dan output pada kendali Fuzzy.



Gambar 5 Arus Sumber Sebelum dan Sesudah Pemasangan SAPF, serta Arus Kompensasi dari SAPF pada tiap fasa.

Setiap fungsi menggunakan fungsi segitiga (triangular function). Dengan adanya masing-masing 5 fungsi keanggotaan untuk input dan 5 fungsi keanggotaan untuk output maka kendali Fuzzy akan menggunakan 25 aturan/rules. Fungsi membership akan menala dengan trial error dengan menggunakan strategi yang telah dibuat dalam rules, sehingga diharapkan mendapatkan nilai yang memiliki tingkat error yang sangat kecil.

Tabel 1 menunjukkan aturan/ rules yang digunakan untuk kendali SAPF berbasis Fuzzy.

TABEL 1
RULES YANG DIGUNAKAN UNTUK KENDALI SAPF BERBASIS FUZZY

Δe	e	BN	SN	Z	SP	BP
BN	BN	BN	SN	SN	Z	
SN	BN	SN	SN	Z	SP	
Z	SN	SN	Z	SP	SP	
SP	SN	Z	SP	SP	BP	
BP	Z	SP	SP	BP	BP	

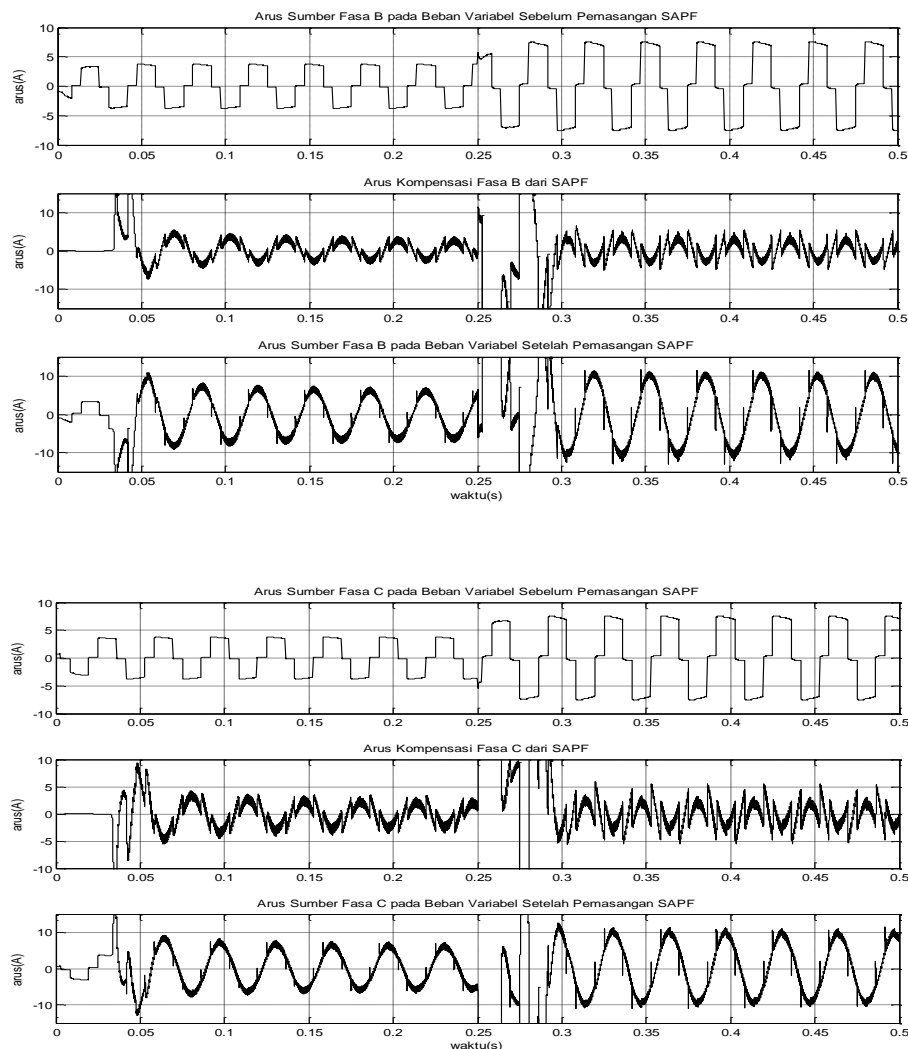
IV. HASIL DAN ANALISA

Simulasi menggunakan software MATLAB Simulink. Hasil pada setiap tahap kendali SAPF dengan Fuzzy Neural Network akan dianalisa.

Sumber tegangan yang digunakan diasumsikan berbentuk sinusoida, 220V, 50 Hz tiga fasa seimbang pada setiap bagian sistem. Beban nonlinear yang digunakan adalah penyerarah terkontrol tiga fasa yang menggunakan peralatan pensaklaran thyrisor yang mensuplai beban induktif sebesar 100 Ohm nilai resistor dan ukuran induktor sebesar 0.5 H serta sudut penyalan 0° . Untuk beban variabel, maka beban yang ada akan ditambahkan menjadi 200 Ohm nilai resistor dan ukuran induktor sebesar 1 H.

Injeksi arus kompensasi yang dihasilkan SAPF ke dalam sistem akan mengeliminasi konten harmonisa arus beban nonlinear. Hal ini akan mengakibatkan arus sumber yang ditarik menjadi berbentuk sinusoidal. Gambar 5 menunjukkan pengaruh injeksi arus kompensasi SAPF terhadap arus sumber pada masing-masing fasa.

Sebelum pemasangan SAPF, arus yang ditarik dari sumber berbentuk non sinusoidal dengan nilai distorsi harmonisa total (THD) pada fasa A sebesar 19,36%, fasa B 19,27% dan fasa C 19,27%.



Gambar 6 Arus Sumber dan Arus Kompensasi Akibat Pemasangan SAPF pada Beban Variabel.

Pemasangan SAPF berhasil untuk mengeliminasi konten harmonisa pada arus masukan sehingga nilai THD menjadi berkurang yaitu 3,7% untuk fasa A, fasa B 3,42% dan fasa C 3,36%. Penurunan nilai THD arus masukan telah memenuhi standar untuk nilai harmonisa arus yaitu di bawah 5%.

Sistem SAPF didesain dengan tujuan agar dapat mengkompensasi harmonisa meskipun terjadi perubahan beban pada sistem tenaga listrik. Desain perubahan beban berada dalam batas-batas yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, perubahan beban disimulasikan dengan penambahan beban sehingga arus yang ditarik dari sumber menjadi bertambah secara linier seiring dengan pertambahan beban. Gambar 6 menunjukkan diagram simulasi sistem dengan beban yang berubah.

Nilai total distorsi harmonisa (THD) arus sumber pada beban yang bervariasi mengalami penurunan yang signifikan setelah pemasangan SAPF pada sistem.

Nilai THD berkurang dari 27,71% pada ketiga fasa sebelum pemasangan SAPF menjadi, 4,71% pada fasa A, 4,62% pada fasa B dan 3,57% pada fasa C. Hal ini menunjukkan kinerja SAPF dengan kontrol berbasis Fuzzy-Neural Network mampu mengikuti perubahan beban dan menginjeksikan arus kompensasi untuk mengeliminasi konten harmonisa arus sesuai dengan kebutuhan sistem.

V. KESIMPULAN

SAPF berbasis Fuzzy Neural Network dapat mengeliminasi konten harmonisa pada arus dan memperbaiki distorsi pada arus beban nonlinear baik pada kondisi beban statis maupun pada kondisi beban yang bervariasi. Hal ini ditunjukkan dengan nilai THD arus masukan pada ketiga fasa yang berkisar antara 3%-4,7%. (di bawah nilai standar THD yang ditentukan).

REFERENCE

- [1] Akagi H, Watanabe E.H, Aredes M, (2007), “*Instantaneous Power Theory and Application to Power Conditioning*”, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [2] Mohan, Undeland, Robin, (2002), “*Power Electronics: Converters, Application and Design*”, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [3] Hart, D. W. “*Introduction To Power Electronics*”. Upper Saddle River, N. J.:Prentice-Hall. 1997

- [4] Hassoun M.H, (1995), “*Fundamental of Artificial Neural Network*”, Asco Trade Typesetting Ltd, United States of America.
- [5] Ling L.P, *SVM Based Hysteresis Current Controller for A Three Phase Active Power Filter*, Thesis Master (2004), University Tecnology Malaysia.
- [6] G. W. Chang, C. I. Chen, Y. F. Teng “An Application of Radial Basis Function Neural Network For Harmonics Detection”, *Proc 2008 Harmonics and Quality of Power 13th International Conference*, pp.1-5.
- [7] Tumay M, Meral M.E, Bayindir K.C, “Extraction of Voltage Harmonics using Multi Layer Perceptron Neural Network”, *Neural Comput & Applic 17* (2008), pp.587-593.
- [8] Salam Z, Cheng T.P, Jusoh A. “ Harmonics Mitigation using Active Power: A Technological Review”, *Journal of Elektrika Vol. 8 No. 2*, (2006), pp. 17-26.
- [9] Aware M.V, Kothari A.G, Bhat S.S, “Power Factor Improvement using Active Filter for Unbalanced Three Phase Non Linear Loads”, *International Journal of EnergyTechnology and Policy*, Vol. 4, (2006).
- [10] Leong Hua Tey, Ping Lam So, Yun Chung Chu, “ Adaptive Neural Network Control of Active Filter”, *Electric Power System Research, Elsevier 77* (2005), pp.37-56
- [11] Temurtas F, Gunturkun R, Yumusak N, Temurtas H, “ Harmonics Detection using Feed Forward and Recurrent Neural Network for Active Filter”, *Electric Power System Research 72* (2004).pp.33-40.
- [12] A. G. Bors, “*Introduction of Radial Basis Function (RBF) Network*,” Dept. of Computer Science University of York.
- [13] Vazquez J.R, Salmeron P, “ Active Power Filter Control using Neural Network Technologies”, *IEEE- Proceeding-Electrical Power Application Vol. 150, No. 2*, (2003).
- [14] Nascimento, C.F, Oliveira, A.A, Goedtel, A, Suva, I.N, “ Compensation Current of Active Power Filter Generated by Artificial Neural Network Approach”, *IEEE Industrial Electronics, IECON- 32nd Annual Conference Vol, Issue, 6-10 Nov*, (2006) pp 4392-4397.
- [15] Gao D, Sun X, “A Shunt Active Power Filter with Control Method Based on Neural Network”, *IEEE Power System Technology Proceeding Vol 3*, (2000) pp. 1619-1624.
- [16] Wilamowski, B.M, Iplikci S, Kaynak O, Efe M, An Algorithm for Fast Convergence in Training Neural Networks, “*ProceedinIJCNN Vol 3*, (2001) pp. 1778-1782.
- [17] Haque, M. T. and Ise, T. Implementation of Single Phase pq Theory. *Proceedings of the Power Conversion Conference 2002*. April 2-5. Japan. PCC Osaka: IEEE. 2002. 761-765.
- [18] IEEE Interharmonics Task Force, *Interharmonics in Power Systems*, Cigre 36.05/ CIRED 2 CC02 Voltage Quality Working Group.
- [19] Santoso, Surya and Grady, W. M. Understanding Power System Harmonics. *IEEE Power Engineering Review*. 2001. 21 (11). pp 8-11.
- [20] Merzagora A.C, Bracchi F, Cerutti S, “A Radial Basis Function Neural Network for Single Sweep Detection of Somatosensory Evoked Potentials”, *Proceeding of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, (2004), San Francisco CA, USA.