

Penyeimbangan Beban Trafo Distribusi Berbasis Data Hasil Pendeteksian Fasa Pelanggan Tegangan Rendah

Anang Dasa Novfowan^{*a)}, Dhimas Dhesah Kharisma^{a)}, Slamet Nurhadi^{a)}

(Received 9 Mei 2026 || Revised 2 Juli 2026 || Published 9 Juli 2026)

Abstract: Load imbalance caused by varied single-phase customer demand can increase neutral current and affect the operational performance of low-voltage distribution systems. This study evaluates a Power Line Carrier (PLC)-based customer-phase identification workflow to support load balancing at the N1223 distribution substation. A field case-study design was used, with phase-current measurements taken at the low-voltage main distribution panel during peak loading and customer phase data verified using a PLC master-slave system. The initial condition ($R = 265$ A, $S = 133$ A, and $T = 116$ A) produced an unbalance index of 36.45% and a neutral current of 141 A. After phase reassignment in Lines B and C, the highest recorded post-balancing unbalance was 5.1%; at 20:00, $R = 166$ A, $S = 185$ A, and $T = 172$ A produced an unbalance index of 4.1%. The post-balancing neutral current was 16.82 A. These findings show that verified customer-phase data provide a traceable basis for selecting rephasing targets. Quantitative neutral-conductor loss estimates are not reported as a main finding because the conductor resistance, length, and cross-sectional area required for independent verification were unavailable.

Keywords: transformer; distribution; unbalance; phase; PLC; rephasing

1. Pendahuluan

Keandalan sistem distribusi tenaga listrik merupakan fondasi utama dalam menjamin kualitas pasokan energi kepada seluruh lapisan masyarakat [1]. Di Indonesia, jumlah pelanggan PLN terus tumbuh secara signifikan, dan berdasarkan Buku Statistik PLN 2023 tercatat total pelanggan mencapai 89.153.278, dengan 81.551.348 di antaranya merupakan pelanggan rumah tangga, dan sebanyak 79.044.851 di antaranya adalah pelanggan Rumah Tangga Kecil (R-1) dengan sambungan listrik satu fasa [2]. Dominasi pelanggan satu fasa ini secara langsung berdampak pada pola pembebanan trafo distribusi yang menjadi sangat tidak merata antar fasa R, S, dan T. Ketidakerataan ini, bila dibiarkan dalam jangka panjang, tidak hanya mengancam efisiensi operasional jaringan, tetapi juga menurunkan kualitas tegangan yang diterima pelanggan ujung, serta memperpendek usia pakai transformator distribusi [3], [4]. Oleh karena itu, pengelolaan beban secara terstruktur dan berbasis data yang valid menjadi kebutuhan strategis yang tidak dapat diabaikan dalam operasional jaringan distribusi modern. Transformator distribusi sebagai tulang punggung penyaluran energi listrik ke pelanggan akhir harus dijaga kondisinya agar sistem tenaga listrik secara keseluruhan dapat beroperasi secara optimal dan berkelanjutan [5].

Ketidakeimbangan beban pada trafo distribusi terjadi karena karakteristik konsumsi listrik setiap pelanggan satu fasa yang sangat bervariasi dan tidak dapat diprediksi secara seragam. Kondisi ini ditandai dengan mengalirnya arus pada penghantar netral transformator, yang secara langsung menimbulkan rugi-rugi daya (*losses*) pada sistem [6], [7]. Studi yang dilakukan pada gardu distribusi di berbagai lokasi di Indonesia menunjukkan bahwa ketidakeimbangan beban dapat mencapai lebih dari 25% pada waktu beban puncak malam hari, melampaui batas toleransi yang ditetapkan oleh standar SPLN [8], [9]. Rugi-rugi daya akibat arus netral yang timbul dari kondisi tidak seimbang ini juga berdampak pada penurunan efisiensi trafo, yang dalam kondisi ekstrem dapat menyebabkan *derating* atau penurunan kapasitas transformator, bahkan berujung pada kerusakan isolasi dan kegagalan peralatan. Lebih jauh lagi, gangguan pada trafo distribusi akibat pembebanan tidak seimbang berkontribusi pada gangguan penyulang, yang pada akhirnya menyebabkan pemadaman bagi pelanggan dan kerugian ekonomi yang signifikan bagi perusahaan maupun

pengguna layanan listrik [7], [10], [11].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan ketidakeimbangan beban trafo distribusi maupun pengembangan metode identifikasi fasa pelanggan pada jaringan tegangan rendah. Pertama, penelitian oleh Novfowan et al. (2023) mengembangkan sistem pendeteksian fasa pelanggan tegangan rendah menggunakan media *Power Line Carrier* (PLC). Sistem tersebut menggunakan perangkat master pada panel tegangan rendah dan perangkat *slave* pada titik pelanggan, dengan hasil pengujian menunjukkan tingkat keberhasilan deteksi 100% pada jarak dekat dengan kecepatan transfer 9600 *baudrate* [5]. Kedua, Yu et al. (2021) mengusulkan metode identifikasi fasa berbasis data-driven dengan ekstraksi fitur dari matriks tegangan-waktu menggunakan reduksi dimensi non-linear dan algoritma DBSCAN yang divalidasi menggunakan IEEE European Low Voltage Test Feeder dengan akurasi identifikasi di atas 90% [12]. Ketiga, Pinthurat et al. (2023) melakukan kajian komprehensif mengenai kondisi unbalance pada jaringan distribusi tegangan rendah dan menunjukkan bahwa distribusi beban satu fasa yang tidak merata menyebabkan arus netral tinggi, peningkatan *neutral-line losses*, serta penurunan umur transformator distribusi [7]. Keempat, Zhang et al. (2024) mengembangkan strategi *phase reassignment* dan perangkat *phase-swapping* untuk mengurangi ketidakeimbangan tiga fasa pada sistem distribusi tenaga listrik, yang terbukti mampu menurunkan *losses* jaringan dan meningkatkan utilisasi kapasitas transformator [11]. Kelima, penelitian Novfowan et al. (2021) menunjukkan bahwa proses penyeimbangan beban transformator distribusi yang dilakukan menggunakan data fasa pelanggan yang valid mampu mengurangi *losses* transformator distribusi hingga 1,06% hanya dalam satu tahap penyeimbangan beban [13].

Meskipun penelitian-penelitian terdahulu telah memberikan kontribusi penting, terdapat beberapa celah yang belum terjawab secara tuntas. Sebagian besar studi identifikasi fasa berbasis data yang ada, seperti pendekatan *data-driven* dan *smart meter*, sangat bergantung pada ketersediaan infrastruktur AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) yang belum merata di seluruh wilayah Indonesia, terutama di daerah pedesaan dan perbatasan. Di sisi lain, metode pendeteksian fasa berbasis RF (*Radio Frequency*) yang selama ini digunakan di lapangan menghadapi kendala interferensi di area padat sinyal dan keterbatasan jangkauan di area terpencil. Penelitian yang secara spesifik membahas integrasi

*Korespondensi: anang.dasa@polinema.ac.id

a) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Polinema, Jalan Soekarno-Hatta No. 9 Malang 65141

antara hasil deteksi fasa pelanggan berbasis PLC dengan prosedur sistematis penyeimbangan beban trafo distribusi sebagai satu alur kerja yang komprehensif masih sangat terbatas. Selain itu, di lapangan sering dijumpai kondisi data fasa pelanggan yang tersimpan tidak valid atau bahkan tidak tersedia sama sekali, sehingga petugas harus melakukan penyeimbangan beban secara *trial and error* yang membutuhkan 4–5 kali percobaan untuk satu gardu distribusi [14]. Kondisi ini menunjukkan adanya kebutuhan nyata akan sebuah pendekatan yang menggabungkan verifikasi fasa pelanggan yang akurat dengan prosedur penyeimbangan beban yang terstandar dan efisien secara waktu.

Untuk menjawab celah penelitian tersebut, penelitian ini mengajukan pendekatan baru yang mengintegrasikan hasil pendeteksian fasa pelanggan tegangan rendah berbasis PLC sebagai basis data primer dalam proses penyeimbangan beban trafo distribusi. Keunggulan media PLC dibandingkan RF terletak pada penggunaan jalur kabel listrik yang sudah ada sebagai medium komunikasi, sehingga tidak dipengaruhi oleh interferensi radio maupun keterbatasan jangkauan sinyal nirkabel [15], [16]. Dengan data fasa pelanggan yang terverifikasi secara akurat, proses pemindahan sambungan pelanggan antar fasa dapat direncanakan secara sistematis dan optimal, berbeda dengan pendekatan *trial and error* yang selama ini dilakukan di lapangan. Konsep yang diusulkan dalam penelitian ini berfokus pada penyusunan prosedur kerja (*standard operating procedure*) penyeimbangan beban yang berbasis pada data real hasil pendeteksian fasa, sehingga efisiensi waktu pelaksanaan di lapangan dapat ditingkatkan secara signifikan. Pendekatan ini diharapkan mampu mereduksi jumlah iterasi penyeimbangan dari 4–5 kali menjadi lebih sedikit, yang secara langsung berdampak pada pengurangan biaya operasional dan peningkatan keandalan pasokan listrik bagi pelanggan tegangan rendah.

Berdasarkan latar belakang dan celah yang telah diidentifikasi, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan memvalidasi prosedur penyeimbangan beban trafo distribusi yang berbasis pada data hasil pendeteksian fasa pelanggan tegangan rendah menggunakan media PLC. Secara lebih spesifik, penelitian ini dirancang untuk membuktikan bahwa verifikasi data fasa pelanggan yang akurat dapat mempercepat dan mengefisienkan proses penyeimbangan beban di lapangan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan teknis bagi petugas lapangan PLN dalam melaksanakan penyeimbangan beban trafo distribusi secara lebih terstruktur, efisien, dan berbasis data yang valid. Selain itu, penelitian ini juga berkontribusi pada pengurangan *losses* teknis akibat ketidakseimbangan beban, yang pada akhirnya berdampak pada peningkatan efisiensi sistem distribusi dan kualitas pelayanan kepada pelanggan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan nilai tambah yang nyata bagi pengelolaan aset trafo distribusi dan mendukung upaya PLN dalam mewujudkan sistem distribusi tenaga listrik yang lebih andal, efisien, dan berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

2.1 Material Penelitian

Penelitian ini merupakan studi lapangan pada gardu distribusi N1223. Karena objek penelitian berupa jaringan tenaga listrik beroperasi, istilah material dalam bagian ini merujuk pada data teknis dan komponen utama sistem yang secara langsung diperlukan untuk menghasilkan keputusan penyeimbangan. Penelitian ini tidak menggunakan reagen atau bahan kimia; oleh

sebab itu, informasi kemurnian bahan tidak relevan dan tidak dicantumkan.

Material data primer pertama adalah rekaman arus fasa R, S, dan T serta arus netral yang diukur pada panel tegangan rendah gardu. Data tersebut digunakan untuk membentuk kondisi awal dan mengukur perubahan sesudah penyeimbangan. Hanya parameter yang memiliki hubungan langsung dengan tujuan penelitian yang dipakai, yaitu arus tiap fasa, arus netral, jurusan, dan waktu pengukuran.

Material data primer kedua adalah hasil pendeteksian fasa pelanggan. Setiap record kerja memuat keterkaitan antara kode pelanggan yang telah dianonimkan, kode jurusan atau tiang, nomor tarikan, daya tersambung nominal, dan fasa yang terdeteksi. Nama pelanggan serta nomor identitas lengkap tidak disajikan dalam artikel karena tidak diperlukan untuk menjelaskan metode dan perlu dilindungi.

Material pendukung meliputi data sambungan rumah per jurusan dan informasi pola pembebanan pada jurusan yang akan dipindahkan. Data tersebut tidak digunakan untuk menyimpulkan profil konsumsi individu, melainkan untuk memilih kelompok sambungan yang secara teknis dapat dipindahkan dari fasa dengan arus lebih tinggi menuju fasa dengan arus lebih rendah.

Perangkat utama untuk pendeteksian fasa adalah modul Power Line Carrier FSK KQ-330 untuk jaringan tegangan rendah 220 V, 50-60 Hz seperti pada Tabel 2.1. Unit master menggunakan papan mikrokontroler Arduino Nano untuk mengirimkan label identitas fasa melalui tiga jalur fasa, sedangkan unit slave menerima label tersebut pada titik pelanggan dan menampilkannya kepada operator. Panel LVMDP pada gardu N1223 merupakan peralatan utama yang menjadi titik pemasangan unit master dan lokasi pengukuran arus fasa serta arus netral. Terminal meter kWh pelanggan merupakan titik observasi bagi unit slave. Kedua titik tersebut dicantumkan dalam konfigurasi sistem karena menentukan jalur keterlacakan antara sumber penanda fasa dan hasil identifikasi pada pelanggan.

TABEL 2.1 PERALATAN UTAMA

Peralatan utama	Model	Fungsi utama
Modul PLC FSK	KQ-330	Mengirim dan menerima label fasa melalui JTR
Mikrokontroler	Arduino Nano	Membentuk dan menampilkan identitas fasa
Panel LVMDP	Gardu N1223; aset operasi	Titik master dan pengukuran arus
Alat ukur arus	Tang ampere meter	Merekam I_R , I_S , I_T , dan I_N

2.2 Desain Penelitian

Penelitian dirancang sebagai studi kasus terapan dengan unit analisis berupa gardu distribusi N1223. Desain ini dipilih karena penelitian mengevaluasi perubahan kondisi pembebanan pada satu objek operasi setelah tindakan re-fasa, bukan menguji hubungan statistik lintas banyak gardu. Urutan kerja dimulai dengan penetapan ruang lingkup gardu, jurusan yang diamati, dan variabel analisis seperti dapat dilihat di Diagram Alir Penelitian Gambar.... Variabel utama ialah arus fasa R, S, T, arus netral, data fasa pelanggan, serta informasi jurusan. Tahap ini memisahkan

data yang digunakan untuk penilaian teknis dari data identitas pelanggan yang tidak diperlukan dalam analisis.



GAMBAR 2.1 ALUR PENELITIAN DARI PERSIAPAN HINGGA EVALUASI PASCAPENYEIMBANGAN

Untuk keaamanan, pekerjaan pada instalasi tegangan rendah harus diawali dengan koordinasi dengan pengelola gardu, penetapan izin kerja atau persetujuan operasi, identifikasi bahaya, dan pembagian peran petugas berwenang. Pengukuran serta pemindahan sambungan tidak boleh diperlakukan sebagai kegiatan laboratorium biasa; pelaksanaannya perlu mengikuti prosedur keselamatan operator, menggunakan perlindungan diri yang sesuai, dan dilakukan ketika kondisi operasi memungkinkan. Nomor izin kerja tidak dilaporkan karena tidak tersedia pada dokumen primer.

Pengukuran awal dilakukan pada panel LVMDP untuk memperoleh kondisi dasar sebelum re-fasa. Arus fasa R, S, dan T dicatat bersama arus netral pada kondisi pembebanan yang relevan, khususnya saat beban relatif tinggi. Nilai ini menjadi baseline untuk membandingkan kondisi pascatindakan dan untuk mengidentifikasi fasa yang memiliki arus terbesar [3], [4]. Tahap berikutnya adalah pendeteksian fasa pelanggan berbasis PLC. Unit master mengirimkan penanda identitas fasa melalui penghantar rendah, sedangkan unit slave dibawa ke terminal pelanggan untuk menerima penanda tersebut. Penerimaan label dari master menunjukkan fasa sambungan pelanggan; prinsip master-slave ini mengikuti rancangan PLC yang telah dijelaskan pada penelitian perangkat sebelumnya [5]. Hasil deteksi dicatat berurutan menurut jurusan, tiang, dan nomor tarikan. Setiap hasil kemudian dibandingkan dengan data sambungan yang tersedia untuk menemukan ketidaksesuaian data fasa. Langkah verifikasi ini penting karena metode identifikasi fasa harus menghasilkan pemetaan pelanggan-ke-fasa yang dapat digunakan secara operasional, bukan hanya nilai akurasi klasifikasi [12], [14].

Data pelanggan yang telah diverifikasi direkap sebagai basis penentuan calon pemindahan sambungan. Dalam proses pengolahan artikel, identitas pelanggan dianonimkan dan hanya informasi teknis yang diperlukan yang disajikan. Pengendalian ini menjaga agar analisis penyeimbangan tidak mengekspos nama atau nomor pelanggan, sekaligus tetap memungkinkan pembaca menelusuri logika pemilihan jurusan dan tarikan.

Indeks ketidakseimbangan dihitung dari arus rata-rata dan koefisien pembebanan tiap fasa seperti pada Persamaan (2-1). Arus rata-rata ditentukan dari tiga arus fasa, kemudian setiap koefisien dihitung sebagai perbandingan arus fasa terhadap arus rata-rata seperti pada Persamaan (2-2) dan Persamaan (2-3) secara berurutan. Pendekatan ini digunakan untuk menghasilkan ukuran deviasi yang mudah dibaca pada evaluasi pembebanan tiga fasa [3], [4].

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

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2-2)$$

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}}, b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}}, c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (2-3)$$

Rugi-rugi pada penghantar netral secara prinsip dihitung menggunakan Persamaan (2-4), dengan nilai tahanan netral

diperoleh dari resistivitas penghantar, panjang penghantar, dan luas penampang. Rumus ini disajikan untuk memperjelas dasar analisis, tetapi hasil numerik rugi-rugi hanya dapat dilaporkan apabila nilai R_N , panjang, penampang, jenis penghantar, dan konfigurasi jalur arus didokumentasikan.

$$P_N = I_N^2 R_N, R_N = \frac{\rho L}{A} \quad (2-4)$$

Perencanaan re-fasa dilakukan pada tingkat jurusan. Selisih arus setiap fasa terhadap arus rata-rata dihitung untuk menunjukkan kelebihan atau kekurangan arus relatif. Target pemindahan dipilih dari kelompok sambungan pada fasa dengan arus lebih tinggi menuju fasa dengan arus lebih rendah, dengan mempertimbangkan keterjangkauan lokasi dan jumlah titik kerja; logika ini sejalan dengan prinsip phase reassignment pada jaringan distribusi [11].

Sesudah target dipilih, pemindahan sambungan dilaksanakan oleh petugas yang berwenang sesuai izin operasi dan prosedur keselamatan setempat. Tahap pascatindakan mencakup pengukuran ulang arus fasa serta arus netral. Evaluasi tidak hanya melihat apakah arus pada satu fasa menurun, tetapi juga apakah ketiga arus fasa menjadi lebih dekat terhadap nilai rata-ratanya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Verifikasi Fasa Pelanggan

Verifikasi fasa merupakan titik awal penyeimbangan karena keputusan pemindahan sambungan tidak dapat dibuat secara andal apabila fasa aktual pelanggan berbeda dari catatan jaringan. Tabel 3.1 menampilkan cuplikan hasil verifikasi dengan kode pelanggan yang dianonimkan. Penyajian ini memperlihatkan bahwa data yang digunakan bukan sekadar daftar daya tersambung, tetapi pemetaan teknis antara titik sambungan, tarikan, dan fasa terdeteksi.

TABEL 3.1 CUPLIKAN DATA HASIL VERIFIKASI FASA PELANGGAN

Kode pelanggan	Kode tiang/jurusan	Tarikan	Daya (VA)	Fasa terdeteksi
P-01	B00A01	2	1.300	S
P-02	B00A01	2	900	S
P-03	B00A01	2	1.300	S
P-04	B00A01	2	1.300	S
P-05	B00A01	3	900	T
P-06	B00A01	3	2.200	T
P-07	B00A01	3	900	T
P-08	B00A01	4	1.300	R
P-09	B00A01	4	450	R
P-10	B00A01	4	900	R

Rekapitulasi tersebut digunakan untuk mengelompokkan calon beban yang dapat dipindahkan pada jurusan tertentu. Temuan ini melengkapi penelitian Novfowan et al. [5], yang berfokus pada perancangan dan pengujian perangkat PLC untuk pendeteksian fasa. Pada penelitian terdahulu, fungsi PLC terutama dibuktikan sebagai media identifikasi. Pada studi ini, hasil identifikasi tersebut diteruskan ke tahap keputusan penyeimbangan beban, sehingga kontribusinya berada pada integrasi alur kerja lapangan, bukan pada pengembangan perangkat baru.

Dibandingkan pendekatan data-driven berbasis smart meter oleh Yu et al. [12] dan kajian Hoogsteyn et al. [14], pendekatan PLC pada studi kasus ini tidak menuntut deret waktu tegangan dari AMI.

Namun, perbandingan tersebut tidak dapat diartikan sebagai bukti bahwa PLC lebih akurat daripada metode data-driven, karena objek, infrastruktur, dan metrik evaluasinya berbeda. Keunggulan yang ditunjukkan hanya berupa keterlaksanaan fase pada kondisi jaringan yang menjadi objek penelitian.

3.2 Kondisi Pembebanan Transformator (Pengukuran Awal)

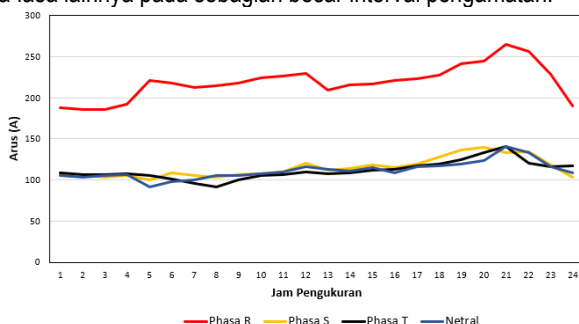
Kondisi awal yang digunakan sebagai baseline berasal dari pengukuran pada 26 Januari 2024. Arus fasa yang tercatat adalah $I_R = 265$ A, $I_S = 133$ A, dan $I_T = 116$ A; arus netral tercatat sebesar 141 A. Dengan penerapan rumus indeks ketidakseimbangan pada bagian metode, arus rata-rata sebesar 171,33 A menghasilkan indeks ketidakseimbangan 36,45%. Nilai tersebut menunjukkan deviasi yang besar terutama pada fasa R.

TABEL 3.2 KONDISI PEMBEBANAN AWAL SEBAGAI BASELINE ANALISIS

Parameter	Nilai
Tanggal pengukuran	26 Januari 2024
I_R	265 A
I_S	133 A
I_T	116 A
I_N	141 A
$I_{rata-rata}$	171,33 A
UBL	36,45%

Perhitungan koefisien perlu menggunakan arus fasa T sebesar 116 A, bukan arus netral 141 A. Pembetulan ini penting karena arus netral dan arus fasa mempunyai fungsi berbeda pada perhitungan UBL. Dengan memakai 265 A, 133 A, dan 116 A secara konsisten, nilai 36,45% dapat direproduksi dari data baseline yang disajikan pada Tabel 3.

Arus netral yang tinggi pada kondisi awal konsisten dengan uraian Pinthurat et al. [7] bahwa distribusi beban satu fasa yang tidak merata dapat meningkatkan arus netral dan rugi-rugi pada penghantar netral. Hasil ini juga sejalan dengan studi tentang pengaruh unbalance terhadap kualitas daya [3], [4]. Akan tetapi, hubungan yang diamati pada gardu N1223 tidak digunakan untuk menyatakan besaran dampak yang sama pada gardu lain. Gambar 3.1 memperlihatkan profil arus 24 jam sebelum penyeimbangan. Grafik digunakan untuk menunjukkan bahwa fasa R berada di atas dua fasa lainnya pada sebagian besar interval pengamatan.



GAMBAR 3.1 PROFIL ARUS FASA DAN ARUS NETRAL SEBELUM PENYEIMBANGAN (SUMBER: DATA PRIMER)

3.3 Perencanaan Penyeimbangan Beban

Perencanaan penyeimbangan dilakukan menggunakan

catatan pengukuran pada tingkat jurusan. Tabel 3.3 menunjukkan arus Line B dan Line C beserta selisihnya terhadap arus rata-rata. Tabel 3.3 digunakan untuk memilih target perpindahan pada jurusan. Pada Line B, fasa R memiliki kelebihan relatif 38 A terhadap arus rata-rata, sedangkan fasa S dan T masing-masing kekurangan 24 A dan 14 A. Pada Line C, fasa R memiliki kelebihan relatif 47,33 A, sedangkan fasa S dan T kekurangan 22,70 A serta 24,70 A. Pola ini memberikan alasan teknis untuk memindahkan sebagian kelompok sambungan dari fasa R menuju fasa S dan T.

TABEL 3.3 SELISIH ARUS JURUSAN TERHADAP ARUS RATA-RATA

Jurusan	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	$I_{rata-rata}$ (A)	$\Delta R/S/T$ (A)
Line B	84	22	32	46,00	38/-24/-14
Line C	181	111	109	133,70	47,33/-22,70/-24,70

Tabel 3.4 merangkum target pemindahan berdasarkan kelompok tarikan, bukan data individual pelanggan. Pada Line B, kelompok tarikan 3 dialihkan dari R ke S dengan total daya nominal 5.700 VA, sedangkan tarikan 7 dialihkan dari R ke T dengan total daya nominal 3.100 VA berdasarkan penjumlahan data pada tabel sumber. Pada Line C, total 5.300 VA dialihkan dari R ke S dan 5.700 VA dari R ke T.

TABEL 3.4 TARGET PENYEIMBANGAN BEBAN PADA JURUSAN TERPILIH (DATA PELANGGAN DIAGREGASI)

Jurusan	Titik/tarikan	Daya	Asal	Tujuan
Line B	B03A01 / tarikan 3	5700 VA	R	S
Line B	B03A01 / tarikan 7	3100 VA	R	T
Line C	C06 tarikan 5 + C07B02 tarikan 9	5300 VA	R	S
Line C	C05 / tarikan 1	5700 VA	R	T

Daya nominal pelanggan dipakai sebagai informasi pemilihan kelompok, bukan sebagai pengganti pengukuran arus aktual. Beban rumah tangga berubah terhadap waktu dan faktor dayanya tidak tersedia dalam data primer, sehingga arus pascapemindahan tidak boleh dihitung hanya dari penjumlahan VA nominal. Oleh sebab itu, pengukuran ulang menjadi langkah verifikasi utama, sejalan dengan prinsip phase reassignment yang membutuhkan evaluasi terhadap kondisi aktual jaringan [11].

3.4 Hasil Penyeimbangan Beban

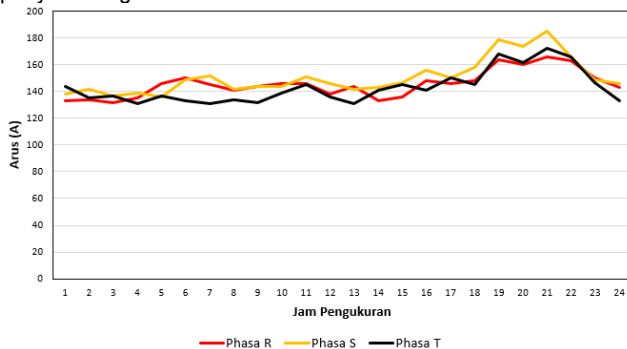
Sesudah penyeimbangan pada Line B dan Line C, pengukuran ulang menunjukkan bahwa jarak antararus fasa berkurang seperti pada Tabel 3.5. Pada salah satu kondisi, $I_R = 150$ A, $I_S = 149$ A, dan $I_T = 133$ A menghasilkan UBL sebesar 5,09%, yang dibulatkan menjadi 5,1%. Pada pukul 20:00, ketika pembebanan relatif tinggi, $I_R = 166$ A, $I_S = 185$ A, dan $I_T = 172$ A menghasilkan UBL sebesar 4,08% atau sekitar 4,1%. Arus netral pascapenyeimbangan yang dicatat pada dokumen primer adalah 16,82 A, dibandingkan 141 A pada baseline. Penurunan tersebut setara dengan sekitar 88,1% berdasarkan kedua nilai arus yang tercatat. Nilai ini mendukung interpretasi bahwa pembagian arus antarfasa yang lebih merata berkaitan dengan berkurangnya resultan arus pada penghantar netral, tetapi penyebabnya tetap harus dipahami dalam konteks satu gardu dan satu waktu pengamatan. Hasil ini mendukung arah temuan Novfowan et al. [13] bahwa data fasa pelanggan yang valid dapat membantu tindakan penyeimbangan dan mendukung prinsip

phase reassignment yang dikemukakan oleh Zhang dan Sun [11]. Berbeda dengan penelitian Zhang dan Sun yang mengembangkan strategi serta perangkat phase-swapping, studi N1223 menyajikan penerapan berbasis data deteksi PLC dan pemindahan kelompok sambungan pada jurusan terpilih. Oleh karena itu, bukti yang diberikan bersifat operasional pada studi kasus, bukan evaluasi perangkat otomatis. Hasil juga konsisten dengan kajian Pinthurat et al. [7] mengenai konsekuensi ketidakseimbangan terhadap arus netral.

TABEL 3.5 INDIKATOR PEMBEBANAN SETELAH PENYEIMBANGAN

Kondisi pascapenyeimbangan	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	$I_{rata-rata}$ (A)	UBL
Kondisi dengan UBL tertinggi tercatat	150	149	133	144,00	5,09%
Pukul 20:00	166	185	172	174,33	4,08%
Arus netral terukur	16,82	-	-	-	-

Gambar 3.2 menunjukkan profil arus fasa setelah tindakan. Ketiga kurva tampak lebih berdekatan dibandingkan profil sebelum penyeimbangan.



GAMBAR 3.2 PROFIL ARUS TIGA FASA SETELAH PENYEIMBANGAN (SUMBER: DATA PRIMER)

Secara praktis, kontribusi penelitian ini adalah adanya jejak keputusan yang dapat diikuti antara lain data fasa pelanggan yang terverifikasi, selisih arus per jurusan, kelompok sambungan yang dipilih, dan pengukuran ulang. Untuk implementasi yang dapat direplikasi secara konsisten, dokumen kerja lapangan perlu distandardisasi, mencakup formulir verifikasi fasa, persetujuan operasi, catatan K3, nilai parameter penghantar, dan pengamanan data pelanggan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini membahas penyeimbangan beban transformator distribusi pada gardu N1223 dengan menggunakan data hasil deteksi fasa pelanggan sebagai dasar penentuan target pemindahan sambungan. Topik ini penting karena ketidakseimbangan beban pada pelanggan satu fasa dapat meningkatkan arus netral dan menurunkan kualitas operasi jaringan distribusi tegangan rendah. Temuan utama menunjukkan bahwa kondisi awal $I_R = 265$ A, $I_R = 133$ A, dan $I_R = 116$ A menghasilkan indeks ketidakseimbangan 36,45% dengan arus netral 141 A. Setelah re-fasa pada Line B dan Line C, indeks ketidakseimbangan tertinggi yang dicatat adalah 5,09%; pada pukul 20:00 nilainya 4,08%. Arus netral pascatindakan tercatat 16,82 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa data fasa pelanggan

yang terverifikasi dapat digunakan sebagai dasar yang dapat ditelusuri dalam memilih target penyeimbangan.

Hasil studi kasus ini mendukung penelitian terdahulu yang menunjukkan pentingnya data fasa pelanggan untuk penyeimbangan beban [13] dan mendukung prinsip *phase reassignment* untuk mengurangi ketidakseimbangan pada jaringan distribusi [11]. Hasil juga selaras dengan kajian yang mengaitkan ketidakseimbangan beban dengan peningkatan arus netral [7]. Penelitian ini tidak bertentangan dengan pendekatan *data-driven* berbasis smart meter [12], [14], tetapi menawarkan alur kerja yang berbeda untuk konteks data PLC dan data lapangan yang tersedia pada gardu N1223. Batasan penelitian adalah penelitian hanya dilakukan pada satu gardu dan tidak membuktikan bahwa hasilnya berlaku untuk seluruh jaringan distribusi. Selain itu, nilai tahanan, panjang, penampang, dan konfigurasi penghantar netral tidak tersedia secara lengkap; oleh karena itu, studi ini tidak menyatakan penurunan rugi-rugi penghantar atau rugi-rugi transformator secara kuantitatif. Pelaksanaan di lapangan juga harus mengikuti izin operasi, K3, serta pengamanan identitas pelanggan.

Pengembangan berikutnya dapat memasukkan dokumentasi alat ukur yang lengkap, parameter fisik penghantar netral, rekaman waktu kerja, dan jumlah iterasi penyeimbangan. Penelitian lanjutan juga dapat menguji prosedur pada beberapa gardu, membandingkan PLC dengan data smart meter, serta mengembangkan formulir atau aplikasi keputusan yang mengintegrasikan verifikasi fasa, rekomendasi re-fasa, keselamatan kerja, dan perlindungan data pelanggan.

Referensi

- [1] R. K. Mittapelli, E. Tharun Sai, and N. Pragathi, "In-depth Automation and Structural Analysis to Enhance the Power Distribution Reliability of an Urban Neighbourhood," *Learn. Anal. Intell. Syst.*, vol. 4, pp. 451–461, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-24318-0_54/SAVE-RESEARCH.
- [2] K. Rohmat et al., "ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI PT. PLN (PERSERO) UPDL PANDAAN," *Transm. J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 25, no. 4, pp. 186–192, Dec. 2023, doi: 10.14710/TRANSMISI.25.4.186-192.
- [3] K. Ma, L. Fang, and W. Kong, "Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 479–488, Sep. 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.03280.
- [4] C. I. Ciontea and F. Iov, "A Study of Load Imbalance Influence on Power Quality Assessment for Distribution Networks," *Electr. 2021, Vol. 2, Pages 77-90*, vol. 2, no. 1, pp. 77–90, Mar. 2021, doi: 10.3390/ELECTRICITY2010005.
- [5] A. D. Novfowan, M. Mieftah, W. Kusuma, and S. Nurhadi, "Power Line Carrier (PLC) sebagai Media Pendeteksi Fasa Pelanggan Tegangan Rendah," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 3, pp. 154–159, Oct. 2023, doi: 10.33795/ELPOSYS.V10I3.4166.
- [6] F. H. M. Rafi, M. J. Hossain, M. S. Rahman, and S. Taghizadeh, "An overview of unbalance compensation techniques using power electronic converters for active distribution systems with renewable generation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 125, p. 109812, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.RSER.2020.109812.

- [7] W. Pinthurat, B. Hredzak, G. Konstantinou, and J. Fletcher, "Techniques for compensation of unbalanced conditions in LV distribution networks with integrated renewable generation: An overview," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 214, p. 108932, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.EPSR.2022.108932.
- [8] Zainal Sya'roni, "Admin,+Baru," *J. Tek. elektro Anal. KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN Transform. Distrib. 20 KV DAN SOLUSINYA PADA Jar. TEGANGAN RENDAH*, pp. 1–9, 2019.
- [9] 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, Dec. 2023, doi: 10.55606/ISAINTEK.V6I02.148.
- [10] S. Toghranegar, A. Rabiee, and A. Soroudi, "Enhancing the unbalanced distribution network's hosting capacity for DERs via optimal load re-phasing," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 87, p. 104243, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.SCS.2022.104243.
- [11] Y. Zhang and X. Sun, "Phase reassignment strategy and load phase-swapping device for three-phase unbalance in the power distribution area," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 235, p. 110564, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.EPSR.2024.110564.
- [12] H. Yu, Y. Wu, W. Guan, D. Zhang, T. Yu, and Q. Liu, "Practical Method for Data-Driven User Phase Identification in Low-Voltage Distribution Networks," *Front. Energy Res.*, vol. 9, p. 752571, Nov. 2021, doi: 10.3389/FENRG.2021.752571/TEXT.
- [13] Anang Dasa Novfowan, Mochammad Mieftah, and Wijaya Kusuma, "Alternatif Penanganan Losses Akibat Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi," *J. Tek. Ilmu Dan Apl.*, vol. 9, no. 1, pp. 83–90, 2021, doi: 10.33795/jtia.v9i1.17.
- [14] A. Hoogsteyn, M. Vanin, A. Koirala, and D. Van Hertem, "Low Voltage Customer Phase Identification Methods Based on Smart Meter Data," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 212, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108524.
- [15] O. BenRhouma, C. Rebai, M. Ben-Romdhane, D. Di Cara, G. Artale, and N. Panzavecchia, "Environmental Impact on RF and PLC for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grids," Sep. 2023, doi: 10.20944/PREPRINTS202309.0948.V1.
- [16] S. Ustun Ercan, "Power line Communication: Revolutionizing data transfer over electrical distribution networks," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 52, p. 101680, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.JESTCH.2024.101680.