

PERBAIKAN KUALITAS DAYA LISTRIK PEMAKAIAN SENDIRI PLTA WLINGI MELALUI IMPLEMENTASI KAPASITOR BANK DAN FILTER LC

Oleh : Ruth Nike Dauhan¹, Arya Kusumawardana¹, Royb Fatkhur Rizal¹, Soraya
Norma Mustika², Hafidz Malkan Chaironi³, Mohamad Farel Firmansyah¹

Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi¹, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia¹

Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika², Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia²

System Owner³, PLN Nusantara Power UP Brantas, Malang, Indonesia³

E-mail Korespondensi: arya.kusumawardana.ft@um.ac.id

Abstrak (TNR 10 Bold)

Kualitas daya listrik menjadi aspek penting dalam mendukung keandalan operasi sistem pembangkit khususnya pada sistem Pemakaian Sendiri (PS) PLTA Wlingi. Penelitian ini difokuskan pada upaya peningkatan faktor daya dan penanggulangan harmonisa yang timbul akibat dominasi beban induktif. Berdasarkan hasil simulasi sistem eksisting, diperoleh nilai faktor daya sebesar 0,49 dengan kandungan harmonisa mendekati ambang batas standar. Solusi yang diterapkan adalah pemasangan kapasitor bank berkapasitas 317,66 kVar, disertai dengan penambahan filter pasif L-C yang dituning pada orde ke-9 untuk meredam resonansi harmonik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa solusi ini mampu meningkatkan faktor daya menjadi 0,83 dan menurunkan nilai THD tegangan hingga 2,21%. Strategi ini terbukti efektif secara teknis dalam meningkatkan efisiensi sistem dan memenuhi batasan kualitas daya sesuai IEEE Std 519.

Kata kunci : faktor daya, harmonisa, kapasitor bank, filter L-C, PLTA Wlingi

Abstract (TNR 10 Bold)

Power quality is an important aspect in supporting the reliability of power plant operations, particularly in the Self-Consumption (SC) system of the Wlingi Hydroelectric Power Plant. This study focuses on efforts to improve the power factor and mitigate harmonics caused by the dominance of inductive loads. Based on the results of simulations of the existing system, a power factor value of 0.49 was obtained, with harmonic content approaching the standard threshold. The solution implemented involves installing a capacitor bank with a capacity of 317.66 kVar, accompanied by the addition of a tuned L-C passive filter at the 9th order to suppress harmonic resonance. Simulation results indicate that this solution effectively improves the power factor to 0.83 and reduces voltage THD to 2.21%. This strategy has proven technically effective in improving system efficiency and meeting power quality limits in accordance with IEEE Std 519.

Keywords : Power Factor, Harmonics, Capacitor Bank, L-C Filter, PLTA Wlingi

1. Pendahuluan (TNR 12 Bold)

Kualitas daya listrik merupakan faktor penting dalam menjaga efisiensi dan keandalan sistem tenaga, terutama pada sistem pemakaian sendiri (PS) di pembangkit listrik tenaga air (PLTA)[1], [2], [3]. Salah satu parameter utama yang mencerminkan kualitas daya adalah faktor daya (power factor), yang menunjukkan perbandingan antara daya aktif dan daya semu. Nilai faktor daya yang rendah menandakan tingginya konsumsi daya reaktif, sehingga menurunkan efisiensi

sistem dan berpotensi meningkatkan biaya operasional[4], [5], [6], [7].

Pada sistem PS PLTA Wlingi, beban-beban dominan bersifat induktif seperti motor kompresor dan pompa pelumas, yang menyebabkan faktor daya berada di bawah standar minimum, yakni sebesar 0,49. Selain itu, pemasangan kapasitor bank sebagai upaya kompensasi daya reaktif dapat menimbulkan harmonisa resonansi jika tidak dirancang dengan tepat[8], [9], [10], [11]. Harmonisa yang berlebihan dapat menyebabkan distorsi

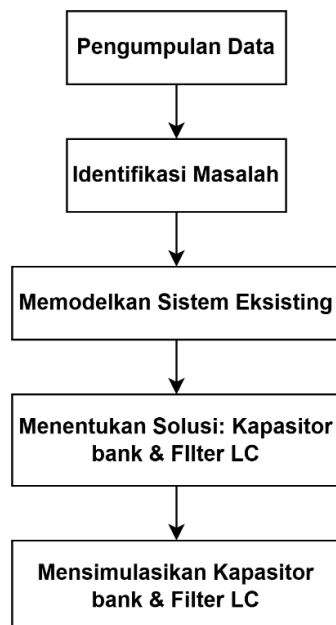
tegangan, panas berlebih pada peralatan, bahkan kerusakan sistem proteksi.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan strategi perbaikan kualitas daya yang tidak hanya meningkatkan faktor daya, tetapi juga mampu mengendalikan harmonisa. Penelitian ini mengusulkan solusi berupa pemasangan kapasitor bank untuk kompensasi daya reaktif, serta penambahan filter pasif L-C yang dituning pada frekuensi harmonisa orde ke-9 untuk meredam distorsi yang terjadi akibat resonansi[12], [13], [14], [15]. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis efektivitas kombinasi tersebut dalam meningkatkan efisiensi sistem PS PLTA Wlingi dan memastikan kesesuaiannya dengan standar kualitas daya seperti yang ditetapkan dalam IEEE Std 519.

2. Metode

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP untuk menganalisis sistem Pemakaian Sendiri (PS) PLTA Wlingi. Fokus utama penelitian adalah melakukan perbaikan faktor daya dan pengendalian harmonisa melalui pemasangan kapasitor bank dan filter pasif L-C.

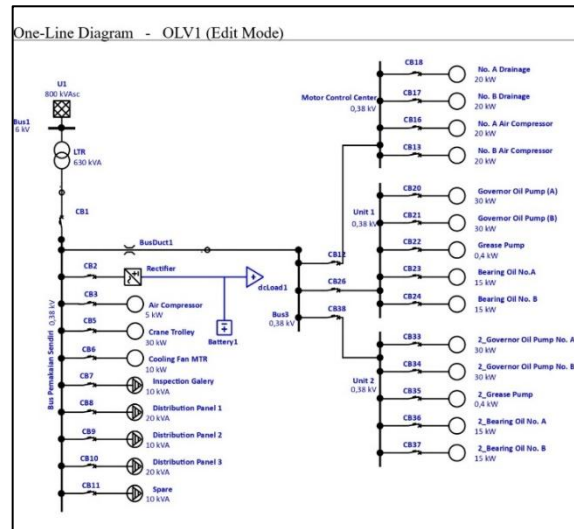
Tahapan metode yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Alur penelitian

2.1 Pemodelan Sistem Eksisting

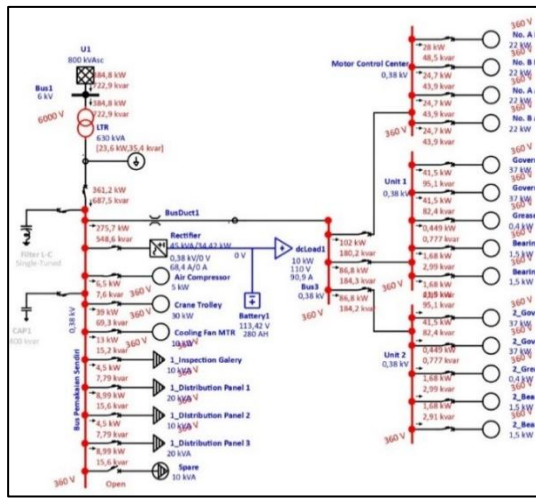
Sistem PS (pemakaian sendiri) 380 Volt dimodelkan berdasarkan data aktual konfigurasi trafo, panel distribusi, serta jenis dan kapasitas beban. Data beban mencakup motor-motor induktif seperti pompa pelumas, pompa drainase, dan kompresor. Gambar 2 merupakan hasil pemodelan SLD sistem PS kedalam ETAP.



Gambar 2. SLD eksisting dimodelkan dalam ETAP

2.2 Analisis Kondisi Eksisting

Simulasi kondisi awal dilakukan untuk mengetahui parameter daya aktif (kW), daya reaktif (KVar), arus sistem, serta nilai Total Harmonic Distortion (THD). Nilai faktor daya dasar diukur sebagai acuan koreksi. Gambar 3 merupakan simulasi kondisi awal atau kondisi eksisting sistem.



Gambar 3. Simulasi kondisi eksisting

Berdasarkan Tabel 1, hasil simulasi awal sistem menunjukkan performa yang tidak efisien. Faktor daya berada di bawah 0,51 untuk seluruh skenario operasi, yang menandakan dominasi daya reaktif. Pada kondisi beban penuh, daya reaktif mencapai 722,9 kVar, menyebabkan pembebanan tinggi pada trafo dan meningkatnya aliran arus. Meskipun nilai Total Harmonic Distortion (THD) tercatat sebesar 2,63%, yang masih berada dalam batas standar IEEE Std 519 (<5%), akumulasi harmonisa ini berpotensi memberikan beban tambahan terhadap sistem dalam jangka panjang. Secara keseluruhan, kondisi ini berdampak pada tingginya rugi-rugi daya, berkurangnya efisiensi distribusi, serta risiko gangguan operasional.

Tabel 1. Hasil simulasi kondisi eksisting

kW Flow	kvar Flow	Amp Flow	% PF	% TH D	Kondisi Beban
384,8	722,9	78,8	46,98	2,63	Beban penuh
287,7	523,5	57,48	48,16	2,63	Unit 1 off
194,2	329,5	36,81	50,77	1,45	Saat standby

2.3 Perhitungan Kebutuhan Kapasitor Bank

Untuk meningkatkan faktor daya pada sisi tegangan rendah 380 Volt sistem Pemakaian Sendiri (PS) PLTA Wlingi,

dilakukan kompensasi daya reaktif melalui pemasangan kapasitor bank pada bus utama (central compensation). Target peningkatan faktor daya adalah dari kondisi eksisting 0,49 menjadi 0,8. Berdasarkan persamaan 1, 2, dan 3:[6], [8], [9].

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (1)$$

$$Q_n = (S^2 - P^2)^{0,5} \quad (2)$$

$$S = \frac{P}{\cos \phi_n} \quad (3)$$

- Daya aktif (P_1) = $630 \times 0,49 = 308,7$ kW
- Daya reaktif awal (Q_1) = $\sqrt{(630^2 - 308,7^2)} = 549,18$ kVar
- Daya semu target (S_2) = $308,7 / 0,8 = 385,87$ kVA
- Daya reaktif target (Q_2) = $\sqrt{(385,87^2 - 308,7^2)} = 231,52$ kVar
- Kebutuhan kapasitor bank (Q_c) = $Q_1 - Q_2 = 317,66$ kVar

Dengan demikian, dibutuhkan kapasitor bank sebesar 317,66 kVar yang dipasang pada bus 380 Volt untuk mencapai target faktor daya.

Namun, pemasangan kapasitor berpotensi menimbulkan resonansi harmonik. Oleh karena itu, dilakukan penalaan sistem dengan menghitung orde resonansi:

$$h_r = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{Q_c}} \quad (4)$$

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem rentan terhadap harmonisa pada orde ke-9 (± 450 Hz). Untuk menghindari resonansi dan meredam harmonisa dominan, digunakan filter pasif L-C yang dituning pada frekuensi tersebut.

Perhitungan komponen filter:

- Kapasitansi

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V^2} \quad (5)$$

- Reaktansi kapasitif dan induktif

$$X_C = X_L = \frac{V^2}{Q_C} \quad (6)$$

- Induktansi

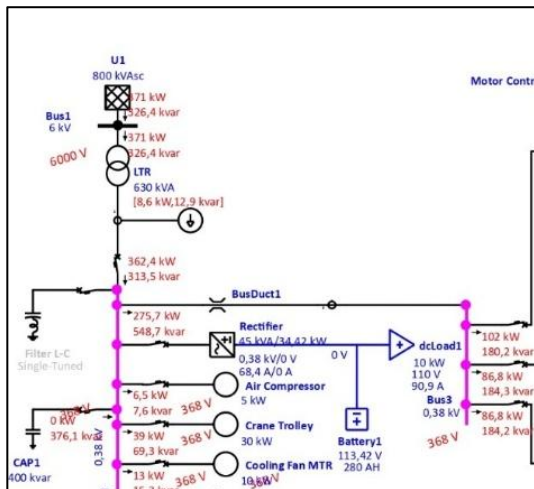
$$L = \frac{X_L}{2 \times \pi \times f_r} \quad (7)$$

Dengan demikian, filter pasif dirancang dengan kapasitor 7,02 mF dan induktor 1,5 mH, dituning pada orde ke-9, untuk mencegah resonansi dan sekaligus menyerap harmonisa pada frekuensi tersebut. Kombinasi ini diharapkan mampu meningkatkan kualitas daya sistem secara menyeluruh.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil simulasi penambahan kapasitor bank

Simulasi tahap kedua dilakukan setelah pemasangan kapasitor bank sebesar 317,66 kVar pada bus 380 Volt sistem Pemakaian Sendiri (PS) PLTA Wlingi. Penambahan kapasitor ini bertujuan untuk mengurangi kelebihan daya reaktif dan meningkatkan faktor daya sistem menuju nilai yang lebih optimal. Gambar 4 merupakan simulasi penambahan kapasitor bank pada sistem.



Gambar 4. Simulasi penambahan kapasitor bank

Setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank sebesar 317,66 kVar, dilakukan simulasi ulang untuk menilai pengaruhnya terhadap parameter sistem. Berdasarkan Tabel 2, hasil menunjukkan adanya peningkatan faktor daya menjadi

0,78, dengan penurunan daya reaktif menjadi 326,4 kVar, dan arus sistem turun signifikan menjadi 47,55 A.

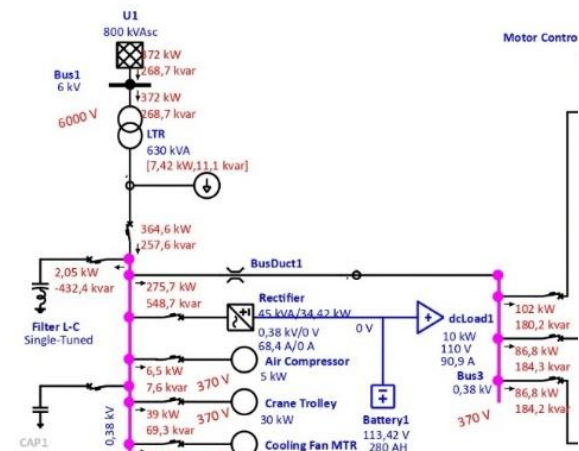
Namun, terjadi lonjakan pada nilai THD tegangan sebesar 6,6%, yang berarti melebihi batas standar IEEE. Hal ini menunjukkan adanya resonansi harmonik, terutama pada orde ke-9, akibat pemasangan kapasitor tanpa kontrol harmonisa.

Tabel 2. Hasil simulasi penambahan kapasitor bank

kW Flow	kvar Flow	Amp Flow	% PF	% TH D	Kondisi Beban
371	326,4	47,55	75,08	6,6	Beban penuh Unit 1 off
279,7	124,8	29,47	91,33	3,24	
191,8	- 71,47	19,7	- 93,71	1,15	

3.2 Hasil simulasi penambahan filter LC

Meskipun pemasangan kapasitor bank berhasil meningkatkan faktor daya, hasil simulasi menunjukkan adanya peningkatan nilai distorsi harmonisa (THD). Untuk mengatasi hal tersebut, diterapkan filter pasif L-C yang dituning pada orde ke-9 (450 Hz) guna meredam harmonisa yang muncul akibat fenomena resonansi. Gambar 5 merupakan simulasi penambahan filter LC pada sistem.



Gambar 5. Simulasi penambahan filter LC

Untuk mengatasi resonansi yang muncul, dilakukan penambahan filter pasif L-C

yang dituning pada frekuensi harmonisa orde ke-9 (450 Hz). Filter ini dirancang dengan kapasitansi 7,02 mF dan induktansi 1,5 mH.

Sesuai Tabel 3, hasil simulasi akhir menunjukkan bahwa faktor daya meningkat menjadi 0,83, arus sistem turun lagi menjadi 44,16 A, dan nilai THD tegangan turun drastis menjadi 2,21%, yang berarti kembali dalam batas aman. Beban trafo juga berkurang signifikan, dari 130% menjadi di bawah 75%.

Tabel 3. Hasil simulasi penambahan filter LC

kW Flow	kvar Flow	Amp Flow	% PF	% TH D	Kondisi Beban
372	268,7	44,16	81,07	2,21	Beban penuh
281,6	66,71	27,85	97,31	2,25	Unit 1 off
192,7	-	355,5	-	1,37	Saat standby
	132,7		82,35		

3.3 Hasil analisis dan pembahasan perbandingan dan efisiensi solusi

Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa penambahan kapasitor bank mampu memperbaiki faktor daya dan mengurangi daya reaktif, namun menimbulkan efek harmonisa yang signifikan. Solusi paling efektif adalah penggunaan filter pasif L-C yang dituning, karena mampu menangani kedua masalah secara simultan: meningkatkan efisiensi sistem dan menjaga kualitas daya tetap dalam batas. Hasil perbandingan dan efisiensi dari solusi yang telah diterapkan pada pada sistem dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan dan efisiensi solusi

Skenario	Cos ϕ	THD (%)	Arus (A)	Efektivitas
Eksisting	0,49	2,63	78,8	Rendah
Kapasitor bank	0,78	6,6	47,55	Menengah, THD tinggi
Filter LC	0,83	2,21	44,16	Tinggi dan stabil

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa strategi peningkatan kualitas daya melalui pemasangan kapasitor bank dan filter pasif LC pada sistem Pemakaian Sendiri (PS) PLTA Wlingi dapat meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan. Berdasarkan simulasi kondisi eksisting, sistem memiliki faktor daya rendah sebesar 0,49 dengan beban reaktif tinggi dan arus sistem mencapai 78,8 A. Meskipun nilai THD masih berada dalam ambang standar, sistem menunjukkan performa distribusi daya yang tidak efisien. Setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank sebesar 317,66 kVar, faktor daya meningkat menjadi 0,78 dan arus menurun menjadi 47,55 A. Namun, langkah ini juga menimbulkan resonansi harmonik yang menyebabkan nilai THD tegangan meningkat hingga 6,6%. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, ditambahkan filter pasif L-C yang dituning pada orde ke-9 (frekuensi 450 Hz). Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan filter ini mampu meningkatkan faktor daya lebih lanjut menjadi 0,83, menurunkan arus sistem menjadi 44,16 A, serta menurunkan nilai THD tegangan hingga 2,21%, sesuai dengan batas aman standar IEEE Std 519. Dengan demikian, kombinasi kompensasi daya reaktif dan peredaman harmonisa melalui filter L-C terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas daya dan efisiensi sistem PLTA secara teknis dan ekonomis.

REFERENSI

- [1] K. A. Mohd Nor and N. Abdullah, 'Power quality improvement of three-phase electrical systems using active-passive hybrid harmonic filter', *Results Eng.*, vol. 22, p. 102242, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102242.
- [2] H. Li *et al.*, 'Power Supply Reliability Enhancement for Low-Voltage Distribution Area With Power Quality Improvement Function', *IEEE Access*, vol. 10, pp. 130619–130631, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3229424.
- [3] J. C. Das, *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*. John Wiley &

- Sons, 2015.
- [4] Rajeshwari and A. Bagwari, 'Voltage harmonic reduction using passive filter shunt passive-active filters for non-linear load', in *2017 7th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, Nov. 2017, pp. 131–136. doi: 10.1109/CSNT.2017.8418524.
 - [5] Cho, Young-Sik, 'Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor: Journal of International Council on Electrical Engineering: Vol 1, No 1'. Accessed: Aug. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5370/JICEE.2011.1.1.007>
 - [6] F. Wen *et al.*, 'Research on optimal receiver radius of wireless power transfer system based on BP neural network', *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 1450–1455, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.11.003.
 - [7] Rajeshwari and A. Bagwari, 'Voltage harmonic reduction using passive filter shunt passive-active filters for non-linear load', in *2017 7th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, Nov. 2017, pp. 131–136. doi: 10.1109/CSNT.2017.8418524.
 - [8] A. B. Nassif, W. Xu, and W. Freitas, 'An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications', *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 3, pp. 1710–1718, Jul. 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2016824.
 - [9] Y. P. Obulesu, M. Venkateswara Reddy, and Y. Kusumalatha, 'A %THD analysis of industrial power distribution systems with active power filter-case studies', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 107–120, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.02.037.
 - [10] L. Motta and N. Faúndes, 'Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends', in *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Oct. 2016, pp. 657–662. doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783319.
 - [11] A. M. Akbar and C. F. Nugraha, 'Analisis Harmonik dan Perbaikan Nilai THD Arus dengan Perancangan Filter Pasif Single-Tuned', *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 12, no. 4, Art. no. 4, Dec. 2024, doi: 10.26760/elkomika.v12i4.892.
 - [12] K. Kritsanasuwan, U. Leeton, and T. Kulworawanichpong, 'Harmonic mitigation of AC electric railway power feeding system by using single-tuned passive filters', *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 1116–1124, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.276.
 - [13] Z. A. Memon, M. A. Uquaili, and M. A. Unar, 'Harmonics Mitigation of Industrial Power System Using Passive Filters', May 21, 2016, *arXiv: arXiv:1605.06684*. doi: 10.48550/arXiv.1605.06684.
 - [14] M. Bajaj and A. K. Singh, 'Optimal design of passive power filter for enhancing the harmonic-constrained hosting capacity of renewable DG systems', *Comput. Electr. Eng.*, vol. 97, p. 107646, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107646.
 - [15] S. Chaladying, A. Charlangsut, and N. Rugthaichareoncheep, 'Parallel resonance impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion', in *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*, Nov. 2015, pp. 1–5. doi: 10.1109/TENCON.2015.7373180.