



UNIVERSITAS INDONESIA

**EVALUASI KINERJA RELE ARUS LEBIH
PADA GENERATOR**

SKRIPSI

**PRIMA HOTLAN KRISTIANTO
04 05 03 0656**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI ELEKTRO
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**EVALUASI KINERJA RELE ARUS LEBIH
PADA GENERATOR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**PRIMA HOTLAN KRISTIANTO
04 05 03 0656**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI ELEKTRO
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Prima Hotlan Kristianto

NPM : 0405030656

Tanda Tangan : 

Tanggal : 6 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

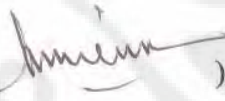
Nama : Prima Hotlan Kristianto
NPM : 0405030656
Program Studi : Elektro
Judul Skripsi : Evaluasi Kinerja Rele Arus Lebih Pada Generator

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing

: Ir. Amien Rahardjo, MT

()

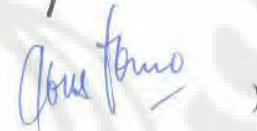
Penguji

: Ir. I Made Ardita, MT

()

Penguji

: Ir. Agus R. Utomo, MT

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Ir. Amien Rahardjo, MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Ir. I Made Ardita, MT dan Ir. Agus R. Utomo, MT selaku penguji dalam sidang skripsi yang telah memberikan saran bagi penyusunan skripsi ini;
- (3) pihak PT Badak BGL yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (4) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (5) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 6 Juli 2009



Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Prima Hotlan Kristianto
NPM : 0405030656
Program Studi : Elektro
Departemen : Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

EVALUASI KINERJA RELE ARUS LEBIH PADA GENERATOR

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 6 Juli 2009
Yang menyatakan



(Prima Hotlan Kristianto)

ABSTRAK

Nama : Prima Hotlan Kristianto
Program Studi : Elektro
Judul : Evaluasi Kinerja Rele Arus Lebih Pada Generator

Dalam suatu sistem tenaga listrik, tidak lepas dari berbagai masalah. Salah satunya adalah gangguan asimetris pada terminal generator. Gangguan ini mengakibatkan aliran arus yang tinggi dan tidak seimbang dalam sistem tiga-fasa sehingga mengakibatkan penyaluran energi listrik ke beban menjadi terganggu dan merusak generator itu sendiri. Oleh karena itu, gangguan ini menjadi bahan pertimbangan dalam penyetelan relai proteksi arus lebih pada generator. Skripsi ini membahas evaluasi kinerja tiga jenis rele arus lebih yang terpasang pada generator apabila terjadi gangguan asimetris pada terminal generator. Evaluasi berupa penentuan waktu *pickup* dan waktu operasi rele. Untuk keperluan evaluasi tersebut, digunakan simulasi dengan pemrograman MATLAB.

Kata kunci:

Gangguan, asimetris, terminal, generator, rele arus lebih, *device 51V*, *device 46*, *device 51GN*

ABSTRACT

Name : Prima Hotlan Kristianto
Study Program : Elektro
Title : Duty Evaluation of Overcurrent Relays for Generators

In a power system, problems are inevitable. One of them is asymmetrical faults at generator terminal. These faults cause unbalanced high current in a three-phase system so that they can make electrical energy distribution to loads disturbed and damage the generator itself. Hence, these faults become setting considerations for over current protection relays at the generators. This final project contains duty evaluation of three types of over current relays set at the generator if there are asymmetrical faults at the generator terminal. Evaluation consists of pickup time and operation time determination of the relays. For that purposes, used simulation by MATLAB programming.

Key words:

Faults, asymmetrical, terminal, generators, over current relays, *device 51V*, *device 46*, *device 51GN*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan.....	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Sistematika Penulisan.....	2
2. RELE PROTEKSI PADA GENERATOR.....	3
2.1 Gangguan Pada Generator.....	3
2.1.1 Gangguan Pada Stator	3
2.1.2 Gangguan Pada Rotor	3
2.1.3 Kondisi Operasi Abnormal	4
2.1.3.1 Hilangnya Penguatan Medan.....	4
2.1.3.2 Gangguan Beban Lebih.....	4
2.1.3.3 Gangguan Tegangan Lebih.....	4
2.1.3.4 Gangguan Penggerak Mula	4
2.1.3.5 Gangguan Arus Lebih Urutan Negatif	5
2.1.3.6 Putaran Lebih.....	5
2.1.3.7 Temperatur Lebih.....	6
2.2 Rele Proteksi Pada Generator.....	6
2.2.1 Rele Arus Lebih dengan <i>Voltage-Restrained</i>	6
2.2.2 Rele Diferensial Stator	7
2.2.3 Rele Arus Lebih Urutan Negatif	9
2.2.4 Rele Anti <i>Motoring</i>	10
2.2.5 Rele Diferensial Stator-Tanah.....	12
2.2.6 Rele Kehilangan Medan.....	12
2.2.7 Rele Tegangan Seimbang dan <i>Time Delay</i>	14

2.2.8	Rele Arus Lebih Netral Generator	14
2.2.9	Rele Tegangan Lebih	15
2.2.10	Rele Thermal Beban Lebih	15
3.	EVALUASI KINERJA RELE ARUS LEBIH.....	18
3.1	Pengertian Kinerja Rele Arus Lebih.....	18
3.2	Kalkulasi Hubung Singkat Generator	18
3.2.1	Karakteristik Arus Hubung Singkat	18
3.2.2	Struktur Magnetik Generator	19
3.2.3	Kalkulasi Arus Gangguan	20
3.2.3.1	Beban Awal	20
3.2.3.2	Tinjauan Kalkulasi Gangguan	22
3.2.3.3	Penentuan Z_f , Arus Gangguan, dan Tegangan	23
3.2.3.4	Hubung Singkat Satu-Fasa-Tanah	26
3.2.3.5	Hubung Singkat Dua-Fasa-Tanah	26
3.2.3.6	Hubung Singkat Dua-Fasa.....	27
3.2.3.7	Komponen DC Arus Hubung Singkat.....	28
3.2.3.8	Arus Hubung Singkat Total.....	28
3.2.4	<i>Automatic Voltage Regulator (AVR)</i>	29
3.3	Proteksi Arus Lebih pada Generator	30
3.3.1	Respon Rele Terhadap Arus <i>Transient</i>	30
3.3.2	Arus Urutan Negatif Pada Generator	31
3.3.2.1	Pengertian Arus Urutan Negatif	31
3.3.2.2	Kapabilitas Urutan Negatif Generator.....	32
3.3.3	Arus pada Netral Generator untuk Gangguan Asimetris	33
3.3.3.1	Arus Netral untuk Gangguan Satu-Fasa-Tanah.....	33
3.3.3.2	Arus Netral untuk Gangguan Dua-Fasa-Tanah	34
3.3.4	Evaluasi Kinerja Rele Arus Lebih.....	35
3.3.4.1	Evaluasi Kinerja <i>Device 51V</i>	35
3.3.4.2	Evaluasi Kinerja <i>Device 46</i>	36
3.3.4.3	Evaluasi Kinerja <i>Device 51GN</i>	37
4.	ANALISIS KINERJA RELE ARUS LEBIH	38
4.1	Analisis Kinerja Rele Untuk Gangguan Satu-Fasa-Tanah.....	38
4.2	Analisis Kinerja Rele Untuk Gangguan Dua-Fasa-Tanah	43
4.3	Analisis Kinerja Rele Untuk Gangguan Dua-Fasa	48
4.4	Analisis Perbandingan Kinerja Rele	52
5.	KESIMPULAN.....	55
	DAFTAR ACUAN.....	56
	DAFTAR PUSTAKA	57
	LAMPIRAN.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Data <i>Motoring Power</i> Berbagai Tipe <i>Prime Mover</i>	11
Tabel 2.2.	Temperatur <i>Trip</i> RTD	17
Tabel 3.1.	Respon Dinamik Rele Arus Lebih Terhadap Variasi Arus.....	31
Tabel 3.2.	Kapabilitas Urutan-Negatif Kontinu.....	32
Tabel 3.3.	Kapabilitas Akumulasi Arus Asimetris	33
Tabel 4.1.	Waktu <i>Pickup Device 51V</i>	52
Tabel 4.2.	Waktu <i>Pickup Device 46</i>	52
Tabel 4.3.	Waktu <i>Pickup Device 51GN</i>	52
Tabel 4.4.	Kinerja Rele Arus Lebih yang Terpasang pada Generator	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Karakteristik Rele Arus Lebih dengan <i>Voltage-restrained</i>	7
Gambar 2.2.	Gangguan di Luar Zona Proteksi Rele Diferensial	8
Gambar 2.3.	Gangguan di Dalam Zona Proteksi Rele Diferensial	8
Gambar 2.4.	Karakteristik Rele Arus Lebih Urutan Negatif	9
Gambar 2.5.	Skema Rele Arus Lebih Netral Generator.....	15
Gambar 2.6.	Pengaman Temperatur Lebih Pada Stator	16
Gambar 3.1.	Arus Hubung Singkat	18
Gambar 3.2.	Envelope Peluruhan Arus Hubung Singkat.....	19
Gambar 3.3.	Sumbu Magnetik Generator	19
Gambar 3.4.	Fasor Arus dan Tegangan.....	21
Gambar 3.5.	Rangkaian Hubung Singkat pada Terminal Generator	24
Gambar 3.6.	Rangkaian Gangguan Satu-Fasa-Tanah	26
Gambar 3.7.	Rangkaian Gangguan Dua-Fasa-Tanah.....	27
Gambar 3.8.	Rangkaian Gangguan Dua-Fasa	27
Gambar 3.9.	Komponen Arus DC pada Gangguan.....	28
Gambar 3.10.	Pengatur Tegangan pada Generator	29
Gambar 3.11.	Arus ke Netral pada Gangguan Satu-Fasa-Tanah	34
Gambar 3.12.	Arus ke Netral pada Gangguan Dua-Fasa-Tanah.....	34
Gambar 4.1.a.	I_a terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah	39
Gambar 4.1.b.	I_b terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah.....	39
Gambar 4.2.a.	I_c terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah	39
Gambar 4.2.b.	V_a terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah	39
Gambar 4.3.a.	V_b terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah	39
Gambar 4.3.a.	V_b terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah	39
Gambar 4.3.b.	V_c terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah	39
Gambar 4.4.a.	V_{ab} terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah	40
Gambar 4.4.b.	V_{bc} terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah.....	40
Gambar 4.5.a.	V_{ca} terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah	40
Gambar 4.5.b.	I_n terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa A-Tanah.....	40
Gambar 4.6.a.	I_a /Tap Arus terhadap V_{ab}/V_{rated} Gangguan Fasa A-Tanah	41
Gambar 4.6.b.	I_b /Tap Arus terhadap V_{bc}/V_{rated} Gangguan Fasa A-Tanah.....	41
Gambar 4.6.c.	I_c /Tap Arus terhadap V_{ca}/V_{rated} Gangguan Fasa A-Tanah	41
Gambar 4.7.a.	Per Unit I_2 terhadap Waktu pada Gangguan Fasa A-Tanah.....	42
Gambar 4.7.b.	K terhadap Waktu pada Gangguan Fasa A-Tanah	42
Gambar 4.8.a.	I_n terhadap Waktu pada Gangguan Fasa A-Tanah	43
Gambar 4.8.b.	$\sum \frac{\Delta t}{t(I)_{av}}$ terhadap Waktu pada Gangguan Fasa A-Tanah.....	43
Gambar 4.9.a.	I_a terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah.....	44
Gambar 4.9.b.	I_b terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah.....	44
Gambar 4.10.a.	I_c terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah.....	44
Gambar 4.10.b.	V_a terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah	44
Gambar 4.11.a.	V_b terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah	44
Gambar 4.11.b.	V_c terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah	44
Gambar 4.12.a.	V_{ab} terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah.....	45

Gambar 4.12.b	V_{bc} terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah.....	45
Gambar 4.13.a	V_{ca} terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah	45
Gambar 4.13.b	I_n terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah.....	45
Gambar 4.14.a	I_a /Tap Arus terhadap V_{ab}/V_{rated} Gangguan Fasa B-C-Tanah	46
Gambar 4.14.b	I_b /Tap Arus terhadap V_{bc}/V_{rated} Gangguan Fasa B-C-Tanah	46
Gambar 4.14.c	I_c /Tap Arus terhadap V_{ca}/V_{rated} Gangguan Fasa B-C-Tanah.....	46
Gambar 4.15.a.	Per Unit I_2 terhadap Waktu pada Gangguan Fasa B-C-Tanah	47
Gambar 4.15.b.	K terhadap Waktu pada Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah.....	47
Gambar 4.16.a.	I_n terhadap Waktu pada Gangguan Fasa B-Fasa C-Tanah	47
Gambar 4.16.b.	$\sum \frac{\Delta t}{t(I)_{av}}$ terhadap Waktu pada Gangguan Fasa B-C-Tanah.....	47
Gambar 4.17.a	I_a terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C	48
Gambar 4.17.b.	I_b terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C	48
Gambar 4.18.a	I_c terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C	49
Gambar 4.18.b	V_a terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C	49
Gambar 4.19.a	V_b terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C.....	49
Gambar 4.19.b	V_c terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C	49
Gambar 4.20.a	V_{ab} terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C	49
Gambar 4.20.b	V_{bc} terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C	49
Gambar 4.21.a	V_{ca} terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C	50
Gambar 4.21.b	I_n terhadap Waktu untuk Gangguan Fasa B-Fasa C.....	50
Gambar 4.22.a	I_a /Tap Arus terhadap V_{ab}/V_{rated} Gangguan Fasa B-Fasa C	50
Gambar 4.22.b	I_b /Tap Arus terhadap V_{bc}/V_{rated} Gangguan Fasa B-Fasa C	50
Gambar 4.22.c	I_c /Tap Arus terhadap V_{ca}/V_{rated} Gangguan Fasa B-Fasa C.....	50
Gambar 4.23.a.	Per Unit I_2 terhadap Waktu pada Gangguan Fasa B-Fasa C	51
Gambar 4.23.b.	K terhadap Waktu pada Gangguan Fasa B-Fasa C	51
Gambar 4.24.	Perbandingan I_2 Gangguan Dua-Fasa-Tanah dengan Dua-Fasa ..	53
Gambar 4.25.	Perbandingan I_n Satu-Fasa-Tanah dengan Dua-Fasa-Tanah.....	54

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Data Generator.....	58
Lampiran B. Data <i>Setting</i> Rele Arus Lebih yang Terpasang pada Generator	59
Lampiran C. Rele-rele pada Generator	60
Lampiran D. Karakteristik Rele Tegangan Lebih Tipe IAV.....	61
Lampiran E. Karakteristik Rele Anti <i>Motoring</i> Tipe GGP	62
Lampiran F. Karakteristik Rele Kehilangan Medan Tipe CEH.....	63
Lampiran G. <i>Listing</i> Program MATLAB	64

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin meningkatnya dan semakin majunya teknologi yang ada saat ini tidak akan lepas dari kebutuhan akan tenaga listrik. Kehandalan sistem tenaga listrik untuk dapat menyalurkan listrik kepada konsumen mempunyai peranan yang sangat penting sekali.

Keandalan suatu sistem tenaga listrik dapat terlihat ketika terjadinya gangguan yang dapat menyebabkan terganggunya penyaluran energi listrik ke konsumen. Dalam suatu sistem tenaga listrik tidak akan mungkin bebas dari gangguan. Gangguan yang terjadi bisa pada pembangkitan, transmisi, maupun distribusi. Salah satu contoh adalah gangguan yang terjadi pada terminal generator. Generator adalah komponen yang sangat penting dalam pembangkitan energi listrik. Jika terjadi gangguan pada terminal generator maka akan menyebabkan terganggunya proses penyediaan energi listrik dan dapat menyebabkan kerusakan pada generator itu sendiri.

Karena sangat pentingnya proteksi generator terhadap kerusakan yang diakibatkan oleh arus gangguan yang sangat besar maka dibutuhkan pengaman terhadap arus lebih ini. Pengaman ini berupa tiga jenis rele arus lebih yang ada pada generator, yaitu rele arus lebih dengan *voltage-restrained*, rele arus lebih urutan-negatif, dan rele arus lebih netral generator. Jika ada gangguan pada terminal generator maka rele arus lebih ini akan memerintahkan *circuit breaker* untuk membuka sehingga generator terhindar dari arus lebih yang lebih lama. Untuk dapat menjalankan fungsinya dengan baik, rele arus lebih memiliki *setting* yang baik. Dengan melakukan evaluasi terhadap kinerja rele arus lebih berdasarkan *setting* yang tersedia, akan dapat diketahui kelayakan dari *setting* rele arus lebih tersebut.

1.2 Tujuan

Tujuan dari skripsi ini adalah melakukan evaluasi kinerja tiga jenis rele arus lebih pada generator apabila terjadi gangguan asimetris di terminal generator. Evaluasi kinerja meliputi waktu *pickup* dan waktu operasi dari rele arus lebih. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan data *setting* rele yang tersedia dan data generator yang digunakan.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah skripsi adalah:

1. Rele arus lebih pada generator yang dievaluasi kinerjanya adalah rele arus lebih dengan *voltage-restrained (device 51V)*, rele arus lebih urutan-negatif (*device 46*), rele arus lebih netral generator (*device 51GN*).
2. Evaluasi rele berupa penentuan waktu mulai *pickup* dan waktu operasi untuk tiga jenis gangguan asimetris, yaitu gangguan satu-fasa-tanah, gangguan dua-fasa-tanah, dan gangguan dua-fasa.
3. Gangguan terjadi pada terminal generator.

1.4 Sistematika Penulisan

Skripsi ini disusun dengan menggunakan metoda studi literatur dan simulasi dengan sistematika penulisan yang terbagi dalam lima bab. Sistematika penulisan sebagai berikut: Bab satu adalah pendahuluan yang menjelaskan mengenai latar belakang, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab dua menjelaskan teori-teori yang berhubungan dengan evaluasi kinerja arus lebih, yaitu kalkulasi hubung singkat pada terminal generator dan proteksi arus lebih pada generator. Bab tiga menjelaskan semua perhitungan yang digunakan dalam membuat simulasi. Bab empat adalah analisa hasil simulasi yang berupa simulasi arus gangguan dan simulasi tiga jenis rele arus lebih untuk setiap gangguan. Bab lima adalah kesimpulan.

BAB 2

RELE PROTEKSI PADA GENERATOR

2.1 Gangguan Pada Generator

Pada dasarnya jenis gangguan pada generator terbagi menjadi tiga, yaitu gangguan pada stator, gangguan pada rotor, dan gangguan yang disebabkan kondisi abnormal.

2.1.1 Gangguan Pada Stator

Gangguan pada stator meliputi gangguan hubung singkat fasa-tanah, gangguan hubung singkat antar-fasa, dan gangguan hubung singkat antar belitan.

Bahaya terbesar dari gangguan tersebut adalah kerusakan pada isolasi inti stator dan lilitan stator akibat panas yang dibangkitkan pada pusat gangguan. Dari ketiga jenis gangguan tersebut gangguan yang sering terjadi dalam belitan stator dan hubungannya adalah gangguan fasa-tanah.

2.1.2 Gangguan Pada Rotor

Gangguan pada rotor dapat berupa gangguan ke tanah atau gangguan antar belitan. Hal ini disebabkan karena adanya tekanan termis atau mekanik yang kuat pada isolasi belitan rotor.

Belitan rotor ini merupakan belitan eksitasi dan pada umumnya dalam keadaan normal mempunyai tahanan isolasi yang sangat tinggi. Gangguan ke tanah satu tempat yang terjadi pada sirkuit eksitasi tidak akan segera menimbulkan kerusakan bila arus gangguan ke tanah dibatasi. Gangguan ke tanah ini akan menimbulkan fluks yang tidak seimbang. Akibat langsung yang segera dirasakan adalah adanya gaya yang tidak seimbang pada masing-masing kutub dan akan menimbulkan getaran pada rotor serta dapat merusak bantalan generator yang akhirnya dapat menyebabkan kerusakan pada stator ataupun rotor karena terjadinya pergeseran. Dengan demikian adanya gangguan satu fasa ke tanah di satu tempat harus segera dideteksi oleh rele.

2.1.3 Kondisi Operasi Abnormal

Kondisi operasi abnormal ini meliputi antara lain :

1. Hilangnya penguatan (*loss of excitation*)
2. Gangguan beban lebih (*overload*)
3. Gangguan tegangan lebih (*overvoltage*)
4. Hilangnya penggerak mula (*loss of primemover*)
5. Gangguan arus lebih urutan negatif (*negatif phase sequence*)
6. Putaran lebih (*overspeed*)
7. Temperatur lebih (*overtemperature*)

2.1.3.1 Hilangnya Penguatan Medan (*Loss of Field*)

Hilangnya penguatan medan menyebabkan putaran generator akan bertambah cepat dan akan menyerap daya reaktif dari sistem. Induksi arus pada rotor, baji (*wedge*) akan menimbulkan torsi pada poros (*shaft*) sebagai hasil kondisi ini menyebabkan pemanasan lebih yang membahayakan rotor.

2.1.3.2 Gangguan Beban Lebih (*Overload*)

Gangguan beban lebih terjadi karena generator tidak mampu memikul beban yang melebihi batas nominalnya. Beban lebih tersebut dapat mengakibatkan penurunan frekuensi dan tegangan keluaran generator. Untuk mengatasi hal ini pengaturan tegangan (AVR) menaikkan arus penguatan namun kenaikan arus penguatan ini bila berlebihan dapat menimbulkan pemanasan lebih pada rotor dan stator.

2.1.3.3 Gangguan Tegangan Lebih (*Overvoltage*)

Gangguan tegangan lebih terjadi karena putaran generator melebihi batas nominalnya yang disebabkan oleh hilangnya beban atau gangguan pada penggerak mula. Putaran yang meningkat dapat meningkatkan frekuensi meningkat pula, hal ini dapat mengganggu sinkronisasi pada jaringan dan dapat pula mengakibatkan terjadinya kerusakan pada generator.

2.1.3.4 Kegagalan penggerak mula (*loss of primemover*)

Gangguan kegagalan penggerak mula pada generator akan mengakibatkan generator berubah menjadi motor. Hal ini terjadi karena generator mendapat suplai daya dari jaringan. Sebelum kehilangan penggerak mula secara keseluruhan, biasanya terjadi penurunan putaran pada turbin secara bertahap. Untuk turbin uap kemungkinan uap yang dibutuhkan untuk menggerakkan turbin tidak cukup untuk memutar turbin pada kecepatan nominalnya. Dengan demikian tegangan yang dihasilkan generator juga menurun. Pada saat terjadi perbedaan tegangan tersebut maka arus listrik akan mengalir ke generator.

2.1.3.5 Gangguan Arus Lebih Urutan Negatif (*Negative Phase Sequence*)

Dalam keadaan normal, arus pada generator tiga fasa seimbang. Tetapi jika terjadi gangguan pada jaringan maka keseimbangan tersebut akan terganggu. Gangguan ini dapat berupa gangguan fasa-tanah, gangguan fasa-fasa, pembebanan tidak simetris, dan putusnya salah satu fasa saluran.

Arus urutan negatif ini akan membangkitkan fluks pada stator yang mempunyai kecepatan yang sama dengan rotor, tetapi berputar dengan arah yang berlawanan. Dengan demikian kecepatan relatif putaran fluks ini terhadap rotor akan berputar pada dua kali dari frekuensi sistem. Hal ini terjadi karena rotor berputar ke kanan sedangkan fluks stator akibat fasa urutan negatif berputar ke kiri. Kejadian ini dapat mengakibatkan arus pusar pada rotor.

Arus pusar dengan frekuensi tinggi menyebabkan bagian luar dari rotor dan lilitan pada rotor menjadi panas. Selanjutnya arus pusar ini mengalir pada batang-batang peredam, gigi alur rotor dan dinding alur rotor yang akan mengubah sifat mekanis dan sifat listrik bagian yang dialirinya.

2.1.3.6 Putaran Lebih (*Overspeed*)

Bila suatu generator bekerja sendiri menanggung beban, tiba-tiba melepas bebannya karena suatu gangguan dan bila generator yang bekerja paralel terlepas dari sistem, akibatnya akan ada putaran lebih. Bila generator yang bekerja sendiri akibat hal ini menyebabkan kenaikan frekuensi dan bila tidak dilengkapi dengan AVR, maka putaran lebih akan menaikkan tegangan generator. Bila kenaikan

tegangan mendadak ini terjadi akan membahayakan isolasi belitan generator dan juga pada sistem beban.

2.1.3.7 Temperatur Lebih (*Overtemperature*)

Timbulnya panas yang berlebihan dalam stator umumnya disebabkan oleh beban lebih atau terjadinya hubung singkat di luar atau di dalam generator serta dapat pula disebabkan oleh kegagalan dari sistem pendinginan. Bila hal ini terjadi akan mengakibatkan perubahan sifat mekanis dan elektris dari bahan isolasi.

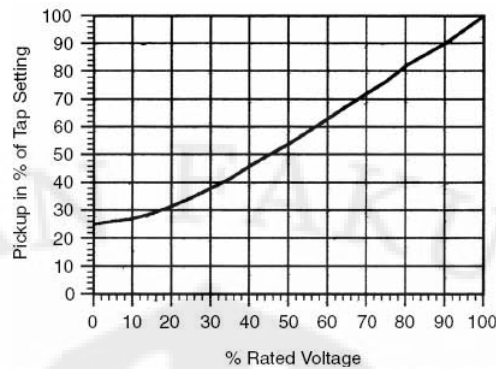
2.2 Rele Proteksi Pada Generator

Rele proteksi yang digunakan pada generator antara lain:

1. Rele arus lebih dengan *voltage restrained (device 51V)*
2. Rele diferensial stator (*device 87G*)
3. Rele arus lebih urutan negatif (*device 46*)
4. Rele anti *motoring (device 32)*
5. Rele diferensial stator-tanah (*device 87GG*)
6. Rele kehilangan medan (*device 40*)
7. Rele tegangan seimbang dan *time delay (device 60 & 62)*
8. Rele arus lebih netral generator (*device 51GN*)
9. Rele tegangan lebih (*device 59*)
10. Rele *thermal overload (device 49)*

2.2.1 Rele Arus Lebih dengan *Voltage Restrained (device 51V)*

Rele ini bekerja berdasarkan tegangan dan arus, tidak seperti rele arus lebih standar yang bekerja berdasarkan arus saja. Rele arus lebih dengan *voltage-restrained* normalnya diset 125-175% dari arus beban penuh. Pada tegangan tertentu di lokasi rele, arus yang dibutuhkan untuk membuat rele *pickup* memiliki nilai tertentu yang ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Karakteristik Rele Arus Lebih dengan *Voltage-restrained*

Berdasarkan gambar 2.1 apabila *setting tap* arus adalah 1000 A, maka untuk tegangan di lokasi rele V_{rated} , maka dibutuhkan arus minimal sebesar 1000 A untuk membuat rele *pickup*. Sedangkan untuk tegangan 0, dibutuhkan arus minimal sebesar 250 A untuk membuat rele *pickup*.

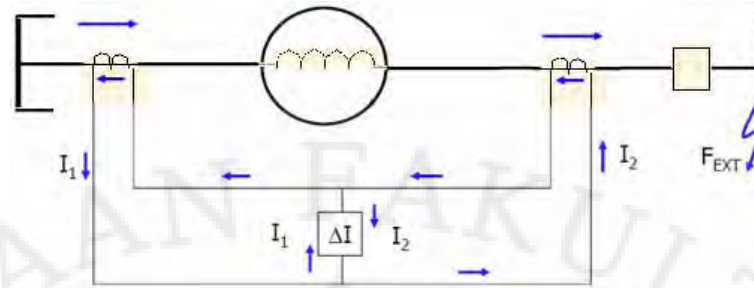
2.2.2 Rele Diferensial Stator (*device 87G*)

Rele diferensial merupakan rele pengaman generator utama, untuk mengatasi gangguan internal yang merupakan gangguan stator satu fasa ke tanah, fasa-fasa ke tanah dan gangguan tiga fasa yang mengakibatkan arus gangguan yang cukup besar. Berdasarkan standard (ANSI code 87G) direkomendasikan menggunakan *High Speed Differential Relay type CDF22*.

Rele jenis ini merupakan pengaman generator yang sangat sensitif dan cepat kerjanya. Daerah pengamannya dibatasi oleh pasangan transformator arus (CT) dimana rele tersebut dipasang.

Prinsip kerja rele ini akan membandingkan 2 besaran antara 2 titik pada batas-batas daerah pengaman. Jika generator yang diamankan tidak terjadi gangguan atau gangguan berada di luar daerah yang diamankan, maka arus yang mengalir pada transformator arus CT_1 dan CT_2 adalah sama. Atau mempunyai perbandingan arus yang seimbang, sehingga rele tidak bekerja. Jika pada daerah yang diamankan terjadi gangguan, akan terjadi perbedaan arus yang dapat menyebabkan rele bekerja. Untuk lebih jelas dapat dilihat dalam uraian berikut :

a. Keadaan normal atau gangguan diluar daerah pengaman.



Gambar 2.2 Gangguan di Luar Zona Proteksi Relé Diferensial

Arus yang mengalir pada relé :

$$i_d = i_1 + i_2 = 0 \quad (2.1)$$

dimana :

i_1 = arus sekunder yang mengalir pada CT₁

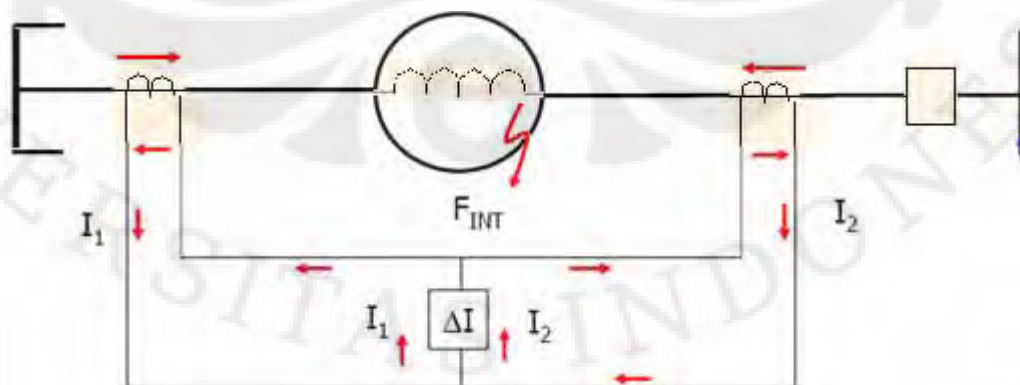
i_2 = arus sekunder yang mengalir pada CT₂

Pada keadaan normal (tidak ada gangguan) atau gangguan berada di luar daerah yang diamankan. Arus i_1 dan i_2 mempunyai nilai yang sama, tetapi dengan arah vektor yang berlawanan sehingga diperoleh $i_d = 0$. Dalam hal ini relé tidak bekerja karena tidak ada arus mengalir melalui relé.

b. Keadaan gangguan di daerah pengamanan

Jika terjadi gangguan hubung singkat di daerah pengamanan, maka arus yang mengalir pada CT₁ dan CT₂ tidak sama (besar dan arah), sehingga ada selisih antara arus i_1 dan i_2 . Adanya selisih yang menyebabkan relé bekerja.

$$i_d = i_1 + i_2 \neq 0 \quad (2.2)$$

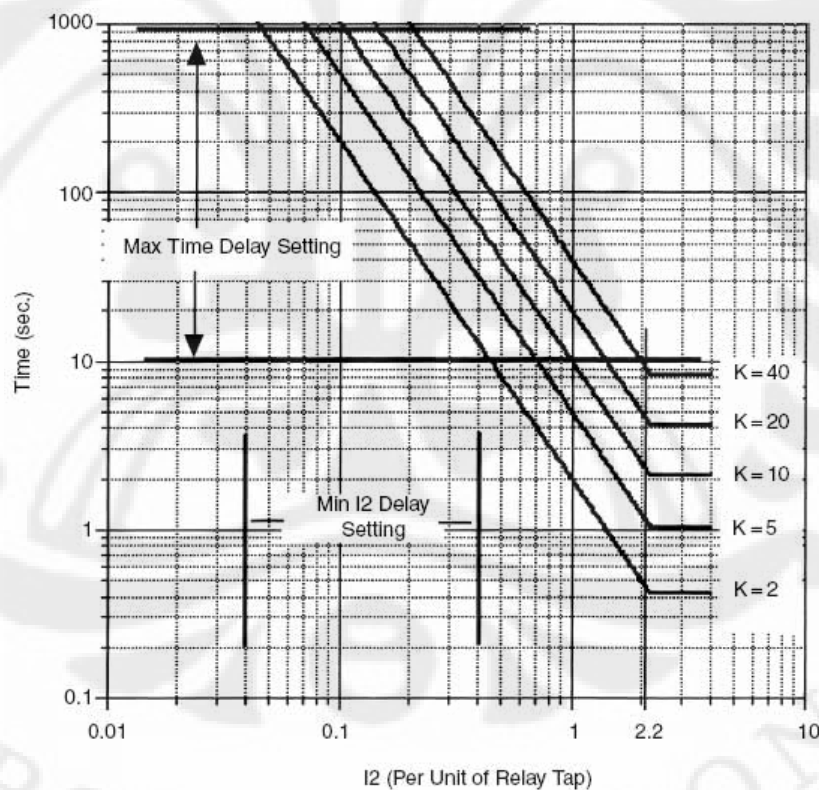


Gambar 2.3 Gangguan di Dalam Zona Proteksi Relé Diferensial

2.2.3 Rele Arus Lebih Urutan Negatif (*device 46*)

Rele arus lebih urutan negatif tersedia pada generator untuk melindungi generator dari efek arus urutan negatif (*unbalanced current*) yang melampaui kapabilitasnya. Implementasi dari rele ini adalah untuk men-*trip breaker* dari generator saja. Hal ini untuk mempercepat resinkronisasi generator apabila kondisi asimetris teratasi.

Rele arus lebih urutan-negatif tersedia dalam model elektromekanik dan elektronik dengan karakteristik waktu-arus yang dapat diatur untuk disesuaikan dengan kapabilitas I^2t dari generator. Rele elektronik memiliki sensitivitas yang lebih baik. Pada rele elektromekanik arus *pickup* I_2 minimum sekitar 60% dari arus nominal generator. Sensitivitas yang kurang baik menyebabkan rele elektromekanik digunakan hanya untuk proteksi *backup* dari arus asimetris.



Gambar 2.4 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih Urutan-Negatif

Rele ini hanya akan mengirim sinyal *trip* apabila akumulator mulai mengakumulasi efek termal I_2 . Ketika efek termal yang terakumulasi mencapai

batas *setting* K dari rele maka rele akan mengirim sinyal *trip* yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\int_0^{t_{op}} I_2^2 dt = K_{setting} \quad (2.3)$$

dengan t_{op} adalah waktu operasi rele. Apabila persamaan (2.3) tidak terpenuhi, maka rele akan mengirimkan sinyal *trip* dalam waktu *setting* maksimum.

Gambar 2.4 adalah kurva karakteristik rele arus lebih urutan negatif. Rele memiliki waktu tunda maksimum yang dapat diatur dari 10 sampai 990 detik. Ketika I_2 mencapai *setting threshold*, rele akan mulai mengakumulasi I^2t dan akan mengirimkan sinyal *trip*. *Trip* akan terjadi apabila akumulator mencapai $K_{setting}$ dan bila kondisi ini tidak terpenuhi rele tetap akan mengirimkan sinyal *trip* dalam waktu tunda *setting* maksimum.

2.2.4 Rele Anti *Motoring* / *Reverse Power Relay* (device 32)

Rele ini digunakan untuk mengamankan generator dari gangguan hilangnya penggerak mula (turbin uap) yang mengakibatkan generator dapat berubah menjadi motor. Pengaliran daya balik pada generator disebabkan oleh input penggerak mula yang kurang. Bila input tidak bisa mengatasi rugi-rugi, kekurangannya akan diberikan oleh daya nyata yang diserap dari sistem, dengan demikian generator telah bertindak sebagai motor. Akibatnya hal ini akan sangat besar pengaruhnya terhadap turbin dibandingkan generator.

Reverse power relay adalah jenis *directional relay* (unit terarah) atau dengan kata lain hanya mendeteksi aliran daya ke arah tertentu. Besaran penggerak rele ini adalah arus dan tegangan. Jika arah arus berlawanan dengan arah *setting*, maka torsi yang ditimbulkan adalah negatif, berarti rele tidak bekerja. Dalam hal ini rele akan pick-up untuk pengaliran daya dalam satu arah dan akan reset untuk pengaliran daya yang berlawanan dengan arah *setting* yang mana hal ini juga tergantung dari jenis turbin penggerakannya.

Tabel 2.1 Data *Motoring Power* Berbagai Tipe *Prime Mover*

Type of prime mover	Motoring power in percent of unit relay
Gas turbine single shaft	100
Gas turbine double shaft	10-15
Four cycle diesel	15
Two cycle diesel	25
Hidraulic turbine	2-100
Steam turbine (conventional)	1-4
Steam turbine (cond.cooled)	0,5-1,0

Data *sample*:

$$\text{Full load MVA} = 15,625$$

$$\text{Tegangan dasar} = 13,8 \text{ kV}$$

$$\text{Rasio CT} = 1000/5$$

$$\text{Rasio PT} = 14400/120$$

$$\text{Minimum pick up relay} = 0,01 \text{ A}, 120 \text{ V}$$

Pada generator *sample*, berdasarkan tabel 2.1 daya motoring yang masuk ke generator dipilih setengah persen dari *rated voltage relay*, yaitu : $0,5\% \times 12,5 \text{ MW} = 0,06 \text{ MW}$.

Sehingga arus motoring :

$$I_M (\text{sisi primer}) = \frac{0,06 \times 10^6 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 13,8 \text{ kV} \cdot 0,8} = 3,14 \text{ A (pada pf} = 0,8)$$

$$I_M (\text{sisi sekunder}) = \frac{5}{1000} \times 3,14 \text{ A} = 0,0157 \text{ A}$$

Karena rele GGP53C3A mempunyai arus kerja minimum 0,01 A pada tegangan 120/14400 V sedangkan tegangan generator adalah 13,8 kV, maka tegangan yang diterima rele:

$$V_{\text{sekunder}} = \frac{13800}{14400} \times 120 \text{ V} = 115 \text{ V}$$

Jadi rele akan *pick-up* pada arus :

$$I_R = \frac{120}{115} \times 0,01 \text{ A} = 0,0104 \text{ A}$$

Dengan demikian rele akan bekerja, sebab arus motoring minimum lebih besar dari kerja minimum rele ($0,0157 > 0,0104$). Menurut standar IEEE C.37.102-1987 rele jenis ini diberi *time delay* maksimum sampai 30 detik untuk memberikan waktu pada saat generator mengalami guncangan beban atau pada saat dilakukan kerja paralel. Untuk generator *sample* apabila dipilih time dial 2 maka terjadi penundaan selama 5 detik.

2.2.5 Rele Diferensial Stator-Tanah (*device 87GG*)

Rele ini digunakan untuk mengamankan stator dari gangguan fasa ke tanah dan fasa-fasa tanah. Rele ini merupakan *back-up* rele 87G. Pada generator *sample* menurut standar (ANSI dev.code 87GG) digunakan *time overcurrent relay* tipe IAC53A801A. Prinsip kerja pengaman diferensial tanah hampir sama dengan pengaman diferensial utama, dimana dalam keadaan normal arus yang menuju ke netral trafo dan netral generator akan sama dengan nol.

Untuk keperluan pengamanan ini digunakan trafo arus pembantu (*auxiliary CT*) karena rasio CT pada netral dan pada belitan tidak sama. Rasio CT

pembantu diperoleh dari: $\frac{100/5}{1000/5} = 1/10$.

Dengan adanya CT ini maka akan menjaga kehandalan operasi rele diferensial tanah. Rele ini bekerja bila gangguan ada di dalam daerah proteksi generator saja (*restricted*) dan bekerja tanpa memakai perbedaan polaritas arus tetapi memakai kelebihan arus saja.

2.2.6 Rele Kehilangan Medan / *Lost of Field Relay (device 40)*

Penguatan medan akan hilang pada suatu generator sinkron, jika terjadi gangguan pada rangkaian kumparan medannya misalnya terbuka atau terhubung singkat. Ketika generator kehilangan arus penguatan, generator akan bekerja sebagai generator induksi. Generator juga akan berputar diatas kecepatan normal dan selanjutnya juga akan mengurangi daya semu (VA) dan menyerap daya reaktif dari sistem. Bila sistem dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif yang diperlukan, maka tegangan tidak akan terganggu, tetapi apabila tidak maka tegangan akan turun dan kestabilan generator yang terhubung paralel akan

terganggu. Bila generator tetap beroperasi pada keadaan seperti ini, maka akan menimbulkan arus tidak normal melalui tubuh rotor dan menghasilkan torsi osilasi yang tinggi pada poros rotor.

Untuk mengamankan gangguan hilangnya penguatan maka pada generator *sample* berdasarkan standar ANSI dipakai rele *loss of excitation* tipe CEH51A3A. Rele ini bekerja berdasarkan besarnya daya reaktif yang diserap sistem, diukur dari besarnya impedansi kapasitif yang timbul. Rele ini juga bekerja berdasarkan sudut antara arus dan tegangan dari daya reaktif tersebut. Semakin besar daya reaktif yang diserap, maka akan semakin besar pula impedansi yang timbul. Besarnya impedansi dinyatakan dengan besarnya jari-jari lingkaran.

$$\text{Radius} = \frac{V^2}{2} \left[\frac{1}{X_L} + \frac{1}{X_d} \right] \quad (2.4)$$

dimana :

V = tegangan fasa

X_L = total *equivalent impedance*

X_d = *synchronous unsaturated impedance*

Untuk perhitungan *setting* rele ini cukup menggunakan konstanta mesin (reaktansi *transient* dan *subtransient*) serta tegangan sistem.

Data rele *sample* :

Full load MVA = 15,625

Tegangan dasar = 13,8 kV

X'_d = 0,26

X_d = 1,8

Rasio CT = 1000/5

Rasio PT = 14400/120

$$Z_{base} = \frac{kV^2}{MVA} \times \frac{CTR}{PTR} = \frac{13,8^2}{15,6} \times \frac{1000/5}{14400/120} = 20,35 \text{ ohm}$$

$$X'_d \text{ (sekunder)} = X'_d \cdot Z_{base} = 0,26 \times 20,35 = 5,3$$

$$X_d \text{ (sekunder)} = X_d \cdot Z_{base} = 1,8 \times 20,35 = 36,6$$

$$\text{Offset tap} = 0,5 \cdot X'_d \text{ (sekunder)} = 0,5 \times 5,3 = 2,65$$

Pilih offset tap = 3

Set L lead pada 1,0 dan H lead pada 4,0.

Bila terjadi gangguan maka rele ini akan memerintahkan membuka generator *breaker* dan *field breaker* untuk meminimalkan kerusakan dalam medan rotor jika terjadi hubung singkat dalam medan rotor.

2.2.7 Rele Tegangan Seimbang dan *Time Delay* (device 60 dan 62)

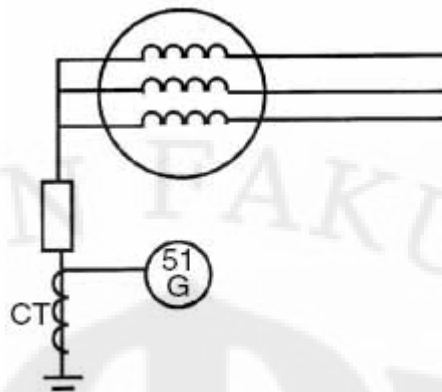
Rele ini bukan pengaman utama maupun pengaman cadangan dari suatu generator, melainkan hanya memantau trafo tegangan untuk beberapa rele pengaman yang lain seperti (51V, 40, 32) yang menggunakan tegangan kontrol untuk rele tersebut, serta untuk sensing *voltage regulator*.

Rele ini bekerja bila ada kegagalan dari salah satu trafo tegangan seperti pengaman lebur (*fuse*) putus atau rangkaian kontrol rusak dan sebagainya. Pada saat operasi normal AVR yang bekerja adalah AVR1, yang mendapat tegangan pengindera (sensing voltage) dari *Voltage Regulator Potential Transformer* (VR-PT). Bila tegangan pengindera untuk AVR1 terjadi gangguan, maka rele ini akan mendeteksi perubahan tegangan serta bekerja dan memerintahkan *transfer switch* (TRS) untuk mengubah posisi kontak, sehingga AVR2 mengambil alih secara otomatis sebagai pengontrol tegangan yang mendapat tegangan pengindera dari *Metering Potential Transformer* (M-PT).

Tetapi sebaliknya bila tegangan pengindera untuk AVR2 terjadi gangguan pada saat AVR1 sedang beroperasi, maka rele ini tidak bekerja. Hal ini dimaksudkan agar jangan sampai generator kehilangan medan penguat.

2.2.8 Rele Arus Lebih Netral Generator (device 51GN)

Rele ini merupakan rele arus lebih standar yang diaplikasikan pada netral generator untuk mendeteksi arus gangguan tanah. Rele ini memiliki *setting tap* dan *time dial*. *Setting tap* rele bervariasi dari 0,5 sampai 4, dan pemilihannya berdasarkan batasan besar arus gangguan tanah ketika rele mulai *pickup*. Pada gambar 2.15, dengan rasio CT 100/5 dan *tap*=1 maka rele mulai *pickup* untuk arus gangguan tanah sebesar 20 A. *Setting time dial* dipilih berdasarkan waktu operasi rele yang diinginkan.



Gambar 2.5 Skema Rele Arus Lebih Netral Generator

Skema aplikasi rele ini ditunjukkan pada gambar 2.5. Rele arus lebih ini akan mengirimkan sinyal *trip* apabila ada arus yang mengalir ke netral generator dan memenuhi persamaan (3.56).

2.2.9 Rele Tegangan Lebih / *Overvoltage Relay (device 59)*

Rele ini berfungsi memproteksi stator generator dari penguatan lebih yang dapat menghasilkan fluks jenuh pada inti besi stator yang mengakibatkan panas berlebihan di sekitar stator.

Untuk mengamankan gangguan tersebut pada generator *sample* dipakai rele *overvoltage* tipe IAV52A4A yang mempunyai *voltage range* 55 – 140 V. Rele ini bekerja berdasarkan kenaikan tegangan yang diakibatkan oleh penguatan lebih. Semakin besar arus penguatan yang masuk ke stator, semakin besar pula tegangan keluaran generator. Tegangan keluaran generator yang naik dari batas nominal dapat menaikkan keluaran generator. Tegangan keluaran generator yang naik dari baras nominal dapat menaikkan keluaran *potential transformer* (PT) 14400/120.

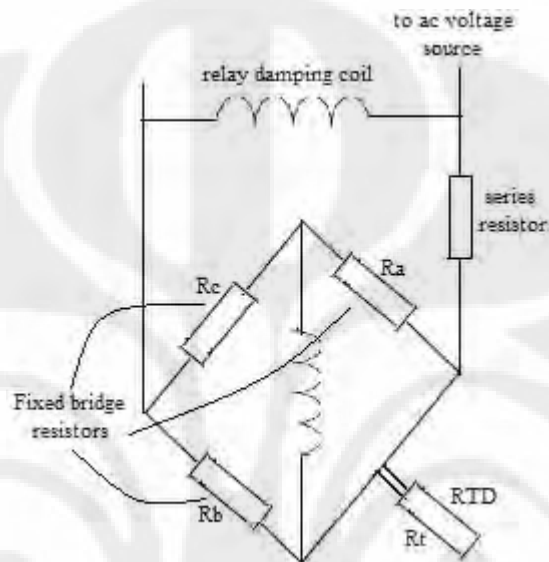
$$\text{Tegangan kerja rele} = \frac{120}{14400} \times 13,8kV = 115 \text{ V}$$

Dari tabel Instruction Book Voltage Relay IAV52A dipilih *setting tap* (tegangan minimum *pick up*) = 120 dengan *time dial setting* 4. Dengan *Time Dial Setting* = 4, maka rele akan bekerja dalam waktu 12,5 detik.

2.2.10 Rele Thermal Beban Lebih / *Thermal Overload Relay (device 49)*

Timbulnya panas yang berlebihan dalam stator pada umumnya disebabkan oleh beban lebih atau terjadinya hubung singkat di luar atau di dalam generator, serta dapat pula disebabkan oleh kegagalan dari sistem pendingin.

Untuk mencegah hal tersebut, maka pada belitan stator digunakan *Resistance Temperature Detector* (RTD). Penempatan RTD ini dapat dilihat dalam gambar berikut :



Gambar 2.6 Pengaman temperatur lebih pada stator berdasarkan perubahan tahanan

Pada keadaan normal dari gambar di atas berlaku hubungan :

$$R_a \times R_b = R_c \times R_t$$

dimana R_t adalah tahanan yang berubah besarnya sesuai dengan temperaturnya.

Selama temperatur belitan stator berada dalam batas yang diizinkan, maka nilai R_t normal dan arus yang melalui *operating coil* masih kecil, sehingga rele tidak bekerja. Sebaliknya bila temperatur belitan stator naik lagi mencapai nilai tertentu maka rele akan bekerja menutup kontaknya, membunyikan alarm serta men-*trip circuit breaker*.

RTD bekerja (*trip*) berdasarkan kelas isolasi dari suatu belitan. Hal ini dapat dilihat dari tabel berikut (NEMA MG.1-20.40).

Tabel 2.2 Temperatur Trip RTD

Motor HP/Volt	Kelas Isolasi			
	A	B	F	H
Kurang dari 1500 HP	110°C	130°C	155°C	180°C
1500 HP ke atas:				
Lebih kecil dari 7 kV	105°C	125°C	150°C	175°C
Lebih besar dari 7 kV	100°C	120°C	145°C	165°C

Karena kelas isolasi untuk belitan pada *sample* yang digunakan adalah kelas F, demi keamanan maka rele ini diset *trip* pada 135°C dan alarm pada 125°C. Dari tabel juga terlihat bahwa untuk isolasi yang sama semakin besar tegangan yang dipakai maka suhu untuk *trip* akan semakin kecil.

BAB 3

EVALUASI KINERJA RELE ARUS LEBIH

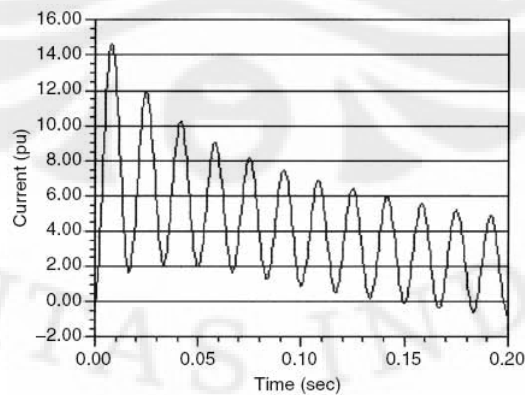
3.1 Pengertian Kinerja Arus Lebih

Kinerja rele arus lebih yang dimaksud di sini adalah penilaian terhadap rele arus lebih pada generator dalam hal waktu mengirimkan sinyal *trip* apabila terjadi gangguan. Rele arus lebih pada generator yang akan dievaluasi kinerjanya adalah tiga jenis rele arus lebih, yaitu rele arus lebih dengan *voltage-restrained (Device 51V)*, rele arus lebih arus urutan-negatif (*Device 46*), dan rele arus lebih netral generator (*Device 51GN*). Ketiga rele ini akan dievaluasi untuk tiga macam gangguan, yaitu gangguan satu-fasa-tanah, gangguan dua-fasa-tanah, dan gangguan dua-fasa. Untuk *device 51V*, kinerja yang dievaluasi adalah waktu yang dibutuhkan rele untuk *pickup*, sedangkan waktu yang dibutuhkan rele ini untuk mengirimkan sinyal *trip* tidak dapat ditentukan karena penulis tidak mendapatkan data persamaan grafik karakteristik rele yang bersangkutan.

3.2 Kalkulasi Hubung Singkat Generator

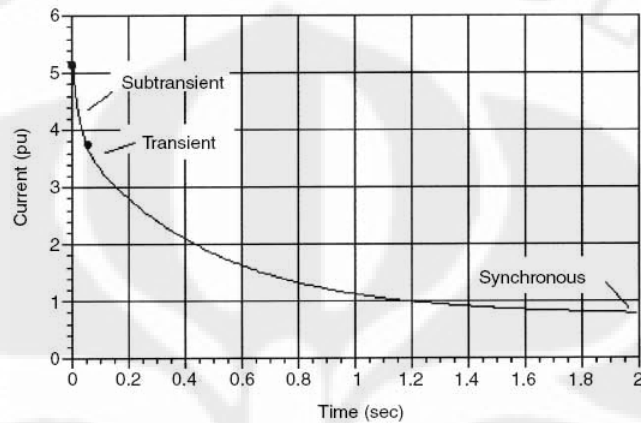
3.2.1 Karakteristik Arus Hubung Singkat

Hubung singkat pada terminal generator sinkron menghasilkan arus yang meluruh terhadap waktu. Gambar 3.1 menunjukkan arus hubung singkat dari generator.



Gambar 3.1 Arus Hubung Singkat

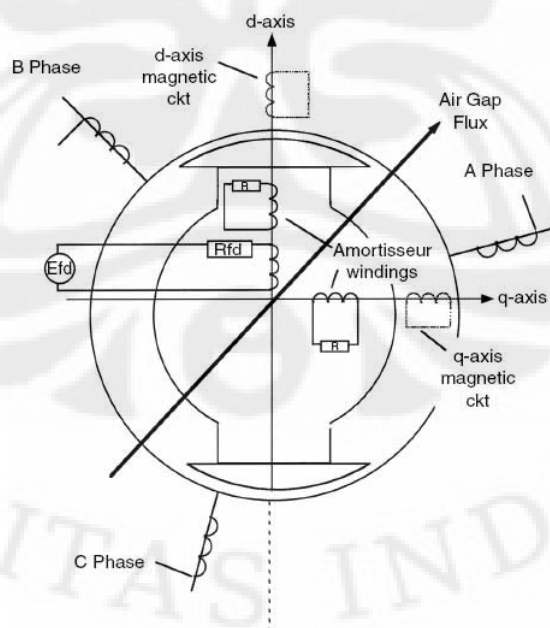
Arus gangguan pada generator dikenal sebagai arus *subtransient*, *transient*, dan *synchronous*. Penamaan ini didasarkan pada periode peluruhan dari komponen arus hubung singkat. Gambar 3.2 menunjukkan *envelope* dari peluruhan arus hubung singkat.



Gambar 3.2 *Envelope* Peluruhan Arus Hubung Singkat

3.2.2 Struktur Magnetik Generator

Generator memiliki dua sumbu magnetik yang mempengaruhi nilai arus hubung singkat, yaitu *d-axis* dan *q-axis*.



Gambar 3.3 Sumbu Magnetik Generator

D -axis segaris dengan kutub medan, berisi belitan medan rotor dan memiliki celah udara (*air gap*) yang kecil. Sedangkan q -axis berada diantara kutub-kutub medan dan terpisah 90° secara elektrik dari d -axis. Ketika terjadi hubung singkat maka akan timbul arus dari kedua sumbu ini menghasilkan:

Persamaan karakteristik d -axis:

$$\bar{i}_d = \left[(I_d'' - I_d') e^{-t/T_{df}''} + (I_d' - I_d) e^{-t/T_{df}'} + I_d \right] \angle - (90^\circ - \delta) \quad (3.1)$$

$$\bar{i}_d = \left[\left(\frac{e_{q0}''}{X_{df}''} - \frac{e_{q0}'}{X_{df}'} \right) e^{-t/T_{df}''} + \left(\frac{e_{q0}'}{X_{df}'} - \frac{EI}{X_{df}'} \right) e^{-t/T_{df}'} + \frac{EI}{X_{df}'} \right] \angle - (90^\circ - \delta) \quad (3.2)$$

Persamaan karakteristik q -axis:

$$\bar{i}_q = \left[(I_q'' - I_q') e^{-t/T_{qf}''} + (I_q' - I_q) e^{-t/T_{qf}'} \right] \angle \delta \quad (3.3)$$

$$\bar{i}_q = \left[\left(\frac{e_{d0}''}{X_{qf}''} - \frac{e_{d0}'}{X_{qf}'} \right) e^{-t/T_{qf}''} + \left(\frac{e_{d0}'}{X_{qf}'} - \frac{Ed}{X_{qf}'} \right) e^{-t/T_{qf}'} \right] \angle \delta \quad (3.4)$$

3.2.3 Kalkulasi Arus Gangguan

3.2.3.1 Beban Awal

Pengaruh beban awal pada generator mempengaruhi kalkulasi hubung singkat. Semula arus q -axis dapat dianggap tidak ada apabila generator berada dalam kondisi tanpa beban, namun dengan adanya beban awal dapat meningkatkan komponen arus q -axis. Analisis hubung singkat membutuhkan perhitungan arus menggunakan persamaan (3.2) dan (3.4), kemudian menggabungkan kedua persamaan arus ini untuk mendapatkan arus urutan positif menggunakan persamaan (3.5).

$$\bar{I}_1 = \bar{i}_d + \bar{i}_q \quad (3.5)$$

Pengaruh beban awal juga menghasilkan *voltage drop* dalam generator. Tegangan dibelakang reaktansi *subtransient*, *transient*, dan *synhronous* (EI, e_q'', e_q') tidak lagi sama dengan tegangan terminal dan $e_{d0}, e_{d0}', e_{d0}''$ tidak lagi bernilai nol. Dengan timbulnya tegangan d -axis akan meningkatkan arus q -axis. Tegangan internal ini dihitung berdasarkan komponen d -axis dan q -axis dari

tegangan terminal dan arus beban sebelum terjadi gangguan. Gambar 3.4 menunjukkan arus beban (I) dan tegangan terminal e_{t0} dapat diuraikan menjadi komponen i_{d0}, i_{q0} dan e_{d0}, e_{q0} .

Tegangan dibelakang X_d'' ditentukan dengan:

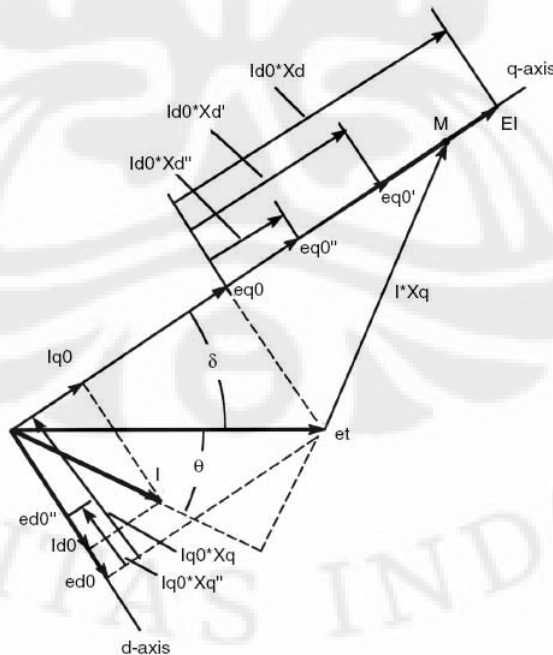
$$\begin{aligned} e_{q0}'' &= e_{q0} + (-ji_{d0})(jX_d'') \\ &= e_{q0} + i_{d0}X_d'' \end{aligned} \quad (3.6)$$

Tegangan e_{q0} adalah komponen q -axis dari tegangan terminal e_{t0} sebelum terjadi gangguan. Komponen d -axis dari arus beban, i_{d0} , lag 90° terhadap tegangan e_{q0} . Perkalian arus i_{d0} dan reaktansi induktif X_d'' menghasilkan kenaikan tegangan yang sefasa dengan e_{q0} .

Pada q -axis, arus i_{q0} mendahului (*lead*) 90° terhadap tegangan e_{d0} .

Hasilnya adalah *voltage drop* sepanjang impedansi X_q'' .

$$\begin{aligned} e_{d0}'' &= e_{d0} + (ji_{q0})(jX_q'') \\ &= e_{d0} - i_{q0}X_q'' \end{aligned} \quad (3.7)$$



Gambar 3.4 Fasor Arus dan Tegangan

Gambar 3.4 menunjukkan arus dan tegangan setiap komponen beserta tegangan internal generator (EI). Sudut antara tegangan terminal dan q -axis dapat dihitung dari titik M, yang terletak pada vektor penjumlahan dari $e_{t0} + jIX_q$. Sudut ini (δ) dapat ditentukan dengan persamaan (3.8). Setelah sudut ini ditentukan, maka persamaan (3.9) sampai (3.18) digunakan untuk menentukan tegangan internal generator sebelum terjadi gangguan.

$$\delta = \arctan\left(\frac{IX_q \cos \theta}{e_{t0} + IX_q \sin \theta}\right) \quad (3.8)$$

$$e_{q0} = e_{t0} \cos \delta \quad (3.9)$$

$$I_{q0} = I \cos(\theta + \delta) \quad (3.10)$$

$$e_{d0} = e_{t0} \sin \delta \quad (3.11)$$

$$I_{d0} = I \sin(\theta + \delta) \quad (3.12)$$

Tegangan q -axis:

$$e_{q0}'' = e_{q0} + I_{d0} X_d'' \quad (3.13)$$

$$e_{q0}' = e_{q0} + I_{d0} X_d' \quad (3.14)$$

$$EI = e_{q0} + I_{d0} X_d \quad (3.15)$$

Tegangan d -axis:

$$e_{d0}'' = e_{d0} - I_{q0} X_q'' \quad (3.16)$$

$$e_{d0}' = e_{d0} - I_{q0} X_q' \quad (3.17)$$

$$Ed = e_{d0} - I_{q0} X_q \quad (3.18)$$

3.2.3.2 Tinjauan Kalkulasi Gangguan

Secara umum, metode untuk menghitung arus gangguan fasa-tanah (P-G), dua-fasa-tanah (2P-G) dan dua-fasa (P-P) adalah sama. Pada setiap kasus, arus d -axis dan q -axis dihitung, kemudian digabungkan dengan persamaan (3.5) untuk menghasilkan arus urutan positif.

Perhitungan arus urutan positif dari arus d -axis dan q -axis *synchronous*, *transient*, dan *subtransient* direpresentasikan dalam gambar 3.5. Arus subkomponen dapat dihitung dari rangkaian-rangkaian yang ditunjukkan.

Tegangan pada setiap rangkaian adalah tegangan internal sebelum terjadi gangguan dibelakang reaktansi yang dihitung menggunakan persamaan (3.8) sampai (3.18).

Impedansi Z_f adalah impedansi gangguan dilihat dari terminal (x-y) pada rangkaian urutan positif yang ditunjukkan gambar 3.5. Z_f adalah impedansi ekuivalen yang diperoleh dari rangkaian impedansi urutan positif, negatif, dan nol dilihat dari terminal x-y. Z_f akan bervariasi terhadap lokasi gangguan dan tipe gangguan. Jika gangguan P-G, 2P-G, dan P-P dihitung untuk lokasi yang sama pada suatu sistem, nilai Z_f akan berbeda untuk setiap tipe gangguan.

Impedansi eksternal, Z_f , juga meningkatkan konstanta waktu T_{df}'' , T_{df}' , T_{qf}'' dan T_{qf}' pada persamaan karakteristik (3.2) dan (3.4). Nilai konstanta waktu yang baru ditentukan oleh Z_f sehingga nilainya akan berbeda untuk setiap tipe gangguan pada lokasi yang sama. Modifikasi konstanta waktu dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_{df}'' = T_{d0}'' \frac{X_d'' + Z_f}{X_d' + Z_f} \quad (3.19)$$

$$T_{df}' = T_{d0}' \frac{X_d' + Z_f}{X_d + Z_f} \quad (3.20)$$

$$T_{qf}'' = T_{q0}'' \frac{X_q'' + Z_f}{X_q' + Z_f} \quad (3.21)$$

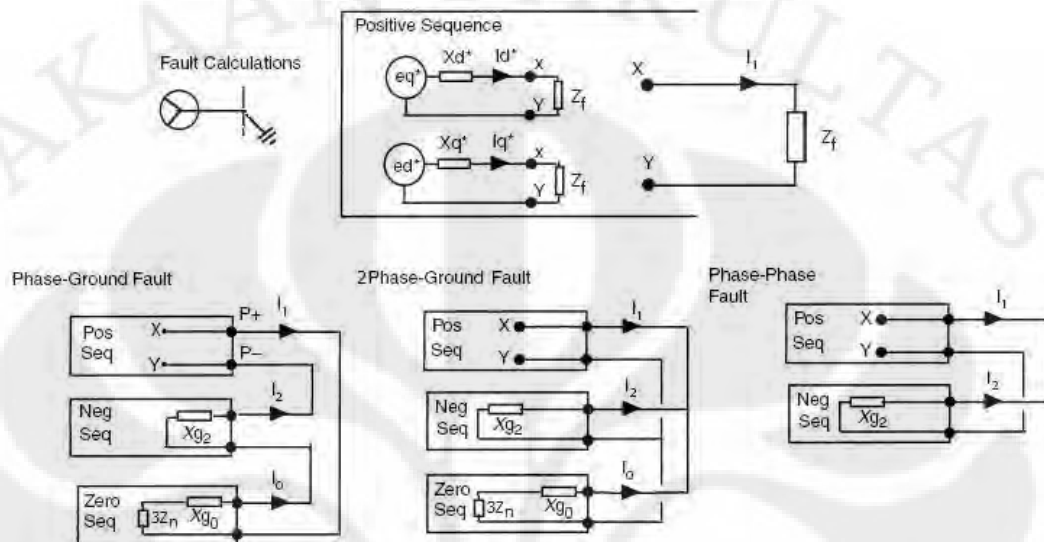
$$T_{qf}' = T_{q0}' \frac{X_q' + Z_f}{X_q + Z_f} \quad (3.22)$$

Apabila arus subkomponen $I_d, I_d', I_d'', I_q, I_q', I_q''$ dan konstanta waktu yang baru diketahui, arus d -axis dan q -axis dapat ditentukan dengan persamaan (3.2) dan (3.4). Arus urutan positif I_1 dihitung dengan persamaan (3.5).

3.2.3.3 Penentuan Z_f , Arus Gangguan, dan Tegangan di Lokasi Gangguan

Perhitungan arus hubung singkat menggunakan metode komponen simetris. Gangguan satu-fasa-tanah, dua-fasa-tanah, dan dua-fasa memiliki

representasi komponen simetris yang berbeda. Hal ini meliputi rangkaian positif, negatif, dan nol juga hubungan antara arus urutan positif, negatif, dan nol. Rangkaian dan hubungan tersebut ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Rangkaian Hubung Singkat pada Terminal Generator

Berdasarkan gambar 3.5, impedansi urutan untuk setiap gangguan adalah sebagai berikut:

$$\bar{Z}_1 = 0 \quad (3.23)$$

$$\bar{Z}_2 = \bar{X}_{g2} \quad (3.24)$$

$$\bar{Z}_0 = 3\bar{Z}_n + \bar{X}_{g0} \quad (3.25)$$

dimana Z_n = impedansi pentanahan generator; Z_1 = impedansi urutan positif; Z_2 = impedansi urutan negatif; dan Z_0 = impedansi urutan nol.

Apabila arus urutan positif telah diketahui, arus urutan negatif dan nol dapat ditentukan berdasarkan teori komponen simetris sebagai berikut:

Fasa-tanah:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 \quad (3.26)$$

Dua-fasa-tanah:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 = 0 \quad (3.27)$$

$$I_2 = -\left(\frac{3Z_n + X_{g0}}{X_{g2} + 3Z_n + X_{g0}}\right)I_1 \quad (3.28)$$

$$I_0 = -\left(\frac{X_{g2}}{X_{g2} + 3Z_n + X_{g0}}\right)I_1 \quad (3.29)$$

Dua-fasa:

$$\bar{I}_2 = -\bar{I}_1, \bar{I}_0 = 0 \quad (3.30)$$

dimana I_1 = arus urutan positif; I_2 = arus urutan negatif; dan I_0 = arus urutan nol.

Arus gangguan ditentukan dengan menghitung arus pada fasa yang terganggu. Berdasarkan teori komponen simetris didapat:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \quad (3.31)$$

$$\bar{I}_b = a^2 \bar{I}_1 + a \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \quad (3.32)$$

$$\bar{I}_c = a \bar{I}_1 + a^2 \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \quad (3.33)$$

dimana $a = 1 \angle 120^\circ$.

Tegangan urutan dapat dinyatakan berdasarkan teori komponen simetris untuk semua gangguan asimetris sebagai berikut:

$$\bar{V}_1 = \bar{I}_1 \bar{Z}_f \quad (3.34)$$

$$\bar{V}_2 = -\bar{I}_2 \bar{Z}_2 \quad (3.35)$$

$$\bar{V}_0 = -\bar{I}_0 \bar{Z}_0 \quad (3.36)$$

Tegangan fasa ditentukan dengan menggunakan teori komponen simetris sebagai berikut:

$$\bar{V}_a = \bar{V}_1 + \bar{V}_2 + \bar{V}_0 \quad (3.37)$$

$$\bar{V}_b = a^2 \bar{V}_1 + a \bar{V}_2 + \bar{V}_0 \quad (3.38)$$

$$\bar{V}_c = a \bar{V}_1 + a^2 \bar{V}_2 + \bar{V}_0 \quad (3.39)$$

Selanjutnya untuk kepentingan analisis rele proteksi, tegangan fasa-fasa ditentukan sebagai berikut:

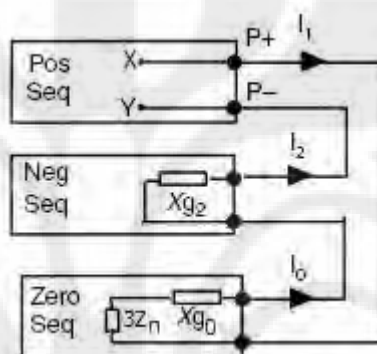
$$\bar{V}_{ab} = \bar{V}_a - \bar{V}_b \quad (3.40)$$

$$\bar{V}_{bc} = \bar{V}_b - \bar{V}_c \quad (3.41)$$

$$\bar{V}_{ca} = \bar{V}_c - \bar{V}_a \quad (3.42)$$

3.2.3.4 Hubung Singkat Satu-Fasa-Tanah

Gangguan fasa-tanah meliputi impedansi urutan positif, negatif, dan nol terhubung seperti pada gambar 3.6. Teori komponen asimetris menggunakan asumsi fasa yang terganggu adalah fasa A.



Gambar 3.6 Rangkaian Gangguan Satu-Fasa-Tanah

Impedansi gangguan dilihat dari terminal x-y adalah:

$$\bar{Z}_f = \bar{X}_{g2} + 3\bar{Z}_n + \bar{X}_{g0} \quad (3.43)$$

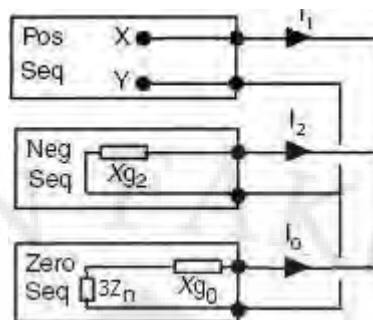
Berdasarkan gambar 3.6 maka hubungan arus urutan pada gangguan satu-fasa-tanah adalah seperti persamaan (3.26).

Tegangan urutan positif di lokasi gangguan diperoleh dengan substitusi persamaan (3.43) ke persamaan (3.34) menghasilkan:

$$\bar{V}_1 = \bar{I}_1 \left(\bar{X}_{g2} + 3\bar{Z}_n + \bar{X}_{g0} \right) \quad (3.44)$$

3.2.3.5 Hubung Singkat Dua-Fasa-Tanah

Gangguan dua-fasa-tanah meliputi impedansi urutan positif, negatif, dan nol terhubung seperti pada gambar 3.7. Teori komponen asimetris menggunakan asumsi fasa yang terganggu adalah fasa B dan C.



Gambar 3.7 Rangkaian Gangguan Dua-Fasa-Tanah

Impedansi gangguan dilihat dari terminal x-y adalah:

$$\bar{Z}_f = \frac{\bar{X}_{g2} \left(3\bar{Z}_n + \bar{X}_{g0} \right)}{\bar{X}_{g2} + 3\bar{Z}_n + \bar{X}_{g0}} \quad (3.45)$$

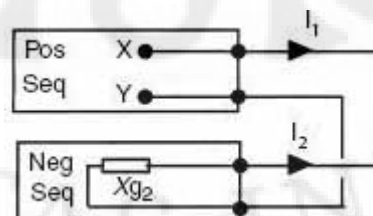
Berdasarkan gambar 3.7, arus urutan negatif dan nol diperoleh dengan *current divider* sehingga didapat persamaan (3.28) dan (3.29).

Tegangan urutan positif di lokasi gangguan diperoleh dengan substitusi persamaan (3.46) ke persamaan (3.34) menghasilkan:

$$\bar{V}_1 = \frac{\bar{I}_1 \bar{X}_{g2} \left(3\bar{Z}_n + \bar{X}_{g0} \right)}{\bar{X}_{g2} + 3\bar{Z}_n + \bar{X}_{g0}} \quad (3.46)$$

3.2.3.6 Hubung Singkat Dua-Fasa

Gangguan dua-fasa meliputi impedansi urutan positif, negatif, dan nol terhubung seperti pada gambar 3.8. Teori komponen simetris menggunakan asumsi fasa yang terganggu adalah fasa B dan fasa C.



Gambar 3.8 Rangkaian Gangguan Dua-Fasa

Impedansi gangguan dilihat dari terminal x-y adalah:

$$\bar{Z}_f = \bar{X}_{g2} \quad (3.47)$$

Berdasarkan gambar 3.8 maka hubungan arus urutan pada gangguan dua-fasa adalah seperti persamaan (3.30).

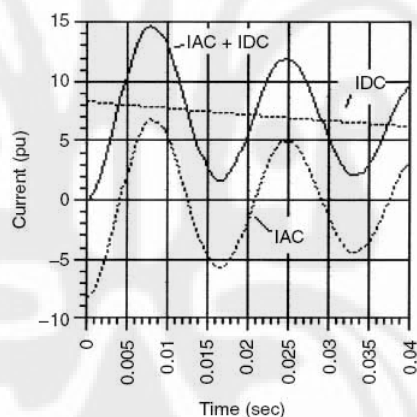
Tegangan urutan positif di lokasi gangguan diperoleh dengan substitusi persamaan (3.47) ke persamaan (3.34) menghasilkan:

$$\bar{V}_1 = \bar{I}_1 \bar{X}_{g2} \quad (3.48)$$

3.2.3.7 Komponen DC Arus Hubung Singkat

Komponen arus DC timbul ketika terjadi gangguan dan biasanya meluruh dengan cepat seperti ditunjukkan gambar 3.9. Nilai awal arus DC adalah akar dua dari besar arus AC pada $t=0$:

$$I_{DC} = \sqrt{2}I_{AC}, \text{ pada } t = 0$$



Gambar 3.9 Komponen Arus DC pada Gangguan

Nilai i_{DC} tergantung konstanta waktu (T_a). Konstanta waktu ini ditentukan oleh sudut rangkaian (X/R), yang nilainya tergantung dari tipe gangguan. Peluruhan arus DC adalah sebagai berikut:

$$i_{DC} = I_{DC} e^{-t/T_a} \quad (3.49)$$

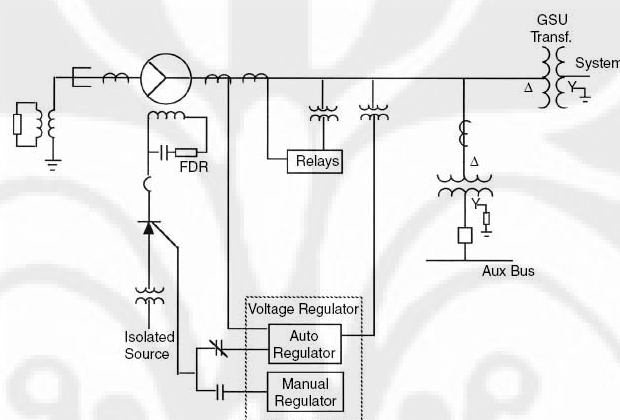
3.2.3.8 Arus Hubung Singkat Total

Arus hubung singkat yang terjadi merupakan penjumlahan dari komponen AC dan DC. Arus ini ditentukan sebagai berikut:

$$\bar{i}_{hs} = \bar{i}_{AC} + \bar{i}_{DC} \quad (3.50)$$

3.2.4 Automatic Voltage Regulator (AVR)

Generator dalam keadaan normal menggunakan AVR yang menghasilkan arus medan yang bervariasi untuk mempertahankan tegangan pada terminal. Ketika gangguan terjadi, terminal generator menurun drastis sehingga AVR akan merasakan tegangan yang menurun dan meningkatkan arus medan untuk mempertahankan tegangan pada terminal.



Gambar 3.10 Pengatur Tegangan pada Generator

Sistem eksitasi sering dilengkapi peralatan untuk mempercepat peluruhan arus gangguan sehingga kerusakan peralatan dapat dicegah. Peralatan ini disebut rangkaian de-eksitasi yang menggunakan FDR (*Field Discharge Resistor*). Ketika *breaker* medan terbuka, maka rangkaian FDR akan bekerja. FDR akan meningkatkan resistansi pada rangkaian medan sehingga akan mengurangi nilai konstanta waktu peluruhan arus medan (T'_{df1}).

Arus eksitasi dan efek de-eksitasi dapat dimasukkan dalam perhitungan arus hubung singkat dengan menambahkan komponen \bar{I}_{ex} pada persamaan arus d-axis \bar{i}_d sebagai berikut:

Untuk eksitasi:

$$I_{ex} = \frac{E_c - EI}{X_{df}} \left[1 - e^{-t/T'_{df}} \right] \quad (3.51)$$

Untuk de-eksitasi:

$$I_{ex} = -\frac{EI}{X_{df}} \left[1 - e^{-t/T'_{df1}} \right] \quad (3.52)$$

$$T'_{df1} = \left[\frac{1}{1 + FDR\Omega / R_f\Omega} \right] T'_{df} \quad (3.53)$$

dengan E_c = tegangan maksimum dari AVR; $FDR\Omega$ = resistansi FDR; $R_f\Omega$ = resistansi medan.

3.3 Proteksi Arus Lebih Pada Generator

3.3.1 Respon Rele Terhadap Arus *Transient*

Rele dengan karakteristik waktu-arus (*Time Current Characteristic*) memiliki grafik karakteristik statis yang dapat diplot dengan memberikan arus yang bernilai konstan ke rele kemudian dicatat waktu operasinya. Grafik tersebut memiliki persamaan karakteristik yang secara umum dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$t(I) = \left[B + \frac{A}{M^p - 1} \right] * TD \quad (3.54)$$

$$M = \frac{I}{CT \text{ ratio} * \text{setting tap}} \quad (3.55)$$

dimana A, B, dan p adalah konstanta yang nilainya ditentukan disain dari rele. M adalah arus operasi dinyatakan dalam kelipatan dari *setting arus pickup*. TD adalah *setting time dial* dan t(I) adalah waktu operasi rele dalam detik apabila dialiri arus I.

Ketika terjadi gangguan, arus berubah secara *transient* sehingga waktu operasi rele tidak dapat ditentukan secara akurat hanya dengan melihat grafik karakteristik atau menggunakan persamaan (3.54). Dengan demikian, dalam perhitungan waktu operasi rele menggunakan karakteristik dinamik sebagai berikut:

$$\int_0^{t_0} \frac{1}{t(I)} dt = 1 \quad (3.56)$$

dimana t_0 adalah waktu operasi rele.

Persamaan (3.56) menyatakan bahwa waktu operasi terjadi ketika nilai daerah di bawah grafik $\frac{1}{t(I)}$ bernilai 1.

Tabel 3.1 Respon Dinamik Rele Arus Lebih terhadap Variasi Arus

A	B	C	D	E	F	G
t	I _a (amp)	t(I) (detik)	1/t(I)	1/t(I) _{av}	Δt/t(I) _{av}	Σ
0	36349	0,2213	4,518	0,000	0,000	0,000
0,01	31001	0,2419	4,134	4,326	0,04326	0,043
0,02	27505	0,2601	3,844	3,989	0,03989	0,083
0,03	25165	0,2757	3,627	3,736	0,03736	0,121
0,04	23542	0,2887	3,464	3,546	0,03546	0,156
0,05	22363	0,2996	3,338	3,401	0,03401	0,190

Evaluasi dinamik dari waktu operasi rele direpresentasikan pada Tabel 3.1. Kolom B menyatakan arus fasa gangguan dihitung dengan persamaan (3.1) sampai (3.33). Kolom C adalah waktu operasi rele yang dihitung untuk setiap nilai arus gangguan pada kolom B menggunakan persamaan (3.54). Kolom D adalah nilai kebalikan dari kolom C. Kolom E adalah nilai rata-rata dari kolom D selama 0,01 detik. Kolom F menyatakan luas daerah di bawah grafik $\frac{1}{t(I)}$ untuk interval waktu 0,01 detik. Kolom G adalah jumlah dari kolom F, dan menyatakan nilai akumulasi *trip* rele.

Apabila nilai kolom G mencapai 1, maka rele akan mengirimkan sinyal *trip*. Dengan menggunakan *spreadsheet*, dibutuhkan 100 iterasi untuk waktu operasi 1 detik. Solusi yang tepat adalah dengan menggunakan *listing* program sehingga iterasi sudah terintegrasi dalam *software* yang bersangkutan.

3.3.2 Arus Urutan Negatif Pada Generator

3.3.2.1 Pengertian Arus Urutan Negatif

Konsep arus urutan negatif berdasar pada metodologi komponen simetris. Teori komponen simetris menyatakan bahwa arus dan tegangan fasa dalam sistem tenaga tiga fasa dapat direpresentasikan oleh tiga komponen satu fasa, yaitu komponen urutan positif, negatif, dan nol. Komponen urutan positif dari arus atau tegangan memiliki rotasi yang sama dengan sistem tenaga. Komponen ini adalah representasi beban yang seimbang. Apabila arus fasa generator memiliki besar yang sama dan saling berbeda sudut 120° , hanya arus urutan positif yang ada. Arus atau tegangan antar fasa yang tidak seimbang dalam besar atau sudut fasa akan meningkatkan komponen urutan negatif dan nol. Komponen urutan negatif memiliki rotasi yang berkebalikan dengan sistem tenaga. Komponen urutan nol menyatakan ketidakseimbangan yang menyebabkan arus mengalir melalui netral generator.

3.3.2.2 Kapabilitas Urutan Negatif Generator

Toleransi urutan-negatif generator dinyatakan dalam dua bentuk: ketahanan terhadap level I_2 yang tinggi untuk waktu yang pendek dan I_2 maksimum yang dapat ditoleransi generator secara kontinu. Efek arus asimetris pada rotor adalah bergantung pada temperatur. Batasan arus asimetris untuk waktu yang pendek dan kontinu didasarkan pada batasan temperatur maksimum rotor.

Kapabilitas urutan-negatif kontinu ditunjukkan pada Tabel 3.2 yang berdasarkan standar IEEE C37.102-1995. Dalam standar ini, pembebanan tidak lebih dari KVA nominal dan arus pada setiap fasa tidak lebih dari 105% arus nominal.

Tabel 3.2 Kapabilitas Urutan-Negatif Kontinu

Type Generator	I_2 yang Diijinkan (persen)
<i>Salient pole</i>	
Dengan belitan <i>amortisseur</i>	10
Tanpa belitan <i>amortisseur</i>	5
<i>Cylindrical rotor</i>	

Pendinginan tak langsung	10
Pendinginan langsung:	
sampai dengan 960 MVA	8
961-1200 MVA	6
1201-1500 MVA	5

Kapabilitas urutan-negatif terhadap level I_2 yang tinggi untuk waktu yang pendek ditunjukkan pada Tabel 3.3. Nilai I_2^2t merupakan batasan akumulasi arus asimetris dalam setiap selang waktu yang pendek.

Tabel 3.3 Kapabilitas Akumulasi Arus Asimetris

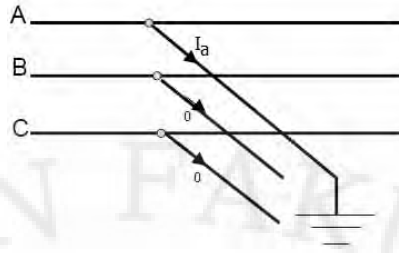
Type Generator	I_2^2t yang Dijinkan
<i>Salient pole</i>	40
<i>Synchronous condensers</i>	30
<i>Cylindrical rotor</i>	
Pendinginan tak langsung	30
Pendinginan langsung 0-800 MVA	10
Pendinginan langsung 801-1600 MVA	10-0,00625 (MVA-800)

3.3.3 Arus Pada Netral Generator Untuk Gangguan Asimetris

Arus yang mengalir pada netral generator adalah arus komponen nol, sehingga hanya ada untuk gangguan asimetris yang melibatkan fasa dengan tanah, yaitu gangguan satu-fasa-tanah dan dua-fasa-tanah. Sedangkan gangguan dua-fasa dan tiga-fasa (dengan atau tanpa tanah) arus pada netral generator adalah nol.

3.3.3.1 Arus Pada Netral Generator Untuk Gangguan Satu-Fasa-Tanah

Pada gangguan satu-fasa-tanah, arus yang mengalir ke netral generator adalah arus pada fasa yang terganggu seperti ditunjukkan gambar 3.11.



Gambar 3.11 Arus ke Netral pada Gangguan Satu-Fasa-Tanah

Arus yang mengalir ke netral generator:

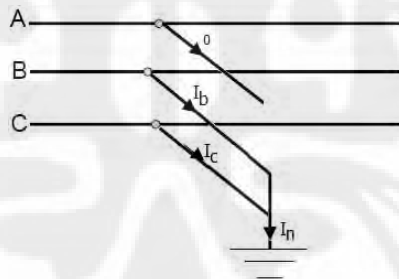
$$\bar{I}_n = \bar{I}_a \quad (3.57)$$

Substitusi persamaan (3.26) dan (3.31) ke persamaan (3.57) menghasilkan:

$$\bar{I}_n = 3\bar{I}_0 = 3\bar{I}_1 \quad (3.58)$$

3.3.3.2 Arus Pada Netral Generator Untuk Gangguan Dua-Fasa-Tanah

Pada gangguan dua-fasa-tanah, arus yang mengalir ke netral generator adalah arus dari kedua fasa yang terganggu seperti ditunjukkan gambar 3.12.



Gambar 3.12 Arus ke Netral pada Gangguan Dua-Fasa-Tanah

Arus yang mengalir ke netral generator:

$$\bar{I}_n = \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (3.59)$$

Substitusi persamaan (3.32) dan (3.33) ke persamaan (3.59) menghasilkan:

$$\begin{aligned} \bar{I}_n &= \left(a^2 \bar{I}_1 + a \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \right) + \left(a \bar{I}_1 + a^2 \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \right) \\ &= \left(a \bar{I}_1 + a^2 \bar{I}_1 \right) + \left(a \bar{I}_2 + a^2 \bar{I}_2 \right) + 2\bar{I}_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left(\bar{I}_1 + a\bar{I}_1 + a^2\bar{I}_1 \right) + \left(\bar{I}_2 + a\bar{I}_2 + a^2\bar{I}_2 \right) - \bar{I}_1 - \bar{I}_2 + 2\bar{I}_0 \\
&= 0 + 0 - \bar{I}_1 - \bar{I}_2 - \bar{I}_0 + 3\bar{I}_0 \\
\bar{I}_n &= - \left(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \right) + 3\bar{I}_0 \tag{3.60}
\end{aligned}$$

Substitusi persamaan (3.27) ke persamaan (3.60) menghasilkan:

$$\bar{I}_n = 3\bar{I}_0 \tag{3.61}$$

3.3.4 Evaluasi Kinerja Rele Arus Lebih

3.3.4.1 Evaluasi Kinerja *Device 5IV*

Evaluasi rele berupa penentuan waktu *pickup* (t_{pickup}) dari rele. Rele akan *pickup* jika tegangan fasa-fasa ($V_{\phi-\phi}$) pada lokasi rele menurun dan grafik

$\left(\frac{I_{\phi}}{I_{pickup\ min}} v_s \frac{V_{\phi-\phi}}{e_{rated}} \right)$ berada di atas grafik karakteristik rele.

3.3.4.1.1 Persamaan Tegangan-Arus *Pickup* Minimum *Device 5IV*

Grafik pada gambar 2.1 dapat didekati dengan persamaan linear untuk selang waktu tertentu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
I_{pickup\ min} &= e_{rated} && ; 90\% < e_{rated} \leq 100\% \\
&0,8e_{rated} + 18 && ; 80\% < e_{rated} \leq 90\% \\
&0,9e_{rated} + 10 && ; 70\% < e_{rated} \leq 80\% \\
&e_{rated} + 3 && ; 60\% < e_{rated} \leq 70\% \\
&0,1e_{rated} + 57 && ; 50\% < e_{rated} \leq 60\% \\
&0,8e_{rated} + 14 && ; 30\% < e_{rated} \leq 50\% \\
&0,625e_{rated} + 19,25 && ; 14\% < e_{rated} \leq 30\% \\
&\frac{3}{14}e_{rated} + 25 && ; 0\% < e_{rated} \leq 14\%
\end{aligned} \tag{3.62}$$

3.3.4.1.2 Karakteristik Tegangan-Arus *Pickup* Minimum $\left(\frac{I_{\phi}}{I_{pick\ up\ min}} v_S \frac{V_{\phi-\phi}}{e_{rated}} \right)$

$I_{pick\ up\ min} = 1000\ A$, diperoleh dari data *setting* rele.

$e_{rated} = 1\ pu$

Rele $A\emptyset$ *pickup* ketika grafik $\left(\frac{I_A}{I_{pick\ up\ min}} v_S \frac{V_{AB}}{e_{rated}} \right)$ berada di atas grafik

karakteristik rele. Rele $B\emptyset$ *pickup* ketika grafik $\left(\frac{I_B}{I_{pick\ up\ min}} v_S \frac{V_{BC}}{e_{rated}} \right)$ berada di atas

grafik karakteristik rele. Rele $C\emptyset$ *pickup* ketika grafik $\left(\frac{I_C}{I_{pick\ up\ min}} v_S \frac{V_{CA}}{e_{rated}} \right)$ berada di

atas grafik karakteristik rele.

3.3.4.2 Evaluasi Kinerja *Device 46*

Arus urutan negatif pada rele adalah:

$$I_2\ sek = \frac{I_2}{CT\ ratio} \quad (3.63)$$

$$I_{2,pu} = \frac{I_2\ sek}{tap\ setting} \quad (3.64)$$

Rele mulai *pickup* apabila arus urutan negatif di lokasi rele melebihi atau sama dengan *setting* arus urutan negatif minimum.

Waktu operasi rele ditentukan berdasarkan persamaan (2.3) yang merupakan luas daerah di bawah kurva $I_{2,pu}^2(t)$ dari $t=t_{pickup}$ sampai $t=t_{operasi}$.

Persamaan (2.3) dapat dituliskan menjadi:

$$\sum_{t=t_{pickup}}^{t_{operasi}} I_{2,pu,av}^2 \Delta t = K_{setting} \quad (3.65)$$

$\lim_{\Delta t \rightarrow 0}$

Apabila $t_{operasi} > t_{maks}$ maka rele akan mengirimkan sinyal *trip* dalam waktu *setting* waktu operasi maksimum (t_{maks}). Apabila $0 < t_{operasi} < t_{maks}$ maka rele akan mengirimkan sinyal *trip* pada saat $t_{operasi}$.

Persamaan (3.65) dapat diselesaikan secara dinamik dengan *listing* program Matlab dengan selang waktu $\Delta t=0,1$ detik sehingga akan didapat waktu operasi rele.

2.3.4.3 Evaluasi Kinerja *Device 51GN*

Karakteristik dari rele arus lebih direpresentasikan pada persamaan (3.54), dengan substitusi $A=3,922$; $B=0,0982$; $p=2$; $TD=8$ didapat persamaan sebagai berikut:

$$t(I_n) = \left(0,0982 + \frac{3,922}{M^2 - 1} \right) * 8 \quad (3.66)$$

$$M = \frac{I_n}{CT \text{ ratio} * \text{setting tap}} \quad (3.67)$$

dengan I_n adalah arus yang melalui netral generator; $CT \text{ ratio}=100/5$; $\text{setting tap}=1$.

Rele mulai *pickup* apabila arus yang melalui netral generator lebih dari atau sama dengan arus primer *pickup* ($M \geq 1$).

Karakteristik dinamik dari rele arus lebih dinyatakan dalam persamaan (3.56) merupakan luas daerah di bawah kurva $\frac{1}{t(I_n)}$ yang mencapai nilai 1 untuk $t=0$ sampai $t=t_{\text{operasi}}$. Sehingga dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$\sum_{t=t_{\text{pickup}}}^{t_{\text{operasi}}} \frac{1}{t(I_n)_{av}} \Delta t = 1 \quad (3.68)$$

Persamaan (3.68) dapat diselesaikan secara dinamik dengan *listing* program Matlab dengan selang waktu $\Delta t=0,001$ detik sehingga akan didapat waktu operasi rele.

BAB 4

ANALISIS KINERJA RELE ARUS LEBIH

Analisis kinerja rele arus lebih meliputi analisis kinerja tiga jenis rele arus lebih pada generator, yaitu rele arus lebih dengan *voltage-restrained (device 51V)*, rele arus lebih urutan negatif (*device 46*), dan rele arus lebih netral generator (*device 51GN*). Ketiga jenis rele tersebut akan dievaluasi kinerjanya untuk tiga macam gangguan asimetris, yaitu gangguan satu-fasa-tanah, gangguan dua-fasa, dan gangguan dua-fasa-tanah. Untuk kasus gangguan dua-fasa, tidak dilakukan evaluasi kinerja *device 51GN* karena tidak ada arus yang mengalir ke netral generator untuk kondisi ini.

4.1 Analisis Kinerja Rele Untuk Gangguan Satu-Fasa-Tanah

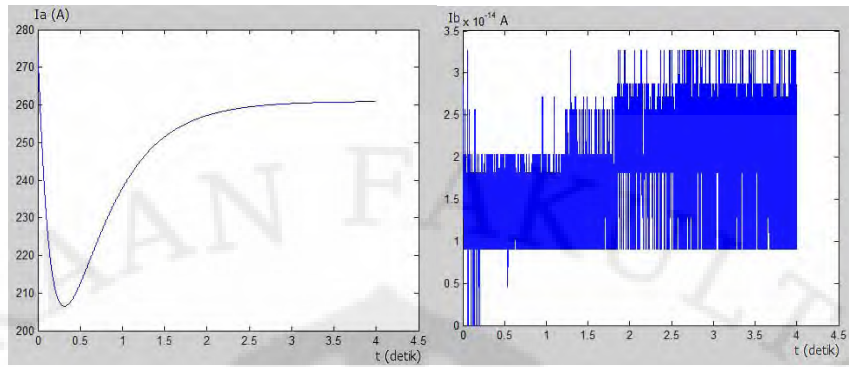
Pada gangguan satu-fasa-tanah, fasa yang terganggu adalah fasa A. Evaluasi keakuratan hasil simulasi dilakukan dengan analisis grafik arus dan tegangan pada lokasi gangguan. Sedangkan evaluasi kinerja rele arus lebih ditentukan oleh hasil simulasi yang berupa grafik komponen arus dan tegangan pada lokasi masing-masing rele.

4.1.1 Arus dan Tegangan

Simulasi arus dan tegangan ini dapat menampilkan grafik komponen arus dan tegangan terhadap waktu. Besarnya arus dan tegangan untuk waktu tertentu dapat ditentukan menggunakan program simulasi tersebut.

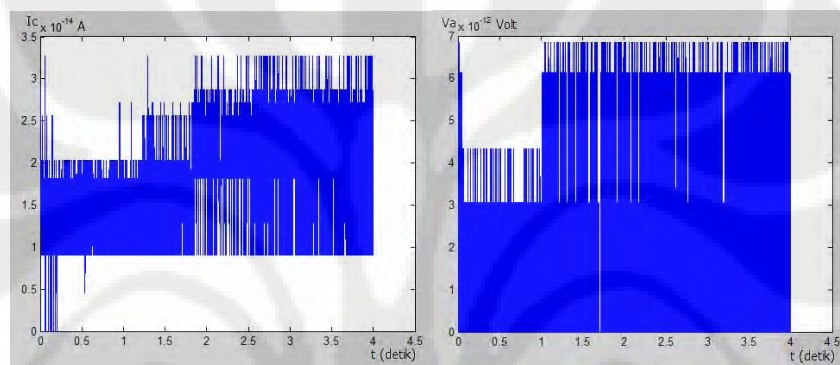
4.1.1.1 Hasil Simulasi Arus dan Tegangan

Dari hasil simulasi arus dan tegangan yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut :



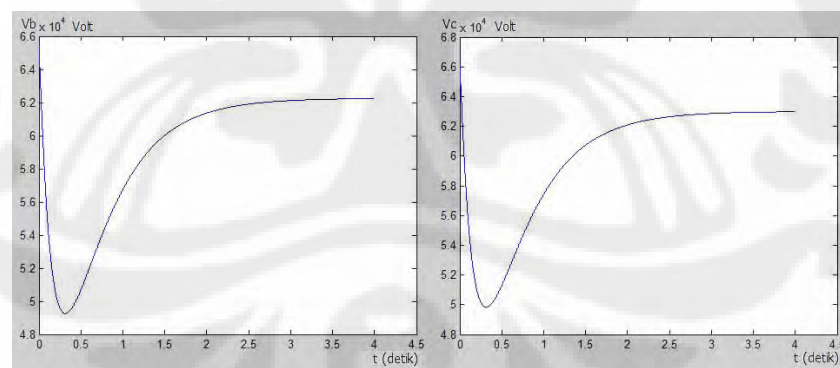
(a)

(b)

Gambar 4.1 (a) I_a terhadap waktu (b) I_b terhadap waktu

(a)

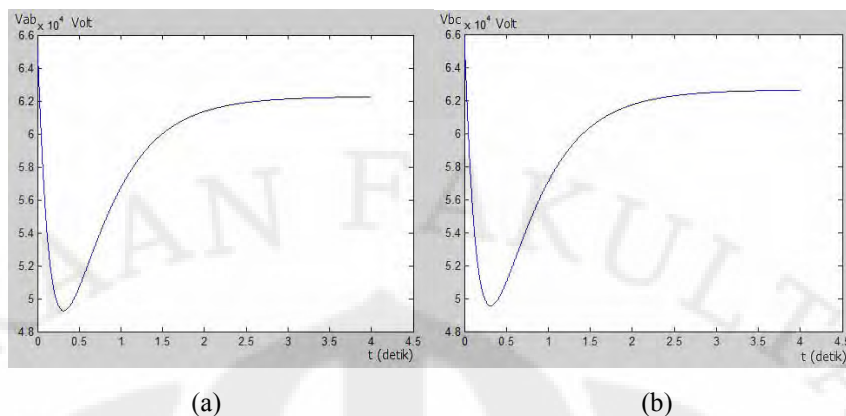
(b)

Gambar 4.2 (a) I_c terhadap waktu (b) V_a terhadap waktu

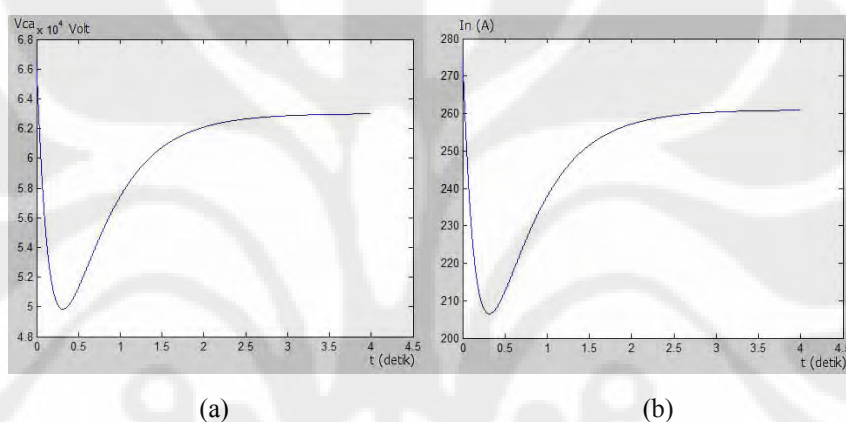
(a)

(b)

Gambar 4.3 (a) V_b terhadap waktu (b) V_c terhadap waktu



Gambar 4.4 (a) V_{ab} terhadap waktu (b) V_{bc} terhadap waktu



Gambar 4.5 (a) V_{ca} terhadap waktu (b) I_n terhadap waktu

4.1.1.2 Pembahasan Simulasi Arus dan Tegangan

Arus pada fasa A menunjukkan kenaikan arus sampai mengalami nilai *steady state*. Arus pada fasa B menunjukkan nilai yang cenderung nol (orde 10^{-14} ampere), begitu juga arus pada fasa C menunjukkan nilai yang cenderung nol (orde 10^{-14} ampere). Hasil ini menunjukkan untuk gangguan fasa A ke tanah, maka arus gangguan yang timbul adalah pada fasa yang terganggu.

Tegangan pada titik gangguan (V_a) menunjukkan nilai yang cenderung nol (orde 10^{-12} volt). Tegangan fasa B (V_b) dan fasa C (V_c) mengalami peningkatan *transient* sampai keadaan *steady state*.

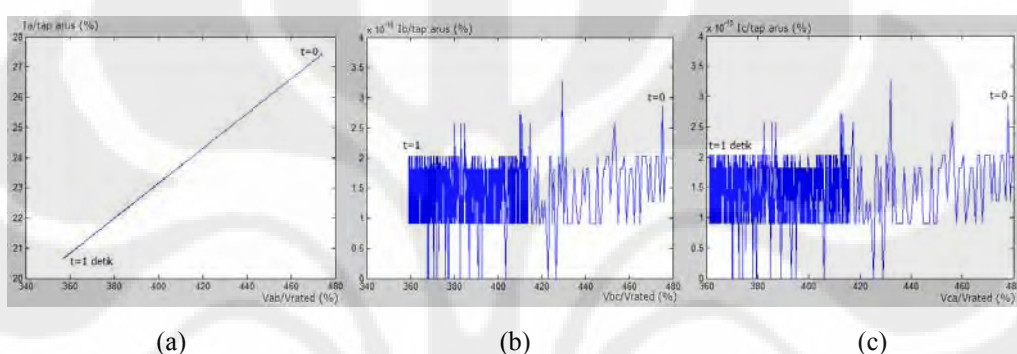
Secara keseluruhan simulasi arus dan tegangan untuk gangguan fasa A ke tanah sesuai dengan teori yang ada bahwa $V_a=0$, $I_b=0$, dan $I_c=0$.

4.1.2 Rele Arus Lebih dengan *Voltage-restrained (Device 51V)*

Simulasi ini menampilkan grafik persentase perbandingan tegangan fasa-fasa dengan tegangan nominal terhadap persentase perbandingan arus fasa dengan arus *pickup* minimum. Rele ini berjumlah 3, masing-masing 1 untuk setiap fasa. Sehingga akan ada tiga buah grafik untuk mengevaluasi kinerja setiap rele.

4.1.2.1 Hasil Simulasi *Device 51V*

Dari hasil simulasi *device 51V* yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut :



Gambar 4.6 (a) $I_a/\text{tap arus}$ terhadap V_{ab}/V_{rated} (b) $I_b/\text{tap arus}$ terhadap V_{bc}/V_{rated} (c) $I_c/\text{tap arus}$ terhadap V_{ca}/V_{rated}

4.1.2.2 Pembahasan Simulasi *Device 51V*

Untuk rele $A\emptyset$, grafik V_{ab}/V_{rated} vs $I_a/I_{\text{pickup min}}$ menunjukkan nilai tegangan V_{ab} lebih besar dari V_{rated} . Hasil ini menunjukkan rele $A\emptyset$ tidak akan *pickup* untuk gangguan fasa A-tanah.

Untuk rele $B\emptyset$, grafik V_{bc}/V_{rated} vs $I_b/I_{\text{pickup min}}$ menunjukkan nilai tegangan V_{bc} lebih besar dari V_{rated} . Hasil ini menunjukkan rele $B\emptyset$ tidak akan *pickup* untuk gangguan fasa A- tanah.

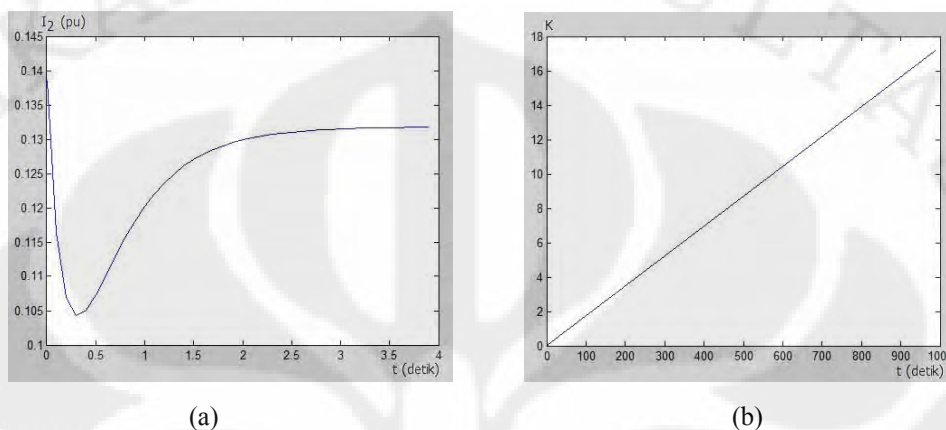
Untuk rele $C\emptyset$, grafik V_{ca}/V_{rated} vs $I_c/I_{\text{pickup min}}$ menunjukkan nilai tegangan V_{bc} lebih besar dari V_{rated} . Hasil ini menunjukkan rele $B\emptyset$ tidak akan *pickup* untuk gangguan fasa A- tanah.

4.1.3 Rele Arus Lebih Urutan Negatif (*Device 46*)

Simulasi ini menampilkan grafik efek termal yang ditimbulkan arus urutan negatif (I_2) dalam satuan termal (K) terhadap waktu.

4.1.3.1 Hasil Simulasi *Device 46*

Dari hasil simulasi *device 46* yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut :



Gambar 4.7 (a) per unit I_2 terhadap waktu (b) K terhadap waktu pada gangguan Fasa A -Tanah

4.1.3.2 Pembahasan Simulasi *Device 46*

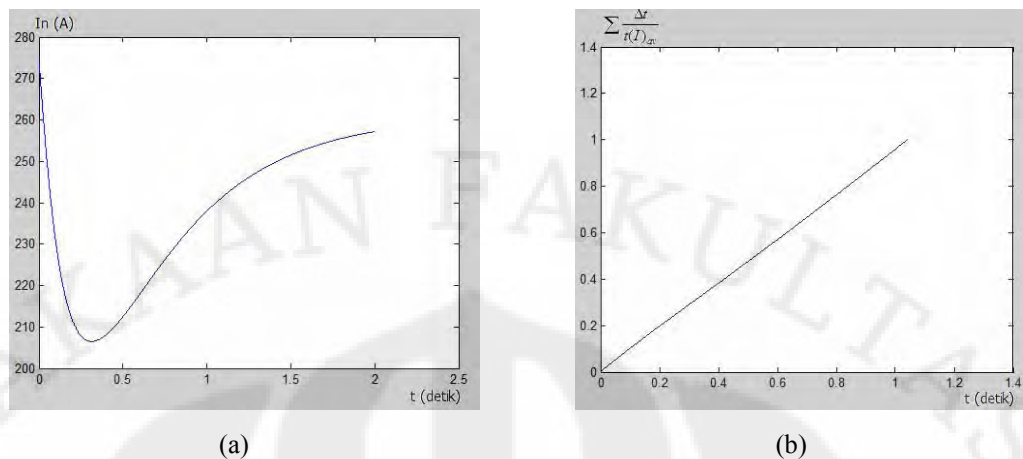
Hasil simulasi menunjukkan I_2 saat awal terjadinya gangguan adalah 0,1385 pu yang berarti diatas nilai *setting* I_2 minimum (0,04 pu). Sehingga rele akan mulai *pickup* seketika. Energi termal yang ditimbulkan arus urutan negatif mencapai 17 satuan K dalam waktu *setting* maksimum (990 detik) sedangkan K_{setting} rele adalah 24. Hasil ini menunjukkan rele akan mengirimkan sinyal *trip* dalam waktu 990 detik jika terjadi gangguan satu-fasa-tanah.

4.1.4 Rele Arus Lebih Netral Generator (*Device 51GN*)

Simulasi ini menampilkan dua buah grafik. Grafik yang pertama adalah grafik arus yang mengalir ke netral generator (I_n) terhadap waktu. Grafik kedua adalah grafik $\sum \frac{\Delta t}{t(I)_{av}}$ terhadap waktu.

4.1.4.1 Hasil Simulasi *Device 51GN*

Dari hasil simulasi *device 51GN* yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut :



Gambar 4.8 (a) I_n terhadap waktu (b) $\sum \frac{\Delta t}{t(I)_{av}}$ terhadap waktu pada gangguan Fasa A-Tanah

4.1.3.2 Pembahasan Simulasi *Device 51GN*

Hasil simulasi menunjukkan I_n saat awal terjadinya gangguan adalah 274 A yang berarti diatas nilai I_n minimum *pickup* (20 A). Sehingga rele akan mulai *pickup* seketika. Grafik $\sum \frac{\Delta t}{t(I)_{av}}$ mencapai nilai 1 dalam waktu 1,042 detik. Hasil ini menunjukkan rele akan mengirimkan sinyal *trip* dalam waktu 1,042 detik.

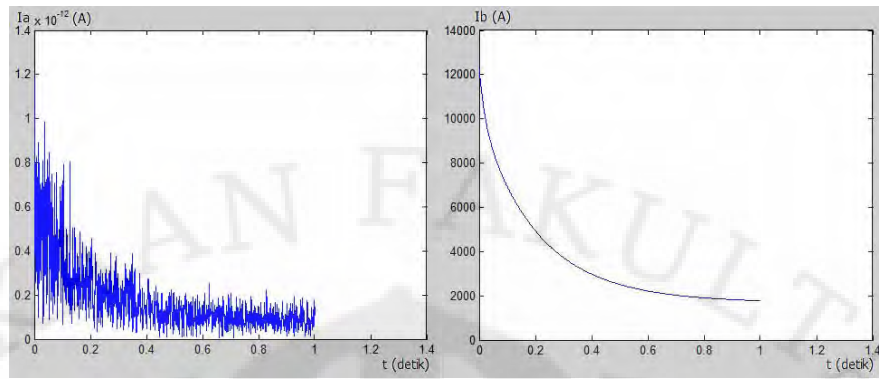
4.2 Analisis Kinerja Rele Untuk Gangguan Dua Fasa-Tanah

Pada gangguan dua-fasa-tanah, dua fasa yang terganggu adalah fasa B dan fasa C.

4.2.1 Arus dan Tegangan

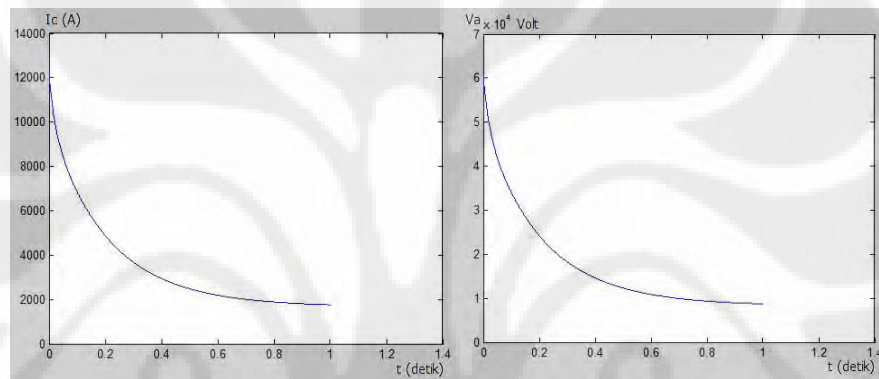
4.2.1.1 Hasil Simulasi Arus dan Tegangan

Dari hasil simulasi arus dan tegangan yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut :



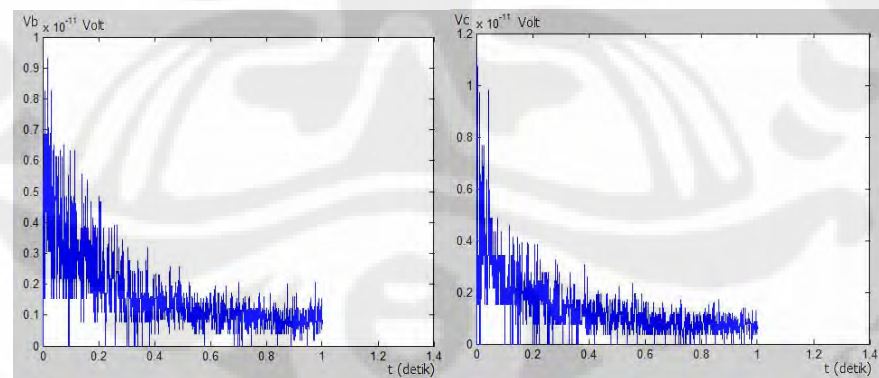
(a)

(b)

Gambar 4.9 (a) I_a terhadap waktu (b) I_b terhadap waktu

(a)

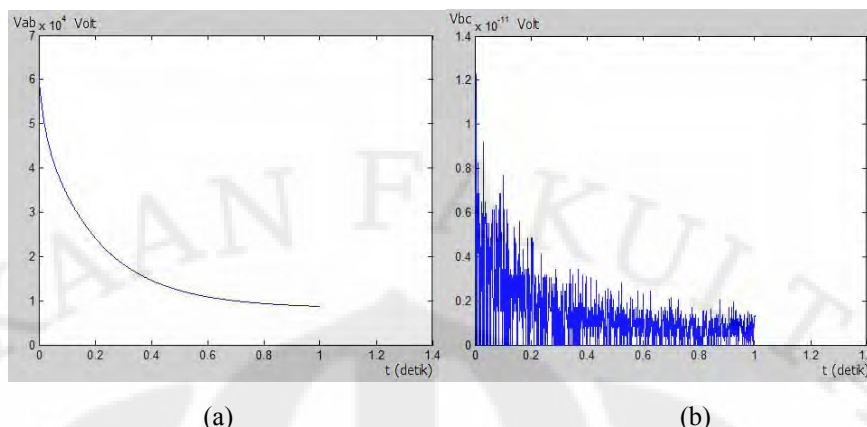
(b)

Gambar 4.10 (a) I_c terhadap waktu (b) V_a terhadap waktu

(a)

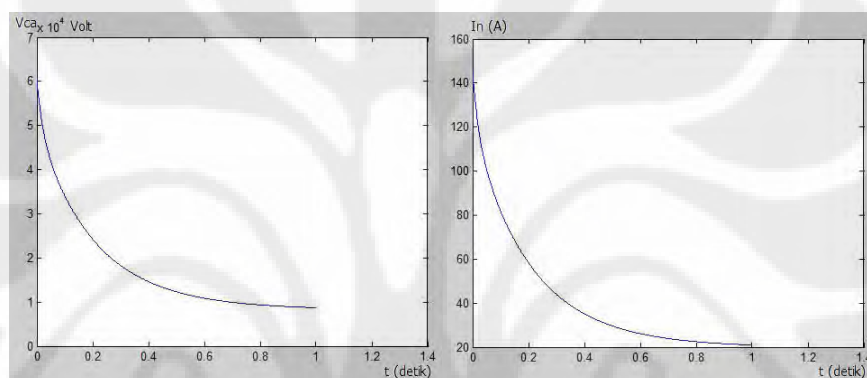
(b)

Gambar 4.11 (a) V_b terhadap waktu (b) V_c terhadap waktu



(a)

(b)

Gambar 4.12 (a) V_{ab} terhadap waktu (b) V_{bc} terhadap waktu

(a)

(b)

Gambar 4.13 (a) V_{ca} terhadap waktu (b) I_n terhadap waktu

4.2.1.2 Pembahasan Simulasi Arus dan Tegangan

Arus pada fasa A menunjukkan nilai yang cenderung nol (orde 10^{-13} ampere). Arus pada fasa B dan fasa C menunjukkan penurunan arus sampai mengalami nilai *steady state*. Hasil ini menunjukkan untuk gangguan fasa B dan C ke tanah, maka arus gangguan yang timbul adalah pada kedua fasa yang terganggu.

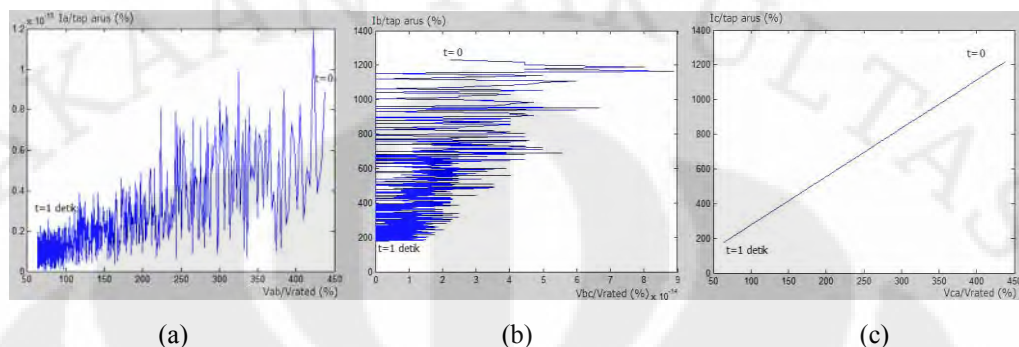
Tegangan fasa A (V_a) mengalami penurunan transient. Tegangan pada kedua titik gangguan (V_b dan V_c) menunjukkan nilai yang cenderung nol (orde 10^{-11} volt).

Secara keseluruhan simulasi arus dan tegangan untuk gangguan fasa B-fasa C-Tanah sesuai dengan teori yang ada bahwa $I_a=0$, $V_b=0$, dan $V_c=0$.

4.2.2 Rele Arus Lebih dengan *Voltage-restrained (Device 51 V)*

4.2.2.1 Hasil Simulasi *Device 51V*

Dari hasil simulasi *device 51V* yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut :



Gambar 4.14 (a) I_a /tap arus terhadap V_{ab}/V_{rated} (b) I_b /tap arus terhadap V_{bc}/V_{rated} (c) I_c /tap arus terhadap V_{ca}/V_{rated}

4.2.2.2 Pembahasan Simulasi *Device 51V*

Untuk rele $A\emptyset$, grafik $I_a/I_{pickup\ min}$ vs V_{ab}/V_{rated} menunjukkan nilai arus I_a yang sangat kecil sehingga tidak cukup untuk membuat rele $A\emptyset$ mengirimkan sinyal trip. Hasil ini menunjukkan rele $A\emptyset$ tidak akan *pickup* untuk gangguan fasa B-fasa C-tanah.

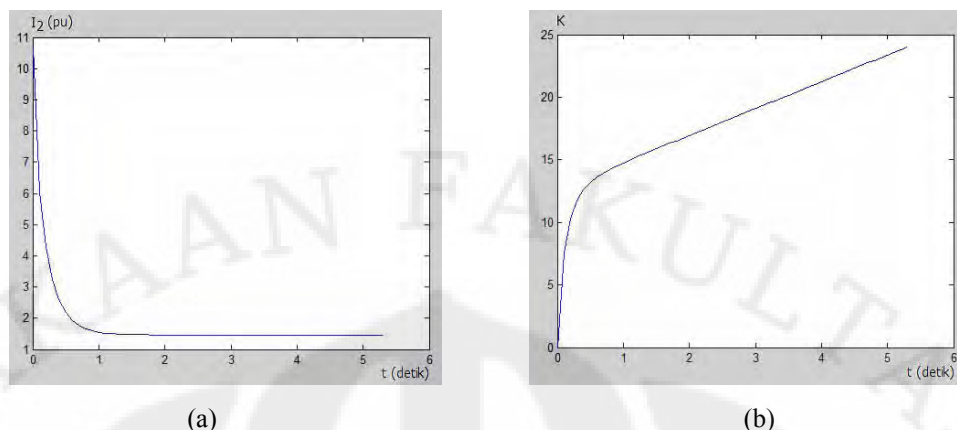
Untuk rele $B\emptyset$, grafik $I_b/I_{pickup\ min}$ vs V_{bc}/V_{rated} menunjukkan nilai tegangan V_{bc} yang sangat kecil dan arus I_b yang besar pada $t=0$. Hasil ini menunjukkan rele $B\emptyset$ akan *pickup* seketika untuk gangguan fasa B-fasa C-tanah.

Untuk rele $C\emptyset$, grafik $I_c/I_{pickup\ min}$ vs V_{ca}/V_{rated} menunjukkan nilai tegangan V_{ca} dan arus I_c yang menurun secara *transient*. Pada $t=0,432$ detik, V_{ca} bernilai 100% dari V_{rated} dan I_c bernilai 277% dari tap arus. Hasil ini menunjukkan rele $B\emptyset$ akan *pickup* dalam waktu 0,432 detik untuk gangguan fasa B-fasa C-tanah.

4.2.3 Rele Arus Lebih Urutan Negatif (*Device 46*)

4.2.3.1 Hasil Simulasi *Device 46*

Dari hasil simulasi *device 46* yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut:



Gambar 4.15 (a) I_2 terhadap waktu (b) K terhadap waktu pada gangguan Fasa A-Fasa B-Tanah

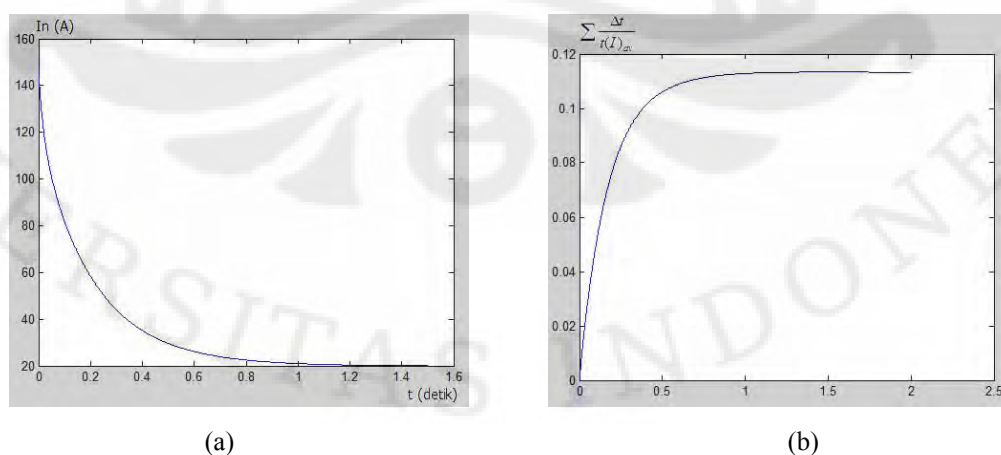
4.2.3.2 Pembahasan Simulasi *Device 46*

Hasil simulasi menunjukkan I_2 saat awal terjadinya gangguan adalah 10,7 pu yang berarti diatas nilai *setting* I_2 minimum (0,04 pu). Sehingga rele akan mulai *pickup* seketika. Energi termal yang ditimbulkan arus urutan negatif mencapai 24 satuan K dalam waktu 5,4 detik. Hasil ini menunjukkan rele akan mengirimkan sinyal *trip* dalam waktu 5,4 detik jika terjadi gangguan dua-fasa-tanah.

4.2.4 Rele Arus Lebih Netral Generator (*Device 51GN*)

4.2.4.1 Hasil Simulasi *Device 51GN*

Dari hasil simulasi *device 51GN* yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut :



Gambar 4.16 (a) I_n terhadap waktu (b) $\sum \frac{\Delta t}{t(I)_{av}}$ terhadap waktu pada gangguan dua-fasa-tanah

4.2.3.2 Pembahasan Simulasi *Device 5IGN*

Hasil simulasi menunjukkan I_n saat awal terjadinya gangguan adalah 145 A yang berarti diatas nilai I_n minimum *pickup* (20 A). Sehingga rele akan mulai *pickup* seketika. Grafik $\sum \frac{\Delta t}{t(I)_{av}}$ tidak akan pernah mencapai nilai 1. Hasil ini menunjukkan rele tidak akan mengirimkan sinyal *trip* untuk gangguan dua-fasa-tanah.

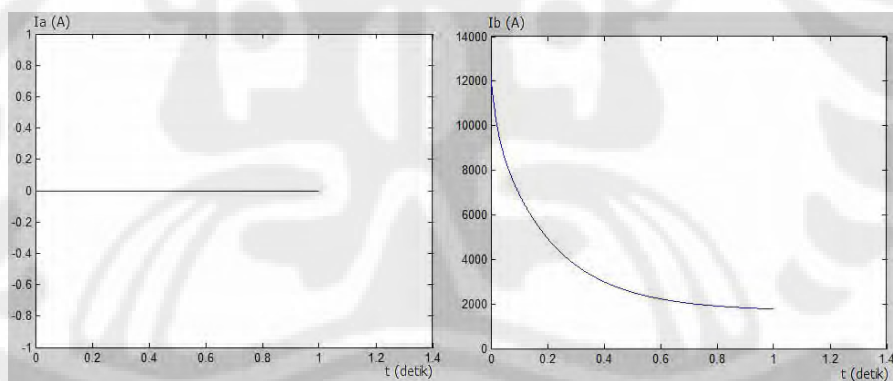
4.3 Analisis Kinerja Rele Untuk Gangguan Dua-Fasa

Pada gangguan dua-fasa, fasa yang terganggu adalah fasa B dan fasa C.

4.3.1 Arus dan Tegangan

4.3.1.1 Hasil Simulasi Arus dan Tegangan

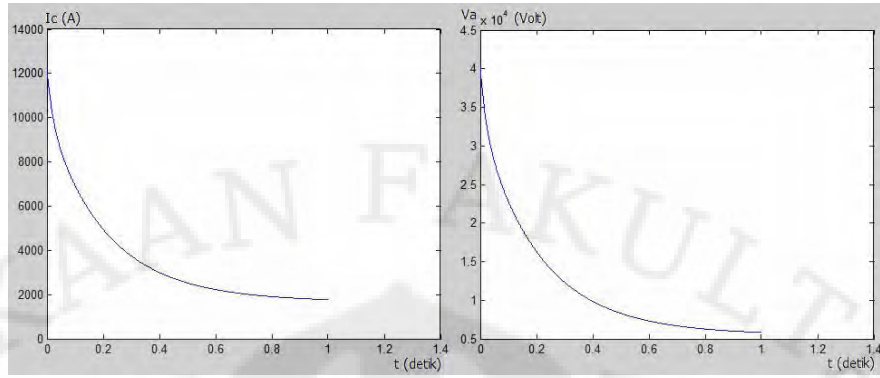
Dari hasil simulasi arus dan tegangan yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut :



(a)

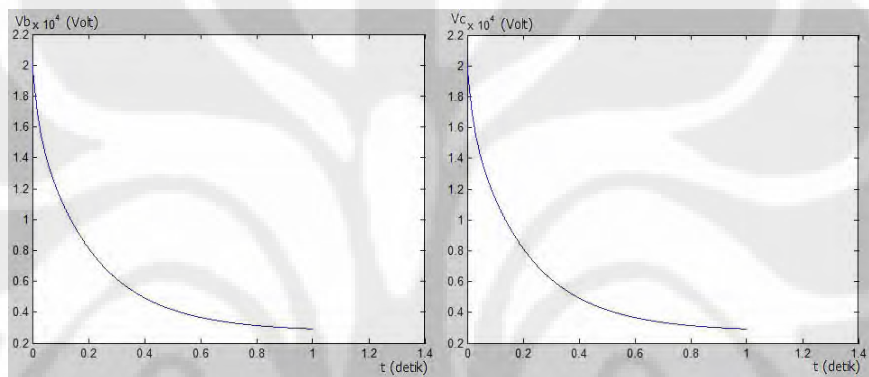
(b)

Gambar 4.17 (a) I_a terhadap waktu (b) I_b terhadap waktu



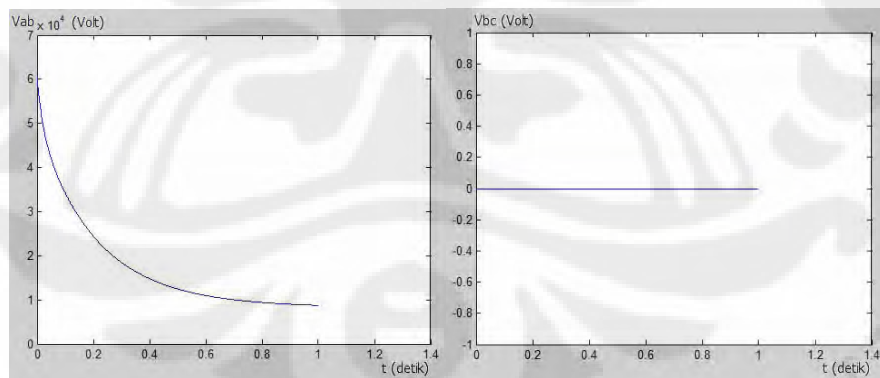
(a) (b)

Gambar 4.18 (a) I_c terhadap waktu (b) V_a terhadap waktu



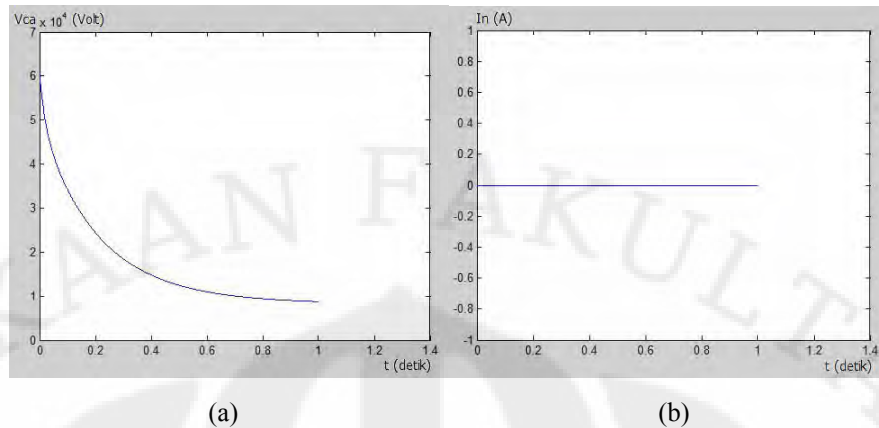
(a) (b)

Gambar 4.19 (a) V_b terhadap waktu (b) V_c terhadap waktu



(a) (b)

Gambar 4.20 (a) V_{ab} terhadap waktu (b) V_{bc} terhadap waktu



Gambar 4.21 (a) V_{ca} terhadap waktu (b) I_n terhadap waktu

4.3.1.2 Pembahasan Simulasi Arus dan Tegangan

Arus pada fasa A menunjukkan nilai nol. Arus pada fasa B dan fasa C menunjukkan penurunan arus sampai mengalami nilai *steady state*. Hasil ini menunjukkan untuk gangguan fasa B-fasa C, maka arus gangguan yang timbul adalah pada kedua fasa yang terganggu.

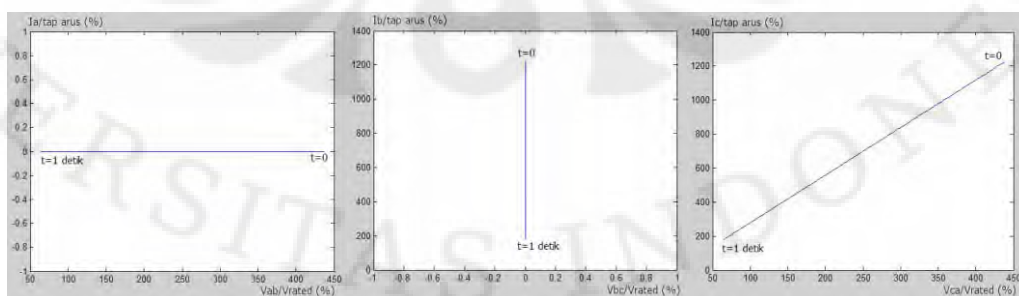
Tegangan fasa A (V_a) mengalami penurunan transient. Tegangan pada kedua titik gangguan (V_b dan V_c) menunjukkan nilai yang sama sehingga nilai V_{bc} nol.

Secara keseluruhan simulasi arus dan tegangan untuk gangguan fasa B-fasa C sesuai dengan teori yang ada bahwa $I_a=0$, $I_b=I_c$, dan $V_b=V_c$.

4.3.2 Rele Arus Lebih dengan *Voltage-restraint (Device 51 V)*

4.3.2.1 Hasil Simulasi *Device 51V*

Dari hasil simulasi *device 51V* yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut:



Gambar 4.22 (a) I_a /tap arus terhadap V_{ab}/V_{rated} (b) I_b /tap arus terhadap V_{bc}/V_{rated} (c) I_c /tap arus terhadap V_{ca}/V_{rated}

4.3.2.2 Pembahasan Simulasi *Device 51 V*

Untuk rele $A\emptyset$, grafik $I_a/I_{pickup\ min}$ vs V_{ab}/V_{rated} menunjukkan nilai arus I_a yang sangat kecil sehingga tidak cukup untuk membuat rele $A\emptyset$ mengirimkan sinyal trip. Hasil ini menunjukkan rele $A\emptyset$ tidak akan *pickup* untuk gangguan fasa B-fasa C.

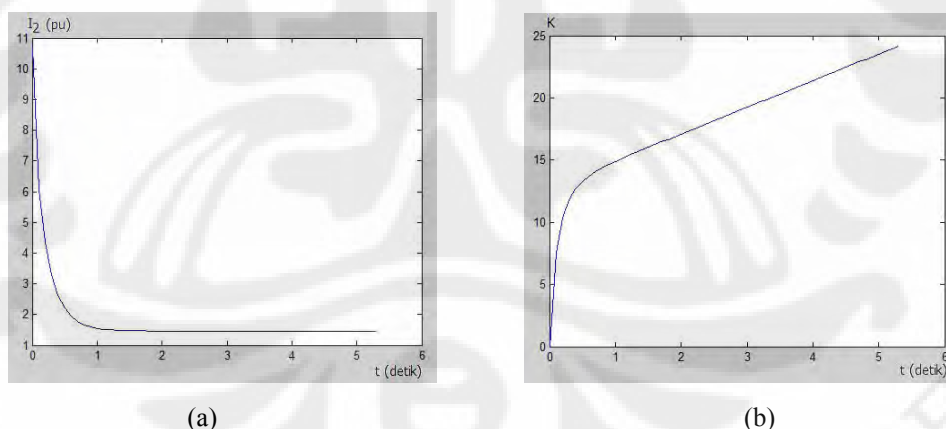
Untuk rele $B\emptyset$, grafik $I_b/I_{pickup\ min}$ vs V_{bc}/V_{rated} menunjukkan nilai tegangan V_{bc} yang sangat kecil dan arus I_b yang besar pada $t=0$. Hasil ini menunjukkan rele $B\emptyset$ akan *pickup* seketika untuk gangguan fasa B-fasa C.

Untuk rele $C\emptyset$, grafik $I_c/I_{pickup\ min}$ vs V_{ca}/V_{rated} menunjukkan nilai tegangan V_{ca} dan arus I_c yang menurun secara *transient*. Pada $t=0,439$ detik, V_{ca} bernilai 100% dari V_{rated} dan I_c bernilai 279% dari tap arus. Hasil ini menunjukkan rele $B\emptyset$ akan *pickup* dalam waktu 0,439 detik untuk gangguan fasa B-fasa C.

4.3.3 Rele Arus Lebih Urutan Negatif (*Device 46*)

4.2.3.1 Hasil Simulasi *Device 46*

Dari hasil simulasi *device 46* yang terjadi untuk gangguan ini didapat hasil sebagai berikut :



Gambar 4.23 (a) I_2 terhadap waktu (b) K terhadap waktu pada gangguan Fasa A – Fasa B

4.3.3.2 Pembahasan Simulasi *Device 46*

Hasil simulasi menunjukkan I_2 saat awal terjadinya gangguan adalah 10,7 pu yang berarti diatas nilai *setting* I_2 minimum (0,04 pu). Sehingga rele akan mulai *pickup* seketika. Energi termal yang ditimbulkan arus urutan negatif

mencapai 24 satuan K dalam waktu 5,4 detik. Hasil ini menunjukkan rele akan mengirimkan sinyal *trip* dalam waktu 5,4 detik jika terjadi gangguan dua-fasa.

4.3.4 Rele Arus Lebih Netral Generator (*Device 51GN*)

Untuk gangguan dua-fasa, rele tidak akan mengirimkan sinyal *trip* karena tidak ada arus yang mengalir ke netral generator.

4.4 Analisis Perbandingan Kinerja Rele

Tiap rele memberikan kinerja yang berbeda pada setiap jenis gangguan. Kinerja masing-masing rele untuk setiap gangguan ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 4.1 Waktu *Pickup* Device 51V

Gangguan	Waktu <i>Pickup</i> (detik)		
	AØ	BØ	CØ
Fasa A – Tanah	-	-	-
Fasa A – Fasa B – Tanah	-	seketika	0,432
Fasa A – Fasa B	-	seketika	0,439

Tabel 4.2 Waktu *Pickup* dan Operasi Device 46

Gangguan	Waktu <i>Pickup</i> (detik)	Waktu Operasi (detik)
Fasa A – Tanah	seketika	990
Fasa A – Fasa B – Tanah	seketika	5,4
Fasa A – Fasa B	seketika	5,4

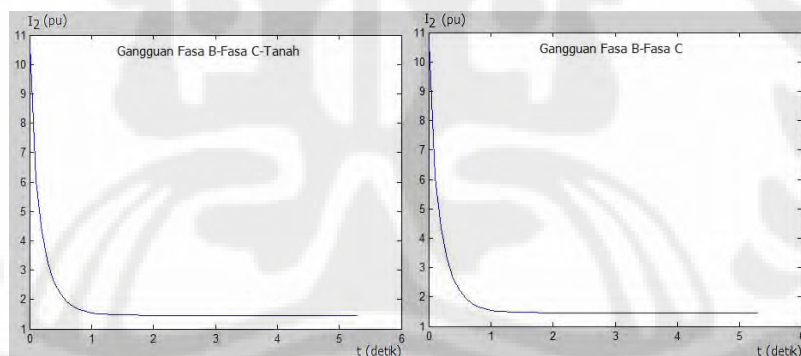
Tabel 4.3 Waktu *Pickup* dan Operasi Device 51GN

Gangguan	Waktu <i>Pickup</i> (detik)	Waktu Operasi (detik)
Fasa A – Tanah	seketika	1,042
Fasa A – Fasa B – Tanah	seketika	-
Fasa A – Fasa B	-	-

Kinerja *device 51V* dipengaruhi oleh tegangan dan arus di lokasi rele. Rele akan *pickup* bila tegangan semakin menurun dan nilainya sesuai dengan grafik

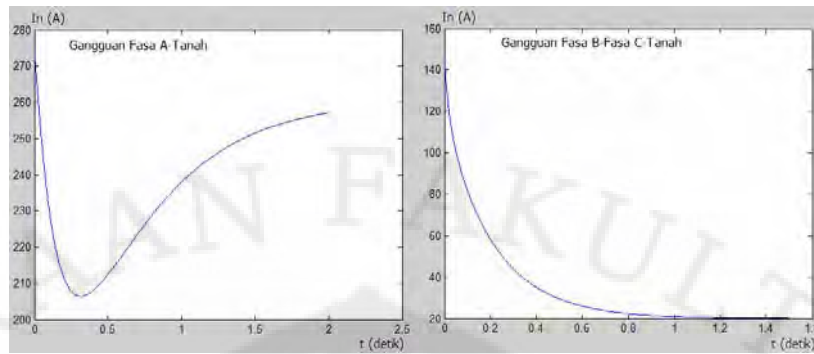
karakteristik arus-tegangan dari rele. Pada gangguan Fasa A-Tanah, grafik tegangan fasa-fasa terhadap waktu di lokasi rele selalu lebih besar dari V_{rated} , sehingga rele tidak *pickup*. Pada gangguan Fasa A-Fasa B-Tanah, grafik $V_{ab}(t)$, $V_{bc}(t)$, dan $V_{ca}(t)$ menurun, namun yang memenuhi grafik karakteristik arus-tegangan rele adalah rele BØ dan CØ. Rele BØ mengalami penurunan tegangan seketika dengan I_b sangat besar sehingga *pickup* seketika. Sedangkan rele CØ mengalami penurunan *transient* sehingga *pickup* dengan waktu tunda.

Kinerja *device 46* ditentukan oleh akumulasi efek termal yang disebabkan arus urutan negatif (I_2). Pada gangguan Fasa A-Tanah, efek termal yang ditimbulkan masih mencapai batas *setting* rele dalam waktu yang lebih lama dari waktu *setting* maksimum, sehingga sinyal *trip* akan dikirim dalam waktu *setting* maksimum, yaitu 990 detik. Pada gangguan Fasa A-Fasa B-Tanah dan gangguan Fasa A-Fasa B, efek termal mencapai batas *setting* rele dalam waktu 5,4 detik sehingga rele akan mengirim sinyal *trip* dalam waktu 5,4 detik. Kesamaan waktu operasi rele untuk kedua gangguan ini disebabkan level arus I_2 yang tidak jauh berbeda seperti ditunjukkan Gambar 4.24.



Gambar 4.24 Perbandingan I_2 gangguan dua-fasa-tanah dengan gangguan dua-fasa

Kinerja *device 51GN* dipengaruhi arus I_n yang melalui netral generator. Pada gangguan Fasa A-Tanah, grafik $I_n(t)$ berada di atas nilai arus *pickup* minimum rele sehingga rele akan mengirimkan sinyal *trip*. Pada gangguan Fasa A-Fasa B-Tanah, grafik $I_n(t)$ semakin menurun secara *transient* di bawah nilai arus *pickup* minimum rele sehingga tidak cukup untuk membuat rele mengirimkan sinyal *trip*.



Gambar 4.25 Perbandingan I_n gangguan satu-fasa-tanah dengan gangguan dua-fasa-tanah

Secara keseluruhan, kinerja ketiga rele arus lebih yang terpasang pada generator ditampilkan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Kinerja Rele Arus Lebih yang Terpasang pada Generator

JENIS GANGGUAN	DEVICE						
	51V			46		51GN	
	AØ	BØ	CØ				
	pickup (detik)	pickup (detik)	pickup (detik)	pickup (detik)	operate (detik)	pickup (detik)	operate (detik)
Fasa A Tanah	-	-	-	seketika	990	seketika	1,042
Fasa A – Fasa B – Tanah	-	seketika	0,432	seketika	5,4	seketika	-
Fasa A – Fasa B	-	seketika	0,432	seketika	5,4	-	-

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan studi evaluasi kinerja tiga jenis rele arus lebih yang terpasang pada generator menggunakan simulasi *MATLAB-File*, dapat diambil kesimpulan bahwa proteksi arus lebih pada generator adalah baik karena untuk setiap tipe gangguan rele arus lebih ada yang mengirimkan sinyal *trip*, dengan waktu pickup dan waktu operasi sebagai berikut:

1. Untuk gangguan satu-fasa-tanah, *device 51V* tidak *pickup*; *device 46* *pickup* seketika dan mengirim sinyal *trip* dalam waktu 990 detik; *device 51GN* *pickup* seketika dan mengirim sinyal *trip* dalam waktu 1,042 detik.
2. Untuk gangguan fasa A-fasa B-tanah, *device 51V AØ* *pickup* seketika, BØ tidak *pickup*, dan CØ *pickup* dalam waktu 0,432 detik; *device 46* *pickup* seketika dan mengirim sinyal *trip* dalam waktu 5,4 detik; *device 51GN* *pickup* seketika namun tidak mengirim sinyal *trip*.
3. Untuk gangguan fasa A-fasa B, *device 51V AØ* tidak *pickup*, BØ *pickup* seketika, dan CØ *pickup* dalam 0,432 detik; *device 46* *pickup* seketika dan mengirim sinyal *trip* dalam waktu 5,4 detik; *device 51GN* tidak akan *pickup*.

DAFTAR ACUAN

- [1] Reimert, Donald. (2006). *Protective relaying for power generation systems*. New York: Taylor & Francis Group.
- [2] Prasetyo, Djoko, Ir, Ph.D. (2005). *Proteksi sistem tenaga listrik*. Bahan ajaran mata kuliah, Universitas Indonesia, Depok.



DAFTAR PUSTAKA

- Chapman, Stephen J. (2002). *Electric machinery and power system fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
- Weedy, B.M., & Cory, B.J. (1998). *Electric power systems* (4th ed). England: John Wiley & Sons Ltd.
- Nagrath, I.J., & Kothari, D.P. (1983). *Modern power system analysis*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Blackburn, J. Lewis., & Domin, Thomas J. (2006). *Protective relaying: Principles and applications* (3rd ed). New York: Taylor & Francis Group.
- Hewitson, Les., (2004). *Practical: Power system protection*. Burlington: IDC Technologies.

Lampiran A. Data Generator

Tabel A. Data Generator

Name	31PG-9
MVA	15,625
kV	13,8
Cos phi	0,8
X_d	1,8
X_d'	0,26
X_d''	0,135
X_2	0,135
X_0	0,04
Earthing	Impedance
RE	80 ohm
XE	0
Model	Subtransient
Machine Type	Round rotor
H	1,7 kW-s/kVA
X_q	1,75
X_q'	0,25
X_q''	0,135
X_c	0,04
X_l	0,04
T_d'	0,585075 s
T_d''	0,02692 s
T_q'	0,117288 s
T_q''	0,032886 s
T_a (P-G)	0,2 s
T_a (2P-G)	0,235 s
T_a (2P)	0,239 s
E_c	2,86 pu
From	B-5
Zone	Train 5

Lampiran B. Data *Setting* Rele Arus Lebih yang Terpasang pada GeneratorTabel B.1 Data Setting Rele Arus Lebih dengan *Voltage-restrained*

DEVICE NAME	MODEL	MFGR	CT RATIO	SETTING	
				TAP	TIME DIAL
51V	IFCV51AD2A	GE	1000/5	5	10

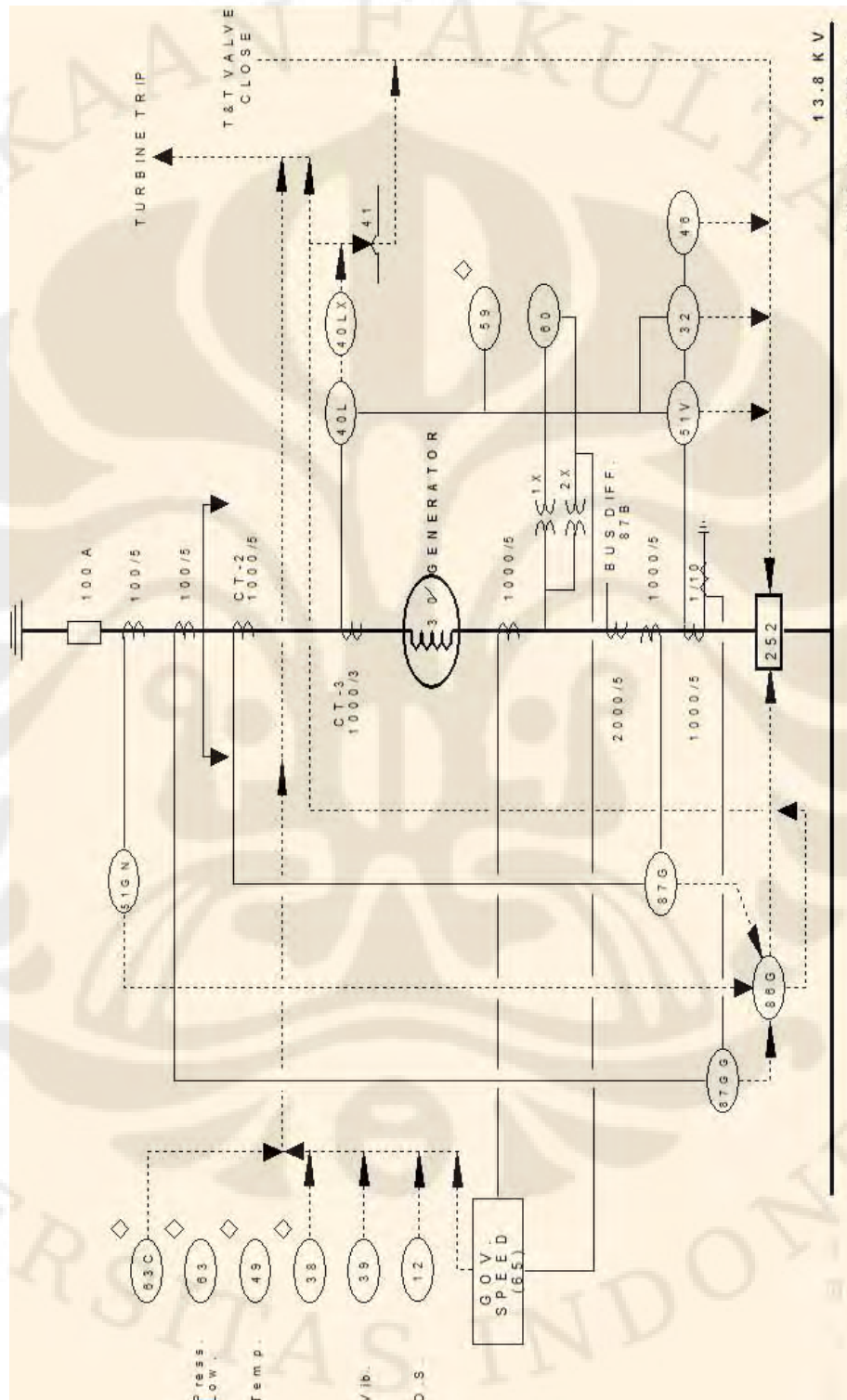
Tabel B.2 Data Setting Rele Arus Lebih Urutan Negatif

DEVICE NAME	MODEL	MFGR	CT RATIO	SETTING			
				K	TAP	MIN PU I ₂	MAX TIME
46	SGC21A2A	GE	1000/5	24	3.3	0,04	990 s

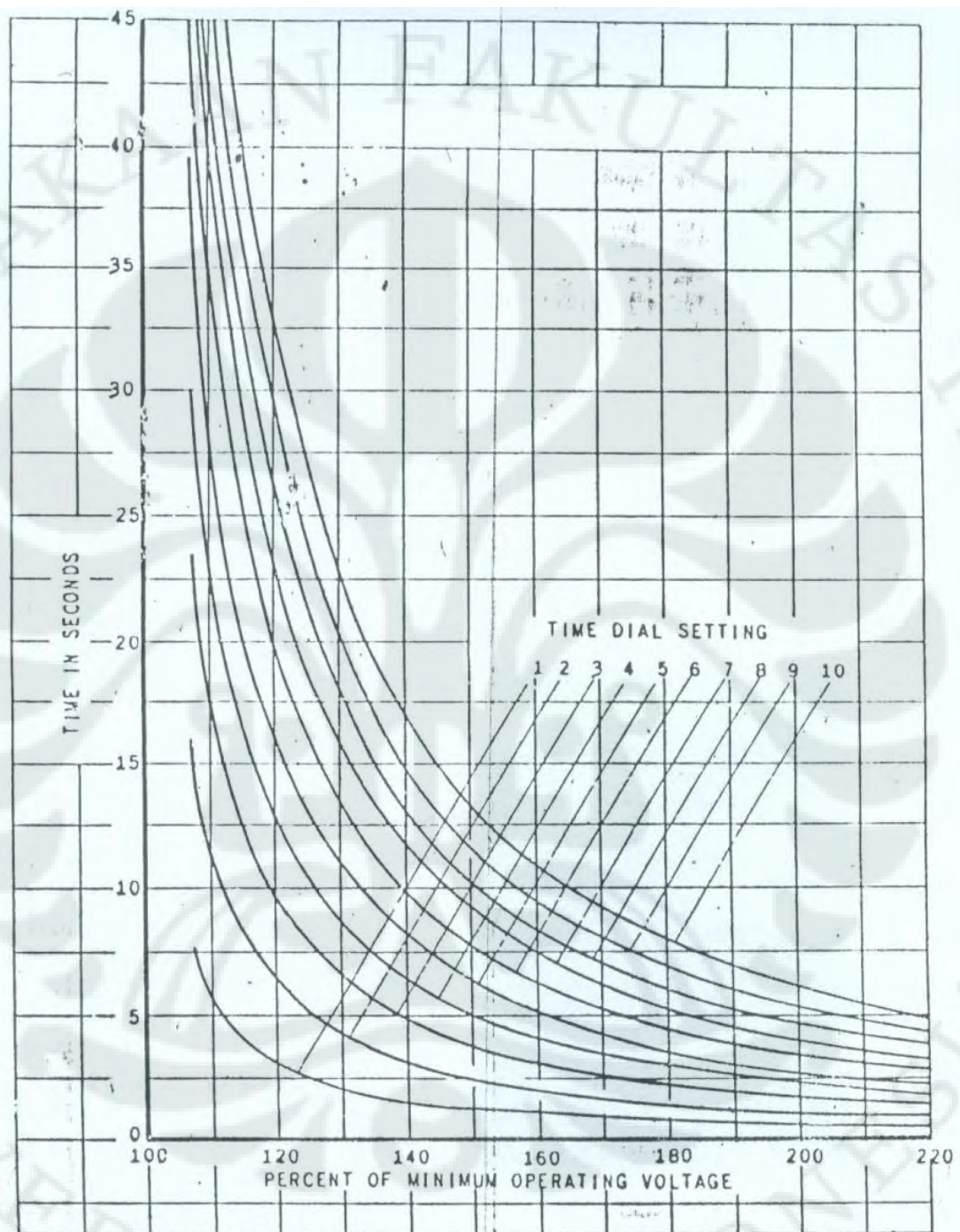
Tabel B.3 Data Setting Rele Arus Lebih Netral Generator

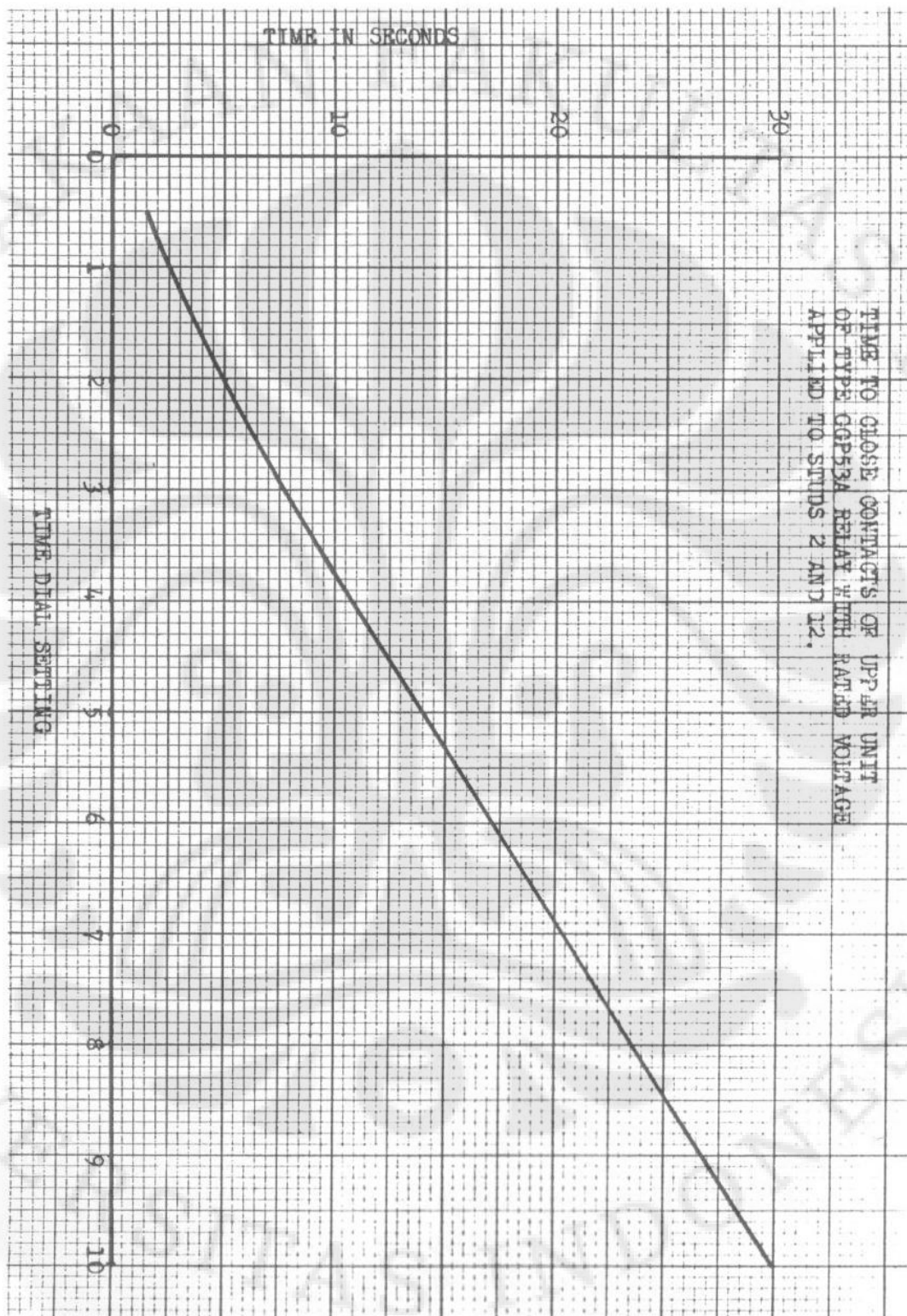
DEVICE NAME	MODEL	MFGR	CT RATIO	SETTING	
				TAP	TIME DIAL
51GN	IAC53A801A	GE	100/5	1	8

Lampiran C. Rele-rele pada Generator



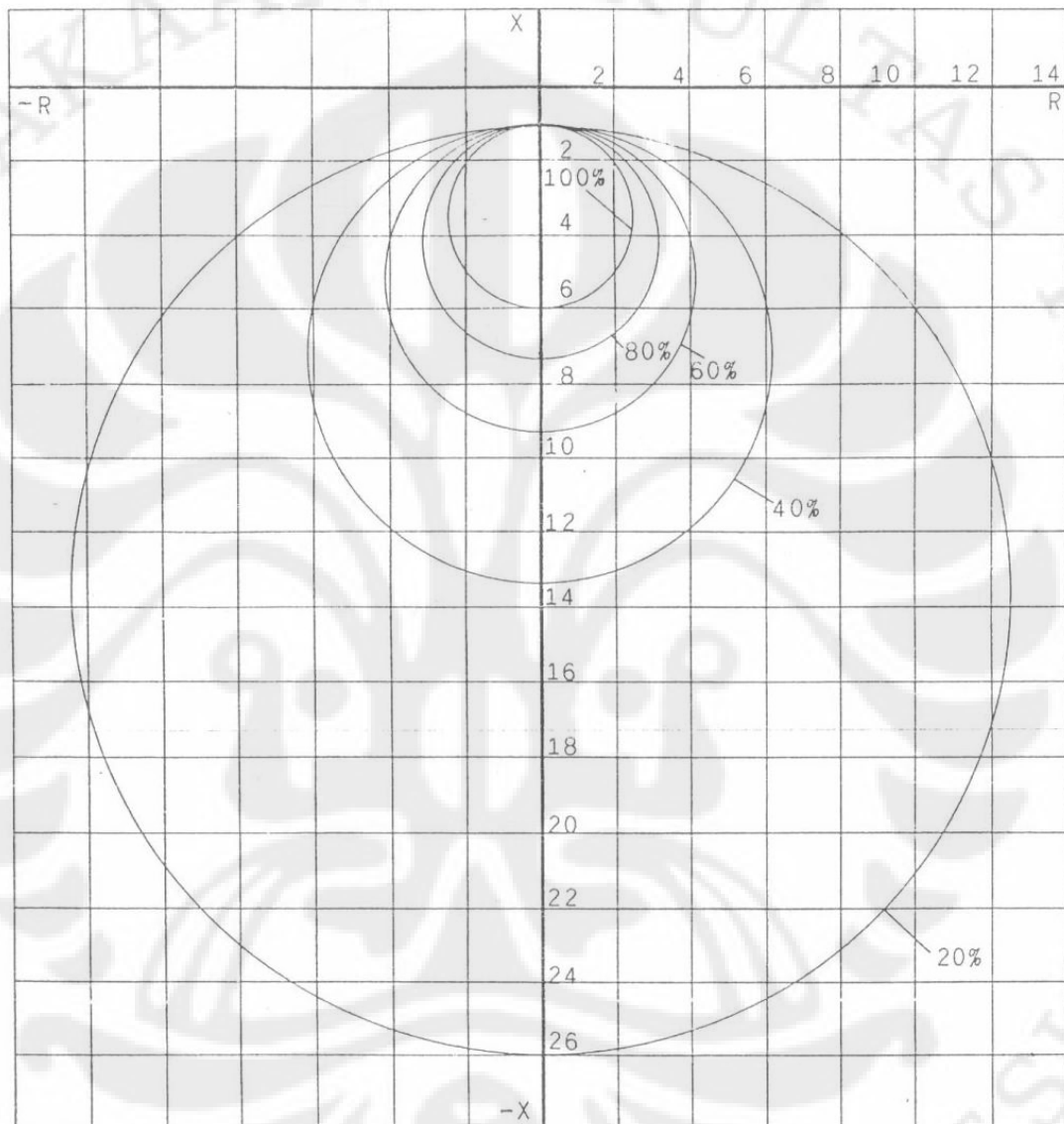
Lampiran D. Karakteristik Rele Tegangan Lebih Tipe IAV



Lampiran E. Karakteristik Rele Anti *Motoring* Tipe GGP

Lampiran F. Karakteristik Rele Kehilangan Medan Tipe CEH

TYPE CEH11A RELAY
 CHARACTERISTICS OF RELAY WITH VARIOUS TAP SETTING WHEN SET
 FOR 1 OHM OFFSET.
 ALL VALUES ARE PHASE - TO - NEUTRAL OHMS



Lampiran G. Listing Program MATLAB

D.1 Listing Program Simulasi Komponen d-axis dan q-axis

```

%Program Simulasi Komponen d-axis dan q-axis
%Gangguan Pada Terminal Generator
clc
t_sim=1.5;
delta=0.001;

%inisialisasi tipe gangguan
simAG=0;
simBCG=0;
simBC=1;

AG(2)=0;
BCG(2)=0;
BC(2)=0;
if (AG(1)==1)
    simAG=1;
    simBCG=0;
    simBC=0;
end
if (BCG(1)==1)
    simAG=0;
    simBCG=1;
    simBC=0;
end
if (BC(1)==1)
    simAG=0;
    simBCG=0;
    simBC=1;
end

sim46(2)=0;
if (sim46(1)==1)
    t_sim=990;
    delta=0.1;
end

a=cosd(120)+j*sind(120);

grounding_resistance=80;
kV=13.8;
PF=0.8;
MVA=15.625;
et0=1.05;

xd=1.8;
xd_tr=0.26;
xd_sbtr=0.135;
xq=1.75;
xq_tr=0.25;
xq_sbtr=0.135;

```

(lanjutan)

```

xg0=0.04;
xg2=0.135;
Td0_tr=0.585075;
Td0_sbtr=0.02692;
Tq0_tr=0.117288;
Tq0_sbtr=0.032886;

kVA=MVA*1000;
Zbase=kV^2/MVA;
i_base=kVA/(sqrt(3)*kV);
Zn=grounding_resistance/Zbase;
v_base=kV*1000;
z2=j*xg2;
z0=3*Zn+j*xg0;

teta=acosd(PF);
I_gen=1/et0*(cosd(-teta)+j*sind(-teta));
I_g=abs(I_gen);
power_angle=atand(I_g*xq*cosd(teta)/(et0+I_g*xq*sind(teta)));

%Tegangan d-axis dan q-axis
eq0=et0*cosd(power_angle);
ed0=et0*sind(power_angle);
Iq0=I_g*cosd(teta+power_angle);
Id0=I_g*sind(teta+power_angle);
eq0_sbtr=eq0+Id0*xd_sbtr;
ed0_sbtr=ed0-Iq0*xq_sbtr;
eq0_tr=eq0+Id0*xd_tr;
ed0_tr=ed0-Iq0*xq_tr;
Ed=ed0-Iq0*xq;
EI=eq0+Id0*xd;

%Fault Resistance
if (simAG==1)
    zf=abs(z2+z0);
    Ta=0.2;
end
if (simBCG==1)
    zf=abs(z2*z0/(z2+z0));
    Ta=0.235;
end
if (simBC==1)
    zf=abs(z2);
    Ta=0.239;
end

%Arus Gangguan
Id_sbtr=eq0_sbtr/(xd_sbtr+zf);
Id_tr=eq0_tr/(xd_tr+zf);
Id=EI/(xd+zf);
Iq_sbtr=ed0_sbtr/(xq_sbtr+zf);
Iq_tr=ed0_tr/(xq_tr+zf);
Iq=Ed/(xq+zf);
Ic(i)=abs(ic(i))*i_base;

```

(lanjutan)

```

%Konstanta waktu
Tdf_sbtr=((xd_sbtr+zf)/(xd_tr+zf))*Td0_sbtr;
Tdf_tr=((xd_tr+zf)/(xd+zf))*Td0_tr;
Tqf_sbtr=((xq_sbtr+zf)/(xq_tr+zf))*Tq0_sbtr;
Tqf_tr=((xq_tr+zf)/(xq+zf))*Tq0_tr;

%Pengaruh Eksitasi
Ec=2.86;
zdf=xd+zf;

sim=1;
t=0;
i=1;
while (sim==1)
    iex(i)=(Ec-EI)/zdf*(1-exp(-t/Tdf_tr));
    id(i)=((Id_sbtr-Id_tr)*exp(-t/Tdf_sbtr)+(Id_tr-Id)*exp(-
t/Tdf_tr)+Id+iex(i))*(cosd(-(90-power_angle))+j*sind(-(90-
power_angle)));
    iq(i)=(Iq_sbtr-Iq_tr)*exp(-t/Tqf_sbtr)+(Iq_tr-Iq)*exp(-
t/Tqf_tr)*(cosd(power_angle)+j*sind(power_angle));
    iac(i)=id(i)+iq(i);
    Idc=sqrt(2)*iac(1);
    idc(i)=Idc*exp(-t/Ta);
    i1(i)=iac(i)+idc(i);
    if (simAG==1)
        i2(i)=i1(i);
        i0(i)=i1(i);
        v1(i)=i1(i)*(z2+z0);
    end
    if (simBCG==1)
        i2(i)=-z0/(z2+z0)*i1(i);
        i0(i)=-z2/(z2+z0)*i1(i);
        v1(i)=i1(i)*z2*z0/(z2+z0);
    end
    if (simBC==1)
        i2(i)=-i1(i);
        i0(i)=0;
        v1(i)=i1(i)*z2;
    end
    in(i)=3*i0(i);
    I1(i)=abs(i1(i))*i_base;
    I2(i)=abs(i2(i))*i_base;
    I0(i)=abs(i0(i))*i_base;
    ia(i)=i1(i)+i2(i)+i0(i);
    ib(i)=a^2*i1(i)+a*i2(i)+i0(i);
    ic(i)=a*i1(i)+a^2*i2(i)+i0(i);
    Ia(i)=abs(ia(i))*i_base;
    Ib(i)=abs(ib(i))*i_base;
    Ic(i)=abs(ic(i))*i_base;
    In(i)=abs(in(i))*i_base;
    v2(i)=-i2(i)*z2;
    v0(i)=-i0(i)*z0;
    va(i)=(v1(i)+v2(i)+v0(i));
    vb(i)=(a^2*v1(i)+a*v2(i)+v0(i));
    vc(i)=(a*v1(i)+a^2*v2(i)+v0(i));

```

(lanjutan)

```

Va(i)=abs(va(i))*v_base;
Vb(i)=abs(vb(i))*v_base;
Vc(i)=abs(vc(i))*v_base;
vab(i)=va(i)-vb(i);
Vab(i)=abs(vab(i))*v_base;
vbc(i)=vb(i)-vc(i);
Vbc(i)=abs(vbc(i))*v_base;
vca(i)=vc(i)-va(i);
Vca(i)=abs(vca(i))*v_base;
time(i)=t;
if (t>=t_sim)
    i_maks=i;
    break;
end
t=t+delta;
i=i+1;
end
%plot(time,Vc);
%plot(time,Vca);
plot(time,Va)

```

D.2 Listing Program Device 51V

```

%Program Plot Grafik V_fasa-fasa/Rated Voltage vs I_fasa/Tap
Setting
%Untuk menentukan waktu pickup device 51V
clear all
clc

%inisialisasi tipe gangguan
AG(1)=1;
BCG(1)=0;
BC(1)=0;

run Arus_Tegangan;

t_maks=1;
tap_arus=1000;
proses=1;
e_rated=1;
t=0;
i=1;
while (proses==1)
    percent_Vab_per_rated_voltage(i)=abs(vab(i))/e_rated*100;
    percent_Ia_per_current_tap(i)=Ia(i)/tap_arus*100;
    percent_Vbc_per_rated_voltage(i)=abs(vbc(i))/e_rated*100;
    percent_Ib_per_current_tap(i)=Ib(i)/tap_arus*100;
    percent_Vca_per_rated_voltage(i)=abs(vca(i))/e_rated*100;
    percent_Ic_per_current_tap(i)=Ic(i)/tap_arus*100;
    time51V(i)=t;
    if (t>t_maks)
        i_maks=i;
        break;
    end
end

```


(lanjutan)

```

        t=t+delta;
        i=i+1;
    end

    for i=1:i_maks
        percent_V_per Rated_voltage(i,1)=percent_Vab_per Rated_voltage(i);
    end
    for i=1:i_maks
        percent_V_per Rated_voltage(i,2)=percent_Vbc_per Rated_voltage(i);
    end
    for i=1:i_maks
        percent_V_per Rated_voltage(i,3)=percent_Vca_per Rated_voltage(i);
    end
    for i=1:i_maks
        percent_I_per Current_tap(i,1)=percent_Ia_per Current_tap(i);
    end
    for i=1:i_maks
        percent_I_per Current_tap(i,2)=percent_Ib_per Current_tap(i);
    end
    for i=1:i_maks
        percent_I_per Current_tap(i,3)=percent_Ic_per Current_tap(i);
    end
    dummy=0.0001;
    for j=1:3
        for k=1:i_maks
            if ((percent_V_per Rated_voltage(k,j)>90) &&
                (percent_V_per Rated_voltage(k,j)<=100) &&
                (percent_I_per Current_tap(k,j)>percent_V_per Rated_vol
                    tage(k,j)))
                t_pickup(j)=(k-1)*delta+dummy;
                k_pickup(j)=k;
                break;
            end
            if ((percent_V_per Rated_voltage(k,j)>80) &&
                (percent_V_per Rated_voltage(k,j)<=90) &&
                (percent_I_per Current_tap(k,j)>0.8*percent_V_per Rated
                    _voltage(k,j)+18))
                t_pickup(j)=(k-1)*delta+dummy;
                k_pickup(j)=k;
                break;
            end
            if ((percent_V_per Rated_voltage(k,j)>70) &&
                (percent_V_per Rated_voltage(k,j)<=80) &&
                (percent_I_per Current_tap(k,j)>0.9*percent_V_per Rated
                    _voltage(k,j)+10))
                t_pickup(j)=(k-1)*delta+dummy;
                k_pickup(j)=k;
                break;
            end
            if ((percent_V_per Rated_voltage(k,j)>60) &&
                (percent_V_per Rated_voltage(k,j)<=70) &&
                (percent_I_per Current_tap(k,j)>percent_V_per Rated_vol
                    tage(k,j)+3))
                t_pickup(j)=(k-1)*delta+dummy;
                k_pickup(j)=k;
            end
        end
    end
end

```

(lanjutan)

```

        break;
    end
    if((percent_V_per Rated_voltage(k,j)>50) &&
        (percent_V_per Rated_voltage(k,j)<=60) &&
        (percent_I_per Current_tap(k,j)>0.1*percent_V_per Rated
        _voltage(k,j)+57))
        t_pickup(j)=(k-1)*delta+dummy;
        k_pickup(j)=k;
        break;
    end
    if((percent_V_per Rated_voltage(k,j)>30) &&
        (percent_V_per Rated_voltage(k,j)<=50) &&
        (percent_I_per Current_tap(k,j)>0.8*percent_V_per Rated
        _voltage(k,j)+14))
        t_pickup(j)=(k-1)*delta+dummy;
        k_pickup(j)=k;
        break;
    end
    if((percent_V_per Rated_voltage(k,j)>14) &&
        (percent_V_per Rated_voltage(k,j)<=30) &&
        (percent_I_per Current_tap(k,j)>0.625*percent_V_per Rat
        ed_voltage(k,j)+19.25))
        t_pickup(j)=(k-1)*delta+dummy;
        k_pickup(j)=k;
        break;
    end
    if((percent_V_per Rated_voltage(k,j)>=0) &&
        (percent_V_per Rated_voltage(k,j)<=14) &&
        (percent_I_per Current_tap(k,j)>3/14*percent_V_per rate
        d_voltage(k,j)+25))
        t_pickup(j)=(k-1)*delta+dummy;
        k_pickup(j)=k;
        break;
    end
end
end
for i=1:3
    t_pickup(2,i)=inf;
end
for j=1:3
    if (t_pickup(1,j)==0)
        waktu_pickup(j)=inf;
    else
        waktu_pickup(j)=t_pickup(1,j)-dummy;
    end
end
waktu_pickup_A=waktu_pickup(1)
waktu_pickup_B=waktu_pickup(2)
waktu_pickup_C=waktu_pickup(3)
%plot(time51V, percent_Vab_per Rated_voltage)
%plot(time51V, percent_Ia_per Current_tap)
plot(percent_Vab_per Rated_voltage,percent_Ia_per Current_tap);
plot(percent_Vbc_per Rated_voltage,percent_Ib_per Current_tap);
plot(percent_Vca_per Rated_voltage,percent_Ic_per Current_tap);

```

(lanjutan)

D.3 Listing Program Device 46

```

%Program Menentukan Waktu Pickup dan Waktu Operasi Device 46
clear all
clc
sim46(1)=1;

%inisialisasi tipe gangguan
AG(1)=1;
BCG(1)=0;
BC(1)=0;

run Arus_Tegangan;

CT_ratio=1000/5;
K_setting=24;
tap=3.3;
min_I2=0.04;
t_maks=990;
k=1;
t_pickup=0;
cek_pickup=1;
while (cek_pickup==1)
    I2_sek(k)=I2(k)/CT_ratio;
    pu_I2(k)=I2_sek(k)/tap;
    I2_square(k)=pu_I2(k)^2;
    time46(k)=t_pickup;
    if (pu_I2(k)>min_I2)
        k_pickup=k;
        pickup=1;
        cek_pickup=0;
        break;
    end
    if (t_pickup>=t_maks)
        pickup=0;
        cek_pickup=0;
    end
    k=k+1;
    t_pickup=t_pickup+delta;
end

K_total=0;
t=t_pickup+delta;
i=k_pickup+1;

while (pickup==1)
    I2_sek(i)=I2(i)/CT_ratio;
    pu_I2(i)=I2_sek(i)/tap;
    I2_square(i)=pu_I2(i)^2;
    I2_square_av(i)=(I2_square(i)+I2_square(i-1))/2;
    I2_square_av_delta(i)=delta*I2_square_av(i);
    K_total=K_total+I2_square_av_delta(i);
    K(i)=K_total;
    time46(i)=t;
end

```

(lanjutan)

```

t_operate=t;
t=t+delta;
i=i+1;
if (K_total>=K_setting)
    t_operate=t;
    pickup=0;
    break;
end
if (t>=t_maks)
    t_operate=t_maks;
    pickup=0;
    break;
end
end
waktu_pickup=t_pickup
waktu_operasi=t_operate
%plot(time46,pu_I2)
plot(time46,K)

```

D.4 Listing Program Device 51GN

```

%Program Menentukan Waktu Pickup dan Waktu Operasi Device 51GN
clear all
clc

%inisialisasi tipe gangguan
AG(1)=1;
BCG(1)=0;

run Arus_Tegangan;

CT_ratio=100/5;
tap=1;
TD=8;

A=3.922;
B=0.0982;
p=2;

min_In=CT_ratio*tap;
M(1)=In(1)/(CT_ratio*tap);
t_op(1)=(A/(M^p-1)+B)*TD;
t_op_reproc(1)=1/t_op(1);
t_op_reproc_av(1)=0;
t_op_reproc_av_delta(1)=0;

t_maks=4;
k=1;
t_pickup=0;
cek_pickup=1;
while (cek_pickup==1)
    time51GN(k)=t_pickup;
    if(In(k)>min_In)
        k_pickup=k;
    end
end

```

(lanjutan)

```

        pickup=1;
        cek_pickup=0;
        break;
    end
    if (t_pickup>=t_maks)
        pickup=0;
        cek_pickup=0;
    end
    k=k+1;
    t_pickup=t_pickup+delta;
end

i=k_pickup+1;
total(i-1)=0;
t=t_pickup+delta;

while (total<1)
    M(i)=In(i)/(CT_ratio*tap);
    t_op(i)=(A/(M(i)^p-1)+B)*TD;
    t_op_reproc(i)=1/t_op(i);
    t_op_reproc_av(i)=(t_op_reproc(i)+t_op_reproc(i-1))/2;
    t_op_reproc_av_delta(i)=delta*t_op_reproc_av(i);
    total(i)=total(i-1)+t_op_reproc_av_delta(i);
    time51GN(i)=t;
    if (t>=t_maks)
        t_operate=inf;
        break;
    end
    t_operate=t;
    t=t+delta;
    i=i+1;
end
waktu_pickup=t_pickup
waktu_operasi=t_operate
%plot(time,In)
plot(time51GN,total)

```