

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 (*multiplier* 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.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PERNTAYAAN NON PLAGIAT	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI.....	v
LEMBAR PERSETUJUAN.....	vi
PERSETUJUAN PUBLIKASI	viii
KATA PENGANTAR.....	viii
ABSTRAK.....	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL.....	xivv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR SINGKATAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Pertanyaan Penelitian	5
1.5. Manfaat Penelitian	5
1.6. Lingkup Penelitian / Batasan Penelitian	6
1.7. Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Pendahuluan	8
2.1.1. Sistem Kelistrikan dan Perkembangannya.....	8
2.1.2. Proteksi Dengan NGR.....	8
2.2. Kerangka Teori.....	9
2.2.1. Sistem Proteksi.....	9
2.2.2. Penerapan Sistem Proteksi pada Generator	12
2.2.3. Generator Sinkron.....	12
2.2.4. Gangguan pada Generator.....	16

2.2.5. Gangguan pada Titik Netral Generator	17
2.2.6. Sistem Pentanahan pada Generator	18
2.2.7. Jenis- Jenis Sistem Pentanahan pada Generator	19
2.2.8. Klasifikasi Sistem Pentanahan dengan Resitans untuk Generator	21
2.2.9. Generator dengan proteksi menggunakan NGR	22
2.2.10. Material Resistor dan alat terpasang pada NGR <i>enclosure</i>	22
2.2.11. Interaksi NGR dengan relai -relai Sistem pada Proteksi Generator ..	25
2.2.12. <i>Multi-Criteria Decision Analysis</i> (MCDA) dalam Pemilihan Rating NGR	28
2.2.13. <i>Solid Grounding</i> sebagai Pembanding Penelitian	29
2.2.14. Keandalan sistem proteksi	29
2.3. Tinjauan Penelitian Terdahulu	29
2.3.1. Relevansi Penelitian	31
2.4. Kerangka Konseptual	32
2.5. Ringkasan	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1. Rancangan Penelitian	33
3.2. Populasi dan Sampel:	33
3.3. Metode Pengumpulan Data	34
3.3.1. Data Primer	34
3.3.2. Data Sekunder	36
3.4. Metode Analisis Data	37
3.4.1. Perhitungan Parameter Dasar Generator	37
3.4.2. Penentuan Resistansi Teoritis NGR	38
3.4.3. Perhitungan Arus Gangguan Berdasarkan Resistansi Hasil FAT	39
3.4.4. Analisa Termal NGR	40
3.4.5. Desain Sensing Resistor Dual Tap pada NGR	41
3.4.6. Analisis <i>Current Transformer</i> (CT)	41
3.4.7. Analisis <i>Vacuum Contactor</i>	42
3.4.8. Evaluasi terhadap relai terhubung dengan NGR	43
3.4.9. Evaluasi untuk Penentuan Rating Optimum NGR	45
3.4.10. Evaluasi Resistans Berdasarkan Material dan Geometric resistor	

NGR.....	48
3.4.11. Perhitungan Solid Grounding.....	50
3.5. Pertimbangan Etika Penelitian.....	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	52
4.1. Gambaran Umum Hasil Penelitian.....	52
4.2. Interpretasi Temuan Penelitian.....	53
4.2.1. Parameter Dasar Generator.....	53
4.2.2. Evaluasi Resistans Berdasarkan Geometris Resistor dan Hasil FAT ..	54
4.2.3. Perhitungan Arus Gangguan Tanah FAT.....	57
4.2.4. Analisis Termal pada NGR.....	57
4.2.5. Evaluasi Kinerja Sensing Resistor Dual Tap pada NGR.....	59
4.2.6. Evaluasi <i>Current Transformer</i> (CT) 200/1 A 5P10 pada NGR.....	59
4.2.7. Evaluasi pemilihan Vacuum Contactor.....	61
4.2.8. Evaluasi Interaksi NGR dengan Relai Proteksi.....	62
4.2.9. Evaluasi Perhitungan dan Justifikasi Pemilihan Parameter NGR.....	64
4.2.10. Perhitungan solid grounding untuk pembanding.....	66
4.3. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu.....	67
4.3.1. Kontribusi Penelitian Habib Hanifah (2025).....	68
4.3.2. Kontribusi Penelitian Wiguna (2024).....	68
4.3.3. Kontribusi Penelitian Putri (2022).....	68
4.3.4. Kontribusi Penelitian Nursafitri (2021).....	69
4.4 Implikasi Dari Temuan Penelitian.....	69
4.4.1. Implikasi Keandalan Sistem Proteksi.....	69
4.4.2. Implikasi terhadap penelitian NGR.....	69
4.4.3. Implikasi Terhadap Keselamatan Personel dan Peralatan.....	70
4.4.4. Implikasi Terhadap Kontinuitas Operasional.....	70
4.4.5. Implikasi Skenario Kegagalan Berdasarkan SLD.....	70
4.5. Keterbatasan Penelitian.....	70
4.5.1. Keterbatasan Metodologis.....	71
4.5.2. Keterbatasan Analisis.....	71
4.5.3. Keterbatasan Kontekstual.....	71
BAB V KESIMPULAN.....	73

5.1. Kesimpulan	73
5.2. Pernyataan Penutup	73
DAFTAR PUSTAKA	74
LAMPIRAN.....	79

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu.....	30
Tabel 3.1 Data FAT NGR	35
Tabel 3.2 Data Current Transformer dan Relay Berdasarkan SLD & FAT	35
Tabel 3.3 Data Sensing Resistor	35
Tabel 3.4 Kerangka Matriks Evaluasi Multi-Skenario.....	47
Tabel 4.1 Ringkasan Hasil Pengujian FAT NGR	52
Tabel 4.2 Parameter Geometric	54
Tabel 4.3 Kontribusi toleransi geometris	56
Tabel 4.4 Perhitungan kenaikan termal resistor	58
Tabel 4.5 Setting Relay Ground Fault 51G.....	63
Tabel 4.6 Hasil Evaluasi Perhitungan Multi-Skenario Rating NGR.....	65
Tabel 4.7 Perbandingan Arus Gangguan Berdasarkan Metode Pentanahan pada.	67
Tabel 4.8 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu.....	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Generator Cummins QSK 95 G4	9
Gambar 2-2 Perangkat Sistem Proteksi	10
Gambar 2-3 Skema Prinsip Kerja Generator Listrik.....	14
Gambar 2-4 Konstruksi generator sinkron.....	15
Gambar 2-5 <i>Solid Grounding</i>	19
Gambar 2-6 <i>Resistance Grounding</i>	20
Gambar 2-7 <i>Reactance Grounding</i>	20
Gambar 2-8 <i>Ungrounded system</i>	21
Gambar 2-9 Proses Fabrikasi NGR.....	23
Gambar 2-10 Resistor bahan stainless	23
Gambar 2-11 Koordinasi NGR & R51G-SE330.....	28
Gambar 2-12 Kerangka Konseptual.....	32
Gambar 3-1 SLD NGR(diolah dari Lampiran 1)	35

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN	Judul	Halaman
A	Neutral Grounding Resistor Acceptance Test Ngr 6.6kv 200A 19 Ω .	80
B	Data sheet Generator n NGR appendix	86
C	SLD NGR.....	91
D	SLD Typical Protection Relaying Metering Diagram EDG-NGR.....	92

DAFTAR SINGKATAN

A	Ampere
AC	Alternating Current
AC TOC	AC Time Overcurrent
ALF	Accuracy Limit Factor
CB	Circuit Breaker
CP	Specific Heat Capacity
CT	Current Transformer
DC	Direct Current
EDG	Emergency Diesel Generator
FAT	Factory Acceptance Test
Fk	Safety Factor
G4	Generation 4
GF	Ground Fault
GGL	Gaya Gerak Listrik
GΩ	Giga Ohm
HRG	High Resistance Grounding
LRG	Low Resistance Grounding
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEEE PES	IEEE Power & Energy Society
Ig	Ground Fault Current
Ig_desain	Design Ground Fault Current
Ig_FAT	Ground Fault Current (FAT)
Ig_max	Maximum Ground Fault Current
Ig-solid	Solid Ground Fault Current
In	Nominal Current
IR	Infrared
Is	Secondary Current
Isense	Sense Current
kA	kilo Ampere
kJ	Kilojoule
kV	kilo Volt
kVA	kilo Volt Ampere
kVAC	kilo Volt Alternating Current
kVDC	kilo Volt Direct Current
kΩ	kilo Ohm
L	Inductance
L-G	Line to Ground
lifetime	Lifetime
L-L	Line to Line
L-R	Line-to-Resistance
M	Multiples of Pickup
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
mbar	millibar
min	Minute

ms	Millisecond
MVA	Mega Volt Ampere
mW	Milliwatt
NGR	Neutral Grounding Resistor
pf	Power Factor
PLC	Programmable Logic Controller
PLN	Perusahaan Listrik Negara
PLTU	Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PNGR	NGR Power Dissipation
Psense	Sensing Power Dissipation
PT PLN	Perusahaan Listrik Negara
pu	per unit
PUIL	Persyaratan Umum Instalasi Listrik
QSK	Quantum Series K
R _{desain}	Design Resistance
R _{FAT}	FAT Resistance
R _{NGR}	Neutral Grounding Resistor
R _b	Burden Resistance
RH	Relative Humidity
RMS	Root Mean Square
Rsense	Sensing Resistor
RSS	Root Sum Square
S _{rated}	Rated Apparent Power
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SE-330	Sensitive Earth Fault Relay
SLD	Single Line Diagram
SLG	Single Line to Ground (Fault)
Std	Standard
T(t)	Temperature at Time t
t _{alarm}	Alarm Time
U _d	Lightning Impulse Voltage
U _m	Rated Maximum Voltage
V	Volt
V _{LL}	Line-to-Line Voltage
VAC	Volt Alternating Current
VCB	Vacuum Circuit Breaker
VDC	Volt Direct Current
VFD	Variable Frequency Drive
V _k	Knee-Point Voltage
VL	Line Voltage
VLL	Line-to-Line Voltage
V _{ph}	Phase-to-Neutral Voltage
V _s	Secondary Voltage
V _{sense}	Sense Voltage
VT	Voltage Transformer
Y	Wye (Bintang)
Z ₀	Zero Sequence Impedance
Z _{base}	Base Impedance

α	Temperature Coefficient
ΔI_g	Ground Fault Current Deviation
ΔR	Resistance Deviation
ΔT	Temperature Difference
η	Thermal Efficiency Factor
Ω	Ohm

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

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 dalam hal ini PT PLN 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.

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). 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.

Generator sinkron 3.500 kVA umumnya beroperasi pada tegangan 6,6 kV atau 11 kV, dengan konfigurasi hubungan bintang (Y) yang menghasilkan titik netral penting bagi sistem proteksi. Desain sistem pentanahan pada titik netral sangat mempengaruhi besar arus gangguan tanah serta tingkat keandalan sistem proteksi secara keseluruhan (Sarira, Brian et al, 2022).

Secara umum, terdapat dua metode dasar sistem pentanahan berdasarkan IEEE Std 142 (Green Book), yaitu *solid grounding* dan *impedance grounding*. Pada sistem *solid grounding*, titik netral generator dihubungkan langsung ke tanah tanpa impedansi. 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 (Çetinkaya & Umer, 2017).

Sebaliknya, sistem *impedance grounding* membatasi arus gangguan tanah dengan menambahkan impedansi berupa reaktansi atau resistans 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. Menurut Chang (2015), penggunaan NGR dengan nilai resistans yang dirancang optimal mampu menjaga stabilitas sistem, mengurangi tegangan lebih transien, serta mencegah kerusakan pada isolasi peralatan.

Nilai resistans NGR merupakan parameter utama yang menentukan besarnya arus gangguan satu fasa ke tanah (*single line-to-ground fault*) pada generator. Besar kecilnya resistans akan mempengaruhi kemampuan sistem proteksi dalam membatasi arus gangguan sehingga tidak menimbulkan kerusakan termal pada belitan stator maupun tegangan lebih pada fasa sehat (Kundur, 2017). Menurut IEEE Std 142-2007, resistans yang terlalu kecil menyebabkan arus gangguan sangat besar sehingga meningkatkan risiko kerusakan peralatan, sedangkan resistans yang terlalu besar mengakibatkan relay tidak sensitif terhadap gangguan. Oleh karena itu, pengaruh resistans NGR terhadap arus gangguan harus dianalisis secara kuantitatif untuk menentukan apakah nilai resistans yang digunakan telah sesuai dengan batasan aman dan keandalan sistem proteksi generator 3.500 kVA.

Factory Acceptance Test (FAT) merupakan tahapan verifikasi teknis yang penting sebelum NGR dioperasikan pada sistem proteksi generator. FAT digunakan untuk memastikan bahwa nilai resistans aktual, kemampuan isolasi, dan integritas konstruksi resistor telah memenuhi persyaratan standar seperti IEEE Std C57.32-2015 dan PUIL 2011 yang mengatur syarat keselamatan dan karakteristik pentanahan pada sistem tenaga listrik. Menurut Chang (2015), evaluasi FAT berfungsi untuk memastikan bahwa perangkat pembatas arus gangguan bekerja sesuai nilai desain sehingga risiko kegagalan proteksi dapat diminimalkan sejak tahap pra-instalasi. Dengan demikian, analisis kesesuaian hasil FAT terhadap standar internasional dan nasional menjadi penting untuk menjamin NGR bekerja secara aman dan andal ketika terjadi gangguan tanah pada generator 3.500 kVA.

Keandalan sistem proteksi generator ditentukan oleh kemampuan perangkat proteksi dalam mendeteksi dan mengisolasi gangguan tanah secara tepat, cepat, dan

selektif. Parameter utama seperti arus gangguan, tegangan lebih pada fasa sehat, serta kemampuan pickup relay berperan penting dalam menentukan tingkat keandalan tersebut (Blackburn & Domin, 2021). Sistem proteksi berbasis NGR dirancang agar arus gangguan tetap berada dalam rentang yang mampu dideteksi oleh *ground fault relay* sehingga proses pemutusan dapat dilakukan sebelum kerusakan menyebar ke bagian lain dari generator. IEEE Std C37.101-2006 menekankan bahwa relai harus memiliki sensitivitas dan waktu operasi yang sesuai dengan karakteristik arus gangguan agar sistem proteksi dapat bekerja tanpa menimbulkan *maloperation* atau *failure to operate*. Oleh karena itu, evaluasi keandalan proteksi dengan NGR menjadi bagian penting dalam memastikan bahwa generator berkapasitas 3.500 kVA memiliki proteksi yang aman dan stabil.

Meskipun penelitian mengenai sistem pentanahan generator telah banyak dilakukan, masih terdapat beberapa celah penelitian yang belum terjawab secara komprehensif. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada analisis besar arus gangguan tanah atau perbandingan metode pentanahan, tanpa mengkaji secara kuantitatif pengujian nilai resistans NGR terhadap arus gangguan pada generator berkapasitas menengah menggunakan data FAT. Evaluasi hasil FAT pada NGR jarang dilakukan secara mendalam, padahal FAT merupakan parameter awal yang menentukan kesesuaian performa resistor terhadap standar IEEE dan PUIL sebelum perangkat dioperasikan di lapangan (Chang, 2015). Lebih jauh, penelitian terdahulu belum banyak menilai tingkat keandalan sistem proteksi generator berdasarkan parameter terintegrasi seperti arus gangguan aktual, tegangan lebih pada fasa sehat, serta kemampuan pickup relay dalam satu kajian yang utuh (Blackburn & Domin, 2021). Celah lain yang belum terisi adalah penelitian yang membandingkan resistans teoritis hasil perhitungan standar dengan resistans aktual FAT untuk menilai implikasinya terhadap sensitivitas proteksi dan respon relay (Lewi et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh resistans NGR dengan menilai kesesuaian hasil FAT, menganalisis keandalan sistem proteksi, dan membandingkan resistans teoritis–aktual pada generator 3.500 kVA.

Perihal yang ditulis diatas menjadi dasar kuat bagi peneliti untuk merumuskan karya ilmiah berjudul “*Evaluasi Keandalan Sistem Proteksi Generator 3.500 kVA*”

Menggunakan Neutral Grounding Resistor”.

Untuk *locus* penelitian , NGR di fabrikasi pada workshop yang berlokasi di Gunung Puteri, Bogor. NGR dan akan di pasang menjadi bagian sistem proteksi generator Cummins QSK 95 G4 yang difungsikan sebagai Emergency Diesel Generator (EDG) pada sebuah smelter di kabupaten Gresik, Jawa Timur

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh nilai resistans NGR terhadap besarnya arus gangguan satu fasa ke tanah pada generator sinkron 3.500 kVA.
2. Hasil pengujian Factory Acceptance Test (FAT) pada unit NGR dievaluasi dengan standar yang terkait seperti IEEE , IEC dan PUIL.
3. Keandalan sistem proteksi ground fault dilihat dari parameter arus gangguan, tegangan lebih pada fasa sehat, dan kemampuan pickup relay.
4. Kesesuaian antara resistans hasil perhitungan teoritis NGR dengan resistans aktual hasil FAT, serta implikasinya terhadap respons proteksi generator.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh nilai resistans NGR terhadap arus gangguan satu fasa ke tanah pada generator sinkron 3.500 kVA.
2. Mengevaluasi hasil pengujian FAT pada unit NGR mengacu pada standar yang di buat oleh IEC, IEEE dan PUIL .
3. Menilai tingkat keandalan sistem proteksi *ground fault* berdasarkan karakteristik arus gangguan, tegangan lebih, dan sensitivitas relay.
4. Menganalisis kesesuaian antara resistans hasil perhitungan teoritis dan resistans aktual NGR hasil FAT serta implikasinya terhadap efektivitas proteksi.

1.4. Pertanyaan Penelitian

Untuk mencapai tujuan di atas, maka pertanyaan penelitian yang dijawab dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana nilai resistans NGR mempengaruhi arus gangguan satu fasa ke tanah pada generator 3.500 kVA?
2. Apakah hasil FAT pada unit NGR telah memenuhi ketentuan standar IEC, IEEE dan PUIL?
3. Bagaimana keandalan sistem proteksi ground fault jika ditinjau dari parameter arus gangguan, tegangan lebih, dan kemampuan pickup relay?
4. Bagaimana kesesuaian antara resistans teoritis dan resistans aktual NGR, serta apa dampaknya terhadap kinerja proteksi?

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian yang dilakukan ini adalah :

1. Bagi *Engineer* Operasional: penelitian ini menjadi acuan dalam penetapan nilai resistans NGR yang sejalan dengan sensitivitas arus gangguan.
2. Bagi Manajemen Pemeliharaan: penelitian ini menegaskan bahwa disiplin monitoring dan uji berkala mempengaruhi kestabilan nilai pickup dan konsistensi respons relay
3. Bagi Penyedia Jasa Proteksi Sistem Tenaga: penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam peninjauan ulang implementasi proteksi stator ground fault pada instalasi yang menggunakan NGR
4. Bagi Masyarakat Pengguna Listrik: penelitian ini memberikan manfaat tidak langsung melalui peningkatan keandalan suplai listrik sehingga potensi gangguan dan pemadaman akibat fault pada unit generator dapat ditekan
5. Bagi Akademisi : penelitian ini dapat menjadi bahan pengayaan materi ajar pada mata kuliah sistem proteksi tenaga listrik terutama topik pembatasan arus gangguan dengan NGR
6. Bagi Peneliti: penelitian ini memberikan landasan empiris yang dapat dipakai untuk memperluas kajian ke arah pengembangan standar evaluasi keandalan proteksi generator skala menengah

7. Bagi Penelitian Selanjutnya: penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan model evaluasi proteksi berbasis data operasi nyata agar penentuan parameter dapat diarahkan oleh kecenderungan performa historis bukan asumsi rancangan awal

1.6. Lingkup Penelitian / Batasan Penelitian

Batasan penelitian ini perlu dilakukan agar efektif dan fokus pada topik yang akan di bahas. Adapun batasan masalah penelitian adalah :

1. Penelitian dilakukan pada sistem pentanahan generator sinkron Cummins QSK95 G4 berkapasitas 3.500 kVA.
2. Generator yang diteliti berfungsi sebagai *Emergency Diesel Generator (standby mode operation)*.
3. Penelitian hanya menilai pengaruh pemilihan resistans NGR serta tidak membahas aspek desain fisik resistor secara manufaktur
4. NGR yang digunakan berbahan logam, bersifat mudah alih, dan dilakukan pengujian dengan hasil yang disebut *Factory Acceptance Test*
5. Evaluasi keandalan sistem proteksi difokuskan pada ground fault dengan pembahasan pada kondisi *steady state* tanpa adanya harmonisa.
6. Analisis keandalan proteksi dibatasi pada koordinasi antara NGR, CT 200/1 A, dan relay 51G serta relay pemantau NGR (SE-330). Evaluasi proteksi tidak mencakup koordinasi dengan proteksi sistem distribusi eksternal atau proteksi tingkat utilitas.
7. Evaluasi termal NGR berdasarkan model perhitungan teoritis dan daya disipasi selama durasi 10 detik, tanpa melakukan pengujian kenaikan temperatur secara fisik pada unit NGR yang terpasang.

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, pertanyaan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori dasar mengenai tenaga listrik , generator sinkron dan teori sistem proteksi termasuk NGR

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang metode penelitian yang berisi langkah-langkah penelitian yang dilakukan dengan menggunakan data-data uji NGR yang mengacu pada standar internasional maupun standar nasional bidang kelistrikan

BAB IV : PEMBAHASAN

Bab ini akan menjelaskan kajian data primer dan sekunder untuk mengevaluasi penggunaan NGR pada sistem proteksi generator QSK 95 G4

BAB V : KESIMPULAN

Bab ini akan memberikan jawaban atas pertanyaan penelitian secara komprehensif

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pendahuluan

2.1.1. Sistem Kelistrikan dan Perkembangannya

Perkembangan sistem tenaga listrik berawal dari penemuan prinsip induksi elektromagnetik oleh Michael Faraday pada tahun 1831, yang menjadi dasar bagi seluruh teknologi pembangkitan listrik modern. Inovasi berikutnya oleh Nikola Tesla melalui pengembangan sistem arus bolak-balik (AC) memungkinkan pembangkitan dan transmisi daya secara efisien pada skala besar, dan menjadikan generator sinkron sebagai teknologi utama dalam pembangkitan listrik. Pembentukan sistem tenaga terintegrasi—meliputi pembangkitan, transmisi, dan distribusi—kemudian dikembangkan oleh tokoh seperti Edison dan Westinghouse, yang memperkuat kebutuhan akan keandalan dan proteksi sistem (Mike Allen, 2024)

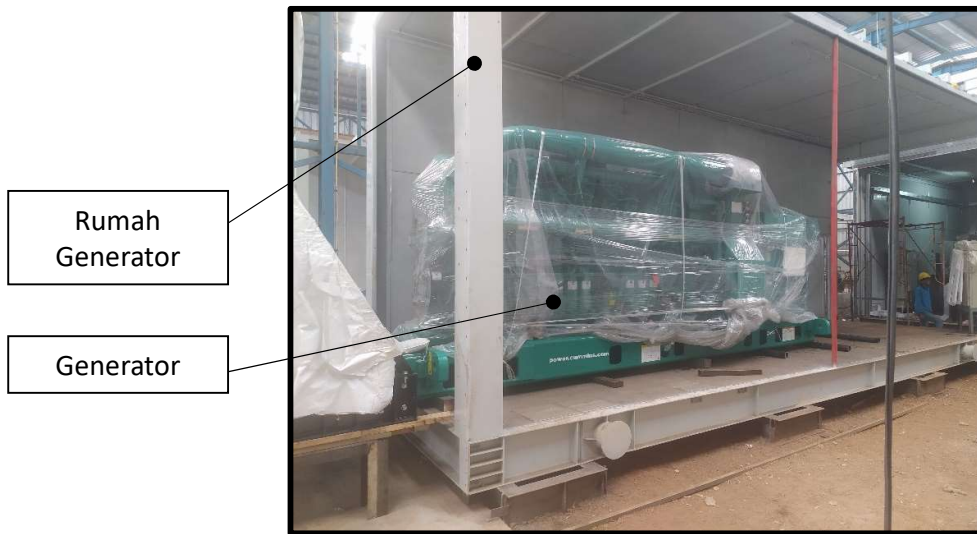
Memasuki era modern, standar sistem tenaga dan kajian teknis mengenai stabilitas serta karakteristik generator sinkron dijelaskan secara komprehensif oleh Grainger, Stevenson, dan Kundur. Seiring meningkatnya kapasitas pembangkitan, gangguan tanah menjadi salah satu ancaman utama bagi keandalan generator, sehingga metode pentanahan berevolusi dari ungrounded dan solid grounding menuju metode pentanahan melalui impedansi untuk mengatasi keterbatasan kedua metode tersebut. Beberapa standar internasional seperti IEEE Std C37.101 dan IEEE Std 142 merekomendasikan penggunaan NGR.

2.1.2. Proteksi Dengan NGR

NGR adalah resistor yang dihubungkan antara titik netral generator dan tanah, dengan fungsi membatasi arus gangguan tanah pada level aman, biasanya dalam praktek industri sekitar 5–10% dari arus nominal generator (IEEE std 142). Dengan pembatasan ini, kerusakan fisik akibat arus tinggi dapat diminimalkan, deteksi gangguan oleh relai dapat tetap andal, dan kontinuitas operasi dapat dipertahankan. Pada generator 3500 kVA, nilai resistans NGR harus dirancang dengan mempertimbangkan tegangan fasa-ke-netral dan arus gangguan yang diizinkan. Selain itu, pemasangan NGR harus diikuti dengan penyesuaian pengaturan (*setting*) pada relai proteksi antara *ground fault* relai

(51G), dan *monitoring* relai (SE 330) untuk memastikan sistem tetap bekerja selektif dan cepat.

Penelitian ini berada pada konteks evaluasi keandalan sistem proteksi generator melalui perancangan nilai resistans NGR yang sesuai dan optimal, pengujian kinerjanya pada kondisi gangguan. Pendekatan ini diharapkan dapat mengurangi risiko kerusakan generator, memperpanjang umur operasional peralatan, dan menjamin kontinuitas pasokan listrik pada sistem yang dilayani. Kajian evaluasi keandalan ini menggunakan data dari FAT sebagai sumber data utamanya. Pada gambar 2.1 merupakan foto dari generator Cummins QSL 95 G4 kapasitas 3500 kVA, 6.6kV yang menjadi bagian penelitian ini



Gambar 2-1 Generator Cummins QSK 95 G4

2.2. Kerangka Teori

2.2.1. Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah perangkat pengaman pada sistem tenaga listrik yang dipasang pada jaringan distribusi, transformator tenaga, saluran transmisi, serta generator listrik (Azis dan Febrianti, 2019). Fungsinya ialah melindungi sistem tenaga listrik dari gangguan atau kelebihan beban dengan cara memisahkan bagian jaringan yang mengalami gangguan agar tidak memengaruhi keseluruhan sistem. 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. Tujuan utama sistem proteksi