

Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Gardu Distribusi KA 0251 Penyulang Gelogor Carik

I Wayan Utama¹, Ida Ayu Laksmi Nirmala Sari²,

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Pendidikan Nasional, Indonesia
E-mail: wayansutama@undiknas.ac.id

DOI: https://doi.org/10.38043/telsinas.v6i2.4893	Received: 07 Juli 2023	Accepted: 19 Agustus 2023	Publish: 25 September 2023
--	----------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------

ABSTRAK: Penyaluran energi listrik yang stabil dan kontinyu merupakan syarat utama dalam memenuhi kebutuhan daya listrik masyarakat. Dalam proses penyaluran energi listrik tersebut, transformator sering kali mengalami gangguan berupa ketidakseimbangan beban pada tiap fasanya. Ketidakseimbangan beban ini akan menyebabkan transformator distribusi menjadi cepat panas yang diakibatkan oleh arus urutan nol yang timbul dari ketidakseimbangan tersebut. Disamping itu, juga akan terjadi kerugian daya yang lebih besar yang diakibatkan oleh arus pada penghantar netral dan juga arus yang mengalir melalui sistem pentanahan netral dari transformator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketidakseimbangan beban yang terjadi pada gardu distribusi KA 0251 dan juga menghitung besarnya kerugian daya akibat dari ketidakseimbangan tersebut. Hasil analisis menunjukkan bahwa Gardu Distribusi KA 0251, nilai persentase ketidakseimbangan bebannya mencapai 50,16% (buruk) yang menyebabkan terjadinya rugi-rugi daya (*losses*) pada penghantar dengan total sebesar 12,55%. Setelah dilakukan penyeimbangan beban dengan memindahkan sambungan pelanggan pada fasa yang tinggi dipindahkan ke fasa yang rendah, persentase ketidakseimbangan beban nilainya turun menjadi 14,32% serta persentase rugi-rugi daya menurun menjadi 4,41%.

Kata kunci: Ketidakseimbangan Beban, Gardu Distribusi, Rugi-rugi Daya

ABSTRACT: Stable and continuous distribution of electrical energy is the main requirement for meeting the community's electrical power needs. In the process of distributing electrical energy, transformers often experience disturbances in the form of load imbalance on each phase. This load imbalance will cause the distribution transformer to heat up quickly due to the zero sequence current that arises from this imbalance. Apart from that, there will also be greater power losses caused by the current in the neutral conductor and also the current flowing through the neutral grounding system of the transformer. This research aims to analyze the load imbalance that occurs at the KA 0251 distribution substation and also calculate the amount of power loss resulting from this imbalance. The results of the analysis show that at the KA 0251 Distribution Substation, the load imbalance percentage value reached 50.16% (bad) which caused power losses in the conductors with a total of 12.55%. After load balancing was carried out by moving customer connections from the high phase to the low phase, the load imbalance percentage decreased to 14.32% and the percentage of power losses decreased to 4.41%.

Keywords: Load Unbalance, Distribution Substation, Power Losses

I. PENDAHULUAN

Di era modern saat ini dan dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang semakin pesat, penggunaan energi listrik sudah menjadi kebutuhan utama bagi seluruh golongan masyarakat. Perkantoran pemerintah, sekolah, pabrik, fasilitas umum lainnya akan lumpuh bila terjadi pemadaman listrik. Untuk itu sudah menjadi kewajiban bagi perusahaan listrik negara PT PLN (Persero) untuk menyediakan dan menyalurkan energi listrik ke konsumen dengan kualitas, kuantitas dan kontinuitas yang baik, agar dapat memberi kenyamanan kepada konsumen.

Dalam proses penyaluran energi listrik tersebut dibutuhkan transformator yang nantinya dapat berfungsi mentransformasikan daya atau energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah ataupun sebaliknya [1]. Transformator merupakan peralatan vital yang diperlukan sebagai media penyaluran energi listrik kepada masyarakat dan pelaku bisnis. Transformator yang terpasang pada gardu distribusi yaitu

mengubah tegangan menengah 20 KV menjadi tegangan rendah 380/220 Volt [2], kemudian tegangan rendah akan langsung disalurkan ke konsumen baik itu masyarakat maupun pelaku usaha.

Terdapat dua hal yang dapat menyebabkan kerusakan dan kerugian pada transformator yaitu, pembebanan yang melebihi standar dan ketidakseimbangan beban yang melebihi standar[3]. Transformator memiliki kapasitas pembebanan yang berbeda – beda sesuai dengan kapasitasnya. Transformator yang overload akan mengakibatkan kerusakan mulai dari komponen gardu distribusi dan trafo akan cepat panas sehingga umur teknis transformator menyusut. Berdasarkan Edaran direksi PT PLN (Persero) Nomor: 0017. E/DIR/2014 pembebanan trafo dapat dibagi menjadi 4 katagori yaitu: pembebanan < 60 % baik; 60 % - < 80 % cukup; 80 % - < 100 % kurang; \geq 100 % buruk. Keadaan ini akan semakin buruk bila pembebanan transformator tidak seimbng. Ketidakseimbangan beban terjadi bila beban yang dilayani pada tiap-tiap fasa (fasa R, fasa S, fasa T) besarnya tidak sama. Sesuai Edaran Direksi PT. PLN (Persero) Nomor: 0017. E/DIR/2014 besar ketidakseimbangan arus antar fas a dibagi menjadi 4 kategori yaitu: ketidakseimbangan < 10 % baik; 10 % - < 20 % cukup; 20 % - < 25 % kurang; dan \geq 25 % buruk[4]. Semakin besar ketidakseimbangan beban maka semakin besar rugi daya listrik yang ditimbulkan. Rugi daya listrik ini merupakan beban tambahan yang harus ditanggung oleh pembangkit, yang akhirnya pembangkit akan memerlukan biaya operasional yang tinggi. Membangkitkan daya listrik dalam jumlah yang besar dengan menggunakan bahan bakar dari fosil seperti batubara tentunya juga akan berdampak pada pencemaran lingkungan oleh karbondioksida yang berasal dari hasil pembangkitan. Karena itu, bila terjadi beban yang tak seimbang pada transformator distribusi harus dilakukan upaya pembenahan dengan menata kembali sambungan pelanggan dalam rangka menyeimbangkan beban antar fasa, sehingga diperoleh persentase ketidakseimbangan beban yang kecil dan dapat meminimalisir rugi daya pada transformator.

Pada PT. PLN (Persero) ULP Kuta terdapat Penyulang Gelogor Carik yang melayani 72 gardu distribusi, salah satu adalah transformator distribusi KA 0251. Dari hasil inspeksi diketahui bahwa transformator KA0251 mengalami masalah ketidakseimbangan beban yang cukup besar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis besarnya ketidakseimbangan yang terjadi, menganalisis besarnya kerugian daya yang ditimbulkan oleh ketidakseimbangan beban dan mengambil langkah penyeimbangan beban. Selanjutnya, setelah dilakukan upaya penyeimbangan beban juga dihitung ketidakseimbangan beban dan juga rugi-rugi daya listrik yang ditimbulkan.

II. LANDASAN TEORI

Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik terbagi atas 3 bagian utama yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi. Ketiga bagian tersebut merupakan satu kesatuan dan harus saling mendukung. Untuk mewujudkan system penyaluran yang handal dengan kualitas daya yang baik sampai pada tingkat pelanggan/konsumen, ini merupakan tujuan utama dari sistem tenaga listrik [5]. Sistem distribusi tenaga listrik berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari pusat beban (gardu induk) sampai ke konsumen. Sistem distribusi dibedakan menjadi sistem distribusi primer dan sistem distrubsi sekunder.

Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan bangunan gardu transformator yang memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pemanfaat baik dengan tegangan menengah maupun tegangan rendah [6]. Gardu Distribusi terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB – TM), Transformator Distribusi (TD) dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB – TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V). Macam-macam gardu distribusi terdiri dari gardu kios, gardu beton, gardu portal, gardu cantol.

Transfromator

Transformator adalah suatu alat listrik yang digunakan untuk mentransformasikan daya atau energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga

memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh[7].

Pembebanan Transformator

Pemilihan kapasitas kVA trafo distribusi didasarkan pada beban yang akan dilayani. Untuk menghindari kerugian yang besar dan pemanasan pada transformator distribusi, sebaiknya pembebanan transformator maksimum 80% dari kapasitas transformator[8].

Persentase pembebanan transformator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\% \text{ Beban} = \frac{V \times I \times \sqrt{3}}{\text{Daya Transformator}} \times 100\% \quad (1)$$

Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan merupakan suatu keadaan yang terjadi apabila salah satu atau semua fasa pada transformator mengalami perbedaan beban [9]. Perbedaan ini dilihat dari besarnya vektor arus/tegangan dan sudut dari masing-masing fasa tersebut. Kemungkinan ketidakseimbangan terjadi bila:

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

Untuk menghitung ketidakseimbangan beban dalam (%) dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

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

Rugi – Rugi Daya Pada Penghantar

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan pada sisi sekunder transformator (fasa R, S, dan T) akan mengalir arus pada penghantar netral, arus ini akan yang menyebabkan terjadinya *losses*[10]. Selain pada penghantar netral, *losses* juga terjadi pada pentanahan transformator. Kerugian daya pada jaringan listrik adalah salah satu indikator terpenting operasi ekonomi dari perusahaan jaringan listrik dan juga mengubah kondisi sistem pembacaan meter listrik serta efektivitas jaringan [11]. *Losses* pada penghantar netral trafo dapat dirumuskan sebagai berikut ini:

$$PN = IN^2 \times RN \quad (3)$$

Dengan:

- PN = Rugi-rugi daya atau *losses* pada penghantar netral (Watt)
- IN = Arus pada penghantar netral (A)
- RN = Tahanan pada penghantar netral (Ω)

Sedangkan untuk menghitung *losses* akibat adanya arus netral ke *grounding* dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$PG = IG^2 \times RG \quad (4)$$

Dengan:

- PN = Rugi-rugi daya atau *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (Watt)
- IG = Arus netral yang mengalir ke tanah (A)
- RG = Tahanan pembumian netral trafo (Ω)

III. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan beberapa metode pengumpulan data diantaranya, dengan melakukan observasi, wawancara, pengukuran, studi literatur dan dokumentasi pada objek penelitian yaitu Gardu KA 0251 Penyulang Gelogor Carik di PT. PLN (Persero) ULP Kuta.

Dalam pengumpulan data khususnya yang berkaitan dengan data gardu distribusi KA 0251 antara lain data system pentanahan netral dari trafo distribusi, *single line diagram* tegangan rendah dari jaringan distribusi sekunder KA 0251, jenis dan luas penampang penghantar dilakukan dengan cara dokumentasi yaitu berdasarkan dokumen yang tersimpan di PLN. (Persero) ULP Kuta. Sedangkan data pembebanan transformator dilakukan pengukuran arus secara langsung pada sisi sekunder dari transformator dengan menggunakan alat ukur tang amper meter. Juga dilakukan pengukuran tegangan pada setiap fasanya.

Berdasarkan data tersebut, dihitung persentase ketidakseimbangan pembebanan dari transformator dan juga dihitung kerugian daya yang terjadi. Dalam rangka menyeimbangkan beban, selanjutnya dilakukan pemindahan sambungan pelanggan dari fasa yang jumlah pelanggannya banyak sebagian di pindahkan ke fasa yang jumlah bebannya sedikit. Selanjutnya dilakukan perhitungan ulang ketidakseimbangannya dan juga rugi rugi dayanya.

IV. PEMBAHASAN

Perhitungan Pembebanan Transformator Pada Gardu Distribusi KA 0251 Sebelum Penanganan

Dalam penelitian ini, penulis melakukan observasi dan pengukuran langsung ke objek penelitian yaitu gardu distribusi KA 0251 selama 5 (lima) hari. Hasil pengukuran arus induk dan tegangan induk disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Data Hasil Pengukuran Arus Induk dan Tegangan Induk Sebelum Penanganan

Tanggal	Arus (A)					Tegangan (V)			R _G ohm
	R	S	T	N	Ground	RS	RT	ST	
4 Juli 2022	89,8	13,1	61,8	66,8	31,3	400,5	404,4	408,6	11
5 Juli 2022	91,4	13,7	61,4	65,4	30,7	398,1	399,4	408,5	11
6 Juli 2022	90,5	14,1	60,8	62,3	29,6	395,5	398,4	402,2	11
7 Juli 2022	90,9	14,2	60,3	67,1	31,3	401,3	401,0	410,7	11
8 Juli 2022	87,3	12,9	62,0	61,7	29,0	409,7	405,4	405,1	11

Berdasarkan data hasil pengukuran pada tanggal 04 Juli 2022 seperti tercantum pada Tabel 1, dihitung arus rata – rata:

$$\begin{aligned}
 I_L \text{ rata-rata} &= \frac{I_r+I_s+I_t}{3} \\
 &= \frac{89,8A+13,1A+61,8A}{3} \\
 &= 54,87 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Tegangan rata – rata fasa dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_L \text{ rata-rata} &= \frac{V_{RS}+V_{RT}+V_{ST}}{3} \\
 &= \frac{400,5A+404,4A+408,6A}{3} \\
 &= 404,51 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya dihitung persentase pembebanan transformator menggunakan persamaan sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 \% \text{ Pembebanan} &= \frac{V_L \times I_L \times \sqrt{3}}{\text{Daya Transformator}} \times 100 \% \\
 &= \frac{404,51 \text{ V} \times 54,87 \text{ A} \times \sqrt{3}}{200.000 \text{ VA}} \times 100 \% \\
 &= \frac{38445,69 \text{ VA}}{200.000 \text{ VA}} \times 100 \% \\
 &= 19,22\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, persentase pembebanan pada tanggal 04 Juli 2022 sebesar 19,22%. Dan dalam Edaran Direksi PT. PLN (Persero) Nomor 0017.E/DIR/2014 nilai persentase tersebut masuk dalam kategori baik. Nilai persentase pembebanan pada hari yang lain dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 2 Hasil Perhitungan Persentase Pembebanan pada Gardu Distribusi KA 0251 Sebelum Penanganan

Tanggal	Pembebanan (%)	Katagori berdasarkan Surat Edaran Direksi PT. PLN
4 Juli 2022	19,22	Baik
5 Juli 2022	19,32	Baik
6 Juli 2022	19,04	Baik

7 Juli 2022	19,31	Baik
8 Juli 2022	19,05	Baik
Rata-Rata	19,19	Baik

Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Pada Gardu Distribusi KA 0251 Sebelum Penanganan

Untuk menghitung ketidakseimbangan beban dibutuhkan nilai arus rata – rata pada gardu distribusi dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3}$$

$$= \frac{89,8A + 13,1A + 61,8A}{3}$$

$$= 54,87 \text{ A}$$

Setelah arus induk rata-rata diketahui selanjutnya menghitung ketidakseimbangan beban setiap fasa pada gardu distribusi KA 0251 dengan rumus:

$$I_R = a \times I_{\text{rata-rata}}, \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{89,8A}{54,87A} = 0,636 \text{ A}$$

$$I_S = b \times I_{\text{rata-rata}}, \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{13,1A}{54,87A} = 0,762 \text{ A}$$

$$I_T = c \times I_{\text{rata-rata}}, \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{61,8A}{54,87A} = 0,125 \text{ A}$$

Jadi untuk mengetahui berapa besar persentase ketidakseimbangan beban pada gardu KA 0251 dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\% \text{ Ketidakseimbangan} = \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} \times 100\%$$

$$= \frac{\{|0,636-1| + |0,762-1| + |0,125-1|\}}{3} \times 100\%$$

$$= 50,80\%$$

Hasil perhitungan persentase ketidakseimbangan beban pada tanggal 04 Juli 2022 mencapai 50,80% nilai tersebut termasuk kategori buruk sesuai Edaran Direksi PT. PLN (Persero) Nomor: 0017. E/DIR/2014. Adapun hasil perhitungan persentase ketidakseimbangan beban selama 5 hari disajikan pada Tabel 3:

Tabel 3 Hasil Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan beban pada Gardu Distribusi KA 0251 Sebelum Penanganan

Tanggal	Ketidakseimbangan Beban (%)	Katagori berdasarkan Surat Edaran Direksi PT. PLN
4 Juli 2022	50,80	Buruk
5 Juli 2022	50,24	Buruk
6 Juli 2022	49,57	Buruk
7 Juli 2022	49,50	Buruk
8 Juli 2022	50,71	Buruk
Rata-Rata	50,16	Buruk

Perhitungan Rugi Daya Akibat Beban Tidak Seimbang Sebelum Penanganan

Akibat nilai ketidakseimbangan beban yang besar, maka timbulah arus yang besar pada penghantar netral yang mengakibatkan rugi daya. Dalam melakukan perhitungan rugi daya pada penghantar diperlukan beberapa data seperti nilai arus netral dan resistansi penghantar JTR.

Perhitungan rugi-rugi pada fasa R

$$P_R = I_R^2 \times R_N$$

$$= (89,8)^2 \times 0,690 \Omega$$

$$= 5561,77 \text{ Watt}$$

$$= 5,56 \text{ kW}$$

Perhitungan rugi-rugi pada fasa S

$$P_S = I_S^2 \times R_N$$

$$= (13,1)^2 \times 0,690 \Omega$$

$$= 117,64 \text{ Watt}$$

$$= 0,12 \text{ kW}$$

Perhitungan rugi-rugi pada fasa T

$$P_T = I_T^2 \times R_N$$

$$= (61,8)^2 \times 0,690 \Omega$$

$$= 2630,72 \text{ Watt}$$

$$= 2,63 \text{ kW}$$

Perhitungan rugi-rugi pada penghantar N

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

$$= (66,8)^2 \times 0,690 \Omega$$

$$= 3075,76 \text{ Watt}$$

$$= 3,08 \text{ kW}$$

Selain munculnya arus pada penghantar netral, ketidakseimbangan beban juga mengakibatkan arus yang besar pada grounding transformator:

$$P_G = I_G^2 \times R_G$$

$$= (31,3)^2 \times 11 \Omega$$

$$= 10762,82 \text{ Watt}$$

$$= 10,76 \text{ kW}$$

Total rugi – rugi yang terjadi di penghantar dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_{total} = P_R + P_S + P_T + P_N + P_G$$

$$= 5,56 \text{ kW} + 0,12 \text{ kW} + 2,63 \text{ kW} + 3,08 \text{ kW} + 10,76 \text{ kW}$$

$$= 22,15 \text{ kW}$$

Jadi persentase rugi-rugi daya total yang terjadi pada tanggal 04 Juli 2022:

$$\%P_{total} = \frac{P_{total}}{P} \times 100\%$$

$$= \frac{22,15 \text{ kW}}{170 \text{ kW}} \times 100\%$$

$$= 13,03 \%$$

Adapun hasil perhitungan rugi daya selama 5 hari, disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4 Hasil Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan beban pada Gardu Distribusi KA 0251 Sebelum Penanganan

Tanggal	Rugi-Rugi Total (kW)	Persentase Rugi-Rugi Daya
4 Juli 2022	22,15	13,03
5 Juli 2022	21,82	12,83
6 Juli 2022	20,62	12,13
7 Juli 2022	22,20	13,06
8 Juli 2022	19,91	11,71
Rata-Rata	21,34	12,55

Mengatasi Ketidakseimbangan Beban pada Gardu Distribusi KA 0251

Setelah diketahui nilai ketidakseimbangan beban pada gardu KA 0251 termasuk dalam katagori yang buruk. Maka dilakukanlah pekerjaan penyeimbangan beban, dimana penyeimbangan beban ini dilakukan dengan memindahkkan beban dari fasa yang padat nilai bebannya ke fasa yang lebih ringan nilai bebannya. Pada kasus ini, pemindahan beban dilakukan dari fasa R ke fasa S

Pehitungan Pembebanan Transformator Pada Gardu Distribusi KA 0251 Sesudah Penanganan

Berikut merupakan nilai rata-rata selama 5 hari setelah dilakukan penanganan penyeimbangan beban pada gardu distribusi KA 0251 Penyulang Gelogor Carik:

Tabel 5 Data Hasil Pengukuran Arus Induk dan Tegangan Induk Sesudah Penanganan

Tanggal	Arus (A)					Tegangan (V)			R _G ohm
	R	S	T	N	Ground	RS	RT	ST	
22 Sept. 2022	50,0	46,6	65,2	22,4	9,4	408,2	407,6	407,6	11
23 Sept. 2022	49,1	46,4	65,4	21,9	8,6	408,7	410,1	410,1	11
24 Sept. 2022	51,0	47,1	66,7	22,4	8,9	403,9	403,5	403,5	11
25 Sept. 2022	50,6	46,8	66,9	21,9	9,6	405,8	405,6	405,6	11
26 Sept. 2022	49,3	47,3	65,4	22,5	9,4	409,3	408,8	408,8	11

Arus rata – rata dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 I_L \text{ rata-rata} &= \frac{I_r+I_s+I_t}{3} \\
 &= \frac{50,0A+46,6A+65,2A}{3} \\
 &= 53,97 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Tegangan rata – rata fasa dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_L \text{ rata-rata} &= \frac{V_{RS}+V_{RT}+V_{ST}}{3} \\
 &= \frac{405,8A+408,2A+407,6A}{3} \\
 &= 407,19 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Setelah memperoleh hasil rata – rata arus dan tegangan maka perhitungan persentase pembebanan:

$$\begin{aligned}
 \% \text{ Pembebanan} &= \frac{V_L \times I_L \times \sqrt{3}}{\text{Daya Transformator}} \times 100 \% \\
 &= \frac{407,19 \text{ V} \times 53,97 \text{ A} \times \sqrt{3}}{200.000 \text{ VA}} \times 100 \% \\
 &= \frac{38060,96 \text{ VA}}{200.000 \text{ VA}} \times 100 \% \\
 &= 19,03\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, persentase pembebanan tanggal 22 September 2022 sebesar 19,03%. Dalam Edaran Direksi PT. PLN (Persero) Nomor 0017.E/DIR/2014 nilai persentase tersebut masuk dalam kategori baik. Dengan menggunakan persamaan yang sama maka nilai persentase pembebanan setelah dilakukannya penanganan penyeimbangan beban dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 6 Hasil Perhitungan Persentase Pembebanan pada Gardu Distribusi KA 0251 Sesudah Penanganan

Tanggal	Pembebanan (%)	Kategori Berdasarkan Edaran Direksi PT. PLN (Persero)
22 Sept. 2022	19,03	Baik
23 Sept. 2022	19,01	Baik
24 Sept. 2022	19,17	Baik
25 Sept. 2022	19,17	Baik
26 Sept. 2022	19,14	Baik
Rata-Rata	19,10	Baik

Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Pada Gardu Distribusi KA 0251 Sesudah Penanganan

Nilai arus rata – rata pada gardu distribusi KA 0251 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 I \text{ rata-rata} &= \frac{I_r+I_s+I_t}{3} \\
 &= \frac{50,0A+46,6A+65,2A}{3} \\
 &= 53,97 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Setelah arus induk rata-rata diketahui, maka untuk menghitung ketidakseimbangan beban setiap fasa pada gardu distribusi KA 0251 dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_R = a \times I_{rata-rata}, \text{ maka } a = \frac{IR}{I_{rata-rata}} = \frac{50,0A}{53,97A} = 0,072 A$$

$$I_S = b \times I_{rata-rata}, \text{ maka } b = \frac{IS}{I_{rata-rata}} = \frac{46,6A}{53,97A} = 0,135 A$$

$$I_T = c \times I_{rata-rata}, \text{ maka } c = \frac{IT}{I_{rata-rata}} = \frac{65,2A}{53,97A} = 0,208 A$$

Mengetahui besar persentase ketidakseimbangan beban dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \% \text{ Ketidakseimbangan} &= \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} \times 100\% \\ &= \frac{\{|0,072-1| + |0,135-1| + |0,208-1|\}}{3} \times 100\% \\ &= 13,90\% \end{aligned}$$

Persentase ketidakseimbangan beban pada tanggal 22 September 2022 mencapai 13,90% dan masuk dalam kategori cukup menurut Edaran Direksi PT. PLN (Persero) Nomor: 0017. E/DIR/2014. Dengan menggunakan persamaan yang sama, adapun hasil yang diperoleh dijabarkan pada tabel berikut ini:

Tabel 7 Hasil Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan beban pada Gardu Distribusi KA 0251 Sesudah Penanganan

Tanggal	Ketidakseimbangan Beban (%)	Kategori Berdasarkan Edaran Direksi PT. PLN (Persero)
22 Sept. 2022	13,9	Cukup
23 Sept. 2022	14,64	Cukup
24 Sept. 2022	14,24	Cukup
25 Sept. 2022	14,78	Cukup
26 Sept. 2022	14,04	Cukup
Rata-Rata	14,32	Cukup

Perhitungan Rugi Daya Akibat Beban Tidak Seimbang Sesudah Penanganan

Selanjutnya penulis melakukan perhitungan *losses* yang terjadi akibat ketidakseimbangan beban tanggal 22 September 2022 dengan menggunakan persamaan:

Perhitungan rugi-rugi pada fasa R

$$\begin{aligned} P_R &= I_R^2 \times R_N \\ &= (50,0)^2 \times 0,690 \Omega \\ &= 1727,01 \text{ Watt} \\ &= 1,73 \text{ kW} \end{aligned}$$

Perhitungan rugi-rugi pada fasa S

$$\begin{aligned} P_S &= I_S^2 \times R_N \\ &= (46,6)^2 \times 0,690 \Omega \\ &= 1500,30 \text{ Watt} \\ &= 1,50 \text{ kW} \end{aligned}$$

Perhitungan rugi-rugi pada fasa T

$$\begin{aligned} P_T &= I_T^2 \times R_N \\ &= (65,2)^2 \times 0,690 \Omega \\ &= 2933,74 \text{ Watt} \\ &= 2,93 \text{ kW} \end{aligned}$$

Perhitungan rugi-rugi pada penghantar N

$$\begin{aligned} P_N &= I_N^2 \times R_N \\ &= (22,4)^2 \times 0,690 \Omega \\ &= 346,68 \text{ Watt} \\ &= 0,35 \text{ kW} \end{aligned}$$

Losses akibat arus netral yang mengalir ketanah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} P_G &= I_G^2 \times R_G \\ &= (9,4)^2 \times 11 \Omega \\ &= 971,96 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$= 0,97 \text{ kW}$$

Total rugi – rugi yang terjadi di penghantar sesudah dilakukannya penyeimbangan beban dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{total} &= P_R + P_S + P_T + P_N + P_G \\ &= 1,73 \text{ kW} + 1,50 \text{ kW} + 2,93 \text{ kW} + 0,35 \text{ kW} + 0,97 \text{ kW} \\ &= 7,48 \text{ kW} \end{aligned}$$

Jadi persentase rugi-rugi daya pada tanggal 22 September 2022:

Persentase rugi-rugi pada fasa R

$$\begin{aligned} \%P_{Total} &= \frac{P_{Total}}{P} \times 100\% \\ &= \frac{7,48 \text{ kW}}{170 \text{ kW}} \times 100\% \\ &= 4,40\% \end{aligned}$$

Adapun persentase *losses* setelah dilakukan penyeimbangan disajikan pada tabel berikut ini:

Tabel 8 Hasil Perhitungan Persentase Rugi Daya pada KA 0251 Sesudah Penanganan

Tanggal	Rugi-Rugi Daya Total (kW)	Persentase Rugi Rugi Daya (%)
22 Sept. 2022	7,48	4,40
23 Sept. 2022	7,24	4,26
24 Sept. 2022	7,62	4,48
25 Sept. 2022	7,7	4,53
26 Sept. 2022	7,48	4,40
Rata-Rata	7,50	4,41

V. KESIMPULAN

1. Ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi KA 0251 diakibatkan oleh besarnya arus yang mengalir di masing – masing fasa tidak sama atau tidak merata, untuk mengatasi masalah ini maka dilakukan penanganan penyeimbangan beban pada fasa S dan R dengan cara memindahkan beban dari fasa yang padat nilai bebannya ke fasa yang lebih ringan nilai bebannya. Pada kasus di gardu distribusi KA 0251 ini, pemindahan beban dilakukan dari fasa R ke fasa S.
2. Hasil perhitungan persentase pembebanan transformator KA 0251 dikategorikan dalam kondisi yang baik karena nilai persentase pembebanan < 60%. Pembebanan transformator sebelum penyeimbangan beban sebesar 19,19% dan sesudah adanya penanganan penyeimbangan beban persentase pembebanan menjadi 19,10%.
3. Dari hasil perhitungan ketidakseimbangan beban transformator pada gardu distribusi KA 0251 mengalami kondisi ketidakseimbangan yang buruk, dimana nilai persentase ketidakseimbangan beban sebelum dilakukan penyeimbangan sebesar 50,16%. Dan setelah dilakukan penanganan penyeimbangan beban diperoleh kondisi gardu distribusi KA 0251 kini masuk dalam katagori cukup dan nilai persentase ketidakseimbangan bebannya turun menjadi 14,32%.
4. Adapun besarrugi – rugi daya yang terjadi di saluran penghantar R, S, T, N dan pentanahan pada gardu distribusi KA 0251 sebelum penyeimbangan beban sebesar 12,55% dan setelah dilakukan penanganan penyeimbangan beban diperoleh nilai persentase rugi – rugi daya turun menjadi 4,41%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Joslen, “Analisa Arrester Transformator 60 MVA 150 KV / 20 KV di Gardu Induk Titi Kuning Medan,” *Darma Agung*, 2022.
- [2] S. R. Monantun, “Jaringan Distribusi Tenaga Listrik.”
- [3] M. I. S. Antonov*, “Studi Analisa Kinerja Trafo Pemakaian Sendiri PT. PLN (Persero) Sektor Bukittinggi PLTA Batang Agam dengan Menggunakan ESA,” *Pros. Semin. Nas. PIMIMD-4, ITP, Padang*, 2017.
- [4] S. E. D. P. P. (Persero) N. 0017.E/DIR/2014, “Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset, PT PLN (Persero),” 2014.
- [5] Damam, “Sistem Distribusi Tenaga Listrik. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas

- Negeri Padang,” 2010.
- [6] S. Hidayat, “Penyeimbangan Beban pada Jaringan Tegangan Rendah Gardu Distribusi CD 33 Penyulang Sawah di PT PLN (Persero) Area Bintaro,” vol. 08 No. 1, 2018.
 - [7] A. Kadir, “Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik. Jakarta: Universitas Indonesia (UI-Press),” 2000.
 - [8] W. Sarimun N., MT., “Buku Saku Pelayanan Teknik (YANTEK). Jakarta: Garamond,” 2014.
 - [9] G. Ayu Kartika sari, “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus netral dan Losses pada trafo distribusi ” Study kasus PT. PLN (Persero) Rayon Blora, S1 Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta,” 2018.
 - [10] E. Julianto, “Studi Pengaruh Ketidakseimbangan Pembebanan Transformator 20 KV PT. PLN (Persero) Cabang Pontianak.”
 - [11] P. P. (Persero), “SPLN D3.010-1: 2014 Spesifikasi Kabel Tegangan Rendah Bagian 1: Kabel Pilin Udara.”