



Penyeimbangan Beban Jaringan 20kV terhadap Rugi-Rugi Daya Menggunakan Perangkat Lunak ETAP PT PLN (Persero) ULP Cijawura

Muhamad Ridwan¹

¹Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Email author: mochridwan756@gmail.com

Article Info

Article history:

Received May 2, 2026

Revised June 5, 2026

Accepted June 11, 2026

Available: July 10, 2026

Published: July 30, 2026

Keywords:

Load imbalance;

Load balancing;

Distribution transformers;

Distribution systems;

Power losses;

Phase currents

ABSTRACT

Load imbalance in the electric power distribution system is one of the problems that can reduce power quality and increase power losses in the network. This study aims to analyze the condition of load imbalance and make efforts to balance the load on the secondary side of the distribution transformer based on field measurement data. The methods used include collecting current data on each phase, calculating the percentage of load imbalance, and evaluating the distribution of the load before and after balancing. The analysis results show that before balancing, there was a significant difference in current between the phases, indicating an unbalanced condition. After the load redistribution, the imbalance value decreased so that the current in each phase became more evenly distributed. This condition has an impact on increasing system efficiency and reducing power losses in the distribution network. Thus, load balancing is an effective step in improving the performance and reliability of the electric power distribution system.

Corresponding Author:

Muhamad Ridwan,

Institut Teknologi Nasioanl Bandung,

Jl. PH.H. Mustopa No.23, Bandung

Email: mochridwan756@gmail.com



1. INTRODUCTION

Sistem distribusi tenaga listrik memiliki peranan penting dalam menyalurkan energi listrik dari gardu induk hingga ke konsumen. Kualitas penyaluran energi listrik sangat dipengaruhi oleh kondisi pembebanan pada masing-masing fasa (Mehta, 2005). Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada sistem distribusi adalah ketidakseimbangan beban antar fasa pada sisi sekunder transformator distribusi, yang umumnya disebabkan oleh pembagian beban satu fasa yang tidak merata pada jaringan tegangan rendah (Zuraidah Tharo, 2018).

Ketidakseimbangan beban dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti meningkatnya arus pada penghantar netral, bertambahnya rugi-rugi daya, serta menurunnya efisiensi dan keandalan sistem distribusi (saadat, 2024). Selain itu, kondisi ini juga dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada transformator yang berpotensi memperpendek umur peralatan (Ismarala & Sultan, 2018). Oleh karena itu, diperlukan analisis dan penanganan yang tepat untuk meminimalkan ketidakseimbangan beban guna menjaga kualitas penyaluran tenaga Listrik (Rohmat & Riyadi, 2023).

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas mengenai analisis ketidakseimbangan beban dan metode penyeimbangannya pada sistem distribusi tenaga listrik. Penelitian dalam menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban dapat dikurangi dengan melakukan redistribusi beban antar fasa berdasarkan hasil pengukuran arus. Sementara itu, penelitian lain dalam menekankan pentingnya evaluasi kondisi pembebanan secara berkala untuk meningkatkan efisiensi sistem distribusi. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih bersifat umum dan belum secara spesifik mengkaji kondisi nyata di lapangan berdasarkan data pengukuran langsung pada transformator distribusi tertentu (Zainal Sya'roni, 2019).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan analisis ketidakseimbangan beban serta penerapan penyeimbangan beban berdasarkan data hasil pengukuran langsung di lapangan pada sisi sekunder transformator distribusi. Proses penyeimbangan dilakukan melalui redistribusi beban pada masing-masing fasa sehingga diperoleh kondisi pembebanan yang lebih merata (Redo Fajri, 2025).

Pada penelitian ini penulis menggunakan data aktual hasil pengukuran lapangan untuk mengevaluasi tingkat ketidakseimbangan beban serta mengukur efektivitas penyeimbangan beban yang dilakukan secara langsung pada sistem distribusi yang diteliti. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran kondisi riil sistem serta menjadi acuan dalam upaya peningkatan efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga Listrik.

2. METHOD

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan analisis berdasarkan data hasil pengukuran langsung di lapangan pada sistem distribusi tenaga listrik. Metode ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat ketidakseimbangan beban serta efektivitas penyeimbangan beban pada sisi sekunder transformator distribusi.

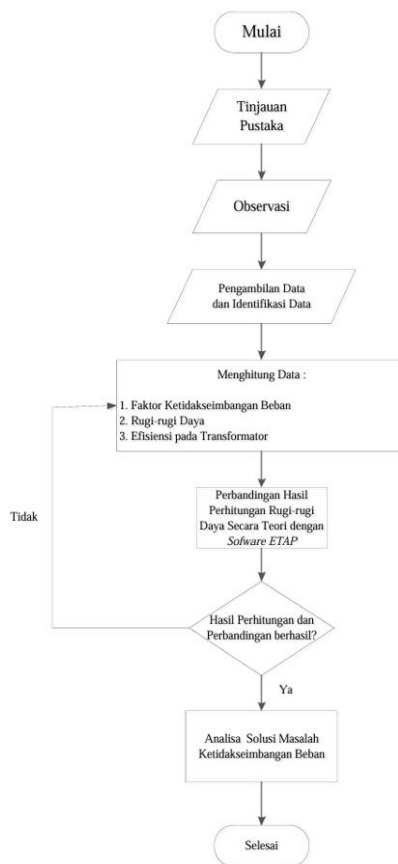
2.1. Lokasi dan Sumber Data

Data penelitian diperoleh dari hasil pengukuran langsung pada sisi sekunder transformator distribusi. Parameter yang diukur meliputi arus pada masing-masing fasa (R, S, dan T) serta arus netral. Data ini digunakan sebagai dasar dalam menganalisis kondisi ketidakseimbangan beban sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan.

2.2. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan secara sistematis untuk memperoleh hasil analisis yang akurat. Tahapan penelitian meliputi:

1. Studi awal terhadap sistem distribusi dan kondisi pembebanan transformator.
2. Pengukuran arus pada masing-masing fasa (R, S, T) dan arus netral.
3. Perhitungan nilai rata-rata arus pada ketiga fasa.
4. Perhitungan persentase ketidakseimbangan beban.
5. Analisis kondisi pembebanan berdasarkan hasil perhitungan.
6. Pelaksanaan penyeimbangan beban melalui redistribusi beban pada masing-masing fasa.
7. Pengukuran ulang setelah dilakukan penyeimbangan beban.
8. Evaluasi dan perbandingan hasil sebelum dan sesudah penyeimbangan.



2.3. Metode Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

Perhitungan ketidakseimbangan beban dilakukan berdasarkan nilai arus pada masing-masing fasa. Nilai rata-rata arus digunakan sebagai acuan kondisi seimbang. Persentase ketidakseimbangan beban dihitung untuk mengetahui deviasi arus terhadap nilai rata-rata.

Semakin kecil nilai ketidakseimbangan, maka kondisi sistem semakin mendekati seimbang. Sebaliknya, nilai yang besar menunjukkan adanya ketidakseimbangan yang signifikan sehingga diperlukan tindakan penyeimbangan beban.

2.4. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban. Parameter yang dianalisis meliputi arus masing-masing fasa, arus netral, serta persentase ketidakseimbangan beban.

Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi efektivitas penyeimbangan beban dalam meningkatkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik serta mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan.

3. RESULT DAN ANALISIS

Bagian ini menyajikan hasil pengukuran, perhitungan, serta analisis terhadap kondisi ketidakseimbangan beban dan rugi daya sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban. Hasil

Gambar 1 Diagram alir penelitian

penelitian juga didukung oleh simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP untuk memvalidasi kondisi sistem distribusi

3.1. Kondisi Awal Beban dan Ketidakseimbangan

Berdasarkan hasil pengukuran di lapangan, diperoleh data arus pada masing-masing fasa yang menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban pada sisi sekunder transformator distribusi. Nilai arus pada fasa R, S, dan T masing-masing sebesar 34 A, 38 A, dan 134 A, dengan arus netral sebesar 65 A.

Tabel 1 Hasil Pengukuran Arus Sebelum Penyeimbangan Beban

Alamat/Lokasi Gardu	Kapasitas Trafo/S (KVA)	Arus (I)				Tegangan V (Volt) F- F
		IR	IS	IT	IN	
Jalan Mekar Utama/ PMK1	630	34	38	134	65	400

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa arus pada fasa T jauh lebih besar dibandingkan fasa lainnya. Kondisi ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban yang signifikan, yang berpotensi menyebabkan meningkatnya rugi daya serta munculnya arus netral pada sistem distribusi.

3.2. Analisis Ketidakseimbangan Beban

3.2.1. Arus Rata-rata

Untuk mengetahui tingkat ketidakseimbangan beban, dilakukan perhitungan berdasarkan nilai arus masing-masing fasa terhadap nilai rata-rata arus.

$$I_{avg} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (1)$$

Dengan memasukkan nilai arus masing-masing fasa, diperoleh:

$$I_{avg} = 68.67 \text{ A}$$

3.2.2. Koefisien Tiap Fasa

Koefisien pembebanan dihitung dengan membandingkan arus tiap fasa terhadap arus rata-rata, sehingga diperoleh:

$$a = \frac{I_R}{I_{avg}} = 0.495 \text{ A}, \quad b = \frac{I_S}{I_{avg}} = 0.553 \text{ A}, \quad c = \frac{I_T}{I_{avg}} = 1.951 \text{ A}$$

Nilai koefisien menunjukkan bahwa fasa T mengalami beban berlebih, sedangkan fasa R dan S berada di bawah kondisi seimbang.

3.2.3. Persentase Ketidakseimbangan Beban

$$Unbalance (\%) = \frac{(|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|)}{3} \times 100\% \quad (2)$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tingkat ketidakseimbangan beban mencapai 63.47%, yang tergolong tinggi dan berpotensi menurunkan efisiensi sistem distribusi.

3.3. Analisa Rugi Daya (Manual)

Perhitungan rugi daya dilakukan berdasarkan komponen rugi transformator dan rugi pada penghantar (kabel).

3.3.1. Rugi Transformator

Berdasarkan standar IEC 60076, rugi transformator terdiri dari rugi inti dan rugi tembaga. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total rugi transformator adalah sekitar 1.35 kW.

Rugi transformator relatif kecil dibandingkan rugi penghantar karena nilai resistansi internal transformator lebih rendah dan rugi inti bersifat konstan.

3.3.2. Rugi Kabel

Rugi daya pada penghantar dihitung berdasarkan arus yang mengalir dan resistansi kabel. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total rugi daya pada kabel mencapai sekitar 7.2 kW.

Besarnya rugi ini dipengaruhi oleh tingginya arus pada salah satu fasa serta adanya arus netral. Karena rugi daya sebanding dengan kuadrat arus (I^2R), maka ketidakseimbangan beban menyebabkan peningkatan rugi daya yang signifikan

3.3.3. Total Rugi Sistem dan Efisiensi

Tabel 2 Rugi Daya Sebelum Penyeimbangan

Parameter	Nilai
Rugi Trafo	1.35 kW
Rugi Kabel	7.2 kW
Total Rugi	8.5 kW
Efisiensi	98.78%

Dari Tabel 2, terlihat bahwa rugi daya terbesar berasal dari penghantar distribusi. Hal ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan rugi daya sistem.

3.4 Hasil Setelah Penyeimbangan

Setelah dilakukan penyeimbangan beban melalui redistribusi beban antar fasa, arus pada masing-masing fasa menjadi lebih merata dan arus netral berkurang secara signifikan.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total rugi daya sistem menurun menjadi sekitar 5 kW, dengan efisiensi meningkat menjadi 99.27%.

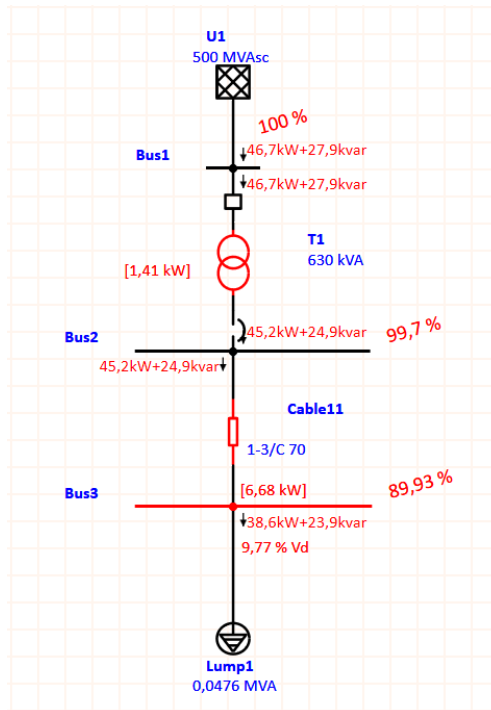
Table 3 Rugi Daya Sesudah Penyeimbangan

Parameter	Nilai
Total Rugi	5 kW
Efisiensi	99.27%

Penurunan rugi daya ini menunjukkan bahwa penyeimbangan beban efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem distribusi

3.5. Hasil Simulasi ETAP

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP untuk memvalidasi hasil perhitungan manual.



Gambar 2 (Single-Line Diagram) Sebelum Penyeimbangan Beban

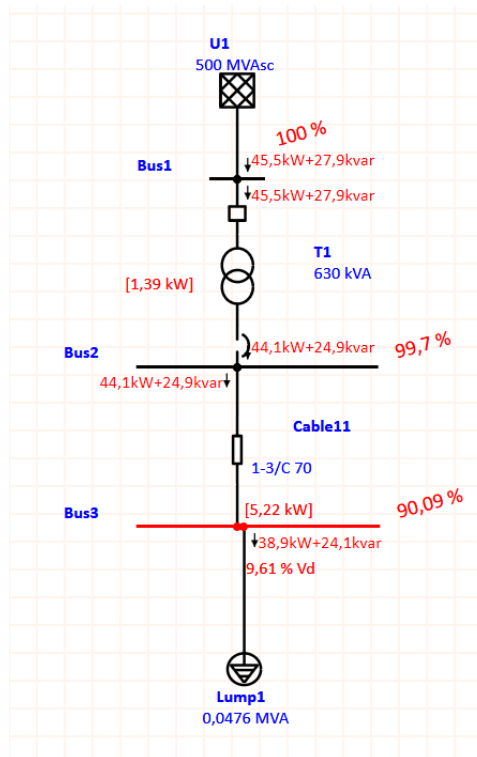
Gambar 3 merupakan hasil dari *Branch Losses Report* Sebelum Penyeimbangan.

Branch Losses Summary Report

CKT / Branch		From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vmag	Amperes in Busbar Winding
ID	Phase	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To		
Cable11	A	0.015	0.017	-0.012	-0.016	3.1	0.5	99.6	89.3	10.3	
	B	0.008	0.004	-0.007	-0.004	0.5	0.1	99.8	94.7	5.2	
	C	0.022	0.004	-0.019	-0.004	3.1	0.5	99.7	85.8	13.9	
T1	A	0.008	0.013	-0.015	-0.017	-6.7	-3.1	100.0	99.6	0.4	0
	B	0.016	0.001	-0.008	-0.004	7.6	-3.2	100.0	99.8	0.2	0
	C	0.023	0.013	-0.022	-0.004	0.5	9.3	100.0	99.7	0.3	0
						8.1	4.0				

Gambar 3 *Branch Losses Report* Sebelum Penyeimbangan

Untuk *Single-Line Diagram* setelah penyeimbangan ditunjukan pada gambar 3 dengan menggunakan metode *Load Flow Analysis*.



Gambar 4 (Single-Line Diagram) Sesudah Penyeimbangan Beban

Pada gambar 4 dibawah merupakan hasil dari *Branch Losses Report* Setelah Penyeimbangan.

Branch Losses Summary Report

Branch ID	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd
	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To	% Drop in Vmag
Cable11	0.044	0.025	-0.039	-0.024	5.2	0.8	99.7	90.1	9.61
T1	0.044	0.025	-0.044	-0.025	0.1	0.1	100.0	99.7	0.29
					5.3	0.9			

* This Transmission Line includes Series Capacitor.

Gambar 5 *Branch Losses Report* Setelah Penyeimbangan

Simulasi menunjukkan bahwa setelah penyeimbangan, distribusi beban menjadi lebih merata dan rugi daya menurun.

3.6. Perbandingan Manual dan ETAP

Pada tabel 4 merupakan perbandingan hasil manual dan ETAP.

Tabel 4 Perbandingan Hasil Manual dan ETAP							
Sebelum Penyeimbangan				Sesudah Penyeimbangan			
Rugi – rugi Daya/ P (kW)		Efisiensi		Rugi – rugi Daya/ P (kW)		Efisiensi	
Manual	ETAP	Manual	ETAP	Manual	ETAP	Manual	ETAP
8.5	8.1	98.78%	96.94%	5	5.3	99,27%	96.97%

Hasil perbandingan menunjukkan adanya selisih antara perhitungan manual dan simulasi ETAP. Perbedaan ini disebabkan oleh pendekatan perhitungan yang digunakan, di mana simulasi mempertimbangkan parameter sistem yang lebih kompleks.

Meskipun demikian, hasil keduanya menunjukkan tren yang sama, yaitu penurunan rugi daya setelah penyeimbangan beban. Hal ini menunjukkan bahwa metode analisis yang digunakan cukup valid untuk merepresentasikan kondisi sistem distribusi

3.7. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban yang tinggi (63.47%) menyebabkan peningkatan rugi daya yang signifikan. Setelah dilakukan penyeimbangan, rugi daya menurun dari sekitar 8.5 kW menjadi 5 kW dan efisiensi meningkat.

Hal ini membuktikan bahwa penyeimbangan beban efektif dalam meningkatkan kinerja sistem distribusi tenaga Listrik.

4. DISCUSSION/CONCLUSION

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketidakseimbangan beban serta pengaruh penyeimbangan beban terhadap rugi daya pada sistem distribusi tenaga listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi awal sistem mengalami ketidakseimbangan beban yang tinggi yang ditandai dengan perbedaan arus antar fasa dan munculnya arus netral, sehingga menyebabkan peningkatan rugi daya. Setelah dilakukan penyeimbangan beban melalui redistribusi pada masing-masing fasa, diperoleh distribusi arus yang lebih merata, penurunan rugi daya dari sekitar 8.5 kW menjadi 5 kW, serta peningkatan efisiensi sistem. Hasil tersebut juga didukung oleh simulasi menggunakan ETAP yang menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan perhitungan manual. Dengan demikian, penyeimbangan beban terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem distribusi tenaga listrik. Ke depan, penelitian ini dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan variasi beban yang dinamis serta penerapan metode optimasi dan sistem monitoring berbasis digital untuk meningkatkan keandalan sistem secara berkelanjutan.

ACKNOWLEDGEMENTS

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak instansi tempat kerja praktik yang telah memberikan kesempatan dan dukungan dalam proses pengambilan data serta kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian ini.

REFERENCES

- [1] I. Bursa, R. L, and N. A. Noor, "Analisis Rugi-Rugi Daya Akibat Ketidakseimbangan Beban pada Jaringan Distribusi Sekunder di PT. PLN (Persero) ULP Watang Sawitto," in Seminar Nasional Teknik Elektro, 2021, pp. 122–128, doi: 10.46851/66.
- [2] H. Dhika, Y. Prasetyo, and A. Supardi, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20kV dan Solusinya Pada Jaringan Tegangan Rendah," Tesis, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2025.
- [3] M. N. Ismarala and A. R. Sultan, "Analisis Faktor Beban Tenaga Listrik di PLN Area Makassar Selatan Dengan Objek Pelanggan Rumah Tangga," in Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian (SNP2M), 2018, pp. 214–218.
- [4] D. S. W. Jayabadi, B. Winardi, and M. Facta, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Trafo 1 GI Spondol Terhadap Rugi-Rugi Akibat Arus Netral Dan Suhu Trafo Menggunakan ETAP 12.6.0," Jurnal Transient, vol. 5, no. 4, pp. 1–7, 2016, doi: 10.14710.
- [5] H. L. Latupeirissa, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Daya Pada Trafo Distribusi," Jurnal Simetrik, vol. 7, no. 2, pp. 68–73, 2017, doi: 10.31959/js.v7i2.43.
- [6] R. Mehta, Principles of Power System: Including Generation, Transmission, Distribution, Switchgear and Protection. 2005.

- [7] S. Pranoto, Sofyan, and N. N. Rusli, "Penyeimbangan Beban Pada Trafo Distribusi Penyulang Akkarena di Unit Layanan Pelanggan Mattoanging PT. PLN (Persero)," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro Dan Informatika (SNTEI)*, vol. 2, no. 1, 2020, pp. 37–46.
- [8] D. I. K. Redo Fajri, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi Pasangan Luar 20/0.4 kV," *Ensiklopedia*, vol. 8, no. 1, pp. 159–173, 2025, doi: 10.33559/eoj.v8i1.3418.
- [9] K. Rohmat and M. A. Riyadi, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 4, no. 4, pp. 186–192, 2023.
- [10] H. Saadat, "Power Flow Analysis," in *Power System Analysis*, PSA Publishing LLC, 2024, pp. 120–143.
- [11] Zainal Sya'roni, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20kV dan Solusinya Pada Jaringan Tegangan Rendah," *Jurnal Teknik Elektro*, pp. 1–9, 2019.
- [12] Zuraidah Tharo, A. D. T. R. P., "Studi Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20Kilovolt Terhadap Rugi-Rugi Daya Pada Penyulang Toddopuli PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) Unit Layanan Pelanggan Panakukkang Makassar," *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi)*, vol. 1, pp. 10–16, 2018.