

Analisis Rugi-Rugi Daya Akibat Ketidakseimbangan Beban pada Jaringan Distribusi Sekunder di PT. PLN (Persero) ULP Watang Sawitto

Irawati Bursa¹⁾, Ruslan L²⁾, Nirwan A. Noor³⁾.
^{1,2,3} Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ujung Pandang
irawatibursa@gmail.com
ruslanlausu@gmail.com
nirwanpnup@gmail.com

Abstrak

Pentingnya energi listrik bagi kehidupan di masyarakat dan industri menuntut PT. PLN (Persero) selaku penyedia energi listrik harus menyediakan energi listrik yang stabil. Penelitian ini dilakukan untuk menghitung rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi sekunder dalam keadaan beban tidak seimbang menggunakan perhitungan secara teori dan simulasi ETAP 12.6.0. Penelitian ini juga bertujuan untuk menghitung rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi sekunder dalam keadaan beban seimbang menggunakan perhitungan secara teori dan simulasi ETAP 12.6.0. Sehubungan dengan itu, penelitian ini dilakukan dengan cara mengumpulkan data terkait data pembebanan transformator, data penghantar, dan data tegangan pangkal dan penerima, kemudian data dianalisis sehingga didapatkan perbandingan antara besar rugi-rugi daya dalam keadaan beban tidak seimbang dan keadaan beban seimbang. Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa besar rugi-rugi daya pada jaringan distribusi sekunder dalam keadaan beban tidak seimbang berdasarkan hasil perhitungan adalah 22,1 kW dengan jatuh tegangan sebesar 20,3 % dan rugi-rugi daya berdasarkan hasil simulasi ETAP 12.6.0 adalah 23,1 kW dengan jatuh tegangan sebesar 16,37%. Sedangkan rugi-rugi daya dalam keadaan beban seimbang berdasarkan hasil perhitungan 20,9 kW dan rugi-rugi daya berdasarkan hasil simulasi ETAP 12.6.0 adalah 22,3 kW dengan jatuh tegangan sebesar 13,69%.

Keywords: Ketidakseimbangan Beban, Rugi-Rugi Daya, Jatuh Tegangan.

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama bagi masyarakat Indonesia. Apabila energi listrik tidak tersedia, maka kehidupan di masyarakat dan sistem industri akan terganggu. Pentingnya energi listrik bagi kehidupan di masyarakat dan industri menuntut PT. PLN (Persero) selaku penyedia energi listrik harus menyediakan energi listrik yang stabil.

Sistem distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik ke konsumen. 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 akan menyebabkan ketidakseimbangan beban. Sehingga, rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi akan meningkat.

Menurut IEEE, standar ketidakseimbangan beban 3 fasa adalah maksimal 20%. Berdasarkan data pengukuran trafo semester kedua tahun 2020 pada *feeder* Kartini di PT. PLN (Persero) ULP Watang Sawitto, terdapat 11 gardu yang ketidakseimbangan

bebannya melebihi 20%. Salah satunya terdapat pada gardu GOT. AJ di Jl. Matahari *feeder* Kartini yang persentase ketidakseimbangan bebannya sebesar 21,3%. Sehingga rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi sekunder GOT. AJ akan meningkat.

Untuk menganalisis terjadinya rugi-rugi daya dan jatuh tegangan sedini mungkin, maka dibutuhkan suatu perangkat lunak (*software*) ETAP. Pada skripsi ini, penulis menggunakan *software* ETAP 12.6.0 untuk mengetahui seberapa besar rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi sekunder dalam keadaan beban tidak seimbang dan beban seimbang. Untuk menguji kebenaran hasil simulasi ETAP 12.6.0, penulis juga melakukan perhitungan secara teori.

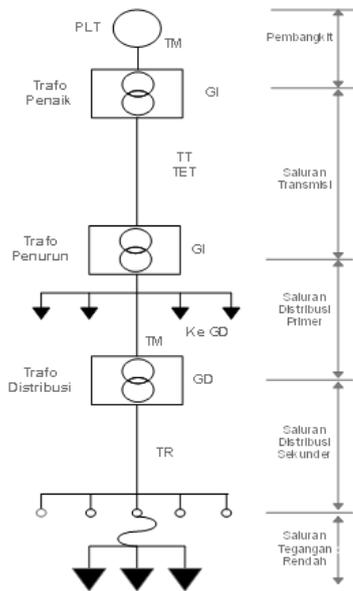
Berdasarkan permasalahan di atas, penulis mengangkat judul tentang “Analisis Rugi-Rugi Daya akibat Ketidakseimbangan Beban pada Jaringan Distribusi Sekunder di PT. PLN (Persero) ULP Watang Sawitto”.

II. KAJIAN LITERATUR

A. Sistem Tenaga Listrik

Menurut Kurnia (2017), sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terdiri dari tiga bagian

utama berupa pembangkit, transmisi, dan distribusi yang saling berhubungan dan bekerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik konsumen. Rangkaian sistem tenaga listrik ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Sistem Tenaga Listrik
(Sumber: Kurnia, 2017)

B. Jaringan Tegangan Rendah

Menurut SPLN No.3 (1987), jaringan tegangan rendah adalah jaringan tegangan rendah yang mencakup seluruh bagian jaringan beserta perlengkapannya, dari sumber penyaluran tegangan rendah sampai dengan alat pembatas/pengukur. Sistem jaringan tegangan rendah ini terdiri dari dua macam, yaitu:

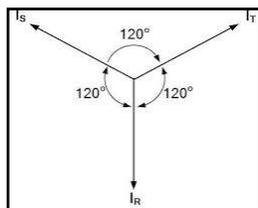
1. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR)
2. Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR)

C. Ketidakseimbangan Beban

Menurut Badaruddin (2012), yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan di mana:

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

Seperti pada gambar 2 di bawah ini:



Gambar 2. Vektor Diagram Arus dalam Keadaan Seimbang

(Sumber: Badaruddin, 2012)

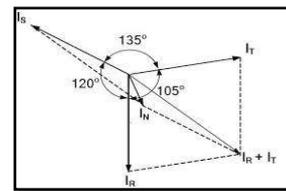
Dari gambar di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa

penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R, I_S, I_T) adalah sama dengan nol. Sehingga tidak muncul arus netral (I_N).

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan di mana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 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.

Seperti yang terlihat pada gambar 3 di bawah ini:



Gambar 3. Vektor Diagram Arus dalam Keadaan Tidak Seimbang
(Sumber: Badaruddin, 2012)

Gambar 3 di atas menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R, I_S, I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya. Berdasarkan IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) ketidakseimbangan beban 3 fasa yang diizinkan adalah 5-20% (IEEE, Std 446-1995).

Untuk arus tiga fasa dari suatu sistem yang tidak seimbang dapat diselesaikan dengan metode komponen simetris. Metode ini telah dipaparkan oleh Fortescue yang membuktikan bahwa suatu sistem yang tidak seimbang dari fasor yang berhubungan dapat diuraikan menjadi sistem dengan fasor seimbang yang dinamakan komponen-komponen simetris. Dengan menggunakan notasi-notasi yang sama seperti pada tegangan akan didapatkan persamaan untuk arus fasanya:

$$I_R = I_1 + I_2 + I_0 \tag{1}$$

$$I_S = \alpha^2 I_1 + \alpha I_2 + I_0 \tag{2}$$

$$I_T = \alpha I_1 + \alpha^2 I_2 + I_0 \tag{3}$$

Dengan tiga langkah yang dijabarkan dalam menentukan urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol terlebih dahulu, maka arus-urutan juga dapat ditentukan dengan cara yang sama, sehingga didapatkan:

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_R + \alpha I_S + \alpha^2 I_T) \tag{4}$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_R + \alpha^2 I_S + \alpha I_T) \tag{5}$$

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_R + I_S + I_T) \tag{6}$$

Di mana:

I_1 = Arus urutan positif (A)

I_2 = Arus urutan negatif (A)

I_0 = Arus urutan nol (A)

$\alpha = 120^\circ$

Arus urutan positif berasal dari komponen urutan positif, komponen ini terdiri dari 3 fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasor 120° , dan mempunyai urutan fasor yang sama dengan fasor aslinya. Sedangkan arus urutan negatif berasal dari komponen urutan negatif, komponen ini terdiri atas 3 fasor yang sama terpisah dengan yang lainnya dalam fasor sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya. Dan arus urutan nol berasal dari komponen urutan nol, komponen ini terdiri atas 3 fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara simetris fasor yang satu dengan yang lainnya.

Pada komponen simetris simbol α digunakan untuk menunjukkan operator yang menimbulkan suatu perputaran 120° dengan arah yang berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Operator semacam ini adalah bagian kompleks yang besarnya satu dan sudutnya 120° dan didefinisikan sebagai:

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ \text{ atau } \alpha = -0,5 + j 0,866$$

Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini, jumlah arus sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral, sehingga:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad (7)$$

D. Rugi-Rugi Daya pada Sistem Distribusi

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antar fasa pada sisi sekunder transformator maka mengalirlah arus netral transformator. Arus yang mengalir pada penghantar netral menyebabkan rugi-rugi daya (Latupeirissa, 2017).

Sebelum mengidentifikasi rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator, perlu diketahui terlebih dahulu nilai resistansi dan reaktansi pada penghantar. Menurut SPLN No. 64 Tahun 1985, nilai resistansi dan reaktansi pada suatu penghantar dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Penghantar Aluminium JTR

Penghantar		KHA (A)	Resistansi Penghantar pada 28°C (Ωkm)		Reaktansi pada 50 Hz (Ωkm)
Jenis	Ukuran		Fasa	Netral	
Twisted	$3 \times 35 + 1 \times 50 \text{ mm}^2$	125	0,894	0,599	0,379
	$3 \times 50 + 1 \times 50 \text{ mm}^2$	154	0,661	0,599	0,3678
Cable	$3 \times 70 + 1 \times 50 \text{ mm}^2$	196	0,457	0,599	0,3572
	$3 \times 95 + 1 \times 50 \text{ mm}^2$	242	0,317	0,599	0,2449

Rugi-rugi daya pada penghantar netral transformator didapatkan berdasarkan persamaan:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (8)$$

Di mana:

P_N = Rugi-rugi pada penghantar netral transformator (W)

I_N = Arus yang mengalir pada netral transformator (A)

R_N = Tahanan penghantar netral transformator (Ω)

Rugi-rugi daya pada jaringan tiga fasa dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L \quad (9)$$

Di mana:

P = Rugi-rugi daya pada jaringan (W)

I = Arus beban jaringan (A)

R = Tahanan penghantar (Ω)

L = Panjang penghantar (kms)

E. Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Berdasarkan SPLN No. 72 (1987), jatuh tegangan yang diperbolehkan dalam penyaluran distribusi sebesar +5% dan -10%.

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik, sesuai dengan persamaan berikut:

$$\Delta V = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\% \quad (10)$$

Di mana:

ΔV = Jatuh Tegangan (V)

V_s = Tegangan pada pangkal pengirim (V)

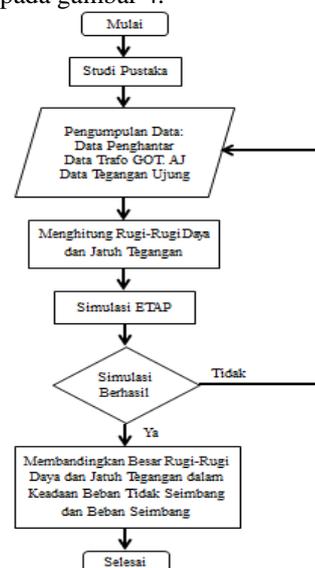
V_r = Tegangan pada pangkal penerima (V)

F. Software ETAP

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi sistem tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real time*. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan sistem tenaga listrik, sistem transmisi, maupun sistem distribusi tenaga listrik.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di kantor PT. PLN (Persero) ULP Watang Sawitto yang berlokasi di Jl. Diponegoro, Kecamatan Watang Sawitto, Kabupaten Pinrang. Penelitian dilakukan mulai dari 01 Januari 2021 sampai 30 Juli 2021. *Flowchart* kegiatan ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. *Flowchart* Kegiatan

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengukuran Beban Gardu GOT. AJ

Pengukuran beban pada gardu distribusi GOT. AJ dilakukan saat Waktu Beban Puncak (WBP) pada Selasa, 09 Maret 2021 pukul 20:00. Hasil pengukuran beban pada gardu distribusi GOT. AJ dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengukuran WBP

DATA PENGUKURAN							BEBAN (kVA)		
ARUS (A)				TEGANGAN (V)			R	S	T
R	S	T	N	PHB F-F	PHB F-N	UJUNG F-N			
248	151	270	110	396	226	180	56,048	34,126	61,02

Berdasarkan data hasil pengukuran pada tabel 2, dapat dihitung arus urutan positif dan negatif dengan menggunakan persamaan (4) dan (5) dimana diasumsikan bahwa kemungkinan ketidakseimbangan beban yang terjadi adalah ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain, sehingga didapatkan:

$$\begin{aligned} \rightarrow I_1 &= \frac{1}{3} (I_R + \alpha I_S + \alpha^2 I_T) \\ &= \frac{1}{3} (248 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 151 \angle 240^\circ + (1 \angle 120^\circ)^2 \cdot 270 \angle 120^\circ) \\ &= \frac{1}{3} (248 \angle 0^\circ + 151 \angle 360^\circ + 270 \angle 360^\circ) \\ &= \frac{1}{3} (248 + 151 + 270) \\ &= 223 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow I_2 &= \frac{1}{3} (I_R + \alpha^2 I_S + \alpha I_T) \\ &= \frac{1}{3} (248 \angle 0^\circ + (1 \angle 120^\circ)^2 \cdot 151 \angle 240^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 270 \angle 120^\circ) \\ &= \frac{1}{3} (248 \angle 0^\circ + 151 \angle 120^\circ + 270 \angle 240^\circ) \rightarrow \text{diubah ke} \\ &\text{rectangular} \\ &= \frac{1}{3} (248 + j 0) + (-75,5 + j 131,4) + (-135 - j 234,9) \\ &= \frac{1}{3} (248 - 75,5 - 135) + j (131,4 - 234,9) \\ &= \frac{1}{3} (37,5 - j 103,53) \rightarrow \text{diubah ke polar} \\ &= \frac{1}{3} (110,1 \angle -70,1^\circ) \\ &= 36,7 \angle -70,1^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

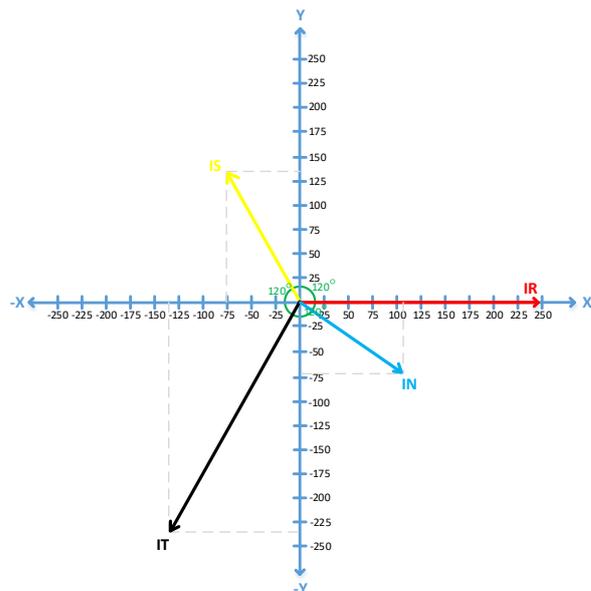
Dari hasil perhitungan diatas, maka diperoleh:

$$\begin{aligned} I_R &= 248 \angle 0^\circ \rightarrow 248 + j 0 \\ I_S &= 151 \angle 120^\circ \rightarrow -75,5 + j 131,4 \\ I_T &= 270 \angle 240^\circ \rightarrow -135 - j 234,9 \end{aligned}$$

Untuk nilai arus netral (I_N) yang muncul akibat ketidakseimbangan beban, diperoleh berdasarkan persamaan (7):

$$\begin{aligned} I_N &= I_R + I_S + I_T \\ &= (248 + j 0) + (-75,5 + j 131,4) + (-135 - j 234,9) \\ &= (248 - 75,5 - 135) + j (131,4 - 234,9) \\ &= 37,5 - j 103,5 \rightarrow 110,1 \angle -70,1^\circ \end{aligned}$$

Setelah didapatkan nilai rectangular pada masing-masing fasa, maka selanjutnya dapat digambarkan kedalam bentuk diagram arus pada gambar 5 sebagai berikut.



Gambar 5. Vektor Diagram Arus dalam Keadaan Tidak Seimbang

B. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

Untuk menghitung persentase ketidakseimbangan beban, digunakan persamaan (14) dan (15):

$$a = \frac{248}{223} = 1,11 ; b = \frac{151}{223} = 0,68 ; c = \frac{270}{223} = 1,21$$

Jadi, besarnya persentase ketidakseimbangan beban pada gardu GOT. AJ adalah:

$$\begin{aligned} \% &= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100 \% \\ &= \frac{\{|1,11-1|+|0,68-1|+|1,21-1|\}}{3} \times 100 \% \\ &= \frac{0,11 + 0,32 + 0,21}{3} \times 100 \% \\ &= 21,3 \% \end{aligned}$$

C. Perhitungan Rugi-Rugi Daya dalam Keadaan Beban Tidak Seimbang

Penghantar yang digunakan pada GOT. AJ menggunakan LVTC $3 \times 70 + 1 \times 50 \text{ mm}^2$ dengan panjang saluran distribusi sekunder pada transformator adalah 0,72 kms. Adapun nilai resistansi dan reaktansi pada suatu penghantar dapat dilihat pada tabel 1.

Untuk menghitung besar rugi-rugi daya yang terjadi pada penghantar netral, digunakan persamaan (8) berikut:

1. Rugi-rugi daya pada penghantar netral

$$\begin{aligned} P_N &= I_N^2 \cdot R_N \\ &= 110^2 \times 0,599 \\ &= 7247,9 \text{ W} \end{aligned}$$

2. Rugi-rugi daya yang terjadi pada penghantar fasa
Pada perhitungan rugi-rugi daya pada penghantar fasa, penulis membagi ke dalam 5 zona agar perhitungan yang dihasilkan lebih akurat.

Dalam keadaan beban tidak seimbang, besar arus yang mengalir pada masing-masing fasa tidak sama. Untuk itu, digunakan persamaan berikut.

- a. Untuk zone 1 (100%)

$$\begin{aligned} P_1 &= ((I_R)^2 + (I_S)^2 + (I_T)^2) \cdot R \cdot L_1 \\ &= ((248)^2 + (151)^2 + (270)^2) \times 0,457 \times 0,14 \end{aligned}$$

$$= 10057,9 \text{ W} \rightarrow 10,05 \text{ kW}$$

- b. Untuk zone 2 (80%)
 $P_2 = ((I_R)^2 + (I_S)^2 + (I_T)^2) \cdot R \cdot L_2$
 $= ((198,4)^2 + (120,8)^2 + (216)^2) \times 0,457 \times 0,14$
 $= 6437,1 \text{ W} \rightarrow 6,4 \text{ kW}$
- c. Untuk zone 3 (60%)
 $P_3 = ((I_R)^2 + (I_S)^2 + (I_T)^2) \cdot R \cdot L_3$
 $= ((148,8)^2 + (90,6)^2 + (162)^2) \times 0,457 \times 0,14$
 $= 3620,9 \text{ W} \rightarrow 3,6 \text{ kW}$
- d. Untuk zone 4 (40%)
 $P_4 = ((I_R)^2 + (I_S)^2 + (I_T)^2) \cdot R \cdot L_4$
 $= ((99,2)^2 + (60,4)^2 + (108)^2) \times 0,457 \times 0,14$
 $= 1609,3 \text{ W} \rightarrow 1,6 \text{ kW}$
- e. Untuk zone 5 (20%)
 $P_5 = ((I_R)^2 + (I_S)^2 + (I_T)^2) \cdot R \cdot L_5$
 $= ((49,6)^2 + (30,2)^2 + (54)^2) \times 0,457 \times 0,14$
 $= 402,3 \text{ W} \rightarrow 0,4 \text{ kW}$

Jadi, besar rugi-rugi daya total pada penghantar fasa adalah sebagai berikut:

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$$

$$= 10057,9 + 6437,1 + 3620,9 + 1609,3 + 402,3$$

$$= 22127,5 \text{ W} \rightarrow 22,1 \text{ kW}$$

D. Perhitungan Jatuh Tegangan dalam Keadaan Beban Tidak Seimbang

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Berdasarkan SPLN No. 72 (1987), jatuh tegangan yang diperbolehkan dalam penyaluran distribusi sebesar +5% dan -10%. Untuk menghitung persentase tegangan digunakan persamaan (10) berikut:

$$\Delta V = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\%$$

$$= \frac{226 - 180}{226} \times 100\%$$

$$= 20,3 \%$$

E. Penyeimbangan Beban

Penyeimbangan beban dilakukan dengan memindahkan beban yang lebih dari salah satu fasa ke fasa yang lain yang bebannya kurang. Untuk itu, perlu diketahui nilai arus beban rata-rata dengan menggunakan persamaan:

$$I = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$= \frac{248 + 151 + 270}{3}$$

$$= 223 \text{ A}$$

Setelah diketahui besarnya arus beban rata-rata, selanjutnya dapat dihitung besarnya selisih antara arus beban per fasa, yaitu:

$$\text{Fasa R} = 223 \text{ A} - 248 \text{ A} = -25 \text{ A} \text{ (nilai arus beban dikurangi 25 A)}$$

$$\text{Fasa S} = 223 \text{ A} - 151 \text{ A} = 72 \text{ A} \text{ (nilai arus beban ditambah 72 A)}$$

$$\text{Fasa T} = 223 \text{ A} - 270 \text{ A} = -47 \text{ A} \text{ (nilai arus beban dikurangi 47 A)}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, beban akan seimbang bila arus beban pada fasa R dipindahkan 25 A ke fasa S dan arus beban pada fasa T dipindahkan 47 A

ke fasa S. Dengan demikian, masing-masing fasa (R, S, dan T) memiliki arus beban sebesar 223 A.

Sehingga dapat dihitung arus urutan positif dan negatif setelah penyeimbangan dengan menggunakan persamaan (4) dan (5) berikut:

$$\rightarrow I_1 = \frac{1}{3} (I_R + \alpha I_S + \alpha^2 I_T)$$

$$= \frac{1}{3} (223 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 223 \angle 240^\circ + (1 \angle 120^\circ)^2 \cdot 223 \angle 120^\circ)$$

$$= \frac{1}{3} (223 \angle 0^\circ + 223 \angle 360^\circ + 223 \angle 360^\circ)$$

$$= \frac{1}{3} (223 + 223 + 223)$$

$$= 223 \text{ A}$$

$$\rightarrow I_2 = \frac{1}{3} (I_R + \alpha^2 I_S + \alpha I_T)$$

$$= \frac{1}{3} (223 \angle 0^\circ + (1 \angle 120^\circ)^2 \cdot 223 \angle 240^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 223 \angle 120^\circ)$$

$$= \frac{1}{3} (223 \angle 0^\circ + 223 \angle 120^\circ + 223 \angle 240^\circ) \rightarrow \text{diubah ke rectangular}$$

$$= \frac{1}{3} (223 + j0) + (-111,5 + j 194,01) + (-111,5 - j 194,01)$$

$$= \frac{1}{3} (223 - 111,5 - 111,5) + j (194,01 - 194,01)$$

$$= \frac{1}{3} (0) + j (0) \rightarrow \text{diubah ke polar}$$

$$= 0 \text{ A}$$

Dari hasil perhitungan diatas, maka diperoleh:

$$I_R = 223 \angle 0^\circ \rightarrow 223 + j (0)$$

$$I_S = 223 \angle 120^\circ \rightarrow -111,5 + j 194,01$$

$$I_T = 223 \angle 240^\circ \rightarrow -111,5 - j 194,01$$

Untuk nilai arus netral (I_N), diperoleh berdasarkan persamaan (7):

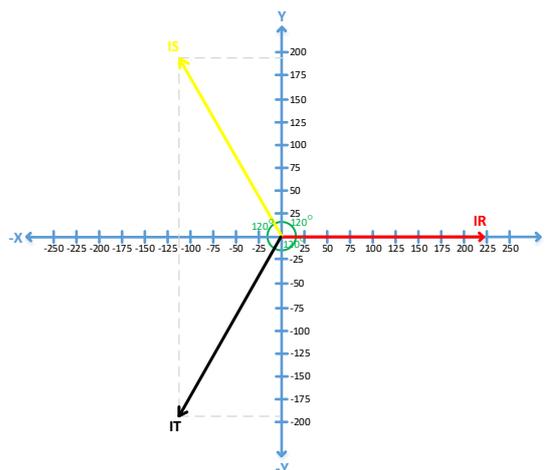
$$I_N = I_R + I_S + I_T$$

$$= (223 + j(0)) + (-111,5 + j 194,01) + (-111,5 - j 194,01)$$

$$= (223 - 111,5 - 111,5) + j (194,01 - 194,01)$$

$$= 0 + j 0 \rightarrow 0$$

Setelah didapatkan nilai rectangular pada masing-masing fasa, maka selanjutnya dapat digambarkan kedalam bentuk diagram arus pada gambar 6 berikut.



Gambar 6. Vektor Arus dalam Keadaan Beban Seimbang

F. Perhitungan Rugi-Rugi Daya dalam Keadaan Beban Seimbang

Untuk menghitung besar rugi-rugi daya yang terjadi pada penghantar netral dan fasa digunakan persamaan (8).

1. Rugi-rugi daya pada penghantar netral

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

$$= 0^2 \times 0,599$$

$$= 0 \text{ W}$$

2. Rugi-rugi daya yang terjadi pada penghantar fasa
Perhitungan rugi-rugi daya pada penghantar fasa dalam keadaan beban seimbang juga dilakukan sama seperti pada perhitungan rugi-rugi daya dalam keadaan beban tidak seimbang. Untuk menghitung besar rugi-rugi daya yang terjadi pada penghantar fasa dalam keadaan beban seimbang digunakan persamaan (8).

a. Untuk zone 1 (100%)

$$P_1 = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L_1$$

$$= 3 \times (223)^2 \times 0,457 \times 0,14$$

$$= 9544,9 \text{ W} \Rightarrow 9,5 \text{ kW}$$

b. Untuk zone 2 (80%)

$$P_2 = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L_2$$

$$= 3 \times (178,4)^2 \times 0,457 \times 0,14$$

$$= 6108,8 \text{ W} \Rightarrow 6,1 \text{ kW}$$

c. Untuk zone 3 (60%)

$$P_3 = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L_3$$

$$= 3 \times (133,8)^2 \times 0,457 \times 0,14$$

$$= 3436,2 \text{ W} \Rightarrow 3,4 \text{ kW}$$

d. Untuk zone 4 (40%)

$$P_4 = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L_4$$

$$= 3 \times (89,2)^2 \times 0,457 \times 0,14$$

$$= 1527,2 \text{ W} \Rightarrow 1,5 \text{ kW}$$

e. Untuk zone 5 (20%)

$$P_5 = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L_5$$

$$= 3 \times (44,6)^2 \times 0,457 \times 0,14$$

$$= 381,8 \text{ W} \Rightarrow 0,3 \text{ kW}$$

Jadi, besar rugi-rugi daya total pada penghantar fasa adalah sebagai berikut:

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$$

$$= 9544,9 + 6108,8 + 3436,2 + 1527,2 + 381,8$$

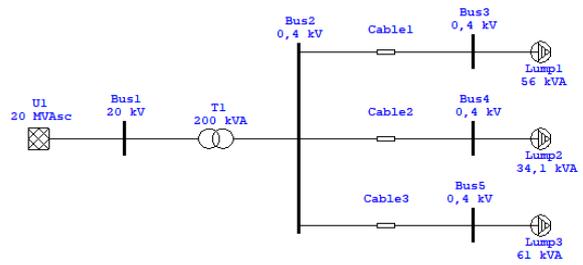
$$= 20995,9 \text{ W} \Rightarrow 20,9 \text{ kW}$$

G. Menghitung Rugi-Rugi Daya pada ETAP 12.6.0

Setelah menghitung besar rugi-rugi daya dan jatuh tegangan dalam keadaan beban tidak seimbang dan beban seimbang secara manual, maka selanjutnya adalah menghitung besar rugi-rugi daya menggunakan simulasi ETAP. Simulasi ini berguna untuk membantu perhitungan nilai rugi-rugi daya dengan cepat. Untuk melihat tingkat keakuratan simulasi, perlu membandingkan nilai yang telah diperoleh dari perhitungan manual dengan hasil simulasi. Agar simulasi yang dilakukan dapat berjalan, perlu dibuat *single line diagram* seperti pada gambar 7.

Gambar 7 dan gambar 8 merupakan *single line diagram* dan data hasil simulasi ETAP dalam keadaan beban tidak seimbang. Dari gambar 8 di atas, dapat dilihat bahwa besar rugi-rugi daya dalam keadaan beban tidak seimbang adalah 23,1 kW dengan jatuh tegangan sebesar 16,37 %.

Adapun *single line diagram* dan data hasil simulasi dalam keadaan beban seimbang dapat dilihat pada gambar 9 dan gambar 10.



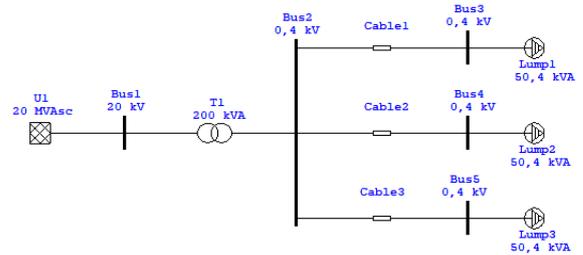
Gambar 7. *Single Line Diagram* dalam Keadaan Beban Tidak Seimbang

Project:	ETAP	Page:	1
Location:	12.6.0H	Date:	26-08-2021
Contract:		SN:	
Engineer:		Revision:	Base
Filename:	SimulasiRugi-RugiDaya	Study Case:	LF
		Config:	Normal

Branch Losses Summary Report

CKT / Branch	ID	From To Bus Flow		To From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vmag
		MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To	
T1		0.120	0.066	-0.118	-0.063	2.1	3.1	100.0	97.6	2.42
Cable1		0.044	0.023	-0.035	-0.022	8.2	1.1	97.6	82.5	15.11
Cable2		0.027	0.015	-0.024	-0.015	3.2	0.4	97.6	88.1	9.45
Cable3		0.047	0.025	-0.038	-0.023	9.6	1.3	97.6	81.2	16.37
						23.1	5.9			

Gambar 8. Data Hasil Simulasi dalam Keadaan Beban Tidak Seimbang



Gambar 9. *Single Line Diagram* dalam Keadaan Beban Seimbang

Project:	ETAP	Page:	1
Location:	12.6.0H	Date:	26-08-2021
Contract:		SN:	
Engineer:		Revision:	Base
Filename:	SimulasiRugi-RugiDaya	Study Case:	LF
		Config:	Normal

Branch Losses Summary Report

CKT / Branch	ID	From To Bus Flow		To From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vmag
		MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To	
T1		0.120	0.067	-0.118	-0.063	2.1	3.1	100.0	97.6	2.43
Cable1		0.039	0.021	-0.033	-0.020	6.7	0.9	97.6	83.9	13.69
Cable2		0.039	0.021	-0.033	-0.020	6.7	0.9	97.6	83.9	13.69
Cable3		0.039	0.021	-0.033	-0.020	6.7	0.9	97.6	83.9	13.69
						22.3	5.8			

Gambar 10. Data Hasil Simulasi dalam Keadaan Beban Seimbang

Gambar 10 merupakan hasil simulasi dalam keadaan beban seimbang. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa besar rugi-rugi daya dalam keadaan beban seimbang adalah 22,3 kW dengan jatuh tegangan sebesar 13,69%.

H. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengukuran pada Selasa, 09 Maret 2021 pukul 20:00 WITA, didapatkan hasil bahwa gardu GOT. AJ mengalami ketidakseimbangan beban. Pengukuran dilakukan saat WBP (Waktu Beban Puncak) dikarenakan karakteristik beban pelanggan GOT. AJ adalah beban rumah tangga. Seperti yang telah diketahui, bahwa persentase ketidakseimbangan beban pada transformator yang dapat ditoleransi adalah 20%. Sedangkan besar ketidakseimbangan beban pada gardu GOT. AJ adalah 21,3% dengan arus netral yang timbul akibat ketidakseimbangan beban sebesar 110 A.

Ketidakeimbangan beban membuat rugi-rugi daya akan semakin besar. Rugi-rugi daya yang dimaksud adalah rugi-rugi daya pada penghantar netral dan rugi-rugi daya pada penghantar fasa. Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan nilai rugi-rugi daya pada penghantar netral sebesar 7,24 kW dan rugi-rugi daya pada penghantar fasa sebesar 22,1 kW dengan jatuh tegangan sebesar 20,3%. Nilai rugi-rugi daya pada penghantar fasa berdasarkan hasil simulasi ETAP adalah 23,1 kW dengan jatuh tegangan sebesar 16,37%.

Adapun besar rugi-rugi daya pada penghantar netral berdasarkan hasil perhitungan dalam keadaan beban seimbang adalah 0 kW dan rugi-rugi daya pada penghantar fasa adalah 20,9 kW. Sedangkan besar rugi-rugi daya pada penghantar fasa berdasarkan hasil simulasi ETAP adalah 22,3 kW dengan jatuh tegangan sebesar 13,69%.

Dari hasil tersebut, dapat dilihat bahwa besar rugi-rugi daya dalam keadaan beban tidak seimbang dan keadaan beban seimbang mengalami penurunan. Selisih rugi-rugi daya antara beban tidak seimbang dengan beban seimbang adalah 1,2 kW untuk perhitungan manual dan 0,8 kW untuk simulasi ETAP. Hal ini membuktikan bahwa ketidakseimbangan beban dapat memperbesar nilai rugi-rugi daya. Perbedaan antara perhitungan manual dengan simulasi ETAP disebabkan karena pada aplikasi ETAP data-data yang dimasukkan lebih rinci. Untuk lebih jelasnya, perbandingan rugi-rugi daya berdasarkan hasil perhitungan dan hasil simulasi dalam keadaan beban tidak seimbang dan beban seimbang dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Perbandingan Rugi-Rugi Daya berdasarkan Hasil Perhitungan dan Hasil Simulasi dalam Keadaan Beban Tidak Seimbang dan Beban Seimbang

Kode Gardu	Alamat Lokasi Gardu	Rugi-rugi Daya (kW)					
		Beban Tidak Seimbang		Beban Seimbang		Selisih	
		Manual	ETAP 12.6	Manual	ETAP 12.6	Manual	ETAP 12.6
GOT. AJ	Jl. Matahari	22,1	23,1	20,9	22,3	1,2	0,8

V. KESIMPULAN

1. Besar rugi-rugi daya pada jaringan distribusi sekunder dalam keadaan beban tidak seimbang berdasarkan hasil perhitungan pada penghantar netral sebesar 7,24 kW dan rugi-rugi daya pada penghantar fasa sebesar 22,1 kW dengan jatuh

tegangan sebesar 20,3 %. Sedangkan rugi-rugi daya berdasarkan hasil simulasi ETAP adalah 23,1 kW dengan jatuh tegangan sebesar 16,37%.

2. Besar rugi-rugi daya pada jaringan distribusi sekunder dalam keadaan beban seimbang berdasarkan hasil perhitungan pada penghantar netral sebesar 0 kW dan rugi-rugi daya pada penghantar fasa 20,9 kW. Sedangkan rugi-rugi daya berdasarkan hasil simulasi ETAP adalah 22,3 kW dengan jatuh tegangan sebesar 13,69%.

REFERENSI

- [1] Badaruddin. 2012. Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon. Laporan Penelitian Internal. Jakarta: Universitas Mercu Buana.
- [2] Fatimah dkk. 2018. Analisis Drop Tegangan pada Jaringan Tegangan Menengah dengan Menggunakan Simulasi Program ETAP. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*.
- [3] IEEE Std 446-1995, IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications.
- [4] Kurnia, Uti. 2017. Sistem Tenaga Listrik. Politeknik Negeri Ketapang.
- [5] Latupeirissa, H. L. 2010. Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Daya pada Trafo Distribusi Gardu KP-01 Desa Hative Kecil. *Jurnal Simetrik*.
- [6] SPLN 64. 1985. Kriteria Desain Enjiniring Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. Perusahaan Listrik Negara.
- [7] SPLN 72. 1987. Spesifikasi Desain untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR). Perusahaan Listrik Negara.
- [8] Suhadi dkk. 2008. Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid I. Buku Ajar SMK. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- [9] Suhadi dkk. 2008. Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid III. Buku Ajar SMK. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- [10] PT. PLN (Persero). 2010. Buku 4 *Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. Jakarta.