

Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Rugi-Rugi Daya dan Penyeimbangannya Pada Transformator Distribusi di PT. PLN (Persero) Rayon Sedayu

Faizal Agung Kurniawan¹, Ramadoni Syahputra², Slamet Suropto³, Yudhi Ardiyanto⁴

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Jl. Brawijaya, Geblagan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta 55183

Email : faizalagung999@gmail.com

INTISARI

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, umumnya dikenal rugi-rugi teknis salah satunya susut daya. Susut daya disebabkan adanya pembebanan yang tidak seimbang terhadap transformator distribusi 3 phase. Hal ini dapat terjadi karena kebutuhan pelanggan yang berbeda dan pengkoneksian yang tidak seimbang pada fasa R, S dan T saat dilakukan kegiatan pasang baru dan tambah daya pada pelanggan. Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi menyebabkan arus mengalir ke penghantar netral sehingga terjadi panas berlebih yang menimbulkan rugi-rugi daya dan arus mengalir ke tanah. Dalam sistem 3 fasa 4 kawat yang diterapkan di Jawa Tengah dan D.I. Yogyakarta, arus netral mendekati 0 dianggap baik. Penyeimbangan beban trafo distribusi merupakan solusi untuk mengatasi beban tidak seimbang. Hasil dari penyeimbangan beban trafo pada 2 unit transformator distribusi diperoleh rata-rata penekanan rugi – rugi daya terhadap total daya yang tersalurkan ke pelanggan adalah 1.610,11 Watt untuk transformator 1503115 dan 250,27 Watt untuk transformator 1411671019.

Kata Kunci : Arus Netral, Penghematan Biaya, Penyeimbangan Beban, Susut Daya.

I. Pendahuluan

Tenaga listrik zaman sekarang tidak terbantahkan menjadi sumber energi pokok yang dibutuhkan manusia untuk turut mendukung perkembangan teknologi dan pertumbuhan pembangunan di segala bidang. Manusia akan bergantung pada tenaga listrik sebagai kebutuhan utama dalam membantu kebutuhan sehari-hari rumah tangga maupun pekerjaan industri. Oleh karena itu ketersediaan tenaga listrik harus dipertahankan kesinambungannya. Hal ini

menjadi tanggung jawab PT PLN (Persero) sebagai perusahaan penyedia listrik untuk memberi jaminan kualitas penyaluran energi listrik tersebut dan listrik dapat tersalurkan dari pembangkit menuju konsumen. Dalam sistem tenaga listrik terdapat masalah penyusutan energi atau rugi-rugi daya yang besar terjadi pada sistem distribusi. Penyusutan daya dapat terlihat dari daya pembebanan pelanggan yang optimal tidak sebesar dengan kapasitas daya transformatornya. Dalam pendistribusian

listrik, pada awalnya beban tiap-tiap fasa (fasa R, fasa S, dan fasa T) dibagi secara merata tetapi karena waktu pengoperasian beban-beban tersebut tidak serempak maka menimbulkan ketidakseimbangan beban yang berpengaruh pada penyediaan tenaga listrik. Ketidakseimbangan beban pada tiap-tiap fasa transformator (fasa R, fasa S, dan fasa T) inilah yang menyebabkan mengalirnya arus di netral dan tanah.

II. Landasan Teori

a. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan sebuah kesatuan interkoneksi komponen-komponen atau alat-alat listrik dengan sistem berskala besar berfungsi sebagai pusat terhubung sistem penyediaan tenaga listrik untuk menyalurkan listrik dari produsen menuju konsumen.

Terdapat tiga komponen utama pada sistem tenaga listrik (Whittaker, 2007):

- a. Pembangkitan
- b. Transmisi
- c. Distribusi

Definisi pembangkit adalah suatu bagian alat sistem yang dapat membangkitkan dan memproduksi tegangan listrik. Listrik dihasilkan oleh pembangkit dari berbagai sumber energi seperti PLTA, PLTN, PLTU, PLTS dan lain-lain. Berbagai macam cara untuk

listrik dapat dibangkitkan di dunia saat ini menggunakan *hidroelektrik*, nuklir, dan bahan bakar fosil. *Hidroelektrik* mengandalkan energi potensial kinetik dan air untuk menghasilkan energi listrik. Melihat kelangkaan bahan bakar fosil mendorong para ilmuwan untuk mencari alternatif sumber energi baru, yaitu biasa digunakan geothermal, air, dan angin. Pada prinsipnya cara kerja semua pembangkit listrik adalah sama, yaitu menggunakan sumber-sumber energi tersebut untuk memutar turbin yang akan menghasilkan listrik.

Transmisi tenaga listrik merupakan komponen vital dalam proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik menuju gardu distribusi dengan bahan konduktor agar dapat digunakan konsumen. Bahan konduktor paling umum digunakan sebagai penghantar yaitu baja, tembaga, aluminium dengan bahan yang dipilih memiliki karakteristik kekuatan fisik dan daya hantar yang baik serta biaya yang memadai. Faktor yang mempengaruhi besar kecilnya nilai resistansi penghantar dan kemampuan daya hantar dari konduktor berdasar pada perbedaan nilai luas penampang dan jenis inti material. Dengan penyaluran melalui transmisi digunakan jarak jauh dapat

mengalami rugi-rugi tenaga sehingga dari pusat pembangkit menuju ke pusat beban harus ditransmisikan dengan tegangan tinggi.

Distribusi merupakan bagian penghubung antara transmisi dengan konsumen dengan tujuan mendistribusikan energi listrik dengan menggunakan tegangan rendah. Proses distribusi dimulai dari PMT *outgoing* pada gardu induk 20 kV sampai alat penghitung dan pembatas (APP) di konsumen. Topologi dalam distribusi yang umum digunakan ring, radial, spindle ataupun mesh. Banyaknya komponen sistem tenaga listrik yang terpasang mengindikasikan meningkatnya penggunaan beban dengan semakin besarnya suatu kota maka jaringan yang terhubung akan meningkat.

b. Komponen Sistem Distribusi

1. Gardu Induk

Pada pendistribusian listrik, gardu induk merupakan sub satu kesatuan sistem penyaluran dengan menerima daya listrik transmisi dari pembangkitan untuk disalurkan menuju sistem distribusi. Klasifikasi tegangan yang diubah dari sistem transmisi pada gardu induk diantaranya tegangan ekstra tinggi ke

tegangan tinggi (500kV/150kV), tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah (150kV/70kV), dan tegangan tinggi ke tegangan menengah (150kV/20kV,70kV/20kV) dengan frekuensi tetap 50 Hz.

2. Jaringan Sistem Distribusi Primer

Jaringan Sistem Distribusi Primer merupakan saluran yang digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dimulai dari gardu induk hingga gardu distribusi. Jaringan ini menggunakan kabel udara, saluran udara ataupun kabel tanah disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan tingkatan keandalan sistem. Tegangan nominal yang digunakan dalam saluran distribusi primer ini sebesar 20 kV hasil penurunun transformator gardu induk 150 kV atau 70 kV. Pengguna listrik berdaya besar dapat langsung berlangganan dari saluran ini seperti industri, mall, hotel, dll.

3. Gardu Distribusi

Gardu Distribusi bagian dari tempat instalasi listrik dari suatu sistem distribusi berfungsi menghubungkan jaringan tegangan menengah (JTM) dengan jaringan tegangan rendah (JTR) untuk mendistribusikan tenaga listrik sesuai kebutuhan tegangan konsumen. Di dalam gardu distribusi terdapat alat alat listrik

pendukung seperti transformator distribusi, pemutus, pengaman, dan penghubung. Nilai tegangan system diubah dari 20 kV menjadi tegangan pemakaian pelanggan 380 V atau 220 V dengan kapasitas transformator yang

biasa digunakan adalah 160 KVA, 200 KVA, 400 KVA, 630 KVA, dan 1000 KVA lebih rendah dari gardu induk.

c. KWH Meter

Menurut pasurono (2013) kWh-meter merupakan suatu alat yang digunakan oleh pihak PLN untuk mengukur dan menghitung jumlah pemakaian energi listrik yang dikonsumsi oleh pelanggan (konsumen listrik). Menurut Pasurono (2013) konsumen listrik prabayar dapat langsung mengetahui presentase rata-rata penggunaan beban dengan 5 *sample* pelanggan.

$$\% \text{ Tiap pelanggan} = \frac{S_{\text{pelanggan}}}{S_{\text{daya kontrak}}} \times 100\%$$

$$\% \text{ rata-rata beban} = \frac{\% \text{pel1} + \% \text{pel2} + \% \text{pel3} + \% \text{pel4} + \% \text{pel5}}{5}$$

Keterangan :

$S_{\text{pelanggan}}$: Daya listrik digunakan pelanggan (VA)

$S_{\text{daya kontrak}}$: Daya kontrak listrik pelanggan (VA)

%pel: Presentase beban tiap pelanggan (%)

Hasil susut daya total dari rugi-rugi daya arus netral, arus yang mengalir menuju pembumian dan penghantar fasa dapat dihitung *Losses* dalam waktu WBP (4 jam/hari) dan LWBP (20 jam/hari) sesuai aturan PLN dengan rumusan berikut.

$$W = P \times t$$

$$\text{Kerugian tiap bulan} = W_{\text{loss}} \times 30 \times \text{harga produksi listrik}$$

Menurut detik finance pada artikelnya tanggal 28 maret 2017 harga produksi listrik PLN adalah Rp.983/kWh.

Keterangan :

W : Energi listrik (kWh)

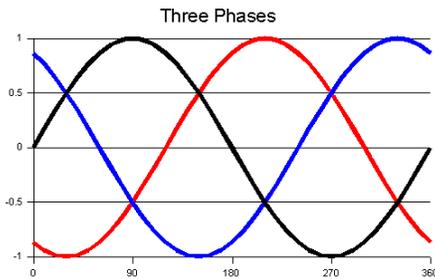
W_{loss} : Energi yang hilang saat WBP dan LWBP (kWh/hari)

P : Rugi-rugi daya (Watt)

t : Waktu (jam)

d. Sistem Tiga Phasa

Sistem 3 phasa adalah metode umum yang dipakai untuk menyalurkan tenaga listrik yang merupakan salah satu tipe dari sistem poliphasa (phasa Banyak). Pada sistem 3 phasa bisa menggunakan kawat netral maupun tanpa kawat netral atau lebih dikenal dengan istilah 3 phasa 4 kawat untuk yang menggunakan kawat netral dan 3 phasa 3 kawat yang tanpa kawat netral.



Gambar 1 Sistem 3 Fasa

e. Ketidakseimbangan Beban pada Sistem Distribusi Tegangan Rendah

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan di mana :

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

Menurut Tim cop distribusi (2009) untuk beban seimbang maka arus netral dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$I_N = I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S (\cos (\theta-120^\circ) + j \sin(\theta-120^\circ)) + I_T (\cos (\theta+120^\circ) + j \sin(\theta+120^\circ))$$

f. Arus Beban Penuh Transformator

Arus beban penuh transformator adalah kemampuan transformator untuk menghantarkan arus baik pada sisi primer dan sekundernya, besarnya arus beban penuh transformator tergantung dari kapasitas transformator tersebut.

Menurut Susongko, (2016) daya transformator apabila ditinjau dari sisi tegangan tinggi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$S = V.I$$

Keterangan :

S adalah daya transformator (kVA)

V adalah tegangan sisi primer trafo (kV)

I adalah arus jala-jala (A)

Sehingga menurut Rohit Mehta (2001) dan Susongko (2016) tegangan antara fasa dan netral disebut tegangan 1 fasa (V_{ph}) sementara tegangan antara 2 fasa disebut tegangan antar fasa/ 3 fasa (V_L) untuk menghitung arus beban penuh transformator (*full load*)

$$S = 3 \times V_{ph} \times I_{ph}$$

$$V_{ph} = V_L / \sqrt{3} ; I_{ph} = I_L$$

$$S = 3 \times \frac{V_L}{\sqrt{3}} \times I_L$$

$$S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L$$

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

Keterangan :

I_{FL} adalah arus beban penuh (A)

S adalah daya trafo (kVA)

V adalah tegangan sisi sekunder trafo (kV)

$$I_{Rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

Keterangan :

$I_{rata-rata}$ adalah arus ketiga fasa (A)

I_R adalah arus fasa R (A)

I_S adalah arus fasa S (A)

I_T adalah arus fasa T (A)

g. Persentase Pembebanan Setiap Phase

Persentase pembebanan transformator sangat berhubungan dengan besarnya nilai pembebanan transformator, didaerah pedesaan pembebanan transformator relatif kecil.

$$\% r = \frac{I_R}{I_{fl}} \times 100\%$$

$$\% s = \frac{I_S}{I_{fl}} \times 100\%$$

$$\% t = \frac{I_T}{I_{fl}} \times 100\%$$

Selanjutnya dapat dicari presentase rata-rata pembebanan transformator dengan menggunakan persamaan :

$$\% x = \frac{\% r + \% s + \% t}{3}$$

Keterangan :

$\% r$ = presentase pembebanan phase R

$\% s$ = presentase pembebanan phase S

$\% t$ = presentase pembebanan phase T

$\% x$ = presentase pembebanan rata-rata transformator (%)

I_r = arus phase R (A)

I_s = arus phase S (A)

I_t = arus phase T (A)

I_{fl} = Arus beban penuh (A)

h. Persentase Ketidakseimbangan Beban

Koefisien a, b, dan c dapat diketahui besarnya, dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang sama dengan besarnya arus rata-rata (I_{rata}) dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$I_R = a. I_{rata-rata} \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}}$$

$$I_S = b. I_{rata-rata} \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}}$$

$$I_T = c. I_{rata-rata} \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}}$$

i. Rugi-rugi Daya pada Jaringan Distribusi Tegangan Rendah

Rugi-rugi daya merupakan besarnya daya yang hilang pada suatu jaringan. Besarnya rugi-rugi daya satu fasa dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\Delta P = I^2 R$$

Akibat pembebanan di tiap – tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran pentanahan netral terdapat nilai tahanan dan dialiri arus, maka kawat netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada trafo tidak seimbang.

Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral sebesar

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

P_N = rugi – rugi yang timbul pada penghantar netral (watt)

I_N = arus yang mengalir melalui kawat netral (A)

R_N = tahanan pada kawat netral (Ω)

Rugi – rugi ini terjadi karena adanya arus netral yang mengalir ke tanah. Besarnya dapat dirumuskan sebagai berikut :

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

P_G = rugi – rugi akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

I_G = arus netral yang mengalir ke tanah (A)

R_G = tahanan pembumian netral trafo (Ω)

Setiap fasa pada transformator distribusi 3 phase memiliki nilai pembebanan yang berbeda sehingga rugi-rugi daya yang dihasilkan akan berbeda. Besar rugi-rugi daya setiap fasa antara R, S, dan T dapat dirumuskan sebagai berikut :

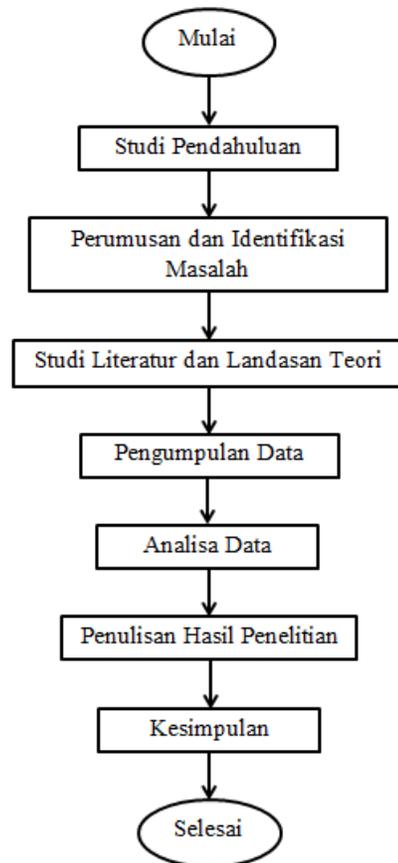
$$P_{R\ Sal} = I_R^2 \times R_R$$

$$P_{S\ Sal} = I_S^2 \times R_S$$

$$P_{T\ Sal} = I_T^2 \times R_T$$

III. Metode Penelitian

Proses pengumpulan data dilakukan dengan wawancara pada pihak yang ahli dan data laporan riil PT. PLN Rayon Sedayu hasil pengukuran petugas/vendor yang bekerja sama



Data yang dibutuhkan dalam proses pengumpulan data meliputi spesifikasi transformator yang digunakan, konfigurasi jaringan distribusi tegangan rendah antar tiang dan sambungan rumah, arus *phase* R S dan T serta netral, tegangan *phase to netral*,

$\cos \Theta$ setiap *phase*, panjang jaringan pelayanan transformator dan data KWH meter pelanggan.

IV. Hasil Penelitian dan Pembahasan

a. Data Pembebanan

Tabel 1 Data pembebanan transformator
1503115

Laporan hasil pengukuran pada malam hari (WBP)			
Fasa	I (A)	V _{F-N} (V)	Cos ϕ
R	69,2	233	0,954
S	117	233	0,901
R	147	230	0,912
I _N	57,3 A		
I _G	6,21 A		
R _G	2,4		

Tabel 2 Data pembebanan transformator
1411671019

Laporan hasil pengukuran pada malam hari (WBP)			
Fasa	I (A)	V _{F-N} (V)	Cos ϕ
R	134,7	218	0,87
S	110,5	223	0,942
R	124,1	222	0,914
I _N	27,5 A		
I _G	4,5 A		
R _G	1,38 Ω		

b. Jaringan Tegangan Rendah (JTR) Transformator

1. Jenis Penghantar

Jaringan pelayanan kedua transformator distribusi 3 phase yang digunakan sebagai penelitian semuanya menggunakan saluran udara tegangan rendah (SUTR) dengan jenis penghantar NFA2X-T / LVTC (Low Voltage Twisted Cable) dengan luas penampang 70 mm² untuk penghantar phase dan 50 mm² untuk penghantar netral. Kapasitas maksimum kuat hantar arus penghantar *phase* berdiameter 70 mm² pada suhu 35 °C yaitu 196 A per *phase* dengan resistansi kabel 0,433 Ω / km dan penghantar netral berdiameter 50 mm² memiliki resistansi 0,690 Ω / km pada suhu 20 °C sesuai dengan karakteristik listrik dari NFA2X-T menurut SPLN 42 – 10 : 1993.

2. Panjang Penghantar

Pengukuran panjang penghantar jaringan pelayanan transformator distribusi dilakukan dengan mengukur jarak antara transformator dengan tiang terakhir (dead end/end pole) menggunakan roll meter.

Tabel 3 Jaringan Pelayanan
Transformator 1503115

Jalur	No. Tiang	Panjang
Line A	1-2	46 meter
	2-3	47 meter
	3-4	43 meter
	4-5	40 meter
	5-6	43 meter
	6-7	43 meter
	7-8	44 meter
	8-9	47 meter
	9-10	45 meter
	10-11	44 meter
Total	11 Tiang	442 meter
Line B	1-2	43 meter
	2-3	44 meter
	3-4	47 meter
	4-5	45 meter
	5-6	44 meter
	6-7	45 meter
	7-8	44 meter
Total	8 Tiang	312 meter
Total Panjang Jaringan Pelayanan Line A dan B = 754 meter		

Jadi untuk panjang penghantar totalnya adalah

$$L = 1 \times 1,03 = 754 \times 1,03 = 776 \text{ m}$$

Tabel 4 Jaringan Pelayanan
Transformator 1411671019

Jalur	No. Tiang	Panjang
Line A	1-2	43 meter
	2-3	45 meter
	3-4	48 meter
	4-5	47 meter
	5-6	48 meter
	6-7	41 meter
	7-8	42 meter
	8-9	42 meter
	Total	9 Tiang
Line B	1-2	45 meter
	2-3	47 meter
	3-4	47 meter
	4-5	46 meter
	5-6	43 meter
	6-7	46 meter
	7-8	44 meter
	8-9	49 meter

	9-10	45 meter
	10-11	43 meter
	11-12	46 meter
Total	12 Tiang	501 meter
Total Panjang Jaringan Pelayanan Line A dan B = 857 meter		

Jadi untuk panjang penghantar totalnya adalah

$$L = 1 \times 1,03 = 857 \times 1,03 = 882 \text{ m}$$

Dengan :

L = Total panjang jaringan dengan andongan

1 = Total panjang jaringan pelayanan jurusan

c. Analisis Pembebanan Transformator

1. Transformator 1503115

Daya pengenal (S) = 160 kVA

Tegangan pengenal (V) = 400 V

Besar arus beban penuh setiap fasa transformator 1503115 adalah

$$\begin{aligned} I_{FL} &= \frac{S}{V \sqrt{3}} \\ &= \frac{160000 \text{ VA}}{400 \sqrt{3}} \\ &= 230,94 \text{ A} \end{aligned}$$

Presentase pembebanan tiap phase-nya adalah

$$I_R = 69,2 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \% r &= \frac{I_R}{I_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{69,2 \text{ A}}{230,94 \text{ A}} \times 100\% \\ &= 29,9\% \end{aligned}$$

$$I_S = 117 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \% s &= \frac{I_S}{I_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{117 \text{ A}}{230,94 \text{ A}} \times 100\% \\ &= 50,5\% \end{aligned}$$

$$I_T = 147 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \% t &= \frac{I_T}{I_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{147 \text{ A}}{230,94 \text{ A}} \times 100\% \\ &= 63,6\% \end{aligned}$$

maka presentase pembebanan rata-rata pada transformator 1503115 adalah :

$$\begin{aligned} \% x &= \frac{\% r + \% s + \% t}{3} \\ &= \frac{\% 29,9 + \% 50,5 + \% 63,6}{3} \\ &= 48\% \end{aligned}$$

Maka pada kondisi Waktu Beban Puncak (WBP) nilai total dari beban yang terpakai pada transformator 1503115 adalah

$$\begin{aligned} S &= \% x \cdot \text{daya pengenal transformator} \\ &= 48\% \times 160 \text{ kVA} \\ &= 77 \text{ kVA} \end{aligned}$$

2. Transformator 1411671019

Daya pengenal (S) = 200 kVA

Tegangan pengenal (V) = 400 V

Besar arus beban penuh
setiap fasa transformator
1411671019 adalah

$$\begin{aligned} I_{FL} &= \frac{S}{V \sqrt{3}} \\ &= \frac{200000 \text{ VA}}{400 \sqrt{3}} \\ &= 288,67 \text{ A} \end{aligned}$$

Presentase pembebanan tiap
phase-nya adalah :

$$\begin{aligned} I_R &= 134,7 \text{ A} \\ \% r &= \frac{I_R}{I_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{134,7 \text{ A}}{288,67 \text{ A}} \times 100\% \\ &= 46\% \\ I_S &= 110,5 \text{ A} \\ \% s &= \frac{I_S}{I_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{110,5 \text{ A}}{288,67 \text{ A}} \times 100\% \\ &= 38\% \\ I_T &= 124,1 \text{ A} \\ \% t &= \frac{I_T}{I_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{124,1 \text{ A}}{288,67 \text{ A}} \times 100\% \\ &= 43\% \end{aligned}$$

Dengan menggunakan
persamaan 2.19, maka presentase

pembebanan rata-rata pada
transformator 1411671019 adalah :

$$\begin{aligned} \% x &= \frac{\% r + \% s + \% t}{3} \\ &= \frac{\% 46 + \% 38 + \% 43}{3} \\ &= 42,3\% \end{aligned}$$

Maka pada kondisi Waktu
Beban Puncak (WBP) nilai total dari
beban yang terpakai pada transformator
1411671019 adalah

$$\begin{aligned} S &= \% x \cdot \text{daya pengenal transformator} \\ &= 42,3\% \times 200 \text{ kVA} \\ &= 84,6 \text{ kVA} \end{aligned}$$

d. Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator

1. Transformator 1503115

Untuk mencari nilai koefisien
ketidakseimbangan masing-masing
phase pada transformator 1503115,
terlebih dahulu dicari besar arus beban
rata-rata pada kondisi seimbang

$$\begin{aligned} I_{\text{Rata-rata}} &= \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \\ &= \frac{69,2 + 117 + 147}{3} \\ &= 111,06 \text{ A} \end{aligned}$$

Nilai koefisien ketidakseimbangan beban pada masing-masing phase transformator 1503115 adalah sebagai berikut :

$$a = \frac{IR}{I_{rata-rata}} = \frac{69,2}{111,06} = 0,62$$

$$b = \frac{IS}{I_{rata-rata}} = \frac{117}{111,06} = 1,05$$

$$c = \frac{IT}{I_{rata-rata}} = \frac{147}{111,06} = 1,32$$

Pada keadaan beban seimbang, koefisien dari a, b, dan c adalah bernilai 1, presentase ketidakseimbangan beban pada transformator 1503115 adalah

$$\begin{aligned} \% k &= \frac{(|a-1|)+(|b-1|)+(|c-1|)}{3} \times 100\% \\ &= \frac{(|0,62-1|)+(|1,05-1|)+(|1,32-1|)}{3} \times 100\% \\ &= \frac{0,38+0,05+0,32}{3} \times 100\% \\ &= 25\% \end{aligned}$$

2. Transformator 1411671019

Untuk mencari nilai koefisien ketidakseimbangan masing-masing phase pada transformator 1411671019, terlebih dahulu dicari besar arus beban rata-rata pada kondisi seimbang

$$\begin{aligned} I_{Rata-rata} &= \frac{IR + IS + IT}{3} \\ &= \frac{134,7 + 110,5 + 124,1}{3} \\ &= 123,1 \text{ A} \end{aligned}$$

Nilai koefisien ketidakseimbangan beban pada masing-masing phase transformator 1411671019 adalah sebagai berikut :

$$a = \frac{IR}{I_{rata-rata}} = \frac{134,7}{123,1} = 1,1$$

$$b = \frac{IS}{I_{rata-rata}} = \frac{110,5}{123,1} = 0,89$$

$$c = \frac{IT}{I_{rata-rata}} = \frac{124,1}{123,1} = 1,01$$

Pada keadaan beban seimbang, koefisien dari a, b, dan c adalah bernilai 1, presentase ketidakseimbangan beban pada transformator 1411671019 adalah

$$\begin{aligned} \% k &= \frac{(|a-1|)+(|b-1|)+(|c-1|)}{3} \times 100\% \\ &= \frac{(|1,1-1|)+(|0,89-1|)+(|1,01-1|)}{3} \times 100\% \\ &= \frac{0,1+0,11+0,01}{3} \times 100\% \\ &= 7,3\% \end{aligned}$$

e. Perhitungan Arus Netral

1. Transformator 1503115

$$\begin{aligned} I_N &= I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S (\cos(\theta-120^\circ) + j \sin(\theta-120^\circ)) + I_T (\cos(\theta+120^\circ) + j \sin(\theta+120^\circ)) \\ &= 69,2 \text{ A} (\cos 17,43^\circ + j \sin 17,43^\circ) + 117 \text{ A} (\cos -94,36^\circ + j \sin -94,36^\circ) + 147 \text{ A} (\cos 144,11^\circ + j \sin 144,11^\circ) \\ &= (-61,94 + -j 9,75) \text{ A} \end{aligned}$$

Dari bilangan kompleks diatas didapatkan hasil untuk nilai arus netral dan arah sudutnya sebagai berikut :

$$I_N = \sqrt{(-61,94)^2 + (-9,75)^2} \text{ A}$$

$$= 62,7 \text{ A}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-61,94}{-9,75} = 81,06^\circ$$

2. Transformator 1411671019

$$I_N = I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S (\cos(\theta - 120^\circ) + j \sin(\theta - 120^\circ)) + I_T (\cos(\theta + 120^\circ) + j \sin(\theta + 120^\circ))$$

$$= 134,7 \text{ A} (\cos 29,52^\circ + j \sin 29,52^\circ) + 110,5 \text{ A} (\cos -100,53^\circ + j \sin -100,53^\circ) + 124,1 \text{ A} (\cos 143,87^\circ + j \sin 143,87^\circ)$$

$$= (-3,21 + j30,8) \text{ A}$$

Dari bilangan kompleks diatas didapatkan hasil untuk nilai arus netral dan arah sudutnya sebagai berikut :

$$I_N = \sqrt{(-3,21)^2 + 30,8^2} \text{ A}$$

$$= 31,06 \text{ A}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{30,8}{-3,21} = -84,15^\circ$$

f. Perhitungan Susut Daya Akibat Arus Netral Pada Penghantar Netral Transformator

1. Transformator 1503115

Penghantar netral transformator 1503115 adalah penghantar dengan jenis

NFA2X-T dengan diameter penghantar adalah 50 mm². Berdasarkan tabel 4.5 penghantar transformator 1503115 memiliki spesifikasi resistansi 0,690 Ω/km, maka dengan panjang total 776 m nilai resistansinya adalah

$$R_N = r_{\text{kabel}} \times L$$

$$= 0,690 \text{ } \Omega/\text{km} \times 0,776 \text{ km}$$

$$= 0,53 \text{ } \Omega$$

Sesuai dengan tabel nilai arus netral yang mengalir pada transformator 1503115 adalah sebesar 57,3 A. Didapat nilai susut daya pada penghantar netral adalah

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

$$= (57,3 \text{ A})^2 \times 0,53 \text{ } \Omega$$

$$= 1.740,14 \text{ Watt}$$

2. Transformator 1411671019

Penghantar netral transformator 1411671019 adalah penghantar dengan jenis NFA2X-T dengan diameter penghantar adalah 50 mm². Berdasarkan tabel 4.5 penghantar transformator 1411671019 memiliki spesifikasi resistansi 0,690 Ω/km, maka dengan panjang total 882 m nilai resistansinya adalah

$$R_N = r_{\text{kabel}} \times L$$

$$= 0,690 \Omega/\text{km} \times 0,882 \text{ km}$$

$$= 0,61 \Omega$$

Sesuai dengan tabel nilai arus netral yang mengalir pada transformator 1503115 adalah sebesar 57,3 A. Didapat nilai susut daya pada penghantar netral adalah

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

$$= (27,5 \text{ A})^2 \times 0,61 \Omega$$

$$= 461,31 \text{ Watt}$$

g. Perhitungan Susut Daya Akibat Arus Yang Mengalir ke Tanah

1. Transformator 1503115

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

$$= (6,21 \text{ A})^2 \times 2,4 \Omega$$

$$= 92,553 \text{ Watt}$$

2. Transformator 1411671019

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

$$= (4,5 \text{ A})^2 \times 1,38 \Omega$$

$$= 27,945 \text{ Watt}$$

h. Perhitungan Susut Daya Penghantar Fasa

1. Transformator 1503115

Dengan panjang total 776 m nilai resistansinya adalah

$$R_{\text{Fasa}} = r_{\text{kabel}} \times L$$

$$R_{\text{Fasa}} = 0,433 \times 0,776 = 0,336 \Omega$$

Besar nilai susut daya penghantar fasa adalah

$$P_{R \text{ Sal}} = I_R^2 \times R_R$$

$$= (69,2)^2 \text{ A} \times 0,336 \Omega$$

$$= 1.608,9 \text{ W}$$

$$P_{S \text{ Sal}} = I_S^2 \times R_S$$

$$= (117)^2 \text{ A} \times 0,336 \Omega$$

$$= 4.599,5 \text{ W}$$

$$P_{T \text{ Sal}} = I_T^2 \times R_T$$

$$= (147)^2 \text{ A} \times 0,336 \Omega$$

$$= 7.260,6 \text{ W}$$

Sehingga total susut daya di penghantar fasa R, S dan T pada transformator 1503115

$$P_{\text{Sal total}} = P_{R \text{ Sal}} + P_{S \text{ Sal}} + P_{T \text{ Sal}}$$

$$= 1.608,9 \text{ W} + 4.599,5 \text{ W} + 7.260,6 \text{ W}$$

$$= 13.469 \text{ W}$$

2. Transformator 1411671019

Dengan panjang total 882 m nilai resistansinya adalah

$$R_{\text{Fasa}} = r_{\text{kabel}} \times L$$

$$R_{\text{Fasa}} = 0,433 \times 0,882$$

$$= 0,38 \Omega$$

Besar nilai susut daya penghantar fasa adalah

$$\begin{aligned}P_{R \text{ Sal}} &= I_R^2 \times R_R \\ &= (134,7)^2 \text{ A} \times 0,38 \Omega \\ &= 6.894,7 \text{ W}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{S \text{ Sal}} &= I_S^2 \times R_S \\ &= (110,5)^2 \text{ A} \times 0,38 \Omega \\ &= 4.639,8 \text{ W}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{T \text{ Sal}} &= I_T^2 \times R_T \\ &= (124,1)^2 \text{ A} \times 0,38 \Omega \\ &= 5.852,3 \text{ W}\end{aligned}$$

Sehingga total susut daya di penghantar fasa R, S dan T pada transformator 1411671019

$$\begin{aligned}P_{\text{Sal total}} &= P_{R \text{ Sal}} + P_{S \text{ Sal}} + P_{T \text{ Sal}} \\ &= 6894,7 \text{ W} + 4639,8 \text{ W} + \\ &\quad 5852,3 \text{ W} \\ &= 17.386,1 \text{ W}\end{aligned}$$

i. Energi yang Hilang dan Kerugian Finansial pada Jaringan Tegangan Rendah Beban Tidak Seimbang

1. Transformator 1503115

a. Beban tidak seimbang waktu malam hari (WBP) :

$$\begin{aligned}W &= P \times t \\ &= 15.301,693 \text{ Watt} \times 1 \text{ jam} \\ &= 15,301693 \text{ kWh}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Susut daya selama WBP} &= 15,301693 \\ \text{kWh} \times 4 \text{ jam} &= 61,206 \text{ kWh}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Kerugian finansial/bulan} \\ &= \text{Energi yang hilang} \times 30 \text{ hari} \times \text{harga} \\ &\quad \text{produksi listrik} \\ &= 61,206 \text{ kWh} \times 30 \times \text{Rp } 983,00 \\ &= \text{Rp } 1.804.964,00/\text{bulan}\end{aligned}$$

b. Beban tidak seimbang waktu siang hari (LWBP) :

$$\begin{aligned}W &= P \times t \\ &= 15.301,693 \text{ Watt} \times 1 \text{ jam} \\ &= 15.301,693 \text{ Wh} \\ &= 15,301693 \text{ kWh} \times 36\% \\ &= 5,5086 \text{ kWh}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Susut daya selama WBP} &= 5,5086 \text{ kWh} \\ \times 20 \text{ jam} &= 110,172 \text{ kWh}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Kerugian finansial/bulan} \\ &= \text{Energi yang hilang} \times 30 \text{ hari} \times \text{harga} \\ &\quad \text{produksi listrik} \\ &= 110,172 \text{ kWh} \times 30 \times \text{Rp } 983,00 \\ &= \text{Rp } 3.248.972,00/\text{bulan}\end{aligned}$$

Maka jumlah total kerugian finansial selama 1 bulan pada waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak transformator 1503115 adalah

Total kerugian finansial/bulan
 = Kerugian finansial WBP + LWBP
 = Rp 1.804.964,00 + Rp 3.248.972,00
 = Rp 5.053.936,00

2. Transformator 1411671019

Dengan rumus yang sama jumlah total kerugian finansial selama 1 bulan pada waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak transformator 1411671019 adalah

Total kerugian finansial/bulan
 = Kerugian finansial WBP + LWBP
 = Rp 2.108.564,00+ Rp 3.789.523,00
 = Rp 5.898.087,00

j. Penyeimbangan Beban Pelanggan

Tabel 4.1 Sampel Penggunaan Beban Pelanggan

No.	V _{pel}	I _{pel}	S = V _x I	P Kontrak
1.	223 V	3,4 A	758 VA	1300 VA
2.	221 V	2,4 A	530 VA	900 VA
3.	216 V	2,2 A	475 VA	900 VA
4.	217 V	1,6 A	347 VA	450 VA
5.	219 V	6,1 A	1335 VA	2200 VA

Jadi rata-rata presentase penggunaan beban yang dapat digunakan sebagai acuan pemindahan beban

%Presentase rata-rata beban
 = $\frac{\%pel1 + \%pel2 + \%pel3 + \%pel4 + \%pel5}{5}$

$$= \frac{58\% + 59\% + 52\% + 77\% + 61\%}{5}$$

= 60% daya kontrak

1. Transformator 1503115

Untuk meminimalisir rugi-rugi daya, masing – masing phase harus diatur agar memiliki arus beban mendekati 111 Ampere. Sehingga :

- a. untuk I_R, I_R – I = 69,2 A – 111 A
 = -41,8 A (ditambah 41,8)
- b. untuk I_S, I_S – I = 117 A – 111 A
 = 6 A (dikurangi 6)
- c. untuk I_T, I_T – I = 147 A – 111 A
 = 36 A (dikurangi 36)

Sedangkan untuk susut daya di penghantar netral adalah

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

$$= (14,6 \text{ A})^2 \times 0,61 \Omega$$

$$= 130,03 \text{ Watt}$$

Berdasarkan hasil perhitungan susut daya arus netral pada transformator 1503115 dan mengasumsikan nilai susut daya arus mengalir ke tanah dan saluran fasa tetap, maka total susut daya yang dihasilkan adalah

$$P_{Total} = P_N \times P_G + P_{Saluran Fasa}$$

$$= 130,03 \text{ Watt} + 92,553 \text{ Watt} + 13.469 \text{ Watt}$$

$$= 13.691,583 \text{ Watt}$$

2. Transformator 1411671019

Untuk meminimalisir rugi-rugi daya, masing – masing phase harus diatur agar memiliki arus beban mendekati 123 Ampere. Sehingga :

- a. untuk I_R , $I_R - I = 134,7 \text{ A} - 123 \text{ A} = 11,7 \text{ A}$ (dikurangi 11,7)
- b. untuk I_S , $I_S - I = 110,5 \text{ A} - 123 \text{ A} = -12,5 \text{ A}$ (ditambah 12,5)
- c. untuk I_T , $I_T - I = 124,1 \text{ A} - 123 \text{ A} = 1,1 \text{ A}$ (dikurangi 1,1)

Sedangkan untuk susut daya di penghantar netral adalah

$$\begin{aligned} P_N &= I_N^2 \times R_N \\ &= (18,6 \text{ A})^2 \times 0,61 \Omega \\ &= 211,04 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan susut daya arus netral pada transformator 1411671019 dan mengasumsikan nilai susut daya arus mengalir ke tanah dan saluran fasa tetap, maka total susut daya yang dihasilkan adalah

$$\begin{aligned} P_{\text{Total}} &= P_N \times P_G + P_{\text{Saluran Fasa}} \\ &= 211,04 \text{ Watt} + 27,945 \text{ Watt} + \\ &\quad 17.386,1 \text{ Watt} \\ &= 17.625,085 \text{ Watt} \end{aligned}$$

k. Penghematan Biaya Sesudah Penyeimbangan Beban

Sesuai hasil perhitungan susut daya penghantar netral sebelum dan sesudah penyeimbangan dengan asumsi nilai susut daya arus mengalir ke tanah dan saluran fasa tetap sehingga susut daya arus netral sebagai pembanding maka penghematan biaya yang dapat dilakukan selama sebulan dan setahun dalam perhitungan sebagai berikut

1. Transformator 1503115

$$\begin{aligned} H_{\text{bulan}} &= \text{Total kerugian finansial/bulan} \\ &\quad \text{sebelum penyeimbangan} - \\ &\quad \text{Total kerugian finansial/bulan} \\ &\quad \text{setelah penyeimbangan} \\ &= \text{Rp } 5.053.936,00 - \text{Rp } \\ &\quad 4.522.114,00 \\ &= \text{Rp } 531.822,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{\text{tahun}} &= \% H_{\text{bulan}} \times 12 \text{ Bulan} \\ &= \text{Rp } 531.822,00 \times 12 \text{ Bulan} \\ &= \text{Rp } 6.381.864,00 \end{aligned}$$

2. Transformator 1411671019

$$\begin{aligned} H_{\text{bulan}} &= \text{Total kerugian finansial/bulan} \\ &\quad \text{sebelum penyeimbangan} - \\ &\quad \text{Total kerugian finansial/bulan} \\ &\quad \text{setelah penyeimbangan} \\ &= \text{Rp } 5.898.087,00 - \text{Rp } \\ &\quad 5.821.326,00 \\ &= \text{Rp } 76.761,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{\text{tahun}} &= \% H_{\text{bulan}} \times 12 \text{ Bulan} \\
 &= \text{Rp } 76.761,00 \times 12 \text{ Bulan} \\
 &= \text{Rp } 921.132,00
 \end{aligned}$$

V. Penutup

a. Kesimpulan

Berdasarkan kegiatan penelitian Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Ketidaseimbangan Beban Terhadap Rugi-Rugi Daya dan Penyeimbangannya pada Transformator Distribusi di PT. PLN (Persero) Rayon Sedayu” dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Nilai persentase ketidakseimbangan beban pada transformator 1503115 sebesar 25% dengan susut daya akibat arus netral 1.740,14 Watt, arus yang mengalir ke tanah 92,553 Watt dan arus penghantar fasa 13.469 Watt sehingga memiliki susut daya total 15.301,693 Watt sementara pada transformator 1411671019 persentase ketidakseimbangan beban lebih kecil yaitu 7,3% dengan susut daya akibat arus netral 461,31 Watt, arus yang mengalir ke tanah 27,945 Watt dan arus penghantar fasa 17.386,1 Watt sehingga memiliki susut daya total 17.875,355 Watt.
2. Dalam perhitungan arus netral secara manual sebelum penyeimbangan didapatkan hasil 62,7 A pada transformator 1503115 dan 31,06 A pada transformator 1411671019. Penurunan arus netral terjadi setelah dilakukan penyeimbangan beban dengan secara perhitungan manual dimana hasilnya arus netral transformator 1503115 menjadi 14,6 A dan arus netral transformator 1411671019 menjadi 18,6 A.
3. Cara meminimalisir nilai susut daya akibat arus netral yang disebabkan oleh beban yang tidak seimbang pada 2 unit transformator 3 *phase*, dilakukan penyeimbangan beban dengan cara memindahkan sambungan rumah atau beban pelanggan dari fasa dengan arus pelanggan yang besar ke fasa dengan arus pelanggan yang kecil dengan hasil ketentuan berikut :
 - a. Transformator 1503115
Memindahkan dua pelanggan daya kontrak 900 VA dan satu pelanggan daya kontrak 450 VA dari *phase* S ke *phase* R serta dua pelanggan daya kontrak 900 VA dan satu pelanggan daya kontrak 450 VA dari *phase* T ke *phase* R.

b. Transformator 1411671019

Lima pelanggan daya kontrak 900 VA *phase* R ke *phase* S dan satu pelanggan daya kontrak 450 VA dari *phase* T ke *phase* S.

b. Saran

Selama melaksanakan penyusunan tugas akhir di PT. PLN (Persero) Rayon Sedayu, penulis memiliki beberapa saran mengenai pembebanan pada transformator 3 *phase* yang bias menjadi referensi dan masukan bagi perusahaan untuk bisa menjadi lebih baik, diantaranya :

1. Dalam kegiatan pemasangan baru dan tambah daya kontrak pada pelanggan baru, petugas harus terorganisir dan lebih memperhatikan besar arus beban masing-masing *phase* R, S, T pada transformator sehingga tidak terjadi ketimpangan beban antar *phase*. Hal ini dimaksudkan untuk meminimalisir susut daya karena arus netral dan arus mengalir ke tanah yang disebabkan ketidakseimbangan.
2. Pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) sebaiknya dilengkapi dengan tanda identifikasi kabel yang terdiri dari asal transformator distribusi, jurusan dan fasa yang digunakan.

3. Dilakukan pengecekan arus beban transformator 3 *phase* secara berkala untu mencegah adanya *overload* dan ketidakseimbangan beban sehingga bila terjadi keadaan tersebut dapat segera ditindaklanjuti dengan perbaikan dan penyeimbangan beban.

Daftar Pustaka

- D. McDonald, John.,Wojszczyk, Bartosz., Flynn, Byron. (2013).”*Distribution Systems, Substations, and Integration of Distributed Generation*”. New York: GE Energy.
- Hakim, Haris. (2012).”*Studi Susut Energi pada Saluran Distribusi dengan Variasi Beban Pelanggan Bisnis*. Depok: Universitas Indonesia.
- Kadir, Abdul. (2000).”*Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*”. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Kawahin, Aprilian., Tuegeh, Maickel., S.Patras, Lily. (2013).”*Pemerataan Beban Transformaor pada Saluran Distribusi Sekunder*”. E-Journal Teknik Elektro dan Komputer. Fakultas Teknik Universtas Sam Ratulangi.

Mehta, V. K., & Mehta, R. (2001). "Basic Electrical Engineering". New Delhi: S.Chand & Company LTD.

Jurnal Ilmiah Semesta Teknik, Vol 17, No. 2.

Nugroho Prianto, Pandu. (2012). "*Studi Susut Energi pada Jaringan Tegangan Rendah Wilayah PLN Area Pelayanan Jaringan Cempaka Putih dengan Objek Pelanggan Residensial*". Depok: Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Simamora, Yoakim., S.M.L Tobing, Panusur. (2014). "*Analisis ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Untuk Identifikasi Beban Lebih dan Estimasi Rugi-Rugi pada Jaringan Tegangan Rendah*". Medan: Fakultas Teknik Universitas Sumatra Utara.

Susongko, 2016. "*Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Jaringan Distribusi Sekunder Gardu Distribusi DS 0587 di PT.PLN (Persero) Distribusi Bali Rayon Denpasar*" E-Journal SPEKTRUM Vol. 3, No. 2

Syahputra, Ramadoni. (2014). "*Estimasi Lokasi Gangguan Hubung Singkat pada Saluran Tenaga Listrik*".

