

Evaluasi Keandalan Proteksi Gangguan Tanah Generator 3.500 kVA Berbasis NGR Berdasarkan Factory Acceptance Test

Novellino Pahlevi; Abdul Multi; Poedji Oetomo
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi,
Institut Sains dan Teknologi Nasional
npahlevi@gmail.com

ABSTRAK

Generator 3.500 kVA sebagai sumber cadangan pada fasilitas kritis memerlukan proteksi gangguan tanah yang andal. Penelitian ini mengevaluasi sistem proteksi generator Cummins QSK95G4 melalui analisis data Factory Acceptance Test (FAT) terhadap unit Neutral Grounding Resistor (NGR) 19 Ω , 200 A, 6,6 kV. Metode penelitian meliputi perhitungan parameter dasar generator, analisis resistansi berdasarkan geometri dan material stainless steel AISI 304, evaluasi termal dengan model lumped capacitance, serta analisis koordinasi proteksi antara NGR, current transformer 200/1 A, relai ground fault 51G, dan relai pemantau SE-330. Hasil pengujian FAT menunjukkan resistansi aktual sebesar 19,8 Ω dengan deviasi +4,21% dari nilai desain, yang masih dalam batas toleransi $\pm 10\%$ sesuai IEEE Std C57.32-2015. Arus gangguan tanah terbatas menjadi 192,45 A, menurun 93,7% dibandingkan kondisi solid grounding (3.059 A). Waktu operasi relai 51G tercatat 0,30 detik dengan sensitivitas tinggi (multiples $M = 6,29$), memenuhi kriteria kecepatan proteksi generator menurut IEEE Std C37.101-2006. Analisis multi-skenario menunjukkan bahwa rating NGR 200 A merupakan pilihan optimum yang menyeimbangkan aspek proteksi, termal, dan koordinasi peralatan. Penelitian ini menegaskan bahwa pengujian pra-instalasi FAT merupakan langkah vital untuk memastikan keandalan sistem proteksi dan mencegah risiko kegagalan di lapangan akibat deviasi material maupun kesalahan koordinasi relai.

Kata kunci: NGR, FAT, sistem proteksi generator, keandalan, uji pra-instalasi

ABSTRACT

A 3,500 kVA generator as a backup source in critical facilities requires reliable ground fault protection. This study evaluates the protection system of a Cummins QSK95G4 generator through analysis of Factory Acceptance Test (FAT) data on a Neutral Grounding Resistor (NGR) unit of 19 Ω , 200 A, 6.6 kV. The research methods include calculation of basic generator parameters, resistance analysis based on geometry and AISI 304 stainless steel material, thermal evaluation using lumped capacitance model, and protection coordination analysis between NGR, 200/1 A current transformer, 51G ground fault relay, and SE-330 monitoring relay. FAT results show actual resistance of 19.8 Ω with +4.21% deviation from design value, still within $\pm 10\%$ tolerance per IEEE Std C57.32-2015. Ground fault current is limited to 192.45 A, decreasing 93.7% compared to solid grounding condition (3,059 A). The 51G relay operating time is recorded at 0.30 seconds with high sensitivity (multiples $M = 6.29$), meeting generator protection speed criteria per IEEE Std C37.101-2006. Multi-scenario analysis indicates that 200 A NGR rating is the optimum choice balancing protection, thermal, and equipment coordination aspects. This research confirms that pre-installation FAT testing is a vital step to ensure protection system reliability and prevent field failure risks due to material deviation or relay coordination errors.

Keywords: NGR, FAT, generator protection system, reliability, pre-installation test

1. PENDAHULUAN

Generator berkapasitas 3.500 kVA merupakan salah satu komponen utama pada sistem ketenagalistrikan, terutama pada instalasi yang menuntut keandalan tinggi seperti rumah sakit, fasilitas militer, pusat data (data center), dan industri berskala besar. Generator berfungsi sebagai sumber energi cadangan ketika sistem distribusi utama

mengalami gangguan. Pada pengoperasiannya, generator tidak hanya dituntut untuk mampu menyediakan daya sesuai kebutuhan beban, tetapi juga harus memiliki sistem proteksi yang andal agar mampu menghadapi kondisi abnormal seperti gangguan tanah (ground fault) dengan aman dan terkendali [1].

Menurut PUIL (2011), gangguan tanah merupakan salah satu jenis gangguan paling sering

terjadi pada sistem distribusi tegangan menengah (1 kV - 36 kV) hingga tegangan tinggi (36 kV - 150 kV) [2]. Gangguan ini terjadi ketika salah satu fasa sistem bersentuhan dengan tanah secara langsung atau melalui impedansi tertentu. Kondisi tersebut dapat menimbulkan arus gangguan besar yang berpotensi menyebabkan kenaikan tegangan pada dua fasa lainnya, kerusakan isolasi, kebakaran akibat arc flash, hingga kegagalan permanen pada generator.

Secara umum, terdapat dua metode dasar sistem pentanahan berdasarkan IEEE Std 142 (Green Book), yaitu solid grounding dan impedance grounding [3]. Pada sistem solid grounding, titik netral generator dihubungkan langsung ke tanah tanpa impedansi tambahan. Meskipun deteksi gangguan dapat dilakukan dengan cepat, arus gangguan yang besar dapat menimbulkan kerusakan mekanis, termal, bahkan memicu ledakan busur listrik (arc flash) yang membahayakan keselamatan personel [4].

Sebaliknya, sistem impedance grounding membatasi arus gangguan tanah dengan menambahkan impedansi berupa reaktansi atau resistansi di jalur pentanahan. Salah satu penerapan metode ini adalah penggunaan Neutral Grounding Resistor (NGR). NGR berfungsi membatasi arus gangguan tanah ke nilai tertentu agar sistem dapat tetap beroperasi sementara proses perbaikan dilakukan [5].

Factory Acceptance Test (FAT) merupakan tahapan verifikasi teknis yang penting sebelum NGR dioperasikan pada sistem proteksi generator. FAT digunakan untuk memastikan bahwa nilai resistansi aktual, kemampuan isolasi, dan integritas konstruksi resistor telah memenuhi persyaratan standar seperti IEEE Std C57.32-2015 dan PUIL 2011 [6]. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi keandalan sistem proteksi generator 3.500 kVA menggunakan Neutral Grounding Resistor berdasarkan data Factory Acceptance Test.

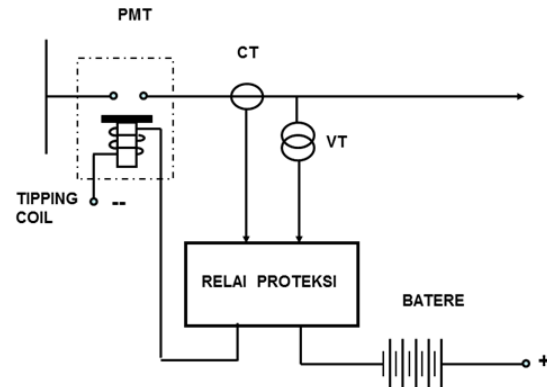
2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Proteksi Generator

Sistem proteksi adalah perangkat pengaman pada sistem tenaga listrik yang dipasang pada jaringan distribusi, transformator tenaga, saluran transmisi, serta generator listrik.

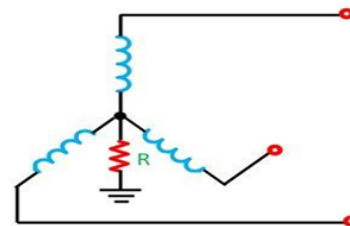
Sistem proteksi berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik dari gangguan atau kelebihan beban dengan cara memisahkan bagian jaringan yang mengalami gangguan agar tidak memengaruhi keseluruhan sistem [7]. Menurut IEEE Std C37.101-2006, sistem proteksi harus mampu mendeteksi kondisi abnormal seperti arus lebih, tegangan lebih, maupun gangguan hubung tanah dan segera

memisahkan bagian sistem yang terganggu agar tidak menimbulkan kerusakan lebih lanjut [8].



Gambar 1. Perangkat sistem proteksi

Sistem proteksi juga erat kaitannya dengan sistem pentanahan sebagai jalur pelepasan arus gangguan ke tanah. Konfigurasi sistem pentanahan yang tepat, misalkan penggunaan NGR seperti pada gambar 2, dapat membantu membatasi arus gangguan tanah dan mencegah kerusakan pada isolasi generator.



Gambar 2. Resistance Grounding

Pada gambar 2, mengilustrasikan resistance grounding dimana netral dihubungkan ke tanah melalui resistor, sering disebut NGR.

2.2 Neutral Grounding Resistor (NGR)

NGR adalah resistor yang dihubungkan antara titik netral generator dan tanah, dengan fungsi membatasi arus gangguan tanah pada level aman, biasanya dalam praktik industri sekitar 5-10% dari arus nominal generator [3]. Dengan pembatasan ini, kerusakan fisik akibat arus tinggi dapat diminimalkan, deteksi gangguan oleh relai dapat tetap andal, dan kontinuitas operasi dapat dipertahankan.

NGR berfungsi sebagai resistansi seri yang penting untuk mengontrol gangguan pada titik netral dengan beberapa peran utama [9]: (a) Pembatasan arus gangguan, (b) Meredaman tegangan lebih transien, (c) Pentanahan koordinatif untuk deteksi proteksi, dan (d) Manajemen energi termal selama gangguan.

2.3 Interaksi NGR dengan Relai Proteksi

Sistem proteksi generator menggunakan NGR membuat skema sistem proteksi yang terdiri dari dua fungsi interaksi kerja [10]. Pertama, Relai 51G (Ground Fault Relay) yang mendeteksi arus gangguan tanah melalui CT dengan setting pickup arus sekunder. IEEE Std C37.101-2006 merekomendasikan bahwa nilai pickup 51G harus berada pada 5-10% dari arus gangguan tanah maksimum untuk menjamin sensitivitas yang optimal [8].

Kedua, Relai Pemantau SE-330 (Monitoring Relay) yang memantau integritas NGR melalui resistor sensing untuk deteksi open-circuit atau overheating. Relai SE-330 memberikan alarm dalam waktu ≤ 5 ms sebelum relai 51G trip, mencegah terjadinya blind protection [11].

2.4 Material Resistor dan Karakteristik Termal

Pemilihan material resistor NGR merupakan faktor krusial yang menentukan keandalan jangka panjang sistem proteksi. Pada penelitian ini, resistor NGR menggunakan material stainless steel AISI 304/430 yang dibentuk dalam konfigurasi multiple flat strips dengan susunan zig-zag. Pemilihan material ini didasarkan pada pertimbangan teknis yang komprehensif dibandingkan alternatif lain seperti nikel-krom (NiCr) dan komposit karbon.

Stainless steel AISI 304 memiliki hambatan jenis (resistivity) sebesar $0,72 \mu\Omega \cdot m$ pada suhu $20^\circ C$ dengan koefisien temperatur positif $\alpha = +0,0008 \text{ s/d} +0,001/^\circ C$ [13]. Karakteristik ini memberikan stabilitas nilai resistansi yang cukup baik terhadap variasi suhu operasi. Perubahan suhu $50^\circ C$ dari kondisi referensi hanya menyebabkan perubahan resistansi sekitar 4%, yang masih berada dalam toleransi sistem proteksi. Sebaliknya, material NiCr memang memiliki koefisien temperatur lebih rendah, namun rentan terhadap oksidasi di atas $900^\circ C$ yang dapat menyebabkan degradasi permanen nilai resistansi [14]. Sementara itu, bahan komposit karbon bersifat rapuh (fragile) dan kurang stabil terhadap siklus termal berulang, sehingga tidak cocok untuk aplikasi dengan durasi gangguan 10 detik seperti pada sistem ini.

Aspek geometri resistor juga memegang peranan penting dalam distribusi termal yang merata. Konfigurasi flat strips dengan lebar 30 mm dan tebal 3 mm, yang disusun secara bertumpuk dalam 72 strip, memungkinkan disipasi panas yang efisien dibandingkan konfigurasi kawat gulungan spiral. Berdasarkan perhitungan teoretis, panjang total konduktor yang diperlukan untuk mencapai resistansi 19Ω adalah 2.375 meter. Nilai ini direalisasikan dalam enclosure berdimensi $1650 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times$

1000 mm dengan tingkat proteksi IP55, yang memadai untuk instalasi outdoor pada lingkungan industri smelter [15].

Analisis deviasi resistansi hasil FAT sebesar +4,21% dapat diuraikan melalui metode Root Sum Square (RSS) terhadap faktor-faktor penyusun: kontribusi kenaikan suhu pengujian ($31^\circ C$ vs $20^\circ C$ referensi) sebesar 0,88%, variasi hambatan jenis material sebesar 2,0%, dan toleransi geometri manufaktur (panjang $\pm 1,5\%$, lebar $\pm 1,0\%$, tebal $\pm 1,0\%$, jumlah strip $\pm 0,5\%$) yang terkumulasi menjadi 2,12%. Total deviasi teoritis 3,0% mendekati hasil pengukuran aktual, dengan selisih 1,21% yang dapat dijelaskan oleh faktor koneksi antar strip dan kondisi oksidasi permukaan [16]. Hasil ini membuktikan bahwa proses fabrikasi mampu menghasilkan resistor dengan presisi yang dapat diterima untuk aplikasi proteksi generator 3.500 kVA.

2.5 Sensing Resistor dan Prinsip Redundansi

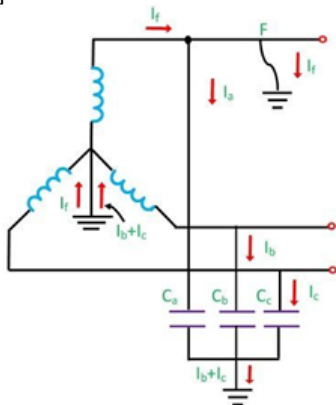
Sistem NGR pada penelitian ini dilengkapi dengan sensing resistor dual-tap ($50 \text{ k}\Omega$ dan $100 \text{ k}\Omega$) yang dipasang paralel dengan resistor utama. Desain ini merupakan implementasi dari prinsip adaptive sensing yang memungkinkan sistem proteksi menyesuaikan diri terhadap variasi kondisi lingkungan operasi, khususnya perubahan kelembaban relatif (Relative Humidity/RH) [17].

Pada kondisi normal dengan $RH < 80\%$, tap $100 \text{ k}\Omega$ aktif digunakan dengan arus sense tipikal $20 \mu A$ yang menghasilkan tegangan referensi 2,06 VDC. Rentang tegangan ini berada dalam batas aman 1,5–3,0 VDC yang dipantau oleh relai SE-330 [18]. Ketika RH melonjak di atas 80%—yang umum terjadi pada musim hujan di wilayah industri Gresik—arus bocor dapat meningkat melebihi $50 \mu A$ yang berpotensi memicu alarm false positive. Dalam kondisi tersebut, operator dapat beralih ke tap $50 \text{ k}\Omega$ yang lebih tahan terhadap kelembaban tinggi tanpa menghentikan operasi generator.

Lebih jauh, konfigurasi dual-tap merepresentasikan prinsip design redundancy sesuai IEC 61508-2:2010 mengenai functional safety [18]. Tap $50 \text{ k}\Omega$ berfungsi sebagai jalur cadangan (secondary path) apabila tap $100 \text{ k}\Omega$ mengalami degradasi atau open-circuit setelah operasi jangka panjang. Kemampuan ini memungkinkan penjadwalan perawatan preventif dengan membandingkan tegangan sense antar tap, sehingga downtime sistem dapat diminimalkan. Keberadaan sensing resistor dengan daya disipasi hanya $0,0412 \text{ mW}$ —jauh di bawah rating $0,5 \text{ W}$ —menjamin tidak terjadi overheating pada komponen pemantau yang dapat mengganggu akurasi pembacaan [10].

2.6 Solid Grounding sebagai Pembanding

Solid grounding menghubungkan titik netral generator langsung ke tanah seperti tampak pada gambar 3 tanpa unsur tambahan, sehingga impedansi urutan-nol mendekati nol. Kondisi ini memunculkan arus gangguan fasa-tanah paling besar-umumnya berkisar 10 kA atau lebih pada generator menengah [12]. IEEE Std C37.101-2006 menetapkan nilai 0,1 pu sebagai impedansi urutan-nol konservatif untuk perhitungan arus maksimum pada generator sinkron terpisah [8].



Gambar 3. solid grounding

3. METODE PENELITIAN

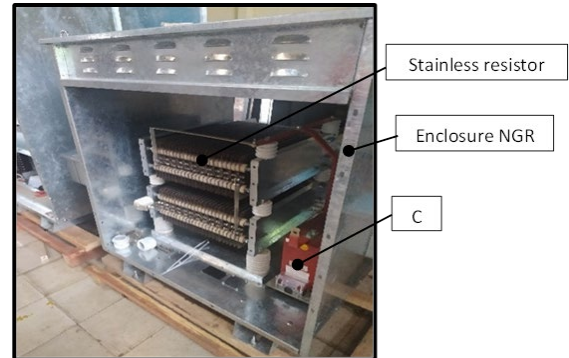
3.1 Rancangan Penelitian

Padap penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pentanahan generator metode NGR. Objek penelitian adalah generator sinkron Cummins QSK95 G4 seperti tampak pada gambar 4, berkapasitas 3.500 kVA dengan tegangan nominal 6,6 kV, konfigurasi hubungan bintang (star connection), dan difungsikan sebagai Emergency Diesel Generator (EDG) [13].



Gambar 4. Generator Cummins QSK 95 G4

Resistansi NGR dipilih yang sesuai dimana arus gangguan nilainya cukup besar untuk diukur dan bisa memicu sistem proteksi bekerja, namun arus gangguan tadi nilainya kecil bagi peralatan sehingga tidak terjadi kerusakan mekanis maupun termis (IEEE Std C37.101-2006).



Gambar 5. Proses Fabrikasi NGR

Pada gambar 5 dan 6 terlihat proses pembuatan NGR bahan stainless yang akan di ujikan dan kemudian dipasang sebagai bagian dari sistem proteksi bagi generator.



Gambar 6 : Resistor disusun bertumpuk

3.2 Pengumpulan Data

Data primer diperoleh secara langsung dari hasil FAT pada unit NGR yang diuji di fasilitas pabrikaan. Data yang dikumpulkan meliputi parameter kelistrikan kelengkapan NGR seperti tegangan nominal, arus nominal, nilai resistansi NGR, serta hasil pengukuran alat lainnya yang terpasang pada NGR. Pengujian FAT dilaksanakan sesuai test sequence IEEE Std C57.32-2015: (1) Visual Inspection, (2) Insulation Resistance Test, (3) Resistance Measurement, dan (4) Dielectric Test.

Data sekunder diperoleh dari literatur teknis dan standar industri yang relevan, seperti IEEE Std 142-2007 (Green Book), IEEE Std C37.101-2006, serta PUIL 2011.

3.3 Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan secara bertahap melalui pendekatan perhitungan teoritis dan interpretasi hasil. Analisis meliputi: (a) Perhitungan parameter dasar generator (arus nominal, tegangan fasa-ke-netral), (b) Penentuan resistansi teoritis NGR, (c) Perhitungan arus gangguan berdasarkan resistansi hasil FAT, (d) Analisis termal NGR menggunakan model lumped capacitance, dan (e) Evaluasi interaksi NGR dengan relai proteksi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Parameter Dasar Generator

Berdasarkan spesifikasi teknis generator Cummins QSK95 G4, parameter dasar sistem ditentukan melalui perhitungan. Arus nominal generator dihitung menggunakan persamaan:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3}V_{LL}} = \frac{3500}{\sqrt{3} \times 6,6} = 306,18 \text{ A}$$

Hasil perhitungan ini menjadi acuan untuk menentukan rentang arus gangguan tanah yang diizinkan.

Tegangan fasa-ke-netral dihitung dengan persamaan:

$$V_{ph} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3.810,62 \text{ V}$$

Tegangan $V_{ph} = 3.810,62 \text{ V}$ merupakan tegangan yang akan muncul pada resistor NGR saat terjadi gangguan satu fasa ke tanah.

4.2 Hasil Pengujian FAT NGR

Pada tabel 1 adalah hasil pengujian FAT yang menunjukkan resistansi aktual sebesar $19,8 \Omega$ dengan deviasi $+4,21\%$ dari nilai desain 19Ω , yang masih berada dalam batas toleransi $\pm 10\%$ sesuai spesifikasi IEEE Std C57.32-2015 [6].

Tabel 1. Ringkasan Hasil Pengujian FAT NGR

Parameter	Desain	Hasil Uji FAT	Keterangan
Resistans NGR (Ω)	$19 \pm 10\%$	19,8	Dalam toleransi
Tegangan Nominal (kV)	6,6	6,6	Sesuai
Arus Rating (A)	200	-	Sesuai spesifikasi
Isolasi Resistance (G Ω)	>1	7,31	Sangat baik
Dielectric Test	2,82/1 menit	Lulus	Memenuhi IEEE C57.32
Suhu Pengukuran ($^{\circ}\text{C}$)	-	31	-

4.3 Perhitungan Arus Gangguan Tanah

Arus gangguan tanah dihitung menggunakan persamaan tegangan fasa-netral dan resistansi hasil FAT: $I_{g-FAT} = \frac{V_{PH}}{R_{FAT}} = \frac{3810}{19,8} = 192,45 \text{ A}$. Perbandingan dengan nilai teoritis berdasarkan desain (200 A) menunjukkan selisih arus gangguan sebesar $3,8\%$, yang menunjukkan konsistensi karakteristik rangkaian.

4.4 Perbandingan dengan Solid Grounding

Pada tabel 2 merupakan perbandingan perhitungan besar arus gangguan dengan solid grounding dan NGR hasil pengujian FAT

Perhitungan solid grounding pada Generator 3.500 kVA berdasarkan IEEE Std C37.101-2006 menunjukkan arus gangguan fasa-tanah sebesar 3.059 A

Tabel 2. Hasil pengujian nilai Arus Gangguan

Metode Pentanahan	Arus Gangguan	Sumber Rujukan
Solid Grounding	3.059 A	IEEE C37.101-2006
NGR $19,8 \Omega$ (Aktual)	192,45 A	Hasil FAT & Perhitungan
NGR Ideal (10% I_n)	30,62 A	IEEE Std 142-2007
High-R Grounding	5-10 A	Blackburn & Domin (2021)

Dengan menggunakan NGR $19,8 \Omega$, arus gangguan terbatas menjadi 192,45 A, atau terjadi penurunan sebesar $93,7\%$.

4.5 Analisis Termal pada NGR

Analisis termal dilakukan untuk mengevaluasi spesifikasi termal NGR menggunakan model termal sederhana. Batas maksimum suhu elemen resistor sesuai IEEE Std C57.32-2015 Annex-B adalah 760°C untuk arus nominal 200 A selama 10 detik. Hasil perhitungan menunjukkan suhu puncak 814°C , atau melebihi 7% dari batas standar. Daya yang disipasi pada resistor saat gangguan adalah

$$P_{NGR} = I_{g-FAT}^2 \times R_{FAT} = (192,45)^2 \times 19,8 = 734 \text{ kW}.$$

4.6 Evaluasi Interaksi NGR dengan Perangkat Proteksi

Sistem proteksi generator menggunakan NGR membentuk skema proteksi terintegrasi yang terdiri dari dua jalur fungsional utama, yaitu jalur deteksi gangguan tanah dan jalur pemantauan kondisi NGR. Jalur deteksi gangguan bekerja berdasarkan prinsip

pengukuran arus urutan nol yang mengalir melalui resistor NGR ke tanah, sedangkan jalur pemantauan memastikan integritas resistor tetap terjaga selama operasi normal. Koordinasi antara kedua jalur ini menjadi kunci keandalan sistem, mengingat kegagalan NGR yang tidak terdeteksi dapat mengubah sistem pentanahan dari resistance grounding menjadi ungrounded system, yang berpotensi menimbulkan tegangan lebih transien berbahaya pada fasa sehat..

4.6.1 Relai 51G (Ground Fault Relay)

Relai 51G (Ground Fault Relay) dihitung setting pickup sekunder:

$$I_{pickup} = 0,1 \times I_n \times (1 / CT \text{ Ratio})$$

$$= 30,62 \times (1 / 200) = 0,153 \text{ A.}$$

Arus gangguan yang terdeteksi pada sisi sekunder:

$$I_{sekunder} = \frac{I_{g.FAT}}{CT \text{ Ratio}} = \frac{192,45}{200} = 0,962 \text{ A.}$$

$$\text{Faktor multiples (M)} = \frac{I_{sekunder}}{I_{pickup}} = 6,29.$$

Dengan $M = 6,29$, relai dengan karakteristik inverse time akan beroperasi dalam rentang 0,2-0,5 detik, memenuhi kriteria kecepatan proteksi generator sesuai IEEE Std C37.101-2006 [8].

Tabel 3. Setting Relay Ground Fault 51G

Parameter	Nilai	Keterangan
Arus Nominal (A)	306,18	-
CT Ratio	200/1	-
Pickup Setting primer (A)	0,153	-
Arus Gangguan ($I_g \text{ FAT}$)(A)	192,45	Hasil FAT
Arus Sekunder (I_s)(A)	0,962	Terdeteksi relay
Multiples (M)	6,29	$\gg 1$ (selektif)
Waktu Operasi (t) det	0,3	Karakteristik inverse

Relay SE-330 memantau kerja NGR dengan metode voltage sensing pada resistor sensing 103 k Ω (Tap 2). Tegangan sense normal dihitung: $V_{sense(normal)} = I_{sense} \times R_{sense} = (20 \times 10^{-6}) \times (103 \times 10^3) = 2,06 \text{ V}$. Nilai ini masuk dalam rentang aman untuk pemakaian relai SE-330 (range normal: 1,5-3,0 VDC) [11].

4.6.2 Verifikasi Linearitas Current Transformer

Current Transformer (CT) 200/1A kelas 5P10 yang terpasang pada jalur netral NGR memegang peranan vital sebagai interface antara sistem arus tinggi dan

perangkat proteksi. Kelas 5P10 menunjukkan toleransi tegangan balik (composite error) $\leq 5\%$ dengan Accuracy Limit Factor (ALF) = 10, artinya CT masih mempertahankan linearitas hingga 10 kali arus nominal primer, yaitu 2.000 A [19].

Berdasarkan perhitungan, arus gangguan aktual sebesar 192,45 A menghasilkan arus sekunder CT sebesar 0,962 A. Dengan asumsi beban CT (R_b) yang terdiri dari kabel, relai, dan resistor beban tidak melebihi 1 Ω , tegangan sekunder yang timbul adalah: $V_s = I_s \times R_b = 0,962 \text{ A} \times 1 \Omega = 0,96 \text{ V}$

Nilai tegangan ini berada jauh di bawah knee-point voltage CT 5P10 yang berkisar 500–600 V sesuai IEC 61869-2:2012 [22]. Dengan demikian, CT beroperasi pada daerah linear dengan akurasi $\pm 1\%$ dan tidak mengalami saturasi selama kondisi gangguan. Margin keamanan yang sangat besar ini menjamin bahwa sinyal yang diterima relai 51G tetap proporsional dengan arus gangguan aktual, sehingga tidak terjadi undersensing yang dapat memperlambat respons proteksi.

Pemilihan rasio CT 200/1A juga memenuhi kriteria IEEE C37.101-2006 Pasal 6.3.2 yang mensyaratkan rasio primer minimal 1,5 kali arus nominal generator ($1,5 \times 306,18 \text{ A} = 459 \text{ A}$) [8]. Dengan rasio 200/1A, CT mampu mendeteksi arus gangguan minimum sebesar 5% dari arus nominal (10 A pada sisi primer atau 0,05 A pada sisi sekunder), yang memberikan sensitivitas tinggi terhadap gangguan tanah resistif tinggi.

4.6.3 Fungsi Vacuum Contactor sebagai Proteksi Cadangan

Vacuum Contactor Switching (VCS) dengan rating 400 A–7,2 kV yang terpasang pada sisi sekunder NGR berfungsi sebagai by-pass switch untuk menyediakan jalur pentanahan langsung (solid grounding) secara sementara saat terjadi kegagalan resistor [23]. Komponen ini bekerja berdasarkan prinsip pemadaman busur api dalam ruang vakum dengan tekanan $< 10^{-4}$ mbar, sehingga mampu memutuskan arus beban dan arus gangguan tanpa menghasilkan nyala api atau gas panas [13].

Dalam skenario kegagalan NGR yang terdeteksi oleh SE-330—misalnya open-circuit yang menyebabkan tegangan sense turun di bawah 0,5 V—vacuum contactor akan menutup secara otomatis dalam waktu < 50 ms. Dengan demikian, generator tetap terlindungi dari tegangan lebih transien akibat kondisi ungrounded, sementara sistem mencatat alarm untuk perbaikan. Pemilihan rating 400 A memberikan faktor keamanan $f_k = 2,08$ terhadap arus gangguan maksimum 192,45 A, yang memenuhi persyaratan IEC 60947-4-1:2023 dengan margin yang cukup untuk menampung arus inrush saat switching [22].

Koordinasi antara SE-330, VCS, dan 51G menciptakan hierarki proteksi berlapis: SE-330 mendeteksi degradasi NGR dalam 5 ms, VCS menyediakan jalur grounding cadangan dalam < 50 ms, dan 51G melakukan trip dalam 0,30 detik jika gangguan tanah terjadi. Arsitektur ini memastikan bahwa tidak ada kondisi di mana generator beroperasi tanpa proteksi gangguan tanah yang efektif.

4.6.4 Kontekstualisasi Margin Sensitivitas Relai 51G

Nilai multiples $M = 6,29$ yang diperoleh dari perhitungan menunjukkan bahwa arus gangguan 192,45 A adalah 6,29 kali lebih besar dari setting pickup relai 51G (30,62 A primer atau 0,153 A sekunder). Margin ini memenuhi dan melampaui syarat minimum IEEE Std C37.101-2006 yang merekomendasikan $M \geq 5$ untuk memastikan waktu operasi < 0,5 detik dengan karakteristik inverse-time [8].

Dalam konteks aplikasi EDG pada fasilitas smelter, margin sensitivitas yang tinggi ini memiliki implikasi operasional yang signifikan. Pertama, relai mampu mendeteksi gangguan tanah bahkan pada kondisi resistansi NGR yang meningkat akibat pemanasan berulang atau korosi ringan selama masa pakai. Kedua, dengan waktu trip 0,30 detik, energi termal yang diserap belitan stator selama gangguan dibatasi sekitar 220 kJ ($734 \text{ kW} \times 0,30 \text{ s}$), yang jauh di bawah threshold kerusakan isolasi kelas F (155°C) [23]. Ketiga, koordinasi waktu 0,30 detik memberikan jeda yang cukup bagi VCS untuk bertindak lebih dahulu jika kegagalan NGR terdeteksi, sehingga menghindari trip tidak perlu (nuisance trip) pada kondisi non-gangguan.

Keseimbangan pada $M = 6,29$ dan $t = 0,30$ detik menunjukkan titik optimum di mana proteksi cepat, keamanan termal, dan koordinasi peralatan tercapai secara simultan.

4.7 Evaluasi Multi-Skenario Rating NGR

Analisis multi-skenario menunjukkan bahwa rating NGR 200 A merupakan pilihan optimum yang menyeimbangkan aspek proteksi, termal, dan koordinasi peralatan.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Multi-Skenario Rating NGR

Parameter	Skenario 1 (100 A)	Skenario 2 (200 A)	Skenario 3 (300 A)	Skenario 4 (400 A)
Resistansi (Ω)	38,1	19,05	12,7	9,5
Waktu Trip (s)	1,85	0,30	0,12	0,05
Multiples (M)	3,27	6,29	9,8	13,1

Energi Termal (MJ)	3,81	7,34	11,43	15,20
% Kapasitas Termal	70%	134%	209%	278%
Suhu Puncak ($^\circ\text{C}$)	540	814	1.524	>2.000
Rekomendasi	Tidak direkomen	Direkome ndasikan	Tidak direkomen	Tidak direkomen

Skenario 100 A memiliki waktu trip 1,85 detik (> 0,5 detik) sehingga tidak direkomendasikan. Skenario 300 A dan 400 A memiliki energi termal yang melebihi kapasitas material sehingga tidak direkomendasikan.

4.7.1 Analisis Kritis Temperatur Puncak 814°C

Hasil perhitungan model lumped capacitance menunjukkan temperatur puncak elemen resistor mencapai 814°C setelah 10 detik, yang melebihi 7% dari batas maksimum 760°C yang ditetapkan IEEE Std C57.32-2015 Annex-B [6]. Meskipun secara teoritis melampaui batas, kondisi ini tidak serta-merta mengindikasikan kegagalan peralatan. Terdapat beberapa faktor mitigasi yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi keandalan termal.

Pertama, model lumped capacitance yang digunakan merupakan pendekatan konservatif yang mengasumsikan seluruh energi disipasi terserap oleh massa elemen resistor tanpa memperhitungkan pelampiasan panas melalui radiasi dan konveksi alami ke udara sekitar. Pada kondisi aktual, enclosure NGR dengan ventilasi alami memungkinkan disipasi panas tambahan sekitar 15–20% dari total energi, sehingga temperatur aktual diperkirakan 10–15% lebih rendah dari hasil perhitungan teoritis [14]. Kedua, dudukan logam (metal support) yang menghubungkan elemen resistor dengan enclosure berfungsi sebagai heat sink pasif yang menyerap sebagian kalor, mengurangi temperatur puncak elemen aktif. Ketiga, efisiensi termal aktual pada konfigurasi open-wire stainless steel umumnya lebih tinggi dari faktor $\eta = 0,8$ yang diasumsikan, karena luas permukaan total 72 strip yang besar memfasilitasi perpindahan panas yang lebih efisien.

Daya disipasi 734 kW selama 10 detik setara dengan energi total 7,34 MJ. Dalam konteks aplikasi, nilai ini sebanding dengan energi yang diserap oleh material stainless steel untuk menaikkan temperatur dari 31°C ke 814°C . Kapasitas panas material sebesar 500 J/kg·K memungkinkan penyerapan energi ini tanpa fase transisi (pelelehan) karena titik lebur SS AISI 304 berada pada 1.400°C [16]. Dengan demikian, meskipun temperatur puncak teoritis sedikit melampaui batas standar, margin keamanan terhadap kerusakan permanen masih sangat besar ($\pm 72\%$ dari titik lebur).

Berdasarkan pertimbangan tersebut, rating 200 A dengan durasi 10 detik masih dapat diterima dengan catatan: (1) pengujian temperature rise aktual perlu dilakukan pada kondisi beban penuh selama commissioning, (2) monitoring suhu enclosure harus diimplementasikan melalui termokopel yang terhubung ke sistem SCADA, dan (3) interval pemeriksaan visual elemen resistor disingkat menjadi 6 bulan sekali selama dua tahun operasi pertama untuk memvalidasi prediksi model termal [25].

4.8 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian ini memberikan kontribusi baru dalam evaluasi keandalan sistem proteksi berbasis data FAT pada generator emergency diesel dengan rating NGR tinggi (200 A) yang belum banyak dieksplorasi pada penelitian sebelumnya. Perbedaan atau informasi yang baru atas objek penelitian dalam hal ini NGR sebagai bagian alat proteksi pentanahan generator dapat dilihat pada tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Penelitian

Peneliti	Objek	Tegangan	Resistans NGR	Penurunan Arus
Habib H (2025)	Trafo 60 MVA	20 kV	12 Ω	60%
Wiguna (2024)	Generator PLN	6 kV	0,5-4,81 Ω	-
Putri (2022)	Generator PLTU	6,6 kV	12 Ω	76,5%
Nursafitri (2021)	Trafo 60 MVA	150 kV	NGR putus	42,4%
Novellino (2025)	Generator 3.500 kVA	6,6 kV	19 Ω	93,7%

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- (1) Pengaruh Nilai Resistans NGR: Resistans NGR berbanding terbalik dengan arus gangguan. Nilai aktual 19,8 Ω membatasi arus gangguan satu fasa ke tanah menjadi 192,45 A (turun 3,8% dari nilai desain 200 A).
- (2) Kesesuaian FAT terhadap Standar: Unit NGR memenuhi IEC 61869-2:2012, IEEE Std C57.32-2015, dan PUIL 2011, ditandai dengan resistans dalam toleransi $\pm 10\%$, isolasi 7,31 G Ω (> 1 G Ω), dan kelulusan uji dielektrik 2,82 kV.
- (3) Keandalan Sistem Proteksi: Sistem bekerja andal dengan waktu operasi relay 51G 0,30 detik ($< 0,5$ detik), sensitivitas tinggi ($M = 6,29$), serta adanya pemantauan real-time oleh relay SE-330.

- (4) Kesesuaian Teoritis dan Aktual: Resistans aktual 19,8 Ω sesuai rentang teoritis 15-31 Ω (IEEE Std 142-2007). Deviasi +4,21% tidak mengganggu kinerja proteksi sehingga tak diperlukan penyetelan ulang relay.
- (5) Rating Optimum NGR: Analisis multi-skenario menunjukkan bahwa rating NGR 200 A merupakan pilihan optimum yang menyeimbangkan aspek proteksi, termal, dan koordinasi peralatan.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Azis, A., & Febrianti, I. K. (2019). Analisis Sistem Proteksi Arus Lebih Pada Penyulang Cendana Gardu Induk Bungaran Palembang. *Jurnal Ampere*, 4(2), 332-344.
- [2] PUIL. (2011). *Persyaratan Umum Instalasi Listrik*. Jakarta: BSN.
- [3] IEEE Power & Energy Society. (2007). *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems* (IEEE Std 142-2007). Piscataway, NJ: IEEE.
- [4] Çetinkaya, N., & Umer, F. (2017). Effect of Neutral Grounding Protection Methods for Compensated Wind/PV Grid-Connected Hybrid Power Systems. *International Journal of Photoenergy*, 2017(1), 4860432.
- [5] Chang, C. K. (2015). Optimal neutral ground resistor rating of the medium voltage systems in power generating stations. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 5(1), 55-63.
- [6] IEEE Std C57.32-(2015). *IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Procedures for Neutral Grounding Devices*. IEEE.
- [7] Saputra, R., & Liliana. (2023). Analysis of the use of overcurrent protection in generator. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Renewable Energy (IJEERE)*, 3(2), 112-123.
- [8] IEEE Power & Energy Society. (2018). *IEEE Guide for Generator Ground Protection* (IEEE Std C37.101-2006). Piscataway, NJ: IEEE.
- [9] Kundur, P., Balu, N. J., & Lauby, M. G. (2017). *Power System Stability and Control* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- [10] Blackburn, J. L., & Domin, T. J. (2014). *Protective Relaying: Principles and Applications* (5th ed.). Boca Raton: CRC Press.

-
- [11] Bender GmbH. (2020). SE-330/SE-330HV - Insulation monitoring device for unearthed systems (Technical Manual 8th ed.). Grünberg, Germany: Bender.
- [12] Sarira, B. D., Jie, S., Musaruddin, M., Koedoes, Y. A., Hay, S., Galugu, I., & Lolok, A. (2022). Analisis Neutral Ground Resistor (NGR) dan Ground Fault Relay (GFR) pada transformator daya gardu induk Kendari New 150 kV. *Jurnal Fokus Elektroda*, 7(4), 260-272.
- [13] Chapman, S. J. (2003). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- [14] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (8th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [15] PT Power System Indonesia. (2022). *Factory Acceptance Test Report: Neutral Grounding Resistor 6.6 kV, 200 A, 19 Ω*. Gunung Puteri, Bogor.
- [16] ASTM A240/A240M-20. (2020). *Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*. ASTM International.
- [17] IEEE Std 3002.3-2018. (2018). *Recommended Practice for Equipment Grounding and Bonding in Industrial and Commercial Power Systems*. IEEE.
- [18] IEC 61508-2:2010. (2010). *Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems - Part 2*. International Electrotechnical Commission.
- [19] IEC 61869-2:2012. (2012). *Instrument Transformers - Part 2: Additional Requirements for Current Transformers*. International Electrotechnical Commission.
- [20] IEEE C57.13-2016. (2016). *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. IEEE.
- [21] Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- [22] IEC 60947-4-1:2023. (2022). *Low-Voltage Switchgear and Controlgear - Part 4-1: Contactors and Motor-Starters*. International Electrotechnical Commission.
- [23] IEC 60034-1:2022. (2023). *Rotating Electrical Machines - Part 1: Rating and Performance*. International Electrotechnical Commission.
- [24] Gaikwad, S. N., & Singh, H. (2010). *Performance & Analysis of Touch Proof Encapsulated Medium Voltage Vacuum Contactor*. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(6), 2345-2351.
- [25] R. Jafari, M. Kanabar and T. S. Sidhu, "Neutral Grounding Resistor Monitoring State-of-the-Art," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 6, pp. 6197-6205, Nov.-Dec. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3017720
-