

ANALISIS PENYEIMBANGAN BEBAN GARDU DISTRIBUSI GLT. AA PT PLN (PERSERO) ULP KARIANGO

ANALYSIS OF LOAD BALANCING AT GLT. AA DISTRIBUTION SUBSTATION OF PT PLN (PERSERO) ULP KARIANGO

Bindar Marda Prasetya^{1*}, Irwan Syarif², Syamsumarlin Taha³

¹²³Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Patria Artha

prasetya73@gmail.com

irwan_syarif@patria-artha.ac.id

syamsumarlintaha@gmail.com

Abstract

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi sering terjadi pada jaringan tegangan rendah dengan dominasi pelanggan satu fasa dan dapat menyebabkan meningkatnya arus netral serta rugi-rugi daya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam tingkat ketidakseimbangan beban, mengevaluasi pengaruhnya terhadap efisiensi energi, serta mengukur keberhasilan tindakan penyeimbangan beban pada Gardu Distribusi GLT. AA PT PLN (Persero) ULP Kariango. Penelitian ini menerapkan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan melakukan pengukuran langsung parameter kelistrikan (arus fasa R, S, T, arus netral, tegangan fasa-ke-netral dan faktor daya) pada periode beban puncak siang dan malam hari selama 14 hari pengamatan. Analisis teknis dilakukan dengan membandingkan parameter sebelum dan sesudah pelaksanaan pemindahan beban (phase swapping). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebelum penyeimbangan, tingkat ketidakseimbangan beban mencapai 25,33% pada beban puncak malam hari, yang menyebabkan meningkatnya arus netral sebesar 45,6 A dan rugi-rugi daya konduktor netral sebesar 1,684 kW (1,72% dari kapasitas terpasang). Setelah dilakukan pekerjaan penyeimbangan beban, tingkat ketidakseimbangan beban mengalami penurunan signifikan sebesar 22,53% menjadi hanya 2,80%. Arus netral tereduksi menjadi 19,6 A dan rugi-rugi daya netral berhasil ditekan menjadi 0,311 kW (penurunan rugi-rugi daya sebesar 1,373 kW). Penurunan rugi-rugi ini berkontribusi langsung pada peningkatan keandalan trafo, penurunan suhu belitan, serta penghematan energi listrik tahunan yang signifikan bagi penyedia layanan tenaga listrik.

Kata kunci: penyeimbangan beban, transformator distribusi, ketidakseimbangan beban, arus netral.

A. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan kawasan pemukiman, serta perluasan sektor industri dan UMKM. PT PLN (Persero) sebagai penyedia tunggal layanan ketenagalistrikan nasional dituntut untuk senantiasa menjaga keandalan, efisiensi, dan kualitas daya

listrik yang disalurkan kepada konsumen. Dalam struktur sistem tenaga listrik, jaringan distribusi merupakan gardu terdepan yang berhubungan langsung dengan pelanggan akhir.

Sistem distribusi tenaga listrik dikelompokkan menjadi dua bagian utama, yaitu Jaringan Tegangan Menengah (JTM) beroperasi pada tegangan 20 kV dan

Jaringan Tegangan Rendah (JTR) yang beroperasi pada tegangan nominal 220/380 V. Transformator distribusi bertindak sebagai komponen pembatas sekaligus pengubah tegangan dari 20 kV menjadi 220/380 V sistem 3-fasa 4-kawat.

Salah satu permasalahan teknis utama yang sering dijumpai pada operasi JTR adalah ketidakseimbangan beban (load unbalance) pada transformator distribusi. Kondisi ketidakseimbangan ini umumnya disebabkan oleh distribusi beban pelanggan satu fasa (220 V) yang tidak merata di antara ketiga fasa R, S, dan T. Selain itu, pola pemakaian listrik pelanggan yang bersifat dinamis dan bervariasi setiap jamnya serta penambahan sambungan pelanggan baru yang tidak teregistrasi dengan perencanaan fasa yang presisi memperparah kondisi ketidakseimbangan tersebut.

Dampak langsung dari ketidakseimbangan beban fasa meliputi munculnya arus listrik yang mengalir pada penghantar netral transformator. Arus netral ini menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya teknis (technical power losses) berupa rugi-rugi tembaga (I^2R) pada konduktor netral dan belitan trafo, pemanasan berlebih (overheating) pada minyak insulation dan isolasi belitan, drop tegangan pada ujung saluran konsumen, serta risiko kerusakan dini pada transformator distribusi.

Di PT PLN (Persero) UP3 Pinrang ULP Kariango, Gardu Distribusi GLT. AA melayani kawasan padat penduduk di Desa Langga. Berdasarkan pemantauan awal rutin, gardu ini menunjukkan indikasi ketidakseimbangan beban yang cukup memprihatinkan terutama pada jam beban puncak (Waktu Beban Puncak / WBP) pukul 18.00–22.00 WITA. Berdasarkan Pedoman Edaran Direksi PT PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014 dan SPLN 1:1995, batas toleransi ketidakseimbangan beban trafo maksimum adalah sebesar 25%. Jika melebihi batas tersebut, tindakan penyeimbangan beban (phase

load balancing) wajib dilaksanakan secara tuntas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat ketidakseimbangan beban fasa sebelum dan sesudah tindakan rekonfigurasi beban, menghitung besarnya arus netral dan rugi-rugi daya yang ditimbulkan, serta menilai dampak ekonomis dan keandalan sistem dari pelaksanaan penyeimbangan beban pada Gardu GLT. AA.

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi listrik berfungsi menyalurkan daya dari gardu induk menuju konsumen akhir. Pada sistem 3-fasa 4-kawat, fasa R, S, dan T membawa tegangan fasa-ke-fasa sebesar 380 Volt, sedangkan tegangan fasa-ke-netral sebesar 220 Volt disalurkan untuk beban pelanggan rumah tangga satu fasa. Keseimbangan arus antara ketiga fasa sangat menentukan kinerja optimal transformator.

2. Konsep Ketidakseimbangan Beban

Suatu sistem 3 fasa dikatakan seimbang sempurna apabila ketiga vektor arus memiliki magnitudo yang sama besar ($|I_R| = |I_S| = |I_T|$) dan terpisah secara simetris oleh sudut fasa 120° listrik. Apabila kondisi ini terpenuhi, maka secara matematis jumlah vektor arus pada titik netral adalah nol ($I_N = 0$).

Namun pada kenyataannya, timbul arus netral akibat ketidaksamaan arus fasa:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \text{ (Persamaan Vektor)}$$

Metode perhitungan koefisien ketidakseimbangan beban dapat dirumuskan dengan menentukan rata-rata arus fasa terlebih dahulu:

$$I_{rata} = (I_R + I_S + I_T) / 3$$

Koefisien pembebanan individual fasa didefinisikan sebagai:

$$a = I_R / I_{rata}$$

$$b = I_S / I_{rata}$$

$$c = I_T / I_{rata}$$

Persentase ketidakseimbangan beban total (% K) dirumuskan sebagai:

$$\% K = [(|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|) / 3] \times 100\%.$$

3. Rugi-rugi Daya (*Power Losses*)

Rugi-rugi daya teknis pada konduktor netral trafo dihitung berdasarkan persamaan Joule-Lenz:

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

Di mana P_N adalah rugi daya pada saluran netral (Watt), I_N adalah arus efektif netral (Ampere), dan R_N adalah resistansi total konduktor netral (Ohm).

Ketika arus tidak seimbang, kuadrat dari arus fasa terbesar mendominasi peningkatan rugi tembaga secara kuadratik, jauh lebih tinggi dibandingkan jika beban yang sama dibagi secara merata di antara ketiga fasa.

4. Standar Mutu dan Batas Toleransi

Standar Nasional Indonesia (SPLN 1:1995) serta rekomendasi internasional IEEE Std 141-1993 menetapkan batasan umum untuk ketidakseimbangan beban pada sistem jaringan distribusi sekunder. Tabel 2.1 merangkum kriteria evaluasi tingkat ketidakseimbangan beban trafo.

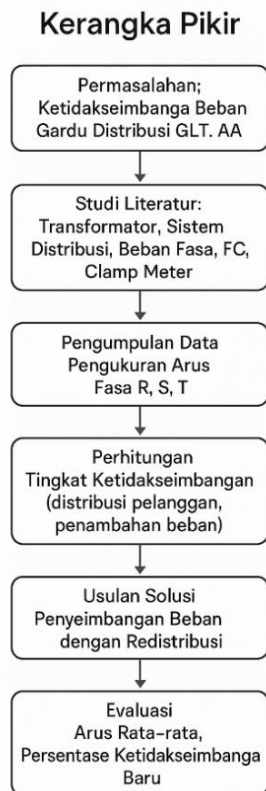
Tabel 2.1. Standar dan Tingkat Kritis Ketidakseimbangan Beban Trafo

Persentase Ketidakseimbangan	Kategori Kinerja	Rekomendasi Tindakan Operasional
< 10%	Sangat Baik (Ideal)	Tidak diperlukan tindakan, pemantauan rutin.
10% - 20%	Baik / Sedang	Evaluasi berkala saat penambahan pelanggan baru.
20% - 25%	Kritis / Batas Toleransi	Perlu dijadwalkan pemeliharaan penyeimbangan.
> 25%	Sangat Kritis (Buruk)	Wajib segera dilakukan tindakan swapping phase.

C. Kerangka Pikir

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi dapat menyebabkan peningkatan arus netral, rugi-rugi daya, pemanasan transformator, serta penurunan kualitas tegangan. Kondisi tersebut berdampak pada menurunnya efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Pada Gardu Distribusi GLT. AA PT PLN (Persero) ULP Kariango ditemukan ketidakseimbangan beban antar fasa. Oleh karena itu, dilakukan analisis melalui pengukuran arus dan tegangan pada setiap fasa, perhitungan persentase ketidakseimbangan, serta evaluasi rugi-rugi daya. Selanjutnya dilakukan penyeimbangan beban (*load balancing*) dengan mendistribusikan kembali beban antar fasa sesuai kondisi di lapangan. Penyeimbangan beban diharapkan dapat menurunkan tingkat ketidakseimbangan, mengurangi arus netral dan rugi-rugi daya, meningkatkan kestabilan tegangan, serta meningkatkan efisiensi dan keandalan

sistem distribusi. Berikut adalah diagram visual kerangka pikir :



D. Metode Penelitian

1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian lapangan dilakukan pada Gardu Distribusi GLT. AA yang berlokasi di Desa Langnga, Kecamatan Mattiro Sompe, Kabupaten Pinrang, di bawah wilayah kerja PT PLN (Persero) UP3 Pinrang ULP Kariango. Pengambilan data empiris dilaksanakan secara berkelanjutan selama 14 hari berturut-turut pada bulan Juli hingga Agustus 2025.

2. Metode Penelitian dan Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif untuk menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi Gardu GLT. AA PT PLN (Persero) ULP Kariango. Pendekatan ini digunakan untuk menggambarkan kondisi pembebanan transformator berdasarkan data hasil pengukuran lapangan, kemudian mengevaluasi

perubahan kondisi sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban.

Penelitian dilaksanakan di Gardu Distribusi GLT. AA yang berada pada wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Kariango. Objek penelitian adalah transformator distribusi tiga fasa beserta sistem jaringan tegangan rendah yang melayani pelanggan pada gardu tersebut. Data yang digunakan merupakan data pengukuran arus beban masing-masing fasa (R, S, dan T) serta arus penghantar netral pada kondisi beban puncak. Selain itu, digunakan data teknis transformator dan data historis pembebanan sebagai pendukung analisis.

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan, pengukuran langsung menggunakan True RMS Clamp Meter, dokumentasi kondisi gardu distribusi, serta pengambilan data teknis dari PT PLN (Persero). Pengukuran dilakukan pada masing-masing fasa transformator untuk memperoleh nilai arus aktual yang kemudian digunakan dalam perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi-rugi daya pada penghantar netral.

Analisis data dilakukan dengan beberapa tahapan, yaitu:

1. Menghitung arus rata-rata dari ketiga fasa transformator.
2. Menghitung persentase ketidakseimbangan beban berdasarkan selisih arus tiap fasa terhadap arus rata-rata.
3. Menghitung rugi-rugi daya (power losses) akibat arus yang mengalir pada penghantar netral.
4. Melakukan penyeimbangan beban (*load balancing*) melalui redistribusi pelanggan satu fasa dari fasa yang memiliki beban tinggi ke fasa dengan beban lebih rendah.
5. Membandingkan nilai ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi-rugi daya sebelum dan sesudah penyeimbangan beban untuk

mengevaluasi efektivitas tindakan perbaikan.

Keberhasilan penyeimbangan beban dievaluasi berdasarkan penurunan persentase ketidakseimbangan beban, berkurangnya arus netral, serta penurunan rugi-rugi daya pada penghantar netral. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan standar operasional PT PLN (Persero) dan ketentuan SPLN mengenai batas ketidakseimbangan pembebanan transformator distribusi sebagai dasar penarikan kesimpulan penelitian.

3. Populasi dan Sampel

1) Populasi

Populasi pada penelitian ini ialah seluruh trafo distribusi tiga fasa yang berada dalam lingkup operasional PT PLN (Persero) ULP Kariango.

2) Sampel

Sampel yang digunakan adalah satu unit trafo distribusi tiga fasa pada Gardu GLT. AA PT PLN (Persero) ULP Kariango di Desa Langnga Kecamatan Mattiro Sompe Kabupaten Pinrang yang menunjukkan indikasi ketidakseimbangan beban berdasarkan data monitoring internal PLN.

4. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif berdasarkan hasil pengukuran arus beban pada masing-masing fasa (R, S, dan T) transformator distribusi Gardu GLT. AA PT PLN (Persero) ULP Kariango. Tahapan analisis meliputi perhitungan beban tiap fasa, analisis tingkat ketidakseimbangan beban, pelaksanaan penyeimbangan beban (*load balancing*), serta evaluasi hasil penyeimbangan.

Beban tiap fasa dihitung berdasarkan hasil pengukuran arus menggunakan Clamp Meter dan dikonversi menjadi daya semu menggunakan Persamaan (1).

$$S = V \times I$$

Di mana :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Tingkat ketidakseimbangan beban dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$\% \text{ketidakseimbangan} = \frac{I_{maks} - I_{min}}{I_{rata-rata}} \times 100\%$$

Di mana :

I_{maks} = Arus tertinggi di antara fasa R, S, dan T

I_{min} = Arus terendah di antara fasa R, S, dan T

$I_{rata-rata}$ = Nilai rata – rata dari ketiga fasa

Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan standar SPLN 1:1995 dan IEEE Std. 141-1993 untuk menentukan tingkat ketidakseimbangan beban

Selanjutnya dilakukan penyeimbangan beban dengan meredistribusikan pelanggan dari fasa yang memiliki beban terbesar ke fasa yang bebannya lebih rendah. Efektivitas penyeimbangan dievaluasi dengan membandingkan nilai ketidakseimbangan beban sebelum dan sesudah redistribusi. Penyeimbangan dinyatakan berhasil apabila persentase ketidakseimbangan berada di bawah batas yang ditetapkan oleh standar yang digunakan.

E. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Spesifikasi Teknis Gardu GLT. AA

Gardu Distribusi GLT. AA menggunakan transformator tipe pole-mounted dengan spesifikasi teknis sebagai berikut:

- Merek / Model: SINTRA / Hermetik 3-Fasa Out Door
- Daya Nominal Trafo (S_N): 100 kVA
- Tegangan Primer / Sekunder: 20.000 V / 400 - 230 V
- Arus Nominal Sisi Sekunder (I_{FL}): 144,38 A
- Frekuensi / Vektor Group: 50 Hz / Dyn11
- Impedansi Trafo (%e): 4,0%
- Tahanan Penghantar Netral (R_N): 0,81 Ohm

- Panjang Saluran Utama JTR: 1,2 kms
(Kabel Twisted AL 3x70 + 1x50 mm²)

2. Profil Beban Sebelum Penyeimbangan (Pre-Balancing)

Data pengukuran arus fasa dan tegangan pada kondisi Beban Puncak Malam (18.00 WITA) sebelum dilakukan pemindahan beban disajikan secara detail pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Data Hasil Pengukuran Parameter Kelistrikan Sebelum Penyeimbangan

Parameter Kelistrikan	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral (N)
Arus Efektif (A)	71,7 A	103,0 A	49,1 A	45,6 A
Tegangan Fasa-Netral (V)	233,1 V	231,5 V	233,3 V	0,0 V
Faktor Daya (Cos ϕ)	0,88	0,87	0,89	-
Daya Semu (kVA)	16,7 kVA	23,8 kVA	11,5 kVA	-
Daya Aktif (kW)	16,4 kW	23,4 kW	11,2 kW	-

Dari data Tabel 5.1, dilakukan perhitungan parameter sistem sebagai berikut:

1. Arus Rata-Rata Fasa (I_{rata}):

$$I_{rata} = (71,7 + 103,0 + 49,1) / 3 = 74,60 \text{ A}$$
2. Persentase Pembebanan Trafo:

$$\% \text{ Pembebanan} = (I_{rata} / I_{nominal}) \times 100\% = (74,60 / 144,38) \times 100\% = 51,67\%$$
3. Koefisien Ketidakseimbangan Fasa:

$$a = 71,7 / 74,60 = 0,961$$

$$b = 103,0 / 74,60 = 1,380$$

$$c = 49,1 / 74,60 = 0,659$$
4. Persentase Ketidakseimbangan Beban (% K) :

$$\% K = [(|0,961 - 1| + |1,380 - 1| + |0,659 - 1|) / 3] \times 100\%$$

$$\% K = [(0,039 + 0,380 + 0,341) / 3] \times 100\% = 25,33\%$$

5. Rugi Daya pada Konduktor Netral (P_N):

$$P_N = I_N^2 \times R_N = (45,6)^2 \times 0,81 = 2.079,36 \times 0,81 = 1.684,28 \text{ Watt} = 1,684 \text{ kW}$$

6. Rasio Rugi Netral terhadap Daya Aktif Trafo :

$$\text{Total Daya Aktif } (P_{total}) = 16,4 + 23,4 + 11,2 = 51,0 \text{ kW}$$

$$\text{Persentase Rugi Netral} = (1,684 / 51,0) \times 100\% = 3,30\% \text{ dari daya aktif tersalurkan.}$$

Analisis Kondisi Awal :

Nilai ketidakseimbangan beban sebesar 25,33% secara eksplisit melampaui ambang batas toleransi maksimum SPLN 1:1995 (25%). Fasa S memikul beban sangat dominan (103,0 A) dibandingkan fasa T yang hanya memikul 49,1 A (selisih mencapai 53,9 A). Hal ini memicu mengalirnya arus netral sebesar 45,6 A yang sangat tinggi dan menyebabkan rugi-rugi daya sebesar 1,684 kW dalam bentuk panas pada konduktor netral.

3. Pelaksanaan Penyeimbangan Beban (Swapping Phase)

Untuk menyeimbangkan beban, dilakukan perencanaan rekonfigurasi fasa pelanggan pada tiang distribusi No. 3, 5, dan 8 JTR Gardu GLT. AA. Target utama adalah memindahkan sebagian beban fasa S sebesar ~28 A menuju fasa T, serta penyesuaian beban kecil fasa T ke fasa R. Pelaksanaan teknis swapping phase dilakukan oleh 4 orang personil teknis PLN ULP Kariango pada tanggal 25 Juli 2025 pukul 10.00–12.00 WITA dengan prosedur padam terencana (manuver pemeliharaan). Setiap sambungan rumah yang dipindah dipisahkan dan di-crimping ulang menggunakan Compression Connector (CCO) berkualitas tinggi yang

dibungkus selongsong heatshrink untuk menjamin tahanan kontak minimal.

4. Profil Beban Setelah Penyeimbangan (Post Balancing)

Setelah pekerjaan rekonfigurasi selesai dan sistem beroperasi kembali, dilakukan pengukuran ulang parameter kelistrikan pada kondisi beban puncak malam hari (18.00 WITA). Data hasil pengukuran pasca penyeimbangan ditampilkan pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2. Data Hasil Pengukuran Parameter Kelistrikan Setelah Penyeimbangan

Parameter Kelistrikan	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral (N)
Arus Efektif (A)	80,7 A	76,0 A	75,6 A	19,6 A
Tegangan Fasa-Netral (V)	231,8 V	230,5 V	232,8 V	0,0 V
Faktor Daya (Cos ϕ)	0,89	0,88	0,89	-
Daya Semu (kVA)	18,7 kVA	17,5 kVA	17,5 kVA	-
Daya Aktif (kW)	18,3 kW	17,2 kW	17,2 kW	-

Dari data Tabel 5.2, dilakukan perhitungan komparatif pasca penyeimbangan:

1. Arus Rata-Rata Fasa Baru (I_{rata}):

$$I_{rata} = (80,7 + 76,0 + 75,6) / 3 = 77,43 \text{ A}$$
2. Persentase Pembebanan Trafo Baru:

$$\% \text{ Pembebanan} = (77,43 / 144,38) \times 100\% = 53,63\%$$
3. Koefisien Ketidakseimbangan Fasa Baru:

$$a = 80,7 / 77,43 = 1,042$$

$$b = 76,0 / 77,43 = 0,982$$

$$c = 75,6 / 77,43 = 0,976$$

4. Persentase Ketidakseimbangan Beban Baru (% K):

$$\% K = [(|1,042 - 1| + |0,982 - 1| + |0,976 - 1|) / 3] \times 100\%$$

$$\% K = [(0,042 + 0,018 + 0,024) / 3] \times 100\% = (0,084 / 3) \times 100\% = 2,80\%$$

5. Rugi Daya Baru pada Konduktor Netral (P_N):

$$P_N = I_N^2 \times R_N = (19,6)^2 \times 0,81 = 384,16 \times 0,81 = 311,17 \text{ Watt} = 0,311 \text{ kW}$$

6. Efisiensi Penurunan Rugi Daya Netral (ΔP_N):

$$\Delta P_N = P_{N \text{ sebelum}} - P_{N \text{ sesudah}} = 1,684 \text{ kW} - 0,311 \text{ kW} = 1,373 \text{ kW} \text{ (Penghematan sebesar 81,53\%)}$$

5. Evaluasi Komparatif dan Diskusi Teknis

Untuk memudahkan perbandingan hasil sebelum dan sesudah penyeimbangan beban pada Gardu GLT. AA, disajikan Tabel 5.3.

Tabel 5.3. Evaluasi Komparatif Parameter Kelistrikan Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan

Parameter Analisis	Sebelum Penyeimbangan	Sesudah Penyeimbangan	Selisih Perubahan	Persentase Perubahan
Arus Fasa R (A)	71,7 A	80,7 A	+9,0 A	+12,55%
Arus Fasa S (A)	103,0 A	76,0 A	-27,0 A	-26,21%
Arus Fasa T (A)	49,1 A	75,6 A	+26,5 A	+53,97%

Arus Netral I _N (A)	45,6 A	19,6 A	- 26,0 A	- 57,0 2%
Rata-rata Arus Fasa (A)	74,60 A	77,43 A	+2,8 3 A	+3,7 9%
Pembebanan Trafo (%)	51,67 %	53,63 %	+1,9 6%	+3,7 9%
Ketidakseimbangan (%) K)	25,33 %	2,80%	- 22,5 3%	- 88,9 5%
Rugi Daya Netral P _N (kW)	1,684 kW	0,311 kW	- 1,37 3 kW	- 81,5 3%

Diskusi Teknis:

1. Penurunan Ketidakseimbangan Beban: Tingkat ketidakseimbangan beban berhasil ditekan secara drastis dari 25,33% menjadi 2,80%. Angka 2,80% berada jauh di bawah ambang batas toleransi standar ideal (10%), menandakan bahwa distribusi beban fasa R, S, dan T pada Gardu GLT. AA kini berada dalam kondisi sangat seimbang.
2. Reduksi Arus Netral: Arus yang mengalir pada kawat netral mengalami penurunan sebesar 57,02% dari 45,6 A menjadi 19,6 A. Sisa arus netral 19,6 A yang masih terukur salah satu faktor yang dapat menyebabkan arus netral masih tersisa adalah adanya beban nonlinier yang berpotensi menghasilkan harmonisa.
3. Penghematan Energi dan Rugi Daya: Tindakan penyeimbangan berhasil mengurangi rugi-rugi daya sebesar

1,373 kW. Jika diasumsikan waktu beban puncak berlangsung rata-rata 5 jam per hari, maka penghematan energi teknis harian adalah :

Ehemat harian = $1,373 \text{ kW} \times 5 \text{ jam} = 6,865 \text{ kWh/hari}$

Secara tahunan, total energi listrik yang berhasil diselamatkan mencapai:

Ehemat tahunan = $6,865 \text{ kWh} \times 365 \text{ hari} = 2.505,72 \text{ kWh/tahun}$

6. Pembahasan

Hasil penelitian pada gardu distribusi GLT. AA menunjukkan bahwa sebelum penyeimbangan, tingkat ketidakseimbangan beban transformator tergolong tinggi, yaitu 25,33%. Kondisi ini memicu munculnya arus netral sebesar 45,6 A dan rugi-rugi daya sebesar 1,684 kW (1,72%). Setelah dilakukan redistribusi beban antar fasa, kondisi sistem membaik secara signifikan. Tingkat ketidakseimbangan beban berhasil diturunkan menjadi 2,8%, yang berdampak pada penurunan arus netral menjadi 19,6 A serta penekanan rugi-rugi daya menjadi 0,311 kW (0,32%).

Penurunan ini membuktikan bahwa penyeimbangan beban efektif meningkatkan efisiensi sistem distribusi. Temuan ini sejalan dengan Sya'roni dan Rijanto (2019) yang menyatakan bahwa ketidakseimbangan beban merupakan faktor utama meningkatnya arus netral dan rugi-rugi daya. Selain itu, kondisi pascapenyeimbangan (2,8%) telah memenuhi kriteria ideal berdasarkan standar SPLN 1:1995 dan IEEE Std 141-1993 yang menetapkan batas ideal ketidakseimbangan $\leq 10\%$ dan batas maksimum $\leq 25\%$. Dengan demikian, penyeimbangan dan monitoring beban secara berkala sangat krusial untuk menjaga performa, efisiensi, dan keandalan transformator distribusi.

F. Kesimpulan

1. Ketidakseimbangan beban sebesar **25,33%** pada trafo distribusi GLT. AA (arus R = 71,7 A, S = 103 A, T = 49,1 A) disebabkan oleh ketidakmerataan distribusi pelanggan rumah tangga 1-fasa serta penambahan beban yang tidak tertata.
2. Kondisi tidak seimbang tersebut berdampak teknis pada munculnya arus netral sebesar **45,6 A**, rugi-rugi daya penghantar netral sebesar **1,684 kW**, potensi pemanasan berlebih pada belitan trafo, penurunan efisiensi, dan penurunan kualitas tegangan pelanggan.
3. Penyeimbangan beban melalui redistribusi sambungan pelanggan terbukti efektif meningkatkan efisiensi sistem. Pascapenyeimbangan, tingkat ketidakseimbangan berhasil diturunkan menjadi **2,8%**, arus netral berkurang menjadi **19,6 A**, dan rugi-rugi daya berkurang menjadi **0,311 kW**.

REFERENSI

- [1] Arismunandar, A., & Kuwahara, S. (1974). *Buku pegangan teknik tenaga listrik*. Association for International Technical Promotion.
- [2] As, M. A. A., Wina, W. W., & Asep, A. I. H. (2021). Sistem Informasi Pemeliharaan Jaringan Distribusi di PT. PLN (Persero) Area Kabupaten Garut. *Indonesian Journal of Informatic Research and Software Engineering (IJIRSE)*, 1(2), 96–104.
- [3] Cooper, C. B. (1987). IEEE recommended practice for electric power distribution for industrial plants. *Electronics and Power*, 33(10), 658.
- [4] Darwanto, A. (2021). Analisis Ketidak Seimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Di PT. PLN (Persero) Rayon Cepu. *SIMETRIS*, 15(1), 35–42.
- [5] Haidir, L. H., Sultan, A. R., & Salim, A. (2019). *Optimalisasi Pembebanan Transformator Distribusi 20 KV dengan Penyeimbangan Beban pada Penyulang Hertasning*.
- [6] Hariswanda, Y., & Anshory, I. (n.d.). *Maintenance of 20 kV SUTM Distribution Network System (ROSE Feeder) at PT. PLN ULP Krian Analisis Pemeliharaan Jaringan Distribusi SUTM 20 kV di Area PT. PLN ULP Krian*.
- [7] Hidayat, S., Legino, S., Fatimah Mulyanti, N., Elektro, T., Kunci, K., Tegangan Rendah, J., Distribusi, G., & Beban, P. (2018). Penyeimbangan Beban Pada Jaringan Tegangan Rendah Gardu Distribusi Cd 33 Penyulang Sawah Di Pt Pln (Persero) Area Bintaro. *Jurnal Sutet*, 8(1), 21–27.
- [8] Indonesia, S. N., & Nasional, B. S. (2000). Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000). *Badan Standardisasi Nasioanal, ICS*, 91, 50.
- [9] Indrawan, A. W., Syarifuddin, S., Purwito, P., A.R4, A., Sultan, A. R., & Ilahi, A. (2021). Penyeimbang Beban pada Gardu Distribusi dengan Metode Fuzzy Logic di Penyulang Lanosi ULP Tomoni PT.PLN (Persero). *Jurnal Teknologi Elekterika*, 5(2), 82. <https://doi.org/10.31963/elekterika.v5i2.3411>
- [10] Kadir, A. (2000). Distribusi dan utilisasi tenaga listrik. *Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta*.
- [11] Kartika, I. P. G., Wijaya, I. K., & Mataram, I. M. (2018). Analisis Beban Takseimbang Terhadap Rugi-Rugi Daya Dan Efisiensi Transformator KI0005 Jaringan Distribusi Sekunder Pada Penyulang Klungkung. *J. SPEKTRUM*, 5(2), 310.
- [12] Kuantitatif, P. P. (2016). Metode penelitian kunatitatif kualitatif dan R&D. *Alfabeta, Bandung*.
- [13] Malik, N., Zuhajji, Z., & Wahidah, N. (2022). Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Rugi-Rugi Daya Listrik Pada Jaringan Distribusi Primer DI PT. PLN (Persero) UP3 Makassar Utara. *Jurnal*

Media Elektrik, 19(3), 149–159.

- [14] Marsudi, D. (2005). *Pembangkitan energi listrik*. Jakarta: Erlangga.
- [15] Marsudi, D. (2006). *Operasi sistem tenaga listrik*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 8.
- [16] NUR, H. (2022). *PEMELIHARAAN GARDU DISTRIBUSI DI PT PLN (PERSERO) ULP DEPOK KOTA*.
- [17] Pln, P. T. (2010). *Buku 1 Kriteria Disain Enjineriing Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*. Jakarta Selatan: PT PLN (Persero).
- [18] PLN, P. T. (2010a). *Buku 4 Standar konstruksi gardu distribusi dan gardu hubung tenaga listrik*. Jakarta Selatan: PT PLN (Persero).
- [19] PLN, P. T. (2010b). *Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik*. Jakarta PT. PLN.
- [20] Quality, I. P. (1995). *IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*.
- [21] Rijono, Y. (1997). *Dasar teknik tenaga listrik*.
- [22] Rusliadi, R., La Elo, Y., Husnah, N., & Lembang, N. (2023). Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi 20 KV pada Gardu Distribusi Tipe BBD Kampung Tanama PT PLN (Persero) ULP Fakfak. *Jurnal Informasi, Sains Dan Teknologi*, 6(02), 56–68.
- [23] Simatupang, H. M. T., & Dewanto, Y. (2024). Pengaruh panjang jaringan tegangan rendah terhadap susut teknis di pt pln daerah cawang. *JURNAL TEKNOLOGI INDUSTRI*, 13(1).
- [24] Stevenson, W. D. (1955). *Elements of power system analysis*. McGraw-Hill.
- [25] Sukmadi, T., & Winardi, B. (2009). Perhitungan Dan Analisis Keseimbangan Beban Pada Sistem Distribusi 20 Kv Terhadap Rugi-Rugi Daya (Studi Kasus Pada Pt. Pln Upj Slawi). *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 11(1), 47–52.
- [26] Suswanto, D. (2009). *Sistem distribusi tenaga listrik*. Padang: Universitas Negeri Padang.
- [27] Sya'roni, Z., & Rijanto, T. (2019). Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20 kV. *Teknik Elektro*, 8(1), 173–180.
- [28] Syarif, I. (2017). *Pemanfaatan Hibrid Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Angin Di Pulau Bunaken*.
- [29] Tanjung, A. (2012). Analisis Sistem Distribusi 20 kV Untuk Memperbaiki Kinerja Dan Keandalan Sistem Distribusi Menggunakan Electrical Transient Analysis Program. *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi Dan Industri*.
- [30] Wibowo, R., Siswanto, W., & Samosir, P. (2010). *Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik*. PT. PLN, 3–4.
- [31] Wrahatnolo, T. (2008). *Teknik Distribusi Tenaga Listrik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.