

Penggunaan Filter Aktif Seri Tiga Phasa untuk Mengkompensasi Tegangan Non- Sinusoida dan Tegangan Tidak Seimbang Akibat Beban Non-Linier di Industri

By Amirullah Amirullah

Penggunaan Filter Aktif Seri Tiga Fasa untuk Mengkompensasi Tegangan Non-Sinusoida dan Tegangan Tidak Seimbang Akibat Beban Non-Linier di Industri

Amirullah¹⁾ dan Adiananda²⁾

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Bhayangkara Surabaya

Jl. Ahmad Yani 114 Surabaya

am9520012003@yahoo.com¹⁾ dan adiananda@ubhara.ac.id²⁾

Abstrak

Tujuan penelitian adalah menganalisis unjuk kerja penggunaan model filter aktif seri tiga fasa untuk kompensasi tegangan nonsinusoida dan tidak seimbang pada beban non-linier. Rangkaian filter aktif seri digunakan untuk mengkompensasi tegangan terdistorsi dan tidak seimbang, memperbaiki faktor daya sumber atau power factor corection (PFC), serta reduksi harmonisa sekaligus menurunkan nilai total harmonic distortion (THD) sistem. Rangkaian filter dimodelkan secara matematis dengan teknik kendali arus menggunakan pulse width modulation (PWM). Aspek yang akan dikaji meliputi; nilai perbaikan faktor daya input, THD tegangan input, THD arus input pada kondisi sebelum dan sesudah rangkaian filter aktif seri dipasang pada beban non-linier, mengacu pada Standar IEEE-519 dan PLN. Hasil penelitian adalah; (1) Rangkaian dengan tiga variasi beban non linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa menghasilkan rata-rata THD tegangan lebih kecil (baik) dibandingkan rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa. Rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa juga mampu menghasilkan tegangan input yang memenuhi syarat batas THD tegangan sesuai Standar IEEE 519 dibandingkan rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa; (2) Rangkaian dengan tiga variasi beban non linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa menghasilkan rata-rata THD arus lebih kecil (baik) dibandingkan rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa. Namun demikian rangkaian tanpa dan menggunakan filter aktif seri tiga fasa belum mampu menghasilkan arus input yang memenuhi syarat batas THD arus sesuai Standar IEEE 519; (3) Penggunaan filter aktif seri tiga fasa pada rangkaian dengan tiga variasi beban non linier telah menurunkan nilai faktor daya input dibawah Standar PLN sebesar 15,85; (4) Penggunaan filter aktif seri tiga fasa pada rangkaian dengan tiga variasi beban non linier mampu memperbaiki nilai THD tegangan dan arus input, namun sebaliknya menurunkan nilai faktor daya input. Penelitian menggunakan rangkaian simulasi Power Simulator (PSim) versi 4.1.

Kata-Kunci: Filter Aktif Seri Tiga Fasa, Tegangan Non-Sinusoida, Harmonisa, Beban Non-Linier.

PENDAHULUAN

Kualitas daya listrik atau *power quality* (PQ) telah lama menjadi isu utama dalam beberapa permasalahan beban-beban non-linier (misalnya, beberapa konverter daya) yang digambarkan sebagai gelombang arus terdistorsi dari sistem daya. Kandungan harmonisa besar pada gelombang arus saluran dapat menyebabkan munculnya tegangan non-sinusoida pada impedansi saluran, menghasilkan gelombang tegangan sumber non-sinusoida pada titik *common coupling* (PCC) [1]. Selanjutnya, distribusi beban besar tidak seimbang satu fasa akan menghasilkan sejumlah tegangan tidak seimbang dalam sistem tenaga listrik. Sumber tegangan non-sinusoida dan/atau tidak seimbang akan menghasilkan sejumlah dampak negatif [2], [3] (misalnya, mengurangi umur dan unjuk kerja peralatan, kesalahan penyalan pada sejumlah penyearah misalnya pada *silicon controlled rectifier* (SCR) saluran, dsb). Untuk mengatasi kondisi tersebut, tentu dibutuhkan peralatan untuk mengkompensasi tegangan terdistorsi dan tidak seimbang.

Beberapa penggunaan filter aktif seri sebelumnya telah dilaporkan [4]-[8] pada berbagai fungsi kompensasi. Peng et al., [4] sudah melakukan penelitian berkaitan dengan aplikasi filter aktif seri dan shunt dan telah diterapkan pada impedansi jaringan dan beberapa jenis beban mengandung harmonisa khusus pada

akhir jaringan, berkaitan dengan tempat pemasangan filter aktif, harus diambil dari kandungan performansi filter yang dikehendaki. Wang et al., [5] melaporkan bahwa filter aktif seri dapat digunakan sebagai kompensasi berbagai jenis harmonisa tegangan yang ditimbulkan beban. Pada penelitian ini Wang et al, menggunakan filter aktif seri sebagai pengontrol tegangan sumber yang dapat membangkitkan tegangan kompensasi sesuai dengan nilai dikehendaki untuk diterapkan pada sumber tegangan dan sumber arus sinusoida.

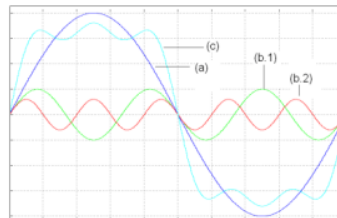
Peng et al., [6] sudah melakukan penelitian dan menyebutkan bahwa penggunaan filter aktif seri dengan filter pasif shunt tunggal tidak cukup memuaskan sebagai rangkaian kompensasi. Dixon et al., [7] mengusulkan cara pengaturan kinerja filter aktif seri dengan sumber arus sinusoida sephasa dengan tegangan utama. Pada skema ini, filter aktif seri berfungsi sebagai pelindung harmonisa daripada pembangkit harmonisa, sebagaimana saat arus saluran sinusoida dapat dihasilkan menggunakan kombinasi filter pasif shunt dan filter aktif seri. Campos et al., [8] mendemonstrasikan bahwa tegangan tidak seimbang dapat dikompensasi dengan menghilangkan komponen urutan negatif sumber tegangan tiga phasa. Penelitian ini bertujuan menerapkan model filter aktif seri tiga phasa untuk mengkompensasi tegangan nonsinusoida dan tegangan tidak seimbang pada beban non-linier. Filter aktif seri sebagai rangkaian kompensasi dilakukan pada sisi beban dan diaplikasikan pada beban yang bersifat sensitif terhadap tegangan dan beban non-linier. Kompensasi tegangan dibutuhkan untuk mengeleminasi sejumlah harmonisa tegangan dan untuk membuat sistem supaya seimbang, dengan cara menginjeksikan tegangan kompensasi melalui kumparan sekunder transformator secara seri dengan saluran.

Rangkaian filter aktif seri digunakan untuk mengkompensasi tegangan terdistorsi dan tidak seimbang, memperbaiki faktor daya atau *power factor corection* (PFC), s¹¹ mereduksi harmonisa sekaligus menurunkan nilai *total harmonic distortion* (THD) sistem. Rangkaian filter aktif seri dimodelkan secara matematis dengan teknik kendali arus dan tegangan menggunakan *pulse width modulation* (PWM). Aspek yang akan dikaji meliputi; nilai perbaikan faktor daya, THD tegangan input, dan THD arus input pada ¹² di sini sebelum dan sesudah dipasang rangkaian filter aktif seri. Rangkaian filter aktif seri akan dimodelkan menggunakan rangkaian simulasi dengan bantuan perangkat lunak Power Simulator (PSim) versi 4. Hasil simulasi akan digunakan sebagai dasar evaluasi unjuk kerja penggunaan model filter aktif seri tiga phasa mengacu pada parameter antara lain: perbaikan nilai faktor daya input (PFC), THD tegangan input, dan THD arus input berdasarkan Standar IEEE 519 dan PLN.

TINJAUAN PUSTAKA

Harmonisa ⁶

Pada sistem tenaga listrik, definisi harmonisa dapat dijelaskan sebagai gelombang terdistorsi secara periodik pada keadaan *steady state* yang disebabkan oleh interaksi antara bentuk gelombang sinus sistem pada frekuensi fundamental dengan komponen gelombang lain yang merupakan frekuensi kelipatan integer dari frekuensi fundamental sumber. Gambar 3 menunjukkan gelombang sinyal yang mengalami distorsi akibat harmonisa.



Gambar 3. Gelombang Terdistorsi Akibat Harmonisa.

¹⁴ rangsan:

- a. = Gelombang pada frekuensi fundamental
- b.1 = Gelombang harmonisa ke-3
- b.2 = Gelombang harmonisa ke-5
- c. = Gelombang Terdistorsi

⁴

Total Harmonic Distortion (THD)

Untuk mengetahui besarnya pengaruh harmonisa pada sistem tenaga listrik digunakan istilah *Total Harmonic Distortion* (THD) yang didefinisikan sebagai sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya (komponen dapat berupa tegangan atau arus). THD dapat dirumuskan sesuai Persamaan 1.

$$THD = \frac{\left[\sum_{n=2}^k U_n^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

6 Keterangan:

U_n = komponen harmonisa

U_1 = komponen fundamental

K = komponen harmonisa maksimum

THD tegangan dan arus berlaku Persamaan 2.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \text{dan} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2)$$

Keterangan:

THD_V dan THD_I = THD tegangan dan THD arus

V_h dan I_h = tegangan harmonisa dan arus harmonisa

V_1 dan I_1 = tegangan fundamental dan arus fundamental

9
Persamaan 1 dan 2 menjelaskan mengenai perbandingan antara nilai rms komponen harmonisa dengan nilai rms komponen dasar dan biasanya menggunakan satuan persen (%). Indeks ini digunakan untuk mengukur deviasi dari bentuk gelombang yang mengandung harmonisa dari gelombang sinusoidal yang sempurna. Untuk gelombang sinusoidal sempurna pada frekuensi dasar, THD-nya adalah nol. Sama dengan pengukuran distorsi harmonisa orde ke-1 untuk tegangan dan arus orde ke- h bahwa V_h/V_1 dan I_h/I_1 . Nilai THD dapat mencapai lebih dari 100%.

Besarnya THD maksimum yang diijinkan untuk tiap negara berbeda tergantung standar yang digunakan. Standar untuk THD yang paling sering dipakai dalam sistem tenaga listrik adalah Standar IEEE 519-1992. Ada dua kriteria yang digunakan dalam analisis distorsi harmonisa yaitu limitasi untuk distorsi tegangan dan limitasi untuk distorsi arus. Tabel 1 menunjukkan limit distorsi (THD) tegangan untuk sistem distribusi tenaga listrik. Tabel 2 menunjukkan batas distorsi harmonisa arus berdasarkan Standar IEEE 519 (Lampiran).

Tabel 1. Standar Batas THD Tegangan

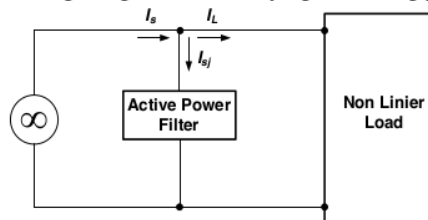
Tegangan Bus pada PCC	Individual Voltage Distortion (%)	THD (%)
Dibawah 69 kV	3.0	5.0
69.001 kV s/d 161 kV	1.5	2.5
Diatas 161.001 kV	1.0	1.5

Catatan: sistem tegangan tinggi dapat mempunyai THD hingga 2% yang disebabkan oleh adanya peralatan DC tegangan tinggi

2
Tabel 2 (Lampiran) memuat standar limitasi untuk distorsi (THD) arus. Rasio I_{sc}/I_L adalah arus hubung singkat pada *Point of Common Coupling* (PCC) terhadap arus beban nominal pada frekuensi fundamental. Pada Tabel 1 tegangan yang dipakai adalah antara 120V sampai 69 kV. Untuk tegangan 69 kV sampai dengan 161 kV dipakai standar batas untuk sistem subtransmisi.

Filter Aktif

7
1 Filter aktif digunakan untuk meredam harmonisa pada beban non-linier pada sistem tenaga. Filter aktif menginjeksikan arus untuk menghilangkan harmonisa yang terkandung pada arus beban.



Gambar 4. Rangkaian Filter Aktif dalam Sistem [16]

Persamaan 3 dan 4 menunjukkan persamaan arus injeksi harmonisa pada pada rangkaian filter aktif.

$$i_{out} = i_L + i_{sj} \quad (3)$$

$$i_L = i_i + i_h \quad (4)$$

Karena ide dasar filter aktif adalah membuat besaran dan phasa yang sama terhadap i_{sj} maka diperoleh Persamaan 5.

$$i_{sj} = -i_h \quad (5)$$

Berdasarkan kombinasi Persamaan 3 s/d 5, maka diperoleh Persamaan 6.

$$i_{out} = i_i \quad (6)$$

Keterangan:

i_L = Arus beban.

i_{sj} = Arus yang diinjeksikan ke harmonisa.

i_i = Arus fundamental.

i_h = Arus harmonisa.

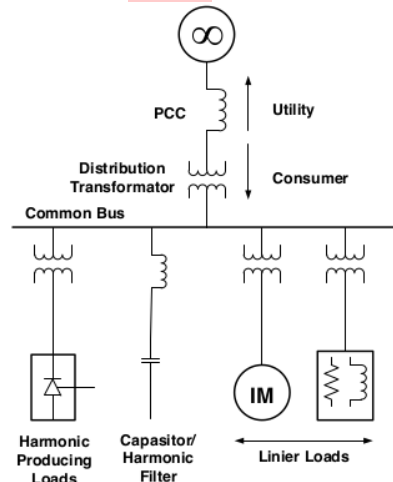
i_{out} = Hasil arus input.

Filter Aktif Seri

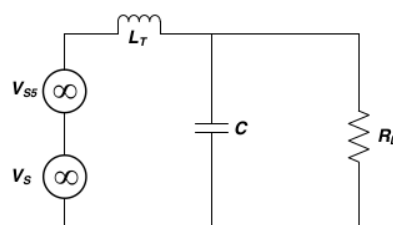
Rangkaian filter aktif seri sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, dapat digunakan untuk mengkompensasi dua hal sekaligus yaitu distorsi harmonisa dan sumber tegangan tidak seimbang.

Pemodelan Beban pada Industri

Gambar 5 menunjukkan sistem pembangkit industri listrik yang mempunyai beban linier dan non-linier, kapasitor untuk perbaikan faktor daya, dan filter harmonisa yang disambungkan pada bus. Bagian utama dari transformator distribusi yang dipasang pada konsumen disambungkan pada Point of Common Coupling (PCC), sedangkan suplai beban linier dan non-linier disambungkan pada bus. Sistem pembangkit dapat mengakibatkan bertambahnya harmonisa sebagai akibat dari resonansi seri dan paralel antara kapasitor bank dan induktansi bocor pada transformator distribusi.



Gambar 5. Pemodelan Beban Industri [18]



Gambar 6. Rangkaian Ekvivalen Satu Fasa Pemodelan Beban Industri [18]

Gambar 6 menunjukkan rangkaian satu fasa yang sama dengan sistem pembangkit dengan asumsi bahwa hanya muncul tegangan harmonisa kelima yang ada pada PCC. L_T adalah induktansi bocor transformator, C kapasitansi kapasitor perbaikan faktor daya, R_L adalah resistansi yang sama dengan resistansi beban. Tegangan bus V_{BUS} meliputi tegangan V_{BUS} harmonisa kelima yang menyebabkan pertambahan harmonisa pada sistem pembangkit listrik industri. Ketika frekuensi resonansi antara L_T dan C terjadi pada harmonisa kelima maka persamaan tegangan bus pada harmonisa kelima adalah:

$$V_{Bus5} = \frac{R_L}{j5\omega L_T} V_{S5} \quad (7)$$

Resonansi harmonisa dapat memperbesar tegangan harmonisa kelima menjadi 4 s/d 10 kali lipat pada kondisi muatan penuh karena L_T memiliki nilai induktansi sebesar 2 s/d 5 %.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dari kondisi awal yaitu: 1) Industri banyak menggunakan peralatan sensitif terhadap tegangan dan motor listrik yang dikontrol oleh konverter statis misalnya: pabrik baja, tekstil, keramik, dsb, 2) Pelanggan listrik RT, pusat-perbelanjaan, perkantoran menggunakan peralatan listrik beban non-linier misalnya: televisi, komputer, mikrowave, lampu fluorescent, lampu reklame, dsb, 3) Indikasinya antara lain: faktor daya input rendah, THD tegangan dan arus input tinggi, 4) Beban non-linier berdampak pada penurunan kualitas daya listrik (PQ). Berdasarkan kondisi awal tersebut, perlu dilakukan penelitian mengenai penggunaan model filter aktif seri tiga fasa untuk kompensasi tegangan nonsinusoida dan tidak seimbang pada beban non-linier.

Metode penelitian adalah sebagai berikut:

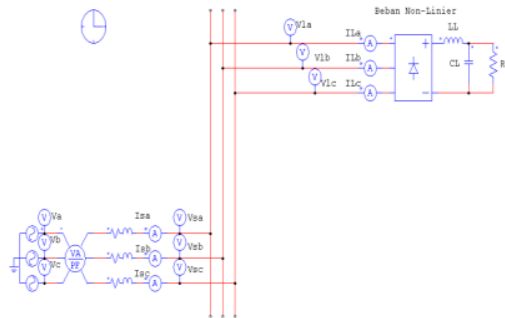
1. Menentukan model matematis rangkaian filter aktif seri tiga fasa untuk mengkompensasi tegangan nonsinusoida dan tegangan tidak seimbang pada beban non-linier di industri.
2. Menentukan model rangkaian filter aktif seri tiga fasa untuk mengkompensasi tegangan nonsinusoida dan tegangan tidak seimbang pada beban non-linier di industri menggunakan bantuan perangkat lunak Power Simulator (PSim) versi 4.0.
3. Menentukan model rangkaian kendali arus dan tegangan filter aktif seri tiga fasa.
4. Menentukan dan membandingkan nilai perbaikan faktor daya sumber (PFC), pada kondisi:
 - a. Sebelum filter aktif tiga fasa dipasang.
 - b. Sesudah filter aktif tiga fasa dipasang.
5. Menentukan dan membandingkan THD tegangan input dan THD arus input akibat beban non-linier, pada kondisi:
 - a. Sebelum filter aktif seri tiga fasa dipasang.
 - b. Sesudah filter aktif seri tiga fasa dipasang.
6. Menentukan model rangkaian filter aktif seri untuk mengkompensasi tegangan nonsinusoida dan tegangan tidak seimbang pada beban non-linier di industri. Adapun parameternya adalah mampu memperbaiki faktor daya sumber (PFC) input, menghasilkan gelombang tegangan dan arus input yang seimbang dan berkualitas tinggi, tetapi tetap dibawah batasan THD tegangan mengacu pada Standar IEEE-519 dan PLN.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi Rangkaian Tanpa Menggunakan Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Simulasi unjuk kerja rangkaian tanpa menggunakan filter aktif seri tiga fasa dimodelkan menggunakan software atau perangkat lunak PSIM versi 4.1. Ada tiga jenis rangkaian tanpa menggunakan filter aktif seri dengan beban non-linier. Rangkaian pertama adalah nilai L dan C tetap, sedangkan nilai R berubah-ubah. Rangkaian kedua adalah nilai R dan C tetap, sedangkan nilai L berubah-ubah. Rangkaian ketiga adalah nilai R dan L tetap, sedangkan nilai C berubah-ubah. Selanjutnya nilai THD tegangan masukan, THD arus masukan, dan faktor daya (pf) masing-masing rangkaian tanpa filter tiga fasa dibandingkan antara satu rangkaian dengan rangkaian lain. Nilai-nilai parameter yang digunakan untuk simulasi adalah sebagai berikut; Tegangan sumber 220 volt, frekuensi sumber 50 Hz, induktor $L = 0,5$ mH, kapasitor $C = 0,5$ mF, dan resistansi $R = 5 \Omega$.

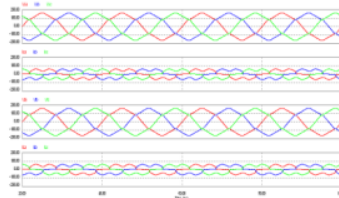
Rangkaian simulasi perbaikan faktor daya tanpa menggunakan filter aktif seri ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian simulasi beban non-linier tanpa menggunakan filter aktif seri tiga fase

3 Hasil Simulasi Tegangan Input, Arus Input, Tegangan Output, dan Arus Output pada Rangkaian Berbeban Non-Linier Tanpa Filter Aktif Seri Tiga Fase

Hasil simulasi tegangan input, arus input rangkaian tanpa filter aktif seri dc dengan nilai L dan C tetap tetapi nilai R berubah-ubah, ditunjukkan pada Gambar 8. Variasi nilai resistansi (R) masing-masing adalah 5, 10, 15, dan 20 Ohm.



Gambar 8. Hasil simulasi tegangan input, arus input, tegangan output, dan arus output rangkaian tanpa filter aktif seri dengan nilai L dan C tetap pada nilai R = 5 Ohm.

Dengan cara yang sama diperoleh hasil simulasi tegangan input, arus input, tegangan output, dan arus output pada rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fase yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3 (Lampiran).

Hasil Simulasi Spektrum Harmonisa Tegangan Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Tanpa Filter Aktif Seri Tiga Fase

Spektrum harmonisa tegangan input rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fase dengan nilai L dan C tetap tetapi nilai R berubah-ubah, ditunjukkan pada Gambar 9. Variasi nilai resistansi (R) masing-masing adalah 5, 10, 15, dan 20 Ohm.



Gambar 9. Spektrum harmonisa tegangan input pada rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fase dengan nilai L dan C tetap pada nilai R = 5 Ohm

Berdasarkan spektrum harmonisa tegangan input rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fase yang ditunjukkan pada Gambar 13 diperoleh bahwa nilai tegangan fundamental ($V_1 = 146,197$ Volt) dan tegangan harmonisa ganjil ke-3 s/d ke-11 berturut-turut adalah $V_3 = 1,223$ Volt, $V_5 = 9,730$ Volt, $V_7 = 0,750$ Volt, $V_9 = 0,639$ Volt, dan $V_{11} = 2,413$ Volt. Nilai tegangan fundamental dan harmonisa sampai dengan harmonisa ke-11 selanjutnya dimasukkan ke Persamaan 1, untuk memperoleh nilai *total harmonic distortion* (THD) tegangan.

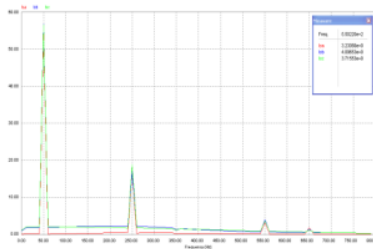
$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{\infty} V_h^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + V_9^2 + V_{11}^2}}{V_1}$$

$$= \frac{\sqrt{(1,223)^2 + (9,730)^2 + (0,750)^2 + (0,639)^2 + (2,413)^2}}{(146,191)^2} = 6,941 \%$$

Dengan cara yang sama nilai THD tegangan input rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa serta hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4 (Lampiran).

Hasil Simulasi Spektrum Harmonisa Arus Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Tanpa Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Spektrum harmonisa tegangan input rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap tetapi nilai R berubah-ubah, ditunjukkan pada Gambar 10. Variasi nilai resistansi (R) masing-masing adalah 5, 10, 15, dan 20 Ohm.

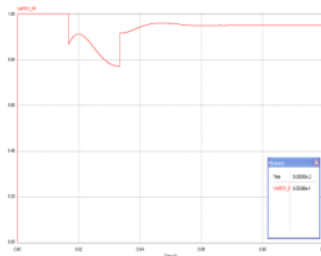


Gambar 10. Spektrum harmonisa arus input pada rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap pada nilai R1 = 5 Ohm

Berdasarkan spektrum harmonisa arus input rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa yang ditunjukkan pada Gambar 14 diperoleh bahwa nilai arus fundamental ($I_1 = 54,695$ A) dan tegangan harmonisa ganjil ke-3 s/d ke-11 berturut-turut adalah $I_3 = 2,221$ A, $I_5 = 18,328$ A, $I_7 = 1,398$ A, $I_9 = 1,213$ A, dan $I_{11} = 4,097$ A. Nilai arus fundamental dan harmonisa sampai dengan harmonisa ke-11 selanjutnya dimasukkan ke Persamaan 2, untuk memperoleh nilai *total harmonic distortion* (THD) arus sebesar 34,714 %. Dengan cara yang sama nilai THD arus input rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa serta hasilnya ditunjukkan pada Tabel 5. Berdasarkan perhitungan sampai harmonisa ke-11 diperoleh bahwa nilai THD arus input rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa untuk tiga variasi kondisi beban non-linier, berkisar antara 27,263 s/d 78,536 %. Batas THD arus mengacu kepada Standar IEEE 519 sampai dengan harmonisa ke-11 (Tabel 1) adalah 4 s/d 15 %. Nilai ini masih berada diatas batas THD arus mengacu pada Standar IEEE 519.

Hasil Simulasi Faktor Daya Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Tanpa Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Hasil simulasi faktor daya input rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap tetapi nilai R berubah-ubah, ditunjukkan pada Gambar 11. Variasi nilai resistansi (R) masing-masing adalah 5, 10, 15, dan 20 Ohm.

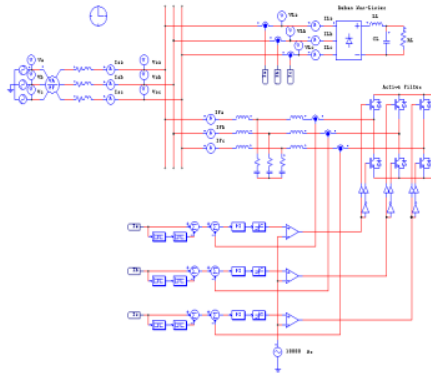


Gambar 11. Kurva simulasi faktor daya (pf) input pada rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap pada nilai R1 = 5 Ohm

Dengan cara yang sama diperoleh simulasi faktor daya (pf) input pada rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa serta hasilnya disajikan pada Tabel 4. Tabel 6 (Lampiran) menunjukkan nilai faktor daya input (pf) pada rangkaian dengan tiga variasi kondisi beban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa. Berdasarkan Tabel 6 diperoleh bahwa nilai rata-rata faktor daya input (pf) pada rangkaian dengan tiga variasi kondisi beban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa berkisar antara 0,902 s/d 0,983. Nilai faktor tersebut sudah berada diatas atau sudah memenuhi batas persyaratan PLN sebesar 0,85.

Simulasi Rangkaian Beban Non-Linier Menggunakan Filter Aktif Seri Tiga Fasa

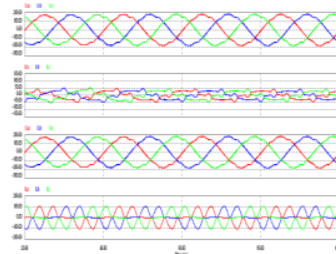
Dengan menggunakan parameter input yang sama, rangkaian simulasi beban non-linier menggunakan filter aktif seri ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Rangkaian simulasi beban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa

Hasil Simulasi Tegangan Input, Arus Input, Tegangan Output, dan Arus Output pada Rangkaian Berbeban Non-Linier Menggunakan Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Hasil simulasi tegangan input dan arus input rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap tetapi nilai R berubah-ubah, ditunjukkan pada Gambar 13. Variasi nilai resistansi (R) masing-masing adalah 5, 10, 15, dan 20 Ohm.



Gambar 13. Hasil simulasi tegangan input, arus input, tegangan output, dan arus output pada rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap pada nilai $R_1 = 5$ Ohm

Dengan cara yang sama diperoleh hasil simulasi tegangan input, arus input, tegangan output, dan arus output pada dua kondisi rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa, serta hasilnya ditunjukkan pada Tabel 7. (Lampiran)

Analisis Hasil Simulasi Tegangan Input, Arus Input, Tegangan Output dan Arus Output Rangkaian Berbeban Menggunakan Filter Aktif Seri

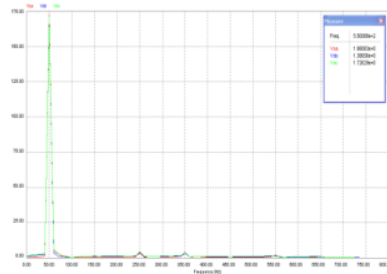
Tabel 7 (Lampiran) menunjukkan nilai tegangan input, arus input, tegangan output, dan arus output rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa. Berdasarkan Tabel 7, diperoleh bahwa untuk semua kondisi beban non-linier, rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa menghasilkan nilai tegangan input (RMS) dan tegangan output yang sama. Rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa menghasilkan nilai arus input (RMS) lebih kecil dibandingkan arus output (RMS).

Penyebabnya adalah karena arus beban non-linier masih mengandung komponen arus harmonisa. Rangkaian filter aktif seri tiga fasa berfungsi menginjeksikan arus (I_f) untuk menghilangkan harmonisa yang terkandung pada arus beban (output). Akibatnya nilai arus input berkurang, menjadi sinusoida kembali, dan menghasilkan kualitas tegangan input yang baik.

Pada kondisi beban non-linier dengan nilai L dan C tetap, semakin besar nilai R maka nilai tegangan input (RMS) pada rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa semakin besar, sedangkan nilai arus input (RMS) semakin kecil. Kondisi yang sama juga ditunjukkan pada rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa berbeban nonlinier dengan (1) nilai R dan C tetap, nilai L semakin besar dan (2) nilai R dan L tetap, nilai C semakin besar.

Hasil Simulasi Spektrum Harmonisa Tegangan Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Menggunakan Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Spektrum harmonisa tegangan input rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap tetapi nilai R berubah-ubah, ditunjukkan pada Gambar 14. Variasi nilai resistansi (R) masing-masing adalah 5, 10, 15, dan 20 Ohm.



Gambar 14. Spektrum harmonisa tegangan input pada rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap pada nilai $R_1 = 5$ Ohm

Dengan cara yang sama diperoleh simulasi spektrum harmonisa tegangan input pada dua kondisi rangkaian berbeban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa yang lain.

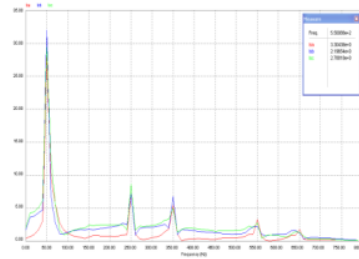
Harmonisa Tegangan Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Menggunakan Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Berdasarkan spektrum harmonisa tegangan input rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa yang ditunjukkan pada Gambar 30 diperoleh bahwa nilai tegangan fundamental (V_1) = 166,663 Volt dan tegangan harmonisa ganjil ke-3 s/d ke-11 berturut-turut adalah $V_3 = 1,258$ Volt, $V_5 = 4,571$ Volt, $V_7 = 3,811$ Volt, $V_9 = 0,866$ Volt, dan $V_{11} = 1,981$ Volt. Nilai tegangan fundamental dan harmonisa sampai dengan harmonisa ke-11 selanjutnya dimasukkan ke Persamaan 2, untuk memperoleh nilai *total harmonic distortion* (THD) tegangan sebesar 3,874 %. Dengan cara yang sama nilai THD tegangan input dua kondisi rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa lain dapat ditentukan. Nilai THD tegangan input untuk semua variasi beban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa selanjutnya ditunjukkan pada Tabel 8 (Lampiran).

Berdasarkan perhitungan sampai harmonisa ke-11 diperoleh bahwa nilai THD tegangan input rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa untuk tiga variasi kondisi beban non-linier, berkisar antara 1,220 s/d 3,874%. Batas THD tegangan mengacu kepada Standar IEEE 519 untuk kelas tegangan dibawah 69 kV (Tabel 1) adalah 5%. Dengan demikian, nilai THD tegangan yang dihasilkan oleh rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa pada tiga kondisi variasi beban non-linier, masih dibawah atau sudah memenuhi persyaratan mengacu pada Standar IEEE 519.

Hasil Simulasi Spektrum Harmonisa Arus Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Menggunakan Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Spektrum harmonisa arus input rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap tetapi nilai R berubah-ubah, ditunjukkan pada Gambar 15. Variasi nilai resistansi (R) masing-masing adalah 5, 10, 15, dan 20 Ohm.



Gambar 15. Spektrum harmonisa arus input pada rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap pada nilai $R1 = 5$ Ohm

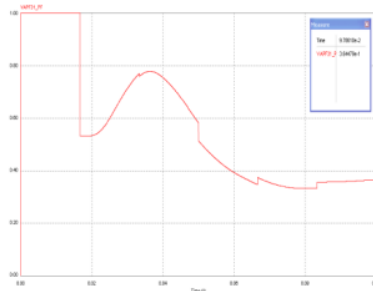
Analisis Hasil Harmonisa Arus Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Menggunakan Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Berdasarkan spektrum harmonisa arus input rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa yang ditunjukkan pada Gambar 15 diperoleh bahwa nilai arus fundamental (I_1) = 30,950 A dan tegangan harmonisa ganjil ke-3 s/d ke-11 berturut-turut adalah $I_3 = 2,404$ A, $I_5 = 8,651$ A, $I_7 = 6,284$ A, $I_9 = 1,528$ A, dan $I_{11} = 3,305$ A. Nilai arus fundamental dan harmonisa sampai dengan harmonisa ke-11 selanjutnya dimasukkan ke Persamaan 2, untuk memperoleh nilai *total harmonic distortion* (THD) arus sebesar 37,313 %. Nilai THD arus input untuk semua variasi beban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa ditunjukkan pada Tabel 9 (Lampiran).

Berdasarkan perhitungan sampai harmonisa ke-11 diperoleh bahwa nilai THD arus input rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa untuk tiga variasi kondisi beban non-linier, berkisar antara 14,636 s/d 43,395 %. Batas THD arue mengacu kepada Standar IEEE 519 sampai dengan harmonisa ke-11 (Tabel 2) adalah 4 s/d 15%.

Hasil Simulasi Faktor Daya Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Tanpa Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Hasil simulasi faktor daya input rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap tetapi nilai R berubah-ubah, ditunjukkan pada Gambar 16. Variasi nilai resistansi (R) masing-masing adalah 5, 10, 15, dan 20 Ohm.



Gambar 16. Kurva simulasi faktor daya (pf) input pada rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa dengan nilai L dan C tetap pada nilai $R1 = 5$ Ohm

Dengan cara yang sama diperoleh simulasi faktor daya (pf) input pada dua kondisi rangkaian berbeban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa lain. Hasil simulasi faktor daya (pf) input selanjutnya disajikan pada Tabel 10. Tabel 10 menunjukkan nilai faktor daya input (pf) pada rangkaian dengan tiga variasi kondisi beban non-linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa. Gambar 16 menunjukkan grafik perbandingan nilai harmonisa tegangan input tiga variasi rangkaian berbeban non-linier tanpa dan menggunakan filter aktif seri tiga fasa. Berdasarkan Tabel 10 diperoleh bahwa nilai rata-rata faktor daya input (pf) pada rangkaian dengan tiga variasi kondisi beban non-linier tanpa filter aktif seri tiga fasa berkisar antara 0,488 s/d 0,683. Nilai faktor daya tersebut masih berada dibawah atau belum memenuhi batas persyaratan PLN sebesar 0,85.

Analisis Perbandingan Nilai Harmonisa Tegangan Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Tanpa dan Menggunakan Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Tabel 11 (Lampiran) menunjukkan perbandingan nilai harmonisa tegangan input rangkaian berbeban non-linier tanpa dan menggunakan filter aktif seri tiga fasa. Gambar 17 menunjukkan grafik perbandingan nilai harmonisa tegangan input tiga variasi rangkaian berbeban non-linier tanpa dan menggunakan filter aktif seri tiga fasa. Berdasarkan perhitungan sampai harmonisa ke-11 diperoleh bahwa nilai rata-rata THD tegangan input rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa untuk tiga variasi kondisi beban non-linier, berkisar antara 5,536 s/d 7,043 %. Sedangkan nilai rata-rata THD tegangan input menggunakan filter aktif seri tiga fasa berkisar antara 1,969 s/d 2,532 %. Batas THD tegangan mengacu kepada Standar IEEE 519 untuk kelas tegangan dibawah 69 kV (Tabel 1) adalah 5%. Berdasarkan nilai tersebut rangkaian dengan tiga variasi beban non linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa menghasilkan rata-rata THD tegangan lebih kecil (baik) dibandingkan rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa. Rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa juga mampu menghasilkan tegangan input yang memenuhi syarat batas THD tegangan sesuai Standar IEEE 519 dibandingkan rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa.

Analisis Perbandingan Nilai Harmonisa Arus Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Tanpa dan Menggunakan Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Tabel 12 (Lampiran) menunjukkan perbandingan nilai harmonisa arus input rangkaian berbeban non-linier tanpa dan menggunakan filter aktif seri tiga fasa. Gambar 18 menunjukkan grafik perbandingan nilai harmonisa arus input tiga variasi rangkaian berbeban non-linier tanpa dan menggunakan filter aktif seri tiga fasa. Berdasarkan perhitungan sampai harmonisa ke-11 diperoleh bahwa nilai rata-rata THD arus input rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa untuk tiga variasi kondisi beban non-linier, berkisar antara 30,298 s/d 58,440 %. Sedangkan nilai rata-rata THD arus input menggunakan filter aktif seri tiga fasa berkisar antara 21,027 s/d 36,834 %. Batas THD arus mengacu kepada Standar IEEE 519 sampai dengan harmonisa ke-11 adalah (Tabel 2) adalah 4 s/d 15%. Berdasarkan nilai tersebut rangkaian dengan tiga variasi beban non linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa menghasilkan rata-rata THD arus lebih kecil (baik) dibandingkan rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa. Namun demikian rangkaian tanpa dan menggunakan filter aktif seri tiga fasa belum mampu menghasilkan arus input yang memenuhi syarat batas THD arus sesuai Standar IEEE 519.

Analisis Perbandingan Faktor Daya (*pf*) Input Rangkaian Berbeban Non-Linier Tanpa dan Menggunakan Filter Aktif Seri Tiga Fasa

Tabel 13 (Lampiran) menunjukkan perbandingan faktor daya (*pf*) input rangkaian berbeban non-linier tanpa dan menggunakan filter aktif seri tiga fasa. Gambar 19 menunjukkan grafik perbandingan nilai faktor daya (*pf*) input tiga variasi rangkaian berbeban non-linier tanpa dan menggunakan filter aktif seri tiga fasa.

Berdasarkan Tabel 11 diperoleh bahwa nilai rata-rata faktor daya input rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa untuk tiga variasi kondisi beban non-linier, berkisar antara 0,977 s/d 0,980 %. Sedangkan nilai rata-rata faktor daya input menggunakan filter aktif seri tiga fasa berkisar antara 0,555 s/d 0,608 %. Batas minimum faktor daya input mengacu kepada Standar PLN adalah 0,85. Berdasarkan nilai tersebut, penggunaan filter aktif seri tiga fasa pada rangkaian dengan tiga variasi beban non linier telah menurunkan nilai faktor daya input dibawah Standar PLN. Dengan demikian rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa belum mampu menghasilkan faktor daya input yang memenuhi Standar PLN.

Berdasarkan Tabel 11 s/d 13 diperoleh bahwa penggunaan filter aktif seri tiga fasa pada rangkaian dengan variasi tiga beban non linier mampu memperbaiki nilai THD tegangan dan arus input, namun sebaliknya menurunkan nilai faktor daya input. Padahal parameter kualitas daya listrik ditentukan oleh nilai harmonisa tegangan, harmonisa arus, dan faktor daya input. Pada Sincy George, et al., [17] disebutkan bahwa usaha mengurangi THD tegangan dapat menyebabkan berkurangnya nilai faktor daya. Sebaliknya jika nilai faktor daya dinaikkan, maka THD tegangan juga akan semakin naik.

17

Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan antara lain:

1. Rangkaian filter aktif seri tiga fasa dapat digunakan untuk mengkompensasi distorsi harmonisa dan tegangan input tidak seimbang akibat beban non-linier. Rangkaian filter aktif seri tiga fasa menggunakan rangkaian konverter *pulse with modulation* (PWM) sebagai pengendali arus dan tegangan.
2. Rangkaian dengan tiga variasi beban non linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa menghasilkan rata-rata THD tegangan lebih kecil (baik) dibandingkan rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa. Rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa juga mampu menghasilkan tegangan input yang memenuhi syarat batas THD tegangan sesuai Standar IEEE 519 dibandingkan rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa.

Bidang Teknik Elektro
Yogyakarta, 10 November 2012

3. Rangkaian dengan tiga variasi beban non linier menggunakan filter aktif seri tiga fasa menghasilkan rata-rata THD arus lebih kecil (baik) dibandingkan rangkaian tanpa filter aktif seri tiga fasa. Namun demikian rangkaian tanpa dan menggunakan filter aktif seri tiga fasa belum mampu menghasilkan arus input yang memenuhi syarat batas THD arus sesuai Standar IEEE 519.
4. Penggunaan filter aktif seri tiga fasa pada rangkaian dengan tiga variasi beban non linier telah menurunkan nilai faktor daya input dibawah Standar PLN sebesar 0,85. Dengan demikian rangkaian menggunakan filter aktif seri tiga fasa belum mampu menghasilkan faktor daya input yang memenuhi Standar PLN.
5. Penggunaan filter aktif seri tiga fasa pada rangkaian dengan tiga variasi beban non linier mampu memperbaiki nilai THD tegangan dan arus input, namun sebaliknya menurunkan nilai faktor daya input. Padahal parameter kualitas daya listrik ditentukan oleh nilai harmonisa tegangan, harmonisa arus, dan faktor daya input. Dengan demikian usaha mengurangi THD tegangan dapat menyebabkan berkurangnya nilai faktor daya. Sebaliknya jika nilai faktor daya dinaikkan, maka THD tegangan juga akan semakin naik.

DAFTAR PUSTAKA

1. H. Akagi and H. Fujita, 1995, *A New Line Conditioner for Harmonic Compensation in Power Systems*, IEEE Trans. Power Del., Vol. 10, No. 3, pp. 1570–1575, Jul. 1995.
2. V. E. Wagner, 1993, *Effect of Harmonics on Equipment*, IEEE Trans. Power Del., Vol. 8, No. 2, pp. 672–680, Apr. 1993.
3. A. Von Jouanne and B. Banerjee, 2001, *Assessment of Voltage Unbalance*, IEEE Trans. Power Del., Vol. 16, No. 4, pp. 782–790, Oct. 2001.
4. F. Z. Peng, 1998, *Application Issues of Active Power Filters*, IEEE Ind. Appl. Mag., Vol. 4, No. 5, pp. 21–30, Sep/Oct. 1998.
5. Z. Wang, Q. Wang, W. Yao, and J. Liu, 2001, *A Series Active Power Filter Adopting Hybrid Control Approach*, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 16, No. 3, pp. 301–310, May 2001.
6. F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, 1990, *New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems a Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 26, No. 6, pp. 983–990, Nov./Dec. 1990.
7. J. W. Dixon, G. Venegas, and L.A. Moran, 1997, *A Series Active Power Filter Based on a Sinusoidal Current-Controlled Voltage-Source Inverter*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 44, No. 5, pp. 612–619, Oct. 1997.
8. A. Campose, G. Joos, and P. D. Ziogas, 1994, *Analysis And Design of a Series Voltage Unbalance Compensator Based on a Three-Phase VSI Operating with Unbalanced Switching Functions*, IEEE Trans. Power Elec., Vol. 9, No. 3, pp. 269–274, May 1994.
9. G. Venkataramanan and M. Illindala, 2002, *Microgrids and Sensitive Loads*, in Proc. IEEE PowerEng. Soc. Winter Meeting, New York, Jan. 27–31, 2002, pp. 315–322.
10. S. M.-R. Rafiei, A. H. Toliyat, R. Ghani, and T. Gopalathnam, 2001, *An Optimal and Flexible Control Strategy for Active Filtering and Power Faktor Correction under Non-Sinusoidal Line Voltages*, IEEE Trans. Power Del., Vol. 16, No. 2, pp. 297–305, Apr. 2001.
11. S. George and V. Agarwal, *A Novel Technique for Optimising The Harmonics and Reactive Power Under Non-Sinusoidal Voltage Conditions*, in Proc. 28th Annu. Conf. IEEE Industrial Electronic Soc., pp. 858–863.
12. N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, 2003, *Power Electronics Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. New York: Wiley, 2003, p. 105.
13. Sincy George and Vivek Agarwal, 2003, *A Novel Technique for Optimizing the Harmonics and Reactive Power Under Non-Sinusoidal Supply and Unbalanced Load Conditions*, in Proc. Power Electronics Specialist Conf. 2003, Jun. 2003, Vol. 4, pp. 1537–1541.
14. Ferraci, Ph., *Power Quality, Cahier Technique Merlin Gerin No. 199, 2001 Fluke 39/41 B Power Harmonic Tester*, Netherlands: Fluke Corporation, 1995.
15. IEEE Standart 519-1992, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System*.
16. Li Jianlin, et. al., 2000, *A Novel Circuit Source Converter with Carrier Phase Shifted SPWM for Active Power Filter*, China: Electrical Engineering Dept. Zhejiang University Hangzou.
17. Sincy George and Vivek Agarwal, 2007, *DSP Based Control Algorithm for Series Active Filter for Optimized Compensation Under Nonsinusoidal and Unbalance Voltage Condition*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, January, 2007.
18. Fujita et al, *A Hibrid Active Filter for Damping of Harmonic Resonance in Industrial Power System*, IEEE Trans. of Power Electronic, Vol. 15, No. 2, March 2000, Page 216.

Penggunaan Filter Aktif Seri Tiga Phasa untuk Mengkompensasi Tegangan Non-Sinusoida dan Tegangan Tidak Seimbang Akibat Beban Non-Linier di Industri

ORIGINALITY REPORT

14%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	www.neliti.com Internet	139 words — 3%
2	repository.its.ac.id Internet	89 words — 2%
3	Ainun Lina Huda Nur Syahadhah. "Sistem Pengisian Baterai Dengan Menggunakan Solar Panel 50 Wp Dan Pengukuran Batas Waktu Pemakaian Pada Renewable Energy Smart Trolley", Emitter: Jurnal Teknik Elektro, 2021 Crossref	70 words — 1%
4	publikasiilmiah.ums.ac.id Internet	67 words — 1%
5	id.123dok.com Internet	64 words — 1%
6	ejurnal.its.ac.id Internet	55 words — 1%
7	123dok.com Internet	41 words — 1%
8	adoc.pub Internet	40 words — 1%

9	citee2015.jteti.ft.ugm.ac.id Internet	29 words — 1%
10	eprints.umm.ac.id Internet	29 words — 1%
11	garuda.kemdikbud.go.id Internet	29 words — 1%
12	dev2.kopertis7.go.id Internet	23 words — < 1%
13	Yanu Shalahuddin, Mochtar Yahya. "Practical Simulation Model-Based Measurement Power Factor Matlab / Simulink", JTECS : Jurnal Sistem Telekomunikasi Elektronika Sistem Kontrol Power Sistem dan Komputer, 2021 Crossref	22 words — < 1%
14	docplayer.info Internet	20 words — < 1%
15	lldikti7.ristekdikti.go.id Internet	18 words — < 1%
16	media.neliti.com Internet	9 words — < 1%
17	www.scribd.com Internet	9 words — < 1%
18	docobook.com Internet	8 words — < 1%

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE MATCHES

OFF