

ANALISA LOSSES AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR 1250 KVA PTPN X PG GEMPOLKREP

Prayoga, Guntur William¹; Budiono, Gatut²

Jurusan Teknik Elektro, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Jl. Semolowaru 45 Surabaya 60118

Telp. (031)5931800, Faks. (031)5927817

E-mail: Iarmored.guntur@gmail.com, 2gatut_budiono@untag-sby.ac.id

ABSTRAKS

*PTPN X PG Gempolkrep merupakan pabrik pembuatan gula pasir dengan bahan dasar berupa tanaman tebu. Dalam kegiatan pengolahan yang dilakukan pabrik banyak mesin-mesin yang membutuhkan daya yang berkualitas agar dapat bekerja secara optimal. Salah satu penyebab menurunnya kualitas daya listrik adalah ketidakseimbangan beban. Ketidakseimbangan beban disebabkan oleh ketidakseimbangan beban antar fasa, baik karena perbedaan beban antar fasa, maupun karena beban yang membebani tiap fasa pada waktu yang berbeda. Akibat adanya beban yang tidak seimbang ini dapat menghasilkan arus netral pada penampang transformator yang menyebabkan kerugian (*losses*). Berdasarkan hasil analisa dengan perhitungan diperoleh hasil arus netral maksimal, minimal dan rata-rata masing-masing berkisar antara 16,924 A – 47,9 A; 14,598 A – 38,106 A; 16,478 A – 38,707 A. Nilai perhitungan persentase ketidakseimbangan beban terbesar pada jam 16.00 sebesar 5,9% dan losses maksimal, minimal dan rata-rata masing-masing berkisar antara 0,087645 kW – 0,470836 kW; 0,065209 kW – 0,444333 kW; 0,083086 kW – 0,458459 kW.*

Kata Kunci: arus netral, losses (rugi daya), ketidakseimbangan beban

1. PENDAHULUAN

Tenaga listrik saat ini sudah sangat melekat pada kehidupan masyarakat. Peningkatan penggunaan tenaga listrik semakin bertambah seiring dengan perkembangan jaman. Untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik ada beberapa syarat yang harus dipenuhi salah satunya adalah andal dan berkelanjutan (kontinyu). Oleh karena itu diperlukan suatu sistem distribusi yang handal agar dapat terdistribusinya tenaga listrik yang berkualitas.

Transformator merupakan salah satu komponen yang sangat penting dalam sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik dan kondisinya harus selalu diperhatikan untuk menjaga kualitas distribusi tenaga listrik tetap handal. Oleh karena itu, kondisi transformator harus terus diperhatikan agar keandalan transformator tidak mengalami penurunan.

Salah satu upaya untuk menjaga keandalan transformator adalah dengan menyeimbangkan beban antar fasanya (R, S, T), tetapi pada kenyataannya sering terjadi ketidakseimbangan. Ketidakseimbangan beban disebabkan oleh ketidakseimbangan beban antar fasa, baik karena perbedaan beban antar fasa, maupun karena beban yang membebani tiap fasa pada waktu yang berbeda.

Dengan adanya ketidakseimbangan beban memunculkan arus urutan negatif dan arus urutan nol. Akibat adanya beban yang tidak seimbang ini dapat menghasilkan arus netral pada penampang transformator yang menyebabkan kerugian (*losses*). Semakin besar arus netral suatu transformator akan menyebabkan menurunnya efisiensi dari transformator tersebut karena *losses* yang dihasilkan dari arus netral juga akan semakin besar. Hal ini, dapat menyebabkan kerugian pada sisi penyedia tenaga listrik dalam hal ini PLN dan pelanggan.

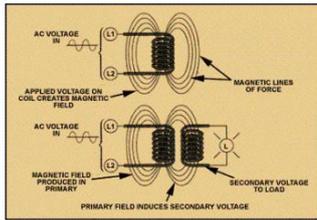
Berdasarkan permasalahan diatas perlu dilakukan analisis yang bertujuan untuk menghitung besar ketidakseimbangan beban antar fasa dan besar losses yang timbul akibatnya.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik yang bekerja dengan prinsip induksi-elektromagnet melalui gandengan dua buah magnet yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah energi listrik. Umumnya transformator dalam sistem tenaga listrik digunakan untuk menaikkan (*step up*) atau menurunkan (*step down*) energi listrik bolak-balik

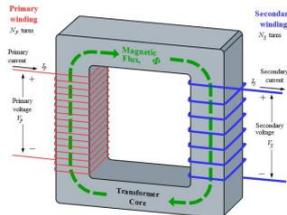
(AC) tanpa mengubah frekuensinya. Pada dasarnya transformator terdiri dari inti besi dan dua kumparan, yang disebut kumparan primer dan kumparan sekunder.



Gambar 1 Prinsip hukum elektromagnetik

2.2. Prinsip Kerja Transformator

Sebuah transformator terdiri dari dua buah kumparan yang memiliki sifat induktif dan biasanya disebut dengan kumparan primer dan kumparan sekunder. Kedua buah kumparan ini dihubungkan secara magnetis menggunakan jalur yang memiliki reluktansi rendah. Ketika kumparan primer dilalui oleh arus listrik bolak-balik maka akan terjadi fluks pada inti transformator. Karena adanya fluks pada inti transformator maka akan terjadi induksi pada kumparan primer (*self-induction*) dan pada kumparan sekunder terjadi induksi juga yang disebabkan oleh pengaruh induksi pada kumparan primer yang biasa disebut dengan induksi bersama (*mutual induction*). Oleh karena terjadi induksi pada kumparan sekunder maka muncul fluks magnet pada kumparan, kemudian arus sekunder mengalir ketika rangkaian sekunder terbebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer (dimagnetisasi) secara keseluruhan.



Gambar 2 Prinsip kerja transformator

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} \text{ (Volt)} \quad (1)$$

Dimana:

E = gaya gerak listrik (Volt)

N = jumlah lilitan

$\frac{d\phi}{dt}$ = perubahan fluks magnet (weber/sec).

2.3. Komponen Simetris

Komponen simetris memungkinkan untuk ketidakseimbangan fasa seperti arus dan tegangan disubsitusikan dengan tiga persamaan komponen simetris seimbang yang berbeda. Metode komponen

simetris pertama kali dikenalkan oleh C.L Fortesque pada tahun 1918. Berdasarkan teorinya, fasor ketidakseimbangan pada sistem tiga fasa dapat dibagi menjadi tiga sistem fasor seimbang sebagai berikut, yaitu:

a. Komponen urutan positif

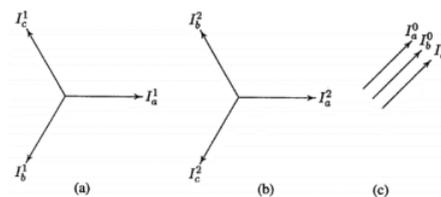
Komponen urutan positif yang terdiri dari satu set komponen tiga fasa seimbang dengan urutan fasa abc. Antara satu fasa dengan fasa lainnya memiliki perbedaan fasor 120° .

b. Komponen urutan negatif

Komponen urutan negatif yang terdiri dari satu set komponen tiga fasa seimbang dengan urutan fasa acb. Antara satu fasa dengan fasa lainnya memiliki perbedaan fasor 120° .

c. Komponen urutan nol

Komponen urutan nol yang terdiri dari tiga komponen satu fasa, semuanya sama besarnya tetapi dengan sudut fase yang sama.



Gambar 3 (a) Komponen urutan positif, (b) Komponen urutan negative, (c) Komponen urutan nol

Fasor ketidakseimbangan merupakan penjumlahan dari komponen fasor yang dinyatakan sebagai berikut :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (2)$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \quad (3)$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \quad (4)$$

2.4. Operator a

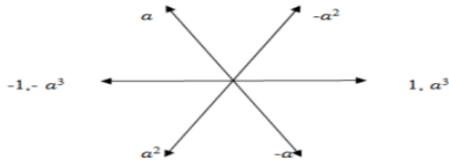
Operator a digunakan untuk menyatakan sebuah operator yang dapat menyebabkan terjadinya perputaran sebesar 120° ke arah berlawanan dengan jarum jam. Operator ini merupakan bilangan kompleks dengan nilai 1 dan sudutnya 120° .

$$a = 1 \angle 120^\circ = 1(\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) = -0,5 + j0,867 \quad (5)$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j0,867 \quad (6)$$

dan

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ = 1 \quad (7)$$



Gambar 4 Sudut fasor operator a

2.5. Komponen Simetris menggunakan Operator a

Operator a dapat mengubah fasor tidak seimbang menjadi komponen simetrisnya yang merupakan hasil perkalian antara I_a dengan operator a. Maka akan diperoleh hubungan berikut:

$$I_{b1} = a^2 I_{a1} \quad (8)$$

$$I_{c1} = a I_{a1} \quad (9)$$

$$I_{b2} = a I_{a2} \quad (10)$$

$$I_{c2} = a^2 I_{a2} \quad (11)$$

$$I_{b0} = I_{a0} \quad (12)$$

$$I_{c0} = I_{a0} \quad (13)$$

Persamaan (8) sampai dengan (13) disubstitusikan ke dalam persamaan (2), (3) dan (4) maka akan diperoleh hasil:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \quad (14)$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (15)$$

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \quad (16)$$

Persamaan diatas ditulis dalam bentuk matriksnya menjadi:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Untuk mempermudah dimisalkan menjadi:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Lalu A diinverse :

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Maka dengan mengalihkan kedua sisi persamaan (17) diperoleh:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (20)$$

Persamaan matriks tersebut dapat ditulis kembali ke persamaan komponen simetris sebagai berikut:

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (21)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (22)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (23)$$

Persamaan (21) menunjukkan bahwa komponen urutan nol sama dengan sepertiga jumlah arus fasa. Jadi, ketika jumlah arus fasa sama dengan nol maka komponen urutan nol tidak akan ada. Persamaan yang sama juga ada untuk tegangan. Jadi, ketidakseimbangan tegangan dapat ditulis dengan persamaan komponen simetris tegangan sebagai berikut :

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (24)$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \quad (25)$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \quad (26)$$

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (27)$$

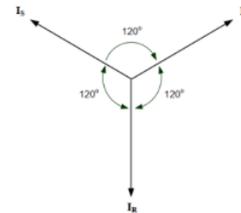
$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 V_c) \quad (28)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) \quad (29)$$

2.6. Ketidakseimbangan Beban pada Transformator

Ketidakseimbangan beban terjadi karena beban pada sistem tiga fasa (R, S, T) tidak merata atau seimbang yang terjadi dikarenakan perbedaan besar beban tiap fasa atau karena perbedaan waktu disaat beban membebani tiap fasa. Keadaan seimbang merupakan keadaan yang memenuhi persyaratan berikut, dimana :

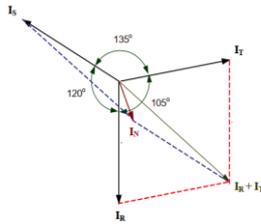
- 1) Ketiga vektor arus / tegangan sama besar.
- 2) Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 5 Vektor Diagram Arus Seimbang

Sedangkan yang dimaksud dengan ketidakseimbangan merupakan keadaan dimana persyaratan keadaan seimbang tidak terpenuhi. Ketidakseimbangan memiliki tiga kemungkinan yaitu :

- 1) Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- 2) Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- 3) Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain



Gambar 6 Vektor Diagram Arus Tidak Seimbang

2.7. Arus Netral

Arus netral adalah arus yang mengalir pada kawat netral pada sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral ini muncul diakibatkan oleh [7] :

- Kondisi beban tidak seimbang
- Karena adanya arus harmonisa akibat beban non-linear.

Arus yang mengalir pada kawat netral merupakan penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris. Besar arus netral dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah.

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad (30)$$

2.8. Losses Akibat Ketidakseimbangan Beban

Akibat dari adanya ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder transformator, mengalirlah arus di netral transformator [8]. Oleh karena adanya arus yang mengalir pada kawat netral transformator ini dapat menimbulkan rugi-rugi (*losses*). *Losses* yang dihasilkan karena arus netral pada kawat netral transformator dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (31)$$

dimana:

P_N = *losses* karena arus netral mengalir di kawat netral (watt)

I_N = arus netral transformator (A)

R_N = tahanan kawat netral transformator (Ω)

Sedangkan untuk menghitung *losses* yang diakibatkan karena arus netral mengalir ke tanah (*ground*) dapat menggunakan persamaan berikut:

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (32)$$

dimana:

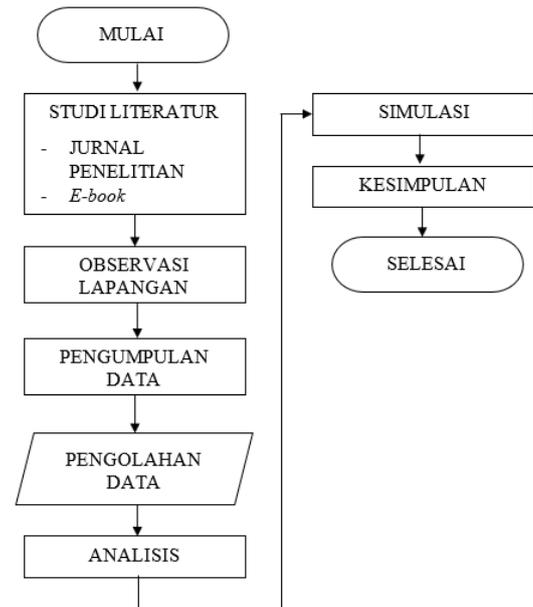
P_G = *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

I_G = arus yang mengalir ke tanah (A)

R_G = tahanan pembumian netral (Ω)

3. METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alur



Gambar 7 Diagram Alur Penelitian

3.2 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan metode kuantitatif. Kuantitatif adalah mengumpulkan data berdasarkan pengukuran dan hasil dari pengukuran tersebut diselesaikan menggunakan rumus matematis. Dalam penelitian ini digunakan rumus komponen simetris untuk mencari nilai ketidakseimbangan pada transformator.

Dalam menyelesaikan penelitian ini penulis melakukan studi literatur dan observasi lapangan. Studi literatur dilakukan untuk:

- Mempelajari konsep ketidakseimbangan beban dalam sistem distribusi beban transformator
- Mempelajari cara menghitung *losses* yang terjadi akibat ketidakseimbangan beban dalam sistem distribusi beban transformator
- Mempelajari batasan ketidakseimbangan beban yang diperbolehkan dalam suatu sistem
- Mempelajari cara menanggungi dan meredam *losses* yang terjadi karena ketidakseimbangan beban

Observasi lapangan disini yang dimaksud adalah melakukan tinjauan transformator secara langsung ke lokasi untuk dan melakukan wawancara serta pengambilan data yang akan dibutuhkan untuk melakukan penelitian.

3.3 Alat

Alat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *clamp meter* dan *power quality analyzer* yang digunakan untuk mengukur besar arus, tegangan, kWh, dan kVA pada transformator yang akan dijadikan penelitian. Pemilihan *clamp meter* sebagai alat ukur adalah karena kemudahan penggunaannya yang dapat mengukur arus listrik tanpa mematikan transformator terlebih dahulu.

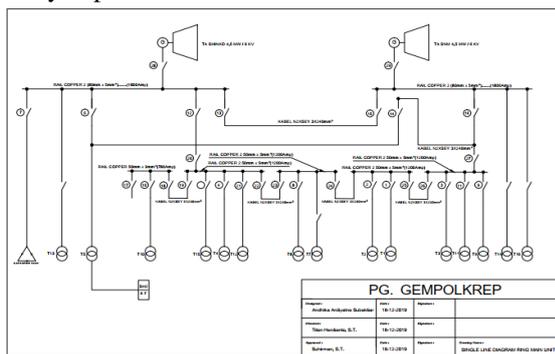


Gambar 8 *Clamp meter* dan *power quality analyzer*

4. ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Sistem Kelistrikan PTPN X PG Gempolkrep

Untuk memenuhi kebutuhan listrik pada PTPN X PG Gempolkrep terdapat dua unit generator yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik dan disalurkan melalui 14 transformator keseluruh wilayah pabrik.



Gambar 9 Single Line Diagram

4.2 Spesifikasi Transformator

Dari 14 transformator penulis memilih transformator 10 yang memiliki kapasitas 1250 KVA, berikut data teknis transformator 10:

Tabel 1 Spesifikasi Transformator

Nama Pabrik	PT. UNINDO
Daya Nominal	1250 KVA

Jumlah Fasa	3
Frekuensi	50 Hz
Tegangan Nominal Primer	6000 V
Tegangan Nominal Sekunder	400 V
Arus Nominal Primer	72,1 A
Arus Nominal Sekunder	1082,5 A
Hubungan Vektor	DyN11
Impedansi	5,5 %
Tahun Pembuatan	1993

4.3 Analisa Arus Netral

Untuk melakukan perhitungan arus netral digunakan rumus $I_N = I_R + I_S + I_T$. Pada keadaan seimbang nilai arus netral adalah 0.

$$\begin{aligned}
 I_N &= I_R + I_S + I_T \\
 I_N &= 575,7 \angle 31,61 + 565,3 \angle 155,1 + 539,3 \angle -83,46 \\
 I_N &= (575,7 \cos 31,61 + j(575,7 \sin 31,61)) + (565,3 \cos - \\
 &\quad \cos 155,1 + j(565,3 \sin 155,1)) + (539,3 \cos - \\
 &\quad -83,46 + j(539,3 \sin -83,46)) \\
 I_N &= (490,287 + j301,744) + (-512,752 + j238,012) + \\
 &\quad (61,425 - j535,791) \\
 I_N &= (490,287 - 512,752 + 61,425) + (j301,744 + \\
 &\quad j238,012 - j535,791) \\
 I_N &= 38,96 + j3,965
 \end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}
 I_N &= I \angle \theta \\
 I &= a + jb \\
 I^2 &= \sqrt{a^2 + b^2} \\
 I^2 &= \sqrt{38,96^2 + 3,965^2} \\
 I &= 39,161 \\
 \theta &= \tan^{-1} \frac{b}{a} \\
 \theta &= \tan^{-1} \frac{3,965}{38,96} \\
 \theta &= 5,851^\circ
 \end{aligned}$$

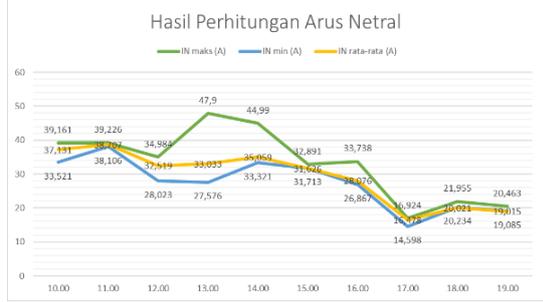
Jadi,

$$\begin{aligned}
 I_N &= 39,161 \angle 5,851^\circ \\
 I_N &= 39,161 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Tabel 2 Hasil Perhitungan Arus Netral

Jam	I_N maks (A)	I_N min (A)	I_N rata-rata (A)
10.00	39,161	33,521	37,131
11.00	39,226	38,106	38,707
12.00	34,984	28,023	32,519
13.00	47,9	27,576	33,033
14.00	44,99	33,321	35,059
15.00	32,891	31,713	31,626
16.00	33,738	26,867	28,076

17.00	16,924	14,598	16,478
18.00	21,955	20,234	20,021
19.00	20,463	19,085	19,015



Gambar 10 Diagram Hasil Perhitungan Arus Netral

4.5. Analisa Losses yang Terjadi akibat Arus Netral

Pada pabrik gula Gempolkrep penghantar kabel netral yang digunakan merupakan 2 kabel berukuran 120 mm² dengan besar resistansi 0,153Ω. Untuk menghitung besar losses yang dihasilkan karena ketidakseimbangan beban menggunakan persamaan (29) :

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

$$P_N = 39,161^2 \times (2 \times 0,153)$$

$$P_N = 1533,58 \times 0,306$$

$$P_N = 469,275 \text{ W} = 0,469275 \text{ kW}$$

Tabel 3 Hasil Perhitungan Besar Losses

Jam	Losses maks (kW)	Losses min (kW)	Losses rata-rata (kW)
10.00	0,469275	0,343839	0,421886
11.00	0,470836	0,444333	0,458459
12.00	0,374507	0,240298	0,323591
13.00	0,702089	0,232693	0,333901
14.00	0,619375	0,339748	0,376115
15.00	0,331036	0,307749	0,306062
16.00	0,351472	0,220882	0,241208
17.00	0,087645	0,065209	0,083086
18.00	0,147499	0,125281	0,122657
19.00	0,128133	0,111457	0,110640



Gambar 11 Diagram Besar Losses

4.6. Analisa Persentase Ketidakseimbangan Menggunakan Data Rata-Rata

Untuk melakukan perhitungan persentase ketidakseimbangan yang terjadi pada sistem digunakan persamaan :

$$\% \text{ketidakseimbangan} = \frac{I_2}{I_1}$$

Dimana :

I₁ = komponen urutan positif

I₂ = komponen urutan negatif

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_R + aI_T + a^2I_S)$$

$$I_1 = \frac{1}{3} [439 \angle 26,29 + ((1 \angle 120) (402,8 \angle -87,66)) + ((1 \angle 240) (428,1 \angle 150,6))]]$$

$$I_1 = \frac{1}{3} [(393,591 + j194,44) + (340,713 + j215,491) + (368,389 + j218,284)]$$

$$I_1 = \frac{1}{3} (1102,69 + j628,215)$$

$$I_1 = 367,563 + j209,405$$

Dimana :

$$I_1 = I \angle \Theta$$

$$I = a + jb$$

$$I^2 = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$I^2 = \sqrt{367,563^2 + 209,405^2}$$

$$I = 423,028$$

$$\Theta = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

$$\Theta = \tan^{-1} \frac{209,405}{367,563}$$

$$\Theta = 29,671^\circ$$

Jadi,

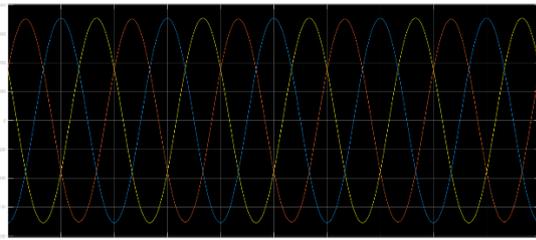
$$I_1 = 423,028 \angle 29,671^\circ$$

$$I_1 = 423,028$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_R + a^2I_T + aI_S)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} [439 \angle 26,29 + ((1 \angle 240) (402,8 \angle -87,66)) + ((1 \angle 120) (428,1 \angle 150,6))]]$$

Gambar 14 Simulasi Setelah Dilakukan Penyeimbangan



Gambar 15 Gambar Gelombang Arus R, S dan T Setelah Diseimbangkan

Tabel 8 Hasil Simulasi Arus dan Tegangan Setelah Penyeimbangan

I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	I_N (A)	V_R (V)	V_S (V)	V_T (V)
500,5	500,3	496,2	4,194	230,9	230,9	230,9

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

$$P_N = 4,194^2 \times (2 \times 0,153)$$

$$P_N = 17,59 \times 0,306$$

$$P_N = 5,382 \text{ W} = 0,05382 \text{ kW}$$

Setelah diseimbangkan *losses* yang awalnya 0,368452 kW berubah menjadi 0,05382 kW.

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa perhitungan pada ketidakseimbangan beban diatas, ketidakseimbangan beban dapat menimbulkan arus netral yang muncul pada transformator 1250 kVA pada PTPN X PG Gempolkrep, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Persentase ketidakseimbangan terbesar terjadi pada jam 16.00 yaitu sebesar 5,9 %, sementara standar persentase ketidakseimbangan IEC adalah sebesar 5%, itu artinya ketidakseimbangan beban pada PTPN PG Gempolkrep sedikit melebihi batas dan disarankan untuk penyeimbangan beban antara ketiga fasanya.
2. *Losses* rata-rata yang dihasilkan akibat adanya arus netral yang mengalir pada penghantar netral paling besar pada siang hari yaitu 0,458459kW dan yang paling kecil sebesar 0,110640kW. Dari hasil perhitungan dan simulasi diatas dapat dilihat bahwa semakin besar arus netral yang mengalir di penampang netral maka semakin besar pula *losses* yang dihasilkan.

5.2 Saran

Adapun saran – saran yang dapat penulis sampaikan adalah perlu dilakukan pekerjaan penyeimbangan beban dengan cara memindahkan sebagian beban di fasa yang berbeban tinggi ke fasa yang berbeban rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zuhul, “Dasar Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya.” p. 264, 2000.
- [2] PLN, *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga.* .
- [3] F. Triyono, “Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang 2017,” 2017.
- [4] A. Supriyadi, “Hubungan Pada Transformator Tiga Fasa,” *Forum Teknol.*, vol. 07, no. 1.
- [5] H. Saadat, “Power flow analysis,” *Power System Stability: Modelling, Analysis and Control.* pp. 107–130, 2015, doi: 10.1049/pbpo076e_ch5.
- [6] M. D. Tobi, “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi Di Pt Pln (Persero) Area Sorong,” *Electro Luceat*, vol. 4, no. 1, p. 5, 2018, doi: 10.32531/jelekn.v4i1.80.
- [7] A. Bachtiar and M. Isnay Samindha, “Studi Analisa Kinerja Trafo Pemakaian Sendiri PT. PLN (Persero) Sektor Bukittinggi PLTA Batang Agam dengan Menggunakan ESA,” no. 519, pp. 250–267, 2017, doi: 10.21063/pimimd4.2017.250-267.
- [8] M. Dahlan, “Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi,” *Dosen Fak. Tek. Univ. Muria Kudus Sist.*, vol. 1, pp. 1–8, 1979.
- [9] Sulistyowati, “Audit energi untuk efisiensi pemakaian energi listrik,” *Eltek*, vol. 10, no. 01, pp. 14–25, 2012.