



SNESTIK

Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi,
dan Teknik Informatika

<https://ejurnal.itats.ac.id/snestik> dan <https://snestik.itats.ac.id>



Informasi Pelaksanaan :

SNESTIK V - Surabaya, 26 April 2025

Fakultas Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

Informasi Artikel:

DOI : 10.31284/p.snestik.2025.7138

Prosiding ISSN 2775-5126

Fakultas Teknik Elektro dan Teknologi Informasi-Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya
Gedung A-ITATS, Jl. Arief Rachman Hakim 100 Surabaya 60117 Telp. (031) 5945043
Email : snestik@itats.ac.id

Evaluasi Performa Filter Daya Aktif 3 Fasa 4 Lengan untuk Beban Area Bisnis

Maman Rukmana^{1,2*}, Ardyono Priyadi¹, Arwindra Rizqiawan², Tri Desmana Rachmildha², Philip Nathanael Erlangga Sitorus², Dimas Anton Asfani¹ dan I Made Yulistya Negara¹

¹Program Profesi Insinyur, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60264
Indonesia

²Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132
Indonesia

e-mail: mrukmana02@gmail.com

ABSTRACT

The increase in energy consumption in business sector electricity consumers causes an increasing number of non-linear loads in the form of single-phase rectifiers that produce harmonics. Harmonic current injection causes distortion of the system voltage waveform, overheating of electrical machines and failure of sensitive equipment. One way to overcome the harmonic problem is to install an active power filter in parallel. Parallel active power filters can eliminate harmonics and balance the load. This study aims to evaluate the performance of active power filters in a 3-phase 4-wire system to overcome current harmonics caused by non-linear loads in business area electricity consumers. The active power filter is tasked with injecting oscillatory active power components, reactive power and zero sequence active power into the load. So that the source only injects the average active power component into the load. By using the instantaneous power theory, the simulation results show that the active power filter is successful in reducing the current THD, the current in the source is sinusoidal and balanced.

Keywords: Active power filter, harmonics, inverter, instantaneous power theory, non linear load

ABSTRAK

Peningkatan konsumsi energi pada konsumen listrik sektor bisnis menyebabkan semakin banyaknya beban non-linier berupa rectifier satu fasa yang menghasilkan harmonik. Injeksi harmonik arus menyebabkan terjadinya distorsi bentuk gelombang tegangan sistem, pemanasan berlebih pada mesin listrik dan kegagalan peralatan sensitif. Salah satu cara untuk menanggulangi masalah harmonik adalah dengan memasang filter daya aktif secara paralel. Filter daya aktif paralel dapat menghilangkan harmonik dan menyeimbangkan beban. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa filter daya aktif pada sistem 3 fasa 4 kawat untuk mengatasi harmonik arus yang disebabkan oleh beban non-linier pada konsumen listrik area bisnis. Filter daya aktif bertugas untuk menginjeksikan komponen daya aktif osilasi, daya reaktif dan daya aktif urutan nol ke dalam beban. Sehingga sumber hanya menginjeksikan komponen daya aktif rata-rata ke dalam beban. Dengan menggunakan teori daya instantaneous, hasil simulasi menunjukkan bahwa filter daya aktif berhasil menurunkan THD arus, arus pada sumber bersifat sinusoidal dan seimbang.

Kata kunci: Beban non linear, filter daya aktif, harmonik, inverter, teori daya instantaneous

PENDAHULUAN

Konsumen listrik PLN sektor bisnis pada tahun 2022 mengonsumsi energi sebesar 50.532,19 GWh atau 18,46% dari total konsumsi energi seluruh konsumen [1]. Pada tahun 2023, konsumen listrik PLN sektor bisnis mengonsumsi energi sebesar 57.112,00 GWh atau 19,80% dari total konsumsi energi seluruh konsumen [2]. Hal tersebut menunjukkan peningkatan konsumsi energi oleh konsumen sektor bisnis. Peningkatan konsumsi energi dipengaruhi dengan meningkatnya beban pada konsumen sektor bisnis. Dengan perkembangan teknologi elektronika daya, peralatan seperti komputer, monitor, lampu LED, pengeras suara, proyektor, *charger*, dan pendingin ruangan pada konsumen sektor bisnis memiliki komponen rectifier 1 fasa yang termasuk beban non-linier. Meningkatnya konsumen sektor bisnis menyebabkan semakin banyaknya beban non-linier yang terhubung ke sistem tenaga [3]. Beban non-linier berupa rectifier 1 fasa tersebut menyebabkan banyak permasalahan kualitas daya, salah satunya masalah harmonisa arus [4], [5]. Pada sistem 3 fase 4 kawat, arus harmonisa mengalir melalui kawat netral. Rectifier 1 fasa pada sistem 3 fasa 4 kawat menyebabkan harmonik arus, ketidakseimbangan beban serta munculnya arus netral pada kawat netral. Komponen arus urutan nol yang mengalir pada kawat netral merupakan kelipatan dari komponen arus orde ketiga, sehingga menyebabkan panas berlebih pada kabel dan transformator [6]. Selain itu, injeksi harmonik injeksi harmonik arus pada sistem tenaga tidak hanya menurunkan efisiensi sistem, tetapi menyebabkan panas berlebih pada mesin listrik berputar dan kegagalan pada peralatan sensitif seperti relay [7], [8]. Dari permasalahan tersebut, diperlukanlah suatu solusi untuk menyelesaikan permasalahan harmonisa untuk sistem dengan beban non-linier berupa rectifier 1 fasa.

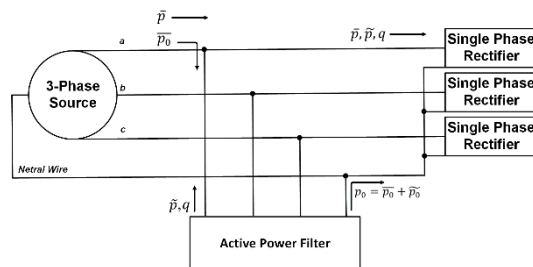
Beberapa metode telah digunakan untuk mengatasi masalah arus harmonisa, seperti memasang filter pasif dan filter daya aktif. Filter pasif ditune untuk frekuensi tunggal atau pita frekuensi tertentu yang mengurangi harmonik dengan menyediakan jalur resistansi rendah ke arus harmonik yang ditune. Namun, filter pasif menyebabkan terjadinya resonansi antara reaktansi saluran dan kurangnya kemampuan kompensasi dinamis [3]. Filter aktif berbasis arus efektif bekerja dengan cara menyuntikkan komponen harmonik dari arus beban tiap fasa sehingga tampak sinusoidal jika dilihat dari sisi sumber. Namun filter aktif ini tidak dapat mengatasi ketidakseimbangan pada sisi sumber dan tidak dapat mengatur faktor daya sehingga menyebabkan arus netral sumber tidak mencapai nol [9].

Filter daya aktif telah dikembangkan dengan teori daya instantaneous, yang memaksa sumber untuk menyediakan daya aktif instantaneous yang konstan dan daya reaktif nol sehingga bentuk gelombang di sisi sumber akan menjadi sinusoidal. Teori daya instantaneous yang diperkenalkan oleh Akagi melibatkan penyeimbangan arus sumber, yang tidak dapat dicapai dengan filter aktif berbasis arus, dan menghilangkan arus netral di sisi sumber dengan

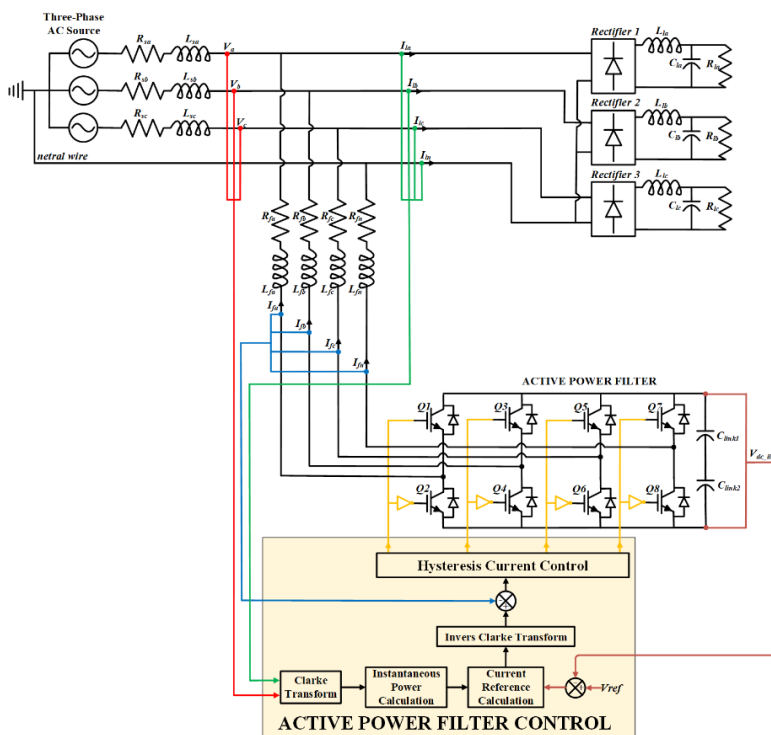
menambahkan daya aktif urutan nol yang diserap oleh beban yang akan disediakan oleh sumber melalui saluran fasa [10]. Dengan demikian, filter daya aktif ini lebih efisien, fleksibel terhadap variasi beban, tidak beresonansi dengan sistem daya, dapat mengkompensasi daya reaktif, bekerja secara independen sesuai dengan karakteristik impedansi sistem, dan dapat mengkompensasi harmonik selektif. Makalah ini bertujuan untuk mengevaluasi performa filter daya aktif pada sistem 3 fasa 4 kawat untuk mengatasi harmonik arus yang disebabkan oleh beban non-linier pada konsumen listrik sektor bisnis.

METODE

Pada sistem 3 fasa 4 kawat, sumber 3 fasa mengirim daya aktif instantaneous, daya reaktif instantaneous dan daya aktif urutan nol instantaneous ke beban non linear. Sesuai dengan Gambar 1, dengan filter daya aktif yang dihubungkan paralel dengan beban non linear, sumber 3 fasa hanya mengirimkan daya aktif rata-rata $\bar{p}$ dan daya aktif urutan nol rata-rata $\bar{p}_0$. Daya aktif osilasi $\tilde{p}$, daya reaktif q , dan daya aktif urutannol osilasi $\tilde{p}_0$ dikirim oleh filter daya aktif. Gambar 2 menunjukkan rangkaiannya dan kendali sistem filter daya aktif.



Gambar 1. Sistem 3 Fasa 4 Kawat dengan Filter Daya Aktif



Gambar 2. Rangkaian dan Kendali Filter Daya Aktif

Berdasarkan Gambar 2 diatas, sumber tegangan 3 fasa dengan tegangan fasa-fasa rms 380 V dan sistem frekuensi 50 Hz terhubung ke beban non linear dan tidak seimbang. Beban berupa 3 buah rectifier satu fasa. Filter daya aktif 3 fasa 4 kawat memiliki 2 topology, yaitu konverter PWM 4 jembatan dan konverter PWM 4 jembatan [11]. Pada topologi konverter PWM 3 lengan, kawat netral terhubung yang memisahkan dua kapasitor. Sedangkan topologi konverter PWM 4 lengan memiliki lengan keempat untuk mengkompensasi arus netral. Pada makalah ini, digunakan konverter PWM 4 lengan, sehingga memiliki total 8 komponen saklar elektronik berupa IGBT. Tiap lengan memiliki 2 IGBT yang saling berlawanan. Konverter disuplai dua kapasitor DC dengan kapasitansi masing-masing 2700 uF. Konverter berupa *Voltage Source Converter* (VSC) sehingga output konverter harus dihubungkan dengan induktor sebelum terhubung ke jaringan. Filter daya aktif membutuhkan beberapa parameter dari sistem seperti arus beban (garis berwarna hijau), tegangan (garis berwarna merah) dan arus konverter (garis berwarna biru).

Dalam makalah ini, teori daya instantaneous p-q-0 digunakan untuk mengkompensasi arus harmonik. Tegangan dan arus beban diubah dari sistem 3 fasa menjadi sistem α - β -0 dengan transformasi Clarke [12]. Persamaan dibawah menunjukkan transformasi Clarke untuk tegangan (v) dan arus (i). Variabel X_α , X_β , and X_0 merupakan tegangan (v) atau arus (i).

$$\begin{bmatrix} X_\alpha & X_\beta & X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a & X_b & X_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Daya aktif instantaneous, daya reaktif instantaneous dan daya aktif urutan nol instantaneous dihitung berdasarkan tegangan dan arus beban pada sistem α - β -0 yang ditunjukkan dengan persamaan (2), (3) dan (4).

$$p = v_{\alpha} i_{\alpha} + v_{\beta} i_{\beta} \quad (2)$$

$$q = v_{\alpha} i_{\beta} - v_{\beta} i_{\alpha} \quad (3)$$

$$p_0 = v_0 i_0 \quad (4)$$

Daya instantaneous dibagi menjadi dua komponen, yaitu komponen rata-rata dan komponen osilasi yang ditunjukkan dengan persamaan (5), (6) dan (7).

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (5)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (6)$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (7)$$

Proses switching pada konverter memerlukan daya aktif yang kontinu, sehingga tegangan DC link dipertahankan lebih besar daripada tegangan puncak pada bus. Hal tersebut menyebabkan rugi-rugi. Kendali PI digunakan untuk mempertahankan tegangan DC link konstan. Arus referensi dalam kerangka α - β -0 dihitung dengan mempertimbangkan komponen daya yang harus diinjeksikan filter daya aktif ke jaringan sesuai persamaan (8) dan (9). Arus referensi dalam sistem α - β -0 diubah kembali ke sistem 3 fasa dengan invers transformasi Clarke.

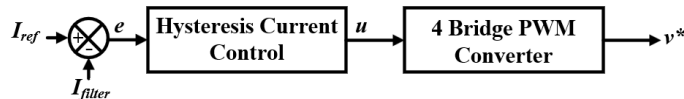
$$\begin{bmatrix} i_{ref_a} \\ i_{ref_b} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_0 - \tilde{p} - q \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$i_{ref_0} = i_0 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a_ref} \\ i_{b_ref} \\ i_{c_ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a_ref} \\ i_{b_ref} \\ i_{0_ref} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$i_{n_ref} = -(i_{a_ref} + i_{b_ref} + i_{c_ref}) \quad (11)$$

Untuk menghasilkan sinyal PWM, kendali arus hysteresis digunakan. Kendali arus hysteresis memiliki keunggulan berupa implementasi yang mudah, kendali yang cepat, kuat dan dinamika yang baik [13]. Dalam makalah ini, lebar pita kendali arus hysteresis yang digunakan sebesar 0,02 A. Kendali arus hysteresis membandingkan arus referensi dan arus konverter aktual. Perbedaan antara arus referensi dan arus filter aktual adalah *error* (*e*). *Error* dilewatkan melalui kendali hysteresis untuk memperoleh sinyal kendali *u* yang akan memberikan perintah switching ke IGBT untuk menghasilkan bentuk gelombang tegangan keluaran yang diinginkan.

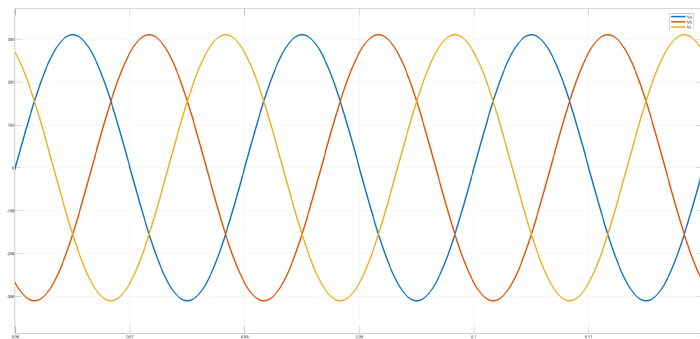


Gambar 3. Diagram Blok Kendali Arus Hysteresis

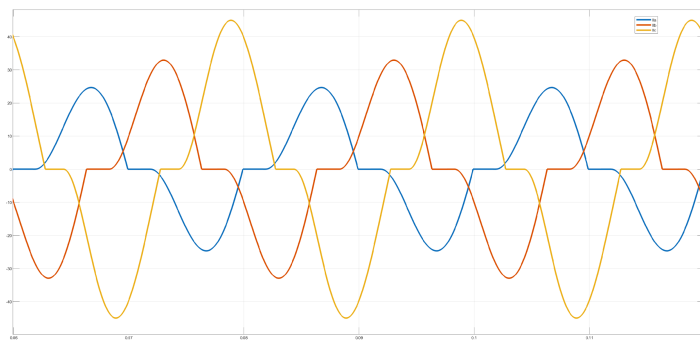
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 4 menunjukkan profil tegangan dengan tegangan rms fasa-netral sebesar 219,3 V, 219,4 V, dan 219,4 V. Sedangkan Gambar 5 menunjukkan profil beban yang tidak seimbang

pada masing-masing fasa. Arus beban fasa A, B, dan C dengan nilai rms berturut-turut 14,54 A, 19,45 A, dan 27,15 A.

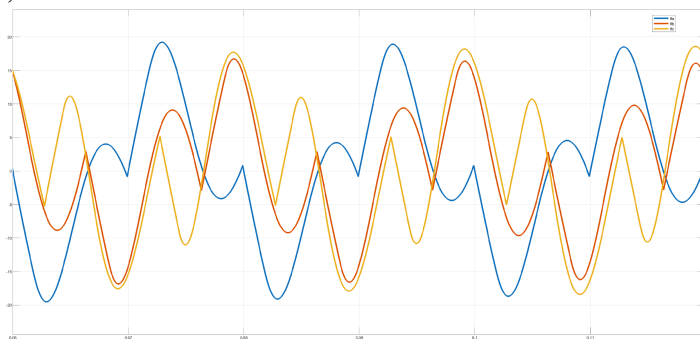


Gambar 4. Bentuk Gelombang Tegangan

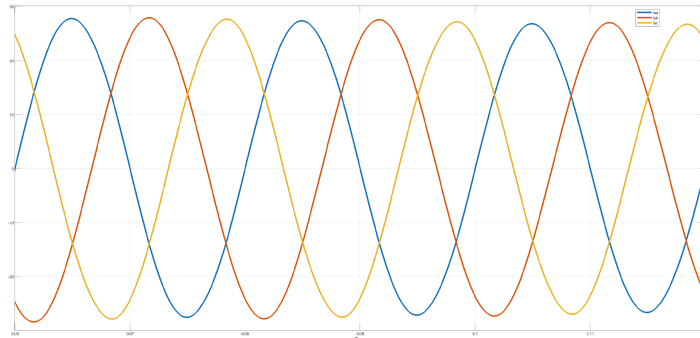


Gambar 5. Bentuk Gelombang Arus Beban

Dengan pemasangan filter daya aktif, Gambar 6 memperlihatkan arus yang diinjeksikan oleh filter daya aktif ke dalam sistem untuk memaksa arus sumber berbentuk sinusoidal. Pada Gambar 5 sebelumnya memperlihatkan arus pada sisi beban harmonik dan tidak seimbang. Namun dengan pemasangan filter daya aktif, arus di sumber menjadi seimbang dan sinusoidal seperti pada Gambar 7. Arus sumber fasa A, B, dan C dengan nilai rms masing-masing 19,28 A, 19,49 A, dan 19,33 A.

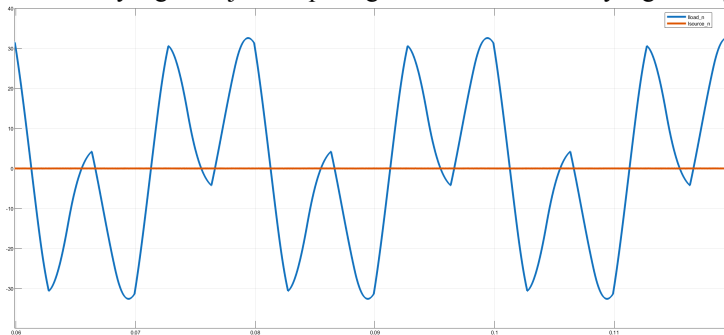


Gambar 6. Arus yang diinjeksikan Filter Daya Aktif



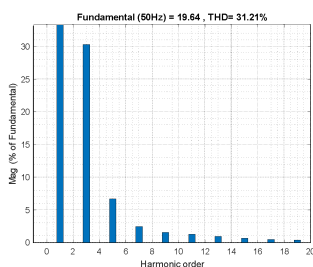
Gambar 7. Bentuk Gelombang Arus Sumber

Gambar 8 dibawah menunjukkan arus netral. Karena beban tidak seimbang maka menghasilkan nilai arus beban netral, dengan gelombang berwarna biru, yang beresilasi sesuai dengan nilai rms sebesar 19,94 A. Namun, pemasangan filter daya aktif berhasil mengompensasi arus netral di sisi sumber yang ditunjukkan pada garis berwarna merah yang nilainya konstan nol.

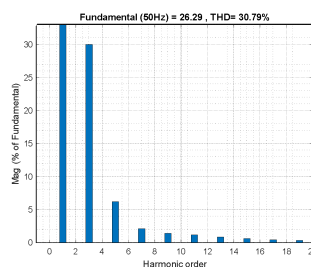


Gambar 8. Bentuk Gelombang Arus Netral tanpa (warna biru) dan dengan Filter Daya Aktif (warna merah)

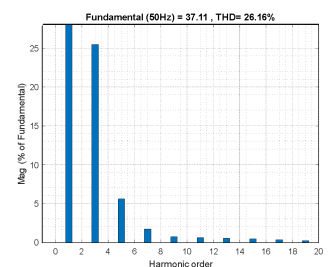
Gambar 9 menunjukkan THD arus sumber untuk setiap fasa. Tanpa filter daya aktif, THD arus sumber mengandung sejumlah besar harmonik ke-1, ke-3, ke-5 dan sejumlah kecil harmonik yang lebih tinggi. THD tertinggi terjadi pada fasa A sebesar 31,21%. Dengan pemasangan filter daya aktif, sisi arus sumber mengalami penurunan THD secara signifikan. THD tertinggi terjadi pada fasa C sebesar 0,94%.



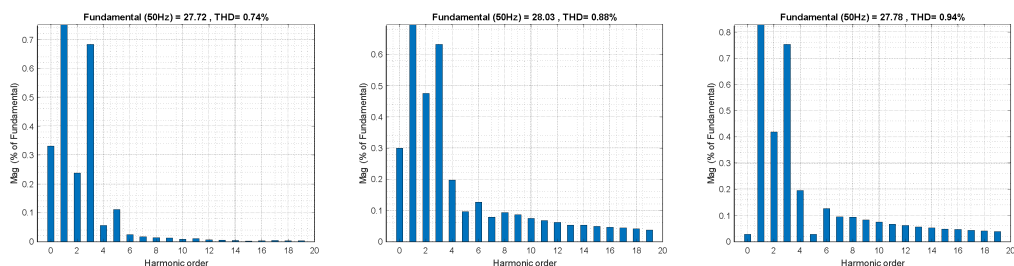
(a) Fasa A tanpa Filter



(b) Fasa B tanpa Filter



(c) Fasa C tanpa Filter



(d) Fasa A dengan Filter (e) Fasa B dengan Filter (f) Fasa C dengan Filter
Gambar 9. THD Arus Sumber tanpa Filter Daya Aktif dan dengan Filter Daya Aktif

Dari Gambar 9 diatas, dapat dirangkum pada tabel di bawah ini yang menunjukkan perbandingan THD arus pada sistem tanpa dan dengan pemasangan filter daya aktif.

Tabel 1. Perbandingan THD tanpa dan dengan Filter Daya Aktif

Kondisi	THD Fasa A	THD Fasa B	THD Fasa C
Tanpa Filter Daya Aktif	31,21 %	30,79 %	26,16 %
Dengan Filter Daya Aktif	0,74%	0,88%	0,94%

Sebelum pemasangan filter daya aktif dengan beban yang tidak seimbang, daya aktif instantaneous berfluktuasi dengan nilai tertinggi sebesar 16,52 kW dan nilai terendah sebesar 9,04 kW. Daya aktif rms yang dibutuhkan beban adalah sebesar 13,35 kW. Sedangkan daya reaktif rms sebesar 4,58 kVAR. Dengan pemasangan filter daya aktif, daya aktif yang dikirim oleh sumber ke beban relatif konstan sebesar 12,64 kW dan daya reaktif yang dikirim oleh sumber ke beban mendekati nol. Hal ini menunjukkan bahwa filter daya aktif telah berhasil menginjeksikan komponen osilasi daya aktif, semua komponen daya reaktif dan komponen osilasi daya aktif urutan nol. Efek dari sumber hanya mengirim daya aktif rata-rata dan daya aktif urutan nol rata-rata yaitu arus pada sisi sumber menjadi seimbang dan sinusoidal.

KESIMPULAN

Makalah ini mengevaluasi performa filter daya aktif untuk sistem kelistrikan 3 fasa 4 kawat dengan topologi *voltage source converter*. Dengan menggunakan teori daya instantaneous p-q-0, filter daya aktif bertugas untuk menginjeksikan daya aktif komponen osilasi, seluruh komponen daya reaktif dan daya aktif urutan nol komponen osilasi. Arus referensi yang diperoleh dari teori daya instantaneous dibandingkan dengan arus filter aktual dengan kendali arus hysteresis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pemasangan filter daya aktif berkontribusi dalam menurunkan THD arus, arus pada sumber menjadi sinusoidal, dan arus netral bernilai nol.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PLN, "Statistik PLN 2022," Jakarta, Jun. 2023. Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2023/05/Statistik-PLN-2022-Final-2.pdf>
- [2] PLN, "Statistik PLN 2023," Jakarta, Jun. 2024. Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2024/07/Laporan-Statistik-2023-Ind.pdf>
- [3] M. Iqbal *et al.*, "Neural Networks Based Shunt Hybrid Active Power Filter for Harmonic Elimination," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 69913–69925, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077065.

- [4] T. D. Rachmildha, "Optimized Combined System of Shunt Active Power Filters and Capacitor Banks," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 3, no. 3, pp. 326–335, Sep. 2011, doi: 10.15676/ijeei.2011.3.3.5.
- [5] L. L. Desouza, N. Rocha, D. A. Fernandes, R. P. R. De Sousa, and C. B. Jacobina, "Grid Harmonic Current Correction Based on Parallel Three-Phase Shunt Active Power Filter," *IEEE Trans Power Electron*, pp. 1–1, 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3107399.
- [6] R. Sharma, N. Goel, and S. Chacko, "Performance Investigation of Fractional PI Controller in Shunt Active Filter for a Three Phase Four Wire System," in *2018 4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA)*, IEEE, Dec. 2018, pp. 1–7. doi: 10.1109/CCAA.2018.8777576.
- [7] Y. Hoon, M. A. M. Radzi, M. K. Hassan, and N. F. Mailah, "Operation of Three-Level Inverter-Based Shunt Active Power Filter Under Nonideal Grid Voltage Conditions With Dual Fundamental Component Extraction," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 33, no. 9, pp. 7558–7570, Sep. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2766268.
- [8] V. N. Jayasankar and U. Vinatha, "Backstepping Controller With Dual Self-Tuning Filter for Single-Phase Shunt Active Power Filters Under Distorted Grid Voltage Condition," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 56, no. 6, pp. 7176–7184, Nov. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3025520.
- [9] T. D. Rachmildha and Y. Haroen, "Angle based fast direct power control approach applied on 3-phase 4-wire active power filter," in *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, IEEE, Nov. 2009, pp. 812–815. doi: 10.1109/PEDS.2009.5385817.
- [10] T. D. Rachmildha, A. Llor, M. Fadel, P. A. Dahono, and Y. Haroen, "Comparison of direct power control with hybrid approach on 3-Phase 4-wire active power filter between p-q-0 and p-q-r power theory," in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, IEEE, Jun. 2008, pp. 2270–2275. doi: 10.1109/ISIE.2008.4677282.
- [11] L. F. A. Maciel, J. L. M. Morales, D. C. Gaona, and J. G. M. Pimentel, "A Study of a Three-Phase Four-Wire Shunt Active Power Filter for Harmonics Mitigation," in *2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ROPEC.2018.8661416.
- [12] "The Instantaneous Power Theory," in *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley, 2017, pp. 37–109. doi: 10.1002/9781119307181.ch3.
- [13] I. A. Altawil, K. A. Mahafzah, and A. A. Smadi, "Hybrid active power filter based on diode clamped inverter and hysteresis band current controller," in *2012 2nd International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA)*, IEEE, Dec. 2012, pp. 198–203. doi: 10.1109/ICTEA.2012.6462865.

