

Reduksi Harmonisa Arus Sumber Tiga-Fasa Dengan Transformator Penggeser Fasa

I. M. Wiwit Kastawan

Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Bandung Barat, Jawa Barat, Indonesia
E-mail: wiwit.kastawan@polban.ac.id

Abstrak – Tulisan ini membahas tentang harmonisa arus sumber yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa dan tiga buah konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor serta upaya reduksinya menggunakan transformator penggeser fasa. Konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa membangkitkan arus sumber non-sinusoidal yang mengandung harmonisa orde ganjil selain kelipatan tiga. Sementara itu, konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor sebagai beban per-fasa dari sebuah sistem beban tiga-fasa seimbang akan membangkitkan arus sumber non-sinusoidal yang mengandung seluruh harmonisa orde ganjil yang mengalir pada setiap penghantar fasa serta arus pada penghantar netral yang merupakan jumlah dari seluruh komponen harmonisa kelipatan tiganya. Harmonisa arus sumber yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa dapat direduksi dengan transformator tiga-fasa delta-delta dan delta-wye. Simulasi dengan perangkat lunak PSIM menunjukkan bahwa penggunaan transformator delta-delta dan delta-wye dapat mengeliminasi harmonisa arus sumber orde ke-5, ke-7, ke-17, ke-19, dan seterusnya. Adapun reduksi harmonisa arus netral yang dibangkitkan oleh tiga buah konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor dapat dilakukan dengan transformator tiga-fasa zig-zag. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan transformator tiga-fasa zig-zag dapat mengeliminasi harmonisa arus kelipatan tiga pada penghantar netral. Namun, hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa harmonisa arus sumber dan arus netral tidaklah tereliminasi melainkan tereduksi secara signifikan saja. Hal ini terjadi karena ketidakidealan rasio belitan transformator tiga-fasa sebagai akibat dari faktor pembagi $\sqrt{3}$.

Kata kunci: netral, arus sumber, harmonisa, konverter ac/dc, transformator penggeser fasa

1 Pendahuluan

Konverter ac/dc, lazim dikenal sebagai penyearah (*rectifier*), banyak digunakan pada berbagai peralatan listrik rumah tangga, komersial ataupun industri. Konverter ac/dc digunakan pada unit SMPS (*switch mode power supply*) untuk catu daya komputer atau peralatan elektronik lainnya, VSD (*variable speed drive*) untuk kendali putaran motor arus bolak-balik, *balast* elektronik untuk lampu penerangan, *battery charger unit*, sistem eksitasi motor listrik dan generator, AVR (*automatic voltage regulator*) untuk generator dan lain-lain [3], [4]. Umumnya, struktur atau topologi konverter ac/dc yang digunakan adalah gelombang penuh satu-fasa untuk kapasitas daya kecil dan gelombang penuh tiga-fasa untuk kapasitas daya yang lebih besar. Proses konversi daya listrik ac ke dc terjadi melalui penyaklaran

konverter. Namun patut dicermati bahwa proses penyaklaran ini akan mengakibatkan munculnya arus sumber non-sinusoidal yang banyak mengandung harmonisa [1]. Kandungan harmonisa yang tinggi akan berdampak buruk terhadap jaringan daya listrik karena mengakibatkan turunnya faktor daya, bertambahnya arus beban, meningkatnya rugi-rugi atau menurunnya efisiensi penyaluran daya listrik, meningkatnya arus netral pada sistem suplai daya listrik tiga-fasa serta kegagalan fungsi dari berbagai alat ukur dan alat-alat listrik lainnya yang terhubung pada jaringan daya listrik tersebut [1], [5].

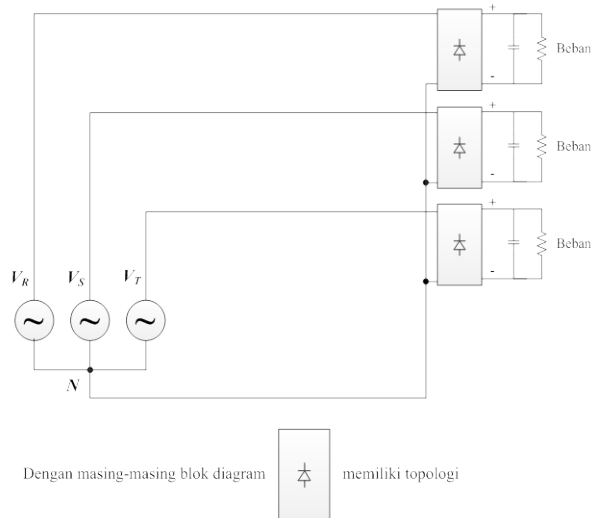
Memperhatikan berbagai dampak buruk harmonisa arus tersebut di atas maka upaya-upaya reduksi perlu dilakukan. Upaya reduksi untuk harmonisa arus sumber yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa dapat dilakukan melalui penggunaan transformator tiga-fasa

delta-delta ($\Delta-\Delta$) dan delta-ye ($\Delta-Y$). Sementara itu, upaya reduksi terhadap harmonisa arus penghantar netral yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor sebagai beban per-fasa dari sebuah sistem tiga-fasa dapat dilakukan dengan pemasangan transformator tiga-fasa zig-zag. Kedua upaya reduksi harmonisa arus sumber ini secara prinsip berbasis pada pergeseran fasa dari tegangan tiga-fasa yang akan dikenakan pada sisi masukan konverter ac/dc. Tegangan sumber akan dipisahkan menjadi beberapa gelombang tegangan dengan beda sudut fasa tertentu sesuai orde dari harmonisa arus sumber yang hendak dieliminasi [6],[7].

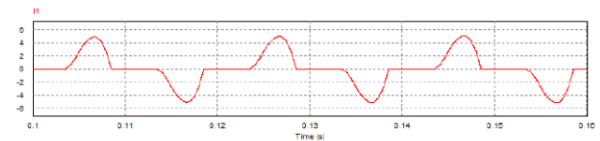
2 Landasan Teori

2.1. Harmonisa Arus Sumber Tiga-Fasa Yang Dibangkitkan Oleh Beban Konverter AC/DC

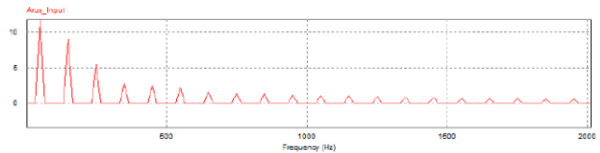
Konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor sering digunakan sebagai beban per-fasa dari sebuah sistem tiga-fasa seperti ditunjukkan oleh Gambar 1. Simulasi terhadap rangkaian konverter ini menghasilkan gelombang arus non-sinusoidal yang mengalir pada salah satu penghantar fasa, yaitu fasa *R*, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2 (a). Gelombang arus yang sama namun berbeda fasa 120° dan 240° akan mengalir pada penghantar fasa *S* dan *T*. Gelombang arus fasa ini mengandung harmonisa orde ganjil ke-3, ke-5, ke-7,... seperti ditunjukkan oleh Gambar 2 (b). Lebih lanjut, arus pada penghantar netral sebagai penjumlahan dari ketiga arus fasa ini tidak sama dengan nol namun merupakan arus periodik non-sinusoidal yang memiliki frekuensi tiga kali frekuensi arus fasa dan mengandung harmonisa orde ganjil kelipatan tiga (ke-3, ke-9, ke-15, ...) seperti ditunjukkan oleh Gambar 2 (c) dan 2 (d).



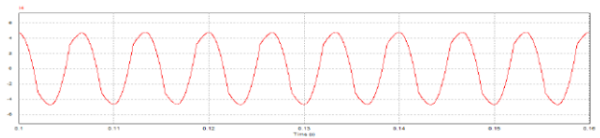
Gambar 1. Konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor sebagai beban per-fasa dari sebuah sistem tiga-fasa.



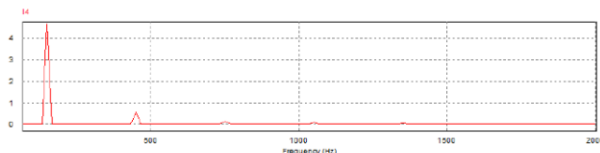
(a)



(b)



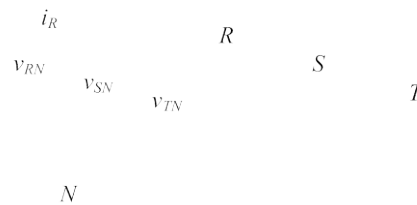
(c)



(d)

Gambar 2. Arus sumber dan netral yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor sebagai beban per-fasa dari sebuah sistem tiga-fasa berdasarkan hasil simulasi.

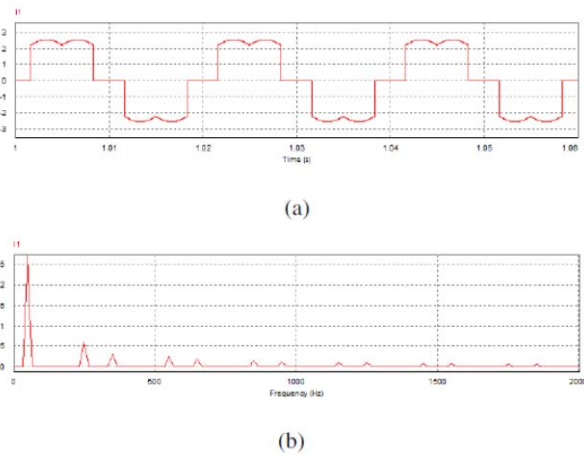
Topologi lain yang banyak dijumpai dalam sistem daya listrik tiga-fasa adalah konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa seperti ditunjukkan oleh Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa [1].

Simulasi terhadap rangkaian konverter ini menghasilkan gelombang arus periodik non-sinusoidal yang mengalir pada salah satu penghantar fasa, yaitu fasa *R*, seperti ditunjukkan oleh Gambar 4 (a). Gelombang arus yang sama namun berbeda fasa 120° dan 240° mengalir pada penghantar fasa yang lain *S* dan *T*. Gelombang arus fasa ini mengandung harmonisa orde ganjil selain kelipatan tiga yaitu ke-5, ke-7,

ke-11, ke-13, dan seterusnya seperti ditunjukkan oleh Gambar 4 (b).

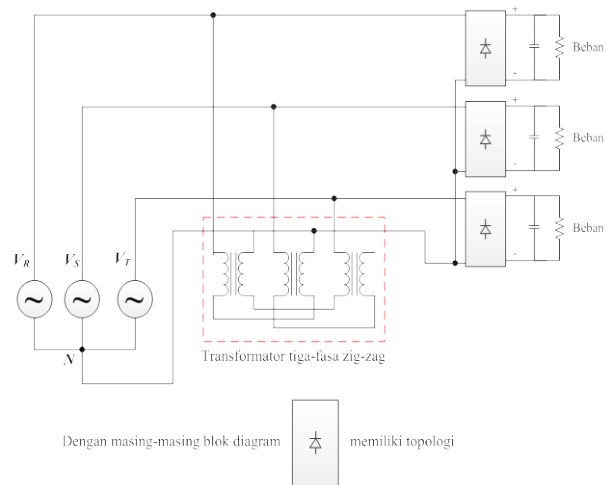


Gambar 4. Arus sumber yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa berdasarkan hasil simulasi.

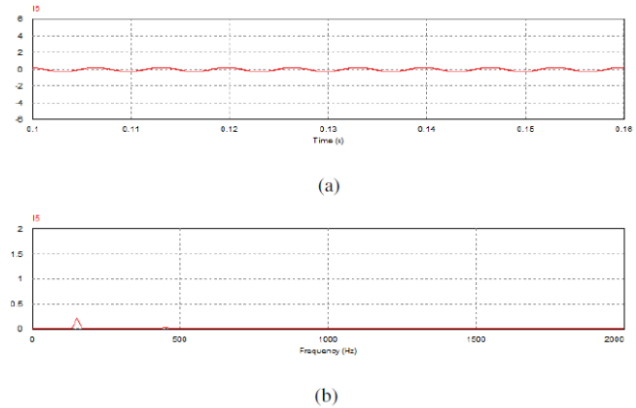
2.2. Reduksi Harmonisa Arus Sumber Tiga-Fasa Dengan Transformator Penggeser Fasa

Harmonisa arus sumber dapat direduksi dengan berbagai cara. Salah satunya adalah dengan transformator tiga-fasa penggeser fasa. Prinsipnya adalah membangkitkan sumber tiga-fasa yang sudut fasa tegangannya bergeser dengan nilai tertentu terhadap sumber tiga-fasa semula. Pergeseran sudut fasa ini mengakibatkan harmonisa arus orde tertentu dari sumber tiga-fasa yang sudut fasanya tergeser berbeda 180° dengan harmonisa arus dari sumber tiga-fasa semula sehingga saling meniadakan. Pergeseran sudut fasa 60° akan mengakibatkan tereliminasi harmonisa arus sumber orde ganjil kelipatan tiga. Sementara itu, pergeseran sudut fasa 30° akan mengakibatkan tereliminasi harmonisa arus sumber orde ganjil ke-5 dan ke-7. Untuk mengeliminasi harmonisa arus orde ganjil ke-11 dan ke-13 diperlukan pergeseran sudut fasa 15° [2], [6].

Telah diuraikan sebelumnya bahwa konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor sebagai beban per-fasa dari sebuah sistem daya listrik tiga-fasa akan menghasilkan arus netral yang mengandung harmonisa orde ganjil kelipatan tiga. Oleh karenanya transformator tiga-fasa zig-zag yang memiliki pergeseran sudut fasa 60° dapat digunakan untuk mengeliminasi harmonisa arus netral tersebut. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan penggunaan transformator tiga-fasa zig-zag untuk reduksi harmonisa arus netral dan hasil simulasinya. Jika kita bandingkan dengan gelombang arus netral yang ditunjukkan oleh Gambar 2 (c) dan (d) maka akan terlihat bahwa pemasangan transformator tiga-fasa zig-zag dapat mereduksi magnitudo arus netral secara signifikan hingga mendekati nol dan hanya harmonisa ganjil orde ke-3 yang masih terlihat muncul dengan nilai mendekati nol seperti ditunjukkan oleh Gambar 6 (a) dan (b).

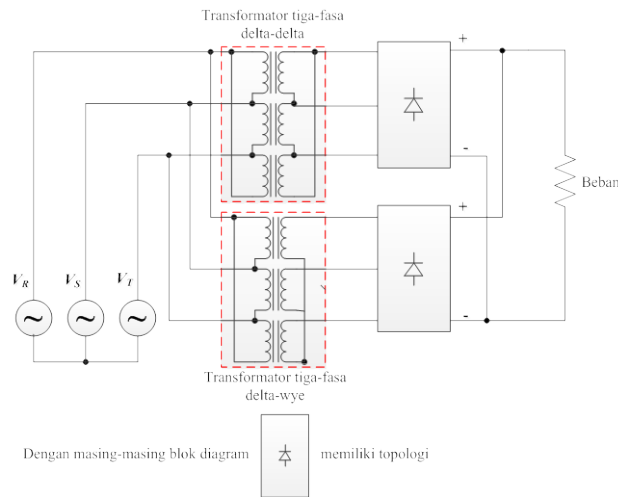


Gambar 5. Penggunaan transformator tiga-fasa zig-zag untuk reduksi harmonisa arus netral.

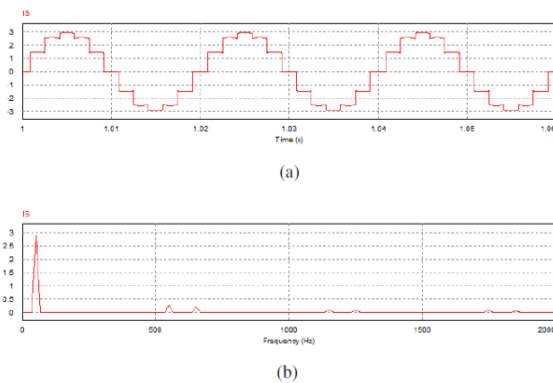


Gambar 6. Arus netral setelah pemasangan transformator tiga-fasa zig-zag berdasarkan hasil simulasi.

Telah diuraikan pula bahwa penggunaan konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa akan mengakibatkan munculnya harmonisa arus sumber orde ganjil selain kelipatan tiga. Oleh karenanya penggunaan transformator tiga-fasa (Δ - Δ) dan (Δ -Y) yang menghasilkan pergeseran sudut fasa 30° akan dapat mengeliminasi kandungan harmonisa arus sumber orde ke-5 dan ke-7 yang merupakan dua orde harmonisa arus sumber paling dominan. Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan penggunaan transformator tiga-fasa dengan hubungan belitan (Δ - Δ) dan (Δ -Y) untuk reduksi harmonisa arus sumber tersebut dan hasil simulasinya.



Gambar 7. Penggunaan transformator tiga-fasa (Δ - Δ) dan (Δ -Y) untuk reduksi harmonisa arus sumber.



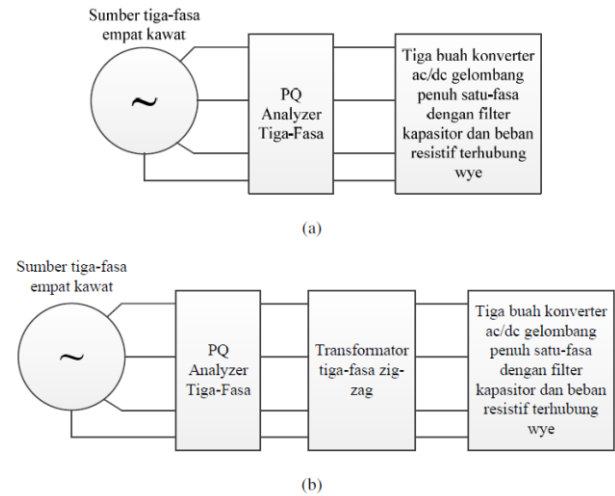
Gambar 8. Arus sumber setelah pemasangan transformator tiga-fasa (Δ - Δ) dan (Δ -Y) berdasarkan hasil simulasi.

Jika dibandingkan dengan arus sumber yang ditunjukkan oleh Gambar 4 (a) dan (b) maka akan jelas terlihat bahwa pemasangan transformator tiga-fasa (Δ - Δ) dan (Δ -Y) dapat menghasilkan bentuk gelombang arus sumber yang lebih mendekati sinusoidal murni, seperti ditunjukkan oleh Gambar 8 (a), dengan kandungan harmonisa yang lebih rendah. Hal ini dikonfirmasi oleh spektrum harmonisa pada Gambar 8 (b) yang memperlihatkan bahwa komponen harmonisa arus yang muncul adalah orde ganjil ke-11, ke-13, ke-23, ke-25,... dengan orde ganjil ke-5, ke-7, ke-17, ke-19,... tereliminasi sepenuhnya.

3 Pengujian Laboraturium dan Pembahasan

Untuk menelaah lebih lanjut upaya reduksi harmonisa arus sumber dengan transformator tiga-fasa ini maka dilakukan langkah pengujian laboratorium. Uji laboratorium pertama bertujuan untuk menelaah

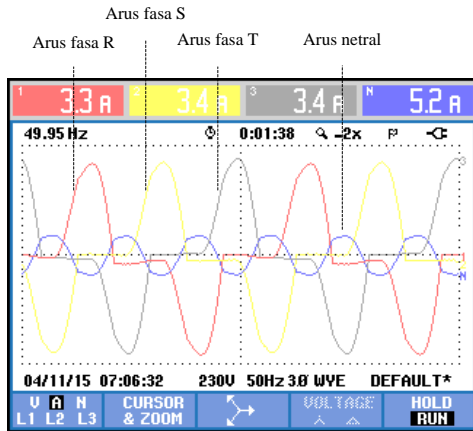
harmonisa arus sumber yang dibangkitkan oleh tiga buah konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor yang dipasang sebagai beban tiga-fasa serta upaya reduksinya dengan transformator tiga-fasa zig-zag. Blok diagram rangkaian pengujianya ditunjukkan oleh Gambar 9 (a) dan (b) di bawah ini.



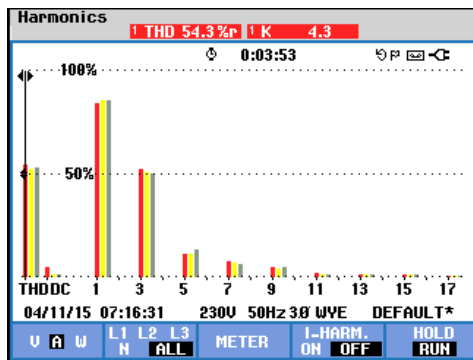
Gambar 9. Blok diagram pengujian harmonisa arus sumber tiga-fasa yang dibangkitkan oleh tiga buah konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor dan upaya reduksinya dengan transformator tiga-fasa zig-zag.

Pengujian ini menghasilkan gelombang arus sumber ac, gelombang arus netral dan spektrum harmonisa yang ditunjukkan oleh Gambar 10. Dapat dilihat bahwa dihasilkan tiga buah gelombang arus sumber ac non-sinusoidal yaitu fasa R, S dan T dengan magnitudo sekitar 3,4 A dan beda fasa 120° serta arus netral non-sinusoidal dengan magnitudo sekitar 5,2 A dan frekuensi tiga kali frekuensi arus sumber ac seperti ditunjukkan oleh Gambar 10 (a). Masing-masing arus sumber ac non-sinusoidal ini mengandung harmonisa orde ganjil ke-3, ke-5, ke-7,... seperti ditunjukkan oleh spektrum harmonisa Gambar 10 (b). Sementara itu, arus non-sinusoidal yang mengalir pada kawat penghantar netral mengandung harmonisa orde ganjil kelipatan tiga yaitu ke-3, ke-9, ke-15,... seperti ditunjukkan oleh spektrum harmonisa Gambar 10 (c). Jika Gambar 10 ini kita bandingkan dengan Gambar 2 maka dapat dinyatakan bahwa hasil uji laboratorium adalah sesuai dengan hasil simulasi. Sementara itu, hasil uji laboratorium untuk upaya reduksi harmonisa arus netral dengan transformator tiga-fasa zig-zag menghasilkan gelombang arus netral dan spektrum harmonisa yang ditunjukkan oleh Gambar 11. Terlihat bahwa pada kawat netral sumber (antara suplai tiga-fasa sumber dan netral transformator tiga-fasa zig-zag) mengalir arus sebesar 2,5 A dengan frekuensi tiga-kali frekuensi arus sumber ac. Hasil uji laboratorium ini sedikit berbeda dengan hasil simulasi pada Gambar 6 dimana arus netral sumber bernilai sangat kecil (dianggap sama dengan

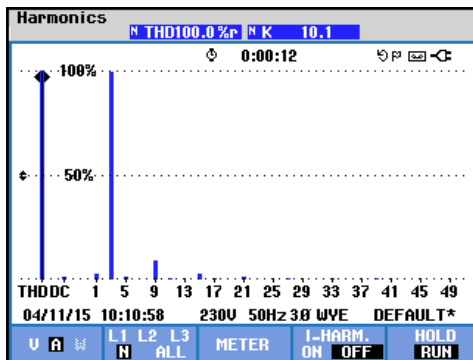
no). Tidak tereliminasi arus netral sumber dalam uji laboratorium ini disebabkan oleh ketidakidealan dari transformator tiga-fasa zig-zag yang digunakan. Rating tegangan setiap belitan fasanya sebesar $220/\sqrt{3}$ V (*rms*) didekati dengan nilai 127 V (*rms*). Namun secara umum dapat dinyatakan bahwa transformator tiga-fasa zig-zag dapat digunakan untuk reduksi harmonisa arus netral.



(a)

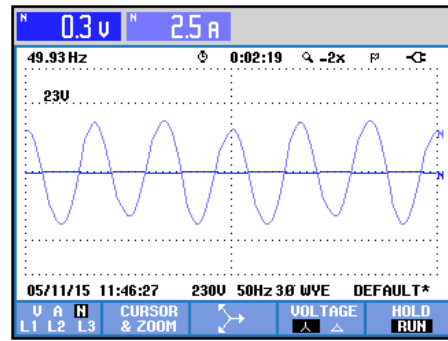


(b)

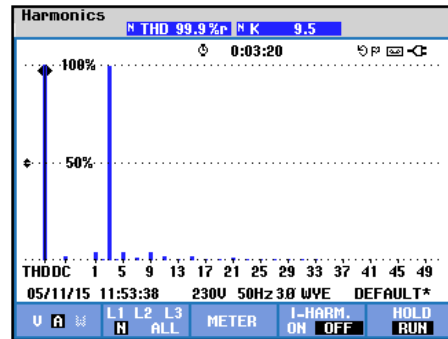


(c)

Gambar 10. Arus sumber dan netral yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor sebagai beban per-fasa dari sebuah sistem tiga-fasa berdasarkan hasil uji laboratorium.



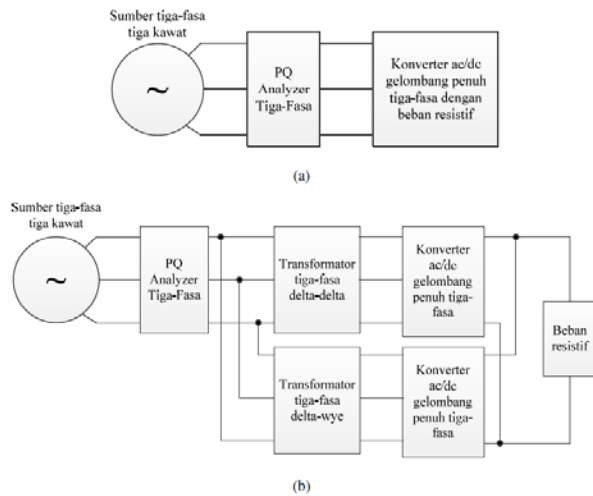
(a)



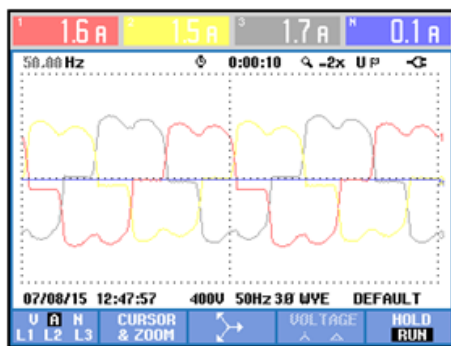
(b)

Gambar 11. Arus netral setelah pemasangan transformator tiga-fasa zig-zag berdasarkan hasil uji laboratorium.

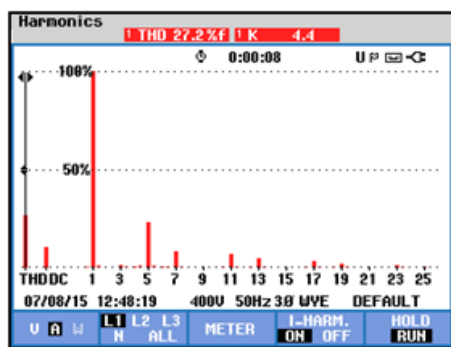
Uji laboratorium yang kedua bertujuan untuk menelaah harmonisa arus sumber yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa serta upaya reduksinya dengan transformator tiga-fasa hubungan belitan (Δ - Δ) dan (Δ -Y). Blok diagram rangkaian pengujianya ditunjukkan oleh Gambar 12 (a) dan (b). Hasil uji untuk beberapa kondisi pembebanan menghasilkan tiga buah arus sumber ac non-sinusoidal dengan beda fasa 120° dan magnitudo berkisar antara 0,4 – 1,6 A per-fasa seperti ditunjukkan oleh Gambar 13 (a). Masing-masing fasa arus sumber ac non-sinusoidal ini memiliki spektrum harmonisa yang ditunjukkan oleh Gambar 13 (b). Dapat dilihat bahwa arus sumber ac non-sinusoidal ini mengandung harmonisa orde ganjil selain kelipatan tiga yaitu ke-5, ke-7, ke-11, ke-13, dan seterusnya. Jika Gambar 13 ini kita bandingkan dengan Gambar 4 maka dapat dinyatakan bahwa hasil uji laboratorium adalah sesuai dengan hasil simulasi. Telaah lebih jauh menunjukkan bahwa arus sumber ac non-sinusoidal ini memiliki nilai *total harmonic distortion* (THD) rata-rata sebesar 28,6%. Persentase terhadap arus fundamental dari harmonisa orde ke-5, ke-7, ke-11 dan ke-13 masing-masing mencapai kisaran 24%, 9,3%, 8,1% dan 5,4%. Sementara itu, harmonisa orde ke-17, ke-19, dan seterusnya memiliki persentase sangat kecil sehingga dapat diabaikan.



Gambar 12. Blok diagram pengujian harmonisa arus sumber yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa dan upaya reduksinya menggunakan transformator tiga-fasa (Δ - Δ) dan (Δ -Y).



(a)

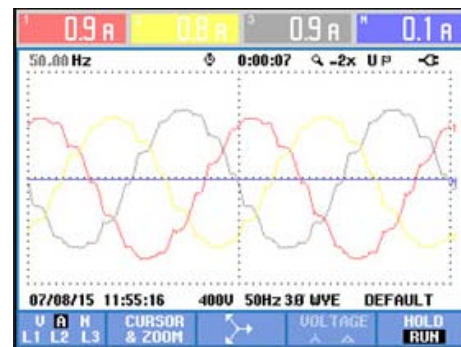


(b)

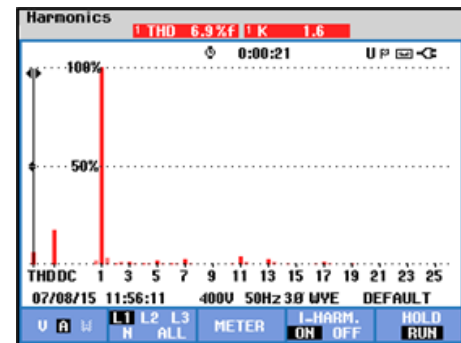
Gambar 13. Arus sumber yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh tiga-fasa berdasarkan hasil uji laboratorium

Hasil uji laboratorium untuk upaya reduksi harmonisa melalui penggunaan transformator tiga-fasa (Δ - Δ) dan (Δ -Y) menghasilkan gelombang arus sumber ac dan spektrum harmonisa yang ditunjukkan oleh Gambar 14. Terlihat bahwa

dihasilkan tiga buah arus sumber ac dengan beda fasa 120° dan memiliki bentuk gelombang yang lebih mendekati sinusoidal. Spektrumnya menunjukkan bahwa terjadi reduksi sangat signifikan terhadap harmonisa arus orde ke-5 dan ke-7 sehingga menurunkan nilai THD rata-rata dengan sangat tajam dari 28,6% menjadi 8,1%. Telaah lebih dalam menunjukkan bahwa harmonisa orde ke-5 dan ke-7 masing-masing direduksi signifikan dari 24% dan 9,3% menjadi 5,7% dan 2%. Meskipun tidak terlalu signifikan, harmonisa arus orde ke-11 dan ke-13 juga tereduksi dari 8,1% dan 5,4% menjadi 3,3% dan 2,2%. Hasil uji laboratorium ini sedikit berbeda dengan hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Gambar 8 dimana harmonisa arus orde ke-5 dan ke-7 tereliminasi atau tereduksi sepenuhnya. Kondisi ini terjadi terutama karena perbandingan tegangan primer dan sekunder transformator delta-wye yang bernilai 220 V/127 V tidak sama persis dengan perbandingan belitan yang bernilai $1/(1/\sqrt{3})$.



(a)



(b)

Gambar 14. Arus sumber setelah pemasangan transformator tiga-fasa (Δ - Δ) dan (Δ -Y) berdasarkan hasil uji laboratorium.

3 Simpulan

Penggunaan transformator penggeser fasa dapat mereduksi harmonisa arus netral dan arus sumber ac yang dibangkitkan oleh konverter ac/dc gelombang penuh satu-fasa dengan filter kapasitor sebagai beban per-fasa dari sebuah sistem tiga-fasa serta konverter

ac/dc gelombang penuh tiga-fasa. Meskipun tidak mengeliminasi, transformator tiga-fasa zig-zag dapat secara signifikan mereduksi harmonisa arus netral lebih dari 50%. Penggunaan transformator tiga-fasa (Δ - Δ) dan (Δ -Y) juga dapat mereduksi harmonisa arus sumber ac secara sangat signifikan. THD arus sumber ac tereduksi lebih dari 70%. Komponen harmonisa arus yang tereduksi sangat signifikan adalah orde ke-5 (tereduksi lebih dari 80%) dan ke-7 (tereduksi lebih dari 75%). Namun, ketidakidealan rasio tegangan/belitan transformator tiga-fasa sebagai akibat faktor pembagi $\sqrt{3}$ yang tidak bulat mengakibatkan tidak terjadinya eliminasi harmonisa arus netral dan arus sumber ac.

Kepustakaan

1. M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook and Applications*, Elsevier-BH, 2011.
2. B. L. Theraja, A. K. Theraja, *A Textbook of Electrical Technology Volume I Basic Electrical Engineering*, S. Chand and Company Ltd., 2005.
3. D. Salomonsson, *Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronics Loads*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, July 2007.
4. F. M. Wildan, E. A. Hakim, D. Suhardi, Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler PID Berbasis Genetic Algorithm, Jurnal Kinetik, Vol.1, No.1, 2016
5. Mahesh A. Patel, Ankit R. Patel, Dhaval R. Vyas, Ketul M. Patel, *Use of PWM Techniques for Power Quality Improvement*, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol. 1, No. 4, May 2009.
6. *Transformer, Harmonic Currents and Phase Shifting*, Literature Code: HPS-TA2, Hammond Power Solutions, 2014.
7. R. Omar, A. Ahmad, M. Sulaiman, *Triplen Harmonics Mitigation 3 Phase Four-Wire Electrical Distribution System Using Wye-Zig-Zag Transformers*, Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS) 1 (1), 2010.