

DESAIN DAN SIMULASI FILTER UNTUK MENURUNKAN HARMONISA PADA TRANSFORMATOR 3 FASA BERBASIS MATLAB

MATLAB-BASED FILTER DESIGN AND SIMULATION TO REDUCE HARMONICS IN 3-PHASE TRANSFORMER

T. Shandy Putra Fahlevi¹, Parlin Siagian², Rahmaniar³, Haris Gunawan⁴

¹²³⁴Teknik Elektro Universitas Pembangunan Pancabudi

Jl. Gatot Subroto, Km. 4,5 Sei Sikambing Medan, 20122

e-mail: tengkushandyputra@gmail.com

ABSTRACT

Three-phase transformers are vital components in power distribution systems, but they have the potential to produce and spread harmonics due to non-linear loads. These harmonics can reduce efficiency, cause overheating, and interfere with other equipment. This study aims to design and simulate a filter for harmonic mitigation in three-phase transformers using MATLAB software. Current and voltage waveform data from the three phases were obtained through field measurements. Simulations were conducted to compare system conditions before and after filter installation. The results show that the use of filters can reduce the total harmonics (THD) in the third order from 13.17% to 7.02%. This study contributes to efforts to improve power quality and distribution system reliability.

Keywords: *Harmonics, Passive Filters, Three Phase Transformers, MATLAB, Power Quality.*

ABSTRAK

Transformator tiga fasa merupakan komponen vital dalam sistem distribusi tenaga listrik, namun berpotensi menghasilkan dan menyebarkan harmonisa akibat beban non-linier. Harmonisa ini dapat menurunkan efisiensi, menyebabkan panas berlebih, dan gangguan pada peralatan lain. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan filter untuk mitigasi harmonisa pada transformator tiga fasa menggunakan perangkat lunak MATLAB. Data bentuk gelombang arus dan tegangan dari ketiga fasa diperoleh melalui pengukuran lapangan. Simulasi dilakukan untuk membandingkan kondisi sistem sebelum dan sesudah pemasangan filter. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan filter mampu menurunkan total harmonisa (THD) pada orde ketiga dari 13,17% menjadi 7,02%. Penelitian ini memberikan kontribusi pada upaya peningkatan kualitas daya dan keandalan sistem distribusi.

Kata Kunci: *Harmonisa, Filter Pasif, Transformator Tiga Fasa, MATLAB, Kualitas Daya.*

PENDAHULUAN

Penggunaan peralatan elektronik dan sistem kelistrikan yang berbasis teknologi semakin meningkat, terutama di industri dan sektor komersial. Peningkatan penggunaan perangkat berbasis daya elektronik, seperti inverter, motor listrik, dan perangkat lainnya, seringkali menyebabkan terjadinya harmonisa dalam sistem kelistrikan. Harmonisa adalah komponen frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasar sistem kelistrikan dan dapat menyebabkan berbagai masalah, seperti penurunan kualitas daya, peningkatan kerugian energi, serta kerusakan pada peralatan listrik (Dugan dkk., 2002). Menurut data dari International Electrotechnical

Commission (IEC), harmonisa dapat menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan, dengan estimasi mencapai miliaran dolar setiap tahunnya akibat kerusakan peralatan dan efisiensi energi yang berkurang (IEC 61000-3-2:2018).

Permasalahan yang muncul akibat harmonisa tidak hanya berdampak pada kualitas daya, tetapi juga dapat mempengaruhi kinerja transformator, terutama transformator tiga fasa yang banyak digunakan dalam distribusi energi listrik. Transformator yang terkena dampak harmonisa dapat mengalami overheating, penurunan efisiensi, dan bahkan kegagalan operasional (Kalair dkk., 2017). Oleh karena itu, mitigasi harmonisa menjadi sangat penting untuk

menjaga keandalan dan efisiensi sistem kelistrikan. Berbagai alternatif solusi telah dilakukan untuk mengatasi masalah ini, mulai dari penggunaan kapasitor, filter pasif, hingga filter aktif.

Beberapa solusi yang telah diterapkan termasuk pemasangan filter harmonisa pasif dan aktif. Filter pasif seperti filter single-tuned dan double-tuned telah terbukti efektif dalam mengurangi harmonisa pada sistem kelistrikan (Faraby dkk., 2021). Namun, penggunaan filter aktif juga mulai populer karena kemampuannya untuk menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi sistem kelistrikan (Memon dkk., 2016). Dalam penelitian ini, penulis memilih untuk fokus pada desain dan simulasi filter pasif menggunakan MATLAB, dengan tujuan untuk memberikan solusi yang lebih efisien dan mudah diterapkan dalam mitigasi harmonisa pada transformator tiga fasa.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada pendekatan desain filter yang menggunakan simulasi berbasis MATLAB, yang memungkinkan analisis yang lebih mendalam dan akurat terhadap kinerja filter dalam kondisi nyata. Dengan menggunakan perangkat lunak ini, penulis dapat mengeksplorasi berbagai parameter desain filter dan mengevaluasi dampaknya terhadap pengurangan harmonisa secara lebih efektif. Selain itu, penelitian ini juga akan membahas pengaruh variasi beban non-linier terhadap kinerja filter, yang sering kali diabaikan dalam studi sebelumnya (Amalia & Nazir, 2015).

STUDI PUSTAKA

A. Pengertian dan Sumber Harmonisa

Harmonisa dalam sistem kelistrikan adalah gelombang listrik yang memiliki frekuensi yang merupakan kelipatan bulat dari frekuensi dasar (fundamental frequency). Dalam sistem tenaga listrik, frekuensi dasar biasanya adalah 50 Hz atau 60 Hz, tergantung pada wilayah geografis. Sebagai contoh, jika frekuensi dasar adalah 50 Hz, maka harmonisa kedua

adalah 100 Hz, harmonisa ketiga adalah 150 Hz, dan seterusnya. Menurut Dugan dkk. (2002), harmonisa dapat menyebabkan berbagai masalah dalam sistem kelistrikan, termasuk peningkatan suhu pada peralatan, kerusakan peralatan, dan penurunan efisiensi sistem. Persamaan umum untuk tegangan atau arus yang mengandung harmonisa dinyatakan sebagai:

$$x(t) = X_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} x_n \sin(n\omega t + \theta_n) \dots (1)$$

Dimana

X_1 = amplitudo komponen fundamental

X_n = amplitudo harmonisa ke-n

ω = frekuensi sudut fundamental

n = orde harmonisa

θ_n = sudut fase harmonisa ke-n

Total Harmonic Distortion (THD) adalah parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat distorsi harmonisa, dirumuskan sebagai:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X_n^2}}{X_1} \times 100\% \dots (2)$$

Sumber harmonisa dapat dibedakan menjadi dua kategori utama: sumber aktif dan pasif. Sumber aktif biasanya berasal dari perangkat elektronik seperti inverter, komputer, dan peralatan listrik lainnya yang menggunakan teknologi switching. Sementara itu, sumber pasif bisa berasal dari beban non-linier seperti motor induksi dan transformator. Menurut Hu dkk. (2023), dengan meningkatnya penggunaan perangkat elektronik di industri dan rumah tangga, tingkat harmonisa dalam sistem kelistrikan juga meningkat, yang dapat mengganggu kualitas daya.

B. Dampak Harmonisa pada Sistem Kelistrikan

Dampak harmonisa pada sistem kelistrikan sangat beragam dan dapat mempengaruhi efisiensi serta keandalan sistem. Salah satu dampak utama adalah peningkatan suhu pada perangkat listrik,

yang dapat mengakibatkan kerusakan prematur. Dugan dkk. (2002) mencatat bahwa harmonisa dapat menyebabkan overheating pada transformator dan motor, yang pada gilirannya dapat mengurangi umur pakai peralatan tersebut.

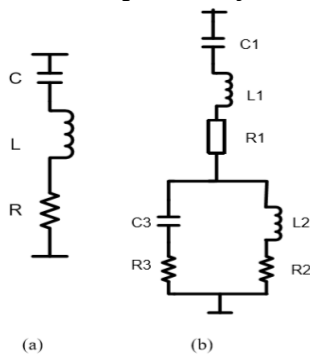
Selain itu, harmonisa juga dapat menyebabkan distorsi tegangan yang dapat mempengaruhi kinerja peralatan sensitif. Peralatan seperti komputer dan perangkat elektronik lainnya sangat rentan terhadap perubahan tegangan yang cepat. Menurut penelitian oleh Mohamed dkk. (2014), distorsi harmonisa dapat menyebabkan kesalahan dalam pengukuran dan operasi perangkat ini, sehingga mengganggu proses produksi di industri.

C. Metode Mitigasi Harmonisa

Terdapat berbagai metode yang dapat digunakan untuk mitigasi harmonisa dalam sistem kelistrikan. Salah satu metode yang paling umum adalah penggunaan filter. Filter digunakan untuk mereduksi harmonisa dengan membatasi frekuensi-frekuensi tertentu dari sistem listrik. Dua jenis filter yang umum digunakan adalah:

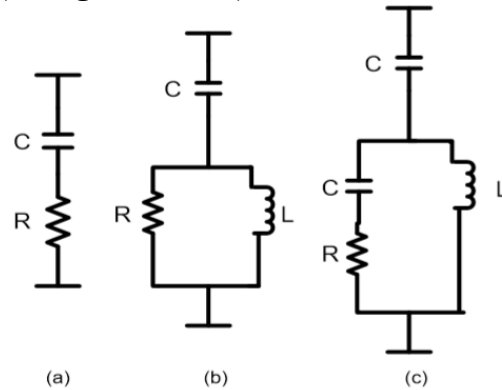
1. Filter Pasif

Filter pasif dirancang untuk menyerap harmonisa pada frekuensi tertentu. Filter ini dapat berupa single-tuned atau double-tuned filter, yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri. Gambar 1. dan Gambar 2. memperlihatkan beberapa jenis filter pasif yang umum digunakan beserta konfigurasi dan impedansinya.



Gambar 1. Filter Passive Tuned

a). Single Tuned b). Double Tuned



Gambar 2. Filter Passive High-Pass

a). First Order, b). Second Order, c). Third Order

Menurut Wakileh (2001), desain filter pasif yang baik dapat secara signifikan mengurangi distorsi harmonisa.

2. Filter Aktif

Metode lain yang sering digunakan adalah filter aktif, yang dapat menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi sistem dan secara dinamis mengurangi harmonisa. Filter aktif bekerja dengan cara menghasilkan arus yang berlawanan dengan arus harmonisa yang ada, sehingga dapat membatalkan efeknya. Penelitian oleh Thuyen dkk. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan filter aktif dapat mengurangi harmonisa hingga 90% dalam beberapa aplikasi industri.

Selain itu, penggunaan kapasitor juga merupakan metode yang efektif untuk mitigasi harmonisa. Kapasitor dapat membantu meningkatkan faktor daya dan mengurangi arus harmonisa dengan cara mengubah karakteristik beban. Faraby dkk. (2021) menemukan bahwa perencanaan kapasitor yang tepat dapat mengurangi harmonisa secara signifikan dalam jaringan distribusi radial.

Dalam praktiknya, kombinasi dari berbagai metode mitigasi sering kali diperlukan untuk mencapai hasil yang optimal. Sebagai contoh, di beberapa pabrik, penggunaan filter pasif dikombinasikan dengan filter aktif dan kapasitor telah terbukti efektif dalam

mengurangi harmonisa dan meningkatkan kualitas daya (Memon dkk., 2016).

D. Desain Filter untuk Mitigasi Harmonisa

Desain filter untuk mitigasi harmonisa memerlukan pemahaman yang mendalam tentang karakteristik harmonisa dan parameter sistem. Langkah pertama dalam desain filter adalah analisis harmonisa untuk mengidentifikasi frekuensi dominan yang perlu dikurangi. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak simulasi seperti MATLAB, yang memungkinkan pengguna untuk memodelkan dan menganalisis sistem kelistrikan secara detail (Xie dkk., 2015).

Setelah analisis harmonisa dilakukan, langkah berikutnya adalah menentukan jenis filter yang paling sesuai. Sebagai contoh, filter single-tuned sering digunakan untuk mengatasi harmonisa tertentu, sementara filter double-tuned dapat digunakan untuk menangani beberapa harmonisa sekaligus. Penelitian oleh Lin dkk. (2024) menunjukkan bahwa desain optimal dari filter single-tuned dapat mengurangi distorsi harmonisa dengan lebih efisien dibandingkan dengan metode lainnya.

Desain filter pasif melibatkan pemilihan komponen yang tepat, seperti kapasitor dan induktor, serta penentuan frekuensi resonansi yang sesuai. Persamaan dasar untuk menentukan frekuensi resonansi pada filter pasif adalah:

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots (3)$$

Dimana:

f_r = frekuensi resonansi

L = induktansi

C = kapasitansi

Desain yang tepat akan memastikan bahwa filter dapat efektif dalam mengurangi harmonisa pada frekuensi tertentu.

Prinsip kerja dari filter pasif yaitu dengan mengalirkan arus harmonisa orde

tertentu dari sumber harmonisa (beban non linier) melalui jaringan filter memaksa arus orde tertentu mengalir ke jaringan filter. Saat terjadi resonansi, harga impedansi saluran akan minimum karena hanya tinggal komponen resistansi. Sebelum merancang suatu filter pasif, maka perlu diketahui besarnya kebutuhan daya reaktif pada sistem. Daya reaktif sistem ini diperlukan untuk menghitung besarnya nilai kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki sistem tersebut.

Parameter penting lain dalam desain filter adalah nilai induktansi yang harus dihitung dengan cermat untuk memastikan bahwa filter berfungsi pada frekuensi yang diinginkan. Selain itu, faktor kualitas (Q) dari filter juga harus diperhatikan, karena dapat mempengaruhi kinerja filter dalam menanggulangi harmonisa. Ketajaman filter bergantung pada faktor kualitas (Q) filter yang ditunjukkan pada Persamaan 4.

$$Q = \frac{X}{R} \dots (4)$$

Dengan harga faktor kualitas (Q) dapat ditentukan sesuai dengan nilai yang sering diterapkan pada frekuensi 50 Hz yaitu $30 < Q < 100$. Simulasi menggunakan MATLAB juga memungkinkan perancang untuk menguji berbagai skenario dan parameter sebelum implementasi fisik dilakukan. Ini sangat penting untuk menghindari kesalahan yang dapat terjadi selama instalasi. Dengan menggunakan simulasi, perancang dapat mengoptimalkan desain filter dan memprediksi kinerjanya dalam kondisi nyata (Jayaraman dkk., 2013).

E. Implementasi dan Evaluasi Kinerja Filter

Implementasi filter untuk mitigasi harmonisa memerlukan perencanaan yang matang dan pengujian yang menyeluruh. Setelah desain filter selesai, langkah selanjutnya adalah instalasi fisik filter di lokasi yang telah ditentukan. Hal ini sering kali melibatkan kerja sama antara berbagai tim, termasuk tenaga teknik dan manajemen proyek, untuk memastikan

bahwa instalasi dilakukan dengan benar dan sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

Setelah filter terpasang, tahap evaluasi kinerja sangat penting untuk memastikan bahwa filter berfungsi dengan baik dalam mengurangi harmonisa. Pengukuran harmonisa dilakukan untuk membandingkan kondisi sebelum dan sesudah pemasangan filter.

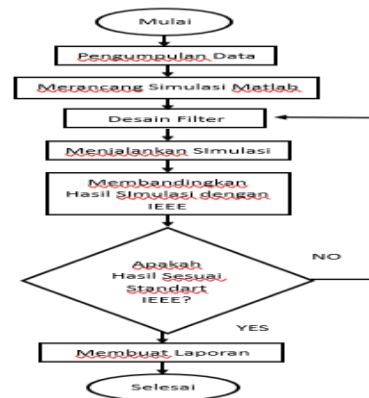
Statistik menunjukkan bahwa dalam banyak kasus, penerapan filter pasif dapat mengurangi total harmonisa distorsi (THD) hingga 50% atau lebih (Affandi, 2014). Namun, penting untuk dicatat bahwa hasil dapat bervariasi tergantung pada kondisi spesifik sistem dan jenis filter yang digunakan. Oleh karena itu, evaluasi yang cermat dan analisis data pasca-instalasi sangat penting untuk memastikan bahwa filter berfungsi sebagaimana mestinya.

Selain pengukuran harmonisa, evaluasi kinerja juga dapat mencakup analisis biaya dan manfaat dari pemasangan filter. Hal ini akan memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai nilai investasi dalam mitigasi harmonisa. Sumarno dkk. (2017) menunjukkan bahwa meskipun ada biaya awal untuk pemasangan filter, penghematan yang diperoleh dari peningkatan efisiensi dan pengurangan kerusakan peralatan dapat jauh melebihi biaya tersebut.

Dengan demikian, implementasi dan evaluasi kinerja filter merupakan langkah krusial dalam proses mitigasi harmonisa, yang tidak hanya meningkatkan kualitas daya tetapi juga dapat memberikan manfaat ekonomi yang signifikan bagi perusahaan.

METODE PENELITIAN

A. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

B. Jenis dan Ruang Lingkup Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian terapan dengan pendekatan kuantitatif eksperimental. Fokus utama adalah mitigasi harmonisa pada transformator tiga fasa yang disebabkan oleh beban non-linier, dengan penerapan filter pasif yang didesain dan disimulasikan di MATLAB/Simulink. Ruang lingkup penelitian meliputi, analisis bentuk gelombang arus dan tegangan tiga fasa hasil pengukuran aktual, identifikasi kandungan harmonisa (THD), desain filter pasif (single-tuned) dan simulasi performa filter dalam mengurangi harmonisa.

C. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini mencakup beberapa metode, antara lain pengukuran langsung, akuisisi data gelombang listrik, dan analisis dokumen teknis. Setiap metode bertujuan untuk memastikan bahwa desain filter harmonisa yang dilakukan berbasis pada kondisi riil sistem tenaga. Pengukuran dilakukan pada sistem tenaga listrik khususnya pada sisi beban sekunder transformator tiga fasa. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk memperoleh bentuk gelombang tegangan dan arus pada masing-masing fasa (R, S, dan T) yang mengalami distorsi akibat beban non-linear.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Penelitian

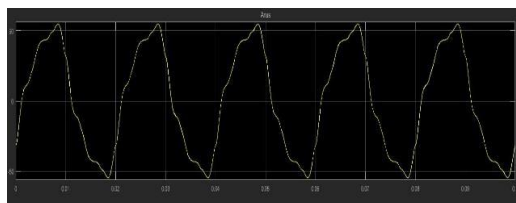
Data penelitian diperoleh melalui proses pengukuran langsung terhadap sistem tenaga listrik pada transformator tiga fasa yang menjadi objek penelitian. Pengukuran dilakukan untuk mendapatkan nilai *Total Harmonics Distortion* (THD), bentuk gelombang arus dan tegangan masing-masing fasa (R, S, dan T) menggunakan alat ukur *Power Quality Analyzer* yang menghasilkan tampilan scope untuk memudahkan analisis harmonisa. Data hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 1 dibawah ini:

Tabel 1. Hasil Pengukuran

No.	Elemen	Besaran
1	Tegangan	223 V
2	Arus	40,46 A
3	Daya Aktif	23.610 Watt
4	Daya Semu	27.240 VA
5	Daya Reaktif	13.110 VAR
6	Faktor Daya	0,87
7	Frekuensi	50 Hz

Tabel 2. Harmonisa Sebelum di Filter

Frekuensi Harmonisa	Orde Harmonisa	IHD (%)	Standar IEEE (%)
150 Hz	3	13,17	12,00
250 Hz	5	8,24	12,00
350 Hz	7	2,35	12,00
450 Hz	9	1,80	12,00
550 Hz	11	2,05	5,50
650 Hz	13	1,15	5,50
750 Hz	15	0,27	5,50
850 Hz	17	0,55	5,00
950 Hz	19	0,46	5,00



Gambar 4. Bentuk gelombang distorsi arus sebelum dipasang *single tuned passive filter*

B. Analisis Data

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan, diketahui bahwa sistem tenaga memiliki tegangan sebesar 223 V dan arus sebesar 40,46 A, dengan daya aktif sebesar 23.610 W, daya semu 27.240 VA, serta daya reaktif sebesar 13.110 VAR. Nilai

faktor daya yang terukur adalah 0,87 dengan frekuensi sistem 50 Hz. Dari data tersebut dapat dihitung impedansi total sistem serta karakteristik beban yang beroperasi dengan dominasi komponen induktif, yang berpotensi menjadi sumber pembangkit harmonisa.

Analisis harmonisa dilakukan melalui transformasi frekuensi menggunakan Fast Fourier Transform (FFT) yang menunjukkan adanya komponen harmonik dominan, yaitu pada orde ke-3 (frekuensi 150 Hz) sebesar 13,17 dimana melebihi dari standar yang telah ditetapkan oleh IEEE 519 – 2014 yaitu sebesar 12%, yang paling dominan dan menjadi target utama dalam perancangan filter pasif single tuned berbasis rangkaian RLC seri.

Untuk mereduksi harmonik orde ke-3, dirancang sebuah single tuned passive filter yang disetel pada frekuensi resonansi 150 Hz sesuai dengan karakteristik harmonik yang terdeteksi. Frekuensi resonansi (f_r) dari filter dirancang menggunakan persamaan:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

dengan $f_r=150$ Hz. Berdasarkan besar daya dan tegangan sistem, terlebih dahulu dihitung daya reaktif target yang akan diserap oleh filter, kemudian nilai kapasitansi (C) ditentukan menggunakan rumus kapasitor daya:

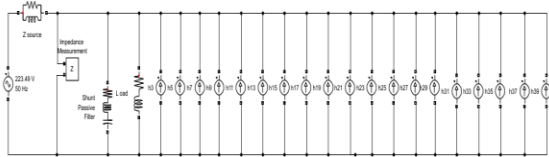
$$Q_c = V^2 \cdot 2\pi f C$$

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V^2}$$

Setelah nilai kapasitansi ditentukan, maka induktansi (L) filter dapat dihitung dari rumus resonansi di atas. Dari Hasil perhitungan di dapat nilai R= 0.07477Ohm, C= 0.000141 F , L= 0.00793H

Secara keseluruhan, perancangan filter pasif single tuned pada orde ke-3 mampu memberikan kontribusi signifikan dalam peningkatan kualitas daya. Setelah

dilakukan simulasi dengan memodelkan single tuned passive filter dengan bantuan aplikasi matlab/simulink. Rangkaian pemodelan single tuned passive filter dapat dilihat pada Gambar 5. berikut:

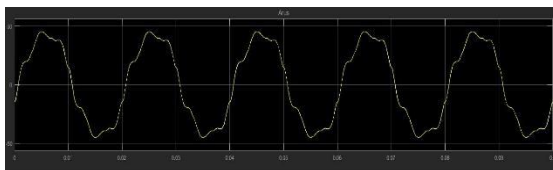


Gambar 5. Pemodelan Single Tuned Passive Filter

Setelah dilakukan pemodelan dan memasukkan nilai hasil pengukuran, maka didapatkan nilai arus harmonisa pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Harmonisa Setelah di Filter

Frekuensi Harmonisa	Orde Harmonisa	IHD (%)	Standar IEEE (%)
150 Hz	3	7,02	12,00
250 Hz	5	9,40	12,00
350 Hz	7	2,68	12,00
450 Hz	9	2,06	12,00
550 Hz	11	2,34	5,50
650 Hz	13	1,31	5,50
750 Hz	15	0,31	5,50
850 Hz	17	0,62	5,00
950 Hz	19	0,53	5,00



Gambar 6. Bentuk Gelombang Distorsi Arus Setelah Dipasang Single Tuned Passive Filter

Hasil simulasi dan perhitungan menunjukkan bahwa setelah pemasangan filter, komponen harmonisa orde ke-3 berhasil direduksi dari 13,17% menjadi 7,02%, yang berarti terdapat penurunan sebesar 6,15% atau sekitar 46,7% dari nilai awal. Penurunan ini menunjukkan bahwa filter bekerja efektif untuk menyerap harmonik orde ke-3. Sementara itu, harmonik orde ke-5 hingga orde ke-19 tidak mengalami penurunan kecil, karena filter tidak disetel untuk orde tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa filter single tuned bersifat selektif, dan sangat efektif ketika dirancang untuk orde harmonik tertentu.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem distribusi tiga fasa yang terhubung dengan transformator menghasilkan distorsi harmonisa yang signifikan, terutama akibat keberadaan beban non-linear. Hal ini terlihat dari bentuk gelombang arus yang terdistorsi dan nilai Total Harmonic Distortion (THDi) awal yang melebihi ambang batas standar IEEE 519-2014.

Setelah dilakukan perancangan dan simulasi Single Tuned Passive Filter menggunakan MATLAB/Simulink, terjadi penurunan nilai THDi secara signifikan. Nilai THDi pada orde ke-3 dengan distorsi tertinggi berhasil ditekan dari kondisi awal sebesar 13,17% menjadi 7,02%, yang menunjukkan keberhasilan filter dalam mereduksi komponen harmonisa. Penurunan ini menunjukkan efektivitas filter dalam memperbaiki kualitas daya dan meningkatkan kestabilan sistem tenaga.

Saran

Berdasarkan hasil analisis dan kesimpulan yang telah diperoleh dalam penelitian ini, disarankan untuk melakukan pemantauan berkala terhadap kualitas daya, terutama apabila terjadi perubahan konfigurasi beban atau kapasitas sistem, agar kinerja filter tetap optimal dalam jangka panjang. Untuk meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas sistem, dapat dipertimbangkan pengembangan filter adaptif atau kombinasi dengan active filter, terutama pada sistem yang menghadapi harmonisa lebih kompleks atau variatif. Sebagai pengembangan lebih lanjut, hasil desain dan parameter filter ini dapat dijadikan dasar untuk otomatisasi perancangan filter harmonisa pada perangkat lunak berbasis MATLAB atau sistem SCADA yang terintegrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Dugan, R. C., Santoso, S., McGranaghan, M. F., & Beaty, H. W. (2002). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw Hill Professional.
- Faraby, M., Muchtar, A., & Putri, A. (2021). *The Single Tuned Filter Planning to Mitigate Harmonic Pollution in Radial Distribution Network Using Particle Swarm Optimization*. 2020 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISRITI51436.2020.9315518>
- Hu, Z., Han, Y., Zalhaf, A. S., Zhou, S., Zhao, E., & Yang, P. (2023). *Harmonic Sources Modeling and Characterization in Modern Power Systems: A Comprehensive Overview*. *Electric Power Systems Research*, 218, 109234. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109234>
- Rozak, O. A. (2019). Simulasi perbaikan THD pada sistem distribusi listrik dengan filter harmonisa berbasis software ETAP 12.6.0. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3), 176–182.
- Kalair, A., Abas, N., Kalair, A. R., Saleem, Z., & Khan, N. (2017). Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1152–1187. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.121>
- Lin, S.-M., Chou, C.-J., Lu, C.-T., & Hsiao, Y.-T. (2024). Optimal design of single-tuned filters for industrial power systems to reduce harmonic distortion using forest algorithm. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 47(4), 414–422. <https://doi.org/10.1080/02533839.2024.2334205>
- Memon, Z., Uqaili, M., & Unar, M. (2016). Harmonics Mitigation of Industrial Power System Using Passive Filters. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 31. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.06684>
- Sumarno, S. S., Penangsang, O., & Aryani, N. K. (2017). Studi Analisis dan Mitigasi Harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.16118>
- Wakileh, G. J. (2001). *Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04343-1>
- Sinaga, J., Siburian, R. M., & Sirait, J. (2020). Analisa pengaruh harmonisa pada pengoperasian beban listrik. *Jurnal Teknologi Energi UDA*, 9(2), 88–97.
- Abidin, J. F. (2015). Analisis unjuk kerja harmonik di instalasi listrik industri dan upaya penanggulangannya. *Jurnal Teknologi Elektro*, 6(3), 176–182.
- Mubarak, A. H. (2015). Simulasi pemasangan filter harmonisa pada sistem tenaga listrik menggunakan software ETAP. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Energi dan Ketenagalistrikan (SNTEK)*, 2(1), 738–745.
- Samiaji, G., Multi, A., Rozak, O. A., & Faturrachman, L. (2020). Analisis perbandingan kualitas daya listrik berdasarkan harmonisa pada motor listrik dengan suplai tenaga surya dan PLN. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Terapan*, 6(3), 176–18.
- Febriyansah, V., & Supardi, A. (2023). Analisis dan perancangan filter harmonik pada sistem instalasi tenaga listrik di PT. Indo Acidatama menggunakan ETAP Power Station 19.1. *Jurnal Emitor*, 15(2), 110–118.
- Iqbal, M., Lomi, A., & Krismanto, A. U. (2021). Analisis pengaruh integrasi energi baru terbarukan terhadap

- resonansi harmonisa pada sistem tenaga listrik. *Jurnal Magnetika*, 6(1), 45–52.
- Istiono, Y., Sentosa, J., & Hosea, E. (2017). Analisa harmonisa akibat penggunaan lampu LED. *Jurnal Teknik Elektro*, 10(1), 30–33.
- Siagian, P., Alam, H., Putra, R. R., & Tanjung, M. S. (2024). Matlab-Based Modeling and Simulation of Temperature and Pressure Parameter Settings for Geothermal Power Plants. *Instal : Jurnal Komputer*, 16(03), 314–321. <https://doi.org/10.54209/jurnalinstall.v16i03.242>
- Pristisal Wibowo , Solly Aryza, (2018), “A Quality Distribution Networks with Unbalanced Load Management Distribution Transformator”, *INTERNATIONAL JOURNAL FOR INNOVATIVE RESEARCH IN MULTIDISCIPLINARY FIELD* ISSN: 2455-0620 Volume – 4.
- Maharani Putri, Pristisal Wibowo, Solly Aryza, Andysah Putera Utama Siahaan, Rusiadi,(2018), “An Implementation Of A Filter Design Passive Lc In Reduce A Current Harmonisa”, *International Journal Of Civil Engineering And Technology (Ijciet)*, Volume 9, Issue 7, July 2018, Pp. 867–873.
- Siti Anisah, (2017), “Analisis Pengukuran Harmonisa Pada Mesin Cuci Kondisi Berbeban Dan Tanpa Beban”, *Jurnal Teknik Elektro Dan Telekomunikasi*, Vol. 4 No. 1
- Jamil Alfasyah, Rahmaniar, R., & Siti Anisah. (2025). Evaluation of the Effect of Capacitor Banks on Energy Efficiency in The 20 kV Distribution System at PT. Unilever Oleochemical Indonesia (UOI). *INFOKUM*, 13(04), 1077-1084. Retrieved from <https://seaninstitute.org/infor/index.php/infokum/article/view/2896>.