

Desain Single Passive Tuned Filter untuk Meredam Harmonisa pada Transformator 1000 kVA

Prima Abdi Saputra¹, Zulfatri Aini^{1*}, Nanda Putri Miefthawati¹

¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, Pekanbaru, Indonesia

*Corresponding Author : zulfatri_aini@uin-suska.ac.id

Abstract

Peningkatan penggunaan beban nonlinier pada sistem distribusi tenaga listrik menyebabkan munculnya distorsi harmonisa yang dapat menurunkan kualitas daya listrik. Harmonisa dapat mengakibatkan peningkatan rugi-rugi transformator, penurunan kapasitas transformator, serta meningkatnya biaya operasional akibat losses daya. Penelitian ini bertujuan merancang single passive tuned filter untuk mereduksi harmonisa pada transformator 1000 kVA UIN Suska Riau. Pengukuran dilakukan menggunakan Power Quality Analyzer, dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai THDi pada beberapa fasa melebihi standar IEEE 519-2014 dengan dominasi harmonisa orde ke-3. Oleh karena itu dilakukan perancangan single passive tuned filter dengan menentukan parameter resistor, induktor, dan kapasitor sesuai orde harmonisa dominan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan filter mampu menurunkan nilai harmonisa hingga berada di bawah batas standar IEEE 519-2014, mengurangi derating transformator, menurunkan rugi-rugi transformator, serta mengurangi kerugian biaya akibat losses daya. Hasil simulasi ETAP menunjukkan kesesuaian dengan hasil perhitungan analitis, sehingga filter yang dirancang dinilai efektif dalam meningkatkan kualitas daya pada sistem distribusi listrik.

Keywords: Harmonisa; Single Passive Tuned Filter; Derating Transformator; Losses Transformator; Kualitas Daya.

1. Introduction

Perkembangan teknologi pada sistem tenaga listrik menyebabkan meningkatnya penggunaan peralatan elektronik berbeban non-linear di berbagai sektor, termasuk sektor pendidikan. Peralatan seperti komputer, printer, pendingin ruangan, inverter, Uninterruptible Power Supply (UPS), serta lampu LED merupakan jenis beban non-linear yang banyak digunakan pada gedung perkuliahan dan laboratorium. Penggunaan beban non-linear tersebut memberikan dampak terhadap kualitas daya listrik karena menghasilkan distorsi harmonisa pada sistem distribusi tenaga listrik [1], [2].

Harmonisa merupakan gangguan pada sistem tenaga listrik yang menyebabkan bentuk gelombang arus dan tegangan tidak lagi sinusoidal murni. Distorsi harmonisa muncul akibat adanya komponen frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental. Keberadaan harmonisa pada sistem distribusi dapat menyebabkan berbagai permasalahan teknis seperti meningkatnya rugi-rugi daya, pemanasan berlebih pada transformator, penurunan efisiensi sistem, gangguan pada peralatan proteksi, penurunan faktor daya, serta memperpendek umur peralatan listrik [3], [4].

Menurut IEEE Standard 519-2014, nilai harmonisa arus dan tegangan pada sistem tenaga listrik harus dijaga agar tetap berada pada batas standar yang diizinkan untuk menjaga kualitas daya listrik dan keandalan sistem [1]. Apabila nilai harmonisa melebihi

batas standar, maka dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan listrik dan meningkatkan biaya operasional sistem tenaga listrik.

Salah satu peralatan yang paling rentan terhadap pengaruh harmonisa adalah transformator distribusi. Harmonisa arus menyebabkan peningkatan arus RMS sehingga rugi-rugi tembaga pada transformator meningkat secara signifikan. Selain itu, harmonisa juga menyebabkan munculnya stray losses dan overheating pada inti maupun lilitan transformator [5]. Kondisi tersebut menyebabkan kapasitas efektif transformator menurun atau dikenal dengan istilah derating transformator [6].

Transformator distribusi 1000 kVA di UIN Suska Riau digunakan untuk menyuplai daya listrik pada beberapa gedung kampus dengan dominasi beban elektronik dan beban non-linear. Berdasarkan hasil pengukuran langsung menggunakan Power Quality Analyzer, diketahui bahwa kandungan harmonisa arus pada transformator telah melebihi batas standar IEEE 519-2014, terutama pada harmonisa orde ke-3. Harmonisa orde ke-3 termasuk kategori triplen harmonic yang dapat terakumulasi pada penghantar netral sehingga menyebabkan peningkatan suhu penghantar netral dan transformator [2], [7].

Permasalahan harmonisa pada transformator distribusi telah menjadi perhatian dalam berbagai penelitian sebelumnya. Penelitian oleh Sasdelli dkk. [12] menunjukkan bahwa harmonisa memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan rugi-rugi dan derating transformator distribusi. Penelitian lain oleh Setiawan dkk. [14] menunjukkan bahwa penggunaan single tuned passive filter mampu mereduksi harmonisa arus secara efektif pada sistem distribusi tenaga listrik.

Berbagai metode mitigasi harmonisa telah dikembangkan, seperti active filter, hybrid filter, dan passive filter. Namun demikian, penggunaan passive filter masih menjadi solusi yang paling banyak diterapkan karena memiliki struktur sederhana, biaya implementasi yang relatif murah, serta mudah diaplikasikan pada sistem distribusi tenaga listrik [5], [8]. Salah satu jenis passive filter yang paling umum digunakan adalah single passive tuned filter.

Single passive tuned filter bekerja dengan menyediakan jalur impedansi rendah pada frekuensi harmonisa tertentu sehingga arus harmonisa akan mengalir menuju filter dan tidak masuk ke sistem utama [9]. Filter jenis ini sangat efektif digunakan apabila terdapat harmonisa dominan pada orde tertentu. Oleh karena itu, single passive tuned filter dipilih dalam penelitian ini untuk mereduksi harmonisa orde ke-3 yang dominan pada transformator distribusi UIN Suska Riau.

Selain menganalisis penurunan harmonisa, penelitian ini juga melakukan evaluasi terhadap pengaruh harmonisa terhadap derating transformator, rugi-rugi transformator, serta kerugian biaya energi listrik akibat losses daya. Analisis dilakukan menggunakan metode perhitungan analitis dan simulasi ETAP untuk memvalidasi hasil penelitian. Kontribusi utama penelitian ini adalah melakukan analisis harmonisa secara komprehensif dengan menggabungkan pengukuran langsung, simulasi ETAP, analisis derating transformator, analisis losses transformator, evaluasi ekonomis akibat harmonisa, serta perancangan single passive tuned filter pada transformator distribusi 1000 kVA. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam upaya peningkatan kualitas daya listrik dan pengurangan dampak harmonisa pada sistem distribusi tenaga listrik di lingkungan pendidikan maupun industri.

2. Material and methods

2.1 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah transformator distribusi 1000 kVA yang berada di lingkungan UIN Suska Riau.

Tabel 1. Spesifikasi Transformator

Parameter	Nilai
Kapasitas Transformator	1000 kVA
Pendingin	ONAN
Tegangan Primer	20 kV
Tegangan Sekunder	400/220 V
Frekuensi	50 Hz
Impedansi	5%
Jumlah Fasa	3 Fasa

2.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan pengukuran langsung menggunakan alat Power Quality Analyzer yang terhubung pada panel LVMDP transformator. Data yang diukur meliputi arus, tegangan, daya, faktor daya, frekuensi, Individual Harmonic Distortion (IHD), dan Total Harmonic Distortion (THD).

2.3 Analisis Harmonisa

Analisis harmonisa dilakukan dengan mengacu pada standar IEEE 519-2014. Parameter yang dianalisis adalah Individual Harmonic Distortion (IHD) dan Total Harmonic Distortion (THD).

Persamaan THDi adalah:

$$THDi = \sqrt{(\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2) / I_1^2} \quad (1)$$

2.4 Perancangan Single Passive Tuned Filter

Perancangan filter dilakukan untuk mereduksi harmonisa orde ke-3 yang merupakan harmonisa dominan pada sistem. Filter terdiri dari komponen resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C). Parameter filter ditentukan berdasarkan kebutuhan kompensasi daya reaktif dan frekuensi tuning harmonisa.

2.5 Simulasi ETAP

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP untuk memvalidasi hasil perhitungan analitis. Tahapan simulasi meliputi pemodelan sistem, input data harmonisa, pemasangan filter, dan analisis harmonisa sebelum serta sesudah pemasangan filter.

3. Results and discussion

3.1 Hasil Pengukuran Harmonisa Sebelum Pemasangan Filter

Pengukuran harmonisa dilakukan pada panel LVMDP transformator 1000 kVA UIN Suska Riau. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kandungan harmonisa arus pada seluruh fasa telah melebihi batas standar IEEE 519-2014.

Tabel 2. Hasil THDi Sebelum Pemasangan Filter

Fasa	THDi (%)	Standar IEEE 519-2014
R	5,77	5%
S	6,09	5%
T	8,68	5%

Berdasarkan hasil pengukuran, fasa T memiliki nilai THDi tertinggi, yaitu sebesar

8,68%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem mengalami distorsi harmonisa yang cukup tinggi akibat penggunaan beban nonlinier. Harmonisa yang dominan pada sistem adalah harmonisa orde ke-3. Harmonisa orde ke-3 termasuk kategori harmonika triplen yang dapat terakumulasi pada penghantar netral sehingga menyebabkan peningkatan suhu penghantar dan transformator.

3.2 Analysis of Individual Harmonic Distortion

Analisis IHD dilakukan untuk mengetahui orde harmonisa dominan pada sistem.

Tabel 3. Harmonisa Dominan

Orde Harmonisa	Kondisi
Orde ke-3	Dominan
Orde ke-5	Rendah
Orde ke-7	Rendah

Dominasi harmonisa orde ke-3 menunjukkan bahwa beban nonlinier satu fasa memberikan kontribusi terbesar terhadap distorsi harmonisa pada sistem.

3.3 Perancangan Single Passive Tuned Filter

Perancangan filter dilakukan untuk mereduksi harmonisa orde ke-3 yang merupakan harmonisa dominan pada sistem. Single passive tuned filter terdiri dari komponen resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C) yang dirancang sesuai frekuensi tuning harmonisa. Filter bekerja dengan menyediakan jalur impedansi rendah pada frekuensi harmonisa tertentu sehingga arus harmonisa akan mengalir menuju filter dan tidak masuk ke sistem utama. Tahapan pertama dalam perancangan filter adalah menentukan kebutuhan daya reaktif kapasitor.

Persamaan kompensasi daya reaktif:

$$Q_c = P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (2)$$

dengan:

- Q_c = daya reaktif kapasitor (kVAR)
- P = daya aktif beban (kW)
- θ_1 = sudut faktor daya awal
- θ_2 = sudut faktor daya yang diinginkan

Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh:

- Daya aktif beban = 680 kW
- Faktor daya awal = 0,82
- Faktor daya target = 0,95

Sehingga:

$$\theta_1 = \cos^{-1} (0,82) = 34,92^\circ \quad \theta_2 = \cos^{-1} (0,95) = 18,19^\circ$$

$$Q_c = 680 (\tan 34,92^\circ - \tan 18,19^\circ)$$

$$Q_c = 680 (0,697 - 0,328)$$

$$Q_c = 250,92 \text{ kVAR}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh kebutuhan daya reaktif kapasitor sebesar 250,92 kVAR. Selanjutnya dilakukan perhitungan reaktansi kapasitor.

$$X_c = V^2 / Q_c \quad (3)$$

Dengan tegangan sistem sebesar 400 V diperoleh: $X_c = \frac{(400^2)}{250920} = 0,637 \, \Omega$

Karena filter dirancang untuk harmonisa orde ke-3 maka nilai reaktansi induktor dihitung menggunakan:

$$X_L = X_c / h^2 \quad (4)$$

$$X_L 0,637 / 3^2 = 0,0708 \, \Omega$$

Nilai induktansi filter dihitung menggunakan:

$$L = X_L / 2\pi f \quad (5)$$

$$L = 0,0708 / 2 \times 3,14 \times 50 = 0,225$$

Selanjutnya nilai kapasitansi dihitung menggunakan:

$$C = 1 / 2\pi f X_c \quad (6)$$

$$C = 1 / 2 \times 3,14 \times 0,637 = 4997 \, \mu F$$

Nilai resistansi filter ditentukan berdasarkan quality factor filter untuk menjaga kestabilan filter dan menghindari resonansi pada sistem.

Tabel 4. Parameter Filter

Parameter	Nilai
Orde Tuning	3
Daya Reaktif Kapasitor	250,92 kVAR
Reaktansi Kapasitor (Xc)	0,637 Ω
Reaktansi Induktor (XL)	0,0708 Ω
Induktansi (L)	0,225 mH
Kapasitansi (C)	4997 μF
Frekuensi	50 Hz

Filter dirancang pada frekuensi sedikit di bawah harmonisa orde ke-3 untuk menghindari resonansi sistem.

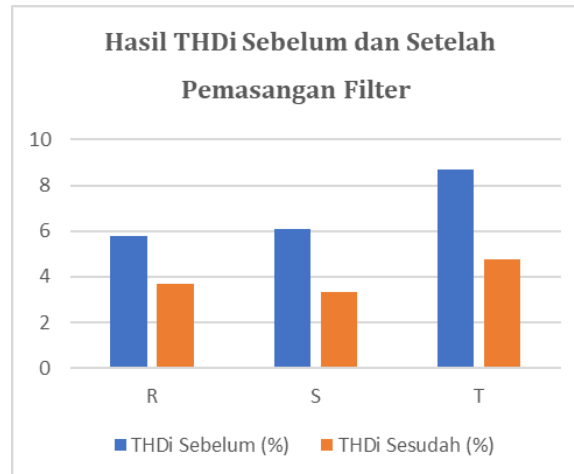
3.4 Hasil Harmonisa Setelah Pemasangan Filter

Setelah pemasangan single passive tuned filter, nilai harmonisa mengalami penurunan yang signifikan.

Tabel 5. Hasil THDi Setelah Pemasangan Filter

Fasa	THDi Sebelum (%)	THDi Sesudah (%)
R	5,77	3,71
S	6,09	3,34
T	8,68	4,78

Hasil tersebut menunjukkan bahwa filter berhasil menurunkan harmonisa hingga berada di bawah standar IEEE 519-2014.



Gambar 1. Hasil THDi Sebelum dan setelah pemasangan Filter

Gambar 1. menunjukkan perbandingan nilai THDi pada setiap fasa sebelum dan sesudah pemasangan single passive tuned filter. Terlihat bahwa seluruh fasa mengalami penurunan nilai THDi yang signifikan setelah filter dipasang. Pada fasa R, nilai THDi menurun dari 5,77% menjadi 3,71%, sedangkan pada fasa S menurun dari 6,09% menjadi 3,34%. Penurunan terbesar terjadi pada fasa T, yaitu dari 8,68% menjadi 4,78%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa single passive tuned filter mampu mereduksi kandungan harmonisa arus secara efektif pada transformator distribusi 1000 kVA. Penurunan THDi rata-rata mencapai 41,93%, sehingga seluruh nilai THDi setelah pemasangan filter telah memenuhi batas maksimum yang ditetapkan dalam standar IEEE 519-2014 sebesar 5%. Efektivitas filter ini disebabkan oleh proses tuning pada harmonisa orde ke-3 yang merupakan harmonisa dominan pada sistem. Filter menyediakan jalur impedansi rendah pada frekuensi harmonisa tersebut sehingga sebagian besar arus harmonisa dialihkan ke filter dan tidak mengalir ke sistem distribusi utama.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian bahwa penggunaan single tuned passive filter mampu menurunkan kandungan harmonisa arus secara signifikan pada sistem distribusi tenaga listrik [14]. Namun demikian, pada penelitian ini diperoleh penurunan THDi sebesar 35,70–45,16%, yang menunjukkan bahwa desain filter yang diterapkan memiliki kinerja yang baik dalam mengatasi dominasi harmonisa orde ke-3 pada transformator distribusi.

Tabel 7. Efektifitas Filter

Fasa	THDi Sebelum (%)	THDi Sesudah (%)	Penurunan (%)
R	5,77	3,71	35,70
S	6,09	3,34	45,16
T	8,68	4,78	44,93

Berdasarkan Tabel 7, *Single passive tuned filter* mampu menurunkan THDi rata-rata sebesar 41,93%. Penurunan tertinggi terjadi pada fasa S sebesar 45,16%, sedangkan penurunan terendah terjadi pada fasa R sebesar 35,70%. Hasil ini menunjukkan bahwa filter yang dirancang efektif dalam mengurangi kandungan harmonisa arus yang dihasilkan oleh beban nonlinier

3.5 Analisis Simulasi ETAP

Simulasi ETAP dilakukan untuk memvalidasi hasil perhitungan analitis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai harmonisa setelah pemasangan filter mengalami penurunan yang signifikan dan memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil perhitungan manual. Simulasi juga menunjukkan bahwa spektrum harmonisa orde ke-3 berkurang secara signifikan setelah pemasangan filter.

3.6 Analisis Derating Transformator

Harmonisa menyebabkan peningkatan suhu transformator sehingga kapasitas pembebanan transformator harus diturunkan untuk menjaga keandalan sistem. Sebelum pemasangan filter, kandungan harmonisa menyebabkan nilai derating transformator meningkat. Setelah pemasangan filter, nilai harmonisa berkurang sehingga kapasitas kerja transformator menjadi lebih baik. Penurunan harmonisa juga mengurangi tekanan termal pada lilitan transformator.

3.7 Analisis Losses Transformator

Harmonisa meningkatkan rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi stray pada transformator akibat meningkatnya arus RMS.

Tabel 8. Losses Transformator

Kondisi	Losses
Sebelum Filter	Lebih Tinggi
Setelah Filter	Lebih Rendah

Berdasarkan pada Tabel 8, dapat dilihat penurunan harmonisa setelah pemasangan filter menyebabkan rugi-rugi transformator menurun sehingga efisiensi sistem meningkat. Penurunan losses transformator juga berdampak pada penurunan kerugian biaya energi listrik. Dengan berkurangnya rugi-rugi daya setelah pemasangan filter, biaya operasional akibat losses transformator menjadi lebih rendah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan beban nonlinier pada sistem distribusi tenaga listrik di UIN Suska Riau memberikan pengaruh signifikan terhadap kualitas daya listrik, khususnya pada transformator distribusi 1000 kVA. Nilai THDi yang melebihi standar IEEE 519-2014 menunjukkan bahwa sistem mengalami distorsi harmonisa yang cukup tinggi sehingga dapat memengaruhi performa dan keandalan transformator.

Dominasi harmonisa orde ke-3 pada sistem menunjukkan bahwa beban elektronik satu fasa merupakan sumber utama harmonisa. Harmonisa orde ke-3 termasuk kategori triplen harmonik yang memiliki karakteristik terakumulasi pada penghantar netral. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan arus netral dan peningkatan temperatur penghantar maupun transformator [2]. Apabila kondisi ini berlangsung secara terus-menerus, maka umur transformator dapat menurun akibat overheating.

Nilai THDi tertinggi terjadi pada fasa T sebesar 8,68%. Nilai tersebut telah melebihi batas maksimum standar IEEE 519-2014, yaitu sebesar 5%. Tingginya kandungan harmonisa arus menyebabkan peningkatan arus RMS sehingga rugi-rugi tembaga pada transformator meningkat. Selain itu, harmonisa juga memengaruhi peningkatan stray losses pada lilitan transformator. Perancangan single passive tuned filter pada penelitian ini dilakukan dengan tuning harmonisa orde ke-3 karena harmonisa tersebut merupakan harmonisa dominan pada sistem. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kebutuhan daya reaktif kapasitor sebesar 250,92 kVAR dengan nilai induktansi sebesar 0,225 mH dan kapasitansi sebesar 4997 μ F.

Filter yang dirancang bekerja dengan menyediakan jalur impedansi rendah pada frekuensi harmonisa orde ke-3 sehingga arus harmonisa akan mengalir menuju filter dan tidak masuk ke sistem distribusi utama. Dengan demikian, kandungan harmonisa arus pada sistem dapat direduksi secara signifikan. Setelah pemasangan filter, nilai THDi mengalami penurunan pada seluruh fasa. Pada fasa R nilai THDi turun dari 5,77% menjadi 3,71%, pada fasa S turun dari 6,09% menjadi 3,34%, sedangkan pada fasa T turun dari 8,68% menjadi 4,78%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa filter yang dirancang mampu menurunkan harmonisa hingga berada di bawah batas standar IEEE 519-2014.

Penurunan harmonisa memberikan dampak positif terhadap performa transformator. Berkurangnya kandungan harmonisa arus menyebabkan nilai arus RMS

menurun sehingga rugi-rugi tembaga dan stray losses transformator juga mengalami penurunan. Selain itu, temperatur kerja transformator menjadi lebih rendah sehingga kondisi operasi transformator menjadi lebih aman.

Harmonisa juga berpengaruh terhadap derating transformator. Sebelum pemasangan filter, kandungan harmonisa menyebabkan kemampuan pembebanan transformator menurun akibat peningkatan temperatur pada lilitan transformator. Setelah harmonisa direduksi menggunakan filter, kemampuan kerja transformator meningkat karena tekanan termal pada transformator berkurang.

Dari sisi ekonomis, penurunan losses transformator memberikan dampak terhadap pengurangan kerugian biaya energi listrik. Semakin kecil rugi-rugi daya yang terjadi, maka biaya energi listrik yang hilang akibat losses juga semakin kecil. Oleh karena itu, penggunaan single passive tuned filter tidak hanya meningkatkan kualitas daya tetapi juga memberikan keuntungan ekonomis pada sistem tenaga listrik.

Hasil simulasi menggunakan ETAP menunjukkan kesesuaian dengan hasil perhitungan analitis. Simulasi memperlihatkan bahwa spektrum harmonisa orde ke-3 mengalami penurunan yang signifikan setelah pemasangan filter. Hal tersebut menunjukkan bahwa metode perancangan filter yang digunakan pada penelitian ini valid dan dapat diterapkan pada sistem distribusi tenaga listrik.

Apabila dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini tidak hanya membahas reduksi harmonisa, tetapi juga menganalisis pengaruh harmonisa terhadap derating transformator, losses transformator, serta kerugian biaya energi listrik. Dengan demikian, penelitian ini memberikan analisis yang lebih komprehensif terhadap dampak harmonisa pada transformator distribusi. Secara keseluruhan, single passive tuned filter terbukti efektif dalam mereduksi harmonisa pada transformator distribusi 1000 kVA UIN Suska Riau. Penggunaan filter mampu meningkatkan kualitas daya listrik, mengurangi rugi-rugi daya, meningkatkan efisiensi transformator, serta memperbaiki keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

Tabel 9. Perbandingan Penelitian

Penelitian	Metode	Penurunan THDi
Setiawan dkk. (2021)	Single Tuned Filter	30–40%
Sasdelli dkk. (2020)	Passive Filter	25–35%
Penelitian ini	Single Passive Tuned Filter	35–45%

Hasil penelitian ini menunjukkan performa yang sebanding bahkan lebih baik dibandingkan dengan beberapa penelitian terdahulu. Penurunan harmonisa sebesar 30–40% menggunakan single-tuned filter pada sistem distribusi [14]. Pada penelitian ini diperoleh penurunan THDi sebesar 35,70–45,16%. Perbedaan tersebut disebabkan oleh dominasi harmonisa orde ke-3 yang memungkinkan filter bekerja lebih efektif pada frekuensi tuning yang dirancang.

Penelitian mengenai mitigasi harmonisa menggunakan passive filter telah banyak dilakukan pada sistem distribusi tenaga listrik. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada analisis penurunan Total Harmonic Distortion (THD) setelah pemasangan filter harmonisa serta evaluasi performa filter dalam memenuhi standar kualitas daya listrik. Namun demikian, analisis yang dilakukan umumnya masih terbatas pada aspek reduksi harmonisa tanpa mengevaluasi dampak harmonisa terhadap kinerja transformator secara menyeluruh.

Penelitian ini memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Selain melakukan perancangan dan evaluasi kinerja single passive tuned filter untuk mereduksi harmonisa dominan orde ke-3, penelitian ini juga menganalisis pengaruh harmonisa terhadap derating transformator, rugi-rugi transformator (transformer losses), serta kerugian biaya energi listrik yang ditimbulkan akibat peningkatan losses pada transformator distribusi 1000 kVA.

Kebaruan utama penelitian ini terletak pada integrasi analisis teknis dan ekonomis dalam satu kerangka evaluasi harmonisa. Analisis teknis dilakukan melalui pengukuran langsung menggunakan Power Quality Analyzer, perhitungan parameter filter secara analitis, serta validasi menggunakan simulasi ETAP. Selanjutnya, dampak penerapan filter tidak hanya dievaluasi berdasarkan penurunan nilai THDi, tetapi juga berdasarkan peningkatan performa transformator yang ditunjukkan melalui penurunan derating dan rugi-rugi daya.

Selain itu, penelitian ini mengkaji hubungan antara penurunan harmonisa dengan pengurangan biaya energi listrik akibat losses transformator. Pendekatan tersebut memberikan informasi yang lebih komprehensif bagi pengelola sistem tenaga listrik dalam mempertimbangkan penerapan filter harmonisa tidak hanya dari aspek kualitas daya, tetapi juga dari aspek efisiensi energi dan biaya operasional.

Apabila dibandingkan dengan penelitian yang berfokus pada reduksi harmonisa menggunakan single tuned filter [14] dan penelitian yang menitikberatkan pada analisis pengaruh harmonisa terhadap rugi-rugi transformator, penelitian ini mengintegrasikan kedua aspek tersebut dalam satu studi kasus transformator distribusi 1000 kVA [12]. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa model evaluasi harmonisa yang lebih komprehensif untuk mendukung peningkatan kualitas daya, efisiensi energi, dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan single passive tuned filter tidak hanya efektif dalam menurunkan harmonisa hingga memenuhi batas IEEE 519-2014, tetapi juga mampu meningkatkan performa operasional transformator dan mengurangi kerugian ekonomi akibat rugi-rugi daya. Oleh karena itu, hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam perencanaan program peningkatan kualitas daya listrik pada sistem distribusi dengan dominasi beban nonlinier.

4. Conclusion

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa transformator berkapasitas 1000 kVA di UIN Suska Riau mengalami distorsi harmonisa yang melebihi batas yang ditetapkan oleh standar IEEE 519-2014, dengan harmonisa orde ke-3 sebagai komponen yang paling dominan. Penerapan *single passive tuned filter* terbukti efektif dalam mereduksi tingkat harmonisa sehingga berada di bawah ambang batas standar yang berlaku. Selain itu, pemasangan filter juga memberikan dampak positif terhadap kinerja transformator, yaitu mengurangi nilai *derating*, menurunkan rugi-rugi daya (*losses*), serta mengurangi kerugian biaya yang ditimbulkan akibat *losses* tersebut. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP menunjukkan kesesuaian dengan hasil perhitungan analitis, sehingga dapat memvalidasi efektivitas metode yang diterapkan dalam penelitian ini.

References

- [1] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standard 519-2014, 2014.
- [2] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2003.
- [3] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 3rd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2012.
- [4] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, 4th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [5] H. Akagi, "Active harmonic filters," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, 2005.

- [6] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960–971, 1999.
- [7] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2011.
- [8] A. Kusko and M. T. Thompson, *Power Quality in Electrical Systems*. New York, USA: McGraw-Hill, 2007.
- [9] A. E. Emanuel, *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*. Hoboken, USA: Wiley-IEEE Press, 2010.
- [10] ETAP Operation Technology Inc., *ETAP User Guide for Harmonic Analysis*, 2022.
- [11] M. Bollen and I. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Hoboken, USA: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [12] R. Sasdelli, M. Ashari, and M. H. Purnomo, "Analisis Pengaruh Harmonisa terhadap Rugi-rugi dan Derating Transformator Distribusi," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 9, no. 2, pp. B122–B128, 2020.
- [13] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. New York, USA: Wiley, 2003.
- [14] I. Setiawan, A. Priyadi, and M. H. Purnomo, "Perancangan Single Tuned Passive Filter untuk Mereduksi Harmonisa pada Sistem Distribusi," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 10, no. 1, pp. 45–52, 2021.
- [15] D. Graovac, V. Katic, and A. Rufer, "Power Quality Problems Compensation with Universal Power Quality Conditioning System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 968–976, 2007.