

Analisis penggunaan autotrafo penggeser fasa sebagai minimisator harmonisa arus di sistem distribusi tenaga listrik

Syafrudin, Pekik A. Dahono, Sukisno, T.M Soelaiman

Laboratorium Penelitian Konversi Energi Elektrik, Institut Teknologi Bandung Jln. Ganesa No 10. Bandung, 40132

Masuk: 30 Desember 1998; revisi masuk: 14 Juni 1999; diterima: 7 Desember 1999

Sari

Meningkatnya aplikasi beban nonlinier di sistem distribusi tenaga listrik telah menyebabkan arus sistem menjadi sangat terdistorsi dengan kandungan harmonisa arus yang sangat tinggi (THD). Persentase THD arus sistem yang tinggi dapat menyebabkan beberapa persoalan harmonisa yang serius. Tulisan ini mengusulkan metode baru untuk meminimisasi harmonisa arus di sistem distribusi tenaga listrik, yaitu dengan menggunakan autotrafo penggeser fasa sebagai minimisator.

Dalam kasus ini, autotrafo bertindak sebagai penggeser sudut fasa tegangan suplai beban. Akibat penggeseran sudut fasa ini, beberapa komponen arus harmonisa yang signifikan pada sisi sumber tegangan sistem dapat dieleminir, sehingga harmonisa arus yang terdapat di sistem menjadi sangat minim. Secara detail, mekanisme minimisasi harmonisa arus sistem dengan menggunakan autotrafo dijelaskan, dan diberikan beberapa konfigurasi autotrafo penggeser fasa yang dapat digunakan sebagai minimisator harmonisa arus sistem. Hasil eksperimen laboratorium diberikan untuk menunjukkan validitas metode yang diusulkan.

Kata Kunci: sistem distribusi tenaga listrik, distorsi arus sistem, autotrafo penggeser fasa, minimisasi harmonisa arus.

Abstract

Analysis of phase shifting autotransformer as current harmonic minimisator on power distribution system

The increasing use of nonlinear loads has made the currents in power distribution system highly distorted with high level harmonic currents content (THD) and created serious harmonics problems. This paper proposed a new method to minimize current harmonics in power distribution system by using phase shifting autotransformer. The loads of system are divided into two parts which are supplied by autotransformer with 30° phase shifting. The effects of the phase shifting which causes harmonic currents are cancelled, and the resulting currents harmonic in power distribution system are minimized. Detailed mechanism of current harmonic minimisation is presented. Several configurations of phase shifting autotransformer are discussed and compared. The influence of load operating conditions are discussed. Experimental results are shown to verify this proposed method.

Keywords: electric power distribution system, current distortion, phase shifting transformer, harmonics minimization

1 Pendahuluan

Banyaknya aplikasi beban nonlinier pada sistem distribusi tenaga listrik seperti konverter statis yang berbasis elektronika daya telah membuat arus sistem menjadi sangat terdistorsi dengan persentase kandungan harmonisa arus THD (*total harmonic distortion*) yang sangat tinggi. Umumnya arus sistem distribusi tenaga listrik yang terdistorsi tersebut didominasi oleh arus harmonisa orde ganjil frekuensi rendah, yakni arus harmonisa orde lima, tujuh, sebelas, dan seterusnya, yang magnitud arus harmonisanya berbanding terbalik dengan orde harmonisanya.

Tingginya persentase kandungan harmonisa arus (THD) pada suatu sistem tenaga listrik dapat menyebabkan timbulnya beberapa persoalan harmonisa yang serius pada sistem tersebut dan lingkungannya, seperti

terjadinya resonansi pada sistem yang merusak kapasitor kompensasi faktor daya, membuat faktor daya sistem menjadi lebih buruk, menimbulkan interferensi terhadap sistem telekomunikasi, meningkatkan rugi-rugi sistem, menimbulkan berbagai macam kerusakan pada peralatan listrik yang sensitif, yang kesemuanya menyebabkan penggunaan energi listrik menjadi tidak efektif [1][2].

Beberapa metode minimisasi harmonisa arus pada sistem tenaga listrik telah banyak dipresentasikan, misalnya dengan menggunakan filter pasif L-C dan filter daya aktif. Namun, dalam prakteknya, penggunaan filter pasif L-C mempunyai beberapa kelemahan, antara lain desain ukuran dan berat induktor L dan C yang cukup besar untuk memfilter arus harmonisa orde frekuensi rendah, dan juga dibutuhkan sejumlah filter L-C dengan ukuran yang berbeda untuk memfilter sejumlah arus harmonisa dengan masing-masing ordenya. Selain itu, karakteristik

filter I-C sangat dipengaruhi oleh impedansi sistem yang sulit diketahui secara pasti karena selalu berubah terhadap konfigurasi sistem. Sementara itu, filter daya aktif merupakan sebuah inverter PWM sumber arus, sehingga sulit merealisasikannya dalam kapasitas yang besar, disamping biaya investasinya yang tinggi. Dan dikhawatirkan bahwa filter daya aktif juga berfungsi sebagai pembangkit arus harmonisa orde tinggi yang dapat mengganggu sistem telekomunikasi, audio, dan video [4].

Dalam tulisan ini diusulkan metode baru untuk meminimisasi harmonisa arus di sistem distribusi tenaga listrik. Metode ini sangat berbeda dengan berbagai metode sebelumnya; pada metode ini minimisasi harmonisa arus sistem dilakukan dengan mensuperposisikan komponen-komponen arus harmonisa arus yang signifikan dari dua cabang beban sistem sehingga saling meniadakan. Super-posisi komponen arus harmonisa pada sistem dapat dilakukan dengan menggeser sudut fasa tegangan suplai beban dengan menggunakan sebuah auto-transformator (autotrafo). Dalam hal ini, autotrafo bertindak sebagai minimisator harmonisa arus sistem. Beberapa konfigurasi autotrafo penggeser fasa dibentuk dan dibandingkan besar masing-masing rating kVA yang dibutuhkan.

Pada tulisan ini juga dilakukan eksperimen laboratorium yang menggunakan sebuah autotrafo hubungan *scott* sebagai minimisator harmonisa arus sistem. Hasil eksperimen memperlihatkan kemampuan metode ini yang menghasilkan THD arus sistem yang minimum, terutama untuk kondisi pada kedua cabang beban sistem mempunyai arus yang sama besar.

2 Mekanisme minimisasi harmonisa arus sistem

Gambar 1 memperlihatkan sistem distribusi tenaga listrik yang mensuplai beban-beban nonlinier yang menyebabkan arus sistem terdistorsi dan mengandung harmonisa arus. Persamaan arus sistem yang mengandung harmonisa dapat dinyatakan sebagai berikut:

Arus sistem $I_s(t)$ sama dengan arus beban total $I_B(t)$, yaitu:

$$i_s(t) = \sqrt{2}I_{S1}\sin(\omega t) + \sum_{h=(6n+1)}^{\infty} \sqrt{2}I_{Sh}\sin(h\omega t) \quad (1)$$

dengan: $I_s(t)$ adalah nilai sesaat dari arus sistem

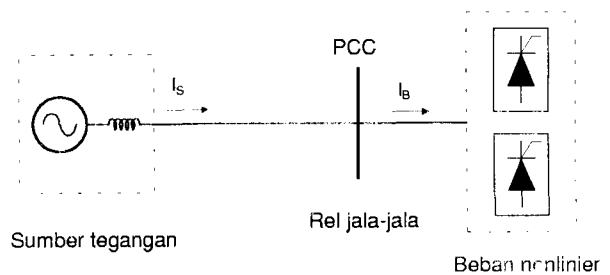
I_{S1} adalah nilai rms dari komponen arus fundamental

I_{Sh} adalah nilai rms dari arus harmonisa orde h

h adalah orde harmonisa

n adalah bilangan integer (1, 2, 3, ...)

$\omega = 2\pi f$, dimana f adalah frekuensi sistem atau frekuensi fundamental



Gambar 1 Sistem yang mensuplai beban nonlinier

Komponen arus harmonisa dari arus sistem ini mempunyai sifat yang sama dengan komponen arus urutan pada sistem komponen simetris; komponen arus harmonisa orde $(h=6n+1)$ mempunyai sifat yang sama dengan komponen urutan positif dan dinamakan komponen arus harmonisa urutan positif, sedangkan komponen arus harmonisa orde $(h=6n-1)$ mempunyai sifat yang sama dengan komponen arus urutan negatif dan dinamakan komponen arus harmonisa urutan negatif.

Umumnya magnitud arus harmonisa yang terdapat pada sistem akan berbanding terbalik terhadap ordenya, dan dinyatakan sebagai :

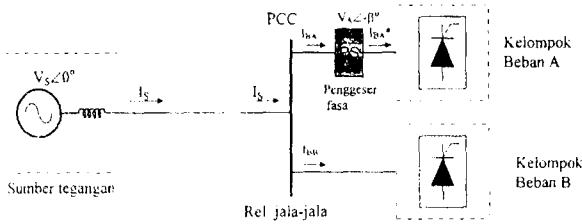
$$I_{Sh} = \frac{I_{S1}}{h} \quad (2)$$

Persentase kandungan arus harmonisa yang terdapat pada suatu sistem atau tingkat distorsi arus sistem dinyatakan dalam THD (*total harmonic distortion*) yang didefinisikan sebagai:

$$THD_{\text{arus}} = \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{\infty} \left(\frac{I_{Sh}}{I_{S1}} \right)^2} \times 100\% \quad (3)$$

Dengan menggunakan persamaan (2) dan (3) dapat dihitung besarnya THD arus sistem pada persamaan (1), yaitu 32,4%. Persentase THD arus ini melebihi batas ketentuan yang direkomendasikan dalam standardisasi harmonisa IEEE-159 tahun 1992 yang menetapkan besar THD arus maksimum di jala-jala sistem atau di PCC (*point of common coupling*) sebesar 20% [5].

Untuk meminimisasi harmonisa arus sistem (THD) agar dapat memenuhi standardisasi dengan metode yang diusulkan ini, dilakukan mekanisme sebagai berikut. Beban sistem dibagi menjadi dua kelompok cabang beban, misalkan kelompok cabang beban A dan B. Kemudian, sudut fasa tegangan suplai untuk salah satu cabang beban digeser sebesar $(-\beta)$ terhadap tegangan sumber dengan menggunakan sebuah penggeser fasa PS (*phase shifter*), sementara cabang beban lainnya disuplai langsung dari sumber tegangan seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.



Gambar 2 Sistem mensuplai dua cabang beban

Kelompok beban nonlinier pada cabang B yang langsung disuplai dari sumber tegangan sistem mempunyai persamaan arus di rel jala-jala sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 i_{BB}(t) &= \sqrt{2}I_{BB1} \sin(\omega t) + \sum_{h=(6n+1)}^{\infty} \sqrt{2}I_{BBh} \sin(h\omega t) \quad (4) \\
 &= \sqrt{2}I_{BB1} \sin(\omega t) + \sqrt{2}I_{BB5} \sin(5\omega t) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BB7} \sin(7\omega t) + \sqrt{2}I_{BB11} \sin(11\omega t) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BB13} \sin(\omega t) + \sqrt{2}I_{BB17} \sin(5\omega t) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BB19} \sin(7\omega t)
 \end{aligned}$$

Kelompok beban A yang mendapat tegangan suplai dengan pergeseran sudut fasa sebesar $-\beta^\circ$ terhadap sudut fasa tegangan sumber $V_S \angle 0^\circ$ mempunyai persamaan arus di sisi beban adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 i_{BA}(t) &= \sqrt{2}I_{BA1} \sin(\omega t - \beta^\circ) + \sum_{h=(6n+1)}^{\infty} \sqrt{2}I_{BAh} \sin(h\omega t - \beta^\circ) \quad (5) \\
 &= \sqrt{2}I_{BA1} \sin(\omega t - \beta^\circ) + \sqrt{2}I_{BA5} \sin(5\omega t - \beta^\circ) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BA7} \sin(7\omega t - \beta^\circ) + \sqrt{2}I_{BA11} \sin(11\omega t - \beta^\circ) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BA13} \sin(\omega t - \beta^\circ) + \sqrt{2}I_{BA17} \sin(5\omega t - \beta^\circ) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BA19} \sin(7\omega t - \beta^\circ)
 \end{aligned}$$

Besar sudut fasa tegangan cabang beban A di sisi jala-jala sistem (input pergeser fasa) sama dengan sudut fasa tegangan sumber, yaitu $V_S \angle 0^\circ$, atau sama dengan sudut fasa tegangan di beban A, yaitu $V_A \angle -\beta^\circ$ yang digeser sebesar $(+\beta^\circ)$. Adanya pergeseran sudut fasa ini juga menyebabkan terjadinya pergeseran sudut fasa pada komponen arus beban A di jala-jala sistem. Sudut fasa komponen arus fundamental I_{BA1} akan tergeser sebesar $(+\beta^\circ)$ dan komponen arus harmonisa urutan positif (arus harmonisa orde $h = 6n + 1$, yaitu orde 7, 13, 19, ... dst) akan tergeser sebesar $(\beta \times h)^\circ$, sedangkan sudut fasa komponen arus harmonisa urutan negatif (arus harmonisa orde $h = 6n - 1$, yaitu orde 5, 11, 17, ... dst) tergeser sebesar $-(\beta \times h)^\circ$. Dengan demikian, dari persamaan (5) dapat ditentukan persamaan arus cabang beban A di sisi jala-jala sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 i_{BA}(t) &= \sqrt{2}I_{BA1} \sin(\omega t - \beta^\circ + \beta^\circ) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BA5} \sin(5\omega t - \beta^\circ - 5\beta^\circ)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \sqrt{2}I_{BA7} \sin(7\omega t - \beta^\circ + 7\beta^\circ) \\
 &+ \sqrt{2}I_{BA11} \sin(11\omega t - \beta^\circ - 11\beta^\circ) \\
 &+ \sqrt{2}I_{BA13} \sin(\omega t - \beta^\circ + 13\beta^\circ) \quad (6) \\
 &+ \sqrt{2}I_{BA17} \sin(5\omega t - \beta^\circ - 17\beta^\circ) \\
 &+ \sqrt{2}I_{BA19} \sin(19\omega t - \beta^\circ + 19\beta^\circ) \\
 &= \sqrt{2}I_{BA1} \sin(\omega t) + \sqrt{2}I_{BA5} \sin(5\omega t - 6\beta^\circ) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BA7} \sin(7\omega t - 6\beta^\circ) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BA11} \sin(11\omega t - 12\beta^\circ) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BA13} \sin(\omega t + 12\beta^\circ) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BA17} \sin(5\omega t - 18\beta^\circ) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_{BA19} \sin(19\omega t + 18\beta^\circ)
 \end{aligned}$$

Besar arus sistem I_S pada jala-jala (PCC) atau pada sumber tegangan adalah penjumlahan arus cabang beban A dan cabang beban B. Dari persamaan (5) dan (6) dapat ditentukan besar arus sistem I_S sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 i_S(t) &= i_{BA}(t) + i_{BB}(t) \quad (7) \\
 &= \sqrt{2} \{ [I_{BA1} + I_{BB1}] \sin(\omega t) \\
 &\quad + I_{BA5} \sin(5\omega t - 6\beta^\circ) + I_{BB5} \sin(5\omega t) \\
 &\quad + I_{BA7} \sin(7\omega t + 6\beta^\circ) + I_{BB7} \sin(7\omega t) \\
 &\quad + I_{BA11} \sin(11\omega t - 12\beta^\circ) + I_{BB11} \sin(11\omega t) \\
 &\quad + I_{BA13} \sin(\omega t + 12\beta^\circ) + I_{BB13} \sin(\omega t) \\
 &\quad + I_{BA17} \sin(5\omega t - 18\beta^\circ) + I_{BB17} \sin(5\omega t) \\
 &\quad + I_{BA19} \sin(5\omega t - 18\beta^\circ) + I_{BB19} \sin(19\omega t) \dots] \}
 \end{aligned}$$

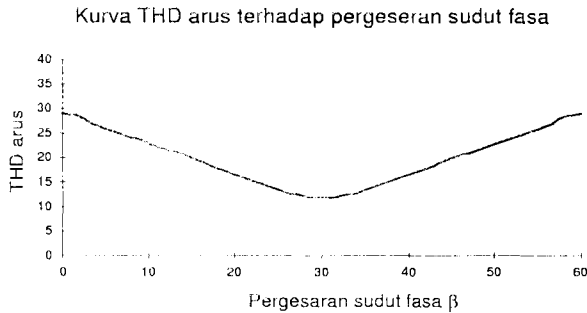
Apabila diasumsikan bahwa magnitud arus besar cabang A dan B adalah sama besar, yakni :

$$\begin{aligned}
 I_{AB1} &= I_{BB1} = I_{B1} = \frac{1}{2} I_S \quad \text{dan} \\
 I_{ABh} &= I_{BBh} = I_{Bh} = \frac{1}{2} I_{Sh}
 \end{aligned}$$

maka persamaan (7) arus sistem I_S dapat ditulis menjadi:

$$\begin{aligned}
 i_S(t) &= \sqrt{2} \{ [I_{S1} \sin(\omega t) + \frac{1}{2} I_{S5} \sin(5\omega t - 6\beta^\circ) \\
 &\quad + I_{S5} \sin(5\omega t) + I_{S7} \sin(7\omega t + 6\beta^\circ) \\
 &\quad + I_{S7} \sin(7\omega t) + I_{S11} \sin(11\omega t - 12\beta^\circ) \\
 &\quad + I_{S11} \sin(11\omega t) + I_{S13} \sin(\omega t + 12\beta^\circ) \\
 &\quad + I_{S13} \sin(\omega t) + I_{S17} \sin(5\omega t - 18\beta^\circ) \\
 &\quad + I_{S17} \sin(5\omega t) + I_{S19} \sin(19\omega t + 18\beta^\circ) \\
 &\quad + I_{S19} \sin(19\omega t) \dots] \} \quad (8)
 \end{aligned}$$

Dengan melakukan perubahan besar sudut pergeseran fasa β pada persamaan (8), akan didapatkan grafik nilai THD arus sistem terhadap sudut pergeseran fasa β yang diperlihatkan dari hasil simulasi pada gambar 3 berikut ini.



Gambar 3 Kurva THD arus sistem terhadap pergeseran sudut fasa tegangan

Hasil simulasi pada gambar 3 memperlihatkan bahwa THD arus sistem I_s akan mencapai nilai minimum, yaitu THD = 11,09% pada sudut pergeseran fasa sebesar $\beta = 30^\circ$.

Dengan mensubstitusikan nilai $\beta = 30^\circ$ ke dalam persamaan (8) akan didapatkan persamaan arus sistem sebagai berikut :

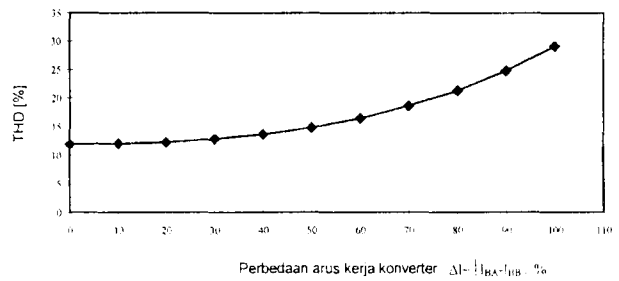
$$i_s(t) = \sqrt{2}[I_{S1}\sin(\omega t) + I_{S11}\sin(11\omega t) + I_{S13}\sin(13\omega t) + \dots] \quad (9)$$

Di sini terlihat bahwa arus sistem I_s tidak mengandung komponen arus harmonisa orde 5, 7, 17, 19 ... dan seterusnya, karena komponen-komponen ini, dari kedua cabang beban A dan B, saling meniadakan (sudut fasanya berlawanan), sehingga kondisi ini membuat THD arus sistem menjadi minimum. Dengan kata lain, arus harmonisa pada sistem dapat diminimisasi dengan melakukan penggeseran sudut fasa tegangan beban sebesar 30° .

Hasil minimisasi harmonisa arus atau THD arus sistem juga sangat dipengaruhi oleh kondisi besar perbedaan arus kerja masing-masing cabang beban. Gambar 4 memperlihatkan THD arus sistem yang dipengaruhi oleh besarnya perbedaan antara arus cabang beban A dan B.

Kondisi terburuk didapat pada nilai THD arus sistem sebesar 32,4%, yaitu perbedaan arus cabang beban A dan B adalah 100%; artinya, sistem hanya mensuplai satu cabang beban. Kondisi ini sama dengan kondisi tanpa dilakukan minimisasi harmonisa arus (tanpa penggeseran sudut fasa). Kondisi terbaik dengan THD sistem sebesar 11,09% didapatkan pada perbedaan arus kerja cabang beban A dan B sebesar 0%, yakni magnitud arus cabang besar A dan B sama besar. Kondisi ini adalah kondisi harmonisa arus sistem paling minim.

Kurva THD arus terhadap perubahan arus

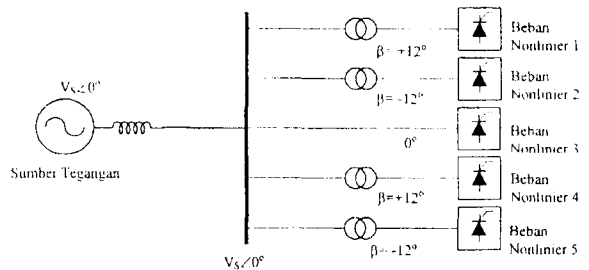


Gambar 4 Pengaruh perbedaan arus kerja cabang beban A dan B (ΔI) terhadap THD arus di sumber tegangan.

Derek A. Paice memberikan suatu formulasi praktis yang dapat digunakan untuk menentukan nilai sudut pergeseran fasa (β) yang dibutuhkan dapat dalam meminimisasi harmonisa arus dari sejumlah cabang beban-nonlinier adalah sebagai berikut [3] :

$$\text{Besar sudut pergeseran fasa} = \frac{60^\circ}{\text{Jumlah cabang beban nonlinier}} \quad (10)$$

Misalkan suatu sistem distribusi tenaga listrik mempunyai lima cabang beban nonlinier seperti pada gambar 5, maka besar sudut pergeseran fasa yang diperlukan adalah $\beta = 60^\circ/5 = 12^\circ$.



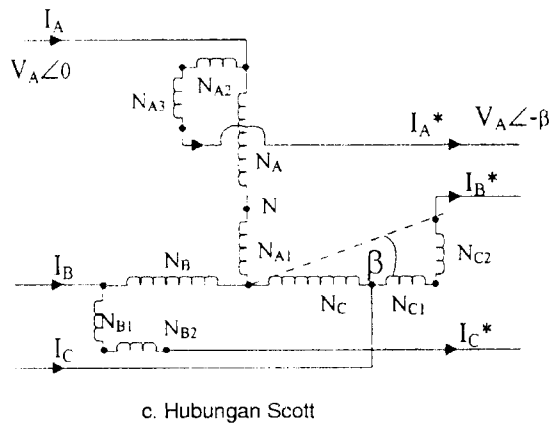
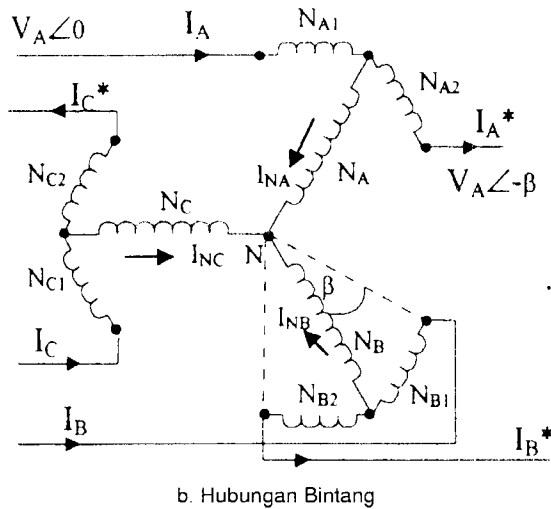
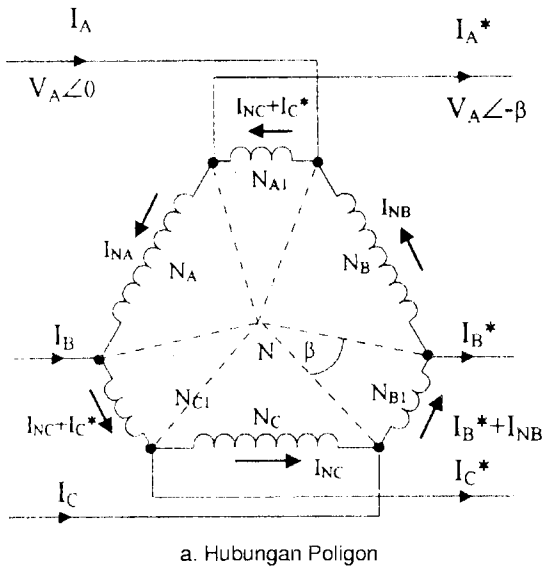
Gambar 5 Minimisasi harmonisa arus sistem yang mensuplai lima cabang beban nonlinier dengan besar sudut pergeseran fasa masing-masing cabang beban adalah 12°

Umumnya untuk menggeser sudut fasa tegangan dapat digunakan penggeser fasa berupa sebuah transformator (trafo) atau autotransformator (autotrafo).

3 Autotrafo penggeser fasa

Penggeseran sudut fasa tegangan sebelumnya dilakukan dengan menggunakan trafo konvensional dua belitan (primer-sekunder), namun rating kVA yang diperlukan oleh trafo penggeser fasa jenis ini relatif sangat besar, yaitu mencapai 1 pu. Oleh karena itu, perlu dicarikan suatu desain penggeser fasa yang memerlukan rating kVA rendah, karena menyangkut masalah biaya dan dimensi ruang yang dibutuhkan. Pada tulisan ini telah didesain tiga konfigurasi autotrafo sebagai penggeser fasa (APF) yang mempunyai rating kVA yang rendah, yakni konfigurasi hubungan scott, bintang, dan poligon seperti yang diperlihatkan pada gambar 6.

Penentuan rating kVA didasarkan pada penjumlahan hasil kali antara arus dan tegangan pada masing-masing belitan trafo tersebut, yang diformulasikan sebagai berikut :



Gambar 6 Konfigurasi autotrafo penggeser fasa

$$\text{Rating VA autotrafo} = \sum V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \quad (11)$$

dengan :

V_{rms} adalah nilai rms tegangan pada belitan trafo

I_{rms} adalah nilai rms arus pada belitan trafo

Dari rangkaian masing-masing konfigurasi autotrafo seperti pada gambar 6 dan dengan menggunakan formulasi persamaan (11), dapat ditentukan rating kVA autotrafo tersebut fungsi dari sudut pergeseran fasa (β), yaitu sebagai berikut :

1. Autotrafo Poligon :

$$\text{kVA} = \left[\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + 2\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\sin\left(60^\circ - \frac{\beta}{2}\right) \right] V_L I_L \quad (14)$$

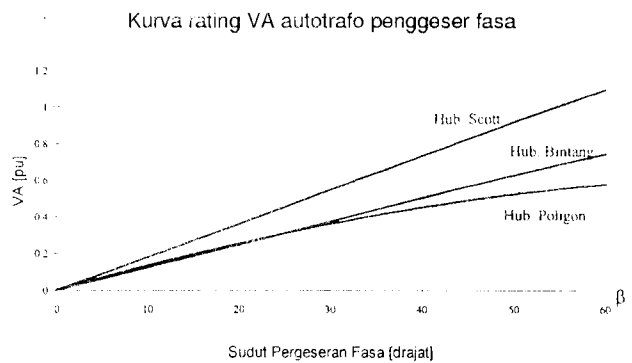
2. Autotrafo Bintang :

$$\text{VA} = \left[-\frac{1}{\sqrt{3}} \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + 2\sin\left(120^\circ - \frac{\beta}{2}\right)\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] V_L I_L \quad (15)$$

3. Autotrafo Scott atau T :

$$\text{VA} = \left[1,682 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + \frac{1}{2\sqrt{2}} \{ (\cos\beta + 1) \text{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) + (1 - \cos\beta) \} + \frac{1}{4} \sin\beta (3,154 - \cos\beta) \right] V_L I_L \quad (16)$$

Kurva perbandingan rating kVA fungsi dari sudut pergeseran fasa β untuk masing-masing konfigurasi APF dari persamaan (14), (15), dan (16) diperlihatkan pada gambar 7.

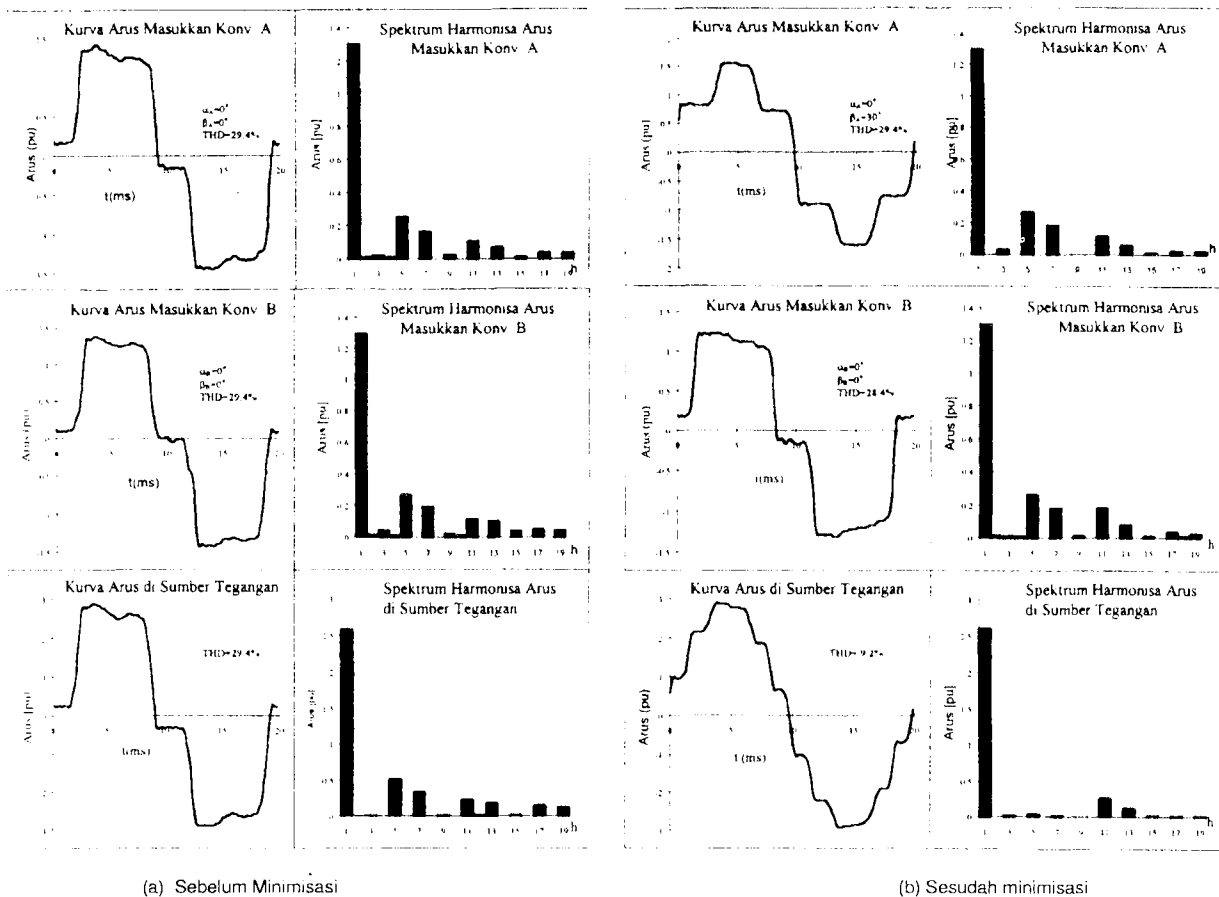


Gambar 7 Kurva rating VA autotrafo terhadap besar sudut penggeser fasa

Dari kurva pada gambar 7 untuk pergeseran fasa $\beta = 30^\circ$, konfigurasi poligon mempunyai rating kVA yang lebih rendah dari konfigurasi lainnya, yakni sebesar 0,36 pu. Hasil rating kVA selengkapnya untuk $\beta = 30^\circ$ diberikan dalam tabel 1 berikut ini.

Tabel 1 Rating VA autotransformator penggeser fasa

No.	Konfigurasi	Sudut pergeseran fasa β	Rating VA (pu)
1	Hubungan Poligon	30°	0,361
2	Hubungan Bintang	30°	0,379
3	Hubungan Scott	30°	0,546



Gambar 9 Kurva, THD, dan spektrum harmonisa arus sistem dan masing-masing cabang beban A dan B. (a). sebelum pemasangan APF atau sebelum diminimisasi
 (b). setelah pemasangan APF atau setelah diminimisasi

Daftar pustaka

1. Rice, David E., "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics - Their Effect on Power Systems Component", *IEEE Trans. Ind. Appl.* **1A-22**, 161-177 (1986).
2. Stratford, Ray P., "Rectifier Harmonics in Power System", *IEEE Trans. Ind. Appl.* **29**, 528-535 (1980).
3. Akagi H., Fujita H., "A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters an Alternative to Shunt Active Filters", *EPE Firenze*, 3-012 - 3-017 (1991).

4. Peng, Fang Zheng et al, "Compensation Characteristics of the Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters", *IEEE Trans. Ind. Appl.* **29**, 144-152 (1993).
5. IEEE Industry Applications Society, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System", USA, (1993).
6. Paice, Derek A. "Power Electronic Converter Harmonics - Multipulse Methods for Clean Power", IEEE Press, New York, (1996).