

Efektivitas Mutasi Transformator Dalam Mengatasi Fluktuasi Beban Pada Trafo Distribusi ULP Bululawang

Harrij Mukti Kristiana^{*a)}, Rachmat Sutjipto^{a)}, Vidiasih^{b)}

(Received 19 Mei 2024 || Revised 14 Juni 2022 || Accepted 21 Juni 2024)

Abstract: Transformer is a very important component in the distribution of electricity from the distribution substation to consumers. Overloading and underloading of transformers can lead to significant inefficiencies and increased losses in the electrical distribution system. Based on data measurement of the ULP Bululawang transformer in 2022, it was found that the C0177 transformer (100 KVA) was overloaded (88.4%) and the C0254 transformer (160 KVA) was underloaded (21.4%). Load forecasting for 2027 predicts that the C0177 transformer load will reach 107%, causing overheating, while the C0254 transformer will remain underloaded at 23.68%. To address these issues, a transformer mutation was proposed. This study aims to evaluate the effectiveness of transformer mutation in redistributing loads and improving efficiency. The method involved measuring transformer loads before and after mutation and using the Least Square method for load forecasting. Post-mutation measurements showed the C0177 transformer load reduced to 62.6% and the C0254 transformer load increased to 37%. These results indicate that the transformer mutation significantly balanced the load distribution. The study also adjusted the protection settings, including FCO, output cable, main switch, PHB-TR, and NH Fuse output cable. The findings suggest that transformer mutation can effectively address load imbalances, improve operational efficiency, and reduce power losses in the distribution system.

Keywords: Least Square, Loading, Mutation, Protection, Transformer

1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan energi yang dibangkitkan oleh generator yang berasal dari energi mekanik [1], [2]. Energi listrik itu kemudian mengalami proses penyaluran sehingga dapat digunakan pelanggan. Distribusi energi listrik memainkan peran vital dalam memastikan pasokan listrik yang stabil dan efisien kepada konsumen [3]. Transformator adalah komponen penting dalam sistem distribusi ini, yang mengubah tegangan tinggi dari gardu induk menjadi tegangan yang lebih rendah yang dapat digunakan oleh konsumen akhir [4]. Efektivitas distribusi listrik sangat bergantung pada kinerja optimal transformator dalam menghadapi berbagai tantangan, termasuk fluktuasi beban dan potensi kerugian energi. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki signifikansi besar dalam mengatasi isu-isu operasional yang mempengaruhi keandalan dan efisiensi sistem distribusi listrik.

Salah satu permasalahan utama dalam distribusi listrik adalah ketidakseimbangan pembebanan transformator sehingga menimbulkan rugi-rugi. Pada PT. PLN (Persero) ULP Bululawang, ditemukan bahwa beberapa transformator mengalami kondisi pembebanan lebih maupun pembebanan kurang yang signifikan. Misalnya, berdasarkan pengukuran tahun 2022 pada pembebanan PT. PLN (Persero) ULP Bululawang tepat di Blayu Wajak ditemukan trafo yang mengalami *overload* yaitu Trafo C0177 berkapasitas 100 kVA dengan beban 88,630 kVA (88,4%), sedangkan peraturan pembebanan trafo lebih baik di bawah 80%. Sedangkan pada penyulang Tajinan C0254 berkapasitas trafo 160 kVA dengan beban 34,277 kVA mempunyai status *underload* (21,4%). Kondisi ini dapat menimbulkan risiko panas berlebih dan inefisiensi, yang dapat menyebabkan kerugian lebih lanjut dalam sistem distribusi.

Dalam perkembangan teknologi saat ini, metode dan pendekatan untuk meningkatkan kinerja transformator terus berkembang. Studi-studi terdahulu menunjukkan berbagai strategi manajemen beban dan peningkatan kapasitas transformator menggunakan metode *uprating* maupun trafo sisipan. Nugraha et al. menganalisis bahwa peningkatan kapasitas transformator PNBS dilakukan dengan mengganti transformator yang awalnya

berkapasitas 50 kVA menjadi 100 kVA. Kapasitas ini tetap aman selama 10 tahun ke depan dan akan melebihi kapasitasnya pada tahun 2031 dengan beban sebesar 80,26 kVA berdasarkan hasil peramalan [5]. Yasa menganalisis *uprating* gardu distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Karang yang menghasilkan penurunan presentase pembebanan transformator hingga 73% dengan penambahan daya ke transformator sebesar 250 kVA [6]. Seniari et al. melakukan analisis pemasangan transformator sisipan pada jarak 313,18 m dari transformator utama dengan hasil tegangan di ujung beban 222,3 V, drop tegangan 3,16%, dan rugi daya saluran sebesar 4,16% [7]. Sutjipto et al. melakukan analisis perbaikan prosentase pembebanan menggunakan metode transformator sisipan dengan hasil yang efektif [8]. Wiryawan et al. membandingkan dua cara yaitu dengan peningkatan kapasitas (*uprating*) transformator dan penambahan transformator sisipan untuk memperbaiki kondisi pembebanan di transformator [9]. Luqmantoro et al. membahas hasil mutasi trafo distribusi Penyulang Ampeldento N1314 dari 160 kVA ke 250 kVA untuk menghindari kerusakan [10].

Meskipun berbagai pendekatan telah diterapkan, masih terdapat celah dalam manajemen ketidakseimbangan beban transformator yang optimal. Studi ini menyoroti pentingnya mutasi transformator sebagai solusi yang lebih efektif dibandingkan dengan pendekatan tradisional seperti *uprating* atau sisipan transformator. *Uprating* trafo belum mungkin dilakukan karena keterbatasan anggaran dari PT. PLN (Persero) ULP Bululawang dan sisipan trafo terhambat karena tidak ada jaringan SUTM pada trafo C0177. Mutasi transformator diharapkan dapat mengurangi beban pada transformator yang *overloading* dan meningkatkan pembebanan pada transformator yang *underloading*, sesuai dengan standar PLN. Dalam konteks ini, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah yang ada dengan menawarkan solusi praktis dan terukur.

Konsep baru yang diusulkan dalam penelitian ini adalah penerapan mutasi transformator secara sistematis untuk mengatasi ketidakseimbangan beban. Dalam pelaksanaan mutasi trafo, diperlukan juga perhitungan untuk mengetahui umur trafo dalam 5 tahun ke depan. Dengan melakukan peramalan beban, maka pembebanan pada trafo yang akan dimutasi dapat

* Korespondensi: harrij@polinema.ac.id

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang
Jalan Soekarno-Hatta No. 9 Malang, Indonesia
b) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang
Jalan Soekarno-Hatta No. 9 Malang, Indonesia

disesuaikan dengan peningkatan kebutuhan daya pelanggan. Dalam peramalan beban ini menggunakan metode Least Square dengan mempertimbangkan ketersediaan data yang ada salah satunya adalah data pengukuran beban dalam 5 tahun silam serta keakuratan metode least square dalam meramalkan beban dalam jangka 5 tahun kedepan. Implementasi konsep ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih terukur dan efisien dalam manajemen beban transformator di PT. PLN (Persero) ULP Bululawang.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas mutasi transformator dalam mengatasi fluktuasi beban pada transformator distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Bululawang. Penelitian ini akan mengukur beban transformator sebelum dan sesudah mutasi, menggunakan Metode Least Square untuk peramalan beban, serta menyesuaikan pengaturan proteksi transformator. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis bagi manajemen PT. PLN dalam mengoptimalkan distribusi energi listrik dan meningkatkan efisiensi operasional sistem distribusi.

2. Metode

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem jaringan distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berinteraksi langsung dengan konsumen [11]. Dalam sistem ini terdapat dua jenis gardu distribusi yaitu cantol dan portal. Sistem distribusi tenaga listrik ini terdiri dari jaringan tegangan rendah dan jaringan tegangan menengah, yang terbentuk dalam konfigurasi radial dan memiliki tiga saluran fasa serta satu fasa [12]. Sistem distribusi pada PT. PLN (Persero) ULP Bululawang terdiri dari 300 unit transformator distribusi dan empat penyulang yang diantaranya sebagai berikut. Penyulang Kolonel Sugiono mempunyai 110 trafo, Tajinan 72 trafo, Wagir 3 trafo dan Wajak dengan 69 trafo. Jumlah asset trafo yang tergolong banyak, dimungkinkan dapat dijumpai tiga kejadian pembebanan yaitu *overload*, normal, dan *underload*.

2.2 Transformator

Transformator adalah alat yang berfungsi untuk mentransfer daya listrik dari satu tingkat tegangan bolak-balik ke tingkat tegangan lainnya tanpa mengubah frekuensinya, melalui induksi elektromagnetik yang sesuai dengan hukum arus dan hukum Faraday [13]. Menurut prinsip induksi elektromagnetik, arus listrik dapat menghasilkan medan magnet dan medan magnet dapat menghasilkan arus listrik [14]. Transformator distribusi yang menjadi fokus penelitian ini yaitu Transformator C0177 berkapasitas 100 kVA merk Schneider Electric dan Transformator C0254 berkapasitas 160 kVA merk Schneider Electric.

2.3 Pembebanan Transformator

Pengoperasian trafo distribusi diupayakan untuk optimal dengan meminimalisir rugi-rugi dalam penyaluran tenaga listrik dan tercapainya umur pakai minimum yang sesuai dengan rancangan [xx]. Dalam kondisi baik, trafo seharusnya bisa dioperasikan 100% tanpa mengurangi umur trafo. Dalam perhitungan besar pembebanan pada suatu trafo dapat menggunakan Persamaan (2-1)

$$S = (V_{RN} \times I_R) + (V_{SN} \times I_S) + (V_{TN} \times I_T) \quad (2-1)$$

Keterangan:

S = Daya Transformator (kVA)

I_R = Arus fasa R (A)

V_{R-N} = Tegangan fasa R terhadap netral (V)

I_S = Arus fasa S (A)

V_{S-N} = Tegangan fasa S terhadap netral (V)

I_T = Arus fasa T (A)

V_{T-N} = Tegangan fasa T terhadap netral (V)

Nilai persentase pembebanan pada transformator dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-2).

$$\%beban = \frac{KVA (beban)}{KVA (transformator)} \quad (2-2)$$

Keterangan:

KVA (beban) = Total daya (beban)

KVA (transformator) = Kapasitas Transformator

Berdasarkan SPLN 17: 1979 [5] tentang pedoman pembebanan trafo yang terendam minyak, pusat beban yang terdiri dari perumahan, beban puncak malam jauh lebih tinggi dari beban puncak saat siang hari. Pedoman untuk pembebanan lebih dengan mempertahankan umur trafo yang normal dan untuk K2 tidak boleh lebih dari 1,5.

Nilai K1 dan K2 dapat diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan Rumus (2-3) dan (2-4).

$$K1 = \frac{S1}{Sr} \quad (2-3)$$

$$K2 = \frac{S2}{Sr} \quad (2-4)$$

Keterangan:

K1 : pembebanan saat LWBP (kVA)

K2 : pembebanan saat WBP (kVA)

Sr : Kapasitas Daya Trafo (watt)

S1 : Rata-rata daya LWBP

S2 : Rata-rata daya WBP

Hasil perhitungan disesuaikan dengan kurva pembebanan trafo untuk menentukan lama pembebanan K2 berdasarkan SPLN 17: 1979.

2.4 Faktor Kebutuhan (FK)

Faktor kebutuhan (FK) adalah perbandingan beban puncak dengan seluruh beban terpasang pada trafo yang dapat dirumuskan seperti Persamaan (2-5).

$$FK = \frac{Bp (beban puncak)}{BC (beban Terpasang)} \times 100 \quad (2-5)$$

Faktor kebutuhan daya trafo pada setiap gardu distribusi, menentukan kapasitas daya trafo yang sesuai dengan kebutuhan beban trafo yang tersambung pada gardu distribusi adalah langkah awal dalam menentukan faktor kebutuhan daya trafo.

$$\text{Kebutuhan Daya Trafo} = FK \times \text{beban tersambung} \quad (2-6)$$

2.5 Peramalan Pertumbuhan Beban Menggunakan Metode Least Square

Peramalan digunakan untuk memprediksi kejadian yang mungkin terjadi di masa depan. Dalam konteks mutasi trafo ini, peramalan pertumbuhan beban diterapkan untuk memastikan bahwa trafo dapat beroperasi secara optimal dalam jangka waktu yang panjang.

Metode *Least Square* digunakan untuk memperkirakan beban puncak yang akan terjadi pada masa yang akan datang pada jaringan distribusi tersebut [15], [16]. Dalam hal ini dikhususkan untuk menganalisis runtutan waktu dengan metode ini kuadrat terkecil dibagi dalam dua hal yaitu kasus data genap dan 40 ganjil. Untuk metode peramalan dengan kuadrat terkecil dengan menggunakan Persamaan (2-7)

$$Y = a + bX \quad (2-7)$$

Keterangan:

- Y = Besar nilai yang diramalkan
- a = nilai periode
- b = tingkat perkembangan nilai yang diramal
- X = variable waktu

Untuk mengetahui koefisien a dan b dapat menggunakan Persamaan (2-8) dan (2-9)

$$a = \frac{\sum Y}{n} \quad (2-8)$$

$$b = \frac{\sum XY}{\sum X^2} \quad (2-9)$$

2.6 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan adalah penurunan tegangan yang terjadi ketika terdapat perbedaan antara tegangan yang dikirim dan tegangan yang diterima oleh penghantar [17]. Penurunan tegangan pada saluran distribusi listrik ini akan sebanding dengan panjang saluran dan beban yang dialirkan, serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar.

3. Pembahasan

3.1 Kondisi Pembebanan Trafo Sebelum Mutasi

Data kapasitas trafo, tegangan sekunder, arus utama, dan pembebanan pada dua transformator dapat dilihat di Tabel 3.1.

TABEL 3.1 DATA TRANSFORMATOR C0177 (100 kVA) DAN C0254 (160 kVA)

Kapasitas trafo (kVA)	Tegangan Sekunder (volt)			Arus Utama (A)			Pembebanan trafo	
	RN	SN	TN	R	S	T	kVA	%
Pembebanan Saat WBP								
100	230	229	235	121	110	145	88,36	88,4
160	223	227	224	74	44	33	34,27	21,4
Pembebanan Saat LWBP								
100	228	226	230	63	102	121	65,24	65,2
160	220	212	218	60	40	33	28,87	18,0

Tabel 3.1 menggambarkan data kapasitas trafo, tegangan sekunder, arus utama, dan pembebanan pada dua transformator dengan kapasitas 100 kVA dan 160 kVA dalam dua kondisi, yaitu saat Waktu Beban Puncak (WBP) dan Luar Waktu Beban Puncak (LWBP). Berdasarkan Tabel 3.1, diketahui bahwa Gardu distribusi C0177 memiliki persentase pembebanan sebesar 88% atau dikatakan *Overload* dari kapasitas trafo sebesar 100 kVA.

Berikut ini contoh perhitungan nilai beban terpakai pada Trafo C0177 saat WBP dan LWBP:

1. Ketika WBP

$$S = (230 \times 121) + (229 \times 110) + (225 \times 145) = 88,360 \text{ kVA}$$

2. Beban LWBP

$$S = (228 \times 63) + (226 \times 102) + (230 \times 121) = 65,246 \text{ kVA}$$

Berikut ini contoh perhitungan persentase pembebanan pada trafo C0177:

1. Beban WBP

$$\% \text{ beban} = \frac{88,360}{100} \times 100\% = 88,4\%$$

2. Beban LWBP

$$\% \text{ beban} = \frac{65,246}{100} \times 100\% = 65,2\%$$

3.2 Analisa Pembebanan Transformator

Kondisi pembebanan kedua trafo pada saat WBP dapat dilihat di Tabel 3.2.

TABEL 3.2 KONDISI PEMBEBANAN TRAF0 WBP

Nomor Gardu	Penyulang	Daya	Beban (kVA)	Beban %	Ket.
C0177	Wajak	100	88,360	88,4	kurang
C0254	Tajinan	160	34,277	21,4	baik

Berdasarkan Tabel 3.2 dapat diketahui bahwa kondisi pembebanan pada trafo gardu C0177 mempunyai beban sebesar 88,360 kVA (88,4%). Besar pembebanan tersebut masuk dalam kondisi kurang baik menurut SE DIR PT. PLN (PERSERO) NO. 0017:2014 [18]. Hal ini disebabkan pembebanan trafo yang lebih dari 80% kapasitas trafo.

Dengan tingginya pembebanan pada trafo tersebut, akan membuat trafo menjadi panas sehingga perlu dilakukan mutasi trafo. Dengan dilakukan mutasi trafo ini diharapkan persentase pembebanan pada trafo akan menurun.

Kondisi pembebanan kedua trafo pada saat LWBP dapat dilihat di Tabel 3.3.

TABEL 3.3 KONDISI PEMBEBANAN TRAF0 LWBP

Nomor Gardu	Penyulang	Daya (kVA)	Beban kVA	Beban %	Ket.
C0177	Wajak	100	65,246	65,2	Cukup
C0254	Tajinan	160	28,874	18,0	baik

Berdasarkan Tabel 3.3 dapat diketahui bahwa pengukuran saat LWBP menunjukkan kondisi beban pada kedua trafo menunjukkan kondisi yang cukup baik dan tidak melebihi standar pembebanan yang ditetapkan SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017:2014.

3.2.1 Perhitungan Nilai Pembebanan yang Diizinkan Terhadap Rata-rata Pembebanan LWBP (K1) dan WBP (K2)

Tabel 3.4 berisi perbandingan kesesuaian pembebanan transformator dengan standar yang telah ditetapkan oleh PT. PLN (Persero).

TABEL 3.4 KESESUAIAN PEMBEBANAN TRAF0 SESUAI STANDAR

Jenis	Pembebanan		Rasio Pembebanan			Ket.
	kVA	%	K1	K2	Standar	
C0177						
WBP	88,36	88,4		0,88	1,5	Sesuai standar
LWBP	65,24	65,2	0,65		K1<1	
C0254						
WBP	34,27	21,4		0,21	1,5	Sesuai standar
LWBP	28,87	18,0	0,18		K1<1	

Berikut perhitungan K1 dan K2 pada trafo C0177:

$$K1 = \frac{\text{beban LWBP}}{\text{Kapasitas Daya Trafo (kVA)}} = \frac{65,24}{100} = 0,65$$

$$K2 = \frac{\text{beban WBP}}{\text{Kapasitas Daya Trafo (kVA)}} = \frac{88,4}{100} = 0,88$$

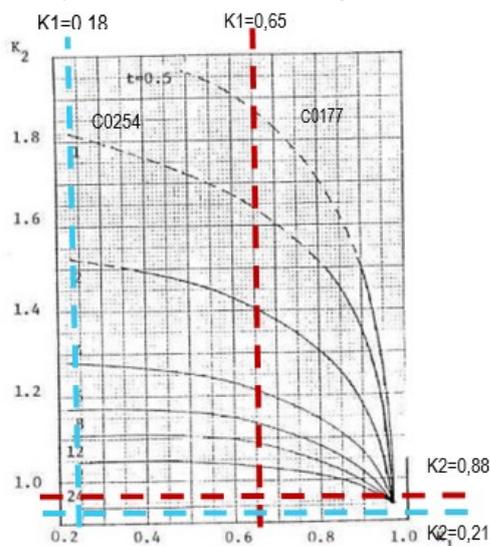
Dari Tabel 3.4 dapat dilihat bahwa trafo C0177 mengalami pembebanan yang sangat tinggi saat WBP, mencapai 88,4%, yang melebihi batas standar 80%. Ini menunjukkan bahwa trafo C0177 berada dalam kondisi *overload* yang dapat menyebabkan pemanasan berlebih dan potensi kerusakan. Sebaliknya, trafo C0254 memiliki pembebanan yang sangat rendah baik saat WBP maupun LWBP, dengan rasio pembebanan yang jauh di bawah standar, menunjukkan bahwa trafo ini *underload* dan tidak

dimanfaatkan secara optimal.

3.2.2 Analisis Nilai K1 dan K2 berdasarkan Kurva Pembebanan

Gambar 3.1 dalam dokumen tersebut menampilkan grafik yang menggambarkan nilai K1 dan K2 pada dua transformator, yaitu C0177 dan C0254, serta menunjukkan perpotongan kedua garis tersebut dalam konteks waktu durasi pembebanan.

Dari Gambar 3.1 dapat diamati bahwa nilai K1 pada trafo C0177 bernilai 0,65, sedangkan K2 bernilai 0,88. Perpotongan kedua garis tersebut berada pada posisi 12 jam. Sehingga lamanya durasi pembebanan dengan beban 88,4% pada trafo C0177 adalah 12 jam. Sedangkan pada trafo C0254 bernilai 0,18, sedangkan K2 bernilai 0,21. Garis tersebut berada pada posisi dibawah 12 jam. Sehingga lamanya durasi pembebanan dengan beban 21,4 % pada trafo C0177 adalah 24 jam.



GAMBAR 3.1 GRAFIK K1 DAN K2

3.3 Jatuh Tegangan Sebelum mutasi

Tabel 3.5 dalam dokumen tersebut berisi data tentang jatuh tegangan sebelum dilakukan mutasi pada dua transformator, yaitu C0177 dan C0254.

TABEL 3.5 JATUH TEGANGAN SEBELUM MUTASI

Gardu	Jarak (km)	Tegangan PHB-TR			Tegangan Ujung (volt)	Jatuh Tegangan	
		R-N	S-N	T-N		volt	%
C0177	886	248	235	239	231	7,06	6,58
C0254	259	232	227	225	223	13,38	2,62

Pada data Tabel 3.5 ditunjukkan bahwa tegangan ujung setiap trafo memiliki drop tegangan bernilai kurang dari 10%, maka nilai tegangan untuk kedua trafo tersebut masih dalam keadaan yang sesuai dengan standar. Nilai drop tegangan dari pangkal sampai ujung jaringan pada trafo C0177 adalah 6,09%, kemudian besar jatuh tegangan pada trafo C0254 bernilai 2,62%. Sehingga tindakan mutasi tersebut merupakan tindakan yang tepat karena, nilai jatuh tegangan pada kedua trafo tersebut masih dengan ketentuan yang berlaku sehingga tidak perlu dilakukan perbaikan jatuh tegangan pada jaringan distribusi.

3.4 Penentuan Kapasitas Transformator Distribusi

Tabel 3.6 dalam dokumen berisi informasi mengenai faktor kebutuhan daya untuk dua transformator, yaitu C0177 dan C0254.

TABEL 3.6 FAKTOR KEBUTUHAN DAYA TRAF0 C0177 DAN C0254

Gardu	Daya (kVA)	Beban Puncak (kVA)	Beban tersambung (kVA)	FK	FK (Mak)
C0177	100	88,360	393,05	0,4	157,22
C0254	160	34,277	296,3	0,4	118,52

Berdasarkan Tabel 3.6 dapat dihitung faktor kebutuhan kapasitas trafo yang sesuai dengan faktor kebutuhan pada gardu distribusi C0177 dengan pelanggan dominan rumah tangga.

$$\text{Kebutuhan Trafo C0177} = FK \times \text{Beban Tersambung} = 0,4 \times 393,05 = 157,22 \text{ kVA}$$

Berdasarkan perhitungan faktor kebutuhan pada Tabel 3.6, trafo C0177 memiliki beban tersambung 393,05 kVA dengan faktor kebutuhan 0,4 maka didapatkan faktor kebutuhan maksimal sebesar 157,22 kVA. Pada trafo C0177 dengan kapasitas 100 kVA mampu menampung 63% dari kapasitas trafo. Dengan persentase beban sebesar 63% maka perlu adanya peningkatan rating trafo sebagai penunjang kebutuhan energi yang diperlukan.

3.5 Persentase Pembebanan Setelah Mutasi

Tabel 3.7 berisi informasi tentang kondisi pembebanan trafo setelah dilakukan mutasi pada dua transformator, yaitu C0177 dan C0254.

TABEL 3.7 KONDISI PEMBEBANAN TRAF0 SESUDAH MUTASI SAAT WBP

Kapasitas trafo (kVA)	Tegangan Sekunder (V)			Arus Utama (A)			Pembebanan	
	RN	SN	TN	R	S	T	kVA	%
Pembebanan Saat WBP (kVA)								
160	228	232	235	123	115	145	88,799	55,5
	230	230	233	125	115	145	88,985	55,6
	231	230	235	125	114	145	89,170	55,7
100	224	230	225	80	40	33	27,882	28
	225	233	230	78	45	31	27,960	28
	220	224	230	75	40	40	28,305	28
Pembebanan Saat LWBP (kVA)								
160	228	226	230	63	102	121	34,545	34,5
	225	225	230	63	105	120	34,490	34,5
	223	224	228	65	105	122	34,660	34,7
	220	212	218	60	40	33	27,882	28
100	220	210	219	60	39	30	27,960	28
	218	210	220	56	40	35	28,305	28

Berdasarkan data Tabel 3.7, dapat dilihat bahwa pembebanan pada trafo C0177 mengalami penurunan menjadi 55,7% dengan beban 89,170 kVA.

3.6 Jatuh Tegangan

Tabel 3.8 berisi data tentang jatuh tegangan setelah dilakukan mutasi pada dua transformator, yaitu C0177 dan C0254.

TABEL 3.8 JATUH TEGANGAN SESUDAH MUTASI

Gardu	Jarak (km)	Tegangan PHB-TR (V)			Tegangan Ujung (V)	Jatuh Tegangan	
		R-N	S-N	T-N		(V)	(%)
C0177	886	248	235	239	231	7,06	6,58
C0254	259	232	227	225	223	13,38	2,62

C0177	886	248	235	239	231	7,06	6,58
C0254	259	232	227	225	223	13,38	2,62

Dari Tabel 3.8, dapat dilihat perbedaan nilai jatuh tegangan antara dua gardu dengan jarak yang berbeda setelah dilakukan mutasi. Gardu C0177 dengan jarak 8.86 km memiliki nilai jatuh tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan gardu C0254 yang berjarak 2.59 km. Nilai jatuh tegangan yang lebih tinggi pada gardu C0177 menunjukkan bahwa tegangan yang diterima di ujung saluran lebih rendah dibandingkan dengan tegangan pada PHB-TR, yang menunjukkan kehilangan energi yang lebih besar dalam saluran yang lebih panjang.

3.7 Perbandingan Sebelum dan Sesudah Mutasi

Tabel 3.9 berisi perbandingan pembebanan transformator sebelum dan sesudah mutasi untuk dua transformator, yaitu C0177 dan C0254. Tabel ini menunjukkan data beban (kVA) dan persentase beban (%) untuk tahun 2023 hingga 2027.

TABEL 3.9 PERBANDINGAN PEMBEBANAN SEBELUM DAN SESUDAH MUTASI

Tahun	Sebelum		Sesudah	
	Beban (kVA)	Beban (%)	Beban (kVA)	Beban (%)
C0177				
2023	93,21	93	89,17	55,73
2024	96,34	96	93,15	58,21
2025	99,47	99	95,49	59,68
2026	102,6	102	97,83	61,14
2027	205,73	105	100,17	62,6
C0254				
2023	35,09	33	34,660	35
2024	35,79	22	36,08	35,5
2025	36,49	22,8	36,7	36
2026	37,19	23	37,32	36,7
2027	37,89	23,68	35,46	37

Tabel 3.9 menunjukkan bahwa mutasi trafo efektif dalam menyeimbangkan beban antara kedua transformator. Trafo C0177 yang sebelumnya *overload* sekarang memiliki beban yang lebih aman dan stabil, sedangkan trafo C0254 yang sebelumnya *underload* sekarang memiliki beban yang lebih optimal. Hasil ini menunjukkan bahwa mutasi trafo berhasil meningkatkan efisiensi operasional sistem distribusi listrik dan mengurangi risiko kerusakan akibat *overload* pada trafo.

3.8 Peramalan Beban Menggunakan Metode *Least Square*

Tabel 3.10 berisi informasi mengenai peramalan beban trafo C0177 setelah dilakukan mutasi, mencakup data untuk tahun 2024 hingga 2027.

TABEL 3.10 PERAMALAN BEBAN TRAF0 C0177

Tahun	Periode	Daya (kVA)	Selisih (kVA)	Kenaikan Per Tahun (%)	Pembebanan (%) Sesudah
2024	3	93,15	3,4	4,5	58,21
2025	4	95,49	2,3	2,5	59,68
2026	5	97,83	2,3	2,4	61,14
2027	6	100,17	2,3	2,4	62,6
Total Kenaikan Daya (kVA)		10,3			
Rata-rata kenaikan per tahun (%)		2,36			

Dari Tabel 3.10 dapat diketahui bahwa setelah dilakukan mutasi, beban trafo C0177 diproyeksikan meningkat setiap tahun. Kenaikan beban tahunan berkisar antara 2.39% hingga 3.45%. Persentase pembebanan juga meningkat dari 58.21% pada tahun 2024 menjadi 62.6% pada tahun 2027. Tabel 3.10 juga menunjukkan bahwa peramalan beban trafo C0177 setelah mutasi memperlihatkan peningkatan beban yang stabil dan terkendali setiap tahunnya. Dengan pembebanan yang berada dalam batas yang aman dan tidak melebihi kapasitas maksimal trafo, hasil ini menunjukkan bahwa mutasi trafo C0177 berhasil meningkatkan efisiensi dan keandalan distribusi energi listrik, sambil menjaga beban dalam tingkat yang aman untuk operasi jangka panjang.

Sedangkan Tabel 3.11 berisi informasi mengenai peramalan beban trafo C0177 setelah dilakukan mutasi, mencakup data untuk tahun 2024 hingga 2027.

TABEL 3.11 PERAMALAN BEBAN TRAF0 C0254

Tahun	Periode	Daya (kVA)	Selisih (kVA)	Kenaikan Per Tahun (%)	Pembebanan (%) Sesudah
2024	3	35,46	0,8	2,3	35,5
2025	4	36,08	0,6	1,8	36
2026	5	36,7	0,6	1,7	36,7
2027	6	37,32	0,6	1,7	37
Total Kenaikan Daya (kVA)		2,6			
Rata-rata kenaikan per tahun (%)		1,5			

Berdasarkan Tabel 3.11 diketahui pada trafo C0254, peningkatan persentase pembebanan per tahunnya sebesar 1,5%, sehingga trafo C0254 diperkirakan akan memiliki tingkat pembebanan 37% pada tahun 2027. Tingkat pembebanan tersebut masih dalam keadaan standar sehingga penggunaan trafo 100 kVA pada C0254 masih relevan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, ditemukan bahwa mutasi transformator berhasil menyeimbangkan beban antara trafo C0177 dan C0254. Sebelum mutasi, trafo C0177 mengalami pembebanan yang sangat tinggi, melebihi kapasitasnya dari tahun 2023 hingga 2027, dengan beban mencapai lebih dari 100% pada beberapa tahun. Sebaliknya, trafo C0254 menunjukkan pembebanan yang sangat rendah, dengan persentase beban hanya sekitar 22% hingga 23.68%.

Setelah dilakukan mutasi, persentase beban pada trafo C0177 turun secara signifikan, berada dalam kisaran yang lebih aman (sekitar 55.73% hingga 62.6%). Sementara itu, persentase beban pada trafo C0254 meningkat secara signifikan, berada dalam kisaran yang lebih optimal (sekitar 35% hingga 37%). Peramalan beban trafo C0177 setelah mutasi menunjukkan peningkatan beban yang stabil dan terkendali setiap tahunnya, dengan kenaikan beban tahunan berkisar antara 2.39% hingga 3.45%.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mutasi transformator efektif dalam mengoptimalkan distribusi beban dan meningkatkan efisiensi operasional sistem distribusi listrik. Dengan pembebanan yang berada dalam batas yang aman dan tidak melebihi kapasitas maksimal trafo, mutasi trafo C0177 dan C0254 berhasil

meningkatkan keandalan distribusi energi listrik, sambil menjaga beban dalam tingkat yang aman untuk operasi jangka panjang. Penyesuaian proteksi dan penggunaan metode peramalan beban menggunakan Least Square juga berkontribusi dalam menjaga kinerja optimal transformator. Oleh karena itu, mutasi transformator dapat dijadikan strategi yang efektif untuk meningkatkan kinerja sistem distribusi listrik di PT. PLN (Persero) ULP Bululawang.

Referensi

- [1] M. Adam, P. Harahap, and M. Ridho Nasution, "Analisa Pengaruh Perubahan Kecepatan Angin Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) Terhadap Daya Yang Dihasilkan Generator DC," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 30–36, Aug. 2019, doi: 10.30596/RELE.V2I1.3648.
- [2] A. Ulinuha and W. A. Widodo, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Angin Skala Mikro Untuk Keperluan Penerangan Jalan," *Proceeding 7th Univ. Res. Colloq. 2018 Bid. Tek. dan Rekayasa*, pp. 128–135, 2019.
- [3] A. Muhammad, H. Tumaliang, and S. Silimang, "Analisa Rugi-Rugi Energi Listrik Pada Jaringan Distribusi (JTM) Di PT. PLN (Persero) Area Gorontalo," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 3, pp. 295–302, 2018, doi: 10.35793/JTEK.V7I3.23634.
- [4] K. Kartika and M. Misriana, "Sistem Monitoring Transformator Distribusi Berbasis XBee Pro," *J. Litek J. List. Telekomun. Elektron.*, vol. 15, no. 2, pp. 29–37, Sep. 2018, doi: 10.30811/LITEK.V15I2.1662.
- [5] M. T. NUGRAHA and D. FAUZIAH, "Penanggulangan Overload Transformator Distribusi dengan Metode Uprating di Gardu PNBS 20 KV ULP Pangandaran," *Pros. Semin. Nas. Energi, Telekomun. dan Otomasi*, pp. 293–304, 2021.
- [6] I. W. S. Yasa, "MENGATASI TRANSFORMATOR OVERLOAD DENGAN METODE UPRATING TRANSFORMATOR PADA GARDU DISTRIBUSI," *J. Kaji. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 2, pp. 82–91, Aug. 2023, doi: 10.52447/JKTE.V8I2.6745.
- [7] N. M. Seniari, M. N. Fadli, and I. M. Ginarsa, "ANALISIS RENCANA PEMASANGAN TRANSFORMATOR SISIPAN PADA SALURAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI PENYULANG PAGUTAN (Studi Kasus: Transformator Distribusi AM097 Di Jalan Banda Seraya, Pagesangan, Kota Mataram)," *DIELEKTRIKA*, vol. 7, no. 1, pp. 56–63, Feb. 2020.
- [8] R. Sutjipto, H. Sungkowo, Epiwardi, and D. D. Kharisma, "Analisis Penggunaan Transformator Sisipan Untuk Mengatasi Rugi Tegangan dan Pembebanan Lebih," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 3, pp. 172–177, Oct. 2023, doi: 10.33795/ELPOSYS.V10I3.4223.
- [9] I. M. A. Wiryawan, I. P. Sutawinaya, and I. W. R. Sutrawan, "ANALISIS PERBANDINGAN ANTARA PENGGUNAAN TRANSFORMATOR SISIPAN DAN UPRATING TRANSFORMATOR DALAM MENANGGULANGI DROP TEGANGAN PADA GARDU DISTRIBUSI KA 0819 PENYULANG MUMBUL," *Log. J. Ranc. Bangun dan Teknol.*, vol. 15, no. 3, p. 159, Mar. 2017, doi: 10.31940/LOGIC.V15I3.493.
- [10] S. D. Luqmantoro, S. Sujito, and R. Mucharam, "Mutasi Transformator Distribusi Di Blimbing Kota Malang Penyulang Ampeldento N1314 Dari 160 kVA Ke 250 kVA Untuk Menghindari Kerusakan Akibat Beban Lebih," *PoliGrid*, vol. 3, no. 2, p. 57, 2022, doi: 10.46964/poligrid.v3i2.1715.
- [11] B. Badriana, J. Jordan, S. Salahuddin, S. Meliala, and K. Kartika, "ANALISIS PENEMPATAN RECLOSER GUNA MEMAKSIMALKAN KINERJA SISTEM TENAGA LISTRIK DI JARINGAN DISTRIBUSI 20 kV PADA PT. PLN (Persero) UNIT PELAKSANA PELAYANAN PELANGGAN (UP3) SIGLI," *J. Energi Elektr.*, vol. 10, no. 1, pp. 30–34, May 2021, doi: 10.29103/jee.v10i1.4984.
- [12] M. Rafi et al., "PENGARUH SUDUT DAYA PADA SISTEM DISTRIBUSI TEGANGAN MENENGAH JARINGAN KABEL DAN UDARA," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 24–28, Jun. 2023, doi: 10.30596/RELE.V6I1.15452.
- [13] E. Permata and I. Lestari, "MAINTENANCE PREVENTIVE PADA TRANSFORMATOR STEP-DOWN AV05 DENGAN KAPASITAS 150KV DI PT. KRAKATAU DAYA LISTRIK," *Pros. Semin. Nas. Pendidik. FKIP*, vol. 3, no. 1, pp. 485–493, Nov. 2020.
- [14] A. Supriyadi, "HUBUNGAN PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA," *Swara Patra Maj. Ilm. PPSDM Migas*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017.
- [15] M. S. Aihunan, H. L. Latupeirissa, and A. J. Kastanja, "PERAMALAN BEBAN PENYULANG WAYAME 2 PT. PLN (PERSERO) AREA AMBON MENGGUNAKAN METODE LEAST SQUARE," *J. ELKO (Elektrikal dan Komputer)*, vol. 2, no. 2, 2021.
- [16] V. Khaerunnisa, K. Usman, and M. A. Murti, "ID: 31 Prediksi Pemakaian Beban Listrik Menggunakan Metode Least Mean Square dan Compressive Sensing Prediction Of Electrical Power Usage Using Least Mean Square and Compressive Sensing," no. November, pp. 227–240, 2020.
- [17] M. F. Hakim, S. Nurhadi, H. D. F. Amaral, and S. L. Hermawan, "Kapasitor Shunt Sebagai Korektor Tegangan Bus di Gardu Induk," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 30–35, Mar. 2023, doi: 10.33795/ELPOSYS.V10I1.915.
- [18] Sukamdi, H. M. Kristiana, M. H. Farizan, and M. R. F. Firmansyah, "Analisis Rencana Pemasangan Transformator Sisipan Untuk Mengatasi Overload dan Drop Voltage pada Penyulang Selogabus PT. PLN (Persero) ULP Bojonegoro Kota," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 3, pp. 127–133, Oct. 2022, doi: 10.33795/ELPOSYS.V9I3.646.