

Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Transformator *Step Up* 60 Mva di Gardu Induk PT PLN (Persero) Batam



Handri Toar
Dosen pembimbing
Dinda Sri Wahyuni

Dinda Aisha Sri Wahyuni^{1*}, Handri Toar¹, Andryas Yuli Anggoro²

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi
Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam, Batam, Indonesia
^{*}Email: dindaaisriwahyuni@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Abstrak— Ketidakseimbangan beban dalam sistem distribusi tenaga listrik sering terjadi karena distribusi beban yang tidak merata antara fasa R, S, dan T pada pengguna jaringan tegangan rendah. Dampak dari ketidakseimbangan beban tersebut adalah munculnya arus netral pada trafo. Arus netral dalam trafo netral ini menyebabkan *losses*, yaitu rugi daya dari arus netral pada penghantar netral trafo dan rugi daya akibat arus netral. Adapun Hasil penelitian ini menunjukkan nilai ketidakseimbangan beban pada transformator 1 adalah 6,63% dan 6,36% untuk transformator 2 nilai ini masih dalam kondisi normal menurut dengan standart IEEE 446-1995, dan untuk arus netral transformator 1 nilainya adalah 8,32 A dan 6,94 A untuk arus netral transformator 2, dan untuk nilai rugi-rugi daya pada Transformator 1 adalah 10, 61 watt dan 7,45 watt untuk transformator 2. Dan untuk efesiensi nya adalah 99,9% terhadap trafo 1 dan 99, 8% untuk trafo 2 kasimpulan Penelitian ini menunjukan bahwa meskipun ada ketidakseimbangan beban kedua transformator ini tetap beroperasi secara efisien dan aman.

Kata kunci: transformator, ketidakseimbangan beban, rugi-rugi arus netral ,dan efisiensi

Abstrak— Load imbalance in the electric power distribution system often occurs due to unequal load distribution between the R, S and T phases for low voltage network users. The impact of this load imbalance is the emergence of neutral current in the transformer. The neutral current in the neutral transformer causes losses, namely power loss from the neutral current in the neutral conductor of the transformer and power loss due to the neutral current. The results of this research show that the load imbalance value on transformer 1 is 6.63% and 6.36% for transformer 2. This value is still in normal conditions according to IEEE 446-1995 standards, and for transformer 1's neutral current the value is 8.32 A. and 6.94 A for the neutral current of transformer 2, and the value of power losses in Transformer 1 is 10.61 watts and 7.45 watts for transformer 2. And the efficiency is 99.9% for transformer 1 and 99.8% for transformer 2. Conclusion This research shows that even though there is a load imbalance, these two transformers still operate efficiently and safely.

Key words: transformer, load imbalance, neutral current losses, and efficiency.

Sistem kelistrikan sangat penting bagi PT PLN Batam untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat dan bisnis. Salah satu komponen penting adalah Transformator gardu induk merupakan bagian penting dari sistem ini. Transformator ini mengubah tegangan dari sumber daya listrik untuk memenuhi kebutuhan distribusi pelanggan. Namun, ketidakseimbangan beban transformator dapat memengaruhi kinerja dan efisiensi operasionalnya secara signifikan.

Transformator banyak digunakan dalam industri tenaga listrik dan elektronika karena mereka memberikan pasokan tenaga listrik yang tepat dan hemat biaya untuk berbagai kebutuhan. Transformator digunakan untuk mengatur tegangan tinggi dalam penyaluran daya jarak jauh. Di gi batu besar terpasang 2 transformator. Transformator #1, yang disebut Trafo#1, memiliki kapasitas 60 MVA dengan tegangan 150/20 kV, dan dibuat oleh CG PAUWELS dengan nomor seri 3011130078 dan tahun pembuatan 2014. Trafo #2, yang disebut Trafo#2, juga memiliki kapasitas 60 MVA dengan tegangan 150/20 kV, tetapi dibuat oleh UNINDO dengan nomor seri P060LEC801-02 dan tahun pembuatan 2014. Kedua transformator ini digunakan untuk meningkatkan dan menurunkan tegangan jaringan distribusi kelistrikan di kawasan GI Batu Besar.

Dalam sistem distribusi, suatu transformator berusaha menjaga beban yang dilayaninya tetap seimbang. Namun, ketidakseimbangan beban sering terjadi. Ketidakseimbangan beban ini terjadi pada masing-masing fasa (R, S, dan T). Dalam kondisi ideal, fasa transformator berada dalam keadaan seimbang, sehingga arus netralnya nol. Namun, ketidakseimbangan beban menyebabkan perubahan arus pada masing-masing fasa, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kehilangan daya. Ketidakseimbangan beban yang tidak terkendali pada transformator mengakibatkan peningkatan arus yang mengalir pada fasa netral, yang mengakibatkan peningkatan rugi daya. Untuk nilai ketidakseimbangan beban terhadap rugi daya adalah 20% dan terhadap rugi-rugi daya adalah 21%. Akibatnya, ketidakseimbangan beban yang tidak terkendali Akan mengurangi efisiensi operasional dan berpotensi merusak komponennya dalam jangka panjang

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Transformator.

Transformator banyak digunakan dalam bidang tenaga listrik dan elektronika. Transformator digunakan untuk memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian ke rangkaian lain melalui induksi elektromagnetik. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga listrik memungkinkan penyesuaian tegangan yang hemat biaya untuk berbagai kebutuhan, seperti kebutuhan tegangan tinggi untuk pengiriman jarak jauh.

Sebagai salah satu alasan utama penggunaan arus bolak-balik (AC) dalam pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik, penggunaan transformator yang sederhana dan tahan lama memungkinkan pemilihan tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk berbagai kebutuhan. Kerugian energi terjadi selama proses penyaluran tenaga listrik. Apabila tegangan dinaikkan, kerugian ini dapat berkurang secara signifikan. Akibatnya, saluran transmisi tenaga listrik selalu membutuhkan tegangan tinggi. Saat ini, tegangan transmisi 500 kV adalah yang paling tinggi di Indonesia, dan ini digunakan terutama untuk mengurangi kerugian energi. Tegangan listrik di pembangkit listrik dinaikkan dari tegangan generator pada awal saluran transmisi, yang biasanya berkisar antara 6 hingga 20 kV. Kemudian, di ujung saluran transmisi, tegangan tersebut diturunkan lagi ke tingkat tegangan yang lebih rendah melalui transformator. [1] Rumus rata-rata Transformator adalah sebagai berikut:

$$\frac{IR+IS+IT}{3} \quad (1)$$

Ket:

I_R : Arus fasa R

I_S : Arus fasa S

I_T : Arus fasa T

2.2. Standar IEEE 141

Standar IEEE 141 digunakan untuk memperkirakan nilai arus netral pada sistem tiga fasa. Ketidakseimbangan beban dalam sistem tiga fasa berhubungan langsung dengan arus netral, yang mana arus netral meningkat jika beban tidak seimbang.

Rumus mencari nilai arus netral berdasarkan standar IEEE 121:

$$I_N = \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_T I_R} \quad (2)$$

2.3. Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator

Ketidakeimbangan beban adalah Ketika distribusi arus pada setiap fasa sistem kelistrikan tiga fasa tidak merata. Dalam sistem tiga fasa ideal, setiap fasa seharusnya menerima beban yang Sama, yang menghasilkan arus yang seimbang dan memastikan sistem stabil. Namun, berbagai faktor, seperti perbedaan jenis beban, perubahan beban yang tidak teratur, Ketidakeimbangan beban dapat sangat membahayakan sistem

kelistrikan. Salah satunya adalah peningkatan arus netral, yang dapat memanaskan kabel dan peralatan listrik lainnya. Ketidakeimbangan ini juga dapat mengurangi efisiensi sistem, mengurangi daya, dan merusak peralatan listrik jika dibiarkan terlalu lama. ketidakseimbangan beban pada tiga fasa, arus akan mengalir ke kawat netral dan perbedaan sudut beban per fasa tidak sama dengan 120° . Berdasarkan standar untuk ketidakseimbangan beban yang diatur dalam standar IEEE 446-1995 sebesar 5% - 20%. [2] Persentase pembebanan ketika tidak seimbang dapat ditunjukkan dengan koefisien a, b, c yang dimana koefisien tersebut membutuhkan arus pada fasa dan arus rata - rata [3]. Maka arus rata - rata diperoleh dengan persamaan:

$$I_{rata-rata} = \frac{IR+IS+IT}{3} \quad (3)$$

Pada keadaan beban seimbang jumlah nilai besarnya dari koefisien a, b, dan c adalah 1. Dengan menggunakan persamaan koefisien a, b, dan c dapat diketahui besarnya, dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang nilainya sama besar dengan arus rata-rata. Jadi untuk menghitung ketidakseimbangan beban pada trafo dapat dirumuskan sebagai berikut[3c]:

$$IR = a . I \text{ maka } a = \frac{IR}{I_{rata-rata}} \quad (4)$$

$$IS = b . I \text{ maka } b = \frac{IS}{I_{rata-rata}} \quad (5)$$

$$IT = c . I \text{ maka } c = \frac{IT}{I_{rata-rata}} \quad (6)$$

Persentase rata - rata Ketidakseimbangan beban(%)

$$= \frac{[a-1]+[b-1]+[c-1]}{3} \times 100\% \quad (7)$$

2.4. Rugi daya arus netral Pada Transformator

Ketika transformator mengalami perbedaan fasa atau pun tegangan akan terjadi ketidakseimbangan beban sehingga Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan losses (rugi-rugi)[4]. Sehingga dapat diketahui untuk mencari rugi arus netral dapat menggunakan persamaan berikut:

$$PN = I_N^2 . RN \quad (8)$$

Keterangan:

PN = Rugi arus netral penghantar trafo (watt)

I_N = nilai Arus netral trafo (A)

RN = nilai tahanan netral penghantar trafo (ohm)

Untuk mengetahui persentase kerugian yang disebabkan oleh aliran arus netral pada penghantar transformator, Rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung persentase kerugian yang disebabkan oleh aliran arus netral pada penghantar transformator [4]:

$$PN = \frac{PN}{P} \times 100\% \quad (9)$$

2.7. Efisiensi Transformator

Efisiensi trafo menunjukkan seberapa banyak energi listrik yang berhasil diubah dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Ini bisa di artikan sebagai perbandingan daya listrik yang masuk (daya primer) dan daya listrik yang keluar (daya sekunder) pada transformator. Meskipun transformator ideal memiliki efisiensi seratus persen, efisiensi sebenarnya kurang dari seratus persen karena rugi-rugi yang mengubah energi listrik menjadi energi panas atau gerak sehingga menyebabkan berkurangnya efisiensi.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (10)$$

Untuk menghitung Efisiensi transformator saat berbeban menurut SPLN 50 tahun 1997[5]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum \text{Rugi-rugi}} \times 100\% \quad (11)$$

Keterangan :

- η : persentase Efisiensi Transformator
- P_{in} : Nilai daya input pada trafo
- P_{out} : Nilai daya output pada trafo
- $\sum \text{Rugi}$: Nilai Total rugi-rugi pada trafo

III. METODE PENELITIAN

3.1. Metode Perancangan

Penulis menggunakan metode pendekatan *kuantitatif* dan komparatif dalam penelitian berjudul "Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Transformator *Step up* 60 Mva di Gardu induk Pt PLN (Persero) Batam. Metode pendekatan *kuantitatif* adalah dengan melibatkan proses pengumpulan data berdasarkan pengukuran mendalam yang dilakukan dalam penelitian ini, kemudian hasil dari pengukuran tersebut disajikan dalam bentuk matematis. Sedangkan jenis metode komparatif ini bertujuan untuk membandingkan hasil percobaan dengan standar yang di tentukan oleh instansi tertentu

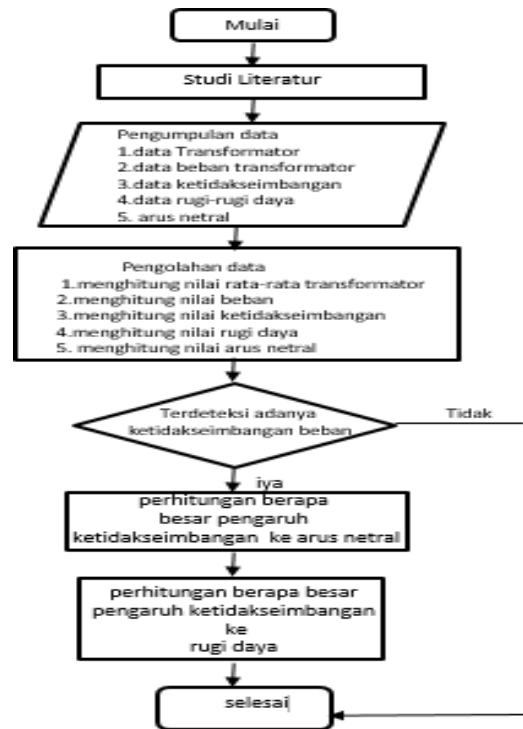
3.2. Waktu dan Tempat penelitian

Dalam proses penelitian ini dilakukan pada bulan oktober hingga Desember 2024 di Pt.PLN (Persero) Batam Penelitian ini dilakukan di area Gardu Induk batu besar. Adapun objek yang digunakan dalam penelitian ini adalah Transformator *Step up* sebanyak 2unit trafo dengan kapasitas 60 Mva.

Tabel 1. Spesifikasi transformator

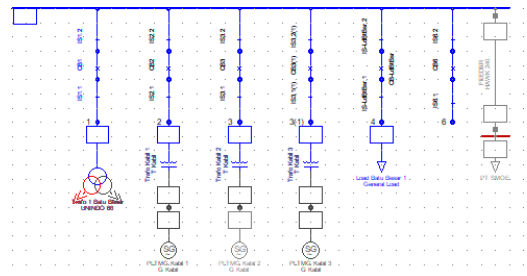
Trafo	Kapasitas	Tegangan	merk	No. seri	Tahun pembua tan
Trafo#1 GI Batu Besar	60 MVA	150/20	CG PAUWEL S	30111300 78	2014
Trafo#2 GI Batu Besar	60 MVA	150/20	UNINDO	P060LEC8 01-02	2015

3.3. Langkah – Langkah Penelitian

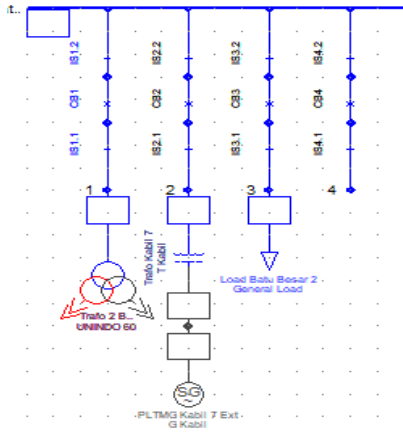


Gambar 1. Diagram Alir Proses Penelitian

3.4. single line diagram transformator gardu induk



Gambar 2. Single line diagram batu besar



Gambar 3. Single line diagram batu besar 2

Dari data tabel 2 akan dihitung menggunakan Rumus pada persamaan 1:

1. Nilai rata-rata transformator maximal

$$\begin{aligned} &= \frac{IR+IS+IT}{3} \\ &= \frac{38,39+43,02+47,08}{3} \\ &= \frac{128,49}{3} \\ &= 42,83 \text{ A} \end{aligned}$$

2. Nilai rata-rata transformator minimal

$$\begin{aligned} I_{rata-rata} &= \frac{38,33 + 42,38 + 47,35}{3} \\ &= \frac{128,06}{3} \\ &= 42,68 \text{ A} \end{aligned}$$

3.5. Data KWH harian gardu induk batu besar

No.	TIME	R (A)	S (A)	T (A)
1	20/10/2024 0:30	40,37951279	44,37419891	46,58943176
2	21/10/2024 1:00	41,11459351	45,09114075	46,99877548
3	22/10/2024 1:30	39,65066691	43,70650482	45,68669891
4	23/10/2024 2:00	39,07112122	43,05659485	45,09893417
5	24/10/2024 2:30	37,42856598	41,43097305	43,79117966
6	25/10/2024 3:00	35,13163376	38,83091354	41,75592804
7	26/10/2024 3:30	36,42167282	40,0905571	43,19788742
8	27/10/2024 4:00	38,61975861	42,57171631	45,28904724
9	28/10/2024 4:30	35,80790329	39,91978836	43,45226669
10	29/10/2024 5:00	37,82997513	41,60166931	45,01787186
11	30/10/2024 5:30	35,59653473	39,72854233	43,90951157
12	31/10/2024 6:00	35,94912338	40,04995346	44,12917328

Gambar 4. Kwh harian gardu induk 1

Tabel 3. Nilai rata-rata trafo 2

Transformator 2	I _R	I _S	I _T
Maximal	39	41	46
Minimal	38	40	46

Dari tabel 3 diatas untuk mencari nilai rata-rata transformator menggunakan persamaan 1.

1. Mencari rata-rata transformator maximal 2

$$\begin{aligned} &= \frac{IR + IS + IT}{3} \\ &= \frac{39 + 41 + 46}{3} \\ &= \frac{126}{3} \\ &= 42 \text{ A} \end{aligned}$$

2. Mencari rata-rata transformator minimal 2

$$\begin{aligned} &= \frac{IR + IS + IT}{3} \\ &= \frac{38 + 40 + 46}{3} \\ &= \frac{124}{3} \\ &= 41,3 \text{ A} \end{aligned}$$

No.	TIME	IA (A)	IB (A)	IC (A)
1	20/10/2024 0:30	41	44	48
2	21/10/2024 1:00	43	45	49
3	22/10/2024 1:30	42	44	48
4	23/10/2024 2:00	42	43	48
5	24/10/2024 2:30	47	49	53
6	25/10/2024 3:00	48	49	53
7	26/10/2024 3:30	46	48	52
8	27/10/2024 4:00	46	48	52
9	28/10/2024 4:30	46	47	52
10	29/10/2024 5:00	42	43	48
11	30/10/2024 05:30:00	41	42	47
12	31/10/2023 6:00	40	41	46

Gambar 5. Kwh harian gardu induk 2

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. perhitungan data

1. perhitungan nilai rata-rata pada transformator 1 dan 2

Tabel 2. Nilai rata rata trafo 1

Transformator 1	I _R	I _S	I _T
Maximal	38,39	43,02	47,08
Minimal	38,33	42,38	47,35

2. Data beban puncak transformator 1 dan 2

Tabel 4. Beban puncak trafo 1

Tanggal dan jam	Transformator 1
25/10/2024 8.30	34, 24 Watt
26/10/2024 7.00	48, 85 Watt
27/10/2024 7.00	25, 78 Watt
28/10/2024 7.00	32, 37 Watt
29/10/2024 5.30	35, 72 Watt
30/10/2024 21.00	71, 47 Watt

Tabel 5. Beban puncaktrafo 2

Tanggal dan jam	Transformator 2
25/10/2024 8.30	29, 76 Watt
26/10/2024 7.00	44, 33 Watt
27/10/2024 7.00	21, 64 Watt
28/10/2024 16.30	32, 84 Watt
29/10/2024 5.30	32, 35 Watt
30/10/2024 21.00	68, 79 Watt

3. Perhitungan nilai ketidakseimbangan

Tabel 6. Data ketidakseimbangan beban

Transformator	I_R	I_S	I_T
1	38, 39A	43, 02 A	47, 08 A
2	39 A	41 A	46 A

Pada tabel 6 untuk menghitung nilai ketidakseimbangan beban menggunakan persamaan [3]

A. Transformator 1

a) $rata - rata = \frac{38,39+43,02+47,08}{3} = 42, 83 \text{ A}$

b) Mencari koefisien dari fasa R, S, T menggunakan persamaan [3],[4],[5]

$$I_R = \frac{I_R}{I_{Rata-rata}} = \frac{38,39}{42} = 0,896$$

$$I_S = \frac{I_S}{I_{Rata-rata}} = \frac{43,02}{42} = 1,004$$

$$I_T = \frac{I_T}{I_{Rata-rata}} = \frac{47,08}{42} = 1,099$$

c) mencari nilai persentase ketidakseimbangan beban

$$\% = \frac{(0,896-1)+(1,004-1)-(1,099-1)}{3} \times 100\% = 6, 63\%$$

B. Transformator 2

a) $Irata - rata = \frac{39+41+46}{3} = 42 \text{ A}$

b) Mencari koefisien dari fasa R, S, T menggunakan persamaan [3],[4],[5]

$$I_R = \frac{I_R}{I_{Rata-rata}} = \frac{39}{42} = 0,928$$

$$I_S = \frac{I_{Ratq-rata}}{I_{Rata-rata}} = \frac{44}{42} = 0,976$$

$$I_T = \frac{I_{Ratq-rata}}{I_{Rata-rata}} = \frac{46}{42} = 1,095$$

c. mencari nilai persentase ketidakseimbangan beban

$$\% = \frac{(0,928-1)+(0,976-1)-(1,095-1)}{3} \times 100\% = 6, 36\%$$

4. Perhitungan Arus netral

Tabel 7. Arus netral

Transformator 1	I_R	I_S	I_T
Maximal	35, 29	38, 41	44, 39
Minimal	35,3	38, 42	44, 38

Pada tabel 7 untuk mencari arus netral menggunakan rumus persamaan [9].

A. Transformator 1

a. Mencari nilai arus netral maximal transformator 1

$$I_N = \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_T I_R}$$

$$= \sqrt{35,29^2 + 38,41^2 + 44,38^2 - (35,29 \times 38,41) - (38,41 - 44,38) - (44,38 - 35,29)}$$

$$= \sqrt{1245 + 1475 + 1978 - 1356 - 1707 - 1565}$$

$$= 4698 - 4629$$

$$I_N = \sqrt{69.2676}$$

$$I_N = 8.32 \text{ A}$$

b. Mencari nilai transformator minimal

$$I_N = \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_T I_R}$$

$$= \sqrt{35,3^2 + 38,42^2 + 44,38^2 - (35,3 \times 38,42) - (38,42 - 44,38) - (35,3 \times 44,38)}$$

$$= \sqrt{1245 + 1474 + 1978 - (1355 - 1707 - 1565)}$$

$$= 4697, 50 - 4628, 09$$

$$I_N = \sqrt{69,41}$$

$$I_N = 8, 33 \text{ A}$$

B. Transformator 2

Tabel 8. Arus netral

Transformator 2	I_R	I_S	I_T
maximal	48, 41	51	54, 71
minimal	36, 77	37, 93	44, 26

Pada tabel 8 untuk mencari arus netral menggunakan rumus persamaan [9]

1. Mencari nilai Transformator maximal 2

$$I_N = \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_T I_R}$$

$$= \sqrt{48,41^2 + 51^2 + 54,71^2 - (48,41 \times 51) - (51 - 54,71) - (48,41 \times 54,71)}$$

$$= \sqrt{2349 + 2601 + 2992 - (2467) - (2780) - 2645}$$

$$= 7942, 24-7894, 08$$

$$I_N = \sqrt{48,16}$$

$$I_N = 6, 94 \text{ A}$$

2. Mencari nilai minimal Transformator 2

$$I_N = \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_T I_R}$$

$$= \sqrt{36,77^2 + 37,93^2 + 44,26^2 - (36,77 \times 37,93) - (37,93 - 44,26) - (36,77 \times 44,26)}$$

$$= \sqrt{\frac{3677^2}{100} + \frac{3793^2}{100} + \frac{2213^2}{50} - 4700,9081}$$

$$= 6, 98 \text{ A}$$

5. Perhitungan rugi daya transformator 1 dan 2

Tabel 9. Rugi-rugi daya

Transformator	I_N	I_N
Transformator 1	8, 32	8, 33
Transformator 2	6, 94	6, 98

Pada tabel 9 untuk menghitung nilai rugi-rugi daya menggunakan rumus persamaan [8]

Keterangan:

Tahanan netral $R_N = 0,153 \Omega$

Daya total $P_{\text{Total}} = 23613 \text{ W}$

Nilai arus netral (I_N)

1. Perhitungan rugi daya trafo 1

A. Rugi daya transformator maksimal

$$P_N = (8, 32)^2 \times 0, 153 = 69, 39 \times 0, 153 = 10, 61 \text{ W} \\ = 0, 010 \text{ Kw}$$

B. Rugi daya minimal

$$P_N = (8, 33)^2 \times 0, 153 = 69, 39 \times 0, 153 = 10, 61 \text{ W} \\ = 0, 010 \text{ Kw}$$

2. Perhitungan rugi daya trafo 2

A. Rugi daya transformator maksimal

$$P_N = (6, 94)^2 \times 0, 153 = 48, 16 \times 0, 153 = 7, 37 \text{ W} \\ = 0, 007 \text{ kW}$$

B. Rugi daya minimal trafo 2

$$P_N = (6, 98)^2 \times 0, 153 = 48, 68 \times 0, 153 = 7, 45 \text{ W} \\ = 0, 007 \text{ Kw}$$

Setelah didapatkan rugi-rugi daya yang disebabkan adanya arus netral maka untuk mencari besar presentasi rugi-rugi daya yang disebabkan oleh adanya arus netral dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P = s \times \cos \phi$$

$$P = 60.000 \times 0, 98$$

$$P = 58, 8 \text{ watt}$$

Sehingga di dapatkan persentase rugi-rugi daya yang disebabkan oleh adanya arus netral pada transformator sebagai berikut:

1. Transformator 1

a. Perhitungan persentase trafo kondisi maksimal

$$P_n = \frac{P_N}{P} \times 100\%$$

$$P_n = \frac{10,61}{58,8} \times 100\%$$

$$P_n = 0,18\%$$

b. Perhitungan persentase trafo kondisi minimal

$$P_n = \frac{P_N}{P} \times 100\%$$

$$P_n = \frac{10,61}{58,8} \times 100\%$$

$$P_n = 0,18\%$$

2. Transformator 2

a. Perhitungan persentase trafo kondisi maksimal

$$P_n = \frac{PN}{P} \times 100\%$$

$$P_n = \frac{7,37}{58,8} \times 100\%$$

$$P_n = 0,12\%$$

b. Perhitungan persentase kondisi trafo minimal

$$P_n = \frac{PN}{P} \times 100\%$$

$$P_n = \frac{7,45}{58,8} \times 100\%$$

$$P_n = 0,12\%$$

Tabel 10. Rugi-rugi daya arus netral

transformator	R	S	T	I _{rata-rata}	Persentase
maximal	38,39	43,02	47,08	42,83	0,18%
minimal	38,33	42,38	47,35	42,83	0,18%
Maximal	39	41	46	42	0,12%
Minimal	38	40	46	42	0,12%

Dari table 10 dapat dilihat jika nilai persentase rugi daya terhadap arus netral ialah pada trafo1 0,18% dan untuk trafo 2 0,12% dari nilai ini dapat dikatakan bahwa antara trafo 1 dan 2 nilai rugi daya terhadap arus netralnya tidak lah terlalu jauh.

6. Perhitungan nilai efisiensi trafo

Agar dapat mengetahui berapa besar *persentase efisiensi* pada Transformator dapat menggunakan rumus:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum \text{Rugi-rugi}} \times 100\%$$

Berdasarkan perhitungan arus dan tegangan pada trafo 1 maka besar daya aktif adalah: 158,657,37watt

Setelah dilakukan perhitungan daya aktif maka besar nilai *efisiensi transformator* sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum \text{Rugi-rugi}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{158,657,37}{158,657,37 + \sum \text{Rugi-rugi}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{158,657,37}{158,657,37 + \sum 10,61} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{158,657,37}{158,668,98} \times 100\%$$

$$\eta = 99,9\%$$

Berdasarkan perhitungan arus dan tegangan pada trafo 2 maka daya aktif adalah: 371,292watt

Setelah mendapatkan daya aktif maka besar nilai efisiensi transformator 2 sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum \text{Rugi-rugi}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{371,292}{371,292 + \sum \text{Rugi-rugi}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{371,292}{371,292 + \sum 7,45} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{371,292}{371,299,45} \times 100\%$$

$$\eta = 99,8\%$$

4.2. Pembahasan hasil perhitungan

1. Nilai Ketidakseimbangan beban transformator

Tabel 11. Hasil perhitungan ketidakseimbangan

Transformator	I _{rata-rata}	I _R	I _S	I _T	Persentase
1	42,83 A	0,896	1,004	1,099	6,63%
2	42 A	0,928	0,976	1,095	6,36%

Hasil perhitungan ketidakseimbangan beban terhadap transformator. untuk hasil transformator 1 Sebagaimana diketahui standar dari ketidakseimbangan beban diatur dalam standar IEEE 446 - 1995 sebesar 5% - 20%. Dengan begitu, transformator 1 memiliki hasil 6,63% artinya sesuai dengan standar karena tidak melebihi 20%. Dan untuk Transformator 2 Sebagaimana diketahui standar dari ketidakseimbangan beban diatur dalam standar IEEE 446 - 1995 sebesar 5% - 20%. Dengan begitu, transformator 2 memiliki 6,36% yang artinya sesuai dengan standar yang digunakan karena tidak melebihi 20%

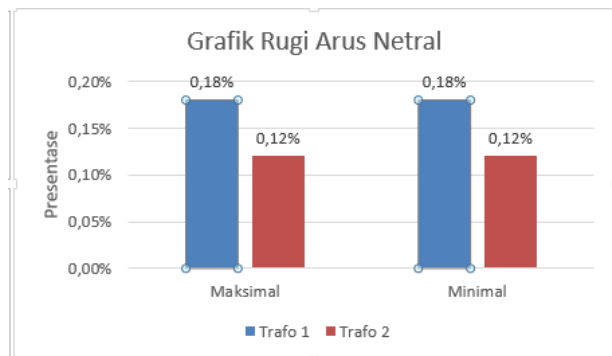
2. Nilai arus netral

Tabel 12. Hasil perhitungan arus netral

TRANSFORMATOR	ARUS NETRAL TRAF0 1	ARUS NETRAL TRAF0 2
MAXIMAL	8,32 A	6,94 A
MINIMAL	8,33A	6,98 A

Transformator 1 menunjukkan stabilitas arus netral yang sangat baik dengan fluktuasi kecil ini mungkin menunjukkan desain yang lebih efisien atau beban yang lebih seimbang. Transformator 2 memiliki arus netral yang sedikit lebih rendah daripada Transformator 1, tetapi perbedaan fluktuasi antara kondisi maksimal dan minimal sedikit lebih besar, mungkin karena perubahan beban atau ketidakseimbangan yang lebih besar dalam sistem. Kedua transformator memiliki arus netral yang cukup stabil, meskipun Transformator 1 menunjukkan sedikit keunggulan dalam hal kestabilan arus.

3. Rugi-Rugi daya pada transformator



Gambar 6. Grafik rugi daya arus netral

Dari hasil pengolahan data yang dilakukan pada transformator 1 dan 2 dapat dilihat pada gambar grafik. Hasil perhitungan nilai persentase pembebanan pada trafo 1 yaitu sebesar 0.18% dan trafo 2 0.12 % masih dibawah 5%, artinya pada hasil pengolahan data nilai persentase pembebanan trafo 1 dan 2 pengukuran yaitu pada trafo 1 dan 2 tidak mengalami beban berlebih, karena nilai persentase pembebanan trafo masih dibawah 5%. Jika merujuk pada standar IEEE 446-1995 bahwa persentase pembebanan dibawah 5%-20% masih dalam kondisi aman.

4. Nilai efisiensi transformator

Tabel 13. Nilai efisiensi transformator

Transformator	P_N	P_N	η
1	10,61 watt	10, 61 watt	99, 9 %
2	7, 37 watt	7,45 watt	99,8 %

Pada tabel 13 merupakan hasil perhitungan untuk rugi-rugi daya pada transformator. Nilai rugi daya pada Transformator 1 adalah 10,61watt menunjukkan bahwa rugi daya pada transformator 1 memiliki daya yang lebih besar dan efisiensi yang rendah, sehingga menghasilkan lebih banyak rugi daya. Pada Transformator 2 nilai rugi dayanya 7, 45watt menunjukkan bahwa transformator bekerja dengan daya yang lebih kecil dan efisiensi lebih kecil, sehingga menghasilkan rugi daya yang lebih kecil daripada transformator 1.dan untuk

efesinsi trafo Diketahui bahwa semakin tinggi tingkat efisiensi suatu peralatan maka semakin handal pula peralatan tersebut. Transformator juga memiliki *efisiensi*, *bagus* atau tidak nya *efisiensi* pada transformator dapat mempengaruhi kerja dari transformator tersebut dikarenakan jika transformator memiliki nilai *efisiensi* yang rendah maka menimbulkan kerugian baik dari operasional dan kehandalan transformator tersebut. Jika dilihat dari hasil ditemukan bahwa nilai *efisiensi* transformator pada transformator 1 sebesar 99.9% dan untuk transformator 2 sebesar 99, 8%. Dari hasil perhitungan *efisiensi* dapat dilihat bahwa kondisi *transformator 1* masih dalam kondisi baik, akan tetapi dalam hal kondisi baik ini *efisiensi* transformator 2 mulai mengalami penurunan meskipun penurunannya tidak lah terlalu besar dikarenakan adanya rugi-rugi daya. Dapat disimpulkan bahwa transformator 1 dan 2 *efisiensi* masih dalam kondisi baik karena berada di angka 99 % tetapi seiring dengan adanya rugi-rugi daya maka dapat menimbulkan penurunan *efisiensi* apabila tidak dikontrol secara berkala.

5. Arus rata -rata pada transformator

Tabel 14. arus rata -rata trafo

nilai	Arus rata – rata transformator 1	Arus rata-rata transformator 2
maksimal	42, 83 A	42 A
minimal	42, 68 A	41, 3 A

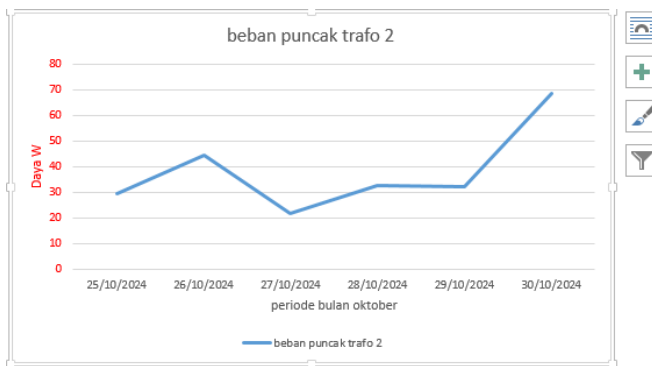
hasil rata-rata transformator setelah dihitung. Transformator 1 memiliki arus yang sedikit lebih besar pada kedua kondisi (maksimal dan minimal). Ini dapat menunjukkan bahwa transformator 1 dapat beroperasi dengan beban yang lebih besar atau dirancang untuk menangani beban yang lebih besar. Transformator 2 memiliki arus yang sedikit lebih rendah antara kondisi maksimal dan minimal, yang dapat menunjukkan bahwa beban pada transformator 2 lebih dipengaruhi oleh beban. Kedua transformator beroperasi pada level arus yang hampir Sama, tetapi transformator 1 sedikit lebih stabil dalam penggunaan arus baik dalam kondisi maksimal maupun minimal.

6. Beban puncak pada transformator



Gambar 7. Beban puncak trafo 1

Dapat dilihat pada gambar grafik beban puncak 1, selama pengumpulan data beban puncak terendah nya terjadi pada tanggal 27 oktober jam 07.000 tercatat sebesar 25, 78 Watt, dan beban puncak tertinggi nya terjadi pada tanggal 30 oktober 2024 sebesar 71,47 watt .dari nilai beban puncak diatas menunjukkan bahwa beban puncak sering terjadi saat kebutuhan listrik mencapai puncaknya seperti pada beban puncak terendah terjadi pada pagi hari dan tertinggi terjadi pada malam hari ,dari analisa ini pembangkit listrik harus dapat menyediakan daya yang cukup untuk mengatasi beban puncak tanpa resiko kekurangan daya . Ini menunjukkan bahwa arus pada setiap fasa tidak merata transformator 1 menunjukkan pola umum dalam sistem kelistrikan, di mana beban dapat meningkat atau menurun.



Gambar 8. Beban puncak trafo 2

Dapat dilihat pada gambar grafik beban puncak 2, selama pengumpulan data beban puncak terendah nya terjadi pada tanggal 27 oktober jam 8.30 tercatat sebesar 21, 64 Watt Watt dan beban puncak tertinggi nya terjadi pada tanggal 30 oktober 2024 sebesar 68,79 watt .dari nilai beban puncak diatas menunjukkan bahwa beban puncak sering terjadi saat kebutuhan listrik mencapai puncaknya seperti pada beban puncak terendah terjadi pada pagi hari dan tertinggi terjadi pada malam hari ,dari analisa ini pembangkit listrik harus dapat menyediakan daya

yang cukup untuk mengatasi beban puncak tanpa resiko kekurangan daya . Ini menunjukkan bahwa arus pada setiap fasa tidak merata transformator 2 menunjukkan pola umum dalam sistem kelistrikan, di mana beban dapat meningkat atau menurun .

V. KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Dari perhitungan, penelitian, dan pembahasan yang sudah dilakukan sebelumnya, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil pengolahan data nilai persentase ketidakseimbangan beban pada trafo *step up* di gardu induk pada transformator 1 adalah 6, 63% dan 6, 36% untuk transformator 2. Nilai ini masih dalam kondisi normal menurut dengan standart IEEE 446-1995
2. Semakin besar persentase ketidakseimbangan beban maka akan semakin besar pula persentase rugi daya akibat arus netral, atau pun sebaliknya semakin kecil persentase ketidakseimbangan beban maka semakin kecil juga persentase rugi daya akibat arus netral.
3. untuk arus netral transformator 1 nilainya adalah 8,32 A dan 6,94 A untuk arus netral transformator 2, dan untuk nilai rugi-rugi daya pada Transformator 1 adalah 10, 61 watt dan 7,45 watt untuk transformator 2

REFERENSI

- [1] Muhammad Rifaat (2014) “Analisis Transformator 3 fasa 150/20 KV pada Gardu Induk Ungaran PLN Distribusi Semarang”
- [2] Ahmad Eko, (2018). Analisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap efisiensi transformator distribusi di PT.PLN (persero) Rayon Palur Karanganyar.
- [3] Zulfadli Pelawi, (2018). Analisis rugi-rugi daya pada penghantar netral jaringan distribusi sekunder akibat ketidakseimbangan beban
- [4] A. Darwanto, “ANALISIS KETIDAK SEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Di PT. PLN (Persero) RAYON CEPU,” *Simetris*, vol. 15, no. 1, pp. 35–42, 2021, doi: 10.51901/simetris.v15i01.179.
- [5] A. P. R. Daya, T. K. Harmonik, C. Agusman, U. Indonesia, F. Teknik, and P. S. Ekstensi, “UNIVERSITAS INDONESIA,” 2011.
- [6] R. M. Solossa and H. Tasmono, “Analisa Efisiensi Pada Transformator Daya 60 MVA Di Gardu Induk Babadan Sidoarjo,” *Ilm. Ekon. dan Manaj.*, vol. 2, pp. 323–332, 2024.
- [7] Y. Marniati and A. S. Ayu, “Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Auxiliary Transformator Pt.Kai Lrt Sumsel,” *J. TEKNO*, vol. 18, no. 1, pp. 16–28, 2021.