

ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TRAF0 1 GI SRONDOL TERHADAP RUGI-RUGI AKIBAT ARUS NETRAL DAN SUHU TRAF0 MENGGUNAKAN ETAP 12.6.0

Dennis Satria Wahyu Jayabadi^{*)}, Bambang Winardi, and Mochammad Facta

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)E-mail: dennis.meneace@gmail.com}

Abstrak

Ketidakseimbangan beban pada suatu sistem distribusi dapat terjadi karena beban-beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Transformator 1 Gardu Induk Sronol merupakan salah satu dari 2 buah transformator penurun tegangan yang melayani beban di penyulang SRL 01, SRL 02, dan SRL 06. Pada bulan April 2016, persentase ketidakseimbangan beban pada Trafo 1 GI Sronol bernilai 5,1% hingga 8%. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut muncul rugi-rugi akibat arus netral pada penghantar netral trafo dan kenaikan suhu minyak serta suhu belitan transformator. Dalam penelitian ini disajikan analisis ketidakseimbangan beban Transformator 1 GI Sronol menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0. Rugi-rugi akibat arus netral dihitung pada kondisi tidak seimbang dan pada kondisi seimbang. Dalam penelitian ini juga disajikan upaya untuk menyeimbangkan beban dengan mengubah hubungan fasa transformator1 fasa pada penyulang yang diamati. Nilai rugi-rugi sebelum dilakukan penyeimbangan beban didapat nilai tertinggi sebesar 233,1 watt. Setelah dilakukan penyeimbangan beban menggunakan ETAP 12.6.0, didapat nilai rugi-rugi tertinggi sebesar 0,16 watt. Suhu minyak dan suhu belitan trafo sebelum dilakukan penyeimbangan beban didapat nilai tertinggi 50°C dan 62°C. Setelah dilakukan penyeimbangan beban didapat suhu minyak dan suhu belitan tertinggi sebesar 42,43°C dan 45,9°C.

Kata kunci: Sistem Distribusi, Transformator, Ketidakseimbangan beban

Abstract

The unbalanced load in electric power distribution system may occur due to single phase loads on low voltage system. Transformer 1 Sronol Substation is one of 2 step down transformers which is used to feed loads in feeder SRL 01, SRL 02, and SRL 06. On April 2016, percentage of unbalanced load at the Transformer 1 Sronol Substation was in between 5,1% to 8%. The effect of the unbalanced load are losses caused by neutral current in neutral conductor and a rise in the oil temperature and winding temperature. In this research, it was presented the analysis of unbalanced load at the Transformer 1 Sronol Substation by using ETAP software 12.6.0. From the unbalanced condition, the losses due to neutral current was calculated. This work also presented the effort to balance the load by changing joint connection of every single transformer along the observed feeder. The highest losses before load balancing was 233,1 watt. After load balancing using ETAP 12.6.0., the highest losses was 0,16 watt. The highest temperature of the oil and winding transformer before load balancing was 50°C dan 62°C. After load balancing, the highest temperature of the oil and winding transformer was predicted to be 42,43°C dan 45,9°C.

Keywords: Distribution System, Transformer, Unbalanced Load

1. Pendahuluan

Sistem distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik ke konsumen. Sistem distribusi terdiri dari jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR). Jaringan tegangan menengah dan jaringan tegangan rendah yang beroperasi secara radial.

Ketidakseimbangan beban selalu terjadi dalam suatu sistem distribusi tenaga listrik. Penyambungan beban yang dilakukan di saluran distribusi kurang memperhatikan pola penyebaran beban antar ketiga fasa dan tidak memperhitungkan besar beban di masing-masing fasa. Keadaan yang demikian tentu saja akan berakibat penyebaran beban yang tidak seimbang antar ketiga fasa pada sistem distribusi[1]. Ketidakseimbangan beban dapat

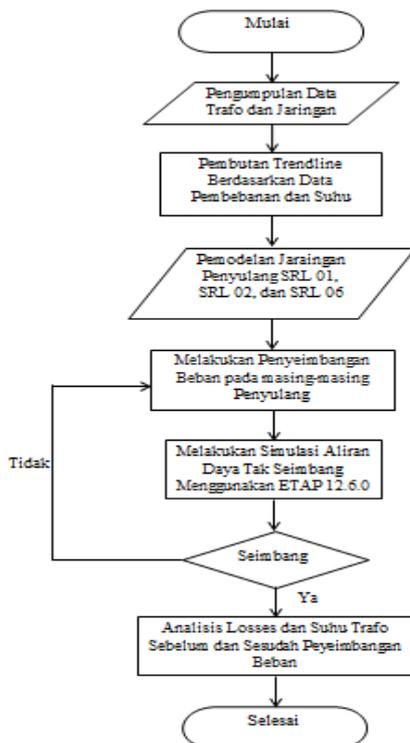
memberikan efek kepada performa jaringan maupun peralatan. Perbedaan nilai tegangan antar fase yang kecil dapat menimbulkan perbedaan yang besar pada arus antar fase[2]. Dalam kondisi ini timbul rugi-rugi yang berbeda pada masing-masing fasa pada trafo sehingga menimbulkan kenaikan temperatur[3]. Batas toleransi yang diperbolehkan untuk nilai persentase ketidakseimbangan adalah maksimal 2% berdasarkan standar SPLN [4].

Trafo 1 Gardu Induk Sronдол memiliki kapasitas 30 MVA menyuplai beban pada penyulang SRL 01, SRL 02 dan SRL 06 yang memiliki jaringan radial dengan jarak distribusi mencapai 11,67 km, 7,55 km dan 5,38 km. Berdasarkan data lapangan pembebanan Trafo 1 GI Sronдол pada Bulan April 2016, persentase ketidakseimbangan beban antar fasa bernilai 5,1% hingga 8%[5]. Berdasarkan hal di atas, dalam Tugas Akhir ini penulis melakukan penyeimbangan beban dengan cara merubah hubungan fasa trafo 1 fasa yang terdapat pada penyulang SRL 01, SRL 02, dan SRL 06 menggunakan ETAP 12.6.0.

2. Metode

2.1. Langkah Penelitian

Langkah penelitian yang dilakukan untuk menyelesaikan penelitian tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Langkah Penelitian

2.2. Data Sistem

Data sistem merupakan kumpulan data yang didapatkan dengan cara melakukan *survey* pada obyek penelitian, yaitu PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sronдол dan juga dengan cara meminta kepada Pihak PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sronдол, APD Jateng & DIY, dan Area Rayon Semarang Selatan. Data-data tersebut meliputi data *power grid*, data spesifikasi transformator, data impedansi penghantar, data pembebanan dan suhu Trafo 1 GI Sronдол bulan April 2016, dan topologi jaringan SRL 01, SRL 02, dan SRL 06. Dari data pembebanan dan suhu Trafo 1 GI Sronдол bulan April 2016, dipilih 4 data yang digunakan sebagai variasi skenario pembebanan pada Tugas Akhir ini. Tabel 1 merupakan data pembebanan tiap skenario.

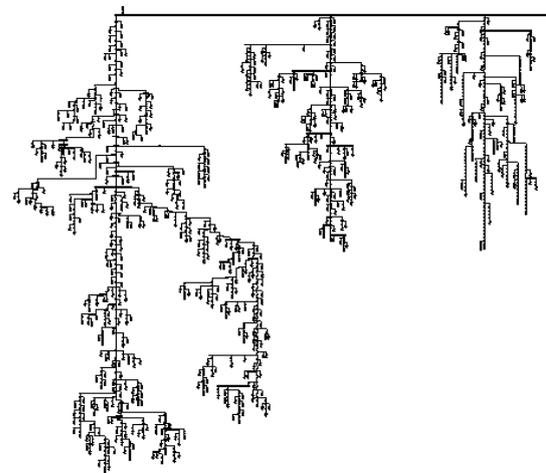
Tabel 1. Data Lapangan Tiap Skenario

Variasi Pembebanan	Arus (Ampere)			Suhu (°C)	
	R	S	T	Minyak	Belitan
Skenario 1	538	472	570	45	58
Skenario 2	545	471	567	47	60
Skenario 3	604	516	640	46	56
Skenario 4	639	566	656	50	62

Pada Tabel 1 terdapat 4 variasi skenario pembebanan. Data pada skenario 1 adalah data pembebanan pada tanggal 18 April 2016, data pada skenario 2 adalah data pembebanan pada tanggal 19 April 2016, data skenario 3 adalah data pembebanan pada tanggal 11 April 2016, dan data skenario 4 adalah data pembebanan pada tanggal 27 April 2016.

2.2. Pemodelan Jaringan

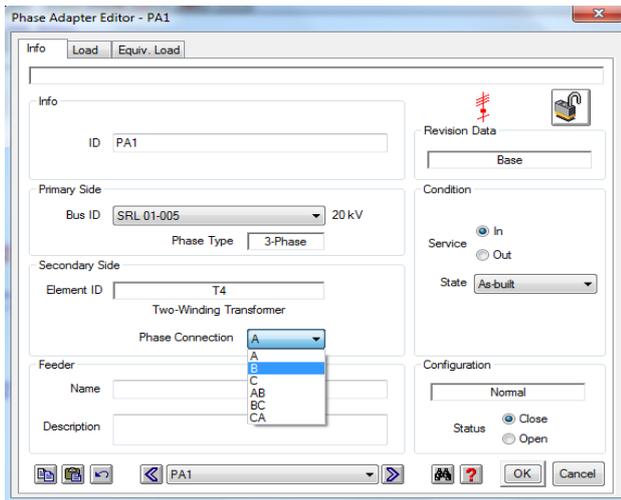
Berdasarkan pada data eksisting jaringan yang diperoleh maka dapat dibuat pemodelan diagram satu garis menggunakan ETAP 12.6.0 seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan topologi masing-masing penyulang pada Trafo 1 GI Sronдол

2.3. Penyeimbangan Beban

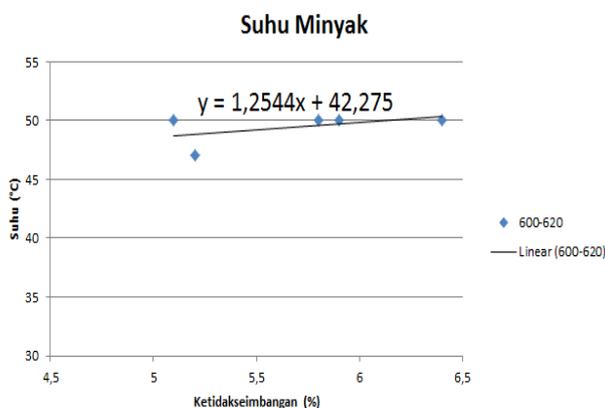
Penyeimbangan beban dilakukan dengan cara memindah hubungan fasa trafo dari satu fasa ke fasa yang lain tanpa merubah nilai beban yang dipikul trafo tersebut. Merubah hubungan fasa pada ETAP 12.6.0 dapat dilakukan dengan merubah *phase connection* yang terdapat pada komponen *phase adapter*. Gambar 3 merupakan cara merubah hubungan fasa pada ETAP 12.6.0



Gambar 3. Merubah Hubungan Fasa pada ETAP 12.6.0

2.4. Trendline

Trendline merupakan garis yang dibuat melalui perhitungan secara statistik. Microsoft excel telah menyediakan fasilitas untuk menambahkan sebuah garis kecenderungan atau *trendline* dalam grafik. Data yang digunakan untuk mendapatkan persamaan *trendline* adalah data pembebanan dan suhu Trafo 1 GI Srdol. persamaan yang didapat digunakan untuk memperkirakan suhu minyak serta suhu belitan trafo setelah dilakukan penyeimbangan beban. Gambar 4 dan Gambar 5 merupakan hasil *trendline* yang didapat menggunakan Ms.Excel.



Gambar 4. Persamaan Trendline Suhu Minyak

Gambar 5. Persamaan Trendline Suhu Be;itan

3. Hasil dan Analisis

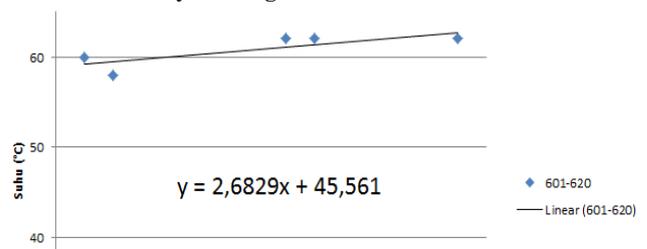
3.1. Simulasi Aliran Daya Tak Seimbang Sebelum Penyeimbangan Beban

Simulasi aliran daya tak seimbang dilakukan untuk mendapatkan nilai arus tiap fasa yang mengalir pada Trafo 1 GI Srdol. Sebelum dilakukan simulasi, langkah yang harus dilakukan adalah memberi beban pada trafo yang terdapat pada jaringan untuk mendapatkan kondisi yang sesuai dengan data lapangan. Dikarenakan tidak terdapat data pembebanan trafo 1 fasa dan 3 fasa pada jaringan, maka beban pada masing-masing trafo diasumsikan sedemikian rupa dengan batasan bahwa pembebanan tiap trafo 1 fasa serta 3 fasa yang berada di tiap penyalang tidak lebih dari 80%.

Simulasi aliran daya tak seimbang dapat dilakukan dengan cara memilih *unbalanced load flow analysis* kemudian memilih *run unbalanced load flow* pada ETAP 12.6.0. Gambar 6 adalah hasil *Report Manager* ETAP 12.6.0 sebelum penyeimbangan beban.

Load Flow					
ID	Phase	MW	Mvar	Amp	% PF
Bus2	A	4.996	3.649	71.4	80.8
	B	4.384	3.191	62.6	80.9
	C	5.254	3.904	75.6	80.3
	N			11.9	
SRL 01-005	A	2.877	1.845	310.1	84.2
	B	2.553	1.668	275.1	83.7
	C	2.669	1.732	289.6	83.9
	N			33.0	
SRL 02-006	A	1.363	0.813	144.0	85.9
	B	1.168	0.695	122.6	85.9
	C	1.713	1.049	182.8	85.3
	N			53.2	
SRL 01-150	A	0.733	0.463	78.6	84.6
	B	0.643	0.411	68.8	84.2
	C	0.847	0.537	91.3	84.4
	N			19.7	

Gambar 6. Report Manager ETAP 12.6.0 Sebelum Penyeimbangan Beban



Pada Gambar 6 terdapat huruf A, B, C, dan N yang merupakan simbol untuk fasa R, S, T, dan netral. Bus 2 merupakan nama untuk Trafo GI, SRL 01-005 merupakan penyulang SRL 01, SRL 01-006 merupakan Penyulang SRL 02, dan SRL 01-150 merupakan Penyulang SRL 06. Tabel 2 adalah rekapitulasi nilai arus tiap fasa pada Trafo 1 GI Sronдол sisi 20 kV hasil simulasi sebelum penyeimbangan beban tiap variasi skenario pembebanan.

Tabel 2. Rekapitulasi Nilai Arus Tiap Fasa Trafo 1 GI Sronдол Sisi 20 kV Hasil Simulasi Sebelum Penyeimbangan Beban

Variasi Pembebanan	Arus (A)			
	R	S	T	N
Skenario 1	538,2	471,9	569,9	89,7
Skenario 2	545	471,1	566,9	89,7
Skenario 3	603,8	516,4	640	113,8
Skenario 4	639,3	566,1	655,9	85,9

Pada Tabel 2 terlihat nilai arus tiap fasa pada sisi 20 kV Trafo GI belum seimbang. Dengan menggunakan data Tabel 2 dapat dihitung persentase ketidakseimbangan beban sebelum penyeimbangan beban menggunakan Persamaan 1 sebagai berikut:

$$\%IUR = \frac{\max|I_a - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}, I_b - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}, I_c - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}|}{\frac{I_a+I_b+I_c}{3}} \times 100\% \quad (1)$$

dimana:

I_A = arus fasa R

I_B = arus fasa S

I_C = arus fasa T

Berikut perhitungan persentase ketidakseimbangan beban sebelum penyeimbangan beban variasi skenario 1:

$$\%IUR = \frac{\max|I_a - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}, I_b - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}, I_c - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}|}{\frac{I_a+I_b+I_c}{3}} \times 100 \%$$

$$\%IUR = \frac{\max[538,2-526,7, 471,9-526,7, 569,9-526,7]}{526,7} \times 100 \%$$

$$\%IUR = \frac{\max[11,5, 54,8, 43,2]}{526,7} \times 100 \%$$

$$\%IUR = \frac{54,8}{526,7} \times 100 \%$$

$$\%IUR = 10,4 \%$$

Dengan cara yang sama, didapatkan persentase ketidakseimbangan beban sebelum penyeimbangan beban pada tiap variasi skenario pembebanan. Tabel 3 adalah rekapitulasi persentase ketidakseimbangan beban sebelum penyeimbangan beban tiap variasi skenario pembebanan.

Tabel 3. Rekapitulasi Persentase Ketidakseimbangan Beban Sebelum Penyeimbangan Beban Tiap Variasi Skenario Pembebanan

Variasi Pembebanan	Ketidakseimbangan Beban (%)
Skenario 1	10,4
Skenario 2	10,6
Skenario 3	12
Skenario 4	8,7

3.2. Perhitungan Rugi-rugi Sebelum Penyeimbangan Beban

Untuk menghitung nilai rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir pada penghantar netral trafo sebelum penyeimbangan beban dapat menggunakan Persamaan 2 sebagai berikut:

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

dimana:

P_N = rugi-rugi penghantar netral trafo (watt)

I_N = arus pada netral trafo (Ampere)

R_N = tahanan pada penghantar netral trafo (Ω)

Berikut perhitungan nilai rugi-rugi variasi skenario 1 sebelum penyeimbangan beban:

$$P_N = (89,7)^2 \cdot 0,018$$

$$P_N = 144,8 \text{ W}$$

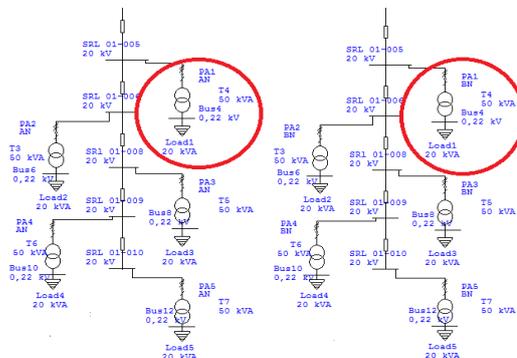
Dengan cara yang sama, didapatkan nilai rugi-rugi sebelum penyeimbangan beban pada tiap variasi skenario pembebanan. Tabel 4 adalah rekapitulasi nilai rugi-rugi sebelum penyeimbangan beban tiap variasi skenario pembebanan.

Tabel 4. Rekapitulasi Nilai Rugi-rugi Sebelum Penyeimbangan Beban Tiap Variasi Skenario Pembebanan

Variasi Pembebanan	Nilai Rugi-rugi (W)
Skenario 1	144,8
Skenario 2	144,8
Skenario 3	233,1
Skenario 4	132,8

3.3. Penataan dan Penyeimbangan Beban

Penataan dan penyeimbangan beban dilakukan pada masing-masing penyulang dengan memindahkan beban dari salah satu fasa ke fasa yang lain dengan merubah hubungan fasa pada trafo 1 fasa yang terdapat di jaringan. Gambar 7 merupakan contoh perubahan hubungan fasa trafo pada ETAP 12.6.0.



Gambar 7. Perubahan Hubungan Fasa Trafo

3.4. Simulasi Aliran Daya Tak Seimbang Setelah Penyeimbangan Beban

Setelah dilakukan penataan dan penyeimbangan beban, dilakukan kembali simulasi aliran daya tak seimbang pada software ETAP 12.6.0. Gambar 8 adalah hasil Report Manager ETAP 12.6.0 setelah penyeimbangan beban.

Load Flow					
ID	Phase	MW	Mvar	Amp	% PF
Bus2	A	4.893	3.572	69.9	80.8
	B	4.875	3.583	69.9	80.6
	C	4.879	3.587	69.9	80.6
	N			0.3	
SRL 01-005	A	2.709	1.740	291.7	84.1
	B	2.695	1.754	291.4	83.8
	C	2.698	1.753	291.6	83.9
	N			1.8	
SRL 02-006	A	1.419	0.852	150.0	85.7
	B	1.416	0.851	149.8	85.7
	C	1.417	0.856	150.1	85.6
	N			0.6	
SRL 01-150	A	0.742	0.471	79.7	84.4
	B	0.741	0.471	79.6	84.4
	C	0.741	0.470	79.6	84.5
	N			0.1	

Gambar 8. Report Manager ETAP 12.6.0 Setelah Penyeimbangan Beban

Rekapitulasi nilai arus tiap fasa pada Trafo 1 GI Srdol sisi 20 kV hasil simulasi setelah penyeimbangan beban tiap variasi skenario pembebanan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Nilai Arus Tiap Fasa Trafo 1 GI Srdol Sisi 20 kV Hasil Simulasi Setelah Penyeimbangan Beban

Variasi Pembebanan	Arus (A)			
	R	S	T	N
Skenario 1	526,9	526,9	526,9	2,26
Skenario 2	527,7	527,7	528,4	2,26
Skenario 3	587,3	586,5	588	3
Skenario 4	620,5	621,2	620,5	1,5

Pada Tabel 5 terlihat nilai arus tiap fasa pada sisi 20 kV Trafo GI mendekati seimbang. Dengan menggunakan data Tabel 5 dapat dihitung persentase ketidakseimbangan beban sebelum penyeimbangan beban menggunakan Persamaan 1. Berikut perhitungan persentase ketidakseimbangan beban setelah penyeimbangan beban variasi skenario 1:

$$\%IUR = \frac{\max|I_a - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}, I_b - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}, I_c - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}|}{\frac{I_a+I_b+I_c}{3}} \times 100 \%$$

$$\%IUR = \frac{\max|526,9-526,9, 526,9-526,9, 526,9-526,9|}{526,9} \times 100 \%$$

$$\%IUR = \frac{\max|0, 0, 0|}{526,9} \times 100 \%$$

$$\%IUR = \frac{0}{526,9} \times 100\%$$

$$\%IUR = 0 \%$$

Dengan cara yang sama, didapatkan persentase ketidakseimbangan beban setelah penyeimbangan beban pada tiap variasi skenario pembebanan. Tabel 6 adalah rekapitulasi persentase ketidakseimbangan beban sebelum penyeimbangan beban tiap variasi skenario pembebanan.

Tabel 6. Rekapitulasi Persentase Ketidakseimbangan Setelah Penyeimbangan Beban Tiap Variasi Skenario Pembebanan

Variasi Pembebanan	Ketidakseimbangan Beban (%)
Skenario 1	0
Skenario 2	0,09
Skenario 3	0,13
Skenario 4	0,08

3.5. Perhitungan Rugi-rugi Setelah Penyeimbangan Beban

Untuk menghitung nilai rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir pada penghantar netral trafo sebelum penyeimbangan beban dapat menggunakan Persamaan 2. Berikut perhitungan nilai rugi-rugi variasi skenario 1 setelah penyeimbangan beban sebagai berikut:

$$P_N = (2,26)^2 \cdot 0,018$$

$$P_N = 0,09 \text{ W}$$

Dengan cara yang sama, didapatkan nilai rugi-rugi setelah penyeimbangan beban pada tiap variasi skenario pembebanan. Tabel 7 adalah rekapitulasi nilai rugi-rugi setelah penyeimbangan beban tiap variasi skenario pembebanan.

Tabel 7. Rekapitulasi Nilai Rugi-rugi Setelah Penyeimbangan Beban Tiap Variasi Skenario Pembebanan

Variasi Pembebanan	Nilai Rugi-rugi (W)
Skenario 1	0,09
Skenario 2	0,09
Skenario 3	0,16
Skenario 4	0,04

3.6. Perhitungan Suhu Trafo Setelah Penyeimbangan Beban

Untuk menghitung suhu Trafo GI setelah dilakukan penyeimbangan beban, digunakan persamaan *trendline* yang didapat menggunakan Ms.Excel. Pada Gambar 4 didapatkan persamaan 3 untuk mencari suhu minyak setelah dilakukan penyeimbangan beban sebagai berikut:

$$y = 1,2544x + 42,275 \tag{3}$$

Sedangkan untuk mencari suhu belitan setelah dilakukan penyeimbangan beban dapat menggunakan persamaan 4 pada Gambar 5 sebagai berikut:

$$y = 2,6829x + 45,561 \tag{4}$$

dimana

y = suhu

x = persentase ketidakseimbangan beban

Berikut perhitungan suhu minyak dan suhu belitan trafo setelah penyeimbangan beban menggunakan Persamaan (3) dan Persamaan (4) variasi skenario 1:

- Suhu Minyak
 $y = 1,2544x + 42,275$
 $y = 1,2544 \cdot 0 + 42,275$
 $y = 42,275 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Suhu Belitan
 $y = 2,6829x + 45,561$
 $y = 2,6829 \cdot 0 + 45,561$
 $y = 45,561 \text{ } ^\circ\text{C}$

Dengan cara yang sama, didapatkan nilai suhu minyak dan suhu belitan trafo setelah penyeimbangan beban pada tiap variasi skenario pembebanan. Tabel 8 adalah rekapitulasi suhu minyak dan suhu belitan trafo setelah penyeimbangan beban tiap variasi skenario pembebanan.

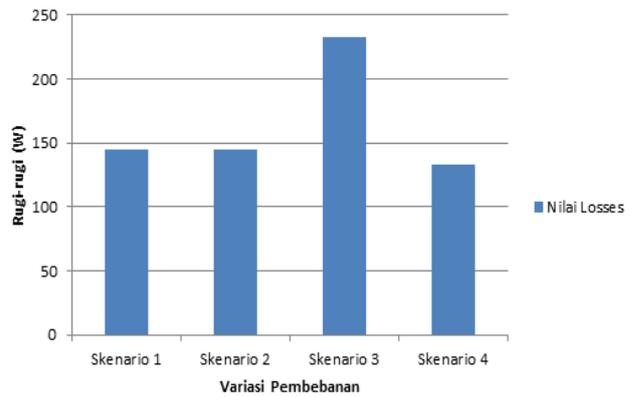
Tabel 8. Rekapitulasi Suhu Minyak dan Suhu Belitan Trafo Setelah Penyeimbangan Beban Tiap Variasi Skenario Pembebanan

Variasi Pembebanan	Suhu minyak ($^\circ\text{C}$)	Suhu Belitan ($^\circ\text{C}$)
Skenario 1	42,275	45,461
Skenario 2	42,39	45,8
Skenario 3	42,43	45,9
Skenario 4	42,37	45,7

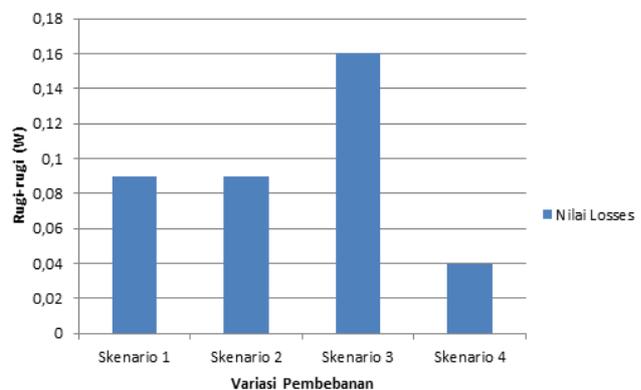
3.7. Perbandingan Nilai Rugi-rugi Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan Beban Keempat Variasi Skenario Pembebanan

Setelah diperoleh nilai rugi-rugi akibat arus yang mengalir pada kawat netral trafo saat kondisi sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban dari keempat variasi skenario pembebanan, dilakukan analisis perbandingan nilai rugi-rugi sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban dari keempat variasi skenario pembebanan. Gambar 8 adalah grafik nilai rugi-rugi sebelum dilakukan penyeimbangan beban dan Gambar 9 adalah grafik nilai rugi-rugi setelah dilakukan penyeimbangan beban dari keempat variasi skenario pembebanan.

Pada grafik Gambar 8 dan grafik Gambar 9 terlihat dengan dilakukannya penyeimbangan beban dapat mengurangi rugi-rugi yang timbul akibat arus netral yang mengalir pada trafo sehingga daya yang dikirim ke konsumen dapat terkirim secara maksimal. Kecilnya nilai rugi-rugi setelah penyeimbangan beban dikarenakan setelah penyeimbangan beban persentase ketidakseimbangan beban antar fasa menjadi sangat kecil sehingga arus yang mengalir pada fasa netral trafo juga sangat kecil.



Gambar 8. Grafik Nilai Rugi-rugi Sebelum Penyeimbangan Beban

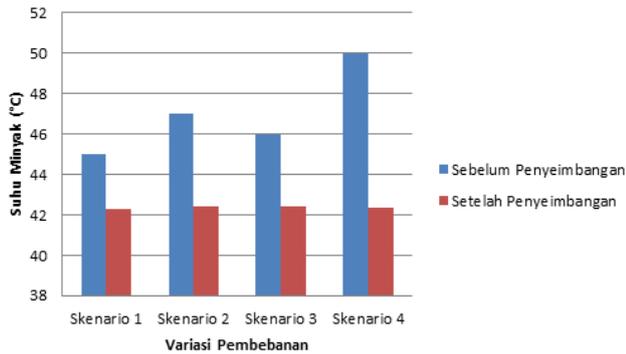


Gambar 9. Grafik Nilai Rugi-rugi Setelah Penyeimbangan Beban

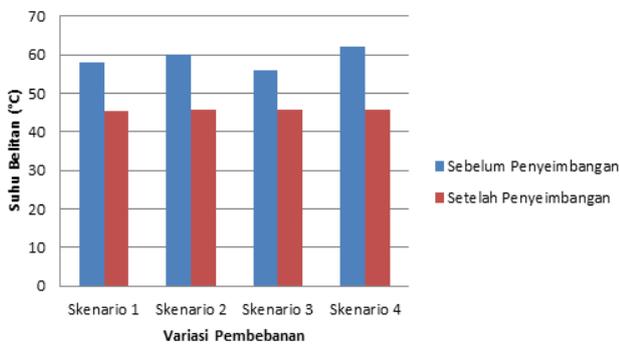
3.8. Perbandingan Suhu Trafo Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan Beban Keempat Variasi Skenario Pembebanan

Setelah diperoleh nilai suhu trafo saat kondisi sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban dari keempat variasi skenario pembebanan, dilakukan analisis perbandingan nilai suhu trafo sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban dari keempat variasi skenario pembebanan. Gambar 10 dan Gambar 11 adalah grafik perbandingan nilai suhu minyak dan suhu belitan trafo sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban dari keempat variasi skenario pembebanan.

Pada grafik Gambar 10 dan grafik Gambar 11 terlihat dengan dilakukannya penyeimbangan beban suhu minyak maupun suhu belitan trafo menjadi turun. Maka dapat disimpulkan dengan dilakukannya penyeimbangan beban dapat menurunkan suhu trafo sehingga dapat mengurangi susut umur trafo akibat kenaikan temperatur karena pembebanan tak seimbang tersebut



Gambar 10. Grafik Perbandingan Suhu Minyak Trafo Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan Beban



Gambar 11. Grafik Perbandingan Suhu Belitan Trafo Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan Beban

4. Kesimpulan

Dari 4 simulasi variasi skenario pembebanan yang dilakukan, dapat disimpulkan dengan dilakukannya upaya penyeimbangan beban pada Trafo 1 GI Spondol, dapat mengurangi rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir pada penghantar netral Trafo 1 GI Spondol dan juga dapat menurunkan suhu minyak serta suhu belitan Trafo 1 GI Spondol. Persentase ketidakseimbangan beban variasi pembebanan skenario 1, skenario 2, skenario 3, dan skenario 4 setelah dilakukan penyeimbangan beban berturut-turut 0%, 0,09 %, 0,13 % dan 0,08 %. Nilai tersebut sudah sesuai nilai standar ketidakseimbangan beban yaitu maksimal 2 %.

Referensi

- [1]. Kawihing, dkk. *Pemerataan Beban Transformator Pada Saluran Distribusi Sekunder*. e-journal Teknik Elektro dan Komputer. Manado: Jurusan Teknik Elektro UNSRAT. 2013.
- [2]. IEEE. *Assessment of Voltage Unbalance*. IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.16, No. 4, October 2001.
- [3]. Edan, Mohammed K. *Effect of Unbalance Voltage on The Operation and Performance of a Three Phase Distribution Transformers*. Jurnal Universitas Babylon. Vol. 21, No. 5, 2013.
- [4]. SPLN D5.004-1:2012. *Regulasi Harmonisa, Flicker, dan Ketidakseimbangan Tegangan*.
- [5]. PT.PLN (Persero). *Beban Trafo 1 Gardu Induk Spondol Semarang Bulan April 2016*. PT.PLN (Persero). Semarang. 2016.
- [6]. IEEE. *Definitions of Voltage Unbalance*. IEEE Power Engineering Review. May 2001.
- [7]. Yang, W.C., Huang, W.T., dan Kao, W.L., *Appliction of SIMULINK to Analyze The Unbalanced Operation Characteristics of a Three-Phase Transformer with Non-Identical Winding Impedances*, AIIE 2015.
- [8]. Engineering Recommendation P29. *Planning Limits For Unbalance Voltage*.