

Analisis Ketidakseimbangan Beban terhadap Kerugian Daya pada Transformator Distribusi 20 kV Menggunakan Software ETAP

Maulana Muslimin*, Agung Trihasto, Deria Pravitasari, Andriyatna Agung Kurniawan

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar
Jl. Kapten Suparman No.39, Potrobangsari, Kec. Magelang Utara, Kota Magelang, Jawa Tengah 56116
E-mail: maulanamuslimin26@students.untidar.ac.id

Naskah Masuk: 06 Januari 2026; Diterima: 19 Januari 2026; Terbit: 31 Maret 2026

ABSTRAK

Abstrak - Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi dapat menyebabkan peningkatan arus netral dan rugi daya, sehingga menurunkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik. Kondisi ini ditemukan pada enam transformator distribusi 20 kV di Penyulang SGN 04 Magelang, dengan tingkat ketidakseimbangan awal mencapai 23,02% pada M1-35A-2A, 22,7% pada M1-44-26-4-A, 12,79% pada M1-44-34, dan tertinggi 54,33% pada M1-44-9. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan rugi daya serta mengevaluasi efektivitas metode penyeimbangan melalui relokasi beban antar fasa. Metode yang digunakan meliputi pengukuran arus beban selama lima hari, perhitungan komponen simetris menggunakan GNU Octave, serta simulasi Unbalanced Load Flow pada perangkat lunak ETAP untuk memvalidasi hasil perhitungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban memiliki dampak signifikan terhadap rugi daya, ditunjukkan dengan arus netral awal mencapai 148,142 A pada M1-44-9 dan rugi daya hingga 21,0245 kW. Setelah penyeimbangan beban diterapkan, seluruh transformator menunjukkan peningkatan signifikan dengan nilai ketidakseimbangan menurun menjadi <3%, misalnya M1-35A-2A menjadi 1,33%, M1-44-31 menjadi 1,35%, dan M1-44-9 menjadi 0,45%. Selain itu, arus netral menurun, seperti pada M1-44-9 dari 148,14 A menjadi 11,84 A, dan rugi daya hanya tersisa 0,0068–0,1343 kW. Dengan demikian, strategi relokasi beban terbukti efektif dalam menurunkan ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi daya sesuai SPLN 17:2014 serta meningkatkan stabilitas sistem distribusi.

Kata kunci : Ketidakseimbangan Beban, Transformator Distribusi, Rugi Daya, ETAP, GNU Octave.

ABSTRACT

Abstract - Load imbalance in distribution transformers can lead to an increase in neutral current and power losses, thereby reducing the efficiency of the electric power distribution system. This condition was identified in six 20 kV distribution transformers on the SGN 04 feeder in Magelang, with initial load imbalance levels of 23.02% at M1-35A-2A, 22.7% at M1-44-26-4-A, 12.79% at M1-44-34, and the highest value of 54.33% at M1-44-9. This study aims to analyze the effect of load imbalance on neutral current and power losses and to evaluate the effectiveness of load balancing through inter-phase load relocation. The methods employed include load current measurements conducted over five days, symmetrical component calculations using GNU Octave, and Unbalanced Load Flow simulations using ETAP software to validate the calculation results. The results show that load imbalance has a significant impact on power losses, as indicated by an initial neutral current of up to 148.142 A at transformer M1-44-9 and power losses reaching 21.0245 kW. After load balancing was implemented, all transformers exhibited significant improvement, with load imbalance values reduced to below 3%, for example, M1-35A-2A decreased to 1.33%, M1-44-31 to 1.35%, and M1-44-9 to 0.45%. In addition, the neutral current was significantly reduced, such as at M1-44-9, where it decreased from 148.14 A to 11.84 A, and the remaining power losses were only in the range of 0.0068–0.1343 kW. Therefore, the load relocation strategy is proven to be effective in reducing load imbalance, neutral current, and power losses in accordance with SPLN 17:2014, while also improving the stability of the distribution system.

Keywords : Load Imbalance, Distribution Transformer, Power Loss, ETAP, GNU Octave.

Copyright © 2026 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang berfungsi untuk menghasilkan dan menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit melalui jaringan listrik hingga sampai ke pusat beban [1]. Sementara itu, jaringan distribusi tenaga listrik berfungsi menyalurkan daya dari pembangkit atau gardu induk ke konsumen akhir. Tidak seperti jaringan transmisi, jaringan distribusi beroperasi pada tegangan menengah

yang menyebabkan penurunan tegangan lebih besar, sehingga menjadi bagian sistem yang langsung terhubung dengan beban.

Salah satu komponen penting dalam sistem distribusi adalah transformator distribusi. Transformator distribusi merupakan komponen penting yang menghubungkan sumber listrik dengan konsumen untuk memastikan penyaluran daya tetap efisien. Namun, transformator sering mengalami masalah operasional, terutama kerugian daya akibat ketidakseimbangan beban yang muncul karena distribusi beban antar fasa tidak merata. Kondisi ini dapat menurunkan kinerja sistem, merusak transformator, dan mengganggu kestabilan suplai Listrik [2].

Ketidakeimbangan beban terjadi ketika pembagian beban antar fasa (R, S, dan T) tidak merata, sehingga menimbulkan arus pada penghantar netral yang menyebabkan rugi-rugi daya [3]. Rugi daya dalam sistem distribusi dapat dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti jarak saluran yang panjang, ketidakseimbangan beban, dan kualitas sambungan. Meskipun pembagian beban awalnya direncanakan seimbang, perbedaan waktu pemasangan dan pola penggunaan energi dapat memicu ketidakseimbangan yang berdampak buruk pada keandalan penyaluran daya listrik [4].

Penyulang SGN 04 di wilayah Magelang Kota memiliki karakteristik beban yang beragam dari sektor rumah tangga, komersial, dan industri kecil, sehingga transformator pada penyulang ini sangat rentan mengalami ketidakseimbangan beban. Ketidakseimbangan terjadi akibat distribusi beban antar fasa yang tidak merata karena sebagian besar pelanggan hanya terhubung pada satu atau dua fasa, sehingga satu fasa menanggung beban lebih besar, arus netral meningkat, dan rugi daya bertambah. Kondisi ini dapat menurunkan efisiensi sistem dan mempercepat kerusakan transformator [5].

Hasil pengukuran pada Juli 2025 menunjukkan tingkat ketidakseimbangan yang bervariasi, yaitu 23,02% pada Gardu M1-35A-2A, 22,7% pada Gardu M1-44-26-4-A, 4,20% pada Gardu M1-44-18-1, 12,79% pada Gardu M1-44-34, dan 54,33% pada Gardu M1-44-9. Data tersebut menegaskan bahwa ketidakseimbangan pada Penyulang SGN 04 masih tergolong tinggi sehingga perlu dilakukan analisis lanjutan untuk menurunkannya sesuai standar.

Penelitian yang dilakukan oleh [6] menyatakan bahwa semakin besar ketidakseimbangan beban, maka arus netral dan rugi daya akan semakin meningkat, sementara SPLN No.17 Tahun 2014 menetapkan batas rugi daya yang baik di bawah 10%. [3] juga menegaskan bahwa efisiensi transformator meningkat apabila rugi daya dapat ditekan. Penelitian yang dilakukan [7] pada trafo distribusi MH 196 menggunakan ETAP 19 menunjukkan ketidakseimbangan beban hingga 51,23% dan 57,66% serta arus netral mencapai 118,81 A, jauh melebihi batas standar, sehingga diperlukan pemerataan beban dan pemantauan rutin.

Melihat pentingnya pemerataan beban pada fasa yang tidak seimbang, diperlukan analisis ketidakseimbangan beban terhadap kerugian daya pada transformator di Penyulang SGN 04 menggunakan perangkat lunak yang mampu memodelkan kondisi jaringan secara akurat. ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) dipilih karena mampu mensimulasikan aliran daya dan kondisi ketidakseimbangan secara detail, meskipun hasil perhitungan komponen simetris di dalamnya tidak dapat ditelusuri secara rinci. Oleh karena itu, penelitian ini menggabungkan simulasi ETAP dengan perhitungan komponen simetris menggunakan GNU Octave untuk memverifikasi hasil dan memberikan analisis ketidakseimbangan yang lebih menyeluruh dan transparan

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1. Transformator

Transformator adalah perangkat listrik untuk mentransfer energi antara dua rangkaian melalui induksi elektromagnetik dan berfungsi menaikkan atau menurunkan tegangan berdasarkan jumlah lilitan pada kumparan primer dan sekunder [3].

2.2. Transformator Distribusi

Transformator distribusi berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan primer 20 kV menjadi 400/230 V untuk digunakan konsumen [8]. Bentuk transformator distribusi ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Transformator Distribusi

2.3. Pembebanan Transformator

Daya transformator pada sisi tegangan tinggi (primer) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (1)$$

Arus beban penuh (full load current) adalah arus maksimum yang dapat ditanggung oleh transformator tanpa melebihi kapasitasnya. Arus ini dihitung menggunakan persamaan:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (2)$$

Keterangan :

I_{FL} = Arus (A)
S = Daya Trafo (kVA)
V = Tegangan (V)

S adalah daya trafo (kVA) dan V merupakan tegangan fasa-ke-fasa [3]. Pembebanan transformator harus dijaga agar tidak melebihi kapasitas untuk menjaga efisiensi. Persentase pembebanan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [9].

$$\% b = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Keterangan :

%b = Persentase pembebanan (%)
 I_{FL} = Arus (A)
 $I_{rata-rata}$ = Arus rata-rata (A)
V = Tegangan (V)

2.4. Standar Pembebanan Transformator

Untuk menjaga kinerja dan keandalan transformator distribusi, diperlukan standar penilaian kondisi operasional berdasarkan tingkat pembebanan. Di Indonesia, acuan yang digunakan adalah Surat Edaran PT PLN No.17 Tahun 2014, yang mengelompokkan kondisi trafo berdasarkan ketidakseimbangan beban, arus netral, dan persentase pembebanan [10]. Rincian standar tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

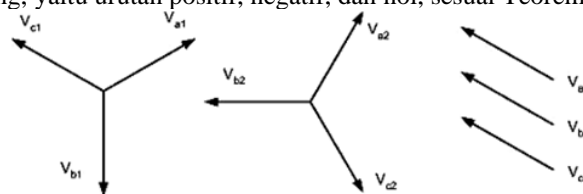
Tabel 1. Standar Pembebanan Transformator Menurut Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No.17 Tahun 2014

| Kelompok Karakteristik | Karakteristik | Indeks Kesehatan | | | |
|----------------------------|---|------------------|------------|-------------|-------|
| | | Baik | Cukup | Kurang | Buruk |
| Pembacaan dan Profil Beban | Ketidakseimbangan arus antar fasa | <10% | 10% - <20% | 20% - <25% | ≥25% |
| | Besar Arus Netral (% Terhadap arus beban trafo) | <10% | 10% - <20% | 15% - <20% | ≥20% |
| | Pembebanan trafo (% terhadap kapasitas) | <10% | 60% - <80% | 80% - <100% | ≥100% |

Tabel 1 menunjukkan standar PT PLN No.17 Tahun 2014 menjadi acuan penilaian kondisi trafo berdasarkan keseimbangan beban, arus netral, dan pembebanan.

2.5. Komponen Simetris

Komponen simetris digunakan untuk menganalisis sistem tenaga yang tidak seimbang, misalnya saat terjadi gangguan hubung singkat. Metode ini memecah sistem tiga fasa yang tidak seimbang menjadi tiga rangkaian seimbang, yaitu urutan positif, negatif, dan nol, sesuai Teorema Fortescue [11].



Gambar 2. Tiga Himpunan fasor seimbang yang merupakan komponen simetris dari tiga fasor tak seimbang

Pada komponen simetris, digunakan operator rotasi 120° berlawanan arah jarum jam yang direpresentasikan sebagai bilangan kompleks bernilai $1 \angle 120^\circ$, seperti ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Fungsi Operator α

| Pangkat Fungsi | Bentuk dalam kutub | Bentuk dalam kutub |
|----------------|--|--------------------|
| α | $1 \angle 120^\circ$ | $-0,5 + j 0,866$ |
| α^2 | $1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ$ | $-0,5 - j 0,866$ |
| α^3 | $1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ$ | $1,0 + j 0,0$ |

Berdasarkan Tabel 2, setelah ketiga komponen simetris didefinisikan, hubungan matematis antara fasor dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I_R = I_1 + I_2 + I_0 \quad (4)$$

$$I_S = \alpha^2 I_1 + \alpha I_2 + I_0 \quad (5)$$

$$I_T = \alpha I_1 + \alpha^2 I_2 + I_0 \quad (6)$$

Setelah urutan positif, negatif, dan nol ditentukan, arus urutan dapat dihitung dengan cara yang sama, sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_R + \alpha I_S + \alpha^2 I_T) \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_R + \alpha^2 I_S + \alpha I_T) \quad (8)$$

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_R + I_S + I_T) \quad (9)$$

Keterangan :

- I_1 = Arus urutan positif (A)
- I_2 = Arus urutan negatif (A)
- I_0 = Arus urutan nol (A)
- α = $1 \angle 120^\circ$ atau $-0,5 + j 0,866$

Pada sistem tiga fasa empat kawat, arus netral merupakan hasil penjumlahan vektor arus ketiga fasa. Arus ini muncul ketika beban antar fasa tidak seimbang atau akibat harmonisa dari beban *non-linear*. Dengan metode komponen simetris, hubungan antara ketidakseimbangan beban dan arus netral dapat dianalisis: jika beban seimbang, arus netral bernilai nol, sedangkan semakin besar ketidakseimbangan beban, semakin besar arus netral yang mengalir. Secara matematis dinyatakan sebagai berikut:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad (10)$$

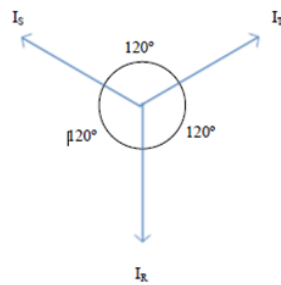
$$I_N = 3I_0 \quad (11)$$

Keterangan :

- I_N = Arus Netral (A)
- I_R = Arus di fasa R (A)
- I_S = Arus di fasa S (A)
- I_T = Arus di fasa T (A)
- I_0 = Arus urutan nol (A)

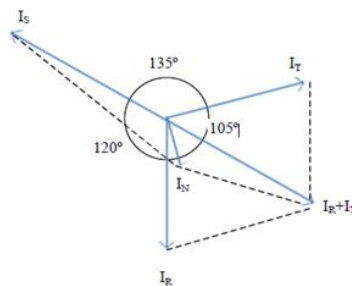
2.6. Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan terjadi ketika terdapat perbedaan nilai atau sudut pada salah satu atau seluruh fasa transformator. Suatu sistem dikatakan seimbang apabila arus ketiga fasa (R, S, T) memiliki nilai yang sama dan berbeda sudut 120° satu sama lain [12].



Gambar 3. Vektor Diagram Arus Keadaan Beban Seimbang

Gambar 3 menunjukkan bahwa ketika ketiga vektor arus fasa (I_R, I_S, I_T) bernilai sama dan berselisih sudut 120° , arus netral (I_N) tidak muncul. Namun, jika salah satu syarat tersebut tidak terpenuhi, transformator berada pada kondisi tidak seimbang. Ketidakseimbangan dapat terjadi ketika besar arus sama tetapi sudut tidak 120° , sudut 120° tetapi besar arus berbeda, atau baik besar arus maupun sudut ketiga fasa berbeda.



Gambar 4. Vektor Diagram Arus Keadaan Beban Tidak Seimbang

Gambar 4 menunjukkan bahwa ketika arus ketiga fasa tidak sama ($I_R, I_S, I_T \neq 0$), maka timbul arus netral (I_N). Persentase ketidakseimbangan beban selanjutnya dihitung menggunakan koefisien a, b, dan c, yang diperoleh dari arus setiap fasa dan nilai arus rata-rata ($I_{rata-rata}$) [13]. Persamaan untuk mencari arus rata-rata ($I_{rata-rata}$) adalah sebagai berikut:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \tag{12}$$

Keterangan :

- $I_{rata-rata}$ = Arus rata-rata (A)
- I_R = Arus di fasa R (A)
- I_S = Arus di fasa S (A)
- I_T = Arus di fasa T (A)

Selanjutnya, untuk memperoleh nilai masing-masing koefisien a, b, dan c dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \tag{13}$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \tag{14}$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \tag{15}$$

Pada kondisi seimbang, nilai koefisien a, b, dan c masing-masing bernilai satu. Oleh karena itu, persentase ketidakseimbangan beban (KB) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$KB = \frac{\{|a-1| + \{|b-1| + \{|c-1|\}}\}}{3} \times 100 \% \tag{16}$$

Keterangan :

- KB = Ketidakseimbangan Beban (%)

2.7. Rugi Daya Akibat Arus Netral

Rugi daya adalah energi listrik yang hilang saat penyaluran dari sumber ke beban, baik pada saluran transmisi maupun transformator, dan berdampak pada kualitas serta kestabilan tegangan. Ketidakseimbangan beban antar fasa menjadi salah satu penyebab terjadinya rugi daya [14].

Arus netral yang timbul akibat ketidakseimbangan mengalir melalui penghantar yang memiliki resistansi dan menimbulkan rugi daya resistif berupa panas. Dalam sistem tiga fasa ideal arus netral bernilai nol, namun saat beban tidak seimbang arus sisa akan menghasilkan rugi daya tambahan yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (17)$$

Keterangan :

P_N = Rugi-rugi daya akibat arus mengalir di netral (kW)

I_N = Arus pada netral transformator (A)

R_N = Resistansi pada penghantar netral (Ω)

Nilai rugi daya yang diperoleh perlu dievaluasi untuk memastikan masih dalam batas toleransi. Menurut SPLN No.72 Tahun 1987, rugi daya yang diizinkan pada sistem distribusi maksimal sebesar 10%.

2.8. Software ETAP

ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) adalah perangkat lunak untuk simulasi dan analisis sistem tenaga listrik, yang dapat digunakan secara offline maupun online. ETAP menyediakan fitur analisis pembangkitan, transmisi, distribusi, serta simulasi ketidakseimbangan beban [15].

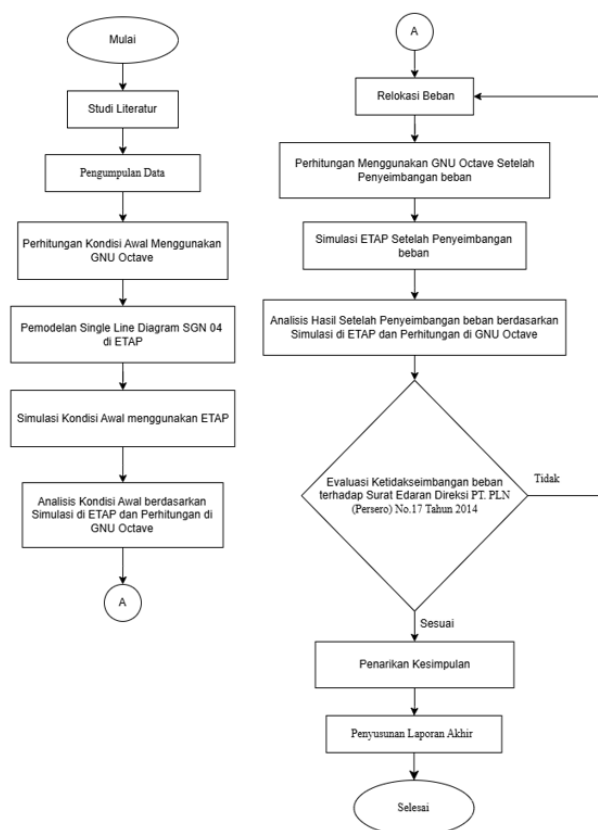
Keunggulan utamanya adalah kemampuan memodelkan sistem tiga fasa tidak seimbang secara terpisah per fasa, termasuk pemodelan beban satu, dua, dan tiga fasa. ETAP juga menghitung komponen urutan nol, positif, dan negatif secara otomatis dan menampilkan hasil simulasi dalam bentuk diagram satu garis serta laporan rugi daya per fasa dan arus netral.

2.9. GNU Octave

GNU Octave adalah perangkat lunak bebas yang dapat dijalankan di berbagai sistem operasi, termasuk GNU/Linux dan Windows. Dikembangkan oleh John W. Eaton, perangkat lunak ini bebas untuk dimodifikasi dan didistribusikan. Octave memiliki aturan sintaks yang ketat, khususnya dalam operasi matriks. Dalam sistem tenaga listrik, perangkat lunak ini dimanfaatkan untuk analisis aliran daya (*Load Flow*), analisis gangguan hubung singkat (*Fault Analysis*), dan menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban dengan mengimplementasikan metode komponen simetris melalui operasi matriks dan bilangan kompleks [16].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada enam transformator di Penyulang SGN 04 dengan pengukuran arus beban selama lima hari pada kondisi beban puncak malam hari. Data kemudian diolah di GNU Octave menggunakan metode komponen simetris untuk memperoleh nilai ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi daya. Selanjutnya, pemodelan jaringan dan simulasi *Unbalance Load Flow* dilakukan menggunakan ETAP guna menganalisis kondisi awal serta evaluasi strategi penyeimbangan melalui relokasi beban. Hasil simulasi tersebut dibandingkan dengan standar ketidakseimbangan PLN berdasarkan SE No.17 Tahun 2014. Alur tahapan penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Transformator 3 Fasa SGN 04

Subbab ini menyajikan data enam transformator tiga fasa pada Penyulang SGN 04 yang dipilih sebagai objek penelitian berdasarkan kondisi pembebanan yang tidak seimbang. Penyulang ini memiliki 147 trafo distribusi, dengan 18 di antaranya merupakan trafo tiga fasa. Informasi trafo seperti nomor gardu, lokasi, kapasitas, merek, dan jenis fasa ditampilkan pada Tabel 3 berdasarkan data lapangan dan catatan PLN ULP Magelang Kota.

Tabel 3. Data Transformator 3 Fasa SGN 04

| Nomer Gardu | Alamat Trafo | Daya (kVA) | Merk | Fasa |
|--------------|-----------------------|------------|----------|--------|
| M1-35A-2A | SPBU MENOWO | 160 | STARLITE | 3 Fasa |
| M1-44-26-4-A | POTROBANGSAN | 100 | STARLITE | 3 Fasa |
| M1-44-31 | SMK 3 NEGERI PAHLAWAN | 100 | TRAFINDO | 3 Fasa |
| M1-44-34 | GKI | 200 | J & P | 3 Fasa |
| M1-44-50-1 | BANK BTPN | 100 | STARLITE | 3 Fasa |
| M1-44-9 | JL. PAHLAWAN | 200 | TRAFINDO | 3 Fasa |

Tabel 3 menunjukkan enam transformator tiga fasa yang menjadi objek penelitian, masing-masing dengan kapasitas dan merek berbeda. Data tersebut digunakan sebagai dasar pengukuran arus dan tegangan serta analisis ketidakseimbangan beban selama lima hari pada kondisi beban puncak malam hari.

4.2. Data Penghantar Netral

Pada penelitian ini, penghantar netral yang digunakan adalah jenis AAAC berpenampang 35 mm² sesuai standar SPLN 41-8:1981. Penghantar ini memiliki tahanan DC 0,958 Ω/km pada suhu 20°C dan digunakan sebagai dasar dalam perhitungan tahanan netral, arus netral, serta rugi daya pada transformator Penyulang SGN 04.

4.3. Data Rata-Rata Pengukuran Transformator 3 Fasa SGN 04

Setelah pengukuran arus selama lima hari pada enam transformator, diperoleh nilai arus rata-rata yang merepresentasikan kondisi beban aktual masing-masing transformator. Nilai ini digunakan sebagai dasar analisis lanjutan serta acuan simulasi dan penyeimbangan beban pada Penyulang SGN 04. Hasil perhitungan arus rata-rata tiap transformator disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rata-Rata Pengukuran Arus Transformator 3 Fasa

| No Gardu | Arus (A) | | |
|--------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | R | S | T |
| M1-35A-2A | 60,74 \angle -12,69 ° | 38,5 \angle -129,21 ° | 43,84 \angle 108,95 ° |
| M1-44-26-4-A | 48,34 \angle -4,28 ° | 38,88 \angle -136,44 ° | 50,35 \angle 115,42 ° |
| M1-44-31 | 53,31 \angle -6,28 ° | 38 \angle -127,65 ° | 73,3 \angle 111 ° |
| M1-44-34 | 191,35 \angle -15,66 ° | 204,59 \angle -137,21 ° | 185,91 \angle 102,86 ° |
| M1-44-50-1 | 5,378 \angle 6,08 ° | 29,9 \angle -122,2 ° | 23,95 \angle 111,9 ° |
| M1-44-9 | 261,63 \angle -21,58 ° | 100,63 \angle -137,01 ° | 134,28 \angle 100,84 ° |

Berdasarkan Tabel 4, hasil rata-rata arus menunjukkan ketidakseimbangan beban pada beberapa transformator. Ketidakseimbangan ini sangat jelas terlihat pada Gardu M1-44-31, dengan arus fasa T sebesar 73,3 \angle 111° A dan fasa S hanya 38 \angle -127,65° A. Selain itu, arus fasa R tertinggi tercatat pada Gardu M1-44-9, yaitu 261,63 \angle -21,58° A, menunjukkan beban yang jauh lebih besar dibanding fasa lainnya. Kondisi ini menunjukkan distribusi beban belum merata dan berpotensi meningkatkan rugi daya, sehingga diperlukan penyeimbangan antar fasa. Selanjutnya, data rata-rata tegangan diperlukan sebagai input simulasi *unbalanced load flow* pada ETAP dan ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rata-Rata Pengukuran Tegangan Transformator 3 Fasa

| No Gardu | Tegangan (V) | | |
|--------------|--------------|---------|---------|
| | R-N | S-N | T-N |
| M1-35A-2A | 217,82 | 219,22 | 218,96 |
| M1-44-26-4-A | 217,18 | 217,56 | 217,425 |
| M1-44-31 | 226,48 | 227,52 | 226,18 |
| M1-44-34 | 220,493 | 221,433 | 220,855 |
| M1-44-50-1 | 226,28 | 226,84 | 226,52 |
| M1-44-9 | 232,74 | 236,72 | 235,38 |

Berdasarkan Tabel 5, hasil pengukuran rata-rata tegangan tiap fasa menunjukkan nilai yang relatif seragam, dengan selisih hanya sekitar 1–4 V antar fasa. Data ini digunakan sebagai data input untuk simulasi pada ETAP. Selain itu, diperlukan juga data rata-rata faktor daya tiap transformator, yang ditampilkan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Rata-Rata Pengukuran Faktor Daya Transformator 3 Fasa

| No Gardu | Cos phi | | |
|--------------|---------|--------|--------|
| | R | S-N | T-N |
| M1-35A-2A | 0,9704 | 0,9644 | 0,9598 |
| M1-44-26-4-A | 0,9894 | 0,943 | 0,9914 |
| M1-44-31 | 0,98 | 0,975 | 0,977 |
| M1-44-34 | 0,9412 | 0,9428 | 0,9358 |
| M1-44-50-1 | -0,9166 | 0,9844 | 0,9646 |
| M1-44-9 | 0,9206 | 0,9388 | 0,9352 |

Berdasarkan Tabel 6, Hasil rata-rata pengukuran faktor daya pada transformator di Penyulang SGN 04 menunjukkan bahwa nilai umumnya berkisar antara -0,9166 hingga 0,9914. Ini mengindikasikan bahwa sebagian besar beban bersifat induktif ringan hingga mendekati kondisi ideal. Nilai tertinggi adalah 0,9914 pada trafo M1-44-26-4-A pada fasa T, sedangkan nilai terendah adalah -0,9166 pada trafo M1-44-50-1 pada fasa R, yang menunjukkan adanya pembebanan kapasitif pada fasa tersebut.

4.4. Hasil Perhitungan Menggunakan GNU Octave

Berdasarkan kode program yang telah dibuat pada lembar editor, yang didasari dengan implementasi persamaan 4-16. Berikut merupakan hasil perhitungan ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi daya menggunakan GNU Octave pada trafo M1-35A-2A yang ditunjukkan pada Gambar 6 berikut.

```

=== Perhitungan untuk Trafo Menowo Baru ===

=== Input Data Arus dari Pengukuran ===
Masukkan |IR| : 68.74
Masukkan sudut IR (deg): -12.69
Masukkan |IS| : 38.5
Masukkan sudut IS (deg): -129.21
Masukkan |IT| : 43.84
Masukkan sudut IT (deg): 188.95

=== Persentase Ketidakseimbangan Beban ===
KB = 18.24 %

--- Konversi Polar ke Rektangular ---
IR = 59.2563 -13.3431j
IS = -24.3383 -29.8311j
IT = -14.2367 +41.4648j

Operator a = -0.5889 +0.8668j
Operator a*2 = -0.5889 -0.8668j

=== Hasil Komponen Urutan (Rectangular) ===
I0 = 6.8937 -0.5781j
I1 = 46.7624 -9.3826j
I2 = 5.6082 -3.4794j

=== Hasil Komponen Urutan (Polar) ===
I0 = 6.9173 ∠ -4.73°
I1 = 47.6787 ∠ -11.25°
I2 = 6.5883 ∠ -31.79°

=== Arus Netral ===
IN = 28.6812 -1.7183j (Rectangular)
IN = 28.7518 ∠ -4.73° (Polar)

Masukkan nilai Rn (Ohm): 0.958

=== Hasil Perhitungan Rugi Daya Akibat Arus Netral ===
PN = 412.5516 Watt
PI = 0.4126 kW
    
```

Gambar 6. Hasil Perhitungan Menggunakan GNU Octave pada Trafo M1-35A-2A

Pada Gambar 6 diatas menunjukkan hasil perhitungan ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi daya untuk Trafo M1-35A-2A menggunakan GNU Octave. Dari hasil tersebut diperoleh ketidakseimbangan beban sebesar 18,24%, arus netral $20,75 \angle -4,73^\circ$ A, dan rugi daya 0,41266 kW. Perhitungan dengan metode yang sama kemudian diterapkan pada transformator lainnya, dan ringkasan hasilnya ditampilkan pada Tabel 7 berikut.

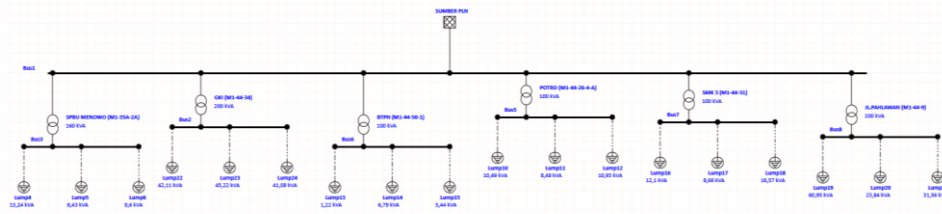
Tabel 7. Hasil Perhitungan Menggunakan GNU Octave

| No Gardu | KB (%) | Arus Netral (A) | Rugi Daya (kW) |
|--------------|--------|--------------------------------|----------------|
| M1-35A-2A | 18,24 | $20,7518 \angle -4,73^\circ$ | 0,4126 |
| M1-44-26-4-A | 10,14 | $15,1578 \angle 95,99^\circ$ | 0,2201 |
| M1-44-31 | 22,39 | $32,7022 \angle 83,84^\circ$ | 1,0245 |
| M1-44-34 | 3,66 | $11,8705 \angle -123,76^\circ$ | 0,135 |
| M1-44-50-1 | 48,51 | $19,6790 \angle -172,67^\circ$ | 0,371 |
| M1-44-9 | 38,71 | $148,1425 \angle -12,86^\circ$ | 21,0245 |

Berdasarkan hasil perhitungan GNU Octave pada Tabel 7, ketidakseimbangan beban pada enam transformator berada pada rentang 3,66% – 48,51%. Nilai tertinggi terdapat pada trafo M1-44-50-1 (48,51%), sedangkan nilai terendah pada M1-44-34 (3,66%). Arus netral dan rugi daya tertinggi terjadi pada M1-44-9, yaitu $148,14 \angle -12,86^\circ$ A dengan rugi daya 21,0245 kW, sedangkan trafo M1-44-34 menunjukkan rugi daya terendah yaitu 0,135 kW, sejalan dengan tingkat ketidakseimbangannya yang kecil.

4.5. Simulasi ETAP Sebelum Penyeimbangan Beban

Setelah diperoleh data kapasitas trafo, rata-rata arus, tegangan, dan faktor daya, seluruh data digunakan sebagai input pada ETAP untuk simulasi *unbalanced load flow*. Simulasi ini bertujuan memodelkan kondisi aktual dan menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban pada penyulang SGN 04. Tahap berikutnya adalah pemodelan single line diagram keenam transformator di ETAP, meliputi transformator, saluran distribusi, dan beban sesuai data pengukuran. Model ini digunakan sebagai dasar simulasi dan ditunjukkan pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7. Pemodelan Single Line Diagram 6 Trafo Distribusi SGN 04

Setelah simulasi ketidakseimbangan beban (*Unbalanced load flow*) telah selesai dilakukan, maka hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada Report Manager seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.

| Bus | | Voltage | | Generation | | Load | | Load Flow | | | | | XFMR | | | |
|------|-------|---------|--------|------------|-------|-------|-------|-----------|------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|
| ID | kV | Phase | % Mag. | Ang. | MW | Mvar | MW | Mvar | ID | Phase | MW | Mvar | Amp | Ang. | % PF | % Tap |
| Bus5 | 0.400 | A | 99.12 | -150.6 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.002 | Bus1 | A | -0.011 | -0.002 | 46.9 | 21.1 | 98.9 | |
| | | B | 99.15 | 89.6 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.003 | | B | -0.008 | -0.003 | 37.8 | -109.8 | 94.3 | |
| | | C | 99.09 | -30.6 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.001 | | C | -0.011 | -0.001 | 48.8 | 141.9 | 99.1 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 13.7 | | | |
| Bus6 | 0.400 | A | 99.87 | -150.0 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | Bus1 | A | -0.001 | 0.000 | 5.3 | 6.4 | 91.7 | |
| | | B | 99.42 | 89.7 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.001 | | B | -0.007 | -0.001 | 29.7 | -100.5 | 98.4 | |
| | | C | 99.49 | -30.2 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.001 | | C | -0.005 | -0.001 | 23.8 | 134.5 | 96.5 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 20.4 | | | |
| Bus7 | 0.400 | A | 98.94 | -150.6 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.002 | Bus1 | A | -0.012 | -0.002 | 53.1 | 17.9 | 98.0 | |
| | | B | 99.23 | 89.6 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.002 | | B | -0.008 | -0.002 | 37.9 | -103.3 | 97.5 | |
| | | C | 98.53 | -30.8 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.004 | | C | -0.016 | -0.004 | 73.0 | 136.9 | 97.7 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 31.5 | | | |
| Bus8 | 0.400 | A | 96.86 | -151.2 | 0.000 | 0.000 | 0.055 | 0.023 | Bus1 | A | -0.055 | -0.023 | 268.2 | 5.8 | 92.1 | |
| | | B | 98.84 | 89.5 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.008 | | B | -0.022 | -0.008 | 102.9 | -110.6 | 93.9 | |
| | | C | 98.44 | -30.6 | 0.000 | 0.000 | 0.029 | 0.011 | | C | -0.029 | -0.011 | 137.0 | 128.6 | 93.5 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 149.9 | | | |
| Bus2 | 0.400 | A | 97.88 | 29.1 | 0.000 | 0.000 | 0.040 | 0.014 | Bus1 | A | -0.040 | -0.014 | 188.4 | -170.6 | 94.1 | |
| | | B | 97.74 | -91.0 | 0.000 | 0.000 | 0.043 | 0.015 | | B | -0.043 | -0.015 | 202.1 | 69.6 | 94.3 | |
| | | C | 97.92 | 149.2 | 0.000 | 0.000 | 0.039 | 0.015 | | C | -0.039 | -0.015 | 183.4 | -51.5 | 93.6 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 15.2 | | | |
| Bus3 | 0.400 | A | 99.23 | -150.4 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.003 | Bus1 | A | -0.013 | -0.003 | 59.0 | 15.6 | 97.0 | |
| | | B | 99.50 | 89.8 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.002 | | B | -0.008 | -0.002 | 37.4 | -105.6 | 96.4 | |
| | | C | 99.42 | -30.3 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.003 | | C | -0.009 | -0.003 | 42.6 | 133.4 | 96.0 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 20.5 | | | |

Gambar 8. Hasil Simulasi Ketidakseimbangan beban

Berdasarkan hasil simulasi *unbalanced load flow* pada ETAP. Bus 2 hingga Bus 7 menunjukkan perbedaan arus antar fasa yang menandakan terjadinya ketidakseimbangan beban. Arus netral pada tiap bus tercatat sebesar: Bus 2 = 15,2 A, Bus 3 = 20,5 A, Bus 5 = 13,7 A, Bus 6 = 20,4 A, dan Bus 7 = 31,5 A. Ketidakseimbangan paling besar terjadi pada Bus 8 (M1-44-9) dengan arus netral mencapai 149,9 A. Kondisi ini menunjukkan perlunya penyeimbangan beban untuk menurunkan arus netral dan rugi daya serta meningkatkan stabilitas sistem distribusi.

4.6. Analisis Kondisi Awal Transformator

Berdasarkan hasil perhitungan GNU Octave dan simulasi ETAP, keenam transformator pada penyulang SGN 04 menunjukkan ketidakseimbangan beban yang cukup tinggi, ditandai oleh

besar-nya nilai ketidakseimbangan, arus netral, dan rugi daya. Ringkasan kondisi awal tersebut ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Analisis Kondisi Awal Transformator Sebelum Penyeimbangan

| No Gardu | KB (%) | Arus Netral Perhitungan GNU Octave (A) | Arus Netral Simulasi ETAP (A) | Rugi Daya (kW) |
|--------------|--------|--|-------------------------------|----------------|
| M1-35A-2A | 18,24 | 20,7518∠-4,73 ° | 20,5 | 0,4126 |
| M1-44-26-4-A | 10,14 | 15,1578∠95,99 ° | 13,7 | 0,2201 |
| M1-44-31 | 22,39 | 32,7022∠83,84 ° | 31,5 | 1,0245 |
| M1-44-34 | 3,66 | 11,8705∠-123,76 ° | 15,2 | 0,135 |
| M1-44-50-1 | 48,51 | 19,6790∠-172,67 ° | 20,4 | 0,371 |
| M1-44-9 | 38,71 | 148,1425∠-12,86 ° | 149,9 | 21,0245 |

4.7. Relokasi Beban

Pada tahap ini, penyeimbangan beban dilakukan dengan metode relokasi beban antar fasa, yaitu memindahkan sebagian beban dari fasa yang berlebih ke fasa yang lebih ringan. Metode ini dipilih karena terdapat perbedaan arus yang cukup besar antar fasa pada setiap transformator. Perhitungan dilakukan berdasarkan nilai arus per fasa tanpa mempertimbangkan jenis dan kapasitas pelanggan, karena keterbatasan data. Langkah awal penyeimbangan adalah menghitung selisih arus tiap fasa terhadap arus rata-rata untuk menentukan besaran perpindahan beban. Perhitungan ini diterapkan pada seluruh transformator, dan hasil relokasi beban selengkapnya ditampilkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Relokasi Beban Berdasarkan Perhitungan Manual

| No Gardu | Arus (A) | | | | Rekomendasi Perpindahan |
|--------------|-----------|---------------|------|---------|------------------------------|
| | Total (A) | Rata-Rata (A) | Fasa | Selisih | |
| M1-35A-2A | 143,08 | 47,69 | R | -13,05 | R → S = 10 A R → T = 4 A |
| | | | S | +9,19 | |
| | | | T | +3,85 | |
| M1-44-26-4-A | 137,57 | 45,86 | R | -2,48 | T → S = 6 A R → S = 2 A |
| | | | S | +6,98 | |
| | | | T | -4,49 | |
| M1-44-31 | 164,61 | 54,87 | R | +1,56 | T → S = 16 A T → R = 2 A |
| | | | S | +16,87 | |
| | | | T | -18,43 | |
| M1-44-34 | 581,85 | 193,95 | R | +2,60 | S → T = 10 A S → R = 2 A |
| | | | S | -10,64 | |
| | | | T | +8,04 | |
| M1-44-50-1 | 59,228 | 19,74 | R | +14,36 | S → R = 10 A T → R = 4 A |
| | | | S | -10,16 | |
| | | | T | -4,21 | |
| M1-44-9 | 496,54 | 165,51 | R | -96,12 | R → S = 66 A R → T = 31 A |
| | | | S | +64,88 | |
| | | | T | +31,23 | |

Berdasarkan Tabel 9, selisih arus pada setiap fasa digunakan untuk menentukan perpindahan beban, di mana nilai negatif menunjukkan kelebihan beban dan nilai positif menandakan kekurangan beban. Setelah dibulatkan, arah relokasi beban ditentukan dari fasa yang berlebih menuju fasa yang kurang untuk masing-masing transformator. Melalui penyesuaian ini, distribusi arus diharapkan lebih seimbang sehingga arus netral dan rugi daya dapat berkurang. Hasil arus setelah penyeimbangan ditampilkan pada Tabel 10 berikut.

Tabel 10. Nilai Arus Setelah Penyeimbangan Beban

| No Gardu | Arus Baru (A) | | |
|--------------|----------------|-----------------|----------------|
| | R | S | T |
| M1-35A-2A | 46,74∠-12,69° | 48,5∠-129,21° | 47,84∠108,95° |
| M1-44-26-4-A | 46,34∠-4,28° | 46,88∠-136,44° | 44,35∠115,42° |
| M1-44-31 | 53,31∠-6,28° | 54∠-127,65° | 55,3∠111° |
| M1-44-34 | 191,35∠-15,66° | 192,59∠-137,21° | 195,91∠102,86° |
| M1-44-50-1 | 19,38∠6,08° | 19,9∠-122,2° | 19,95∠111,9° |
| M1-44-9 | 164,63∠-21,58° | 166,63∠-137,01° | 165,28∠100,84° |

Penyeimbangan beban dilakukan hanya berdasarkan magnitudo arus tanpa mempertimbangkan perubahan sudut fasor, sehingga perpindahan beban antar fasa dapat diterapkan dengan lebih sederhana di lapangan. Hasil relokasi menunjukkan distribusi arus yang lebih merata, misalnya pada trafo M1-35A-2A, arus fasa R turun dari 60,74 A menjadi 46,74 A, sementara fasa S dan T naik menjadi 48,50 A dan 47,84 A. Pendekatan ini diharapkan mampu menurunkan arus netral dan rugi daya, serta akan divalidasi lebih lanjut melalui simulasi ETAP untuk memastikan efektivitas penyeimbangan beban.

4.8. Perhitungan GNU Octave Setelah Penyeimbangan Beban

Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan 4 hingga 13. Hasil ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi daya setelah penyeimbangan ditampilkan pada Tabel 11.

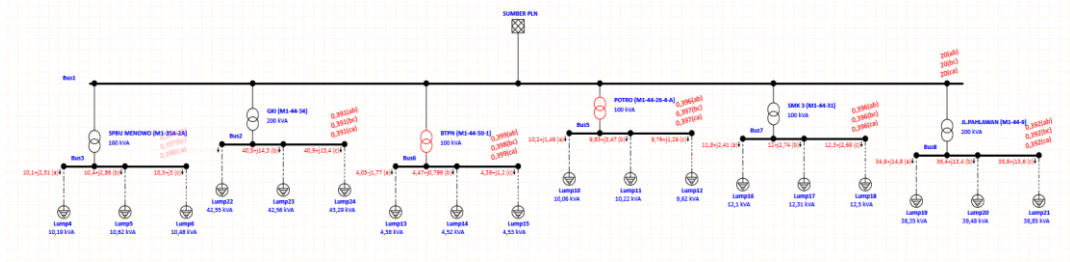
Tabel 11. Perhitungan menggunakan GNU Octave Setelah Penyeimbangan Beban

| No Gardu | KB (%) | Arus Netral (A) | Rugi Daya (kW) |
|--------------|--------|-----------------|----------------|
| M1-35A-2A | 1,33 | 2,6677∠-102,94° | 0,0068 |
| M1-44-26-4-A | 2,19 | 8,0399∠147,73° | 0,0619 |
| M1-44-31 | 1,35 | 3,0464∠86,48° | 0,0089 |
| M1-44-34 | 0,91 | 8,544∠94,62° | 0,0699 |
| M1-44-50-1 | 1,23 | 3,9203∠71,78° | 0,0147 |
| M1-44-9 | 0,45 | 11,8409∠-89,41° | 0,1343 |

Berdasarkan Tabel 11, seluruh transformator menunjukkan penurunan ketidakseimbangan beban setelah penyeimbangan. Nilai ketidakseimbangan kini berada pada rentang 0,45%–2,19%, dengan arus netral antara 2,6677∠-102,94° A hingga 11,8409∠-89,41° A, serta rugi daya hanya 0,0068–0,1343 kW. Hasil ini menunjukkan bahwa proses penyeimbangan berhasil menurunkan ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi daya secara signifikan.

4.9. Simulasi Etap Setelah Penyeimbangan Beban

Setelah penyeimbangan beban dan perhitungan ulang menggunakan GNU Octave, dilakukan pemodelan ulang transformator pada ETAP untuk melihat perubahan kondisi arus dan tingkat ketidakseimbangan setelah relokasi beban diterapkan. Hasil pemodelan ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Pemodelan Single Line Diagram 6 Trafo Distribusi SGN 04 Setelah Penyeimbangan Beban

Model tersebut kemudian digunakan untuk melakukan simulasi *unbalanced load flow*. Hasil simulasi ditampilkan pada Report Manager seperti pada Gambar 10.

| Bus | | Voltage | | | Generation | | Load | | Load Flow | | | | | | | XFMR |
|------|-------|---------|--------|--------|------------|-------|-------|-------|-----------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|
| ID | kV | Phase | % Mag. | Ang. | MW | Mvar | MW | Mvar | ID | Phase | MW | Mvar | Amp | Ang. | % PF | % Tap |
| Bus8 | 0.400 | A | 98.04 | -150.7 | 0.000 | 0.000 | 0.035 | 0.015 | Bus1 | A | -0.035 | -0.015 | 167.5 | 6.3 | 92.1 | |
| | | B | 98.06 | 89.2 | 0.000 | 0.000 | 0.036 | 0.013 | | B | -0.036 | -0.013 | 171.3 | -110.9 | 93.9 | |
| | | C | 98.08 | -30.8 | 0.000 | 0.000 | 0.036 | 0.014 | | C | -0.036 | -0.014 | 169.1 | 128.5 | 93.5 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 9.3 | | | |
| Bus2 | 0.400 | A | 97.86 | 29.1 | 0.000 | 0.000 | 0.040 | 0.015 | Bus1 | A | -0.040 | -0.015 | 190.3 | -170.6 | 94.1 | |
| | | B | 97.87 | -90.9 | 0.000 | 0.000 | 0.040 | 0.014 | | B | -0.040 | -0.014 | 190.1 | 69.6 | 94.3 | |
| | | C | 97.80 | 149.1 | 0.000 | 0.000 | 0.041 | 0.015 | | C | -0.041 | -0.015 | 193.4 | -51.5 | 93.6 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 4.4 | | | |
| Bus3 | 0.400 | A | 99.41 | -150.3 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.003 | Bus1 | A | -0.010 | -0.003 | 45.4 | 15.7 | 97.0 | |
| | | B | 99.37 | 89.7 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.003 | | B | -0.010 | -0.003 | 47.2 | -105.6 | 96.4 | |
| | | C | 99.37 | -30.3 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.003 | | C | -0.010 | -0.003 | 46.5 | 133.4 | 96.0 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 1.2 | | | |
| Bus5 | 0.400 | A | 99.15 | -150.5 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.001 | Bus1 | A | -0.010 | -0.001 | 44.9 | 21.1 | 98.9 | |
| | | B | 98.98 | 89.6 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.003 | | B | -0.010 | -0.003 | 45.6 | -109.9 | 94.3 | |
| | | C | 99.20 | -30.5 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.001 | | C | -0.010 | -0.001 | 43.0 | 142.0 | 99.1 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 7.5 | | | |
| Bus6 | 0.400 | A | 99.54 | -150.2 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.002 | Bus1 | A | -0.004 | -0.002 | 19.2 | 6.3 | 91.7 | |
| | | B | 99.61 | 89.8 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.001 | | B | -0.004 | -0.001 | 19.7 | -100.4 | 98.4 | |
| | | C | 99.58 | -30.2 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.001 | | C | -0.004 | -0.001 | 19.8 | 134.5 | 96.5 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 3.6 | | | |
| Bus7 | 0.400 | A | 98.94 | -150.6 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.002 | Bus1 | A | -0.012 | -0.002 | 53.1 | 17.9 | 98.0 | |
| | | B | 98.90 | 89.4 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.003 | | B | -0.012 | -0.003 | 53.9 | -103.4 | 97.5 | |
| | | C | 98.89 | -30.6 | 0.000 | 0.000 | 0.012 | 0.003 | | C | -0.012 | -0.003 | 55.0 | 137.1 | 97.7 | |
| | | N | | | | | | | | N | | | 2.6 | | | |

Gambar 10. Hasil Simulasi Ketidakseimbangan Beban Setelah Penyeimbangan Beban

Hasil simulasi *unbalanced load flow* pada Gambar 10, menunjukkan bahwa setelah penyeimbangan beban, kondisi sistem mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Arus netral pada setiap bus juga menurun dibandingkan kondisi awal, misalnya Bus 2 (4,4 A), Bus 3 (1,2 A), Bus 5 (7,5 A), Bus 6 (3,6 A), Bus 7 (2,6 A), dan Bus 8 (9,3 A). Penurunan ini menandakan bahwa penyeimbangan beban berhasil mengurangi ketidakseimbangan sistem.

4.10. Analisis Kondisi Transformator Setelah Penyeimbangan Beban

Berdasarkan hasil perhitungan ulang menggunakan GNU Octave serta simulasi ETAP setelah penyeimbangan beban, kondisi keenam transformator pada penyulang SGN 04 menunjukkan perbaikan signifikan. Nilai ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi daya terbaru ditampilkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil Analisis Kondisi Transformator Setelah Penyeimbangan Beban

| No Gardu | KB (%) | Arus Netral Perhitungan GNU Octave (A) | Arus Netral Simulasi ETAP (A) | Rugi Daya (kW) |
|--------------|--------|--|-------------------------------|----------------|
| M1-35A-2A | 1,33 | 2,6677∠-102,94 ° | 1,2 | 0,0068 |
| M1-44-26-4-A | 2,19 | 8,0399∠147,73 ° | 7,5 | 0,0619 |
| M1-44-31 | 1,35 | 3,0464∠86,48 ° | 2,6 | 0,0089 |
| M1-44-34 | 0,91 | 8,544∠94,62 ° | 4,4 | 0,0699 |
| M1-44-50-1 | 1,23 | 3,9203∠71,78 ° | 3,6 | 0,0147 |
| M1-44-9 | 0,45 | 11,8409∠-89,41 ° | 9,3 | 0,1343 |

Dari Tabel 12 terlihat bahwa penyeimbangan beban berhasil menurunkan ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi daya pada seluruh transformator. Trafo M1-44-9 yang sebelumnya memiliki ketidakseimbangan tertinggi kini menunjukkan kondisi paling stabil dengan ketidakseimbangan 0,45%, arus netral 11,8409∠-89,41° A (GNU Octave) dan 9,3 A (ETAP), serta rugi daya turun menjadi 0,1343 kW. Trafo lainnya, termasuk M1-44-50-1, M1-35A-2A, M1-44-26-4-A, M1-44-31, dan M1-44-34 juga menunjukkan hasil serupa dengan ketidakseimbangan di bawah 3%. Secara keseluruhan, metode penyeimbangan yang diterapkan terbukti efektif meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem distribusi.

4.11. Analisis Perbandingan Kondisi Transformator Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan Beban

Setelah dilakukan penyeimbangan beban, seluruh transformator pada penyulang SGN 04 menunjukkan perbaikan signifikan dibanding kondisi awal. Nilai ketidakseimbangan beban yang sebelumnya mencapai hingga 48,51% berhasil diturunkan menjadi di bawah 3%. Dampak penyeimbangan ini juga terlihat pada arus netral, di mana transformator dengan nilai tertinggi sebelumnya seperti M1-44-9 turun dari 148,14 A menjadi 11,84 A (hasil perhitungan GNU Octave) dan menjadi 9,3 A berdasarkan simulasi ETAP. Transformator lain seperti M1-35A-2A, M1-44-26-4-A, dan M1-44-31 juga mengalami penurunan signifikan. Selain penurunan arus netral, rugi-rugi daya juga berkurang secara drastis. Contohnya, M1-44-9 yang sebelumnya kehilangan daya sebesar 21,0245 kW setelah penyeimbangan hanya mengalami rugi daya sebesar 0,1343 kW. Transformator lainnya juga menunjukkan penurunan rugi daya dengan pola serupa. Secara keseluruhan hasil ini membuktikan bahwa metode relokasi beban antar fasa berhasil meningkatkan efisiensi sistem distribusi, mengurangi rugi energi, serta meningkatkan stabilitas operasional transformator di penyulang SGN 04.

4.12. Evaluasi Ketidakseimbangan Beban Terhadap Standar Menurut Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No.17 Tahun 2014

Evaluasi dilakukan berdasarkan standar PT. PLN 17:2014 untuk menilai tingkat ketidakseimbangan beban pada transformator setelah penyeimbangan. Tujuannya yaitu memastikan kondisi kesehatan trafo telah memenuhi batas ketidakseimbangan yang ditetapkan. Hasil evaluasi ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Evaluasi Ketidakseimbangan Beban Terhadap Standar Menurut Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No.17 Tahun 2014

| No Gardu | KB (%) | Indeks Kesehatan | KB (%) | Indeks Kesehatan |
|--------------|--------|------------------|--------|------------------|
| M1-35A-2A | 18,24 | Cukup | 1,33 | Baik |
| M1-44-26-4-A | 10,14 | Cukup | 2,19 | Baik |
| M1-44-31 | 22,39 | Kurang | 1,35 | Baik |
| M1-44-34 | 3,66 | Baik | 0,91 | Baik |
| M1-44-50-1 | 48,51 | Buruk | 1,23 | Baik |
| M1-44-9 | 38,71 | Buruk | 0,45 | Baik |

Berdasarkan Tabel 12, setelah penyeimbangan beban seluruh transformator di penyulang SGN 04 menunjukkan peningkatan nilai indeks kesehatan sesuai standar PLN 17:2014. Trafo yang sebelumnya masuk kategori buruk dan kurang seperti M1-44-50-1, M1-44-9, dan M1-44-31, kini berada pada kategori baik dengan nilai ketidakseimbangan di bawah 3%. Hal ini membuktikan bahwa penyeimbangan beban berhasil memperbaiki kondisi transformator dan menstabilkan distribusi arus antar fasa.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban pada transformator Penyulang SGN 04 berdampak signifikan pada kenaikan arus netral dan rugi daya. Sebelum penyeimbangan, beberapa transformator memiliki tingkat ketidakseimbangan tinggi, seperti M1-35A-2A sebesar 18,24%, M1-44-26-4-A sebesar 10,14%, M1-44-34 sebesar 3,66%, dan M1-44-9 mencapai 38,71%, dengan arus netral awal mencapai 20,75 A (M1-35A-2A) hingga 148,14 A (M1-44-9), serta rugi daya awal berkisar 0,135 – 21,0245 kW. Solusi yang diterapkan adalah relokasi beban antar fasa. Setelah penyeimbangan, seluruh transformator menunjukkan peningkatan signifikan dengan nilai ketidakseimbangan berada di bawah 3%, misalnya M1-35A-2A turun menjadi 1,47%, M1-44-31 menjadi 2,51%, dan M1-44-9 menjadi 2,68%. Dampaknya, arus netral menurun, seperti pada M1-44-9 dari 20,30 A menjadi 3,12 A, dan rugi daya berkurang menjadi hanya 0,0068 – 0,1343 kW. Hasil ini menunjukkan bahwa penyeimbangan beban efektif dalam menurunkan ketidakseimbangan, arus netral, dan rugi daya sesuai standar SPLN 17:2014, sehingga meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem distribusi tenaga listrik.

REFERENSI

- [1] T. Marwanto and Z. Abidin, "ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA FEEDER SEJANGKUNG Di PT. PLN (PERSERO) ULP SAMBAS," *J. Tek. Elektro Univ. ...*, 2021.
- [2] Muliadi, Syukri, T. M. Asyadi, and A. Salim, "Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi Penyulang Mibo Rayon Merduati," *Aceh J. Electr. ...*, vol. 2, no. 2, pp. 7–12, 2022.
- [3] I. K. Yasa, K. S. A., Wirajaya, I. M. A., & Adrama, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi di PT. PLN (Persero) Ulp Bangli," (*Journal Electr. Syst. Control Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 141–154, 2024, doi: 10.31289/jesce.v6i2.11992.
- [4] R. T. Ginting, Zulfahri, and Arlenny, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Jaringan Distribusi Tegangan Rendah Menggunakan ETAP.," *Sain, Energi, Teknol. Ind.*, vol. 6, no. 2, pp. 81–89, 2022, doi: 10.31849/sainetin.v6i2.9734.
- [5] Ika Noer Syamsiana, Budi Eko Prasetyo, Harry Hassidiqi, and Salsha Faradilla Firdaus, "Balancing Load Outgoing Transformator 2 di Politeknik Negeri Malang," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 3, pp. 201–207, 2023, doi: 10.33795/elposys.v10i3.4266.
- [6] N. M. Rahayu, A. Mashar, and R. F. Muldiani, "EVALUASI PEMBEBANAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI PADA GARDU CANTOL PTUC DI PT PLN (PERSERO) UP3 BANDUNG," *Sport. Cult.*, vol. 15, no. 1, pp. 72–86, 2024, doi: 10.25130/sc.24.1.6.
- [7] B. D. Setiawan, H. S. R. Pili, and Abdullah, "ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA TRAFODISTRIBUSI MH 196 MENGGUNAKAN ETAP 19 DI ULP MEDAN HELVETIA," *Fairchild Books Dict. Text.*, vol. 4, no. 1, pp. 628–636, 2022, doi: 10.5040/9781501365072.7621.
- [8] R. Rusliadi, Y. La Elo, N. Husnah, and N. Lembang, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi 20 KV pada Gardu Distribusi Tipe BBD Kampung Tanama PT PLN (Persero) ULP Fakfak," *J. Informasi, Sains dan Teknol.*, vol. 6, no. 02, pp. 56–68, 2023, doi: 10.55606/isaintek.v6i02.148.
- [9] Aris Sampe, "Analisis Rugi-Rugi Daya Akibat Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi 20 Kv/380 V Di Penyulang Dpr Kota," *J. Sains dan Teknol.*, vol. 1, no. 2, pp. 106–123, 2022, doi: 10.58169/saintek.v1i2.84.
- [10] J. Rumakat and D. Fauziah, "Analisis Beban Tidak Seimbang Terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi pada Penghantar Netral Transformator di Rayon Baguala Ambon," *Pros. Semin. Nas. Energi, Telekomun. dan Otomasi SNETO 2021*, pp. 334–345, 2021, [Online]. Available: <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/sneto/article/view/748>
- [11] Usuluddin, Y. Basir, and M. Helmi, "Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Bandara Sultan Mahmud Badaruddin Ii Palembang," no. 0017, 2022.
- [12] Zulkhulaifah, Bakhtiar, and H. Rudito, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan BebanTrafo Distribusi 20 Kv Terhadap Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi pada Penyulang Hertasning Baru PT PLN (Persero) ULP Panakukkang Makassar," *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, no. September, pp. 1–6, 2021.
- [13] S. Oktavia Ginting, I. B. G. Manuaba, and A. A. G. Maharta Pemayun, "Audit Energi Untuk Pencapaian Penghematan Penggunaan Energi Listrik Di Pt. Graha Sarana Duta Ii Denpasar," *J. SPEKTRUM*, vol. 9,

- no. 1, p. 27, 2022, doi: 10.24843/spektrum.2022.v09.i01.p4.
- [14] T. Umpel, G. M. C. Mangindaan, and M. Tuegeh, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Arus Netral Dan Rugi-Rugi Daya (Losses) Transformator Daya PLTU Amurang PT PJB Services," 2023, [Online]. Available: www.feriadianto.my.id
- [15] R. Jamil, R. D. H. Wibowo, and M. Syahrudin, "Implementasi Penggunaan Software Etap 12.6 Untuk Analisis Pembebanan Pada Transformator Distribusi 2000 Kva," *Pros. Konf. Nas. Soc. Eng. Polmed*, vol. 4, no. 1, pp. 556–567, 2023.
- [16] Wamiliana, M. Usman, Warsono, Warsito, and J. I. Daoud, "Using modification of Prim's algorithm and GNU Octave and to solve the multiperiods installation problem," *IJUM Eng. J.*, vol. 21, no. 1, pp. 100–112, 2020, doi: 10.31436/iiumej.v21i1.1088.