

FAILURE ANALYSIS OF NEUTRAL GROUNDING RESISTOR IN POWER TRANSFORMER

Analisis Kegagalan Netral Grounding Resistor Pada Transformator Daya Di PLTD

Mikhael Richardo Wahani ¹⁾, Lily Stiowaty Patras ²⁾, Novi Margritje Tulung ³⁾

Dept. of Electrical Engineering, Sam Ratulangi University Manado, Kampus Bahu St., 95115, Indonesia

e-mails : mikhaelwahani@gmail.com, patraslily48@gmail.com, novi.tulung@unsrat.ac.id

Received: [date]; Revised: [date]; Accepted: [date]

Neutral Grounding Resistor (NGR) is one of the important components in the transformer protection system in Diesel Power Plants (PLTD), especially in maintaining system stability when a ground fault occurs. This study analyzes the causes of NGR failure in Laiwui PLTD which resulted in a blackout for more than 12 hours on Obi Island. Based on the results of technical calculations, it is known that the fault current exceeded the NGR design capacity of 300 A, with an actual current value reaching 442 A and heat energy of 54.5 MJ. The conductor temperature increased to 2000°C, causing the cable to burn and the grounding system to fail. In addition, the NGR resistance value decreased from 39.8 Ω to 27.9 Ω, indicating internal degradation. Calculations of single-phase to ground fault current, capacitive current, and transformer impedance support the conclusion that the combination of current surges, resistance degradation, and cable durability mismatches are the main factors in system failure. These results are expected to be a reference in improving the reliability of protection systems in similar installations.

Keywords: *Neutral Grounding Resistor, fault current, PLTD, system failure, protection reliability.*

Abstrak — Neutral Grounding Resistor (NGR) merupakan salah satu komponen penting dalam sistem proteksi transformator di Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), khususnya dalam menjaga kestabilan sistem saat terjadi gangguan hubung tanah. Penelitian ini menganalisis penyebab kegagalan NGR pada PLTD Laiwui yang mengakibatkan blackout selama lebih dari 12 jam di Pulau Obi. Berdasarkan hasil perhitungan teknis, diketahui bahwa arus gangguan melebihi kapasitas desain NGR sebesar 300 A, dengan nilai arus aktual mencapai 442 A dan energi panas sebesar 54,5 MJ. Suhu konduktor meningkat hingga 2000°C, menyebabkan kabel terbakar dan sistem pentanahan gagal berfungsi. Selain itu, nilai tahanan NGR menurun dari 39,8 Ω menjadi 27,9 Ω, menunjukkan adanya degradasi internal. Perhitungan arus gangguan satu fasa ke tanah, arus kapasitif, dan impedansi trafo mendukung kesimpulan bahwa kombinasi lonjakan arus, penurunan tahanan, dan ketidaksesuaian daya tahan kabel menjadi faktor utama kegagalan sistem. Hasil ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam peningkatan keandalan sistem proteksi di instalasi sejenis.

Kata kunci : *Neutral Grounding Resistor, arus gangguan,*

PLTD, kegagalan sistem, keandalan proteksi.

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik merupakan infrastruktur utama yang mendukung sektor ekonomi, sosial, dan teknologi. Sistem ini terdiri dari sejumlah pusat pembangkit listrik seperti PLTA, PLTU, PLTS, dan PLTD, akan disalurkan melalui jaringan transmisi sebelum didistribusikan ke pelanggan melalui sistem distribusi. Pada PLTD, energi listrik dihasilkan dari mesin diesel yang mengubah energi bahan bakar menjadi energi listrik, yang kemudian dapat langsung didistribusikan ke masyarakat atau melalui transformator untuk penyesuaian tegangan sebelum digunakan oleh konsumen. Dalam sistem tenaga listrik yang menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), transformator memainkan peran penting dalam menyesuaikan tegangan sebelum didistribusikan ke masyarakat. Agar transformator dapat beroperasi dengan aman dan andal, diperlukan sistem proteksi dan grounding titik netral yang sesuai. Proteksi transformator pada PLTD bertujuan untuk mencegah gangguan listrik yang dapat merusak peralatan dan mengganggu kontinuitas pasokan listrik. Beberapa proteksi yang umum digunakan meliputi proteksi arus lebih (OCR) untuk mengatasi gangguan hubung singkat atau beban berlebih, proteksi diferensial untuk mendeteksi ketidakseimbangan arus akibat gangguan internal, serta proteksi tegangan lebih guna melindungi trafo dari lonjakan tegangan mendadak. Selain itu, trafo yang menggunakan sistem pendingin minyak umumnya dilengkapi dengan relay Buchholz, yang berfungsi mendeteksi adanya gas akibat gangguan internal seperti kegagalan isolasi atau percikan listrik dalam tangki trafo.

Selain proteksi, grounding titik netral transformator pada PLTD juga memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan tegangan dan mencegah gangguan hubung tanah yang dapat menyebabkan lonjakan arus. Beberapa metode grounding yang diterapkan pada sistem PLTD antara lain solid grounding, di mana titik netral dihubungkan langsung ke tanah untuk memastikan proteksi maksimal pada sistem dengan beban seimbang, serta resistance grounding, yang menggunakan resistor untuk membatasi arus gangguan sehingga mengurangi risiko kerusakan peralatan akibat lonjakan tegangan. Penerapan sistem proteksi dan grounding

yang tepat sangat penting untuk meningkatkan keandalan operasional PLTD, mencegah gangguan pada jaringan distribusi, serta memastikan pasokan listrik tetap stabil dan aman bagi pelanggan.

Dan NGR yang ada di PLTD Laiwui terjadi permasalahan di bagian kelistrikan nya sehingga terjadi pemadaman di pulau Obi lebih dari 12 jam. Dengan demikian saya sebagai mahasiswa yang terkait dengan sistem tenaga, ingin mengkaji bagaimana dan bisa mengatasi permasalahan ini, sehingga saya tertarik untuk menjadikan masalah tersebut sebagai tugas akhir dengan judul “ANALISIS KEGAGALAN NETRAL GROUNDING RESISTOR PADA TRANSFORMATOR DAYA DI PLTD LAIWUI TERNATE “.

A. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)



Gambar 1 Tempat PLTD Laiwui

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) adalah salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama untuk menghasilkan energi listrik. Dalam sistem ini, energi kimia dari bahan bakar fosil—umumnya solar—diubah menjadi energi mekanik melalui proses pembakaran internal di dalam mesin diesel. Energi mekanik tersebut kemudian digunakan untuk memutar rotor generator, yang selanjutnya menghasilkan energi listrik berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik.

Prinsip kerja PLTD dimulai saat bahan bakar disemprotkan dan dikompresi dalam ruang bakar mesin diesel, menghasilkan ledakan yang mendorong piston dan menghasilkan putaran poros. Putaran ini diteruskan ke rotor generator yang berada dalam medan magnet stator. Akibat pergerakan rotor di dalam medan magnet, terjadi perubahan fluks magnetik yang memotong konduktor stator dan menghasilkan tegangan listrik sesuai hukum Faraday. Tegangan ini kemudian digunakan untuk memasok beban atau disalurkan ke sistem distribusi tenaga listrik.

B. Transformator



Gambar 2 Transformator PLTD Laiwui

Transformator, atau sering disebut trafo, adalah perangkat listrik yang berfungsi untuk mentransfer daya dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Berdasarkan [9], trafo merupakan perangkat statis yang bekerja menggunakan prinsip induksi elektromagnetik, di

mana arus listrik pada kumparan primer menciptakan medan magnet yang kemudian menginduksi tegangan pada kumparan sekunder, memungkinkan perubahan daya dalam sistem AC dengan tegangan dan arus yang berbeda pada frekuensi tertentu.

C. Komponen Utama Transformator

- 1) Inti Besi, berfungsi sebagai jalur magnetik untuk mengalirkan fluks elektromagnetik yang dihasilkan oleh kumparan primer ke kumparan sekunder. Inti ini biasanya terbuat dari lempengan besi silikon yang dilaminasi untuk mengurangi rugi-rugi eddy current (arus pusar) dan meningkatkan efisiensi transformasi energi.
- 2) Kumparan, merupakan gulungan kawat tembaga atau aluminium yang berfungsi untuk menginduksi tegangan listrik dalam proses transformasi daya. Kumparan ini terdiri dari kumparan primer, yang terhubung ke sumber tegangan dan menghasilkan medan magnet, serta kumparan sekunder, yang menerima induksi dan menghasilkan tegangan keluaran. Perbandingan jumlah lilitan pada kumparan primer dan sekunder menentukan besar perubahan tegangan sesuai dengan prinsip transformasi.
- 3) Tangki konservator, digunakan untuk menyimpan cadangan minyak isolasi pada transformator, memungkinkan ekspansi dan kontraksi minyak akibat perubahan suhu selama operasi. Tangki ini dilengkapi dengan breather (silica gel) yang berfungsi untuk menyaring kelembaban udara sebelum masuk ke dalam sistem, mencegah kontaminasi minyak isolasi. Dengan adanya tangki konservator, kualitas minyak dapat tetap terjaga, sehingga dapat memperpanjang umur transformator.
- 4) Sistem pendingin, pada transformator memiliki peran krusial dalam menjaga suhu operasi tetap stabil dan aman. Kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi daya dalam transformator, serta kondisi suhu lingkungan sekitar dapat memengaruhi kenaikan suhu selama operasi. Apabila suhu ini terlalu tinggi, isolasi kertas di dalam trafo bisa mengalami kerusakan. Untuk mencegah hal tersebut, transformator dilengkapi dengan sistem pendingin yang berfungsi mengalirkan panas keluar dari bagian dalam trafo. Minyak isolasi digunakan sebagai media pendingin, menyerap panas dari lilitan, lalu mengalirkannya melalui sirkulasi alami yang terjadi karena perbedaan suhu. Untuk meningkatkan efektivitas pendinginan, trafo biasanya dilengkapi dengan sirip-sirip radiator dan kipas. Apabila diperlukan proses pelepasan panas yang lebih cepat, digunakan sistem pendingin paksa (forced cooling) yang mengandalkan pompa untuk mensirkulasikan minyak, udara, atau air secara aktif.
- 5) Bushing, berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dan tangki transformator. Dimana sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, Bushing merupakan keluaran dari belitan menuju keluar tangki transformator yang dilengkapi dengan isolasi berupa keramik.
- 6) Tap changer, adalah komponen yang digunakan

untuk mengatur tegangan keluaran transformator dengan mengubah jumlah lilitan di kumparan primer atau sekunder. Ada dua jenis tap changer, yaitu Off Load Tap Changer (OLTC), yang hanya bisa dioperasikan saat transformator dalam kondisi mati, dan On Load Tap Changer (OLTC), yang dapat diubah saat trafo sedang beroperasi tanpa mengganggu pasokan daya. Tap changer sangat penting untuk menjaga kestabilan tegangan pada sistem tenaga listrik.

- 7) Sistem pernapasan, pada transformator berfungsi untuk mengatur sirkulasi udara yang masuk dan keluar dari tangki konservator guna menjaga kualitas minyak isolasi. Saat suhu minyak berubah akibat beban kerja transformator, minyak akan mengalami ekspansi dan kontraksi, sehingga udara dari luar akan masuk atau keluar melalui sistem pernapasan. Komponen utama dalam sistem ini adalah Breather (Silica Gel Breather), yang berisi butiran silika gel sebagai penyerap kelembaban udara sebelum masuk ke dalam tangki konservator. Silika gel ini biasanya berwarna biru atau jingga saat kering dan berubah menjadi merah muda saat jenuh oleh kelembaban, sehingga perlu diganti atau dikeringkan kembali agar tetap efektif. Dengan adanya sistem pernapasan, minyak isolasi dapat terhindar dari kontaminasi kelembaban dan partikel kotoran, sehingga kualitas isolasi tetap terjaga dan kinerja transformator lebih optimal serta tahan lama.

D. Grounding (Pentanahan)

Sistem pentanahan (grounding) berfungsi utama untuk melindungi peralatan listrik dari lonjakan tegangan, terutama yang disebabkan oleh sambaran petir. Di samping itu, grounding juga berperan dalam menghubungkan komponen atau rangkaian listrik secara langsung ke tanah. Karena perannya yang penting dalam menjaga keselamatan dan kestabilan sistem, grounding menjadi elemen krusial dalam infrastruktur kelistrikan. [19]

Oleh sebab itu, nilai standar resistansi pentanahan ditetapkan dengan batas maksimum hambatan antara kabel dan tanah sebesar 5 ohm, sebagaimana diatur dalam PUIL 2011 yang masih digunakan hingga saat ini. Untuk menjelaskan pentingnya nilai tahanan pentanahan yang rendah, prinsip dasar kelistrikan seperti Hukum Ohm dapat digunakan sebagai acuan.[10]

E. Neutral Grounding Resistor (NGR)

Neutral Grounding Resistor (NGR) merupakan perangkat yang dipasang pada titik netral generator dan dihubungkan ke tanah melalui suatu tahanan [15]. Tujuannya adalah untuk membatasi arus gangguan tanah (ground fault) agar tidak terlalu besar saat terjadi hubungan singkat ke tanah. Dengan pembatasan ini, arus gangguan tetap berada dalam kisaran yang dapat dideteksi oleh sistem proteksi, seperti relay arus tanah. Hal ini memungkinkan relay bekerja secara tepat dalam mengisolasi gangguan, sehingga peralatan terlindungi dan kontinuitas sistem tetap terjaga.

F. Low Resistansi dan High Resistansi

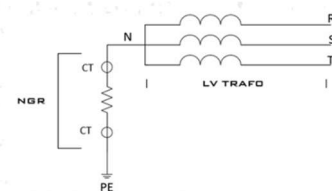
Dalam sistem kelistrikan, metode pentanahan memainkan peran penting dalam menjaga keandalan dan

keamanan instalasi. Sistem NGR terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu Low Resistance Grounding (LRG) dan High Resistance Grounding (HRG). Keduanya memiliki prinsip kerja yang berbeda tergantung pada kebutuhan sistem — apakah lebih mengutamakan proteksi cepat terhadap gangguan atau kontinuitas operasi yang tinggi. [17]

- 1) Low Resistance Grounding (LRG) bekerja dengan cara memutus sistem (trip) secara otomatis saat terjadi gangguan satu fasa ke tanah. Ini memastikan bahwa arus gangguan segera dieliminasi untuk mencegah kerusakan pada peralatan. [17]
 - Arus gangguan: 100 – 1000 A
 - Proteksi: Zero-sequence CT & Ground Fault Relay
 - Trip point relay: 5 – 20% dari arus maksimum
 - Durasi kerja resistor: 10 detik
 - Suhu maksimum resistor: 760 °C
 - Tegangan sistem umum: 2.4 – 34.5 kV
- 2) High Resistance Grounding (HRG) dirancang untuk tetap mempertahankan operasi sistem meskipun terjadi gangguan ke tanah. Sistem ini tidak langsung trip, melainkan hanya memberikan alarm, sehingga sangat ideal untuk sistem kritis yang tidak boleh mengalami penghentian mendadak. [17]
 - Arus gangguan: 5 – 10 A
 - Proteksi: Zero-sequence CT & Ground Fault Relay
 - Alarm point relay: 10 – 20% dari arus gangguan
 - Durasi kerja resistor: Kontinu (continuous duty)
 - Suhu maksimum resistor: 375 °C
 - Ketentuan: Arus resistor > arus kapasitif sistem, namun < 8 A

G. Rangkaian NGR

Rangkaian Neutral Grounding Resistor (NGR) terdiri dari dua komponen utama, yaitu trafo arus dan resistor. Pada sistem ini, sisi sekunder trafo arus dikonfigurasi dalam bentuk bintang (Y) dan dihubungkan ke tanah melalui resistor pembatas [13]. Dua buah trafo arus dipasang dalam rangkaian, masing-masing terletak sebelum dan sesudah resistor. Kedua trafo ini berfungsi untuk mendeteksi arus gangguan satu fasa ke tanah dan mengirimkan sinyal ke sistem relay proteksi. Relay akan mengukur besar arus berdasarkan sinyal dari sisi sekunder trafo arus, dan akan aktif jika arus di sisi primer melebihi batas yang telah ditentukan. Umumnya, rasio trafo arus yang digunakan berkisar antara 150 hingga 300 A pada sisi primer terhadap 1 A di sisi sekunder.



Gambar 3 Rangkaian NGR

Rangkaian ini menunjukkan sistem pentanahan titik netral pada LV Trafo (Low Voltage Transformer) menggunakan NGR dan dilengkapi dengan trafo arus (CT) sebagai sistem deteksi proteksi.

Bagian-bagian Rangkaian:

1) LV Trafo

- Output 3 fasa: R, S, T (fase-fase) dan N (netral).
- Gulungan sekunder trafo dihubungkan dalam konfigurasi Y (bintang), sehingga memiliki titik netral (N).

2) NGR (Neutral Grounding Resistor)

- Terhubung dari titik netral (N) ke ground (PE) melalui sebuah resistor.
- Fungsinya untuk membatasi arus gangguan tanah jika terjadi hubung singkat fasa ke tanah.

3) CT (Current Transformer)

- Ada dua buah CT dipasang:
 - Satu CT sebelum resistor = mendeteksi arus yang keluar dari netral.
 - Satu CT setelah resistor = mendeteksi arus menuju tanah.
- CT berfungsi untuk mengukur arus gangguan dan mengirimkan sinyal ke relay proteksi.

4) PE (Protective Earth)

- Titik akhir pentanahan, tempat arus gangguan dilepaskan ke bumi.

H. Gangguan Hubung Singkat

Gangguan satu fasa ke tanah merupakan salah satu jenis gangguan yang paling sering terjadi dalam sistem tenaga listrik. Gangguan ini terjadi ketika salah satu fasa terhubung langsung ke tanah, sehingga menyebabkan aliran arus gangguan melalui titik netral atau melalui tahanan pentanahan seperti Netral Grounding Resistor (NGR). Dalam kondisi ini, arus netral yang normalnya kecil atau mendekati nol akan meningkat secara signifikan akibat ketidakseimbangan sistem.

1. Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Gangguan ini merupakan gangguan yang tak simetris sehingga memerlukan komponen simetris yaitu urutan negatif dan nol. Persamaannya dapat ditulis:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (1)$$

Dimana :

I_{a1}, I_{a2}, I_{a0} = Arus fasa urutan positif, negative, dan nol

Z_1, Z_2, Z_0 = Impedansi urutan positif, negative, dan nol

V_f = Tegangan gangguan

Jika gangguan terjadi pada fasa a maka arus ditulis

$$I_{a1} = 3 \times I_{a1} \quad (2)$$

$$I_b = I_c = 0 \quad (3)$$

Untuk arus transienya dapat ditulis

$$I_a = I_{a1} \times I_{FL} \quad (4)$$

2. Arus Netral

Jika Terjadi gangguan ke tanah, maka akan ada arus yang masuk ke sisi netral dan bisa menyebabkan ketidakseimbangan beban antara ketiga fasa, kita bisa menghitung arus yang masuk ke sisi netral menggunakan persamaan berikut ini :

$$I_N = \sqrt{I_{L1}^2 + I_{L2}^2 + I_{L3}^2 - (I_{L1} \times I_{L2}) - (I_{L2} \times I_{L3}) - (I_{L3} \times I_{L1})} \quad (5)$$

Dimana :

I_N = Arus Netral (A)

I_{L1} = Arus Pada Fasa R (A)

I_{L2} = Arus Pada Fasa S (A)

I_{L3} = Arus Pada Fasa T (A)

3. Arus Beban Penuh

Untuk menghitung arus beban penuh, langkah awal yang perlu dilakukan adalah menentukan nilai MVAbase serta besar beban dari masing-masing konsumen pada setiap jaringan distribusi di gardu induk. Setelah itu, perhitungan arus dapat dilakukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$I_{FL} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot kV} \quad (6)$$

Dimana :

I_{FL} = Arus Beban Penuh (A)

P = Beban maks. Di PLTD (MVA)

kV = Tegangan (kV)

I. Energi Panas

Energi panas merupakan salah satu parameter penting dalam analisis gangguan listrik, karena berperan langsung dalam menentukan seberapa parah dampak termal terhadap peralatan. Oleh karena itu, pembatasan arus dan durasi gangguan menjadi kunci untuk menjaga keamanan dan keandalan sistem tenaga Listrik, maka kita bisa menghitung energi panas tersebut dengan menggunakan persamaan :

$$E = I^2 \times R \times t \quad (7)$$

Dimana :

E = Energi Panas (J)

I = Arus Listrik (A)

R = Nilai Tahanan (Ohm)

t = Waktu (s)

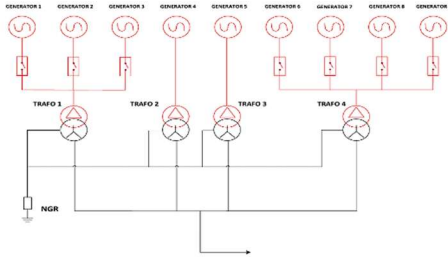
II. METODE PENELITIAN

Untuk melakukan analisis terhadap kegagalan sistem pentanahan di PLTD Laiwui, tahap awal yang dilakukan adalah mengumpulkan data teknis dari komponen utama sistem proteksi, yaitu Neutral Grounding Resistor (NGR). Pemahaman terhadap konfigurasi dan karakteristik NGR menjadi dasar dalam melakukan berbagai perhitungan teknis, seperti analisis arus gangguan, energi panas yang dihasilkan, serta evaluasi performa sistem grounding secara keseluruhan. Data yang diperoleh kemudian dijadikan acuan dalam proses penghitungan guna mengidentifikasi penyebab utama terjadinya kegagalan sistem.

A. Data Penelitian

1. Data Peralatan

Berikut ini merupakan One Line Diagram yang ada di Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Laiwui di tahun 2024



Gambar 4 SLD PLTD Laiwui 2024

Setelah itu di bawah merupakan data spesifikasi dari NGR yang ada di PLTD Laiwui

Tabel 1 Data Spesifikasi NGR

Nama	Keterangan
Merek/Tipe	GR-0300
Nomor Seri	001202502
Tegangan Sistem	20 kV / $\sqrt{3}$
Resistansi	40 Ω
Arus	300A
Durasi Operasi	10 Detik
CT Ratio 1	300 / 5 ; 5P10 ; 15 VA
CT Ratio 2	-
BIL	24 / 50 / 125 kV
Degree of Protection	IP 23

Dan untuk spesifikasi - spesifikasi Trafo nya sebagai berikut

Tabel 2 Data Spesifikasi Trafo 1

Nama	Keterangan
Merek/Tipe	Starlite / T630 N°54
Nomor Seri	1120522125-005
Daya	630 kVA
HV	20.000 V
LV	400 V
Frekuensi	50 Hz
Tahun Pembuatan	2011
Jenis Minyak	Mineral Oil
Sistem Pendingin	ONAN (Oil Natural Air Natural)

Tabel 3 Data Spesifikasi Trafo 2

Nama	Keterangan
Merek/Tipe	Trafoindo
Nomor Seri	171303093
Daya	315 kVA
HV	20.000 V
LV	400 V
Frekuensi	50 Hz
Tahun Pembuatan	2017
Jenis Minyak	Mineral Oil
Sistem Pendingin	ONAN (Oil Natural Air Natural)

Tabel 4 Data Spesifikasi Trafo 3

Nama	Keterangan
Merek/Tipe	Trafoindo
Nomor Seri	173310084
Daya	315 kVA
HV	20.000 V
LV	400 V
Frekuensi	50 Hz
Tahun Pembuatan	2017
Jenis Minyak	Mineral Oil
Sistem Pendingin	ONAN (Oil Natural Air Natural)

Tabel 5 Data Spesifikasi Trafo 4

Nama	Keterangan
Merek/Tipe	Trafoindo
Nomor Seri	163318125
Daya	630 kVA
HV	20.000 V
LV	400 V
Frekuensi	50 Hz
Tahun Pembuatan	2018
Jenis Minyak	Mineral Oil
Sistem Pendingin	ONAN (Oil Natural Air Natural)

2. Data Pemeliharaan dan Gangguan NGR dan Impedansi Trafo

Berikut adalah data pemeliharaan sebelum terjadinya gangguan, juga data saat setelah terjadinya gangguan dan juga data impedansi ke empat trafo yang ada.

Tabel 6 Data Pemeliharaan NGR

Parameter	Nilai
Arus	6.3A
Tahanan NGR	39.8 Ω
Tahanan Grounding	0.98Ω

Tabel 7 Data Gangguan NGR

Parameter	Nilai
Arus	442A
Tahanan NGR	27,9 Ω
Tahanan Grounding	5.6Ω

Tabel 8 Data Impedansi

Parameter	Nilai
Urutan Positif	-j0.013
Urutan Negatif	-j0.013
Urutan Nol	-j0.013

B. Perhitungan Arus Netral

Dengan menggunakan data pada tabel 7 kita bisa menghitung arus netral menggunakan persamaan 5 :

$$I_N = \sqrt{442^2 + 0^2 + 0^2 - (442 \times 0) - (0 \times 0) - (0 \times 442)}$$

$$I_N = \sqrt{195364 + 0 + 0 - 0 - 0 - 0}$$

$$I_N = 442 \text{ A}$$

Dengan perhitungan di atas nilai arus netral sebesar 442A.

C. Energi Panas

Nilai energi panas dapat kita hitung dengan menggunakan persamaan 7 dan juga menggunakan data yang di tabel 1,6 dan 7.

1. Normal

$$E = 300^2 \times 40 \times 10$$

$$E = 90000 \times 40 \times 10$$

$$E = 36.000.000 \text{ Joule}$$

Dengan perhitungan di atas maka nilai energi panas adalah 36.000.000 Joule dan jika di ubah ke dalam suhu maka nilai nya adalah 1300±°C

2. Gangguan

$$E = 442^2 \times 27,9 \times 10$$

$$E = 195.364 \times 27,9 \times 10$$

$$E = 54.506.556 \text{ Joule}$$

Dengan perhitungan di atas maka nilai energi panas adalah 54.506.556 Joule dan jika di ubah dalam suhu maka nilai nya adalah 2000±°C

D. Perhitungan Satu Fasa Ke Tanah

Dengan menggunakan data pada tabel 8 maka kita bisa menghitung nilai gangguan satu fasa ke tanah dengan menggunakan persamaan 1 dan menghitung Arus beban Penuh menggunakan persamaan 6.

$$I_{FL} = \frac{7000000}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 201,2 \text{ A}$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1 \angle 0^\circ}{-j0.013 + (-j0.013) + (-j0.013)}$$

$$I_{a1} = \frac{1 + j0}{-j0.039}$$

$$I_{a1} = 25,63 \text{ A}$$

Dan hasil I_{a1} adalah 25,63 A. Untuk menghitung Arus gangguannya menggunakan persamaan 2.

$$I_{a1} = 3 \times 25,63 \text{ A} = 75,9 \text{ A}$$

Maka Nilai arus transien nya menggunakan persamaan 4

$$I_a = 75,9 \times 201,2 = 15,2 \text{ kA}$$

Dengan perhitungan di atas nilai $I_{a1} = 25,63 \text{ A}$ dan arus gangguannya 75,9A dan nilai Arus transien nya 15,2kA

III. HASIL PEMBAHASAN

A. Hasil Perhitungan

Berikut ini adalah tabel – tabel hasil perhitungan di atas.

Tabel 9 Hasil Perhitungan Arus Netral

Parameter	Nilai
Arus Netral	442A

Tabel 10 Hasil Perhitungan Energi Panas

Parameter	Nilai
Suhu Panas Normal	36.000.000 Joule
Suhu Panas Gangguan	54.506.556 Joule
Normal (%)	1300±°C
Gangguan (%)	2000±°C

Tabel 11 Hasil Perhitungan Gangguan 1 Fasa Ke Tanah

Parameter	Nilai
Nilai I_{a1}	36.000.000 Joule
Nilai I_a	54.506.556 Joule
Nilai Arus Transien	1300±°C

Tabel 12 Hasil Perhitungan Arus Beban Penuh

Parameter	Nilai
Arus Beban Penuh	201,2A

B. Pembahasan

Berdasarkan hasil perhitungan, kegagalan sistem Netral Grounding Resistor (NGR) di PLTD Laiwui disebabkan oleh kombinasi lonjakan arus gangguan, penurunan resistansi NGR, dan ketahanan termal kabel yang tidak memadai. Arus netral yang mencapai 442 A jauh melampaui batas desain 300 A, menunjukkan gangguan signifikan pada sistem.

Penurunan resistansi NGR dari 39,8 Ω menjadi 27,9 Ω menunjukkan adanya degradasi internal. Akibatnya, energi panas meningkat drastis dari 36 juta Joule ($\pm 1300^\circ\text{C}$) menjadi 54,5 juta Joule ($\pm 2000^\circ\text{C}$), menyebabkan suhu konduktor melebihi batas aman dan memicu kebakaran serta kegagalan sistem grounding. Perhitungan juga menunjukkan arus gangguan total sebesar 75,9 A dengan arus transien mencapai 15,2 kA. Durasi gangguan yang melebihi 10 detik memperparah kerusakan, menandakan sistem proteksi tidak mampu merespons secara cepat.

Dengan demikian, kegagalan NGR bersifat sistemik—melibatkan desain kapasitas yang tidak sesuai, degradasi komponen, dan keterlambatan proteksi. Hal ini menegaskan pentingnya evaluasi berkala terhadap sistem proteksi dan grounding, serta perlunya pemeliharaan dan pengujian rutin untuk menjaga keandalan sistem kelistrikan di PLTD..

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan analisis teknis terhadap sistem pentanahan NGR di PLTD Laiwui, diketahui bahwa NGR dirancang membatasi arus gangguan tanah hingga 300 A selama 10 detik. Namun, saat gangguan terjadi, arus netral mencapai 442 A dalam durasi melebihi batas, menghasilkan energi panas sebesar 54,5 MJ yang menyebabkan suhu kabel naik hingga 2000°C —melampaui ambang 1300°C —dan memicu kerusakan fisik. Selain itu, resistansi NGR menurun dari 39,8 Ω menjadi 27,9 Ω , mengindikasikan degradasi elemen internal yang memperbesar arus gangguan. Kombinasi durasi gangguan, lonjakan arus, dan kerusakan termal menunjukkan kegagalan NGR dalam melindungi sistem grounding secara andal.

B. Saran

Evaluasi terhadap kapasitas NGR di PLTD Laiwui perlu dilakukan agar sesuai dengan kondisi sistem terkini, khususnya dalam menangani arus gangguan besar. Penggunaan kabel dan peralatan yang tahan suhu tinggi sangat disarankan untuk menghindari kerusakan saat lonjakan arus. Pemeriksaan rutin nilai tahanan NGR serta peningkatan sistem proteksi grounding, seperti penambahan pengaman, menjadi langkah penting dalam mencegah kerusakan lebih lanjut. Selain itu, pelatihan bagi operator terkait deteksi dini kerusakan dan respons cepat sangat diperlukan. Dokumentasi serta analisis setiap gangguan juga harus ditingkatkan agar dapat menjadi dasar perbaikan sistem dan referensi bagi pemeliharaan maupun pengembangan proteksi NGR di unit lain.

V. REFERENSI

- [1] A.R. Sultan, M.W. Mustafa, M. Saini. (2012). “Ground Fault Currents in Unit Generator-Transformer at Various NGR and Transformer Configurations”, *Universiti Teknologi Malaysia (UTM)*.
- [2] Asran, J. Misbahul, M. Dedi. (2021). “Analisa Pengaruh Neutral Grounding Resistance (Ngr) 40 Ohm Pad Transformator Daya 30 Mva Digardu Induk Bireue Terhadap Arus Gangguan Satu Fasa Ke Tanah”. *Universitas Malikussaleh Lhokseumawe*. ISSN 2303 – 1360
- [3] Bandung. 1991. SPLN. 1980. No. 26 Tentang Pedoman Penerapan Sistem Distribusi 20 kV, Fasa Tiga, 3 Kawat dengan Tahanan Rendah dan Tahanan Tinggi.
- [4] Del Toro, V. (2002). *Principles of Electrical Engineering*. Prentice Hall.
- [5] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). *Electric Machinery* (6th ed.). McGraw-Hill.
- [6] Gonen, T. (2016). *Electric Power Transmission System Engineering: Analysis and Design* (3rd ed.). CRC Press.
- [7] Grover, H. (2001). *Power System Protection and Switchgear*. New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd.
- [8] I Made Mataram, “Profil Sistem Kelistrikan Bali Pasca GI Pemecutan Kelod Dan PLTU 780 MW Celukan Bawang Beroperasi,” *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, Vol. 9 No.1, Januari-Juni 2010
- [9] International Electrotechnical Commission (IEC). (2011). *Power Transformers – Part 1: General*. IEC 60076-1. Geneva: IEC.
- [10] IEEE. (1972). *Recommended Practice For Grounding of Industrial And Commercial Power System*, IEEE Std. 142(IEEE Green Book)
- [11] Jumari, J., Ginting, Y., & Tamba, P. (2019). Sistem Pentanahan Pada Jaringan Distribusi Di Pt. Pln (Persero) Rayon Medan Helvetia. *JURNAL TEKNOLOGI ENERGI UDA: JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 8(2), 81-86.

- [12] Mahajan, S. (2011). *Power System Analysis*. Oxford University Press.
- [13] Manurung, D. B. (2024). *Analisa performance NGR (Neutral Grounding Resistance) pada trafo 2 GI Lopana* (Skripsi Sarjana, Universitas Sam Ratulangi, Manado).
- [14] Nasar, S. A. (1990). *Electric Power Systems*. Schaum's Outline Series. McGraw-Hill.
- [15] Nursafitri, R., & Susilo, E. Evaluasi NGR (Neutral Grounding Resistance) Sebagai Proteksi Gangguan Tanah Pada Transformator Daya 60 MVA di Gardu Induk Padang Luar_Reyni Nursafitri. ABSTRACT OF UNDERGRADUATE RESEARCH, FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY, BUNG HATTA UNIVERSITY, 18(1), 1-1.
- [16] PT. PLN (Persero) P3B. "Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali" September 2013
- [17] PT. Puncakjaya Power. (n.d.). *Neutral Grounding Resistor (NGR) – Training Material*. Training Department, OB-2 Kuala Kencana, Timika – Papua.
- [18] Sudaryanto, S. (2016). Analisis Perbandingan Nilai Tahanan Pembumian Pada Tanah Basah, Tanah Berpasir dan Tanah Ladang. JET (Journal of Electrical Technology), 1(1), 71-75.
- [19] Ward, S., & Marsden, C. (2002). *Electrical Installation Technology* (7th ed.). London: Routledge
- [20] Wood, A. J., & Wollenberg, B. F. (2012). *Power Generation, Operation, and Control* (3rd ed.). Wiley.
- [21] Yusniati, Y. (2018). Analisa Gangguan Arus Lebih Terhadap Kondisi Netral Grounding Resistance Aplikasi Pt Pln (Persero) Gardu Induk Lamhotma. Rele (Rekayasa Elektr. Dan Energi) J. Tek. Elektro, 1(1), 16-20.

TENTANG PENULIS



Penulis Bernama lengkap Mikhael Richardo Wahani. Lahir di Tomohon, Sulawesi Utara, 17 Juni 2002. Memulai Pendidikan pertama di Sekolah Dasar dan Sekolah Menengah Pertama Adventh Kotamobagu (2008 – 2017), kemudian melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Atas Kristen Kotamobagu (2017 – 2020). Pada tahun 2021, penulis memulai pendidikan di Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi Manado di Jurusan Teknik Elektro, dengan mengambil konsentrasi Minat Teknik Tegangan Tinggi pada tahun 2023. Dalam menempuh pendidikan, penulis telah melaksanakan Kerja Praktek di ULTG Sawangan selama 3 bulan, dan mengikuti Kuliah Kerja Terpadu (KKT) pada bulan Desember di Talete 1, Kecamatan Tomohon Tengah, Kota Tomohon. Selama menempuh pendidikan penulis aktif menjadi asisten lab Tenaga pada mata kuliah Praktikum Teknik Tenaga Listrik dan Instalasi Tenaga Listrik dan juga aktif dalam kegiatan Himpunan Mahasiswa Elektro FT. UNSRAT