

Pemodelan Penggunaan Trafo Pengganti yang Dipengaruhi Aspek Teknis dan Ekonomi Studi Kasus PLTU Ombilin

Halwan Mashuri Nasution*, Iwa Garniwa Mulyana K

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: HALWAN2410731@itpln.ac.id*, iwa.garniwa@itpln.ac.id

Keywords:

transformer, capacity, ratio,
vector group, loss of opportunity

Abstract

A reliable electricity supply is essential for supporting economic growth; therefore, maintaining the operational continuity of power plants is a critical priority. The failure of the 140 MVA main transformer at the Ombilin Steam Power Plant caused a prolonged outage, resulting in significant technical and economic losses. This study aims to evaluate the feasibility of replacement transformers based on technical and economic considerations to determine the most appropriate alternative. A quantitative case study approach was employed through transformer specification data collection, technical analysis, PSIM-based simulation, and economic evaluation using the loss of opportunity approach. Two candidate transformers were assessed, namely a 145 MVA transformer from Tambak Lorok Gas Power Plant and an 80 MVA transformer from Indralaya Combined Cycle Power Plant. The results indicate that the 145 MVA transformer requires modifications to the vector group, high-voltage connection, current transformer ratio, and protection relay settings, with an installation period of 170 days. Meanwhile, the 80 MVA transformer requires operating capacity limitation, synchronization voltage adjustment, additional ring current transformers, and protection setting modifications, with an installation period of only 57 days. From an economic perspective, the 80 MVA transformer provides lower opportunity losses for short-term operation, whereas the 145 MVA transformer becomes more economical after three years because it enables full generating capacity. Therefore, selecting a replacement transformer should balance rapid operational recovery with long-term economic efficiency.

Kata Kunci:

transformator, kapasitas, rasio,
vector group, kehilangan
kesempatan

Abstrak

Penyediaan tenaga listrik yang andal merupakan faktor penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi sehingga kontinuitas operasi pembangkit harus tetap terjaga. Gangguan pada transformator utama PLTU Ombilin berkapasitas 140 MVA menyebabkan unit pembangkit berhenti beroperasi dalam waktu yang lama dan menimbulkan kerugian teknis maupun ekonomi. Penelitian ini bertujuan menganalisis kelayakan penggunaan trafo pengganti berdasarkan aspek teknis dan ekonomi untuk menentukan alternatif yang paling optimal. Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan studi kasus melalui pengumpulan data spesifikasi transformator, analisis teknis, simulasi menggunakan perangkat lunak PSIM, serta analisis ekonomi menggunakan pendekatan loss of opportunity. Dua kandidat trafo yang dianalisis adalah trafo 145 MVA dari PLTG Tambak Lorok dan trafo 80 MVA dari PLTGU Indralaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa trafo 145 MVA memerlukan modifikasi pada vector group, koneksi sisi tegangan tinggi, rasio current transformer, dan pengaturan sistem proteksi dengan durasi pemasangan selama 170 hari. Sementara itu, trafo 80 MVA membutuhkan penyesuaian kapasitas operasi, rasio tegangan sinkronisasi, penambahan ring current transformer, dan perubahan pengaturan proteksi dengan durasi pemasangan 57 hari. Secara ekonomi, trafo 80 MVA memberikan kehilangan kesempatan

produksi yang lebih rendah pada penggunaan jangka pendek, sedangkan trafo 145 MVA menjadi alternatif yang lebih menguntungkan apabila dioperasikan lebih dari tiga tahun karena mampu mendukung kapasitas pembangkitan secara penuh. Dengan demikian, pemilihan trafo pengganti perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kebutuhan pemulihan operasi yang cepat dan efisiensi ekonomi jangka panjang.

PENDAHULUAN

Kebutuhan tenaga listrik akan meningkat sejalan dengan perkembangan ekonomi dan pertumbuhan penduduk (Daniel et al., 2024; Sholeh et al., 2021). Kondisi ini harus diantisipasi dengan penyediaan tenaga listrik dalam jumlah yang cukup, dan sudah menjadi keniscayaan bahwa penyediaan tenaga listrik tersebut merupakan prioritas utama dalam mendukung perkembangan ekonomi dan pertumbuhan penduduk (Alnavis et al., 2024). Penyediaan energi listrik khususnya di Pulau Sumatera dipasok dari beberapa pembangkit listrik yang terhubung dengan jaringan transmisi terinterkoneksi dalam sistem tenaga listrik dengan tegangan 150 kV maupun 275 kV (Tamam et al., 2017).

Salah satu pembangkit yang menopang sistem kelistrikan di Sumatera adalah PLTU Ombilin yang berlokasi di Sumatera Barat dengan kapasitas daya terpasang 2×100 MW, terhubung dengan jaringan transmisi 150 kV. PLTU Ombilin beroperasi sejak tahun 1995 dan merupakan pembangkit dengan kapasitas terbesar di Sumatera Bagian Tengah pada saat itu. Pembangkit ini menggunakan uap panas dari sistem boiler berbahan bakar batu bara untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator (Karamallah & Suwitno, 2021). Transformator (trafo) merupakan salah satu peralatan utama yang mengubah energi listrik dari keluaran generator 11,5 kV menjadi tegangan tinggi 150 kV untuk ditransmisikan ke sistem jaringan (Mustari et al., 2024). Trafo PLTU Ombilin merupakan trafo 3 fasa dengan kapasitas 140 MVA dengan rasio 11,5/157,5 kV.

Pada September 2013, terjadi gangguan pada trafo utama (Generator Transformer) PLTU Ombilin yang dibuktikan melalui pengujian Resistance Insulation Tester, menunjukkan adanya kerusakan isolasi yang menyebabkan short circuit pada belitan trafo (Indra et al., 2022). Gangguan ini menyebabkan PLTU stop beroperasi dalam waktu yang cukup lama, baik karena waktu perbaikan trafo maupun pengadaan trafo baru (± 2 tahun), sehingga menimbulkan kerugian besar secara ekonomi dan terganggunya pasokan listrik di Sumatera (Helmy & Agung, 2017).

Sebagai strategi pemeliharaan untuk mengurangi durasi shutdown, dilakukan koordinasi dengan beberapa unit induk pembangkit untuk mencari trafo cadangan yang dapat digunakan sementara di PLTU Ombilin. Diperoleh dua kandidat trafo: trafo 145 MVA dari PLTG Tambak Lorok GT 1.3 di Semarang dan trafo 80 MVA dari PLTGU Indralaya di Sumatera Selatan. Karena kedua trafo tersebut memiliki kapasitas dan spesifikasi yang berbeda dengan trafo eksisting, maka dibutuhkan penelitian khusus mengenai kemungkinan penggunaan trafo pengganti tersebut.

Beberapa penelitian terdahulu yang relevan antara lain membahas syarat sinkronisasi generator yang mencakup kesamaan tegangan, frekuensi, sudut fasa, dan urutan fasa (Antoro & Syakur, 2020; Diningsih et al., 2022; Endefi, 2020); metode perubahan koneksi untuk transformator dengan vector group berbeda (Khosa, 2022; Purba & Gani, 2024; Yogi & Dedeng, 2014); pengaruh kapasitas transformator terhadap pembebanan dan usia trafo

(Dionova, 2022; Dreidy & Salah, 2025; Husodo & Firmansyah, 2016; Suharno & Setiawan, 2020); penyesuaian setting proteksi relai diferensial akibat perubahan vector group dan perubahan rasio CT (Tamilselvi, 2026; Wang, 2022; Wulung, 2024); serta pendekatan kuantitatif terhadap kehilangan pendapatan akibat energi yang tidak terjual sebagai dasar analisis loss of opportunity (Cong, 2022; Paulus & Sudiarto, 2025; Sorrentino et al., 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menentukan dan menganalisis parameter yang mempengaruhi modifikasi pada trafo pengganti di PLTU Ombilin; (2) memodifikasi trafo pengganti berdasarkan aspek yang mempengaruhinya sesuai kondisi lapangan; dan (3) menentukan loss of opportunity yang terendah dari kedua kandidat trafo untuk digunakan di PLTU Ombilin.

Transformator adalah alat listrik yang digunakan untuk mentransformasikan daya atau energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya melalui gandengan magnet berdasarkan prinsip induksi elektromagnet (Zambrano-monserate, 2026). Transformator daya memungkinkan pengiriman daya secara ekonomis dan efisien karena pengiriman daya dengan tegangan tinggi memperkecil rugi-rugi I^2R dan drop tegangan IZ . Berdasarkan Hukum Faraday, tegangan induksi pada kumparan N lilitan yang dihubungkan oleh fluks $\Phi(t)$ yang berubah terhadap waktu adalah:

$$e(t) = N \cdot d\Phi(t)/dt \quad (1)$$

Rasio tegangan transformator ideal ditentukan oleh perbandingan jumlah lilitan primer N_1 dan sekunder N_2 , yang dikenal sebagai rasio belitan $a = N_1/N_2$, sehingga: $E_1/E_2 = N_1/N_2$. Untuk rangkaian 3 fasa, kapasitas dasar dan tegangan dasar digunakan untuk menghitung nilai per-unit sistem tenaga (Shuai, 2018).

Vector group berhubungan dengan pergeseran sudut fasa antara sisi tegangan tinggi (HV) dan tegangan rendah (LV). Berdasarkan standar IEC 60076, vector group diklasifikasikan menjadi empat kelompok utama: Kelompok 1 (pergeseran 0° : Yy0, Dd0, Dz0), Kelompok 2 (pergeseran 180° : Yy6, Dd6, Dz6), Kelompok 3 (pergeseran -30° : Yd1, Dy1, Yz1), dan Kelompok 4 (pergeseran $+30^\circ$: Yd11, Dy11, Yz11). Transformator kelompok 3 dan 4 dapat diparalelkan dengan membalik urutan fasa salah satunya, misalnya Yd1 dapat diparalelkan dengan Dy1 melalui pembalikan urutan fasa terminal primer dan sekunder.

Kapasitas trafo merupakan nilai daya keluaran yang dapat beroperasi secara kontinu tanpa melebihi temperatur operasi yang diizinkan. Berdasarkan kapasitasnya, transformator dibagi menjadi: daya kecil (500 kVA–7.500 kVA), daya sedang (7.500 kVA–100 MVA), dan daya besar (di atas 100 MVA). Standar pembebanan transformator tidak boleh melebihi 80% dari kapasitas trafo untuk menjaga umur dan efisiensi operasional (Glover et al., 2017). Perkiraan umur transformator daya yang beroperasi sesuai kapasitasnya adalah 30 tahun (Indarto et al., 2020).

Relai diferensial bekerja berdasarkan perbandingan arus yang masuk ke dalamnya dan digunakan sebagai proteksi untuk peralatan seperti transformator, generator, dan busbar. Pada kondisi normal dan saat gangguan eksternal, jumlah arus yang masuk ke relai bernilai nol, sehingga relai tidak bekerja. Ketika terjadi gangguan internal, jumlah arus tidak bernilai nol dan relai memberikan perintah trip kepada circuit breaker. Setting relai diferensial mempertimbangkan arus sekunder CT sisi primer (I_p), arus sekunder CT sisi sekunder (I_s), arus diferensial ($I_{diff} = |I_p - I_s|$), arus restrain ($I_{restraint}$), dan slope = $I_{diff}/I_{restraint}$ (Alla, 2024).

Transformator arus (CT) merupakan perangkat yang berfungsi untuk mengukur arus listrik pada sistem tenaga, khususnya pada sisi primer dengan level tegangan menengah hingga ekstra tinggi. CT bekerja dengan menurunkan arus besar menjadi arus yang lebih kecil untuk keperluan pengukuran maupun proteksi berdasarkan persamaan $N1.I1 = N2.I2$. Berdasarkan penggunaannya, CT dibagi menjadi dua jenis: CT pengukuran (metering) dan CT proteksi. Tabel 2 dan Tabel 3 menyajikan batas kesalahan masing-masing jenis CT.

CT kelas 5P20 yang umum digunakan pada proteksi trafo berarti batas akurasi 5P dengan faktor arus batas 20 kali arus nominal. CT pengukuran memiliki tingkat saturasi lebih rendah dibanding CT proteksi, sehingga CT pengukuran berfungsi melindungi alat ukur, sedangkan CT proteksi memiliki kemampuan bekerja linier hingga arus gangguan besar.

Sistem kelistrikan PLTU Ombilin 2x100 MW terdiri dari empat level tegangan yaitu 0,4 kV, 6,3 kV, 11,5 kV, dan 150 kV dengan konfigurasi radial. Tabel 4 menyajikan peralatan utama sistem kelistrikan PLTU Ombilin.

Pada saat generator belum bertegangan, suplai listrik unit pembangkit diperoleh dari sistem 150 kV melalui SST. Sistem sinkronisasi menggunakan PT dengan rasio 11500/110 V (sisi generator) dan $150000/\sqrt{3}/110/\sqrt{3}$ V (sisi transmisi) untuk mendeteksi kesesuaian tegangan sebelum CB sinkronisasi di-close.

Setting relai diferensial trafo eksisting PLTU Ombilin (relai DT24 GEC ALSTHOM) adalah: IR/In sisi primer E1 = 0,87, IR/In sisi sekunder E2 = 0,93, persentase slope 25%, ambang operasi minimum 0,2 IR. Input CT sisi HV (1000/1A) dihubungkan delta dan input CT sisi LV (8000/5A, dikonversi ke 1A melalui T50A) dihubungkan langsung untuk penyesuaian sudut fasa vector group YNd1 [34].

Sinkronisasi adalah proses penyatuan dua sistem yang beroperasi dengan tegangan AC. Persyaratan sinkronisasi yang harus dipenuhi meliputi: (1) kesamaan frekuensi dengan toleransi $\pm 0,067$ Hz; (2) kesamaan tegangan dengan toleransi perbedaan $\pm 5\%$; dan (3) kesamaan sudut fasa dengan toleransi $\pm 10^\circ$ (Gozdowiak, 2020). Kegagalan memenuhi syarat-syarat ini akan mengakibatkan lonjakan daya reaktif, arus sinkronisasi yang besar, dan risiko kerusakan mekanis pada generator.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan selama 6 bulan dari 01 Januari 2026 hingga 30 Juni 2026 bertempat di PT. PLN Indonesia Power UBP Ombilin, Jl. Prof. M. Yamin, Talawi, Kota Sawahlunto, Sumatera Barat. Penelitian juga dilakukan di PLTG Tambak Lorok Unit 3.1 di Semarang, Jawa Tengah dan PLTGU Indralaya di Sumatera Selatan, masing-masing selama 3 hari, sebagai lokasi trafo cadangan yang menjadi kandidat.

Metode Pengumpulan Data

Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan studi kasus. Pengumpulan data dilakukan melalui: (1) pengumpulan data spesifikasi trafo eksisting dan trafo kandidat terkait spesifikasi kelistrikan, gambar fisik trafo, wiring diagram metering, dan proteksi; (2) pengumpulan wiring diagram pada panel proteksi trafo, panel sinkronisasi, dan panel kontrol trafo di PLTU Ombilin; (3) pengumpulan data perkiraan durasi pekerjaan pemasangan trafo dari pekerjaan terdahulu yang sejenis; serta (4) pengumpulan data

pengusahaan pembangkit terkait produksi listrik, tarif listrik, dan rencana kinerja operasi pembangkit.

Metode Analisis Data

Langkah analisis data yang dilakukan adalah: (1) identifikasi spesifikasi yang berbeda antara trafo eksisting dengan trafo kandidat; (2) analisis teknis berupa perhitungan dan penyesuaian spesifikasi trafo serta kemungkinan modifikasi yang dilakukan; (3) simulasi menggunakan software PSIM (Power Simulation) untuk memastikan kesesuaian modifikasi vector group; (4) pendataan pekerjaan yang muncul terkait modifikasi dan penyesuaian; (5) penentuan durasi dari semua pekerjaan dan critical time yang mempengaruhi durasi total pemasangan trafo; serta (6) perhitungan Loss of Opportunity untuk masing-masing kandidat trafo.

Simulasi PSIM dirancang dengan memodelkan generator menggunakan 3-phase sinusoidal source dengan parameter tegangan 11.500 V. Trafo 3 fasa dimodelkan dengan 3 buah trafo ideal 1 fasa yang dihubungkan dengan konfigurasi vector group yang sesuai. Probe tegangan dipasang untuk mengukur tegangan antar fasa sisi LV (VGRS, VGST, VGTR) dan sisi HV (VTRS, VTST, VTTR) guna memperoleh bentuk gelombang output trafo dan memvalidasi pergeseran sudut fasa sebelum dan sesudah modifikasi.

Spesifikasi Trafo yang Diteliti

Dari hasil survei lapangan, diperoleh data spesifikasi ketiga trafo yang diperbandingkan sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Spesifikasi Trafo PLTU Ombilin, Trafo 145 MVA, dan Trafo 80 MVA

No.	Spesifikasi	Trafo Eksisting (140 MVA)	Trafo Kandidat (145 MVA)	Trafo Kandidat (80 MVA)
1	Manufacturer	GEC ALSTHOM	MEIDENSHA	JEUMONT-SCHNEIDER
2	Rating (MVA)	140	145	80 *)
3	HV/LV (kV)	157,5/11,5	153,75/11,5	158,6/11 *)
4	Jumlah Fasa	3 Fasa	3 Fasa	3 Fasa
5	Frekuensi (Hz)	50	50	50
6	HV Connection	Star	Star	Star
7	LV Connection	Delta	Delta	Delta
8	Vector Group	YNd1	YNd11 *)	YNd1
9	Cooling	ONAN/ONAF/OFAF	ONAN/OFAF	OFAF
10	Taping Range	±10% (9 tap)	±5% (5 tap)	±5% (5 tap)
11	Impedansi (%)	12,5	11	11,97
12	CT HV Bushing	3×CT 1000/1A; 3×CT 600/5A	3×CT 800/5A *)	3×CT 800/5A; 3×CT 2000/5A; 3×CT 400/5A
13	CT LV Bushing	3×CT 8000/5A	3×CT 10000/5A	Tidak tersedia *)
14	CT HV Neutral	1×CT 600/5A	1×CT 800/5A	1×CT 300/5A
15	Tipe Koneksi HV	Overhead Conductor	Underground Cable *)	Overhead Conductor
16	Tipe Koneksi LV	Overhead Conductor	Overhead Conductor	Overhead Conductor
17	Total Mass (kg)	158.000	134.000	66.000

*) Berbeda dengan trafo eksisting PLTU Ombilin — memerlukan modifikasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Perbedaan Spesifikasi Trafo

Berdasarkan Tabel 1, spesifikasi trafo 145 MVA dan 80 MVA yang berbeda dari trafo eksisting diidentifikasi sebagai berikut: Pada trafo 145 MVA, perbedaan terletak pada vector group (YNd11, sedangkan eksisting YNd1), tipe koneksi HV bushing (underground cable, sedangkan eksisting overhead), rasio dan jumlah CT HV bushing, serta tidak adanya CT proteksi under impedance secara terpisah. Pada trafo 80 MVA, perbedaan utama terletak pada kapasitas (80 MVA vs 140 MVA eksisting), rasio tegangan HV/LV (158,6/11 kV vs 157,5/11,5 kV), dan tidak tersedianya CT pada sisi LV. Perbedaan-perbedaan ini menunjukkan bahwa kedua kandidat trafo tidak dapat langsung dipasang di PLTU Ombilin tanpa modifikasi.

Modifikasi Trafo 145 MVA

a. Penyesuaian Vector Group

Trafo eksisting PLTU Ombilin menggunakan vector group YNd1 (pergeseran fasa $+30^\circ$), sedangkan trafo 145 MVA menggunakan YNd11 (pergeseran fasa -30°). Perbedaan sudut fasa 60° antara kedua trafo ini akan mengakibatkan: (1) kegagalan sinkronisasi pembangkit dengan sistem/grid karena perbedaan sudut fasa; dan (2) relai diferensial berpotensi bekerja pada kondisi operasi normal karena arus diferensial tidak bernilai nol.

Modifikasi dilakukan dengan menukar koneksi fasa secara fisik pada sisi HV dan LV. Pada sisi HV, fasa R dari gardu induk disambungkan ke fasa T trafo, dan fasa T dari gardu induk disambungkan ke fasa R trafo, sementara fasa S tetap. Pada sisi LV, fasa R dari generator disambung ke fasa T trafo dan fasa T generator ke fasa R trafo. Dengan penyesuaian ini, walaupun secara internal trafo memiliki vector group YNd11, secara eksternal hubungan fasa menjadi ekuivalen dengan YNd1 eksisting.

Hasil simulasi PSIM memvalidasi penyesuaian tersebut. Pergeseran sudut pada trafo eksisting diperoleh $\Delta t = 1,66$ ms antara puncak gelombang LV dan HV, sehingga pergeseran sudut $= (1,66/20) \times 360^\circ = 30^\circ$. Sebelum modifikasi koneksi, trafo 145 MVA menghasilkan $\Delta t = -1,66$ ms dengan pergeseran sudut $= -30^\circ$ atau 330° . Setelah modifikasi koneksi, pergeseran sudut kembali menjadi $+30^\circ$, sama dengan trafo eksisting, sehingga sinkronisasi dapat dilakukan dengan aman.

Akibat perubahan sambungan koneksi, diperlukan pergeseran posisi trafo sejauh 460 mm (5% dari panjang pondasi 9.200 mm sesuai kriteria ACI 351.3R-18) agar LV bushing memiliki air clearance yang aman dari busbar generator. Jarak air clearance antar penghantar setelah pergeseran mencapai 319 mm, melebihi persyaratan minimum 125 mm per standar IEC 62271-1 untuk sistem 12 kV. Luas penampang busbar tembaga penghubung sisi LV ditentukan berdasarkan arus maksimal generator (6.904 A) dengan safety factor 125% sehingga rating busbar 8.630 A, menggunakan penampang $2 \times 220 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (total 4.400 mm^2) dengan kerapatan arus 2 A/mm^2 .

Penyesuaian Tipe Koneksi HV Bushing

Trafo 145 MVA menggunakan tipe HV bushing dengan sistem kabel underground, sedangkan trafo eksisting menggunakan terminal overhead. Modifikasi yang dilakukan adalah menambahkan kabel 150 kV XLPE 500 mm^2 sepanjang 240 m ($3 \times 80 \text{ m}$) dari trafo Unit 2 ke GIS (Gas Insulated Switchgear). Arus maksimum pada sisi HV (145 MVA, 150 kV) adalah 558,1 A, sehingga dengan safety factor 125% diperlukan rating kabel 697,6 A. Kabel 150 kV XLPE 500 mm^2 dengan konfigurasi trefoil memiliki kapasitas 715 A, sehingga memenuhi

persyaratan. Kabel ini sekaligus dimanfaatkan untuk rekoneksi fasa pada sisi HV (fasa R trafo ke fasa T sistem dan fasa T trafo ke fasa R sistem).

Penyesuaian CT dan Setting Relai Proteksi

Trafo 145 MVA hanya memiliki 1 set CT pada sisi HV dengan rasio 800/5A, sedangkan eksisting membutuhkan 2 set CT terpisah untuk relai diferensial (1000/1A) dan under impedance (1000/1A). Modifikasi dilakukan dengan menambah aux CT (ACT) berrasio 5/1/1A dengan 2 core pada rangkaian sekunder CT HV. Berdasarkan perhitungan ulang setting relai diferensial dengan trafo 145 MVA: rating arus primer (I_{pn}) = 7.279 A, pada sisi sekunder CT (I_{pns}) = 0,727 A, dan arus sekunder trafo (I_{sns}) = 1,177 A setelah dihubungkan delta untuk penyesuaian sudut fasa (YNd11). Nilai IR/In yang diperbarui: E1 = 0,72 (sisi primer) dan E2 = 1,17 (sisi sekunder). Setting relai earth fault diperbarui menjadi 0,6 A dan relai under impedance menjadi 1 Ω .

Modifikasi Trafo 80 MVA

Penyesuaian Kapasitas

Trafo 80 MVA memiliki kapasitas yang jauh lebih kecil dari generator 137,5 MVA, sehingga dibutuhkan pembatasan beban pembangkit. Pembebanan maksimum trafo dibatasi 80% dari kapasitas = 64 MVA, dan untuk $\cos \phi = 0,85$ diperoleh daya aktif maksimum $P_{maks} = 80\% \times 80 \times 0,85 = 54,4 \text{ MW} \approx 55 \text{ MW}$. Arus maksimum yang diizinkan pada daya 64 MVA dan tegangan 11 kV adalah $I_{max} = 3.359 \text{ A}$. Setting relai arus lebih generator yang difungsikan sebagai pengaman overload trafo diperbarui menjadi $I_s = 2,25 \text{ A}$ (setara 3.600 A pada sekunder trafo dengan daya 68,6 MVA = 85% kapasitas trafo), menggunakan CT 8000/5A pada generator.

Penyesuaian Rasio Tegangan

Rasio tegangan trafo 80 MVA (158,6/11 kV) berbeda dari eksisting (157,5/11,5 kV), sehingga tegangan output saat sinkron menjadi: $V_t = 165.800 \text{ V}$, dengan perbedaan $\Delta V = (165.800 - 150.000) / 150.000 \times 100\% = 10,5\%$, jauh melebihi batas $\pm 5\%$. Perbedaan ini berpotensi menyebabkan lonjakan daya reaktif, arus sinkronisasi yang besar, dan kerusakan pada generator. Modifikasi dilakukan dengan mengubah rasio PT synchron di sisi generator dari tap normal ke posisi -5 V (rasio menjadi 105/110 V). Setelah modifikasi, tegangan sinkron menjadi: $V_t = 158.272 \text{ V}$, dengan $\Delta V = (158.272 - 150.000) / 150.000 \times 100\% = 5,5\%$, mendekati batas toleransi.

Penambahan Ring CT dan Penyesuaian Setting Proteksi

Trafo 80 MVA tidak memiliki CT pada sisi LV sehingga relai diferensial tidak dapat berfungsi. Penambahan ring CT dengan rasio 4500/5A dilakukan pada sisi LV trafo, diletakkan pada steel support yang tidak membebani trafo. Diperlukan pula busbar tembaga tambahan sepanjang ~840 mm (penampang $2 \times 135 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, total 2.700 mm^2) untuk menjangkau LV bushing yang lebih rendah dari busbar generator. Setting relai diferensial diperbarui: $I_{pn} = 4.198 \text{ A}$, $I_{pns} = 0,932 \text{ A}$, $I_{sns} = 0,628 \text{ A}$ (YNd1, delta), nilai IR/In: E1 = 0,93, E2 = 0,63. Setting relai earth fault diperbarui menjadi 1,68 A dan relai under impedance menjadi 3,4 Ω .

Durasi Pemasangan Trafo Pengganti

Setelah diperoleh rincian pekerjaan modifikasi, ditentukan durasi tiap pekerjaan beserta hubungan antar pekerjaan menggunakan metode jalur kritis (critical path method). Tabel 5 menyajikan durasi pekerjaan pemasangan trafo 145 MVA dan Tabel 6 menyajikan hubungan antar pekerjaan beserta jalur kritisnya.

Tabel 5. Durasi Tiap Pekerjaan Pemasangan Trafo 145 MVA

No.	Pekerjaan	Kode	Durasi (Hari)
1	Pembongkaran trafo	A	4
2	Pengiriman trafo	B	21
3	Penempatan dan pemasangan trafo	C	4
4	Pengadaan busbar koneksi sisi LV trafo	D	60
5	Pemasangan busbar koneksi sisi LV trafo	E	6
6	Pengadaan pelat tembaga terminal bushing LV dan flexible connector	F	17
7	Pengadaan steel structure	G	32
8	Pemasangan steel structure	H	7
9	Manufacturing kabel 150 kV	I	61
10	Delivery kabel 150 kV	J	39
11	Penempatan kabel 150 kV	K	2
12	Manufacturing sealing end kabel 150 kV	L	105
13	Delivery sealing end kabel 150 kV	M	39
14	Pembuatan pondasi HV bushing dan cable trench	N	75
15	Pemasangan sealing end kabel 150 kV	O	22
16	Pengujian kabel 150 kV	P	1
17	Pengadaan ACT	Q	7
18	Pemasangan ACT	R	1
19	Perubahan setting dan pengujian relai proteksi	S	5
20	Pengadaan pipa fire protection	T	11
21	Pemasangan pipa fire protection	U	8
22	Pengujian fire protection	V	1
23	Purifikasi minyak isolasi trafo	W	4
24	Tes individu trafo	X	13
25	Sertifikat Laik Bertegangan	Y	1

Tabel 6. Hubungan Antar Pekerjaan dan Jalur Kritis Pemasangan Trafo 145 MVA

Alur	Urutan Pekerjaan	Total Durasi (Hari)
1	A → B → C → K → O → P → Y	55
2	A → B → C → E → Y	36
3	A → B → C → U → V → Y	39
4	A → B → C → W → X → V → Y	48
5	A → B → C → H → E → Y	43
6	G → H → E → Y	46
7	D → E → Y	67
8	F → E → Y	24
9	N → K → O → P → Y	101
10	I → J → K → O → P → Y	126
11 *)	L → M → K → O → P → Y (JALUR KRITIS)	170
12	Q → R → S → T	24
13	T → U → V → Y	21

*) Jalur kritis — menentukan total durasi pemasangan trafo 145 MVA

Jalur kritis pemasangan trafo 145 MVA adalah alur 11 (L → M → K → O → P → Y) dengan total durasi 170 hari. Pekerjaan yang menjadi faktor penentu adalah manufacturing sealing end kabel 150 kV (L = 105 hari) ditambah proses delivery (M = 39 hari), yang berhubungan langsung dengan perbedaan vector group dan tipe HV bushing.

Tabel 7 dan 8 menyajikan durasi pekerjaan serta hubungan antar pekerjaan pemasangan trafo 80 MVA.

Tabel 7. Durasi Tiap Pekerjaan Pemasangan Trafo 80 MVA

No.	Pekerjaan	Kode	Durasi (Hari)
1	Pembongkaran trafo	A	4
2	Pengiriman trafo	B	14
3	Penempatan dan pemasangan trafo	C	3
4	Pengadaan busbar sisi LV trafo	D	13
5	Pemasangan busbar sisi LV trafo	E	3
6	Pengadaan pelat tembaga terminal bushing LV	F	17
7	Pengadaan steel support	G	25
8	Pemasangan steel support	H	4
9	Pengadaan ring CT	I	35
10	Pemasangan ring CT	J	1
11	Pemasangan kabel trip winding temperature	K	1
12	Perubahan tap dan pengujian PT sinkron	L	1
13	Pengadaan ACT	M	7
14	Pemasangan ACT	N	1
15	Perubahan setting dan pengujian relai proteksi	O	7
16	Pemasangan pipa fire protection	P	1
17	Pengujian fire protection	Q	1
18	Purifikasi minyak isolasi trafo	R	3
19	Tes individu trafo	S	13
20	Sertifikat Laik Bertegangan	T	1

Tabel 8. Hubungan Antar Pekerjaan dan Jalur Kritis Pemasangan Trafo 80 MVA

Alur	Urutan Pekerjaan	Total Durasi (Hari)
1	A → B → C → H → J → E → R → S → Q → T	47
2	A → B → C → K → T	23
3	F → E → R → S → Q → T	38
4	D → E → R → S → Q → T	34
5	G → H → J → E → R → S → Q → T	51
6 *)	I → J → E → R → S → Q → T (JALUR KRITIS)	57
7	M → N → O → T	16
8	P → Q → T	3
9	L → T	2

*) Jalur kritis — menentukan total durasi pemasangan trafo 80 MVA

Jalur kritis pemasangan trafo 80 MVA adalah alur 6 ($I \rightarrow J \rightarrow E \rightarrow R \rightarrow S \rightarrow Q \rightarrow T$) dengan total durasi 57 hari. Pekerjaan penentu adalah pengadaan ring CT pada sisi LV ($I = 35$ hari, terdiri dari 28 hari pabrikasi + 7 hari delivery), yang berhubungan dengan tidak tersedianya CT pada sisi LV trafo.

Rekapitulasi Perubahan Setting Relai Proteksi

Berdasarkan seluruh perhitungan setting yang telah dilakukan pada Sub-bab 4.2 dan 4.3, Tabel 10 merangkum perubahan setting relai proteksi untuk trafo eksisting PLTU Ombilin, trafo pengganti 145 MVA, dan trafo pengganti 80 MVA.

Tabel 10. Rekapitulasi Setting Relai Proteksi Trafo PLTU Ombilin

Parameter Setting	Trafo Eksisting (140 MVA)	Trafo Pengganti (145 MVA)	Trafo Pengganti (80 MVA)
Relai Diferensial — IR/In Sisi Primer (E1)	0,87	0,72	0,93
Relai Diferensial — IR/In Sisi Sekunder (E2)	0,93	1,17	0,63
Relai Diferensial — Slope (%)	25%	25%	25%
Relai Diferensial — Hubungan Input CT HV	Delta (YNd1)	Delta (YNd11 → ekivalen YNd1)	Delta (YNd1)
Relai Earth Fault — Setting Arus (Is)	0,84 A	0,625 A → 0,6 A	1,66 A → 1,68 A
Relai Under Impedance — Setting Impedansi (Z)	4 Ω (sisi LV)	0,76 Ω → 1 Ω	3,46 Ω → 3,4 Ω
Relai Arus Lebih Generator — Is batas bawah	5,25 A (8.400 A primer)	Tidak berubah	2,25 A → 3.600 A primer
Rasio CT HV Bushing yang Digunakan	1000/1A	800/5A + ACT (5/1A)	800/5A + ACT (5/1A)
Rasio CT LV Bushing yang Digunakan	8000/5A	10000/5A	Ring CT 4500/5A (tambahan)
Rasio CT HV Neutral Bushing	600/5A	800/5A	300/5A

Dari Tabel 10 terlihat bahwa seluruh perubahan setting relai dapat dilakukan tanpa penggantian unit relai karena masih dalam rentang pengaturan relai yang tersedia. Penggunaan aux CT (ACT) berrasio 5/1A pada kedua kandidat trafo menjadi solusi teknis untuk menyesuaikan besar arus sekunder CT yang berbeda tanpa perlu mengganti CT bushing trafo.

Perbandingan Kehilangan Kesempatan Produksi (Loss of Opportunity)

Perbandingan loss of opportunity (LoO) dilakukan berdasarkan rata-rata produksi PLTU Ombilin satu unit selama operasi normal sebesar 60,363 MW per jam, dengan target produksi bulanan 43.461,36 MWh (24 jam × 30 hari) dan tarif pendapatan Rp 1.602/kWh. Tabel 9 menyajikan perbandingan akumulasi kehilangan kesempatan produksi pada kondisi tanpa trafo pengganti, menggunakan trafo 145 MVA, dan menggunakan trafo 80 MVA.

Tabel 9. Perbandingan Akumulasi Loss of Opportunity Penggunaan Trafo Pengganti (Juta Rupiah)

Bulan ke-	Tanpa Trafo	Trafo 145 MVA	Trafo 80 MVA
1	69.625,10	69.625,10	69.625,10
2	139.250,20	139.250,20	132.906,28
3	208.875,30	208.875,30	139.092,18
4	278.500,39	278.500,39	145.278,07
5	348.125,49	348.125,49	151.463,97
6	417.750,59	394.542,23	157.649,87
7	487.375,69	394.542,23	163.835,77
12 **)	835.501,18	394.542,23	194.765,26
...	...	...	...

Bulan ke-	Tanpa Trafo	Trafo 145 MVA	Trafo 80 MVA
36	2.506.503,55	533.792,42	470.105,23
37	2.576.128,65	533.792,42	539.730,33
...	...	...	...
48	3.342.004,74	533.792,42	607.775,22

**) Bulan ke-12 setiap tahun: unit shutdown overhaul selama 1 bulan (produksi = 0).

Dari Tabel 9, jika unit tidak beroperasi sama sekali, akumulasi kehilangan kesempatan produksi mencapai Rp835,5 miliar dalam 1 tahun dan Rp3.342,0 miliar dalam 4 tahun. Jika menggunakan trafo 145 MVA, unit pembangkit dapat berproduksi penuh setelah 170 hari (5 bulan 20 hari) proses pemasangan, dengan total LoO selama pemasangan sebesar: $170 \times 24 \times 60,363 \times 1.602 = \text{Rp}394.542.226.080$. Setelah trafo beroperasi, akumulasi LoO berhenti bertambah (kecuali saat overhaul tahunan). Sementara itu, trafo 80 MVA membutuhkan durasi pemasangan lebih singkat yaitu 57 hari dengan LoO pemasangan sebesar: $57 \times 24 \times 60,363 \times 1.602 = \text{Rp}132.287.687.568$. Namun, setelah beroperasi, LoO terus bertambah sebesar $(60,363 - 55) \times 24 = 127,2$ MWh per hari akibat keterbatasan kapasitas trafo.

Terlihat bahwa penggunaan trafo 80 MVA memiliki LoO yang lebih rendah dari bulan ke-1 sampai bulan ke-36 (LoO = Rp470.105.230.000). Setelah melewati bulan ke-36, kondisi berbalik di mana trafo 145 MVA memberikan LoO yang lebih rendah (Rp533.792.420.000) dibandingkan trafo 80 MVA (Rp539.730.330.000). Ini berarti penggunaan trafo 80 MVA lebih menguntungkan jika digunakan kurang dari 3 tahun, sedangkan untuk penggunaan lebih dari 3 tahun, trafo 145 MVA lebih direkomendasikan secara ekonomis.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis aspek teknis dan ekonomi penggunaan trafo pengganti pada PLTU Ombilin yang mengalami gangguan pada transformator utama 140 MVA. Dari analisis teknis, penggunaan trafo 145 MVA memerlukan modifikasi utama berupa: (1) perubahan koneksi fasa sisi HV dan LV untuk menyesuaikan vector group YNd11 menjadi ekuivalen YNd1 yang divalidasi melalui simulasi PSIM dengan pergeseran sudut fasa $+30^\circ$; (2) penambahan kabel 150 kV XLPE 500 mm² sepanjang 240 m untuk penyesuaian tipe HV bushing dari underground ke overhead; (3) penambahan aux CT rasio 5/1/1A dan perubahan setting relai diferensial ($E1=0,72$; $E2=1,17$), earth fault ($I_s=0,6$ A), dan under impedance ($Z=1 \Omega$). Penggunaan trafo 80 MVA memerlukan modifikasi berupa: (1) pembatasan beban pembangkit hingga 55 MW dengan perubahan setting relai arus lebih generator ($I_s=2,25$ A); (2) penyesuaian rasio PT synchron ke posisi -5 V agar perbedaan tegangan sinkronisasi mendekati $\pm 5\%$; (3) penambahan ring CT sisi LV rasio 4500/5A beserta steel support dan busbar tambahan; serta (4) perubahan setting relai diferensial ($E1=0,93$; $E2=0,63$), earth fault ($I_s=1,68$ A), dan under impedance ($Z=3,4 \Omega$). Dari analisis ekonomi, kehilangan kesempatan produksi jika unit tidak beroperasi mencapai Rp835,5 miliar dalam 1 tahun dan Rp3.342,0 miliar dalam 4 tahun. Berdasarkan durasi pemasangan, trafo 80 MVA lebih menguntungkan dengan waktu 57 hari (LoO = Rp132,3 miliar) dibandingkan trafo 145 MVA dengan 170 hari (LoO = Rp394,5 miliar). Namun, dengan mempertimbangkan keterbatasan kapasitas trafo 80 MVA selama operasi, trafo 145 MVA menjadi lebih menguntungkan secara ekonomi apabila digunakan lebih dari 3 tahun. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan analisis load flow, transient stability, dan short circuit untuk mengetahui pengaruh

penggunaan trafo pengganti terhadap sistem secara lebih komprehensif, serta analisis risiko logistik dan skenario percepatan pengadaan material yang dapat mempengaruhi keputusan pemilihan trafo.

REFERENSI

- Alla, M. (2024). *IEEE Power System Relaying and Control (PSRC) Committee Working Group J20: Practices for Generator Synchronizing Systems*. IEEE.
- Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., & Nugroho, V. H. (2024). Energi listrik berkelanjutan: Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia. *JIMESE*, 1(2), 119–139.
- Antoro, G. D., & Syakur, A. (2020). Sinkronisasi Trafo Unit Gardu Bergerak (UGB) dengan Trafo Distribusi di Lingkungan PLN. *Jurnal Teknik Elektro Terapan*, 9(3), 11–16.
- Cong, Y. (2022). On the use of Real-Time transformer temperature estimation for improving transformer operational tripping Schemes. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 143, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108420>
- Daniel, J., Ruiz, M., & Eduardo, C. (2024). Economic growth and electricity consumption: Fresh evidence of panel data for LAC. *Heliyon*, 10(September 2023). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33521>
- Diningsih, D. R., Situmeang, U., & Zulfahri. (2022). Pengaruh Pembebanan Terhadap Umur Transformator Daya #1 150/20 kV Pada Gardu Induk Teluk Lembu. *SainETIN*, 7(1), 1–6. <https://doi.org/10.31849/sainetin.v7i1.6223>
- Dionova, B. W. (2022). Distribution Transformer Synchronization Simulation and Implementation with Dyn5 and Dyn11 Vector Groups using the MATLAB Simulink and TTR Test. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 3.
- Dreidy, M., & Salah, W. A. (2025). Development of a synchronization system and frequency control scheme for the smooth reconnection of high penetration isolated photovoltaic distribution networks. *Energy Conversion and Management: X*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101398>
- Endefi, A. (2020). Rancangbangun Alat Sinkronisasi Generator Berbasis Mikrokontroler. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 1(2), 110–115.
- Glover, J. D., Overbye, T. J., & Sarma, M. S. (2017). *Power System Analysis and Design* (6th ed.). Cengage Learning.
- Gozdowiak, A. (2020). Faulty Synchronization of Salient Pole Synchronous Hydro Generator. *Energies*, 13.
- Helmy, B. M., & Agung, A. I. (2017). Analisis Energi Hilang Akibat Gangguan Pada Pembangkit di PT. PJB Unit Pembangkitan Brantas PLTA Siman Malang. *Jurnal Teknik Elektro*, 6(2), 129–135.
- Husodo, B. Y., & Firmansyah. (2016). Analisis Vector Group pada Hubungan Paralel Transformator Unit Gardu Bergerak. *Jurnal Teknologi Elektro, Universitas Mercu Buana*, 7(3), 130–139.
- Indarto, A., Aziz, M., & Hudaya, C. (2020). Study of material characteristics of core and winding to minimize losses on power transformer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/673/1/012008>
- Indra, M. H., Y. S., H., & Priyadi, I. (2022). Pengujian Tahanan Isolasi Pada Transformator Distribusi 160 kVA Di PT. PLN (PERSERO) UP3 Bengkulu. *Jurnal Amplifier*, 12(2), 8–15.
- Karamallah, R., & Suwitno. (2021). Analisa Efisiensi Turbin Uap Berbahan Bakar Fiber dan Cangkang Sawit pada Boiler di PT. Tri Bakti Sarimas untuk Produksi Energi Listrik. *Jom FTEKNIK*, 8(2), 1–8.
- Khosa, I. (2022). Financial Hazard Assessment for Electricity Suppliers Due to Power Outages:

- The Revenue Loss Perspective. *Energies*.
- Mustari, Kurniawan, R., & Ramlan. (2024). Analisis efisiensi transformator dalam pembangkit listrik di PT. PLN Indonesia Power UPDK Keramasan. *Jurnal Penelitian Sains*, 26(2), 137–142.
- Paulus, Y. S., & Sudiarto, B. (2025). Studi Pengaruh Pemilihan Rasio CT Terhadap Arus Hubung Singkat dan Potensi Saturasi pada Penyulang 20 kV Gardu Induk New Jakabaring. *Jurnal Surya Energy*, 10(1), 11–23.
- Purba, D. A., & Gani, U. A. (2024). Study of Siemens 7UT86 Percentage Differential Relay as Protection of 60 MVA Power Transformer at 150 GIS kV Dayauh Kolot. *Telectrical*, 2(2), 208–223. <https://doi.org/10.26418/telectrical.v2i2.84598>
- Sholeh, I., Situmeang, U., & Monice. (2021). Studi Peramalan Beban Pada Gardu Induk Teluk Lembu UIP3BS UPT Pekanbaru PT. PLN (PERSERO). *SENKIM*, 1(1), 11–26.
- Shuai, M. (2018). Review on Economic Loss Assessment of Power Outages. *Procedia Computer Science*, 130, 1158–1163. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.151>
- Sorrentino, E., Gupta, N., & Oliveros, E. (2017). Methods for differential protection of Scott transformers. *Electric Power Systems Research*, 147, 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.02.018>
- Suharno, D. N., & Setiawan, I. (2020). Rancang Bangun Simulator Sinkronisasi Generator Sinkron 3 Fasa Semiotomatis Berbasis Mikrokontroler Arduino. *Media Pengembangan Ilmu Dan Aplikasi Teknik*, 19(2), 161–170.
- Tamam, I. B., Koerniawan, T., Ichsan, M. N., & Elektro, T. (2017). Analisa Pembangunan Saluran Transmisi 275 kV antara GI Kiliranjao dan GI Payakumbuh. *Jurnal Energi Kelistrikan*, 9(1), 93–99.
- Tamilselvi, S. (2026). Hybrid transformer overload protection scheme integrating real-time thermal imaging and numerical relay coordination. *Electric Power Systems Research*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112188>
- Wang, J. (2022). Cooperative overload control strategy of power grid-transformer considering dynamic security margin of transformer in emergencies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108098>
- Wulung, A. (2024). Comprehensive Study on Power Transformer Fault Detection and Diagnosis Post-Cianjur Earthquake: A Case Investigation. *International Journal of Electrical Engineering and Informatics*, 16(1), 1–17. <https://doi.org/10.15676/ijeei.2024.16.1.1>
- Yogi, T. T., & Dedeng, H. (2014). Pemasangan Rele Diferensial Pada Trafo Daya Dengan Vector Group Yang Berbeda. *Jurnal Teknologi*, 6(1).
- Zambrano-monserrate, M. A. (2026). The economic impact of power outages in developing countries: A quasi-experimental analysis. *Energy Economics*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.109063>