

**STUDI PENGARUH ARUS HARMONISA TERHADAP KINERJA
RELE ARUS LEBIH PADA PENYULANG ELECTROSTATIC
PRECIPITATOR DI PLTU UNIT 6 PAITON**

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

**SKRIPSI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

**SUHENDRA D.P
NIM. 0810630095-63**

**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
MALANG
2015**

LEMBAR PERSETUJUAN

**STUDI PENGARUH ARUS HARMONISA TERHADAP KINERJA
RELE ARUS LEBIH PADA PENYULANG *ELECTROSTATIC
PRECIPITATOR* DI PLTU UNIT 6 PAITON**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

SUHENDRA D.P
NIM. 0810630095-63

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Ir. Hery Purnomo, M.T.
NIP. 19550708 198212 1 001

Dosen Pembimbing II

Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.
NIP. 19580609 198703 1 003

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI PENGARUH ARUS HARMONISA TERHADAP KINERJA
RELE ARUS LEBIH PADA PENYULANG ELECTROSTATIC
PRECIPITATOR DI PLTU UNIT 6 PAITON

SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

SUHENDRA D.P
NIM. 0810630095-63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 04 Juni 2015

Majelis Penguji :

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Hadi Suyono, S.T.,M.T.,PhD

NIP. 19730520 200801 1 013

Ir. Wijono, M.T., Ph.D

NIP. 19621111 198903 1 003

Dosen Penguji III

Ir. Soeprapto, M.T.

NIP. 19561020 198903 1 001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19741203 200012 1 001



KATA PENGANTAR

Alhamdulillahi robbil 'aalamiin, skripsi dengan judul "**Studi Pengaruh Arus Harmonis Terhadap Kinerja Rele Arus Lebih Pada Penyulang Electrostatic Precipitator Di PLTU Unit 6 Paiton**" dapat diselesaikan. Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi Teknik Energi Elektrik Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Tidak banyak yang bisa disampaikan kecuali ungkapan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan bimbingan, arahan dan dukungan sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan. Dengan rasa hormat, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak M.Azis Muslim, S.T., M.T., Ph.D selaku Ketua Jurusan dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Ali Mustofa, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi dan Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Ir.Hery Purnomo, M.T. dan Bapak Ir. Mahfudz Shidiq, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
4. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D, Bapak Ir. Wijono, M.T., Ph.D, dan Bapak Ir. Soeprapto, M.T selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan terhadap penyempurnaan skripsi ini.
5. Bapak Dwi Fadilla K., S.T., M.T selaku dosen saksi.
6. Seluruh Bapak/Ibu dosen serta karyawan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
7. Seluruh staf *maintenance* bagian *electric* dan *electrical engineering* PT. YTL Jawa Timur yang menanganani PLTU Unit 5 dan 6 Paiton, dan kepada mas Harmawan S.T selaku asisten *electrical engineer* yang telah banyak memberi bantuan pada penyusunan skripsi ini.



8. Kedua orang tua tercinta, Bapak Marnoto dan Ibunda Sugina dan Nenek tercinta Supandi yang telah mendidik, memberi kasih sayang, perhatian, motivasi dan selalu memanjatkan do'a yang tidak pernah terputus.
9. Adik tercinta, Maradona Armando Firando, terima kasih atas kasih sayang, do'a, dan selalu memberikan semangat serta dukungan. Skripsi ini buat Bapak, Ibunda, Nenek dan Adik saya yang paling saya sayangi dan cintai.
10. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan, yang tidak disebutkan satu persatu secara langsung atas penyusunan skripsi ini.

Disadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini banyak kekurangan dan kelemahan karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama penggerjaan skripsi ini, oleh karena itu diperlukan saran dan kritik dari semua pihak untuk perbaikan dan kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat memberi manfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, 17 Juni 2015



RINGKASAN

Suhendra D.P., Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2015, *Studi Pengaruh Arus Harmonisa Terhadap Kinerja Rele Arus Lebih Pada Penyulang Electrostatic Precipitator Di PLTU Unit 6 Paiton*, Dosen Pembimbing: Ir. Hery Purnomo, M.T. dan Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.

Rele arus lebih (*overcurrent relay*) adalah salah satu komponen sistem proteksi yang berfungsi sebagai proteksi terhadap gangguan hubung singkat fasa ke fasa atau hubung singkat tiga fasa yang terjadi di sepanjang *zone* proteksi dari rele arus lebih tersebut dengan cara membaca arus saluran (*line*) melalui transformator arus (*current transformer*), kemudian membuat *circuit breaker* membuka. Keberadaan arus harmonisa yang mengalir pada saluran menyebabkan arus yang dibaca oleh rele arus lebih adalah resultan arus fundamental dan arus harmonisa yang dinamakan arus terdistorsi harmonisa. Arus harmonisa menyebabkan kurva seting *overcurrent relay* karakteristik *inverse time* bergeser ke bawah menyebabkan nilai *pick up* berubah, waktu trip rele lebih cepat. Hal demikian bisa menyebabkan rele arus lebih (*overcurrent relay*) trip jika seting arus untuk *rele* arus lebih tidak cukup besar untuk kasus arus terdistorsi harmonisa. Arus pada penyulang *electrostatic precipitator* mengandung arus harmonisa disebabkan penggunaan komponen elektronika daya berupa SCR (*silicone controlled rectifier*) pada *electrostatic precipitator* yang digunakan untuk mengatur besarnya arus pada *step up transformer*.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja rele arus lebih yang terdapat pada penyulang *electrostatic precipitator* akibat arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* supaya tidak terjadi kesalahan dalam penyetelan rele arus lebih yang terdapat pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* di PLTU Unit 6 Paiton Langkah-langkah yang digunakan adalah Menggambar *single line* PLTU Unit 6 menggunakan simulasi beserta rele arus lebih pada penyulang *electrostatic precipitator* (rele 1) dan rele arus lebih yang terdapat pada *incoming busbar* BBB (rele 2), dilanjutkan melakukan seting rele 1 dan rele 2 menggunakan batas minimum penyetelan arus yang dianjurkan yaitu $1,05 \times I_{rated}$. Data-data arus fundamental dan arus harmonisa yang diperoleh melalui pengukuran secara langsung di lapangan di masukkan dalam beban *electrostatic precipitator* yang digambarkan sebagai beban *static* pada simulasi kemudian menjalankan simulasi *harmonic load flow* untuk dua kejadian yaitu tanpa melibatkan arus harmonisa dan melibatkan arus harmonisa.

Dari hasil *harmonic load flow* ketika tidak melibatkan data arus harmonisa diperoleh arus yang mengalir pada penyulang *electrostatic precipitator* atau sisi primer CT (*Current Transformer*) untuk rele 1 sebesar 109,8 A, arus ini dibaca oleh rele 1 sebesar $1,05 \times 109,8 = 115,29$ A lebih kecil daripada besarnya seting arus aktual pada rele 1 sehingga rele 1 tidak trip. Ketika data arus harmonisa dilibatkan pada simulasi *harmonic load flow* diperoleh arus yang mengalir pada penyulang *electrostatic precipitator* atau sisi primer CT (*Current Transformer*) untuk rele 1 sebesar 106,4 A, arus ini dibaca oleh rele 1 sebesar $1,05 \times 116,4 = 122,22$ A melebihi daripada besarnya seting arus aktual rele 1 yaitu 121,275 A, rele 1 trip dalam waktu 28,875 menit. Oleh karena adanya perbedaan waktu trip ketika tidak melibatkan data arus harmonisa dan ketika melibatkan data arus harmonisa menyatakan bahwa kurva seting untuk rele 1 bergeser. Ketika tidak melibatkan data arus harmonisa, rele 1 trip jika arus fundamentalnya melebihi besarnya arus seting pada rele 1 yaitu 121,275 A. Ketika melibatkan data arus harmonisa dalam analisis, rele 1 trip jika arus fundamentalnya



melebihi 115, 02 A. Untuk menghindari rele 1 trip akibat adanya arus harmonisa yang mengalir pada penyulang *electrostatic precipitator* maka setting rele 1 dinaikkan menjadi 140 A.

Kata kunci: rele arus lebih, arus harmonisa, kesalahan setting rele arus lebih.



DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
RINGKASAN	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pengertian Harmonisa	5
2.2 Nilai RMS Arus Terdistorsi	5
2.3 <i>Total Harmonic Distortion (THD)</i>	6
2.4 Standarisasi Batas Distorsi Arus	7
2.5 Beban yang Menimbulkan Arus Harmonisa	8
2.6 Arus Hubung Singkat	9
2.7 Perhitungan Arus Hubung Singkat	11
2.7.1 Komponen Simetris	11
2.7.2 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	13
2.7.3 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa	15
2.7.4 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah	17
2.7.5 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah	20
2.8 Perhitungan Impedansi Komponen Sistem Tenaga Listrik	21
2.8.1 Impedansi Generator Sinkron	22
2.8.2 Impedansi Grid	22

2.8.3	Impedansi Transformator	22
2.9	Prinsip Kerja Rele Arus Lebih	25
2.10	Spesifikasi Teknis Rele Arus Lebih Statis Tipe MCGG	26
2.11	Penyetelan Rele Arus Lebih.....	28
2.11.1	Batas Minimum Penyetelan	29
2.11.2	Batas Maksimum Penyetelan	29
2.11.3	Data Tambahan untuk Penyetelan Rele Arus Lebih	29
2.12	Pengaruh Arus Harmonisa Terhadap Kinerja Rele Arus Lebih.....	32
BAB III METODE PENELITIAN	35
3.1	Pengambilan Data	36
3.2	Prosedur Perhitungan dan Analisis	36
3.3	Penutup	38
BAB IV ANALISIS PENGARUH ARUS HARMONISA TERHADAP KINERJA RELE ARUS LEBIH	39
4.1	<i>Electrostatic Precipitator</i> (ESP)	39
4.2	Suplai Daya <i>Electrostatic Precipitator</i>	39
4.3	Arus Harmonisa yang Ditimbulkan oleh <i>Electrostatic Precipitator</i>	40
4.4	Menghitung Arus Hubung Singkat Fasa ke Fasa ($I_{f2\Phi}$) dan Hubung Singkat Tiga Fasa ($I_{f3\Phi}$) pada Busbar HQA 2 dan <i>Busbar</i> HQA-T20	42
4.4.1	Menghitung Impedansi Komponen Sistem Daya yang Berada dalam Lintasan Hubung Singkat	43
4.4.2	Menghitung Impedansi <i>Thevenin</i> dari Jaringan Urutan Positif ($Z_{kk}^{(1)}$) dan Urutan Negatif ($Z_{kk}^{(2)}$)	49
4.4.3	Menghitung Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ($I_{f3\Phi}$) di <i>Busbar</i> HQA 2	51
4.4.4	Menghitung Arus Hubung Singkat Fasa ke Fasa ($I_{f2\Phi}$) di <i>Busbar</i> HQA 2	51
4.4.5	Menghitung Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ($I_{f3\Phi}$) di <i>Busbar</i> 10 kV HQA-T20	51
4.4.6	Menghitung Arus Hubung Singkat Fasa ke Fasa ($I_{f2\Phi}$) di <i>Busbar</i> 10 kV HQA-T20	51
4.4.7	Perbandingan antara Arus Hubung Singkat melalui Perhitungan dan Hasil Simulasi	52



4.5 Menghitung TDD (<i>Total Demand Distortion</i>) <i>Incoming Switchgear Electrostatic Precipitator</i> HQA 2 dan Membandingkan dengan Standar Menurut Standar IEEE	52
4.6 Melakukan Seting Rele Arus Lebih Menggunakan Karakteristik <i>Very Inverse</i>	54
4.6.1 Rele Arus Lebih pada Penyulang <i>Electrostatic Precipitator</i> (Rele 1)	54
4.6.2 Rele Arus Lebih pada <i>Incoming</i> untuk <i>Busbar BBB</i> (Rele 2)	56
4.6.3 Koordinasi Rele 1 dan Rele 2	56
4.7 Analisis Pengaruh Arus Harmonia Tethadap Kinerja Rele Arus Lebih dalam Memenuhi Stelan Karaktersitik <i>Very Inverse</i>	58
4.8 Seting Ulang Rele 1	62
BAB V PENUTUP	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN I	67
LAMPIRAN II	73
LAMPIRAN III	75
LAMPIRAN IV	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Arus Fundamental ditambah Arus Harmonisa ke tiga Menghasilkan Arus Terdistorsi	5
Gambar 2.2	Arus Hubung Singkat Simetris	10
Gambar 2.3	Arus Hubung Singkat Asimetris	10
Gambar 2.4	Komponen-komponen Simetris dari Fasor V_a , V_b , V_c	12
Gambar 2.5	Fasor V_a , V_b , V_c diperoleh dengan Menjumlahkan Komponen Simetris dari Masing-masing Fasor yang Bersangkutan	13
Gambar 2.6	Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	13
Gambar 2.7	Gambar Rangkain untuk Menyatakan Persamaan Arus Urutan Positif ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	14
Gambar 2.8	Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa.....	15
Gambar 2.9	Gambar Rangkaian untuk Menyatakan Persamaan Arus Urutan Positif dan Arus Urutan Negatif ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa	17
Gambar 2.10	Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah	18
Gambar 2.11	Gambar Rangkaian untuk Menyatakan Persamaan Arus Urutan Positif, Arus Urutan Negatif dan Arus Urutan Nol ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah	19
Gambar 2.12	Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	20
Gambar 2.13	Gambar Rangkaian untuk Menyatakan Persamaan Arus Urutan Positif, Arus Urutan Negatif, Arus Urutan Nol ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	21
Gambar 2.14	Diagram Ekuivalen Transformtor Tiga Belitan	23
Gambar 2.15	Diagram Ekuivalen Impedansi Belitan Transformator Tiga Fasa	24
Gambar 2.16	Rangkaian Internal Rele Arus Lebih Tipe MCGG	25
Gambar 2.17	Prinsip Kerja Rele Arus Lebih.....	26
Gambar 2.18	Hubungan Arus-Waktu dengan Tunda Waktu untuk Rele Arus Lebih Tipe MCGG.....	27
Gambar 2.19	Hubungan Perbandingan antara Waktu Tunda Minimum dan Konstanta Waktu <i>Inrush</i> dengan Perbandingan antara Seting <i>Threshold</i> dan Arus <i>Inrush</i>	30

Gambar 3.1	Diagram Alir Metode Penelitian	35
Gambar 4.1	<i>Single Line PLTU</i> Unit 6 Paiton	40
Gambar 4.2	Komponen Sisten Daya yang Berada dalam Lintasan Arus Hubung Singkat	43
Gambar 4.3	Rangkaian Jaringan Urutan Positif	49
Gambar 4.4	Rangkaian Jaringan Urutan Negatif.....	50
Gambar 4.5	Grafik Koordinasi Rele 1 dan Rele 2	57
Gambar 4.6	Urutan Rele Arus Lebih Trip Ketika Terjadi Hubung Singkat.....	57
Gambar 4.7	<i>Harmonic Load Flow</i> ketika Arus Harmonisa tidak dilibatkan.....	59
Gambar 4.8	Kurva Seting Rele 1 dan Arus yang dibaca oleh Rele 1 ketika Arus Harmonisa tidak dilibatkan	60
Gambar 4.9	<i>Harmonic Load Flow</i> ketika Arus Harmonisa dilibatkan.....	60
Gambar 4.10	Kurva Seting Rele 1 dan Arus yang dibaca oleh Rele 1 ketika Arus Harmonisa dilibatkan	61
Gambar 4.11	Pergeseran Kurva Seting Rele 1 Akibat Arus Harmonisa	62
Gambar 4.11	Kurva Seting Ulang Rele 1 dan Arus yang dibaca oleh Rele 1 ketika Arus Harmonisa dilibatkan	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Batas Distorsi Arus untuk Sistem Distribusi (120 V Hingga 65 Kv)	7
Tabel 2.2	Nilai Arus Puncak <i>Inrush</i> Maksimum untuk Berbagai Variasi Daya dan Konstanta Waktu <i>Inrush</i>	30
Tabel 2.3	<i>Damage Curve</i> untuk <i>Dry Type Transformer</i> Kategori 2	31
Tabel 4.1	Arus Fundamental dan Arus harmonisa Fasa A <i>Incoming</i> <i>Switchgear Electrostatic Precipitator</i>	41
Tabel 4.2	Arus Fundamental dan Arus harmonisa Fasa B <i>Incoming Switchgear</i> <i>Electrostatic Precipitator</i>	42
Tabel 4.3	Arus Fundamental dan Arus harmonisa Fasa C <i>Incoming Switchgear</i> <i>Electrostatic Precipitator</i>	42
Tabel 4.4	Perbandingan Antara Arus Hubung Singkat Melalui Perhitungan dan Hasil Simulasi	52
Tabel 4.5	Perbandingan antara TDD <i>Incoming Switchgear Electrostatic</i> <i>Precipitator</i> dan TDD Menurut Standar IEEE	53



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I	Data-data untuk Menentukan Nilai Impedansi	67
Lampiran I.1	Data-data Generator (MKA) dan Transformator (BBT01).....	67
Lampiran I.2	Data-data Generator (MKA).....	68
Lampiran I.3	Data-data Transformator (BBT01)	69
Lampiran I.4	Data-data Kabel Tipe 2XSY 3X1X500	70
Lampiran I.5	Data-data Kabel Tipe 2XSEYFGbY 3X185, Transformator HQA-T20, Kabel Tipe 3X1XC750MCM/1X1/0.....	71
Lampiran I.6	Data-data Transformator HQA-T20	72
Lampiran II	<i>Swtchgear Electrostatic Precipitator</i>	73
Lampiran II.1	Panel-panel yang Berada dalam <i>Switchgear Electrostatic Precipitator</i>	73
Lampiran II.2	Beban-beban yang Terhubung dengan MCC (<i>Motor Control Center</i>). 74	
Lampiran III	Data-data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa untuk Panel-panel yang Berada dalam <i>Switchgear Electrostatic Precipitator</i>	75
Lampiran III.1	Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada <i>T/R Control Panel 5D</i> (Fasa AC) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan <i>Power Quality Analyzer</i>	77
Lampiran III.2	Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada <i>T/R Control Panel 4D</i> (Fasa BC) Selama 10 Menit Pengukuran <i>Power Quality Analyzer</i>	76
Lampiran III.3	Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada <i>T/R Control Panel 3D</i> (Fasa AB) Selama 10 Menit Pengukuran <i>Power Quality Analyzer</i>	77
Lampiran III.4	Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada <i>T/R Control Panel 2D</i> (Fasa BC) Selama 10 Menit Pengukuran <i>Power Quality Analyzer</i>	78
Lampiran III.5	Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada <i>T/R Control Panel 1D</i> (Fasa AB) Selama 10 Menit Pengukuran <i>Power Quality Analyzer</i>	79

Lampiran III.6 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada <i>T/R Control Panel 5C</i> (Fasa BC) Selama 10 Menit Pengukuran <i>Power Quality Analyzer</i>	80
Lampiran III.7 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada <i>T/R Control Panel 4C</i> (Fasa BC) Selama 10 Menit Pengukuran <i>Power Quality Analyzer</i>	81
Lampiran III.8 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada <i>T/R Control Panel 3C</i> (Fasa AC) Selama 10 Menit Pengukuran <i>Power Quality Analyzer</i>	82
Lampiran III.9 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada <i>T/R Control Panel 2C</i> (Fasa AB) Selama 10 Menit Pengukuran <i>Power Quality Analyzer</i>	83
Lampiran III.10 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada <i>T/R Control Panel 1C</i> (Fasa AC) Selama 10 Menit Pengukuran <i>Power Quality Analyzer</i>	84
Lampiran III.11 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar pada MCC Fasa B Selama 10 Menit Pengukuran <i>Power Quality Analyzer</i> .	85
Lampiran IV Hasil Simulasi Arus Hubung Singkat di Busbar HQA 2	86
Lampiran IV.1 Gambar Arus Hubung Singkat Tiga Fasa di <i>Busbar HQA 2</i>	86
Lampiran IV.2 Hasil Simulasi Arus Hubung Singkat di <i>Busbar HQA 2</i>	87
Lampiran IV.3 Gambar Arus Hubung Singkat Tiga Fasa di <i>Busbar 10 kV HQA-T20</i>	88
Lampiran IV.4 Hasil Simulasi Arus Hubung Singkat di <i>Busbar 10 kV HQA-T20</i>	89



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Electrostatic precipitator merupakan salah satu komponen penting bagi PLTU unit 6 Paiton yang berfungsi mereduksi debu hasil pembakaran batu bara di *boiler* (bejana tertutup yang mampu mengubah air menjadi uap dengan bantuan panas) sampai pada batas kekeruhan tertentu sehingga emisi debu tidak mencemari lingkungan dengan memanfaatkan prinsip medan elektrostatis.

Electrostatic precipitator dalam memenuhi fungsinya tidak terlepas dari penggunaan komponen elektronika daya. Komponen elektronika daya berupa SCR (*silicone controlled rectifier*) dan jembatan penyearah (*bridge rectifier*) digunakan dalam *electrostatic precipitator* (ESP). SCR (*silicone controlled rectifier*) digunakan untuk mengatur besarnya arus yang mengalir pada *step up transformer* dan jembatan penyearah (*bridge rectifier*) yang merupakan satu set dengan *step up transformer* digunakan untuk mengubah tegangan ac menjadi tegangan dc. Komponen-komponen tersebut memproduksi arus harmonisa selama operasi. Arus harmonisa yang ditimbulkan memiliki frekuensi kelipatan bilangan ganjil dari frekuensi fundamental/dasar (50 Hz). Timbulnya arus harmonisa tersebut menyebabkan arus pada penyulang *electrostatic precipitator* terdistorsi.

Pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* dipasang sebuah rele arus lebih yang berfungsi sebagai proteksi terhadap gangguan hubung singkat tiga fasa dan fasa ke fasa yang terjadi sepanjang penyulang *electrostatic precipitator* sampai *busbar HQA 2* (*busbar 400 V electrostatic precipitator*). Arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* mengakibatkan arus pada penyulang *electrostatic precipitator* mengalami distorsi sehingga menyebabkan masalah dalam proteksi. Umumnya pabrik mendisain rele arus lebih beroperasi dalam bentuk gelombang arus sinusoidal fundamental. Keberadaaan arus harmonisa pada penyulang *electrosatic precipitator* menyebabkan rele arus lebih yang terpasang pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* tidak hanya membaca arus fundamental tetapi juga arus harmonisa. Keterlibatan arus harmonisa dalam pembacaan arus oleh rele arus lebih menyebabkan rele arus lebih beroperasi lebih cepat (waktu trip rele lebih cepat daripada waktu trip rele tanpa adanya arus harmonisa) dengan besarnya arus fundamental yang



sama untuk hubungan arus-waktu karakteristik *inverse time* (*standard inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*) yang dimiliki oleh rele arus lebih (Fujita. G, Member of IEEE, 2007), hal demikian mengakibatkan operasi rele arus lebih tidak lagi sesuai stelan karakteristik *inverse time* yang dipilih atau kurva hubungan arus-waktu karakteristik *inverse time* (*standard inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*) mengalami pergeseran untuk kondisi arus terdistorsi. Bergesernya kurva hubungan arus-waktu rele arus lebih bisa menyebabkan rele arus lebih trip jika arus seting pada rele arus lebih tidak cukup tinggi, akan terjadi perpotongan antara arus fundamental yang dibaca oleh rele arus lebih dan kurva hubungan arus-waktu rele arus lebih. Oleh karena itu kinerja rele arus lebih dipengaruhi oleh keberadaan arus harmonisa.

Jika rele arus lebih pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* trip karena keberadaan arus harmonisa yang menandakan terjadi kesalahan dalam seting rele maka *electrostatic precipitator* tidak akan bekerja karena tidak ada suplai daya untuk *electrostatic precipitator*. Jika hal demikian terjadi maka mengganggu proses produksi tenaga listrik di PLTU Unit 6 Paiton, karena apabila *electrostatic precipitator* tidak bekerja maka unit pembangkit akan dimatikan (*shut down*). Oleh karena rele arus lebih yang dipasang pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* memiliki hubungan arus-waktu karakteristik *inverse time* (*standard inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*) maka penulis menganggap perlu melakukan studi pengaruh arus harmonisa terhadap kinerja rele arus lebih pada penyulang *electrostatic precipitator* di PLTU Unit 6 Paiton dalam memenuhi stelan karakteristik *inverse time*, dipilih karakteristik *very inverse* yang bisa mewakili karakteristik *inverse time* lainnya agar tidak terjadi kesalahan dalam seting rele arus lebih.

1.2. Rumusan Masalah

Mengacu pada permasalahan yang telah diuraikan dalam latar belakang maka rumusan masalah yang akan dibahas adalah:

1. Bagaimana melakukan seting rele arus lebih pada penyulang *electrostatic precipitator* menggunakan stelan karakteristik *very inverse*.
2. Bagaimana melakukan seting rele arus lebih pada *incoming busbar* BBB agar terjadi koordinasi yang baik dengan rele arus lebih pada penyulang *electrostatic precipitator*.

3. Bagaimana pengaruh arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* terhadap kinerja rele arus lebih yang terdapat pada penyulang *electrostatic precipitator* dalam memenuhi stelan karakteristik *very inverse*.

1.3. Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini sesuai sasaran yang diharapkan, maka penelitian dibatasi pada beberapa hal berikut ini:

1. Analisis dilakukan pada rele arus lebih yaitu rele yang digunakan untuk proteksi terhadap gangguan hubung singkat tiga fasa dan fasa ke fasa yang terdapat pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* di PLTU Unit 6 Paiton.
2. Rele arus lebih yang dipasang adalah rele arus lebih tipe MCGG 82.
3. Analisis dilakukan untuk mengetahui kinerja rele arus lebih akibat pengaruh arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* dalam memenuhi stelan hubungan arus-waktu karakteristik *very inverse* yang terdapat dalam spesifikasi rele arus lebih tersebut.
4. Tidak membahas tentang pengaruh arus harmonisa terhadap rele proteksi tanah (*ground fault relay*).
5. Pengamatan dan pengambilan data arus harmonisa pada panel-panel yang terhubung dengan *busbar* HQA 2 (*busbar* 400 V *electrostatic precipitator*) dilakukan menggunakan alat ukur *Three Phase Power Quality Analyser* (Fluke 434/435).
6. Dalam perhitungan analisis, setiap frekuensi yang sama dianggap memiliki beda fasa yang sama untuk fasa yang sama.

1.4. Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah untuk melakukan studi mengenai kinerja rele arus lebih yang terpasang pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* akibat pengaruh arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* dalam memenuhi stelan hubungan arus-waktu karakteristik *very inverse* agar tidak terjadi kesalahan dalam melakukan setting rele arus lebih.

1.5. Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan informasi bagi PLTU Unit 6 Paiton mengenai kinerja rele arus lebih yang terpasang pada pangkal penyulang



electrostatic precipitator akibat pengaruh arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* agar tidak terjadi kesalahan dalam melakukan setting rele arus lebih tersebut.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut.

BAB I : PENDAHULUAN

Memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.

BAB III : METODE PENELITIAN

Memberikan tentang tahapan penyelesaian penelitian yang meliputi pengambilan data, prosedur perhitungan dan analisis serta penutup berisi kesimpulan dan saran.

BAB IV : STUDI PENGARUH ARUS HARMONISA TERHADAP KINERJA RELE ARUS LEBIH

Berisi pengolahan data, perhitungan dan analisis yang menjelaskan pengaruh arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* terhadap kinerja rele arus lebih pada penyulang *electrostatic precipitator* dalam memenuhi stelan karakteristik *very inverse* kemudian diperoleh stelan sehingga tidak menyebabkan kesalahan dalam penyetelan rele arus lebih.

BAB V : PENUTUP

Berisi kesimpulan dan saran yang diperoleh dari hasil penelitian.

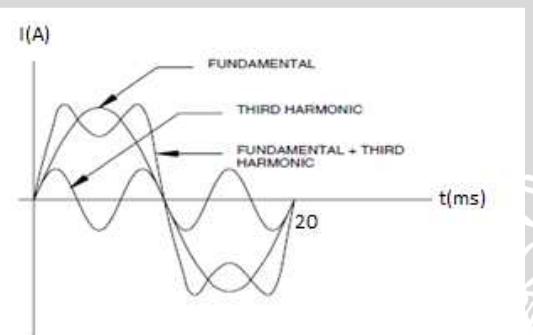


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Harmonisa

Harmonisa dalam dunia listrik dikategorikan sebagai gangguan (*disturbance*). Harmonisa merupakan suatu gelombang periodik yang memiliki frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamentalnya (50 Hz). Jadi gelombang dengan frekuensi 100 Hz merupakan harmonisa ke dua, harmonisa ketiga adalah gelombang dengan frekuensi 150 Hz, dan seterusnya. Harmonisa ke dua, harmonisa ke tiga, dan seterusnya dinamakan komponen harmonisa dari gelombang terdistorsi. Gelombang terdistorsi adalah penjumlahan gelombang fundamental dengan gelombang-gelombang harmonisa, sehingga terbentuk suatu gelombang terdistorsi yang bentuknya tidak sinusoidal murni.



Gambar 2.1. Arus Fundamental ditambah Arus Harmonisa ke tiga Menghasilkan Arus Terdistorsi

Sumber: C Sankaran. 2002:72

Gambar 2.1 menjelaskan bahwa jika pada suatu gelombang arus terdapat arus fundamental dengan frekuensi 50 Hz dan arus harmonisa ke tiga dengan frekuensi 150 Hz maka akan menghasilkan arus terdistorsi yang merupakan penjumlahan dari arus fundamental dan arus harmonisa ke tiga.

2.2. Nilai RMS Arus Terdistorsi

Nilai rms gelombang arus periodik dinyatakan oleh persamaan berikut (Mack Grady, *Understanding Power System Harmonic*, 2012:16):

$$I_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t)^2 dt$$

Gelombang terdistorsi memiliki komponen-komponen arus harmonis didalamnya, oleh karena itu $i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega_1 t + \theta_k)$, nilai $i(t)$ disubstitusikan dalam persamaan di atas menghasilkan persamaan berikut :

$$\begin{aligned} I_{rms}^2 &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left(\sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega_1 t + \theta_k) \right)^2 dt \\ I_{rms}^2 &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left(\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 \sin^2(k\omega_1 t + \theta_k) \right) dt + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1, m \neq n}^{\infty} I_m I_n \sin(m\omega_1 t + \theta_m) \sin(n\omega_1 t + \theta_n) dt \\ I_{rms}^2 &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left(\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 \left(\frac{1 - \cos(2k\omega_1 t + 2\theta_k)}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1, m \neq n}^{\infty} I_m I_n \left(\frac{\cos((m-n)\omega_1 t + \theta_m - \theta_n)}{2} + \frac{\cos((m+n)\omega_1 t + \theta_m + \theta_n)}{2} \right) \right) dt \end{aligned}$$

Karena integral cosinus satu periode sama dengan nol maka persamaan direduksi menjadi persamaan berikut:

$$\begin{aligned} I_{rms}^2 &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left(\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 \frac{1}{2} \right) dt = \frac{1}{2T} \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 (t_0 + T - t_0) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{I_k}{\sqrt{2}} \right)^2 \\ I_{rms} &= \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{I_k}{\sqrt{2}} \right)^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{k,rms})^2} \end{aligned} \tag{2.1}$$

Dengan:

k : Orde harmonis (gelombang dengan frekuensi 100 Hz memiliki nilai $k = 2$, $k = 3$ untuk gelombang dengan frekuensi 150 Hz, dan seterusnya), untuk $k = 1$ merupakan fundamental dan bukan merupakan gelombang harmonis.

2.3. Total Harmonic Distortion (THD)

Ukuran yang biasanya digunakan untuk menyatakan harmonis adalah THD yang biasa disebut faktor distorsi dan biasanya dinyatakan dalam persen. THD dinyatakan sebagai nilai rms semua komponen harmonis yang menyusun suatu gelombang dibagi dengan nilai rms fundamentalnya (dalam hal ini arus atau tegangan fundamental). Untuk THD arus dinyatakan oleh persamaan berikut (Mack Grady, *Understanding Power System Harmonic*, 2012:17):

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{k,rms}^2}}{I_{1,rms}} \times 100\% \tag{2.2}$$



Jika nilai rms arus terdistorsi dinyatakan dalam persamaan THD_i maka persamaan (2.1) menjadi persamaan (2.3) berikut:

$$\text{THD}_i^2 = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} I_{k,\text{rms}}^2}{I_{1,\text{rms}}^2} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} I_{k,\text{rms}}^2 - I_{1,\text{rms}}^2}{I_{1,\text{rms}}^2}$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} I_{k,\text{rms}}^2 = I_{1,\text{rms}}^2 (1 + \text{THD}_i^2)$$

$$I_{\text{rms}} = I_{1,\text{rms}} \sqrt{1 + \text{THD}_i^2} \quad (2.3)$$

2.4. Standarisasi Batas Distorsi Arus

Pengaruh harmonisa pada peralatan dan sistem begitu besar dan bervariasi secara teknis dan ekonomis sehingga diperlukan standarisasi harmonisa. Standar yang mengatur batasan distorsi harmonisa adalah standar yang dipublikasikan oleh IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineer*) yaitu IEEE Std 519-1992. Standar ini mengatur batasan harmonisa yang diijinkan (batas toleransi distorsi tegangan dan distorsi arus). Batas distorsi arus menurut IEEE Std 519-1992 seperti tercantum dalam Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1. Batasan Distorsi Arus Untuk Sistem Distribusi (120V hingga 65 kV)

Maksimum Distorsi Harmonisa Dalam % Arus Beban Fundamental (I_L)						
Harmonisa Orde Ganjil Pada : 120 V ≤ V ≤ 69 kV						
I _{SC} /I _L	n<11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	n≤35	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Sumber: *IEEE Recommended Practices and Requirements For Harmonic Control in Electrical Powers*, 1992:78

Tabel 2.1 menerangkan bahwa jika perbandingan antara arus hubung singkat maksimum (I_{SC}) di titik hubung bersama dan arus fundamental beban maksimum (I_L) di titik hubung bersama kurang dari 20 maka batas maksimum nilai TDD (*total demand distortion*) adalah 5 % , jika nilai TDD melebihi 5 % maka arus sudah dikategorikan terdistorsi, dan seterusnya.



TDD (*Total Demand Distortion*) adalah suatu ukuran yang menyatakan distorsi atau tidaknya suatu arus yang mengalir ke beban. TDD dinyatakan sebagai perbandingan antara nilai rms semua komponen arus harmonis yang menyusun suatu gelombang dan nilai rms arus fundamental beban maksimum atau rating arus saluran di titik hubung bersama (titik pertemuan antara suplai dan beban). Jika dinyatakan dalam persamaan matematis maka persamaannya sebagai berikut:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_{1,\text{rms(rated)}}} \quad (2.4)$$

2.5. Beban yang Menimbulkan Arus Harmonisa

Harmonisa dihasilkan oleh beban *nonlinear* yaitu beban yang menyebabkan bentuk gelombang arus yang timbul berbeda dengan bentuk geombang tegangan yang dipakai. Harmonisa juga dihasilkan oleh alat (*device*) yang menimbulkan arus *nonsinusoidal*. Beban *nonlinear* dikelompokkan menjadi (Mack Grady, *Understanding Power System Harmonic*, 2012:31):

- a. Transformator.

Untuk alasan ekonomis, transformator-transformator daya didesain beroperasi pada batas atau sedikit melebihi kurva saturasi dari material inti yang digunakan. Hal tersebut menyebabkan arus magnetisasi kaya akan harmonisa (hanya harmonisa ganjil). Harmonisa ketiga merupakan komponen harmonisa yang dominan (memiliki nilai paling besar dibandingkan komponen harmonisa yang lainnya). Akan tetapi arus magnetisasi sangat kecil jika dibandingkan dengan arus beban penuh.

- b. Mesin.

Seperti halnya transformator, mesin-mesin beroperasi dengan kerapatan fluksi melebihi batas saturasi. Motor induksi tiga fasa menghasilkan harmonisa ganjil tetapi dalam jumlah yang kecil.

- c. Lampu fluorescent (dengan ballast magnetik)

Pada beban ini, harmonisa yang dominan adalah harmonisa ketiga yang besarnya berkisar dari 15% sampai 20% fundamentalnya.

- d. Arc furnace

Beban ini menghasilkan harmonisa ketiga dan kelima yang dominan yaitu nilainya lebih besar jika dibandingkan dengan orde harmonisa yang lainnya.

Selain beban *nonlinear* yang disebutkan di atas, beban-beban elektronik daya (*power electronic loads*) juga menimbulkan arus harmonika seperti: *converter*, *switch mode power supply*. Selain itu juga ada *bridge rectifier* untuk mengubah besaran ac menjadi besaran dc. Harmonika yang ditimbulkan merupakan harmonika ganjil. SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) yang digunakan untuk mengontrol arus seperti halnya yang digunakan pada *electrostatic precipitator* menimbulkan arus-arus harmonika. Arus harmonika yang ditimbulkan juga merupakan harmonika ganjil, yang dominan adalah harmonika ke tiga, ke lima dan ke tujuh, tetapi yang paling dominan adalah harmonika ke tiga. Dan ada banyak lagi alat yang menimbulkan harmonika yaitu suatu alat yang menggunakan komponen semikonduktor yang dalam proses kerjanya sebagai saklar (ada aksi *switching*).

2.6. Arus Hubung Singkat

Hubung singkat adalah hubungan yang secara tiba-tiba atau disengaja melewati sebuah resistansi atau impedansi yang memiliki nilai rendah diantara dua atau lebih titik pada lintasan listrik yang memiliki beda tegangan, sedangkan arus hubung singkat adalah arus dalam lintasan listrik sebagai akibat dari adanya hubung singkat.

Gelombang arus hubung singkat dinyatakan oleh persamaan berikut (Gers, Juan M. & Edward J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks 2nd Edition*, 2004 :12):

$$i(t) = \frac{V_{\max}}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \phi) - \sin(\alpha - \phi)e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}]$$

Dengan:

V_{\max} : tegangan puncak ,volt

Z : impedansi ekuivalen jaringan yang berada disebelah hulu lokasi gangguan hubung singkat, $(\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2})$ ohm

α : sudut antara permulaan gangguan dan tegangan nol (sudut fasa tegangan ketika hubung singkat terjadi)

ϕ : sudut fasa impedansi ekuivalen jaringan $(\tan^{-1}(\frac{\omega L}{R}))$

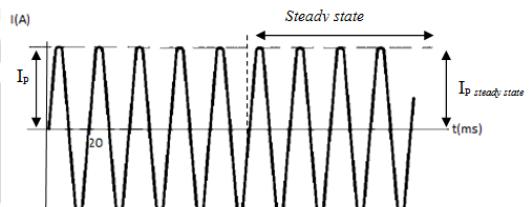
Dari persamaan gelombang arus hubung singkat, diketahui bahwa arus hubung singkat terdiri dari dua komponen yaitu komponen arus sinusoida bolak-balik dan komponen aperiodik dengan laju peluruhan sebanding dengan besarnya $\frac{R}{L}$. Ada dua

kejadian ekstrim untuk arus hubung singkat berkenaan dengan nilai puncak arus pada setengah siklus pertama arus hubung singkat yaitu jika:

- $\alpha = \phi$ dinamakan arus hubung singkat simetris, persamaan gelombang arus hubung singkat simetris adalah:

$$i(t) = \frac{V_{\max}}{Z} [\sin(\omega t)]$$

Arus hubung singkat simetris memiliki bentuk gelombang seperti berikut ini:



Gambar 2.2. Arus Hubung Singkat Simetris

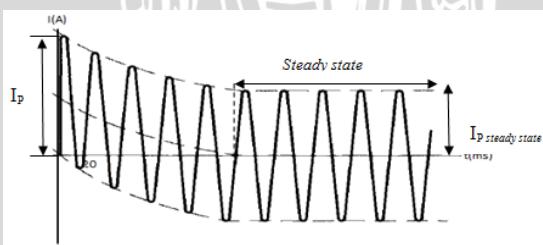
Sumber: Gers, Juan M. & Edward J. Holmes, 2004

Dari gambar 2.2, nilai puncak arus pada setengah siklus pertama arus hubung singkat simetris (I_p) nilainya sama dengan nilai puncak arus hubung singkat ketika mencapai keadaan mantap (*steady state*) ($I_{p \text{ steady state}}$).

- $\alpha = 0$, dinamakan arus hubung singkat asimetris, persamaan gelombang arus hubung singkat asimetris adalah:

$$i(t) = \frac{V_{\max}}{Z} [\sin(\omega t - \phi) - \sin(-\phi)e^{-(\frac{R}{L})t}]$$

Arus hubung singkat asimetris bentuk gelombangnya seperti berikut ini:



Gambar 2.3. Arus Hubung Singkat Asimetris

Sumber: Gers, Juan M. & Edward J. Holmes, 2004

Gambar 2.3 menjelaskan bahwa nilai puncak arus pada setengah siklus pertama arus hubung singkat asimetris (I_p) nilainya lebih besar dari pada nilai puncak arus hubung singkat ketika mencapai keadaan mantap (*steady state*) ($I_{p \text{ steady state}}$).



Arus puncak pada setengah siklus pertama arus hubung singkat asimetris lebih besar dari pada arus puncak ketika mencapai *steady state* dan arus puncak pada setengah siklus pertama arus hubung singkat simetris sama dengan arus puncak ketika mencapai *steady state*. Oleh karena itu analisis perhitungan arus hubung singkat untuk penyetelan rele arus lebih cukup menggunakan nilai arus hubung singkat ketika mencapai *steady state*. Arus hubung singkat *steady state* ini menjadi parameter besarnya arus hubung singkat yang diproteksi.

2.7. Perhitungan Arus Hubung Singkat

2.7.1 Komponen Simetris

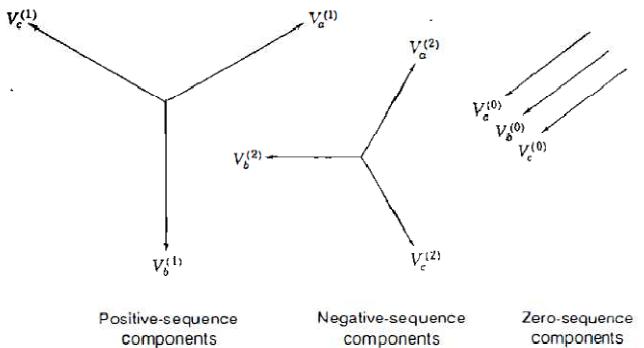
Gangguan tidak simetris misalnya gangguan satu fasa ke tanah atau gangguan fasa ke fasa menyebabkan arus dan tegangan sistem tidak seimbang. Menurut C.L Fortescue, sistem yang tidak seimbang dari n buah fasor yang berhubungan dapat diuraikan menjadi n buah sistem dengan fasor-fasor seimbang yang dinamakan komponen-komponen simetris dari fasor aslinya. Komponen-komponen simetris tersebut merupakan komponen-komponen urutan positif (*positive sequence components*), komponen-komponen urutan negatif (*negative sequence components*), dan komponen-komponen urutan nol (*zero sequence components*). Komponen-komponen urutan positif, komponen-komponen urutan negatif, dan komponen-komponen urutan nol berturut-turut adalah:

- Komponen-komponen urutan positif (*positive sequence components*), terdiri dari tiga fasor yang memiliki nilai (*magnitude*) yang sama, terpisah satu sama lain sebesar 120° , dan memiliki urutan fasa yang sama dengan fasor aslinya.
- Komponen-komponen urutan negatif (*negative sequence components*), terdiri dari tiga fasor yang memiliki nilai (*magnitude*) yang sama, terpisah satu sama lain 120° , dan memiliki urutan fasa berlawanan dengan fasor aslinya.
- Komponen-komponen urutan nol (*zero sequence components*), terdiri dari tiga fasor yang memiliki nilai yang sama, dan satu sama lain terpisah 0° .

Jika fasor aslinya memiliki urutan fasa abc, maka komponen-komponen urutan positif dari fasor aslinya memiliki urutan fasa abc juga, sedangkan komponen – komponen urutan negatif dari fasor aslinya memiliki urutan fasa acb. Jika fasor aslinya berupa tegangan, dapat dinyatakan dengan V_a , V_b , V_c . Untuk komponen-komponen simetrisnya dilambangkan dengan menambahkan *superscript* yaitu huruf yang ditulis di atas. 1 untuk urutan positif, 2 untuk urutan negatif, dan 0 untuk urutan nol. Jadi



komponen urutan positif, komponen urutan negatif, komponen urutan nol dari fasor V_a berturut-turut dinyatakan dengan $V_a^{(1)}$, $V_a^{(2)}$, dan $V_a^{(0)}$. Demikian juga untuk V_b dan V_c , komponen urutan positif, komponen urutan negatif, komponen urutan nol untuk fasor V_b berturut-turut dinyatakan dengan $V_b^{(1)}$, $V_b^{(2)}$, $V_b^{(0)}$, dan untuk fasor V_c dinyatakan dengan $V_c^{(1)}$, $V_c^{(2)}$, $V_c^{(0)}$. Komponen-komponen simetris dari fasor V_a , V_b , V_c dinyatakan oleh gambar 2.4.



Gambar 2.4. Komponen-komponen Simetris dari Fasor V_a , V_b , V_c

Sumber: John J. Grainger and William D. Stevenson, JR,1994

Gambar 2.4 adalah komponen-komponen simetris dari fasor V_a , V_b , dan V_c . Fasor V_a , V_b , dan V_c bisa ditentukan dengan menjumlahkan komponen simetris dari masing-masing fasor yang bersangkutan (John J. Grainger and William D. Stevenson, JR,1994:418):

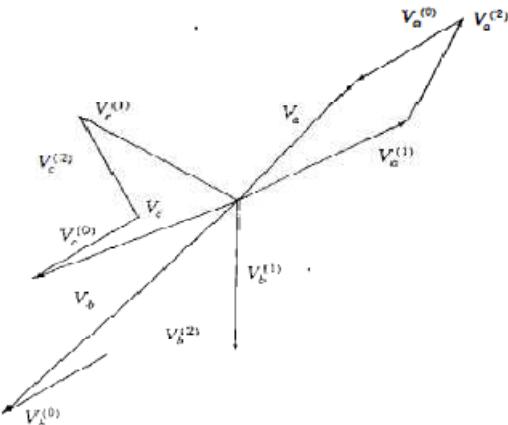
$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)}$$

$$V_b = V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)}$$

$$V_c = V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)}$$

Hasil dari penjumlahan komponen-komponen simetris dari fasor V_a , V_b , dan V_c menghasilkan fasor V_a , V_b , dan V_c yang merupakan fasor aslinya. Seperti pada gambar 2.5 berikut.





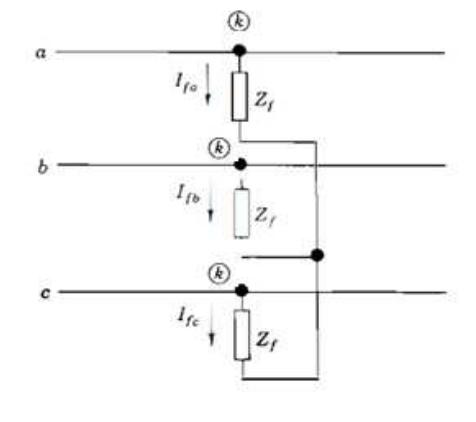
Gambar 2.5. Fasor V_a , V_b , V_c diperoleh dengan Menjumlahkan Komponen Simetris dari Masing-masing Fasor yang Bersangkutan

Sumber: John J. Grainger and William D. Stevenson, JR, 1994

Pada gambar 2.5 fasor V_a , V_b , V_c yang merupakan fasor tidak seimbang diperoleh dengan menjumlahkan komponen-komponen simetrisnya dari fasor yang bersangkutan.

2.7.2 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Hubung singkat tiga fasa adalah hubung singkat yang terjadi antara fasa a, fasa b, dan fasa c seperti pada gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa
Sumber: John J. Grainger and William D. Stevenson, JR, 1994

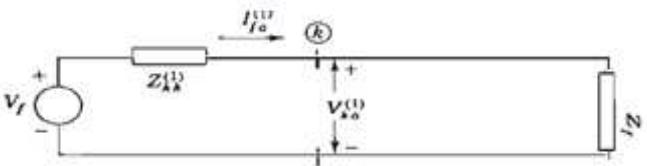
Pada gambar 2.6 menggambarkan terjadi hubungan antara fasa a, fasa b, dan fasa c melewati suatu impedansi Z_f (impedansi hubung singkat) mengakibatkan arus gangguan tiga fasa mengalir.

Hubung singkat tiga fasa merupakan hubung singkat simetris sehingga hanya mengalir arus urutan positif. Arus urutan nol ($I_{fa}^{(0)}$) = 0 dan arus urutan negatif ($I_{fa}^{(2)}$) =

0. Arus urutan positif yang mengalir dirumuskan sebagai berikut (John J. Grainger and William D. Stevenson, JR, 1994:479):

$$I_{fa}^{(1)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_f}$$

Gambar rangkaian untuk menyatakan persamaan $I_{fa}^{(1)}$ sebagai berikut:



Gambar 2.7. Gambar Rangkaian untuk Menyatakan Persamaan Arus Urutan Positif ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa
Sumber: John J. Grainger and William D. Stevenson, JR,1994

Arus pada fasa a jika dinyatakan dalam komponen simetrisnya adalah:

$$I_{fa} = I_{fa}^{(0)} + I_{fa}^{(1)} + I_{fa}^{(2)}$$

maka arus pada fasa a ketika gangguan tiga fasa terjadi adalah:

$$I_{fa} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_f}$$

Arus pada fasa b jika dinyatakan dalam komponen simetrisnya adalah:

$$I_{fb} = I_{fa}^{(0)} + a^2 I_{fa}^{(1)} + a I_{fa}^{(2)}$$

maka arus pada fasa b ketika gangguan tiga fasa terjadi adalah:

$$I_{fb} = \frac{a^2 V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_f}$$

Arus pada fasa c jika dinyatakan dalam komponen simetrisnya adalah:

$$I_{fc} = I_{fa}^{(0)} + a I_{fa}^{(1)} + a^2 I_{fa}^{(2)}$$

maka arus pada fasa c ketika gangguan tiga fasa terjadi adalah:

$$I_{fc} = \frac{a V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_f}$$

Dengan:

V_f : tegangan fasa pada titik gangguan sebelum gangguan terjadi

$Z_{kk}^{(1)}$: impedansi *thevenin* antara titik gangguan dan *node referensi* dari jaringan urutan positif

Z_f : impedansi gangguan hubung singkat

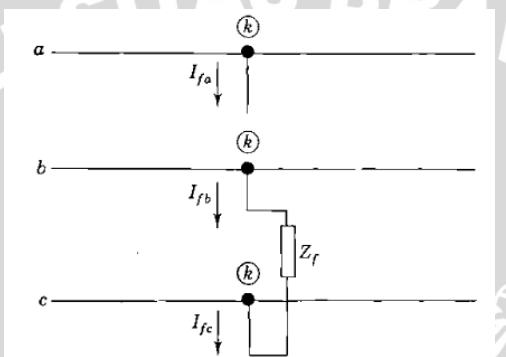


Arus pada fasa a, fasa b, dan fasa c ketika gangguan hubung singkat tiga fasa terjadi memiliki nilai yang sama dan masing-masing terpisah 120° , maka demi kemudahan persamaan arus hubung singkat tiga fasa ditulis ulang menjadi persamaan (2.5) berikut

$$I_{f3\phi} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_f}. \quad (2.5)$$

2.7.3 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Hubung singkat dua fasa adalah tersambungnya kedua fasa misal fasa b dan fasa c melalui impedansi Z_f seperti pada gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2.8. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa
Sumber: John J. Grainger and William D. Stevenson, JR, 1994

Pada gambar 2.8 menggambarkan terjadi hubungan antara fasa b, dan fasa c melewati suatu impedansi Z_f (impedansi hubung singkat) mengakibatkan mengalirnya arus gangguan fasa ke fasa.

Kondisi pada titik gangguan yaitu pada bus k seperti yang terlihat pada gambar 2.8 adalah:

$$I_{fa} = 0, I_{fb} = -I_{fc}, V_{kb} - V_{kc} = I_{fb}Z_f$$

Komponen-komponen simetris dari arus I_{fa} adalah:

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{fb} \\ -I_{fb} \end{bmatrix}$$

$$I_{fa}^{(0)} = 0 + \frac{1}{3} I_{fb} - \frac{1}{3} I_{fb} = 0$$

$$I_{fa}^{(1)} = 0 + \frac{1}{3} a I_{fb} - \frac{1}{3} a^2 I_{fb}$$



$$I_{fa}^{(2)} = 0 + \frac{1}{3}a^2 I_{fb} - \frac{1}{3}aI_{fb}$$

Maka komponen-komponen simetris dari arus I_{fa} adalah:

$$I_{fa}(0) = 0, I_{fa}^{(1)} = -I_{fa}^{(2)}$$

$$V_{kb} - V_{kc} = (V_{kb}^{(0)} + V_{kb}^{(1)} + V_{kb}^{(2)}) - (V_{kc}^{(0)} + V_{kc}^{(1)} + V_{kc}^{(2)})$$

Karena tidak ada arus urutan nol ($I_{fa}^{(0)} = 0$) maka $V_{kb}^{(0)} = 0$ dan $V_{kc}^{(0)} = 0$

$$V_{kb} - V_{kc} = (V_{kb}^{(1)} + V_{kb}^{(2)}) - (V_{kc}^{(1)} + V_{kc}^{(2)})$$

$$V_{kb} - V_{kc} = (V_{kb}^{(1)} - V_{kc}^{(1)}) + (V_{kb}^{(2)} - V_{kc}^{(2)})$$

$$V_{kb} - V_{kc} = (a^2 - a)V_{ka}^{(1)} + (a - a^2)V_{ka}^{(2)} = (a^2 - a)(V_{ka}^{(1)} - V_{ka}^{(2)})$$

$$I_{fb}Z_f = (I_{fb}^{(0)} + I_{fb}^{(1)} + I_{fb}^{(2)})Z_f = (I_{fb}^{(1)} + I_{fb}^{(2)})Z_f$$

$$I_{fb}Z_f = (a^2 I_{fa}^{(1)} + aI_{fa}^{(2)})Z_f$$

$$(a^2 - a)(V_{ka}^{(1)} - V_{ka}^{(2)}) = (a^2 - a)I_{fa}^{(1)}Z_f$$

$$V_{ka}^{(1)} - V_{ka}^{(2)} = I_{fa}^{(1)}Z_f$$

$$V_f - Z_{kk}^{(1)}I_{fa}^{(1)} - (-Z_{kk}^{(2)}I_{fa}^{(2)}) = I_{fa}^{(1)}Z_f$$

$$V_f - Z_{kk}^{(1)}I_{fa}^{(1)} - (-Z_{kk}^{(2)} - I_{fa}^{(1)}) = I_{fa}^{(1)}Z_f$$

$$V_f - (Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f)I_{fa}^{(1)} = 0$$

$$I_{fa}^{(1)} = -I_{fa}^{(2)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f}$$

Dengan:

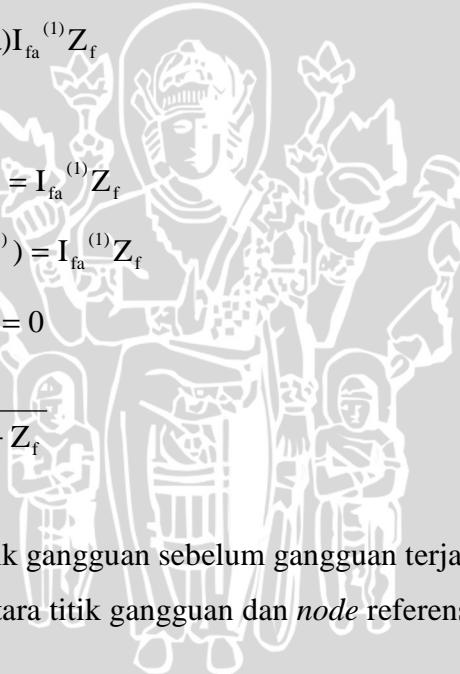
V_f : tegangan fasa pada titik gangguan sebelum gangguan terjadi

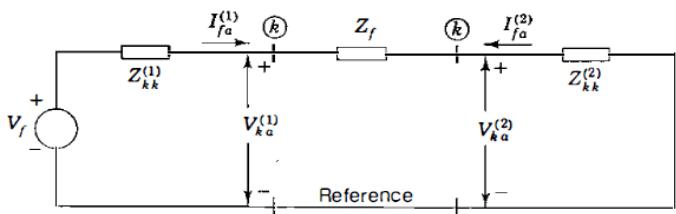
$Z_{kk}^{(1)}$: impedansi *thevenin* antara titik gangguan dan *node* referensi dari jaringan urutan positif

$Z_{kk}^{(2)}$: impedansi *thevenin* antara titik gangguan dan *node* referensi dari jaringan urutan negatif

Z_f : impedansi gangguan hubung singkat

Persamaan arus urutan positif ($I_{fa}^{(1)}$) dan arus urutan negatif ($I_{fa}^{(2)}$) ketika gangguan hubung singkat dua fasa jika dinyatakan dalam gambar rangkaian sebagai berikut:





Gambar 2.9. Gambar Rangkaian untuk Menyatakan Persamaan Arus Urutan Positif dan Arus Urutan Negatif ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Sumber: John J. Grainger and William D. Stevenson, JR,1994

Arus hubung singkat pada fasa b (I_{fb}) dan pada fasa c (I_{fc}) ketika terjadi gangguan hubung singkat dua fasa jika dinyatakan dalam komponen simetrisnya berturut-turut adalah:

$$I_{fb} = I_{fa}^{(0)} + a^2 I_{fa}^{(1)} + aI_{fa}^{(2)} = 0 + a^2 I_{fa}^{(1)} + aI_{fa}^{(2)}$$

$$I_{fb} = 1\angle 240^\circ (I_{fa}^{(1)}) - 1\angle 120^\circ (I_{fa}^{(1)})$$

$$I_{fb} = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3}\right) \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f} - \left(-\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}\right) \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f}$$

$$I_{fb} = \frac{-j\sqrt{3} V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f}$$

$$I_{fc} = \frac{j\sqrt{3} V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f}$$

Arus hubung singkat pada fasa b dan fasa c ketika terjadi hubung singkat antara fasa b dan fasa c memiliki nilai yang sama dan satu sama lain terpisah 180° . Maka demi kemudahan, arus hubung singkat dua fasa ditulis ulang menjadi persamaan (2.6) berikut.

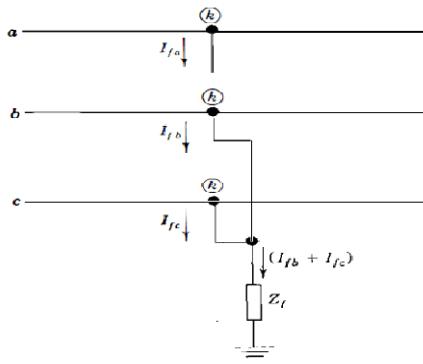
$$I_{f2\phi} = \frac{\sqrt{3} V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f} \quad (2.6)$$

Untuk gangguan hubung singkat yang jauh dari lokasi generator $Z_{kk}^{(1)} = Z_{kk}^{(2)}$

2.7.4 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Hubung singkat dua fasa ke tanah (fasa ke fasa ke tanah) adalah terkoneksi kedua fasa misal fasa b dan fasa c dan tanah melalui impedansi Z_f seperti pada gambar 2.10 berikut ini.





Gambar 2.10. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Sumber: John J. Grainger and William D. Stevenson, JR,1994

Kondisi pada titik gangguan yaitu pada bus k seperti yang terlihat pada gambar 2.10 adalah:

$$I_{fa} = 0, V_{kb} = V_{kc} = (I_{fb} + I_{fc})Z_f$$

Karena $I_{fa} = 0$ maka arus urutan nol adalah $I_{fa}^{(0)} = \frac{1}{3}(I_{fb} + I_{fc})$ sehingga $V_{kb} = V_{kc} = 3Z_f I_{fa}^{(0)}$.

Komponen-komponen simetris dari V_{ka} adalah:

$$\begin{bmatrix} V_{ka}^{(0)} \\ V_{ka}^{(1)} \\ V_{ka}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kc} \end{bmatrix}$$

Dari baris kedua dan baris ketiga yang diperoleh dari perkalian matrik, diperoleh $V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)}$. Sementara dari baris ke satu diperoleh:

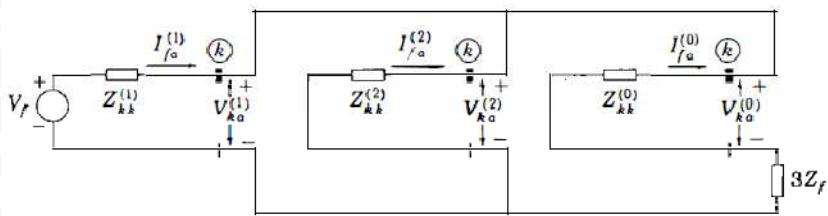
$$V_{ka}^{(0)} = \frac{1}{3}(V_{ka} + V_{kb} + V_{kc})$$

$$3V_{ka}^{(0)} = V_{ka} + 2V_{kb} + V_{kc} = V_{ka}^{(0)} + V_{ka}^{(1)} + V_{ka}^{(2)} + 2(3Z_f I_{fa}^{(0)})$$

$$\text{Karena } V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)} \text{ maka diperoleh } V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(0)} - 3Z_f I_{fa}^{(0)}$$

Persamaan $V_{ka}^{(1)}$, $V_{ka}^{(2)}$, dan $V_{ka}^{(0)}$ di atas jika dinyatakan dalam gambar rangkaian, seperti gambar 2.11 berikut:





Gambar 2.11. Gambar Rangkaian untuk Menyatakan Persamaan Arus Urutan Positif, Arus Urutan Negatif dan Arus Urutan Nol ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke tanah

Sumber: John J. Grainger and William D. Stevenson, JR,1994

Dari gambar rangkaian 2.11 diperoleh persamaan arus urutan positif, arus urutan negatif, dan arus urutan nol berturut-turut ketika terjadi hubung singkat dua fasa ke tanah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{fa}^{(1)} &= \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + \frac{Z_{kk}^{(2)}(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f}} \\ I_{fa}^{(1)} &= \frac{V_f(Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)}{Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)}3Z_f + Z_{kk}^{(2)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(2)}3Z_f} \\ I_{fa}^{(2)} &= -I_{fa}^{(1)} \left[\frac{Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \right] \\ I_{fa}^{(2)} &= \frac{-V_f(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)}{Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)}3Z_f + Z_{kk}^{(2)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(2)}3Z_f} \\ I_{fa}^{(0)} &= -I_{fa}^{(1)} \left[\frac{Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \right] \\ I_{fa}^{(0)} &= \frac{-V_f Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)}3Z_f + Z_{kk}^{(2)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(2)}3Z_f} \end{aligned}$$

Arus hubung singkat pada fasa b (I_{fb}) dan pada fasa c (I_{fc}) ketika terjadi gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah (hubung singkat fasa ke fasa ke tanah) jika dinyatakan dalam komponen simetrisnya berturut-turut adalah:

$$I_{fb} = I_{fa}^{(0)} + a^2 I_{fa}^{(1)} + a I_{fa}^{(2)}$$

$$I_{fb} = \frac{-V_f Z_{kk}^{(2)} + a^2 V_f (Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f) - a V_f (Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)}{Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)}3Z_f + Z_{kk}^{(2)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(2)}3Z_f}$$

$$I_{fb} = \frac{-j\sqrt{3}V_f(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f - aZ_{kk}^{(2)})}{Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)}3Z_f + Z_{kk}^{(2)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(2)}3Z_f} \quad (2.7)$$

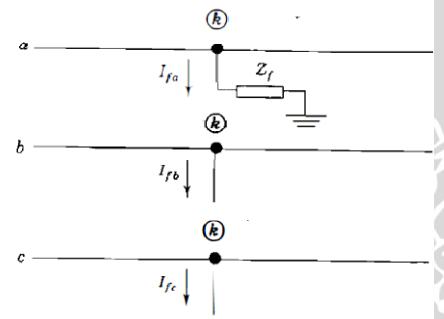
$$I_{fc} = I_{fa}^{(0)} + aI_{fa}^{(1)} + a^2I_{fa}^{(2)}$$

$$I_{fc} = \frac{-V_f Z_{kk}^{(2)} + a V_f (Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f) - a^2 V_f (Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)}{Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)}3Z_f + Z_{kk}^{(2)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(2)}3Z_f} \quad (2.8)$$

$$I_{fc} = \frac{j\sqrt{3}V_f(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f - a^2Z_{kk}^{(2)})}{Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(1)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)}3Z_f + Z_{kk}^{(2)}Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(2)}3Z_f}$$

2.7.5 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Hubung singkat fasa ke tanah adalah hubungan antara fasa misal fasa a ke tanah melewati impedansi gangguan hubung singkat Z_f seperti pada gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.12. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Sumber: John J. Grainger and William D. Stevenson, JR, 1994

Kondisi pada titik gangguan yaitu pada bus k seperti yang terlihat pada gambar 2.12 adalah:

$$I_{fb} = 0, I_{fc} = 0, V_{ka} = Z_f I_{fa}$$

Komponen-komponen simetris dari I_{fa} adalah:

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dari matriks di atas diperoleh $I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{I_{fa}}{3}$ atau $I_{fa} = 3I_{fa}^{(0)}$

$$V_{ka} = Z_f I_{fa} = 3Z_f I_{fa}^{(0)}$$

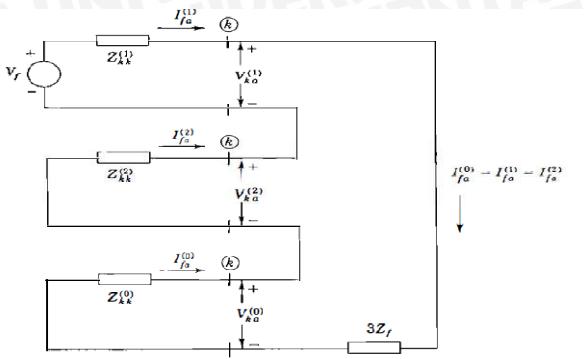
$$V_{ka} = V_{ka}^{(0)} + V_{ka}^{(1)} + V_{ka}^{(2)} = V_f - (Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)}) I_{fa}^{(0)} = 3Z_f I_{fa}^{(0)}$$

Maka komponen-komponen simetris dari I_{fa} adalah:

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + 3Z_f}$$



Persamaan arus urutan nol ($I_{fa}^{(0)}$), arus urutan positif ($I_{fa}^{(1)}$) dan arus urutan negatif ($I_{fa}^{(2)}$) ketika gangguan hubung singkat fasa ke tanah jika dinyatakan dalam gambar rangkaian, seperti gambar 2.13 berikut:



Gambar 2.13. Gambar Rangkaian untuk Menyatakan Persamaan Arus Urutan Positif, Arus Urutan Negatif dan Arus Urutan Nol ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke tanah

Sumber: John J. Grainger and William D. Stevenson, JR, 1994

Arus pada fasa a ketika terjadi gangguan hubung singkat antara fasa a dan tanah jika dinyatakan dalam komponen simetrisnya adalah:

$$I_{fa} = I_{fa}^{(0)} + I_{fa}^{(1)} + I_{fa}^{(2)} = \frac{3V_f}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + 3Z_f} \quad (2.9)$$

Dengan:

V_f : tegangan fasa pada titik gangguan sebelum gangguan terjadi

$Z_{kk}^{(1)}$: impedansi *thevenin* antara titik gangguan dan *node* referensi dari urutan positif jaringan

$Z_{kk}^{(2)}$: impedansi *thevenin* antara titik gangguan dan *node* referensi dari urutan negatif jaringan

$Z_{kk}^{(0)}$: impedansi *thevenin* antara titik gangguan dan *node* referensi dari urutan nol jaringan

Z_f : impedansi gangguan hubung singkat

Untuk gangguan hubung singkat yang jauh dari lokasi generator $Z_{kk}^{(1)} = Z_{kk}^{(2)}$

2.8. Perhitungan Impedansi Komponen Sistem Tenaga Listrik

Nilai impedansi komponen sistem tenaga listrik digunakan untuk menentukan nilai arus hubung singkat pada lokasi gangguan.



2.8.1 Impedansi Generator Sinkron

Impedansi urutan positif dan reaktansi urutan positif generator sinkron dirumuskan sebagai berikut (IEC 60909, *Calculation of Short Circuit Current in Three Phase System*):

$$Z_{IG} = R_{IG} + jX_{IG} \quad (2.10)$$

$$X_{IG} = x''_d \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} \quad (2.11)$$

Dengan:

Z_{IG} : impedansi urutan positif generator

U_{rG} : rating tegangan generator

X_{IG} : reaktansi urutan positif generator

x''_d : reaktansi subtransien dalam persen impedansi

impedansi dan reaktansi tersebut merupakan impedansi dan reaktansi urutan positif.

Jika nilai impedansi tersebut dibawa ke sistem tegangan yang berbeda maka harus dikalikan dengan $\frac{1}{\bar{u}_r^2}$ (\bar{u} merupakan rasio antara tegangan generator dengan tegangan sistem yang berbeda).

2.8.2 Impedansi Grid

Nilai impedansi pada grid dinyatakan oleh persamaan berikut ini (IEC 60909, *Calculation of Short Circuit Current in Three Phase System*):

$$Z_Q = \frac{U_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}} \quad (2.12)$$

Dengan:

Z_Q : impedansi urutan positif grid

U_{nQ} : rating tegangan grid

I_{kQ} : arus hubung singkat di grid

2.8.3 Impedansi Transformator

Impedansi urutan positif, reaktansi urutan positif, dan resistansi urutan positif transformator dirumuskan sebagai berikut (IEC 60909, *Calculation of Short Circuit Current in Three Phase System*):

$$Z_{IT} = R_{IT} + jX_{IT} \quad (2.13)$$



$$Z_{IT} = \frac{u_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (2.14)$$

$$R_{IT} = \frac{u_{Rr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (2.15)$$

$$\text{atau } R_{IT} = \frac{P_{krT}}{3 \times I_{rT}^2} \quad (2.16)$$

$$X_{IT} = \sqrt{Z_{IT}^2 - R_{IT}^2} \quad (2.17)$$

Dengan:

Z_{IT} : impedansi urutan positif transformator

R_{IT} : resistansi urutan positif transformator

X_{IT} : reaktansi urutan positif transformator

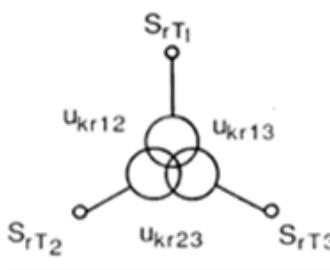
U_{rT} : rating tegangan transformator

u_{kr} : drop tegangan impedansi (dalam %) atau sering disebut sebagai impedansi hubung singkat (dalam %)

U_{Rr} : drop tegangan resistansi (dalam %) atau sering disebut sebagai resistansi hubung singkat (dalam %)

P_{krT} : daya yang disipasikan dalam belitan transformator pada rating arus

Untuk transformator yang memiliki tiga belitan seperti gambar 2.14 berikut ini.

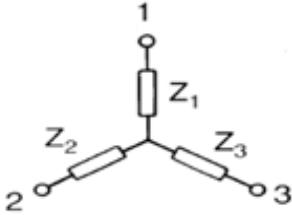


Gambar 2.14. Diagram Ekuivalen Transformator Tiga Belitan
Sumber: EIC 60909, *Calculation of Short Circuit Currents in Three Phase Systems*

Gambar 2.14 merupakan diagram ekuivalen transformator tiga belitan, S_{rT1} adalah rating daya belitan pertama, S_{rT2} adalah rating daya belitan ke dua, S_{rT3} adalah rating daya belitan ke tiga, U_{kr12} adalah drop tegangan impedansi pada belitan 1 dan 2, U_{kr13} adalah drop tegangan impedansi pada belitan 1 dan 3, U_{kr23} adalah drop tegangan impedansi pada belitan 2 dan 3.

Gambar 2.14 jika digambar dalam diagram impedansi belitan transformator tiga fasa menjadi gambar 2.15 berikut ini.





Gambar 2.15. Diagram Ekuivalen Impedansi Belitan Transformator Tiga Fasa

Sumber: EIC 60909, *Calculation of Short Circuit Currents in Three Phase Systems*

Pada gambar 2.15 Z_1 adalah impedansi belitan pertama, Z_2 adalah impedansi belitan kedua, Z_3 adalah impedansi belitan ke 3.

Impedansi belitan 1 dan 2, impedansi belitan 1 dan 3, impedansi belitan 2 dan 3 berturut-turut dinyatakan oleh persamaan berikut (IEC 60909, *Calculation of Short Circuit Current in Three Phase System*):

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 = u_{kr12} \frac{u_{rT}^2}{S_{rT12}} \quad (2.18)$$

$$Z_{13} = Z_1 + Z_3 = u_{kr13} \frac{u_{rT}^2}{S_{rT13}} \quad (2.19)$$

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3 = u_{kr23} \frac{u_{rT}^2}{S_{rT23}} \quad (2.20)$$

Dengan:

Z_{12} : impedansi pada belitan 1 dan 2

Z_{13} : impedansi pada belitan 1 dan 3

Z_{23} : impedansi pada belitan 2 dan 3

U_{kr12} : drop tegangan impedansi pada belitan 1 dan 2 dalam %

U_{kr13} : drop tegangan impedansi pada belitan 1 dan 3 dalam %

U_{kr23} : drop tegangan impedansi pada belitan 2 dan 3 dalam %

U_{rT} : rating tegangan transformator

S_{rT12} : rating daya bersama belitan 1 dan 2

S_{rT13} : rating daya bersama belitan 1 dan 3

S_{rT23} : rating daya bersama belitan 2 dan 3

Z_1 : impedansi belitan 1

Z_2 : impedansi belitan 2

Z_3 : impedansi belitan 3



Impedansi belitan 1, belitan 2, belitan 3 berturut-turut dinyatakan oleh persamaan berikut (IEC 60909, *Calculation of Short Circuit Current in Three Phase System*):

$$Z_1 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}) \quad (2.21)$$

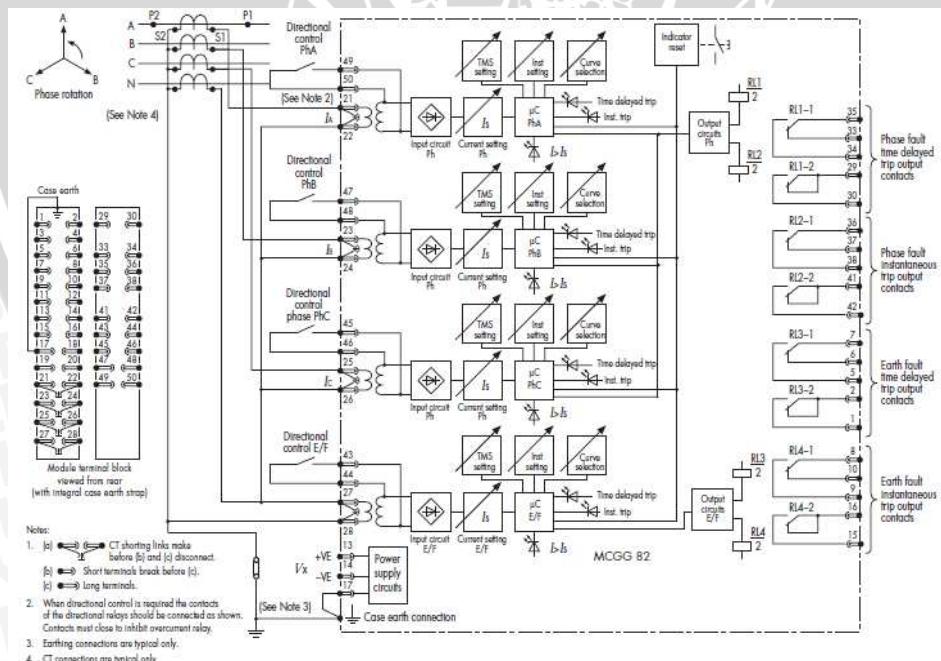
$$Z_2 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{23} - Z_{13}) \quad (2.22)$$

$$Z_3 = \frac{1}{2}(Z_{13} + Z_{23} - Z_{12}) \quad (2.23)$$

Impedansi belitan 1 (Z_1), impedansi belitan 2 (Z_2), dan impedansi belitan 3 (Z_3) merupakan impedansi urutan positif. Impedansi urutan positif dan impedansi urutan negatif transformator memiliki nilai yang sama.

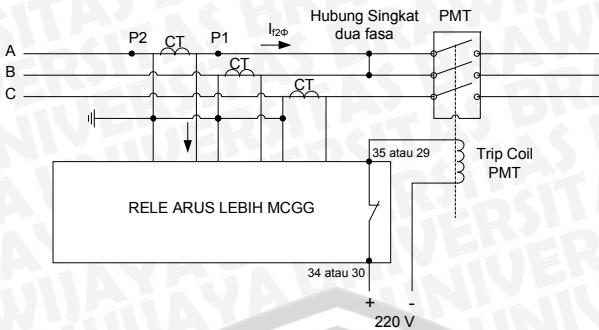
2.9. Prinsip Kerja Rele Arus Lebih

Rele arus lebih adalah peralatan listrik yang dirancang untuk membuat pemutus daya (*circuit breaker*) beroperasi (*open*) ketika ada gangguan hubung singkat dua fasa atau hubung singkat tiga fasa . Prinsip kerja rele proteksi arus lebih dapat diperlihatkan pada gambar 2.16 dan gambar 2.17 berikut.



Gambar 2.16. Rangkaian Internal Rele Arus Lebih Tipe MCGG

Sumber: *Overcurrent Relay for Phase and Earth Faults Type MCGG, Manual Book*



Gambar 2.17. Prinsip Kerja Arus Lebih

Pada gambar 2.16 menjelaskan jika terjadi gangguan misalnya gangguan hubung singkat dua fasa di depan titik P1 maka arus dari P2 ke P1 menjadi lebih besar dari arus seting rele. Akibatnya arus di sekunder CT (transformator arus) atau dari titik S1 ke S2 menjadi lebih besar dari arus seting rele. Arus ini masuk ke transformator IA lalu diproses di *input scircuit Ph*, karena melebihi arus seting lalu diproses di μ C PhA ($I > Is$) kemudian disesuaikan dengan seting arus-waktu dan kurva yang dipilih apakah SI (*Standard Inverse*), VI (*Very Inverse*), EI (*Extremely Inverse*), DT (*Definite Time*), sehingga mengoperasikan *output circuit Ph* (sirkuit keluaran Ph) dan mengenerjais kumparan trip rele RL1/2 dan kumparan trip rele RL2/2, dengan demikian saklar RL1-1 dan RL1-2 serta RL2-1 dan RL2-2 menjadi “ON”(terminal 34 dan 35 terhubung juga terminal 29 dan 30 terhubung), terhubungnya terminal-terminal ini akan menyediakan jalan untuk mengalirnya arus pada trip coil PMT sehingga menyebabkan PMT terbuka seperti diperlihatkan pada gambar 2.17. Saklar RL1-1 dan RL1-2 adalah saklar untuk gangguan dua fasa (fasa ke fasa) atau gangguan tiga fasa dengan waktu tunda yaitu untuk kurva SI, VI, dan EI serta DT sedangkan saklar RL2-1 dan RL2-2 untuk kurva *inst* gangguan dua fasa atau gangguan tiga fasa. Di dalam proses kerja rele ini tidak ada bagian yang bergerak secara mekanis.

2.10. Spesifikasi Teknis Rele Arus Lebih Statis Tipe MCGG

Rele proteksi arus lebih tipe MCGG memiliki 4 (empat) jenis hubungsn arus-waktu karakteristik *inverse time* yaitu: *standard inverse* (SI), *very inverse* (VI), *extremely inverse* (EI), serta *long time earth fault*. Untuk *long time earth fault* biasanya digunakan untuk proteksi terhadap gangguan hubung singkat ke tanah.

Hubungan arus-waktu untuk karakteristik *standard inverse*, *very inverse*, *extremely inverse* yang dipakai oleh rele memakai standard IEC (*International*



*Electrotechnical Commission) yang dirumuskan berturut-turut sebagai berikut (*Overcurrent Relay for Phase and Earth Faults Type MCGG, Manual Book*):*

$$t = t_p \left(\frac{0,14}{I^{0,02} - 1} \right) \quad (2.24)$$

Dengan:

t : waktu trip (*tripping time*) rele untuk karakteristik *standar inverse*, s

t_p : pengali waktu (*time multiplier setting*)

I : kelipatan arus seting (*multiple of setting*), A

$$t = t_p \left(\frac{13,5}{I - 1} \right) \quad (2.25)$$

Dengan:

t : waktu trip (*tripping time*) rele untuk karakteristik *very inverse*, s

t_p : pengali waktu (*time multiplier setting*)

I : kelipatan arus seting (*multiple of setting*), A

$$t = t_p \left(\frac{80}{I^2 - 1} \right) \quad (2.26)$$

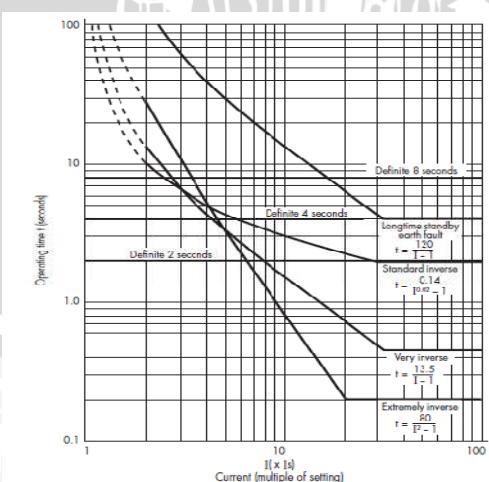
Dengan:

t : waktu trip (*tripping time*) rele untuk karakteristik *extremely inverse*, s

t_p : pengali waktu (*time multiplier setting*)

I : kelipatan arus seting (*multiple of setting*), A

Gambar 2.18 berikut merupakan kurva karakteristik hubungan arus-waktu rele arus lebih tipe MCGG.



Gambar 2.18. Hubungan Arus-Waktu dengan Tunda Waktu Untuk Rele Arus Lebih Tipe MCGG

Sumber: *Overcurrent Relay for Phase and Earth Faults Type Type MCGG, Manual Book*



Pada gambar 2.18 kurva hubungan arus-waktu karakteristik *standard inverse* lebih curam daripada kurva hubungan arus-waktu karakteristik *long time earth fault*, oleh karena itu kurva hubungan arus-waktu karakteristik *standard inverse* memberikan waktu trip rele lebih cepat daripada waktu trip dengan karakteristik *long time earth fault* ketika ada gangguan hubung singkat, begitu juga dengan kurva hubungan arus-waktu karakteristik *very inverse* memberikan waktu trip rele lebih cepat dari pada kurva hubungan arus-waktu *standard inverse*, dan hubungan arus-waktu karakteristik *extremely inverse* memberikan waktu trip rele lebih cepat daripada kurva hubungan arus-waktu karakteristik *very inverse*. Sedangkan untuk kurva hubungan arus-waktu karakteristik *definite*, waktu trip rele tidak dipengaruhi besarnya arus, rele akan trip dengan tunda waktu sesuai waktunya yang dipilih ketika ada gangguan hubung singkat.

Rele arus lebih tipe MCGG memiliki *range* arus setting (I_s) dari $0,05 I_n$ sampai $2,4 I_n$ dalam langkah (*step*) $0,05 I_n$. I_n merupakan arus nominal rele arus lebih tersebut (1A atau 5A), pemilihan tergantung dari arus nominal sisi sekunder CT (*Current Transformer*). *Range* untuk pengali waktu (*time multiplier setting*) yaitu 0,05 hingga 1 dalam langkah (*step*) 0,025. Semakin kecil pengali waktu yang dipilih maka waktu trip semakin cepat.

2.11. Penyetelan Rele Arus Lebih

Rele arus lebih adalah komponen proteksi yang digunakan untuk proteksi terhadap gangguan hubung singkat dua fasa atau tiga fasa. Arus yang mengalir pada rele adalah hasil bagi arus aktual (arus sebenarnya) dengan rasio CT (*current transformer*). Pemilihan *tap* (ketukan) arus pada rele dinyatakan oleh perbandingan arus setting dengan arus nominal rele. Maka setting arus aktual adalah hasil kali *tap* (ketukan) dengan arus nominal rele dan rasio CT. Jika dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut (Harsya Ramadhan dalam jurnal skripsinya):

$$I_s = \text{tap} \times I_n \quad (2.27)$$

$$I_{\text{set}} = I_s \times \text{ratio CT} = \text{tap} \times I_n \times \text{ratio CT} \quad (2.28)$$

Dengan:

I_s : arus setting rele

I_{set} : arus setting aktual (sebenarnya)

I_n : arus nominal rele (1 atau 5 A)



Pada sub bab 2.10 sebelumnya disebutkan bahwa arus seting untuk rele tipe MCGG berkisar dari $0,05 I_n$ sampai $2,4 I_n$, hal tersebut menyatakan bahwa tap (ketukan) rele tersebut berkisar dari 0,05 hingga 2,4.

Dalam kasus koordinasi rele arus lebih, rele arus lebih yang berada di *upstream* (pengaman cadangan) diberi waktu tunda sebesar 0,35 sekon untuk mengizinkan rele yang berada di *downstream* (pengaman utama) trip lebih dahulu.

2.11.1 Batas Minimum Penyetelan

Penyetelan rele arus lebih mempunyai batasan besarnya arus. Pada dasarnya batas penyetelan rele arus lebih adalah rele tidak boleh bekerja pada beban maksimum atau rating arus sistem (I_{rated}). Selain itu penyetelan rele harus memperhatikan kesalahan *pick up* karena rele memiliki histerisis dalam arus yang dinyatakan oleh rasio *drop off/pick up*. *Drop off* adalah arus maksimum yang menyebabkan rele tidak bekerja, sedangkan *pick up* adalah arus minimum yang menyebabkan rele bekerja. Rasio tersebut besarnya 0,95 untuk rele MCGG. Jadi arus seting minimum rele tidak kurang dari 1,05 kali arus beban maksimum (rating arus sistem). Jika ditulis secara matematis batas minimum penyetelan sebagai berikut:

$$I_{set} = 1,05 \times I_{rated} \quad (2.29)$$

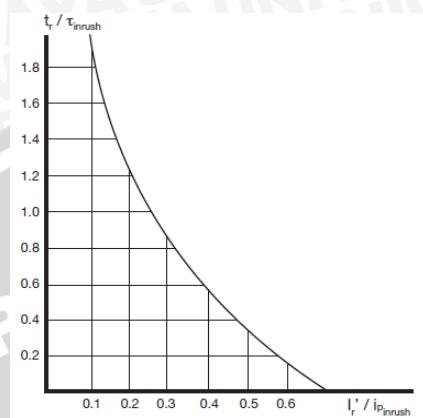
2.11.2 Batas Maksimum Penyetelan

Batas maksimum penyetelan rele arus lebih adalah rele harus bekerja bila ada gangguan hubung singkat pada zona proteksi rele seksi berikutnya dengan tunda waktu lebih besar dari rele seksi berikutnya.

2.11.3 Data Tambahan Untuk Penyetelan Rele Arus Lebih

Pada hilir (*downstream*) rele arus lebih yang diteliti pada laporan ini terdapat transformator, maka kedua hal berikut diperhatikan demi keamanan: rele tidak boleh bekerja ketika ada arus *inrush* (*energize* transformator). Ketika terjadi hubung singkat, rele tersebut harus bekerja dengan cepat agar panas yang ditimbulkan karena arus hubung singkat berada di bawah batas termal transformator yang bersangkutan supaya isolasinya tetap aman. Batas termal transformator dinyatakan oleh kurva hubungan arus-waktu yang disebut *damage curve*.

Perkiraan nilai arus *inrush* transformator untuk berbagai variasi daya dan waktu tunda minimum (*minimum delay time*) yang diperbolehkan bagi alat proteksi yang berada di sebelah hulu transformator untuk menghindari trip yang tidak diinginkan dinyatakan oleh gambar 2.14 dan tabel 2.2 (ABB, *MV/LV Transformer Substations: Theory and Example of Short Circuit Current, Technical Application Paper*, 2005: 30):



Gambar 2.19. Hubungan Perbandingan antara Waktu Tunda minimum dan Konstanta Waktu *Inrush* dengan Perbandingan antara *Setting Threshold* dan Arus *Inrush*

Sumber: ABB, *MV/LV Transformer Substations: Theory and Example of Short Circuit Current, Technical Application Paper*, 2005.

Pada gambar 2.19, bagian vertikal menyatakan perbandingan antara waktu tunda minimum rele arus lebih yang diizinkan dan konstanta waktu *inrush*, dan bagian horizontal menyatakan perbandingan antara setting threshold (seting arus rele) dan arus puncak *inrush* maksimum yang diperkirakan terjadi.

Tabel 2.2. Nilai Arus Puncak *Inrush* Maksimum untuk Berbagai Variasi Daya dan Konstanta Waktu *Inrush*

S_{nTR} [kVA]	$k_i = \frac{I_p_{inrush}}{I_{nTR}}$	τ_{inrush} [s]
200	10.5	0.15
250	10.5	0.18
315	10	0.2
400-500	10	0.25
630	10	0.26
800-1000	10	0.3
1250	10	0.35
1600	10	0.4
2000	9.5	0.4

Sumber: ABB, *MV/LV Transformer Substations: Theory and Example of Short Circuit Current, Technical Application Paper*, 2005.

Pada tabel 2.2 jika rating daya transformator 2000 kVA atau 2 MVA maka konstanta waktu *inrush* adalah 0,4, dan seterusnya.

Berdasarkan gambar 2.19 dan tabel 2.2, untuk transformator 2 MVA maka k_i bernilai 9,5. Jika tegangan sisi primer transformator 10 kV maka arus nominal

transformator adalah 115,5 A sehingga arus *inrush* yang paling besar nilainya 1097,25 A. Jika *Setting Threshold* (arus seting) alat proteksi dipilih sebesar 121,275 A maka $\frac{I_r'}{I_p \text{ inrush}} = 0,110$, dari grafik diperoleh $\frac{t_r}{\tau_{\text{inrush}}} = 1,8$ sehingga perkiraan tunda waktu minimum (t_r) yang diperbolehkan bagi alat proteksi yang berada di sebelah hulu transformator adalah $1,8 \times 0,4 = 0,72$ sekon supaya alat proteksi tidak trip.

Damage curve adalah kurva hubungan arus-waktu yang menunjukkan batas ketahanan termal transformator dari arus hubung singkat. Jika *damage curve* terlampaui maka isolasi belitan transformator akan mengalami penuaan atau bahkan akan mengalami kerusakan. *Damage Curve* tergantung jenis transformator, tipe kering (*dry type transformer*) atau tipe basah (*oil immersed transformer*). Pada laporan ini, transformator yang berada di sebelah hilir rele arus lebih tipe MCGG merupakan transformator tipe kering (*dry type transformer*). *Damage curve* untuk transformator tipe kering (*dry type transformer*) yang dinyatakan oleh standar ANSI C57.12.59 seperti pada tabel 2.3 berikut:

Tabel 2.3 *Damage Curve* untuk *Dry Type Transformer* Kategori 2 (Dua)

<i>Dry Type Transformers</i>		
501-1667 kVA 1 fasa		
501-5000 kVA 3 fasa		
<i>Inrequent fault (thermal damage)</i>		
x Rated Current (A p.u.)	Time (sec.)	I^2t (A p.u.-sec.)
3,5	100	1250
11,2	10	1250
25	2	1250

Sumber: SKM Systems Analysis Inc., *Equipment Damage Curves Transformers*, didownload dari www.skm.com/applicationguides7.html

Tabel 2.3 menyatakan jika arus yang mengalir pada belitan sebesar 3,5 kali rating arus transformator maka batas waktu agar isolasinya tidak mengalami penuaan adalah 100 sekon, Jika pada belitan transformator mengalir arus sebesar 11,2 kali rating arus transformator maka batas waktu yang diperbolehkan 10 sekon, jika arus yang mengalir pada belitan 25 kali rating arus transformator maka batas waktu yang diperbolehkan adalah 2 sekon.

2.12. Pengaruh Arus Harmonisa Terhadap Kinerja Rele Arus Lebih

Arus yang terdistorsi memiliki komponen arus harmonisa dalam arus tersebut. Adanya arus-arus harmonisa pada gelombang arus menyebabkan nilai rms (*root mean square*) arus naik. Nilai rms (*root mean square*) arus setelah adanya arus harmonisa dinyatakan oleh persamaan (2.1) atau (2.3). Arus terdistorsi inilah yang dibaca oleh rele arus lebih sehingga menyebabkan rele arus lebih beroperasi lebih cepat yaitu waktu trip (*tripping time*) rele lebih cepat jika dibandingkan dengan waktu trip tanpa melibatkan adanya arus-arus harmonisa dengan nilai arus fundamental yang sama. Arus-arus harmonisa bisa menyebabkan nilai arus terdistorsi melebihi arus setting rele, jika hal demikian terjadi maka rele arus lebih akan trip walaupun tidak terjadi gangguan hubung singkat yang menandakan terjadi kesalahan dalam setting (penyetelan) rele arus lebih karena rele arus lebih hanya boleh trip jika terjadi gangguan hubung singkat dua fasa atau hubung singkat tiga fasa.

Untuk menganalisis pengaruh arus harmonisa terhadap kinerja rele arus lebih dalam memenuhi stelan karakteristik hubungan arus-waktu *inverse time* yang berupa *standar inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse* maka dibuat dua perbandingan yaitu perhitungan waktu trip rele arus lebih tanpa menyertakan arus-arus harmonisa dan perhitungan waktu trip rele arus lebih dengan menyertakan arus-arus harmonisa menggunakan persamaan (2.24), (2.25), dan (2.26).

Persamaan waktu trip rele arus lebih pada persamaan (2.24), (2.25), dan (2.26) berturut-turut untuk kasus arus yang tidak terdistorsi (hanya ada arus fundamental saja) maka persamaannya ditulis ulang menjadi persamaan (2.30), (2.31), (2.32) berikut ini:

$$t = t_p \left(\frac{0,14}{\left(\frac{(1,05 \times I_{1,rms})^{0,02}}{I_{set}} - 1 \right)} \right) \quad (2.30)$$

Dengan:

t : waktu trip (*tripping time*) rele arus lebih untuk karakteristik *standard inverse*, s

$I_{1,rms}$: arus fundamental yang mengalir pada saluran

1,05 : kesalahan *pick up* (arus yang dibaca oleh rele sebesar 1,05 kali arus sebenarnya)

I_{set} : setting arus aktual



$$t = t_p \left(\frac{13,5}{\left(\frac{1,05 \times I_{1,\text{rms}}}{I_{\text{set}}} \right)^2 - 1} \right) \quad (2.31)$$

Dengan:

t : waktu trip (*tripping time*) rele untuk karakteristik *very inverse*, s

$$t = t_p \left(\frac{80}{\left(\frac{1,05 \times I_{1,\text{rms}}}{I_{\text{set}}} \right)^2 - 1} \right) \quad (2.32)$$

Dengan:

t : waktu trip (*tripping time*) rele untuk karakteristik *extremely inverse*, s

Pada dasarnya pabrik mendisain rele arus lebih untuk beroperasi dalam bentuk gelombang arus sinusoidal fundamental, maka kurva hubungan arus-waktu yang diperoleh dari persamaan (2.30), (2.31), dan (2.32) merupakan kurva hubungan arus fundamental-waktu trip untuk stelan yang diharapkan.

Jika arus pada saluran terdapat komponen arus harmonika maka berdasarkan persamaan (2.3) dan persamaan (2.24), (2.25), (2.26), hubungan arus-waktu karakteristik *standard inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse* berturut-turut menjadi persamaan berikut:

$$t = t_p \times \frac{0,14}{\left(\frac{1,05 \times I_{1,\text{rms}} \sqrt{\text{THD}_i^2 + 1}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1} \quad (2.33)$$

$$t = t_p \times \frac{13,5}{\left(\frac{1,05 \times I_{1,\text{rms}} \sqrt{\text{THD}_i^2 + 1}}{I_{\text{set}}} \right)^2 - 1} \quad (2.34)$$

$$t = t_p \times \frac{80}{\left(\frac{1,05 \times I_{1,\text{rms}} \sqrt{\text{THD}_i^2 + 1}}{I_{\text{set}}} \right)^2 - 1} \quad (2.35)$$

Dengan:



$$I_{l,rms} \sqrt{THD_i^2 + 1} : \text{merupakan nilai rms arus terdistorsi, A}$$

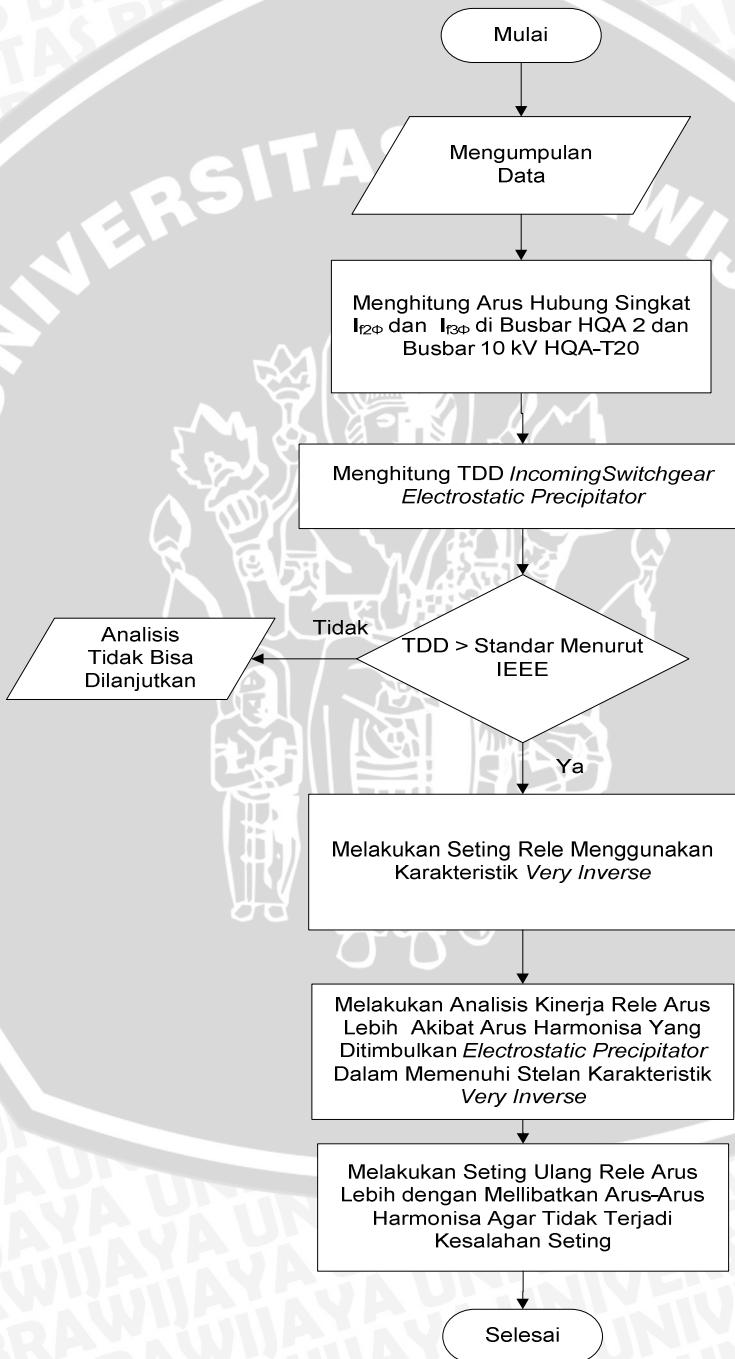
Kurva hubungan arus-waktu yang diperoleh dari persamaan (2.33), (2.34), dan (2.35) merupakan kurva hubungan arus fundamental-waktu trip yang diharapkan telah mengalami pergeseran, menandakan operasi rele dipengaruhi oleh keberadaan arus harmonisa.



BAB III

METODE PENELITIAN

Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan dari penelitian ini maka diperlukan suatu metode. Metode untuk menyelesaikan permasalahan dan mewujudkan tujuan dari penelitian ini dijelasakan oleh diagram alir pada gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian

3.1. Pengambilan Data

Data-data yang dikumpulkan merupakan data-data dari perusahaan PLTU Paiton Unit 6. Data-data yang dikumpulkan dibedakan menjadi data sekunder dan data primer.

1. Data Sekunder

- a. *Single Line* Lintasan yang diteliti
- b. Data-data Komponen Tenaga Listrik (Generator, Transformator, Kabel) yang ada dalam *single line* yang diteliti

2. Data Primer

- a. Spesifikasi Rele Arus Lebih yang diteliti yaitu Rele Arus Lebih Statis Tipe MCGG
- b. Data Arus Harmonisa

Semua panel beban yang terhubung dengan busbar *electrostatic precipitator* (busbar HQA 2) diukur arus harmonisanya menggunakan *Power Quality Analyzer* (PQA) tiga fasa masing-masing 10 menit, tiap satu menit data disimpan. Data yang memiliki kandungan arus harmonisa yang paling besar pada masing-masing panel beban yang terhubung dengan busbar HQA2 dipilih kemudian dianalisis.

Power Quality Analyzer adalah alat ukur yang mampu menguraikan gelombang-gelombang yang memiliki frekuensi yang berbeda yang menyusun suatu gelombang beserta nilai rmsnya. Melalui alat ukur *Power Quality Analyzer* bisa dilihat frekuensi-frekuensi yang menyusun suatu gelombang dan besarnya nilai rms gelombang tiap frekuensi penyusunnya.

3.2 Prosedur Perhitungan dan Analisis

Langkah-langkah perhitungan dan analisis untuk memperoleh hasil akhir dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung arus gangguan hubung singkat fasa ke fasa ($I_{f2\Phi}$) dan arus gangguan hubung singkat tiga fasa ($I_{f3\Phi}$) di busbar *electrostatic precipitator* (busbar 400 V HQA 2). Perhitungan arus hubung singkat fasa ke fasa ($I_{f2\Phi}$) dan arus hubung singkat tiga fasa ($I_{f3\Phi}$) di busbar HQA 2 ini digunakan untuk mengetahui besarnya TDD *Incoming busbar* HQA 2 sedangkan arus hubung singkat $I_{f2\Phi}$ dan $I_{f3\Phi}$ di busbar 10 kV HQA-T20 digunakan untuk perhitungan koordinasi rele arus lebih. Adapun langkah-langkah perhitungan ini sebagai berikut:

- a. Menghitung nilai impedansi komponen-komponen tenaga listrik yang berada dalam lintasan hubung singkat, seperti menghitung impedansi generator



menggunakan persamaan (2.10), menghitung impedansi transformator menggunakan persamaan (2.13) untuk transformator dua belitan, untuk transformator tiga belitan menggunakan persamaan (2.21), (2.22), (2.23), impedansi grid dihitung menggunakan persamaan (2.12), sementara impedansi kabel diketahui langsung dari data pabrikan.

- b. Menggambar rangkaian urutan positif dan negatif jaringan.
 - c. Menghitung impedansi *thevenin* antara titik gangguan (*busbar* 400 V HQA 2) dan *node* referensi dari jaringan urutan positif ($Z_{kk}^{(1)}$) dan jaringan urutan negatif ($Z_{kk}^{(2)}$)
 - d. Menghitung arus hubung singkat fasa ke fasa ($I_{f2\Phi}$) menggunakan persamaan (2.6). Menghitung arus hubung singkat tiga fasa ($I_{f3\Phi}$) menggunakan persamaan (2.5).
2. Menghitung TDD (*Total Demand Distortion*) *Incoming Switchgear Electrostatic Precipitator*.

Untuk menghitung TDD menggunakan persamaan (2.4). TDD (*Total Demand Distortion*) adalah suatu ukuran yang menyatakan distorsi atau tidaknya suatu arus yang mengalir ke beban. Perhitungan TDD *incoming switchgear electrostatic precipitator* ini digunakan untuk mengetahui apakah arus pada *incoming switchgear electrostatic precipitator* mengalami distorsi atau tidak. Untuk mengetahui distorsi atau tidaknya arus pada *incoming switchgear electrostatic precipitator* maka TDD pada *incoming switchgear electrostatic precipitator* akan dibandingkan dengan TDD menurut standar IEEE seperti dalam tabel 2.1. Jika TDD melebihi standar dalam tabel 2.1 maka gelombang arus mengalami distorsi karena arus harmonisa, jika kurang atau sama dengan TDD menurut tabel 2.1 maka gelombang arus tidak mengalami distorsi dan tidak bisa dilakukan analisis karena pengaruh arus harmonisa.

3. Melakukan setting rele arus lebih menggunakan *very inverse* dengan memperhatikan batas termal belitan transformator HQA-T20 (*damage curve*) pada tabel 2.3 serta memperhatikan perkiraan besarnya arus *inrush* transformator HQA T-20 dan tunda waktu minimum rele arus lebih untuk arus *inrush* tersebut yang diizinkan agar ketika terjadi arus *inrush* rele arus lebih tidak trip. Dalam penentuan arus setting rele dipilih arus minimum penyetelan yaitu arus minimum yang dianjurkan sesuai persamaan (2.29). Nilai arus setting minimum ini dipilih untuk mengetahui apakah

rele arus lebih aman terhadap arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* jika diseting dengan nilai arus sesuai persamaan (2.29).

4. Melakukan analisis mengenai kinerja rele arus lebih akibat arus harmonisa dalam memenuhi stelan karakteristik *very inverse* yang sudah di setting menurut langkah 3. Untuk melakukan analisis kinerja rele arus lebih digunakan persamaan waktu trip rele arus lebih. Rele arus lebih yang telah diseting dihitung waktu tripnya untuk dua kasus yaitu melibatkan arus-arus harmonisa dan tanpa melibatkan arus-arus harmonisa untuk berbagai arus fundamental menggunakan persamaan (2.30), (2.31), (2.32), (2.33),(2.34), dan (2.35). Setelah itu hasilnya diplot dalam bentuk kurva. Kurva hubungan arus fundamental-waktu trip rele, yang dihasilkan oleh perhitungan tanpa melibatkan arus-arus harmonisa merupakan kurva hubungan arus fundamental-waktu trip rele untuk stelan karakteristik yang diharapkan sedangkan kurva hubungan arus fundamental- waktu trip rele yang dihasilkan oleh perhitungan dengan melibatkan arus-arus harmonisa merupakan kurva stelan yang diharapkan telah mengalami pergeseran. Dari kedua kurva yang dihasilkan untuk masing-masing karakteristik hubungan arus-waktu, menandakan arus harmonisa mempengaruhi kinerja operasi rele arus lebih dalam memenuhi stelan karakteristik *very inverse*.
5. Melakukan setting ulang rele arus lebih yang terdapat pada penyulang *electrostatic precipitator* yang telah diseting sebelumnya pada langkah 3 dengan memperhatikan arus-arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator*, agar rele arus lebih tidak trip akibat arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator*.

3.3 Penutup

Pada bagian ini akan dilakukan pengambilan kesimpulan dan saran. Kesimpulan diperoleh berdasarkan analisis dan perhitungan. Kesimpulan berdasarkan permasalahan yang diutarakan dalam pendahuluan.



BAB IV

STUDI PENGARUH ARUS HARMONISA TERHADAP KINERJA RELE ARUS LEBIH

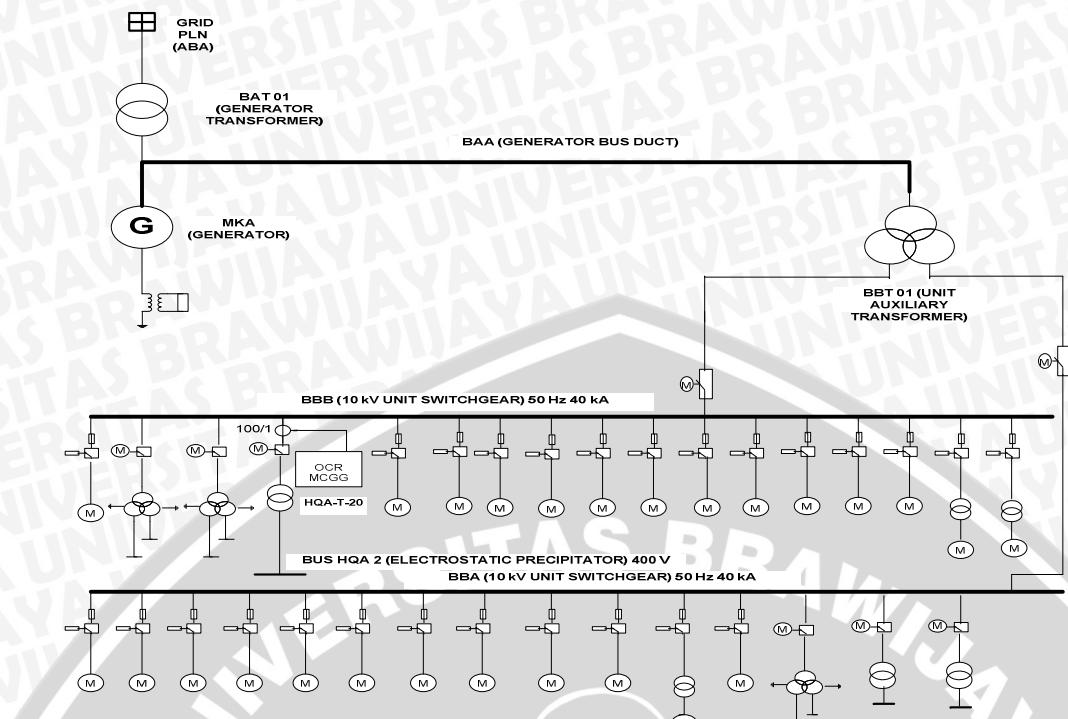
4.1. *Electrostatic Precipitator (ESP)*

Electrostatic precipitator atau lebih diakrab dengan pengumpul debu merupakan salah satu komponen vital PLTU Unit 6 paiton yang berfungsi mereduksi debu hasil pembakaran batu bara di *boiler* (bejana tertutup yang mampu mengubah air menjadi uap dengan bantuan panas) sampai pada batas kekeruhan tertentu sehingga emisi debu tidak mencemari lingkungan dengan memanfaatkan prinsip medan elektrostatis.

Komponen penting penyusun *electrostatic precipitator* yaitu *transformer rectifier set (T/R set)*, *discharge electrode* (elektroda berbentuk pegas), *collecting electrode* (elektroda berbentuk plat), dan *rapping motor*. *Transformer rectifier set (T/R set)* merupakan *step up transformer* (transformator penaik tegangan) yang terintegrasi menjadi satu dengan jembatan penyearah (*bridge rectifier*). Mula-mula tegangan 400 V diperoleh dari *busbar HQA 2* kemudian dinaikkan oleh *step up transformer* setelah itu dijadikan tegangan searah (*dc voltage*) oleh *bridge rectifier* menjadi tegangan 65 kV dc. Bagian positif dari tegangan dc yang dihasilkan dihubungkan dengan *collecting electrode* dan ditanahkan, sedangkan bagian negatif dari tegangan dc dihubungkan dengan *discharge electrode* sehingga tercipta medan magnet searah antara *discharge electrode* dan *collecting electrode*. Debu hasil pembakaran batu bara di *boiler* didorong menuju *electrostatic precipitator* oleh *ID Fan*. *Discharge electrode* memberikan muatan negatif kepada debu sehingga debu lebih bermuatan negatif dari pada *collecting electrode*, debu yang telah terionisasi ini bergerak menuju *collecting electrode*, selanjutnya debu yang menempel pada *collecting electrode* di jatuhkan oleh *rapping motor*. Debu yang telah terjatuh kemudian ditransfer menuju tempat pembuangan debu.

4.2. *Suplai Daya Electrostatic Precipitator (ESP)*

Suplai daya untuk *electrostatic precipitator* dijelaskan oleh gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Single Line PLTU Unit 6 Paiton

Sumber: PLTU Unit 6 Paiton

Dari gambar 4.1, suplai daya untuk *electrostatic precipitator* diperoleh dari *busbar* BBB yaitu *unit switch gear* yang memiliki tegangan 10 kV. Dari *busbar* BBB ditarik kabel sebagai penyulang *electrostatic precipitator* dan ditempatkan rele proteksi arus lebih statis tipe MCGG 82 di pangkal penyulang, kemudian tegangan 10 kV diturunkan menjadi tegangan 400 V oleh transformator HQA-T20. Tegangan 400 V dihubungkan dengan *busbar* HQA 2 yaitu *busbar electrostatic precipitator*, dari *busbar* HQA 2, tegangan 400 V didistribusikan pada beban-beban dalam *electrostatic precipitator* seperti pada gambar dalam lampiran II.

4.3. Arus Harmonisa yang Ditimbulkan oleh *Electrostatic Precipitator*

Switchgear electrostatic precipitator memiliki tegangan 400 V terdiri dari 11 panel (10 T/R Control Panel dan 1 Panel MCC) seperti pada lampiran II. Tegangan 400 V ac dinaikkan oleh *step up transformer* kemudian disearahkan menjadi tegangan 65 kV dc oleh *bridge rectifier*. Bagian positif dari tegangan dc yang dihasilkan dihubungkan dengan *collecting electrode* (elektroda berbentuk plat) dan ditanahkan, sedangkan bagian negatif dari tegangan dc yang dihasilkan dihubungkan dengan *discharge electrode* (elektroda berbentuk pegas) sehingga tercipta medan magnet searah

antara *discharge electrode* dan *collecting electrode*. *Discharge electrode* mengionisasi debu sehingga debu tertarik dan menempel pada *collecting electrode*.

Pengontrolan arus yang mengalir pada T/R set (*step up transformer* yang terintegrasi menjadi satu dengan *bridge rectifier*) dilakukan oleh *T/R Control Panel*. Untuk mengatur besar kecilnya arus, *T/R Control Panel* menggunakan SCR (*Silicone Controlled Rectifier*). Dalam proses kerja SCR, SCR akan on tergantung sudut penyalaannya sehingga terjadi aksi *switching*. Adanya aksi *switching* ini menyebabkan timbulnya arus harmonisa. Pada *switchgear electrostatic precipitator* terdapat 10 *T/R Control Panel* yang memiliki konfigurasi yang sama.

Arus harmonisa dan arus fundamental pada tiap-tiap *T/R Control Panel* pada penelitian ini diperoleh dengan melakukan pengukuran secara langsung di lapangan menggunakan alat *Three Phase Power Quality Analyzer*. Hasil pengukuran diperlihatkan pada lampiran III. Arus harmonisa dan arus fundamental pada panel MCC (*Motor Control Center*) juga diperoleh melalui pengukuran dengan alat *Three Phase Power Quality Analyzer*. Beban pada panel MCC merupakan motor dan *heater* sehingga arus harmonisa pada panel MCC ini sangat kecil nilainya. Hasil pengukurannya juga diperlihatkan pada lampiran III.

Dari data pengukuran arus harmonisa dan arus fundamental yang diperoleh dari masing-masing panel pada *switchgear electrostatic precipitator* diperoleh arus harmonisa dan arus fundamental pada fasa A, fasa B, fasa C *incoming switchgear electrostatic precipitator* atau *incoming busbar HQA 2* seperti tabel 4.1, 4.2, dan 4.3 berikut.

Tabel 4.1 Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Fasa A *Incoming Busbar Switchgear Electrostatic Precipitator*

Orde (k)	Arus RMS (A)	Orde (k)	Arus RMS (A)	Orde (k)	Arus RMS (A)
1	2731,44	13	8,68	25	2,91
3	927,47	15	8,91	27	1,74
5	91,15	17	4,67	29	1,74
7	38,19	19	2,56	31	1,88
9	18,38	21	2,16	33	1,69
11	10,17	23	3,83	35	0,69

Tabel 4.2 Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Fasa B *Incoming Busbar Switchgear Electrostatic Precipitator*

Orde (k)	Arus RMS (A)	Orde (k)	Arus RMS (A)	Orde (k)	Arus RMS (A)
1	2745,45	13	9,06	25	3,15
3	954,92	15	9,43	27	1,81
5	98,2	17	5,07	29	1,83
7	41,5	19	2,71	31	2,05
9	19,56	21	2,5	33	1,76
11	11,47	23	4,03	35	0,78

Tabel 4.3 Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Fasa B *Incoming Busbar Switchgear Electrostatic Precipitator*

Orde (k)	RMS Arus (A)	Orde (k)	RMS Arus (A)	Orde (k)	RMS Arus (A)
1	2471,96	13	7,64	25	2,63
3	812,35	15	7,8	27	1,52
5	79,31	17	4,28	29	1,58
7	33,54	19	2,36	31	1,66
9	16,22	21	2,19	33	1,47
11	8,93	23	3,46	35	0,68

Arus harmonisa pada tabel di atas akan mengalir menuju pangkal penyulang *electrostatic precipitator* sehingga terbaca oleh rele arus lebih.

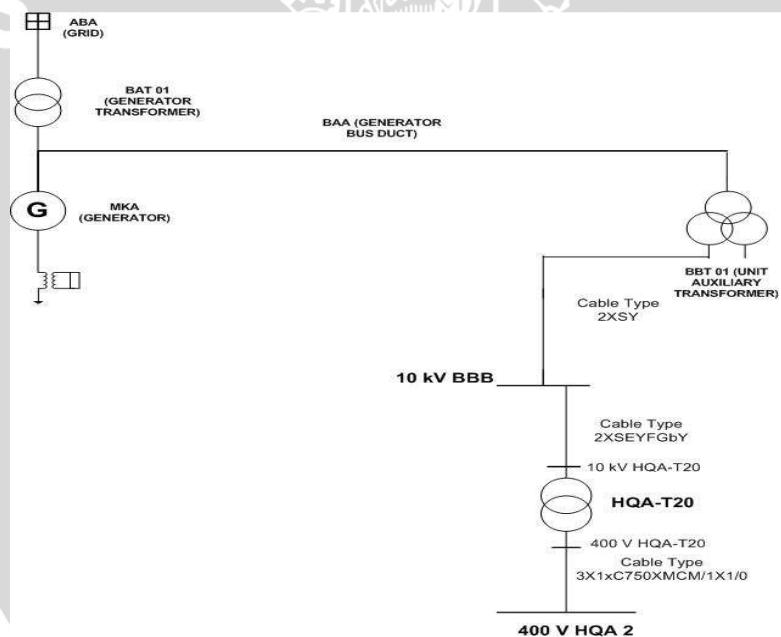
4.4. Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat Fasa ke Fasa ($I_{f2\Phi}$) dan Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ($I_{f3\Phi}$) pada *Busbar HQA 2* dan *Busbar 10 kV HQA-T20*

Perhitungan arus hubung singkat fasa ke fasa dan arus hubung singkat tiga fasa pada *busbar HQA 2* digunakan untuk mengetahui besarnya arus hubung singkat fasa ke fasa dan arus hubung singkat tiga fasa yang akan diproteksi oleh rele arus lebih tipe MCGG 82 dan untuk menentukan nilai TDD *incoming busbar HQA 2*. Perhitungan arus hubung singkat fasa ke fasa (dua fasa), dan arus hubung singkat tiga fasa pada *busbar 10 kV HQA-T20* digunakan untuk melakukan koordinasi antara rele 1 (*overcurrent*

relay pada penyulang *electrostatic precipitator* yaitu tipe MCGG 82) dan rele 2 (*overcurrent relay* pada *incoming busbar* BBB yaitu tipe 7SJ551).

4.4.1. Menghitung Impedansi Komponen Sistem Daya yang Berada dalam Lintasan Arus Hubung Singkat

Impedansi komponen sistem daya yang berada dalam lintasan arus hubung singkat digunakan untuk mengetahui impedansi *thevenin* dari rangkaian jaringan urutan positif ($Z_{kk}^{(1)}$) dan negatif ($Z_{kk}^{(2)}$) yang selanjutnya digunakan untuk menghitung arus gangguan hubung singkat dua fasa ($I_{f2\Phi}$) dan arus gangguan hubung singkat tiga fasa ($I_{f3\Phi}$). Komponen sistem daya pada gambar 4.1 yang berada dalam lintasan hubung singkat ketika hubung singkat terjadi pada *busbar* HQA 2 adalah Grid PLN (ABA), Transformator (BAT 01), Generator (MKA), Transformator (BBT 01), transformator (HQA-T20), serta kabel saluran yang menghubungkan komponen-komponen tersebut sampai pada *busbar* HQA 2 seperti pada gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Komponen Sisten Daya yang Berada dalam Lintasan Arus Hubung Singkat
Sumber: Hasil Analisis

Pada gambar 4.2, ketika terjadi hubung singkat pada *busbar* HQA 2 maka komponen sistem daya seperti generator (MKA), grid PLN (ABA), transformator (BAT 01), transformator (BBT 01), kabel Tipe 2XSY, kabel tipe 2XSEYFGBY, transformator (HQA-T20), dan kabel tipe 3X1XC750MCM/1X1/0 harus diketahui nilai masing-masing impedansinya untuk menentukan besarnya arus hubung singkat pada *busbar* HQA 2. Nilai impedansi masing-masing komponen tersebut sebagai berikut:



a. Generator (MKA)

Data-data yang diperlukan untuk mengetahui nilai impedansi generator mengacu pada lampiran I:

$$U_{rG} = 21 \text{ kV}$$

$$x_d'' = 19 \%$$

$$S_{rG} = 789 \text{ MVA}$$

$$R/X = 0,05$$

$$X_2 = 18 \%$$

$$X_2/R_2 = 9$$

Sesuai persamaan (2.11):

$$X_{1G} = x_d \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{19}{100} \times \frac{21000^2}{789000000} = 0,1062\Omega$$

$$R_{1G} = 0,05 \times 0,1062 = 0,0053\Omega$$

$$X_{2G} = x_d \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{18}{100} \times \frac{21000^2}{789000000} = 0,1006\Omega$$

$$R_{2G} = 0,11 \times 0,1006 = 0,0111\Omega$$

Sesuai persamaan (2.10) maka impedansi urutan positif generator Z_{1G} adalah:

$$Z_{1G} = R_{1G} + jX_{1G} = 0,0053 + j0,1062\Omega$$

Impedansi urutan negatif generator Z_{2G} adalah :

$$Z_{2G} = R_{2G} + jX_{2G} = 0,0111 + j0,1006\Omega$$

Karena arus hubung singkat yang ingin dihitung di busbar HQA 2 yang memiliki tegangan 400 V maka semua impedansi harus dikonversi ke tegangan 400 V.

$$Z_{1G} = \left(\frac{400}{21000}\right)^2 \times 0,0053 + j0,1062\Omega = 0,0000019 + j0,000039\Omega$$

$$Z_{2G} = \left(\frac{400}{21000}\right)^2 \times 0,0111 + j0,1006\Omega = 0,000004 + j0,0000365\Omega$$

b. Transformator (BBT 01)

Mengacu pada lampiran I:

$$u_{kr12} = 10 \% \quad S_{rT12} = 40 \text{ MVA} \quad P_{krT12} = 0,1 \text{ MW}$$

$$u_{kr13} = 10 \% \quad S_{rT13} = 40 \text{ MVA} \quad P_{krT13} = 0,1 \text{ MW}$$

$$u_{kr23} = 20 \% \quad S_{rT23} = 40 \text{ MVA} \quad P_{krT23} = 0,2 \text{ MW}$$

$$U_{rT} = 21 \text{ kV}$$



Nilai mutlak impedansi belitan 1 dan 2, belitan 1 dan 3, serta belitan 2 dan 3 berturut-turut dinyatakan oleh persamaan (2.18), (2.19),(2.20) maka diperoleh:

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 = u_{kr12} \frac{u_{rT}^2}{S_{rT12}} = \frac{10}{100} \times \frac{21000^2}{40000000} = 1,1025\Omega$$

$$Z_{13} = Z_1 + Z_3 = u_{kr13} \frac{u_{rT}^2}{S_{rT13}} = \frac{10}{100} \times \frac{21000^2}{40000000} = 1,1025\Omega$$

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3 = u_{kr23} \frac{u_{rT}^2}{S_{rT23}} = \frac{20}{100} \times \frac{21000^2}{40000000} = 2,205\Omega$$

Untuk mencari nilai resistansi dan reaktansi berturut-turut menggunakan persamaan (2.16) dan (2.17) sehingga diperoleh:

$$R_{12} = \frac{P_{krT12}}{3 \times I_{rT}^2} = \frac{100000}{3 \times \left(\frac{40000000}{\sqrt{3} \times 21000} \right)^2} = 0,0276\Omega$$

$$R_{13} = \frac{P_{krT13}}{3 \times I_{rT}^2} = \frac{100000}{3 \times \left(\frac{40000000}{\sqrt{3} \times 21000} \right)^2} = 0,0276\Omega$$

$$R_{23} = \frac{P_{krT23}}{3 \times I_{rT}^2} = \frac{200000}{3 \times \left(\frac{40000000}{\sqrt{3} \times 21000} \right)^2} = 0,0552\Omega$$

$$X_{12} = \sqrt{1,1025^2 - 0,0276^2} = 1,1022\Omega$$

$$X_{13} = \sqrt{1,1025^2 - 0,0276^2} = 1,1022\Omega$$

$$X_{23} = \sqrt{2,205^2 - 0,0552^2} = 2,2044\Omega$$

Dari nilai resistansi dan reaktansi diatas, maka nilai impedansi belitan 1 dan 2, belitan 1 dan 3, belitan 2 dan 3 berturut-turut adalah:

$$Z_{12} = 0,0276 + j1,1022\Omega$$

$$Z_{13} = 0,0276 + j1,1022\Omega$$

$$Z_{23} = 0,0552 + j2,2044\Omega$$

Untuk mencari impedansi pada belitan 1 (Z_1), impedansi pada belitan 2 (Z_2), dan impedansi pada belitan 3 (Z_3) berturut-turut menggunakan persamaan (2.21), (2.22), (2.23) menghasilkan:

$$Z_1 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}) = \frac{1}{2}(0,0276 + j1,1022 + 0,0276 + j1,1022 - 0,0552 - j2,2044) = 0$$

$$Z_2 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{23} - Z_{13}) = \frac{1}{2}(0,0276 + j1,1022 + 0,0552 + j2,2044 - 0,0276 - j1,1022) \\ = 0,0276 + j1,1022 \Omega$$

$$Z_3 = \frac{1}{2}(Z_{13} + Z_{23} - Z_{12}) = \frac{1}{2}(0,0276 + j1,1022 + 0,0552 + j2,2044 - 0,0276 - j1,1022) \\ = 0,0276 + j1,1022 \Omega$$

Nilai impedansi dikonversikan ke tegangan 400 V:

$$Z_1 = \left(\frac{400}{21000}\right)^2 \times 0\Omega = 0\Omega$$

$$Z_2 = \left(\frac{400}{21000}\right)^2 \times (0,0276 + j1,1022)\Omega = 0,000010 + j0,000400\Omega$$

$$Z_3 = \left(\frac{400}{21000}\right)^2 \times (0,0276 + j1,1022)\Omega = 0,000010 + j0,000400\Omega$$

c. Kabel tipe 2XSY 3X1X500 (tegangan 10 kV)

Mengacu pada lampiran 2.2:

$$R = 0,0366 \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,0902 \Omega/\text{km}$$

$$L = 35 \text{ meter}$$

$$n = 5$$

n : banyaknya kabel yang terpasang secara paralel (*number of parallel installed cable*)

Nilai resistansi dan reaktansi per kabel dengan panjang 35 meter adalah:

$$R = \frac{0,0366 \times 0,035}{5} = 0,000256\Omega$$

$$X = \frac{0,0902 \times 0,035}{5} = 0,000631\Omega$$

Maka impedansi urutan positif kabel adalah

$$Z_{1K} = 0,000256 + j0,000631\Omega$$

Impedansi tersebut dikonversi ke tegangan 400 V menjadi:

$$Z_{1K} = \left(\frac{400}{10000}\right)^2 \times (0,000256 + j0,000631)\Omega = 4,1 \times 10^{-7} + j10,1 \times 10^{-7} \Omega$$



d. Kabel tipe 2XSEYFGbY 3X185 (tegangan 10 kV)

Mengacu pada lampiran I:

$$R = 0,0991 \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,0914 \Omega/\text{km}$$

$$l = 0,205 \text{ km}$$

$$n = 1$$

Nilai resistansi dan reaktansi kabel dengan panjang 205 meter adalah:

$$R = 0,0991 \times 0,205 = 0,0203155 \Omega$$

$$X = 0,0914 \times 0,205 = 0,018737 \Omega$$

Maka impedansi urutan positif kabel adalah

$$Z_{IK} = 0,0203155 + j0,018737 \Omega$$

Impedansi tersebut dikonversi ke sistem tegangan 400 V menjadi:

$$Z_{IK} = \left(\frac{400}{10000} \right)^2 \times (0,0203155 + j0,018737) = 3,250 \times 10^{-5} + j2,998 \times 10^{-5} \Omega$$

e. Transformator HQA-T20

Mengacu pada lampiran I:

$$u_{kr} = 5,75 \%$$

$$S_{rT} = 2 \text{ MVA}$$

$$U_{rT} = 400 \text{ V}$$

$$P_{krT} = 15 \text{ kW}$$

Nilai mutlak impedansi urutan positif dinyatakan oleh persamaan (2.14) yaitu:

$$Z_{IT} = \frac{u_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{5,75}{100} \times \frac{400^2}{2000000} = 0,004608 \Omega$$

Nilai resistansi urutan positif dinyatakan oleh persamaan (2.16).

$$R_{IT} = \frac{P_{krT}}{3 \times I_{rT}^2} = \frac{15000}{3 \times 2165^2} = 0,001067 \Omega$$

Sesuai persamaan (2.17), reaktansi urutan positif bernilai:

$$X_{IT} = \sqrt{Z_{IT}^2 - R_{IT}^2} = \sqrt{0,004608^2 - 0,001067^2} = 0,004483 \Omega$$

maka nilai impedansi urutan positif transformator (HQA-T20) adalah:

$$Z_{IT} = 0,001067 + j0,004483 \Omega$$



f. Kabel tipe 3X1XC750MCM/1X1/0 (tegangan 400 V)

Mengacu pada lampiran I:

$$R = 0,05 \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,08 \Omega/\text{km}$$

$$l = 0,015 \text{ km}$$

$$n = 4$$

Nilai resistansi dan reaktansi per kabel dengan panjang 15 meter adalah:

$$R = \frac{0,05 \times 0,015}{4} = 0,0001875 \Omega$$

$$X = \frac{0,08 \times 0,015}{4} = 0,0003 \Omega$$

Maka impedansi urutan positif kabel adalah:

$$Z_{IK} = 0,0001875 + j0,0003 \Omega$$

g. Grid (ABA)

Mengacu pada lampiran I:

$$U_{nQ} = 500 \text{ kV}$$

$$I_{kQ} = 50 \text{ kA}$$

$$R/X = 0,1$$

Sesuai persamaan (2.12), maka nilai mutlak impedansi urutan positif grid adalah:

$$Z_Q = \frac{U_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 50} = 5,7735 \Omega$$

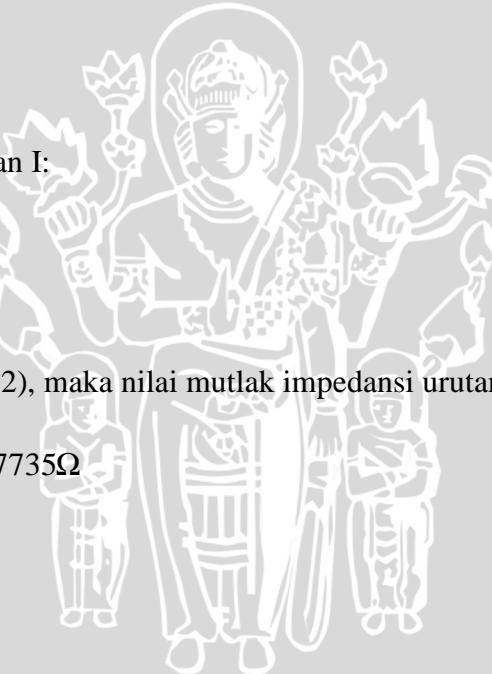
$$R_Q = 0,57448 \Omega$$

$$X_Q = 5,7448 \Omega$$

$$Z_Q = 0,57448 + j5,7448 \Omega$$

Nilai impedansi dikonversi ke tegangan 400 V:

$$Z_Q = \left(\frac{400}{500000} \right)^2 \times (0,57448 + j5,7448) = 3,677 \times 10^{-7} + j3,677 \times 10^{-6} \Omega$$



h. Transformator (BAT 01)

Mengacu pada lampiran I:

$$u_{kr} = 10 \%$$

$$S_{rT} = 765 \text{ MVA}$$

$$U_{rT} = 500 \text{ kV}$$



$$P_{krT} = 1,44 \text{ MW}$$

Nilai mutlak impedansi urutan positif dinyatakan oleh persamaan (2.14) yaitu:

$$Z_{IT} = \frac{U_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{10}{100} \times \frac{500 \text{ kV}^2}{765 \text{ MVA}} = 32,6797 \Omega$$

Nilai resistansi urutan positif dinyatakan oleh persamaan (2.16).

$$R_{IT} = \frac{P_{krT}}{3 \times I_{rT}^2} = \frac{1440000}{3 \times 883,3459^2} = 0,6151 \Omega$$

Sesuai persamaan (2.17), reaktansi urutan positif bernilai:

$$X_{IT} = \sqrt{Z_{IT}^2 - R_{IT}^2} = \sqrt{32,6797^2 - 0,6151^2} = 32,6739 \Omega$$

maka nilai impedansi urutan positif transformator BAT01 adalah:

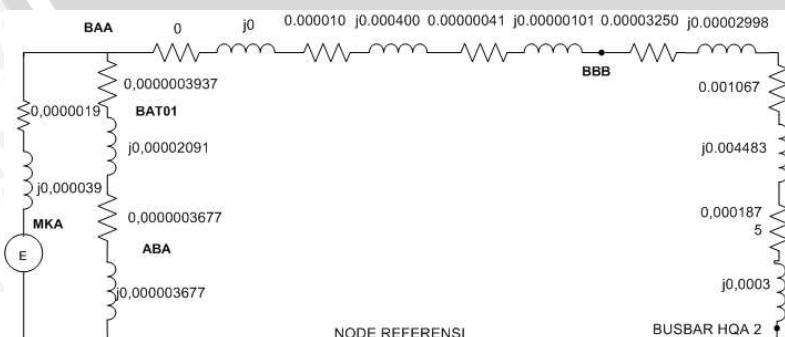
$$Z_{IT} = 0,6151 + j32,6739 \Omega$$

Nilai impedansi dikonversi ke tegangan 400 V:

$$Z_{IT} = \left(\frac{400}{500000} \right)^2 \times (0,6151 + j32,6739) = 3,937 \times 10^{-7} + j2,09110^{-5} \Omega$$

4.4.2. Menghitung Impedansi *Thevenin* dari Jaringan Urutan Positif ($Z_{kk}^{(1)}$) dan Urutan Negatif ($Z_{kk}^{(2)}$)

Menghitung impedansi *thevenin* dari jaringan urutan positif ($Z_{kk}^{(1)}$) dan urutan negatif ($Z_{kk}^{(2)}$) digunakan untuk mengetahui impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif jaringan yang dilihat dari *busbar* HQA 2 ketika terjadi gangguan di *busbar* HQA 2. Impedansi-impedansi ini digunakan untuk menghitung arus hubung singkat dua fasa ($I_{f2\Phi}$) dan arus hubung singkat tiga fasa ($I_{f3\Phi}$). Untuk mengetahui nilai impedansi ($Z_{kk}^{(1)}$) dan impedansi ($Z_{kk}^{(2)}$) perlu menggambar rangkaian urutan positif dan urutan negatif. Berdasarkan gambar 4.2 dan nilai impedansi tiap komponen daya listrik, rangkaian jaringan urutan positif seperti pada gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Rangkaian Jaringan Urutan Positif

Sumber: Hasil Analisis



Dari gambar rangkaian 4.3.

ABA seri dengan BAT 01:

$$Z_s = (0,0000003677 + j0,000003677 + 0,0000003937 + j0,00002091)$$

$$Z_s = 0,0000007614 + j0,00002459 = 0,000024601 \angle 88,22^\circ$$

Z_s paralel dengan MKA

$$Z_p = \frac{(0,000024601 \angle 88,22^\circ)(0,00003905 \angle 87,21^\circ)}{(0,0000007614 + j0,00002459 + 0,0000019 + j0,000039)}$$

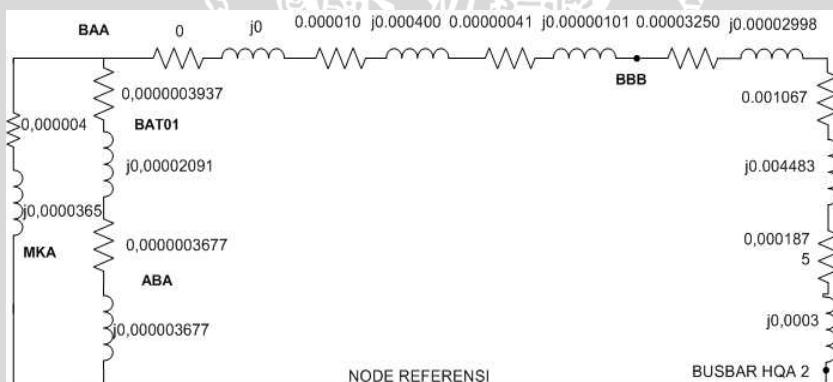
$$Z_p = \frac{(9,61 \times 10^{-10} \angle 175,43^\circ)}{(6,36 \times 10^{-5} \angle 87,60^\circ)} = 0,0000151 \angle 87,83^\circ = 5,72 \times 10^{-7} + j1,5 \times 10^{-5} \Omega$$

$$\begin{aligned} Z_{kk}^{(1)} &= (0,000000572 + j0,000015) + (0,000010 + j0,000400) \\ &+ (0,00000041 + j0,00000101) + (0,00003250 + j0,00002998) + (0,001067 + j0,004483) \\ &+ (0,0001875 + j0,0003) = 0,0012980 + j0,005230 \Omega = 0,00539 \angle 76,06^\circ \Omega \end{aligned}$$

Jadi impedansi ekuivalen jaringan urutan positif yang dilihat dari busbar HQA 2

$$Z_{kk}^{(1)} = 0,00539 \angle 76,06^\circ$$

Rangkaian jaringan urutan negatif seperti pada gambar 4.4 berikut



Gambar 4.4 Rangkaian Jaringan Urutan Negatif
Sumber: Hasil Analisis

$$Z_p = \frac{(0,000024601 \angle 88,22^\circ)(0,0000367 \angle 83,75^\circ)}{(0,0000007614 + j0,00002459 + 0,000004 + j0,0000365)}$$

$$Z_p = \frac{(9,03 \times 10^{-10} \angle 171,97^\circ)}{(6,13 \times 10^{-5} \angle 85,54^\circ)} = 0,0000147 \angle 86,43^\circ = 9,15 \times 10^{-7} + j1,47 \times 10^{-5} \Omega$$

$$Z_{kk}^{(2)} = (0,000000915 + j0,0000147) + (0,000010 + j0,000400)$$

$$+ (0,00000041 + j0,00000101) + (0,00003250 + j0,00002998) + (0,001067 + j0,004483)$$



$$+(0,0001875 + j0,0003) = 0,0012983 + j0,005229\Omega = 0,00539 \angle 76,06^\circ \Omega$$

Impedansi ekuivalen urutan positif jaringan sama dengan impedansi ekuivalen urutan negatif jaringan:

$$Z_{kk}^{(2)} = 0,00539 \angle 76,06^\circ$$

4.4.3. Menghitung Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ($I_{f3\Phi}$) di Busbar HQA 2

Arus hubung singkat tiga fasa dinyatakan oleh persamaan (2.5), sementara impedansi hubung singkat nilainya 0 maka:

$$I_{f3\Phi} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_f} = \frac{\frac{400 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}}}{0,00539 \angle 76,06^\circ} = 42846,03 A \angle -76,06^\circ$$

Jadi arus hubung singkat tiga fasa ketika terjadi gangguan hubung singkat di busbar HQA 2 adalah $I_{f3\Phi} = 42,84603$ kA

4.4.4. Menghitung Arus Hubung Singkat Fasa ke Fasa ($I_{f2\Phi}$) di Busbar HQA 2

Arus hubung singkat fasa ke fasa ($I_{f2\Phi}$) dinyatakan oleh persamaan (2.6), maka:

$$I_{f2\Phi} = \frac{\sqrt{3}V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f} = \frac{\sqrt{3} \times \frac{400 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}}}{2(0,00539 \angle 76,06^\circ)} = 37105,75 A \angle -76,06^\circ$$

Jadi arus hubung singkat dua fasa di busbar HQA 2 adalah $I_{f2\Phi} = 37,10575$ kA

4.4.5. Menghitung Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ($I_{f3\Phi}$) di Busbar 10 kV HQA-T20

$$I_{f3\Phi} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_f} = \frac{\frac{10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}}}{0,280005 \angle 84,43^\circ} = 20,61928 kA \angle -84,43^\circ$$

Jadi arus hubung singkat tiga fasa di busbar 10 kV HQA-T20 adalah $I_{f3\Phi} = 20,61928$ kA

4.4.6. Menghitung Arus Hubung Singkat Fasa ke Fasa ($I_{f2\Phi}$) di Busbar 10 kV HQA-T20

$$I_{f2\Phi} = \frac{\sqrt{3}V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f} = \frac{\sqrt{3} \times \frac{10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}}}{0,559851 \angle 84,40^\circ} = 17,86190 kA \angle -84,40^\circ$$

Jadi arus hubung singkat dua fasa di *busbar* 10 kV HQA-T20 adalah $I_{f2\Phi} = 17,86190$ kA

4.4.7. Perbandingan antara Arus Hubung Singkat Melalui Perhitungan dan Hasil Simulasi

Hasil simulasi arus hubung singkat dicantumkan dalam lampiran IV. Sesuai lampiran IV, perbandingan antara arus hubung singkat melalui perhitungan dan simulasi dinyatakan oleh tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.4 Perbandingan antara Arus Hubung Singkat Melalui Perhitungan dan Hasil Simulasi

Lokasi Gangguan	Melalui Perhitungan		Hasil Simulasi	
	$I_{f3\Phi}$	$I_{f2\Phi}$	$I_{f3\Phi}$	$I_{f2\Phi}$
HQA 2	42,84603 kA	37,10575 kA	42,186 kA	36,535 kA
10 kV HQA-T20	20,61928 kA	17,86190 kA	20,922 kA	18,124 kA

Berdasarkan tabel 4.4, berbandingan antara nilai arus hubung singkat melalui perhitungan dan hasil simulasi tidak terlalu jauh berbeda. Hal ini menandakan bahwa perhitungan yang dilakukan benar.

4.5. Menghitung TDD (*Total Demand Distortion*) *Incoming Switchgear Electrostatic Precipitator* dan Membandingkan dengan TDD Menurut Standar IEEE

TDD *incoming switchgear electrostatic precipitator* adalah suatu ukuran yang menyatakan distorsi atau tidaknya arus pada *incoming switchgear electrostatic precipitator* yang menjadi gambaran distorsi atau tidaknya arus pada penyulang *electrostatic precipitator* yang diketahui dengan membandingkan TDD yang diperoleh dari perhitungan dengan TDD menurut standar IEEE seperti pada tabel 2.1.

Arus harmonia pada *incoming switchgear electrostatic precipitator* dinyatakan oleh tabel 4.1, tabel 4.2, dan tabel 4.3.

Sesuai persamaan (2.4), tabel 4.1, tabel 4.2, dan tabel 4.3 maka TDD *incoming switchgear electrostatic precipitator* fasa A, fasa B, Fasa C berturut turut adalah:

a. Fasa A *Incoming Busbar HQA 2*

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{18} I_k^2}}{I_{1,\text{rated}}} \times 100\% = \frac{933,08}{\frac{2000000}{\sqrt{3} \times 400}} \times 100\% = 32,32\%$$

b. Fasa B *Incoming Busbar HQA 2*

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{18} I_k^2}}{I_{1,\text{rated}}} \times 100\% = \frac{961,25}{\frac{2000000}{\sqrt{3} \times 400}} \times 100\% = 33,29\%$$

c. Fasa C *Incoming Busbar HQA 2*

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{18} I_k^2}}{I_{1,\text{rated}}} \times 100\% = \frac{817,22}{\frac{2000000}{\sqrt{3} \times 400}} \times 100\% = 28,30\%$$

Arus hubung singkat maksimum (I_{sc}) di titik hubung bersama merupakan arus hubung singkat tiga fasa ($I_{f3\Phi}$) ketika terjadi gangguan hubung singkat di *busbar HQA 2* dan arus fundamental beban maksimum (I_L) merupakan rating arus sisi sekunder transformator HQA-T20, maka rasio antara I_{sc} dan I_L adalah:

$$\frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{42,84603\text{kA}}{2887\text{A}} = 14,84$$

Mengacu pada tabel 2.1, untuk $I_{sc}/I_L < 20$ maka batas maksimum TDD adalah 5 %, jadi arus *incoming switchgear electrostatic precipitator* baik fasa A, fasa B, fasa C mengalami distorsi yang dinyatakan oleh tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5 Perbandingan TDD *Incoming Switchgear Electrostatic Precipitator* dan TDD Menurut Standar IEEE

I_{sc}/I_L	TDD Penyulang <i>Electrostatic Precipitator</i>	Batas TDD Menurut Standar IEEE	
$14,84 < 20$	Fasa A = 32,32 %	5%	Melebihi Standar
	Fasa B = 33,29%	5%	Melebihi Standar
	Fasa C = 28,30 %	5%	Melebihi Standar



Dari tabel 4.5, maka arus *incoming switchgear electrostatic precipitator* baik fasa A, fasa B, dan fasa C mengalami distorsi bentuk gelombang.

4.6. Melakukan Seting Rele Arus Lebih Menggunakan Karakteristik *Very Inverse*

4.6.1. Rele Arus Lebih Pada Penyulang *Electrostatic Precipitator* (Rele 1)

Untuk melakukan studi kinerja rele arus lebih dalam memenuhi stelan karakteristik *very inverse* akibat arus harmonisa supaya tidak terjadi kesalahan seting rele arus lebih, maka rele arus lebih disetel menggunakan batas minimum penyetelan. Batas minimum penyetelan merupakan batas minimum arus seting untuk penyetelan rele arus lebih yang disarankan atau dianjurkan sesuai dengan rumus (2.29).

$$I_{\text{set}} = 1,05 \times I_{\text{rated}} = 1,05 \times \frac{2\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 10\text{kV}} = 1,05 \times 115,5 = 121,275\text{A}$$

I_{set} merupakan arus seting aktual yaitu nilai batas arus pada penyulang *electrostatic precipitator* yang diproteksi oleh rele 1. Oleh karena arus yang mengalir pada rele arus lebih merupakan arus sekunder CT (*Current Transformer*), maka I_{set} harus dibagi dengan rasio CT (*Current Transformer*) seperti pada persamaan (2.28). CT yang terpasang pada penyulang *electrostatic precipitator* memiliki rasio 100/1. Maka arus seting rele arus lebih adalah:

$$I_s = \frac{I_{\text{set}}}{100} = 1,21275\text{A}$$

Kurva hubungan arus-waktu untuk karakteristik *very inverse* seperti pada persamaan (2.25). Oleh karena sebelah hilir rele 1 terdapat transformator HQA-T20 yang termasuk dalam zona proteksi rele arus lebih tersebut maka kurva hubungan arus-waktu karakteristik *very inverse* yang dipilih harus berada dibawah kurva hubungan arus-waktu yang menyatakan batas termal belitan transformator HQA-T20 (*damage curve*) untuk menghindari pemanasan lebih jika terjadi arus gangguan hubung singkat. Batas termal transformator seperti dalam tabel 2.3. Hubungan arus-waktu yang menyatakan batas termal transformator dalam tabel 2.3 adalah:

$$3,5 \times I_{\text{rating arus transformator}} = 3,5 \times 115,5 = 404,25\text{ A dengan batas waktu } 100\text{ s}$$

$$11,2 \times I_{\text{rating arus transformator}} = 11,2 \times 115,5 = 1293,6\text{ A dengan batas waktu } 10\text{ s}$$

$$25 \times I_{\text{rating arus transformator}} = 25 \times 115,5 = 2887,5\text{ A dengan batas waktu } 2\text{ s}$$

Hubungan arus-waktu karakteristik *very inverse* juga harus memperhatikan arus *inrush* transformator HQA-T20 yaitu arus permulaan ketika transformator HQA-T20 dihubungkan dengan sumber karena arus seting yang dipilih merupakan batas minimum



penyetelan yang nilainya lebih kecil dari arus *inrush* transformator HQA-T20. Arus *inrush* maksimum transformator HQA-T20 dan tunda waktu minimum bagi alat proteksi yang diizinkan dengan seting arus aktual 121,275 A telah dijelaskan dalam sub bab 2.11.3 yaitu arus *inrush* maksimum transformator HQA-T20 dengan rating daya 2 MVA adalah 1097,25 A dengan tunda waktu minimum yang diizinkan untuk alat proteksi dengan seting arus 121,275 A adalah 0,72 s.

Waktu trip rele 1 selain tergantung pada besarnya arus yang dibaca rele 1 dan arus seting rele 1, juga bergantung kepada pemilihan seting pengali waktu (*time multiplier setting*) (t_p). Seting pengali waktu (t_p) yang terdapat pada spesifikasi rele 1 berkisar antara 0,05 hingga 1 dalam langkah 0,025. Mengacu pada persamaan (2.31), untuk kasus arus *inrush* transformator HQA T-20, t_p yang sesuai adalah

$$0,72 = t_p \times \frac{13,5}{\left(\frac{1,05 \times 1097,25}{121,275} \right) - 1}$$

$$t_p = 0,72 \times \frac{\left(\frac{1,05 \times 1097,25}{121,275} \right) - 1}{13,5} = 0,453$$

Agar arus *inrush* transformator HQA-T20 tidak menyebabkan rele arus lebih trip maka hubungan arus-waktu karakteristik *very inverse* harus berada di atas titik hubungan arus *inrush*-waktu tunda minimum alat proteksi. Maka t_p yang memenuhi syarat adalah 0,475 hingga 1. Dalam seting ini dipilih pengali waktu (t_p) = 1.

Pengali waktu (t_p) yang dipilih harus disesuaikan dengan kurva hubungan arus-waktu yang menyatakan batas termal transformator HQA T-20.

$$t = 1 \times \frac{13,5}{\left(\frac{1,05 \times 404,25}{121,275} \right) - 1} = 5,4 < 100s$$

$$t = 1 \times \frac{13,5}{\left(\frac{1,05 \times 1293,6}{121,275} \right) - 1} = 1,32 < 10s$$

$$t = 1 \times \frac{13,5}{\left(\frac{1,05 \times 2887,5}{121,275} \right) - 1} = 0,56 < 2s$$

Pemilihan $t_p = 1$ tidak akan menyebabkan transformator HQA-T20 mengalami *over heating* ketika ada arus gangguan hubung singkat.

Setting rele 1

Hubungan arus-waktu	: <i>Very Inverse</i>
Arus setting aktual (I_{set})	= 121,275 A
Pengali waktu (t_p)	= 1

4.6.2. Rele Arus Lebih Pada *Incoming* untuk *Busbar BBB* (Rele 2)

Model rele arus lebih pada *incoming busbar BBB* adalah 7SJ551 buatan siemens. Rele arus lebih ini sebagai *back up* untuk rele arus lebih pada penyulang *electrostatic precipitator* disamping sebagai rele utama untuk proteksi *busbar BBB*.

$$I_{set} = 1,05 \times I_{rated} = 1,05 \times \frac{40\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 10\text{kV}} = 2425\text{A}$$

Rasio *current transformer* (CT) untuk rele arus lebih *incoming busbar BBB* (rele 2) memiliki rasio 3000/1.

$$I_s = \frac{I_{set}}{3000} = 0,809\text{ A}$$

Rele arus lebih *incoming busbar BBB* (rele 2) dikoordinasikan dengan rele arus lebih penyulang *electrostatic precipitator* (rele 1) dengan tunda waktu 0,35 s. Ketika terjadi hubung singkat tiga fasa pada *busbar 10 kV HQA-T20* yaitu sebesar 20922 A. Arus hubung singkat tiga fasa ini besarnya $181,14 \times I_{set}$ rele 1. Berdasarkan gambar 2.18 maka rele 1 akan trip dalam waktu sekitar 0,5 s. Agar rele 2 memiliki tunda waktu sebesar $0,5\text{ s} + 0,35\text{ s} = 0,85\text{ s}$, maka t_p (pengali waktu) sebesar:

$$t_p = 0,85 \times \frac{\left(\frac{1,05 \times 20922}{2425} \right) - 1}{13,5} = 0,507$$

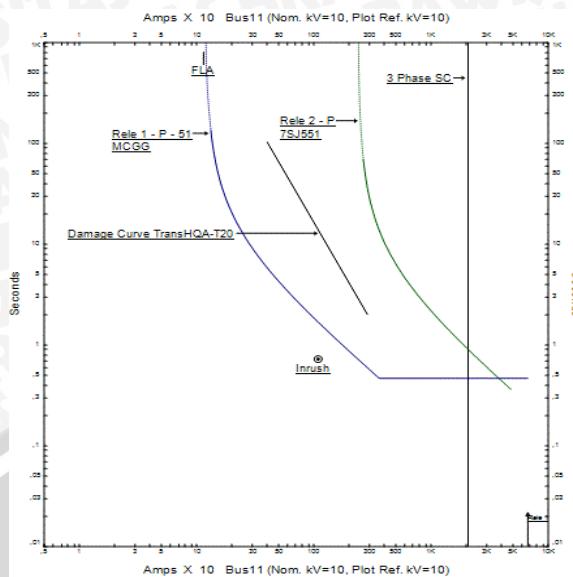
Setting rele 2

Hubungan arus-waktu	: <i>Very Inverse</i>
Arus setting aktual (I_{set})	= 2425 A
Pengali waktu (t_p)	= 0,507

4.6.3. Koordinasi Rele 1 dan Rele 2

Berdasarkan setting rele 1 dan rele 2 maka koordinasi rele 1 dan rele 2 diperlihatkan oleh gambar 4.5 berikut:

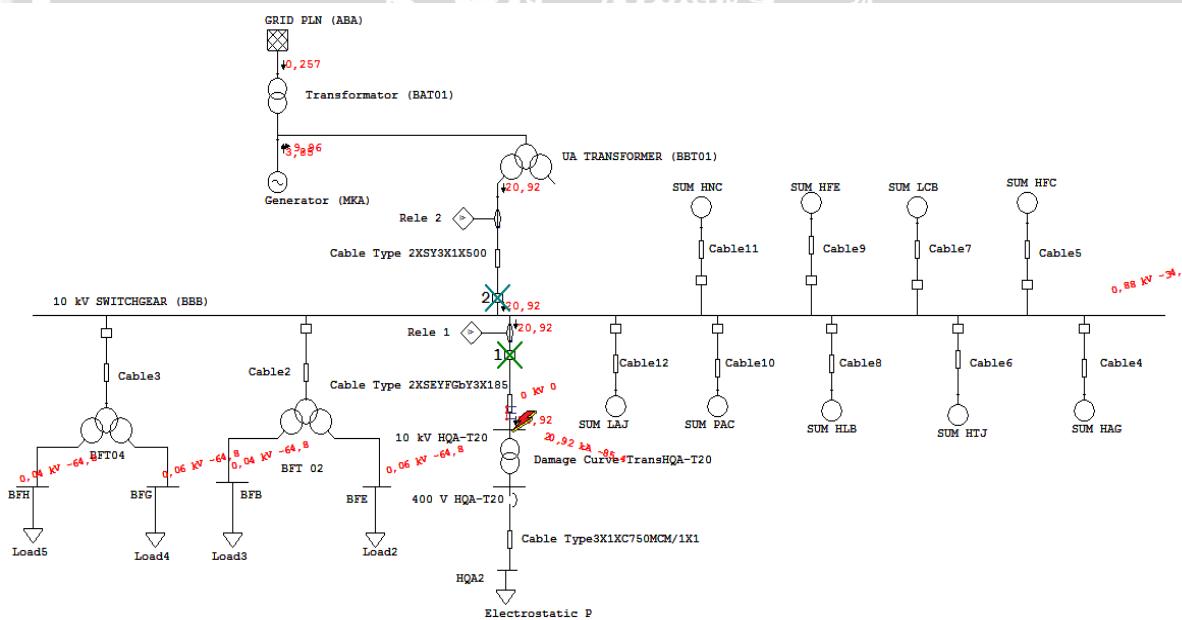




Gambar 4.5 Grafik Koordinasi Rele 1 dan Rele 2

Sumber: Hasil Simulasi

Berdasarkan gambar 4.5, ketika terjadi hubung singkat tiga fasa di *busbar* 10 kV HQA-T20 maka rele 1 akan trip lebih dahulu, rele 2 akan trip jika arus hubung singkat masih terjadi sampai tunda waktu untuk rele 2. Simulasi urutan rele trip ketika terjadi hubung singkat di *busbar* 10 kV HQA-T20 dinyatakan oleh gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 Urutan Rele Arus Lebih Trip Ketika Terjadi Hubung Singkat

Sumber: Hasil Simulasi

Berdasarkan gambar 4.6, rele 1 akan trip terlebih dahulu ketika terjadi gangguan hubung singkat sehingga menyebabkan CB penyulang *electrostatic precipitator* membuka (*open*) yang dinyatakan dengan nomor 1, setelah itu jika tunda waktu rele 2

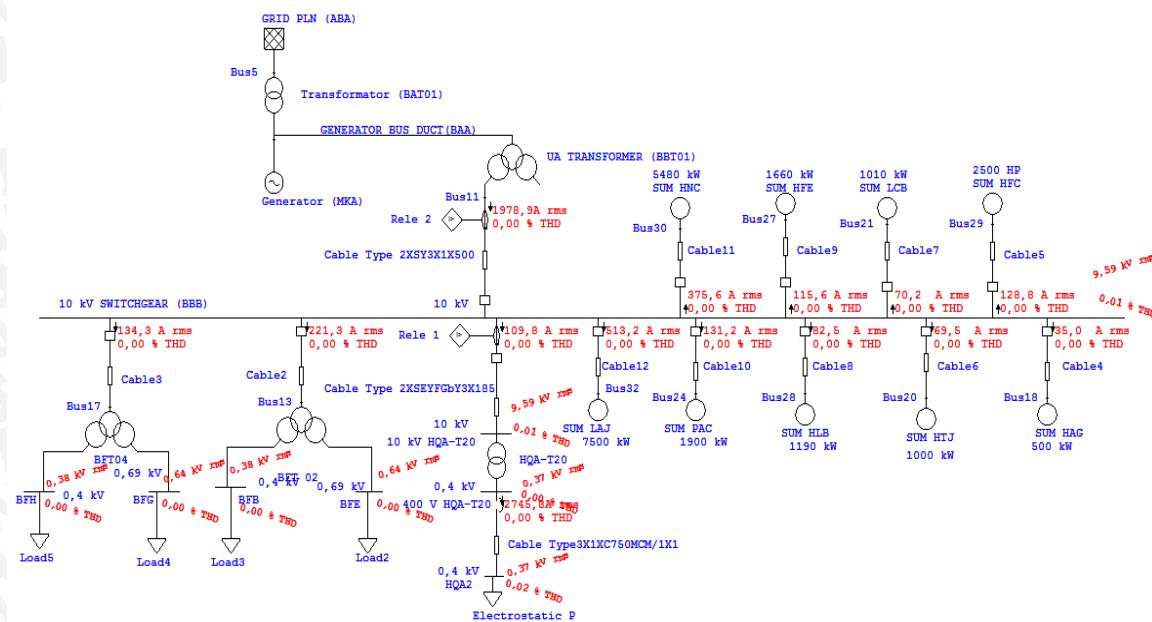
tercapai maka rele 2 akan trip sehingga menyebabkan CB *incoming* untuk *busbar* BBB membuka (*open*) yang dinyatakan dengan nomor 2. Berdasarkan gambar 4.5 dan gambar 4.6 maka penyetelan rele 1 dan rele 2 memberikan koordinasi yang baik.

4.7. Analisis Pengaruh Arus Harmonisa Terhadap Kinerja Rele Arus Lebih Dalam Memenuhi Stelan Karakteristik *Very Inverse*

Untuk mengetahui pengaruh arus harmonisa terhadap kinerja rele arus lebih perlu membandingkan dua hal yaitu bagaimana kinerja rele arus lebih pada arus fundamental saja (tidak ada kontribusi arus harmonisa) dan kinerja rele arus lebih pada arus fundamental ditambah arus harmonisa (ada kontribusi arus harmonisa). Data pengukuran arus fundamental dan arus harmonisa pada *incoming switchgear electrostatic precipitator* seperti pada tabel 4.1, 4.2, dan 4.3. Pada tabel 4.1, 4.2, dan 4.3 nilai arus fundamental dan arus harmonisa yang paling besar terdapat pada tabel 4.2 yaitu pada fasa B *incoming switchgear electrostatic precipitator* sehingga data arus fundamental dan arus harmonisa untuk analisis dipilih tabel 4.2. Oleh karena CT (*Current transformer*) sebagai input rele arus lebih (rele 1) berada pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* maka perlu diketahui kandungan arus fundamental dan arus harmonisa yang mengalir pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator*. Untuk mengetahui kandungan arus fundamental dan arus harmonisa yang mengalir pada pangkal *electrostatic precipitator* dilakukan dengan menggunakan simulasi. Mulanya menggambar *single line* unit 6 Paiton kemudian data arus fundamental dan arus harmonisa pada tabel 4.2 dimasukkan dalam *electrostatic precipitator* yang dilambangkan dengan beban statis pada simulasi setelah itu menjalankan simulasi *harmonic load flow*.

Hasil *harmonic load flow* ketika data arus harmonisa pada tabel 4.2 tidak dilibatkan seperti gambar 4.7 berikut.





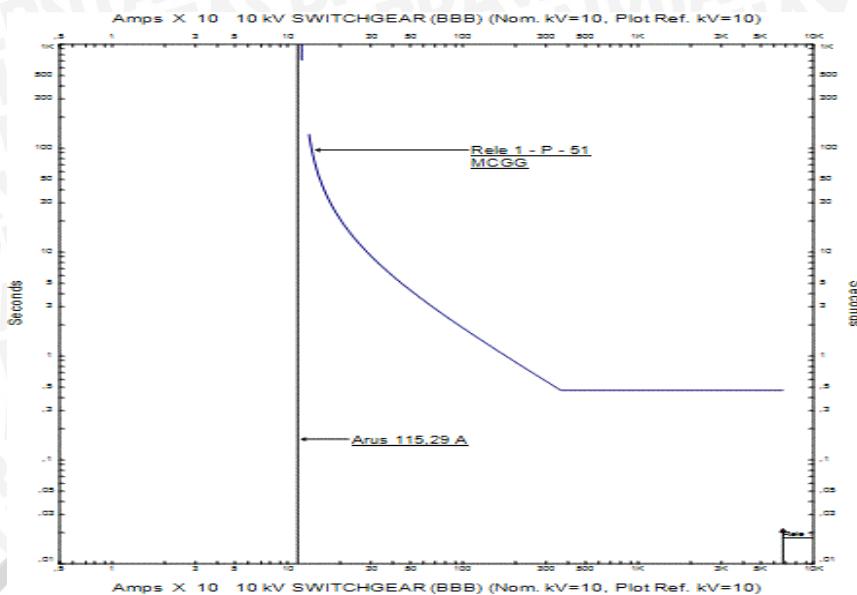
Gambar 4.7 *Harmonic Load Flow* ketika Arus Harmonisa tidak Dilibatkan

Sumber: Hasil Simulasi

Berdasarkan gambar 4.7, arus yang mengalir pada sisi primer CT (*Current Transformer*) untuk rele 1 atau pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* bernilai 109,8 A. Rele 1 memiliki perbandingan *drop off/ pick up* sebesar 0,95 maka arus sebesar 109,8 A akan dibaca oleh rele 1 sebesar $1,05 \times 109,8 \text{ A} = 115,29 \text{ A}$. Oleh karena rele 1 memiliki seting arus sebesar 121,275 A maka rele 1 tidak akan trip karena arus seting rele 1 lebih besar dibandingkan arus yang dibaca oleh rele 1 yang dinyatakan oleh persamaan berikut.

$$t = 1 \times \left(\frac{13,5}{\left(\frac{115,29}{121,275} \right) - 1} \right) = -273,55s$$

Dari hasil persamaan di atas, tanda minus menyatakan rele 1 tidak akan trip. Demikian juga untuk rele 2, arus yang mengalir pada sisi primer CT untuk rele 2 sebesar 1978,9 A. Rele 2 juga memiliki rasio antara *drop off/ pick up* sebesar 0,95 maka arus sebesar 1978,9 A dibaca oleh rele 2 menjadi sebesar $1,05 \times 1978,9 \text{ A} = 2077,845 \text{ A}$, nilai arus ini lebih kecil dibandingkan dengan arus seting untuk rele 2 yaitu sebesar 2425 A sehingga rele 2 juga tidak akan trip. Gambar 4.8 berikut merupakan hubungan antara arus yang dibaca oleh rele 1 ketika arus harmonisa tidak dilibatkan dan kurva seting rele 1.

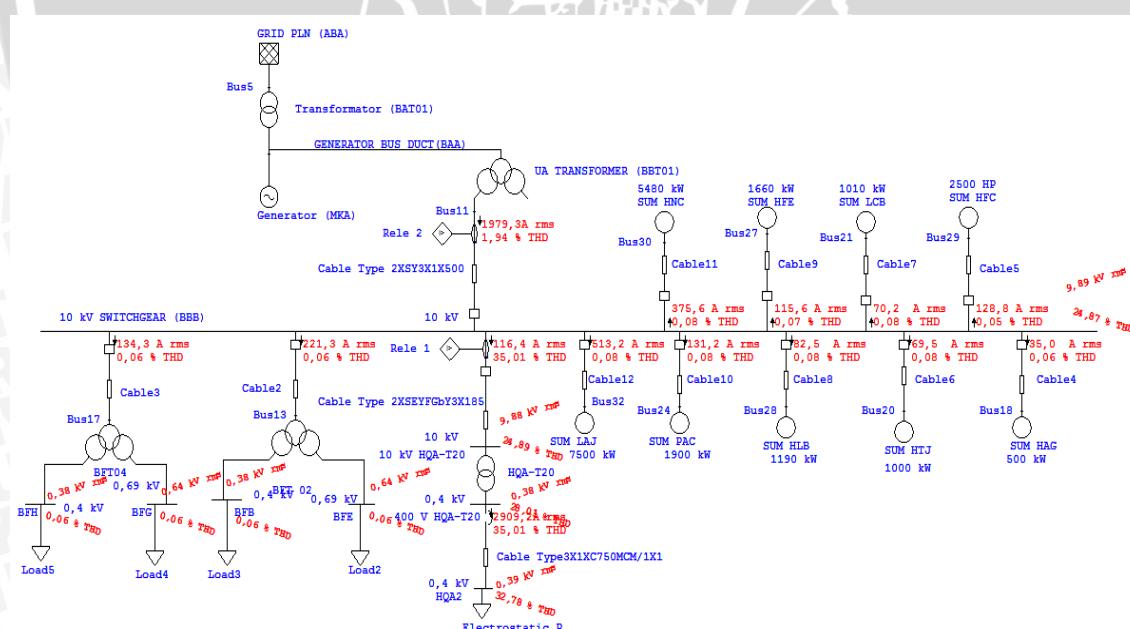


Gambar 4.8 Kurva seting Rele 1 dan Arus yang dibaca oleh Rele 1 ketika Arus Harmonisa tidak Dilibatkan

Sumber: Hasil Simulasi

Pada gambar 4.8 tidak terjadi perpotongan antara kurva seting rele 1 dengan arus yang dibaca oleh rele 1 yang menandakan bahwa rele 1 tidak akan trip.

Hasil *harmonic load flow* ketika data arus harmonisa pada tabel 4.2 dilibatkan seperti gambar 4.9 berikut.



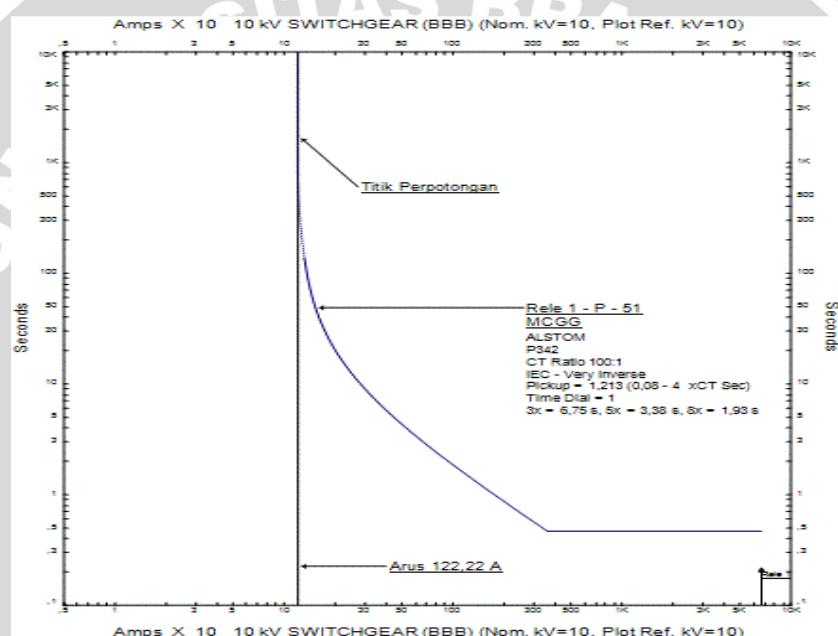
Gambar 4.9 *Harmonic Load Flow* ketika Arus Harmonisa Dilibatkan
Sumber: Hasil Simulasi

Berdasarkan gambar 4.9, adanya kontribusi arus harmonisa menyebabkan nilai rms arus pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* atau sisi primer CT untuk rele 1 nilainya berubah menjadi 116,4 A. Nilai arus 116,4 A dibaca oleh rele 1 sebesar

$1,05 \times 116,4 = 122,22$ A. Arus ini melebihi dari setting rele 1 yaitu 121,275 A sehingga menyebabkan rele 1 trip dalam waktu:

$$t = 1 \times \left(\frac{13,5}{\left(\frac{122,22}{121,275} \right) - 1} \right) = 1732,5 \text{ s} = 28,875 \text{ menit}$$

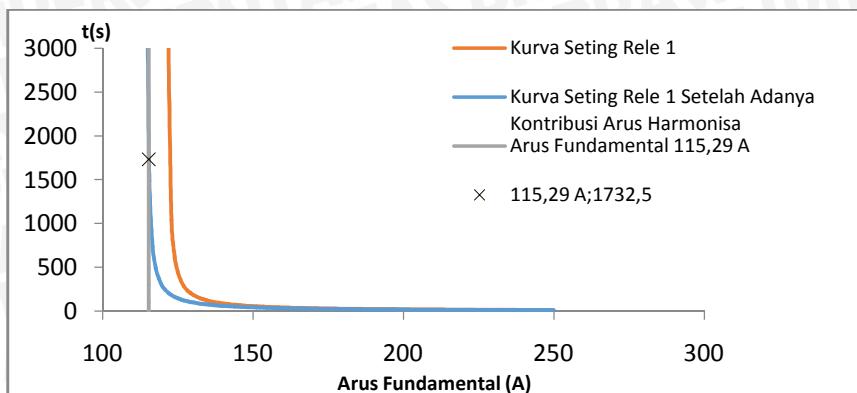
Sedangkan arus yang mengalir pada sisi primer CT untuk rele 2 sebesar 1979,3 A. Arus ini dibaca oleh rele 2 sebesar $1,05 \times 1979,3$ A = 2078,265 A nilainya masih lebih kecil dari arus setting rele 2 yaitu 2425 A sehingga rele 2 tidak akan trip. Gambar 4.8 berikut merupakan hubungan antara arus yang dibaca oleh rele 1 ketika arus harmonisa diberikan dan kurva setting rele 1.



Gambar 4.10 Kurva setting Rele 1 dan Arus yang dibaca oleh Rele 1 ketika Arus Harmonisa Dilibatkan
Sumber: Hasil Simulasi

Berdasarkan gambar 4.10, terjadi perpotongan antara kedua kurva yaitu kurva setting rele 1 dan arus yang dibaca oleh rele 1 sehingga menyebabkan rele 1 trip. Berdasarkan gambar 4.8 dan 4.10, arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* menyebabkan kurva setting rele 1 bergeser seperti pada gambar 4.11 berikut.





Gambar 4.11 Pergeseran Kurva Setting Rele 1 Akibat Arus Harmonisa
Sumber: Hasil Analisis

Gambar 4.8 memperlihatkan terjadi pergeseran kurva setting rele 1. Arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* menyebabkan arus fundamental sebesar 115,29 A yang terbaca oleh rele 1 mengakibatkan rele 1 trip dalam waktu 1732,5 s atau 28,875 s sehingga terjadi kesalahan dalam setting rele 1.

Rele 1 seharusnya trip jika arus fundamentalnya melebihi 121,275 A karena arus setting rele 1 sebesar 121,275 A, kontribusi arus harmonisa menyebabkan rele 1 trip ketika arus fundamental melebihi:

$$121,275 = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{k,\text{rms}})^2} = \sqrt{I_{1,\text{rms}}^2 + 1478,41}$$

$$I_{1,\text{rms}} = 115,02\text{A}$$

atau arus fundamental yang mengalir pada pangkal penyulang *electrostatic precipitator* melebihi:

$$121,275 = 1,05 \times \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{k,\text{rms}})^2} = 1,05 \times \sqrt{I_{1,\text{rms}}^2 + 1478,41}$$

$$I_{1,\text{rms}} = 108,91\text{A}$$

4.8. Setting Ulang Rele 1

Untuk menghindari kesalahan dalam setting rele 1 maka arus setting harus dinaikkan menjadi:

$$I_{\text{set}} = 1,05 \times \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{k,\text{rms}})^2} = 1,05 \times \sqrt{I_{\text{rated,rms}}^2 + 1478,41}$$

$$I_{\text{set}} = 1,05 \times \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{k,\text{rms}})^2} = 1,05 \times \sqrt{115,5^2 + 1478,41}$$

$$I_{\text{set}} = 127,82 \text{ A}$$

Arus sebesar 127,82 A adalah tap ke $\frac{127,82}{100 \times 0,05} = 25,56$. Tap yang ada pada rele MCGG berkisar dari 0,05 sampai 2,4 dalam langkah 0,05, dipilih tap ke-28 yaitu tap = 1,4 sehingga arus seting rele adalah 1,4 A dan arus seting aktual adalah 140 A. Tidak dipilih tap ke-26 = 1,3 atau tap ke-27 = 1,35 karena untuk memberikan *space* agar arus seting rele 1 tidak terlalu mendekati nilai 127,82 A.

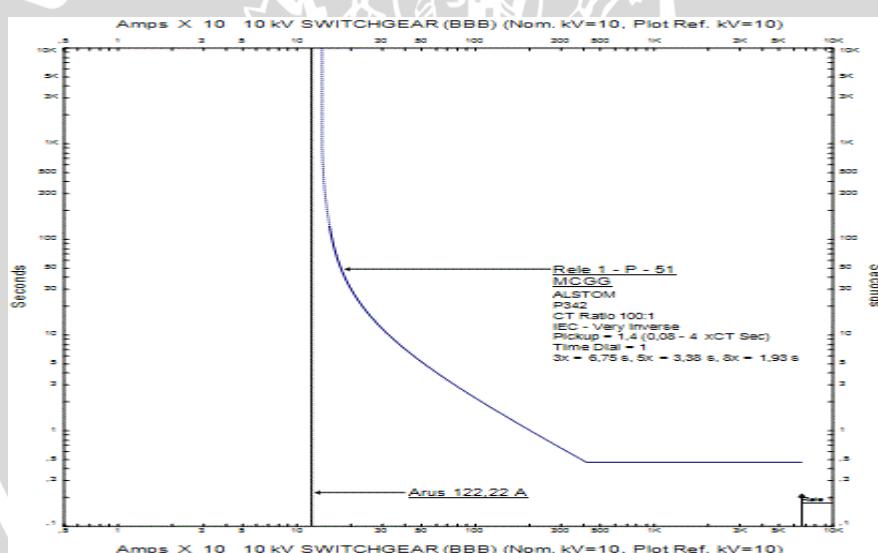
Setting ulang rele 1

Hubungan arus-waktu : *Very Inverse*

Arus setting aktual (I_{set}) = 140 A

Pengali waktu (t_p) = 1

Kurva hubungan antara kurva setting rele 1 dan arus yang dibaca oleh rele1 ketika arus harmonisa diberikan dinyatakan oleh gambar 4.12 berikut.



Gambar 4.12 Kurva setting Ulang Rele 1 dan Arus yang dibaca oleh Rele 1 ketika Arus Harmonisa Diberikan
Sumber: Hasil Simulasi

Berdasarkan gambar 4.12 dapat dilihat bahwa penyetelan setting arus aktual untuk rele 1 sebesar 140 A tidak akan menyebabkan rele 1 trip akibat arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* walaupun arus fundamental yang mengalir pada penyulang *electrostatic precipitator* sebesar rating arus yaitu 115,5 A.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis dan perhitungan dapat disimpulkan bahwa:

1. Untuk melakukan setting rele arus lebih yang terdapat pada penyulang *electrostatic precipitator* (Rele 1) perlu mengetahui rating arus penyulang *electrostatic precipitator* tersebut, rating arus rele arus lebih tidak boleh kurang dari rating arus penyulang *electrostatic precipitator*. Oleh karena pada sebelah hilir rele 1 terdapat transformator HQA-T20 maka kurva setting rele 1 harus berada di bawah kurva ketahanan termal transformator HQA-T20 untuk menjamin agar transformator HQA-T20 tidak mengalami *over heating*, kurva rele 1 juga harus berada di atas arus *inrush* transformator HQA-T20-durasi waktu arus *inrush* yang diperkirakan agar rele 1 tidak trip ketika transformator HQA-T20 baru diberi daya.
2. Setting rele arus lebih pada *incoming busbar* BBB (Rele 2) diperoleh dengan terlebih dahulu mengetahui rating arus pada *incoming busbar* BBB, arus setting rele 2 yang dipilih tidak boleh kurang dari rating arus *incoming busbar* BBB. Agar rele 2 dan rele 1 terjadi koordinasi yang baik maka rele 2 diberi tunda waktu 0,35 s untuk membolehkan rele 1 trip terlebih dahulu ketika terjadi gangguan hubung singkat dalam zona proteksi rele 1.
3. Arus harmonica yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* menyebabkan kurva setting rele arus lebih yang terdapat pada penyulang *electrostatic precipitator* (rele 1) bergeser. Dengan penyetelan arus setting sebesar 121,275 A pada rele 1 menyebabkan rele 1 trip dalam waktu 28,875 menit. Adanya kontribusi arus harmonica yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator* menyebabkan rele 1 trip ketika arus fundamental melebihi 115,02 A. Untuk menghindari rele 1 trip akibat adanya arus harmonica maka setting rele 1 dinaikkan menjadi 140 A.

5.2 Saran

1. Karena arus harmonica menyebabkan kesalahan setting rele arus lebih maka dalam kasus arus yang terdistorsi harmonica, penentuan arus setting untuk rele arus lebih harus memperhatikan besarnya arus harmonica.
2. Penelitian ini hanya meneliti kinerja rele arus lebih yaitu rele proteksi untuk arus gangguan hubung singkat fasa ke fasa dan arus gangguan hubung singkat tiga fasa

3. yang terdapat pada penyulang *electrostatic precipitator* akibat pengaruh arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *electrostatic precipitator*. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan menganalisis pengaruh arus harmonisa terhadap kinerja rele proteksi gangguan hubung singkat ke tanah (*ground fault relay*).



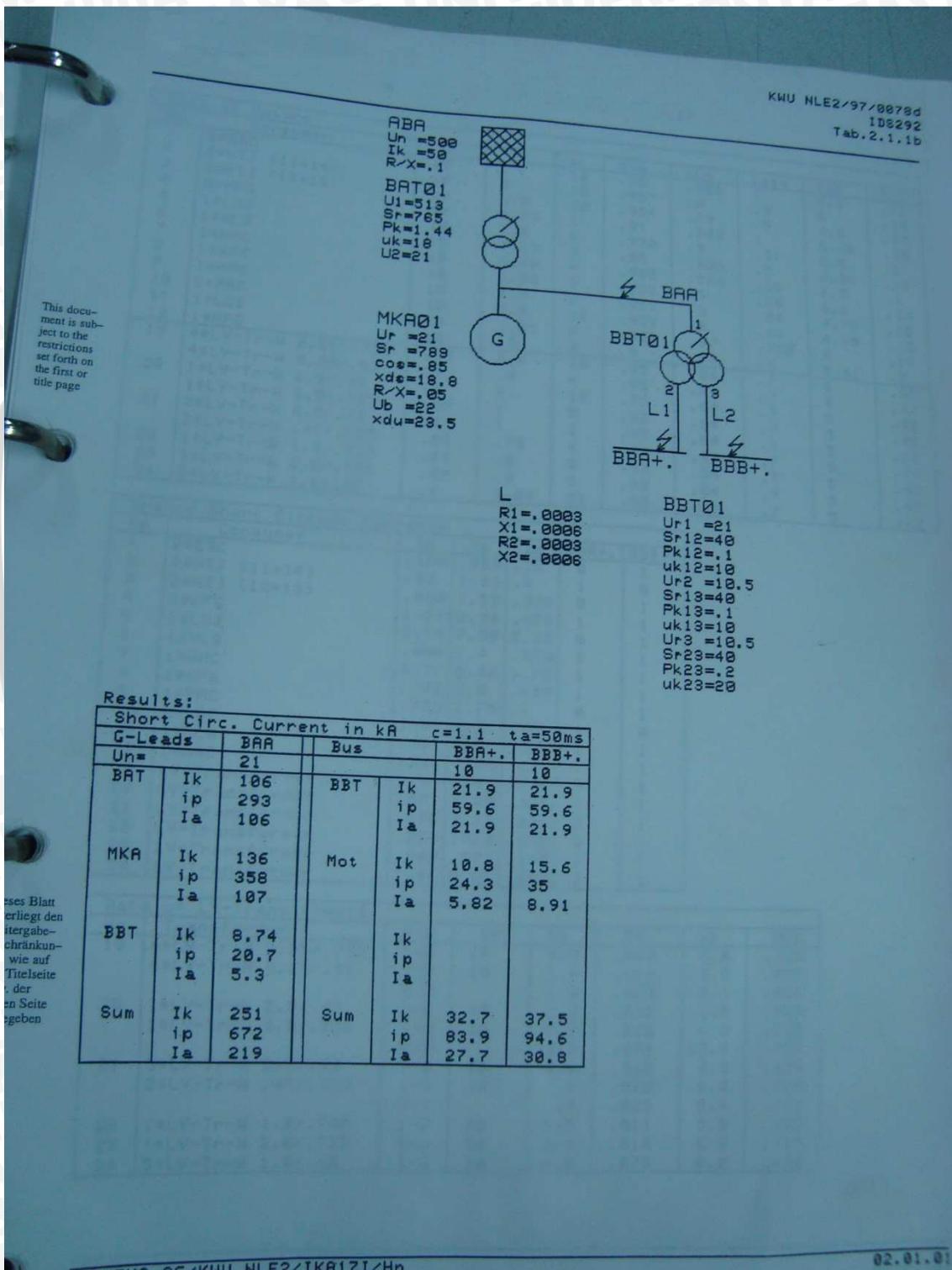
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR PUSTAKA

- ABB Group Company. 2005. *MV/LV Transformer Substations: Theory and Example of Short Circuit Current, Technical Application Paper*.
- Alstom. 1999. *Overcurrent Relay for Phase and Earth Faults Type MCGG Manual Book*. England: Stafford.
- C. Sankaran. 2002. *Power Quality*, USA: CRC Press LLC.
- Equipment Damage Curves Transformers*. SKM Systems Analysis Inc. Didownload dari www.skm.com/applicationguides7.html.
- G., Fujita dkk. 2007. *Impact of Harmonics on Tripping Time and Coordination of Overcurrent Relay*. Jurnal. Italy: International Conference on Electric Power System.
- Gers, Juan M. dan Holmes, Edward J. 2004. *Protection of Electricity Distribution Networks 2nd Edition*. London: MPG Book Limited, Bodmin, Cornwall.
- Gonen, Turan. 1986. *Electrical Power Distribution System Engineering*. New York: Mc.Graw Hill Book Company.
- Grady, Marc. 2012. *Understanding Power System Harmonics*.
- Grainger, John J. Dan Stevenson JR, William D. 1994. *Power System Analysis*. 1994: Mc.Graw-Hill, Inc.
- IEC 60909. *Calculation of Short Circuit Current in Three Phase System*.
- IEEE Standard 519-1992. *IEEE Recommended Practices and Requirements For Harmonic Control in Electrical Powers*. USA: IEEE Inc.
- Hewitson, L.G., dkk. 2004. *Practical Power System Protection*. USA: Elsevier Ltd.
- Ramadhan, Harsya. 2011. *Studi Pengaruh Harmonisa Terhadap Rele Arus Lebih Untuk Pengaman Sistem Distribusi Di PT. Ispat Indo*. Jurnal dipublikasikan di ITS Surabaya.



LAMPIRAN I**Data-data untuk Menentukan Nilai Impedansi****I.1 Data-data Generator (MKA) dan Transformator (BBT01)**

I.2 Data-data Generator (MKA)

PAITON II UNIT 5&6 GENERATOR-PROTECTION STEAM TURBINE 50CHA			
UNID: 4 123 972			
Generator data			
rated voltage	UN	21 kV	
rated apparent power	S N	789 MVA	
power factor	p.f.	0,85	
rated active power	P N	670,65 MW	
rated current	I N	21,692 kA	
max. current (10 Cel)	Imax	22,833 kA	
rated frequency	f N	50 Hz	
synchronous reactance	Xd	227,8%	
(for cylindrical rotor machine: Xd = Xq)			
transient synchronous reactance	X'd	29,96%	
max. reactive power (underexc.)	Q1max	363,73 Mvar	
no-load field voltage	U exc-o	140 V	
therm. time constant rotor	Tau 1	40sec	
max.cont.permissible neg.sequence current I2	K I2>	8%	
therm. time constant rotor	C = I2 ² t	10 s	
continously permissible overload	Imax/In	110%	
therm time constant stator	Tau 2	30 sec	
current transformer			
star point	Iprim	Isec	TRi
generator bus	25 kA	1 A	25 000
	25 kA	1 A	25 000
voltage transformer			
generator bus	Uprim	Usec	TRu
network	21 kV / 1,73	100 V / 1,73	210
	500 kV / 1,73	100 V / 1,73	5000
neutral point transformer			
data	Uprim	Usec	Ü Tr
	21 kV / 1,73	500 V / 1	24,249



I.3 Data-data Transformator (BBT01)

**PAITON II UNIT 5&6
GENERATOR-PROTECTION
STEAM TURBINE 50CHA**

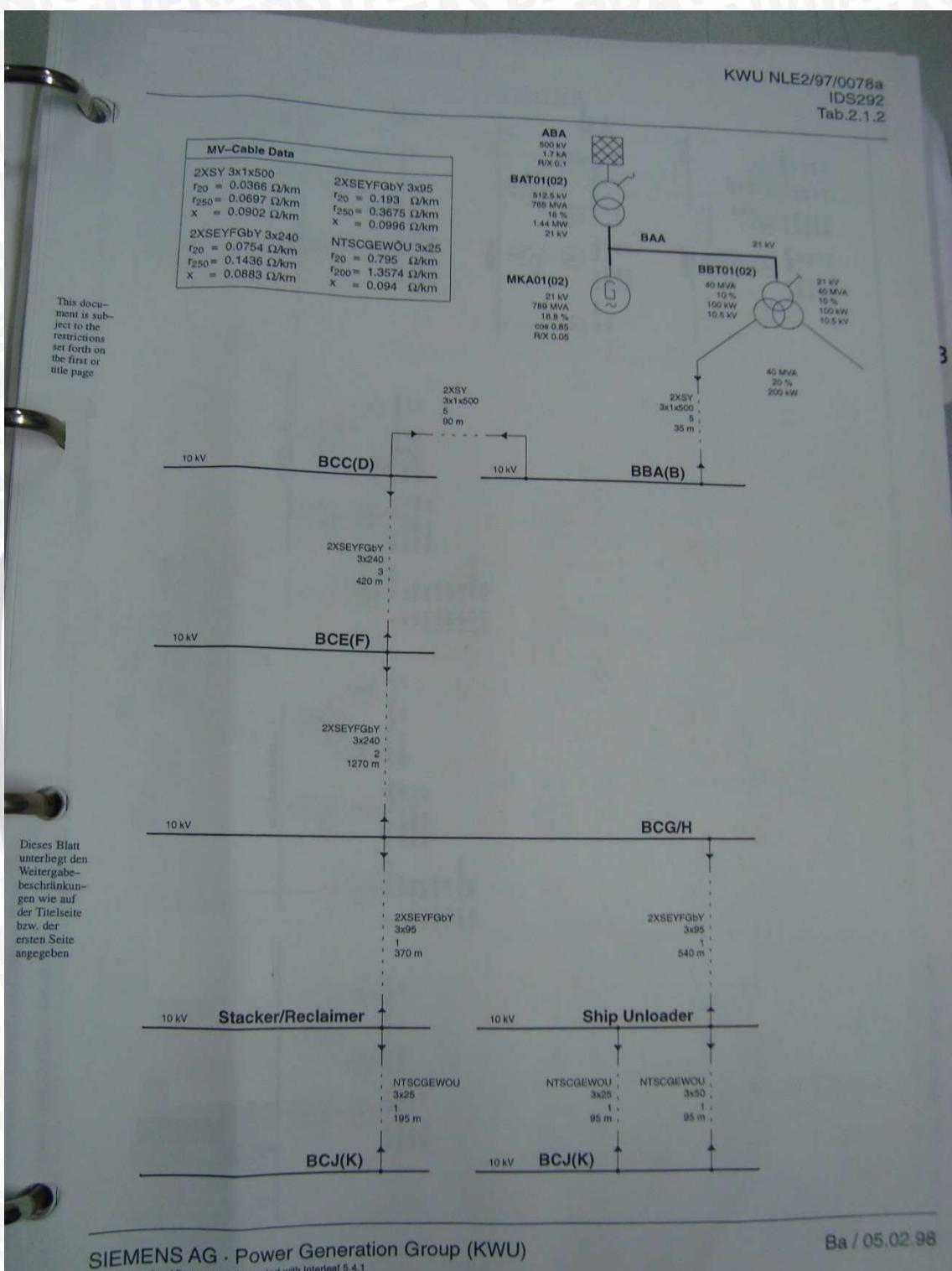
UNID: 4 123 972

Auxiliary Transformer

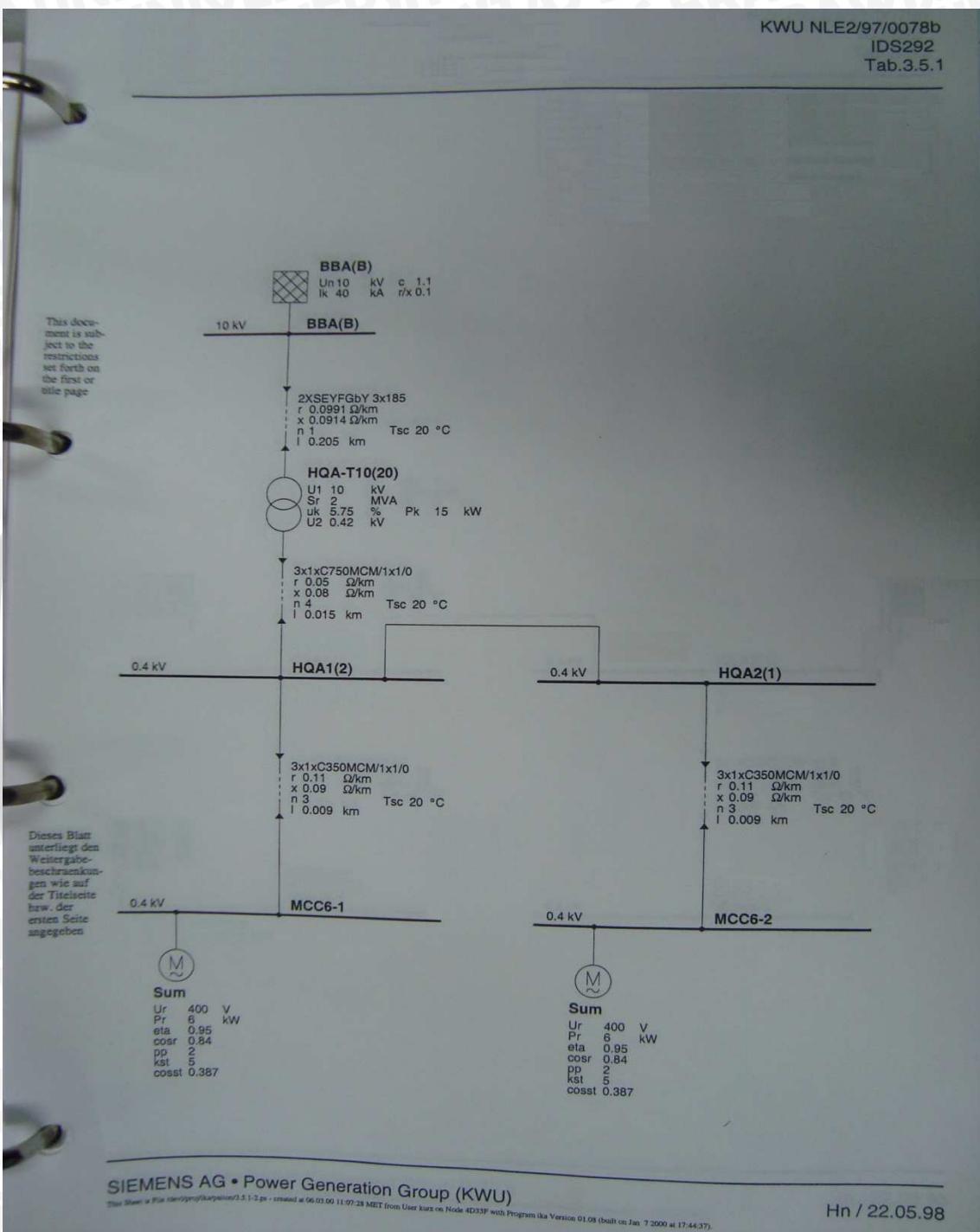
vector group	Cc	Dyn1yn1
total coupling capacitance	B/Bn	nF
max. permissible induction	B/Bn (1,2)	%
tripping time	I/I _n	s
permissible overload	Tau	%
therm. time constant		min
winding	primary	
rated voltage	U N	21 kV
rated apparent power	S N	60 MVA
rated current	I N	1650 A
impedance voltage	u k	10,00%
control range of tap changer	+	5, %
control range of tap changer	-	5, %
winding	secondary	
rated voltage	U N	10,5 kV
rated apparent power	S N	40 MVA
rated current	I N	22000 A
impedance voltage	u k	10,00%
winding	tertiary	
rated voltage	U N	10,5 kV
rated apparent power	S N	40 MVA
rated current	I N	22000 A
impedance voltage	u k	10,00%
current transformer		
high voltage side	I _{prim}	I _{sec}
low voltage side (60BBA)	1	2 kA
low voltage side (60BBB)	2	3 kA
low voltage side (60BBB)	3	3 kA
voltage transformer		
high voltage side	U _{prim}	U _{sec}
low voltage side (60BBA)	1	21 kV
low voltage side (60BBA)	2	10 kV
low voltage side (60BBB)	3	10 kV
		TRu
		210
		100
		100



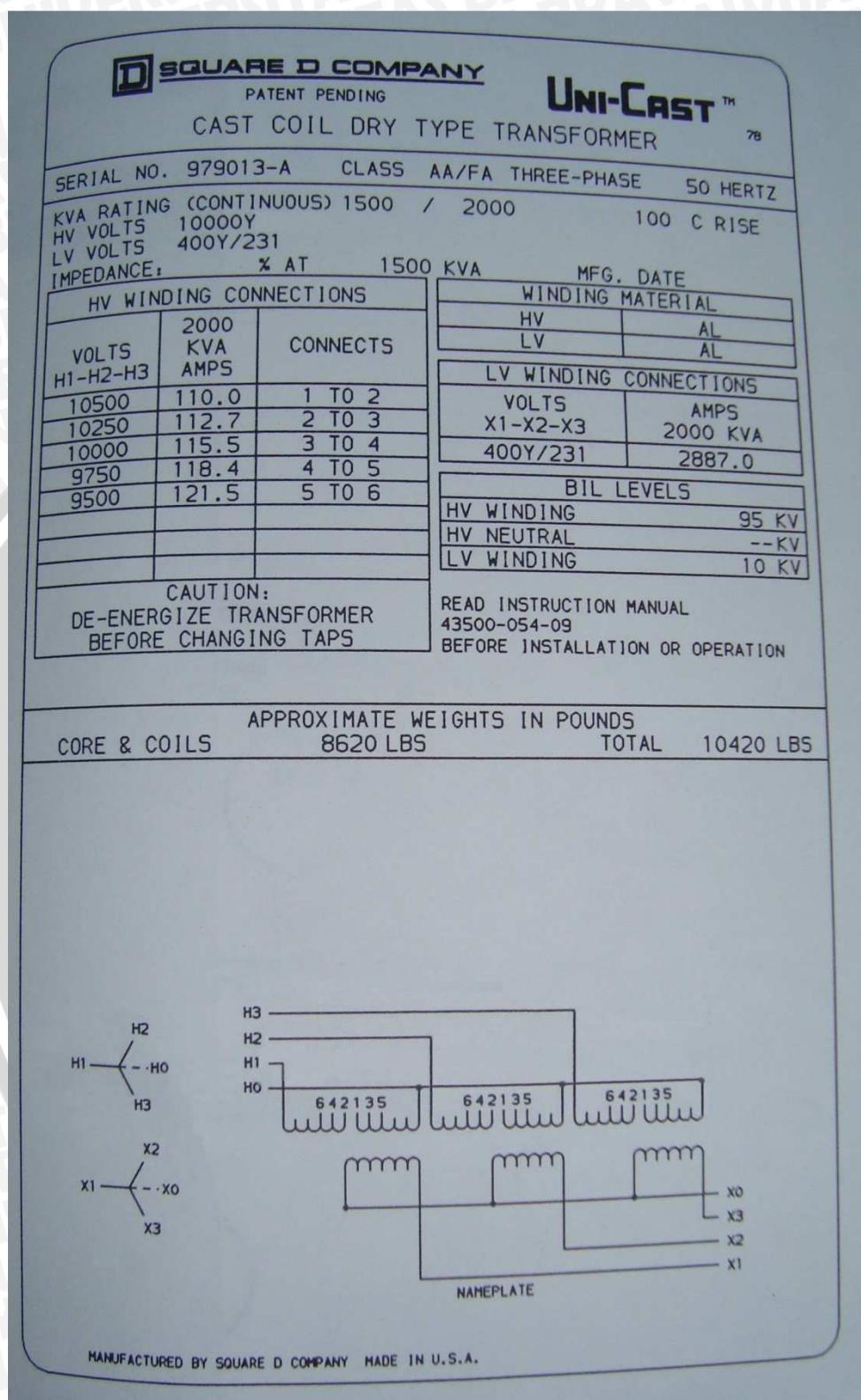
I.4 Data-data Kabel 2XSY 3X1X500

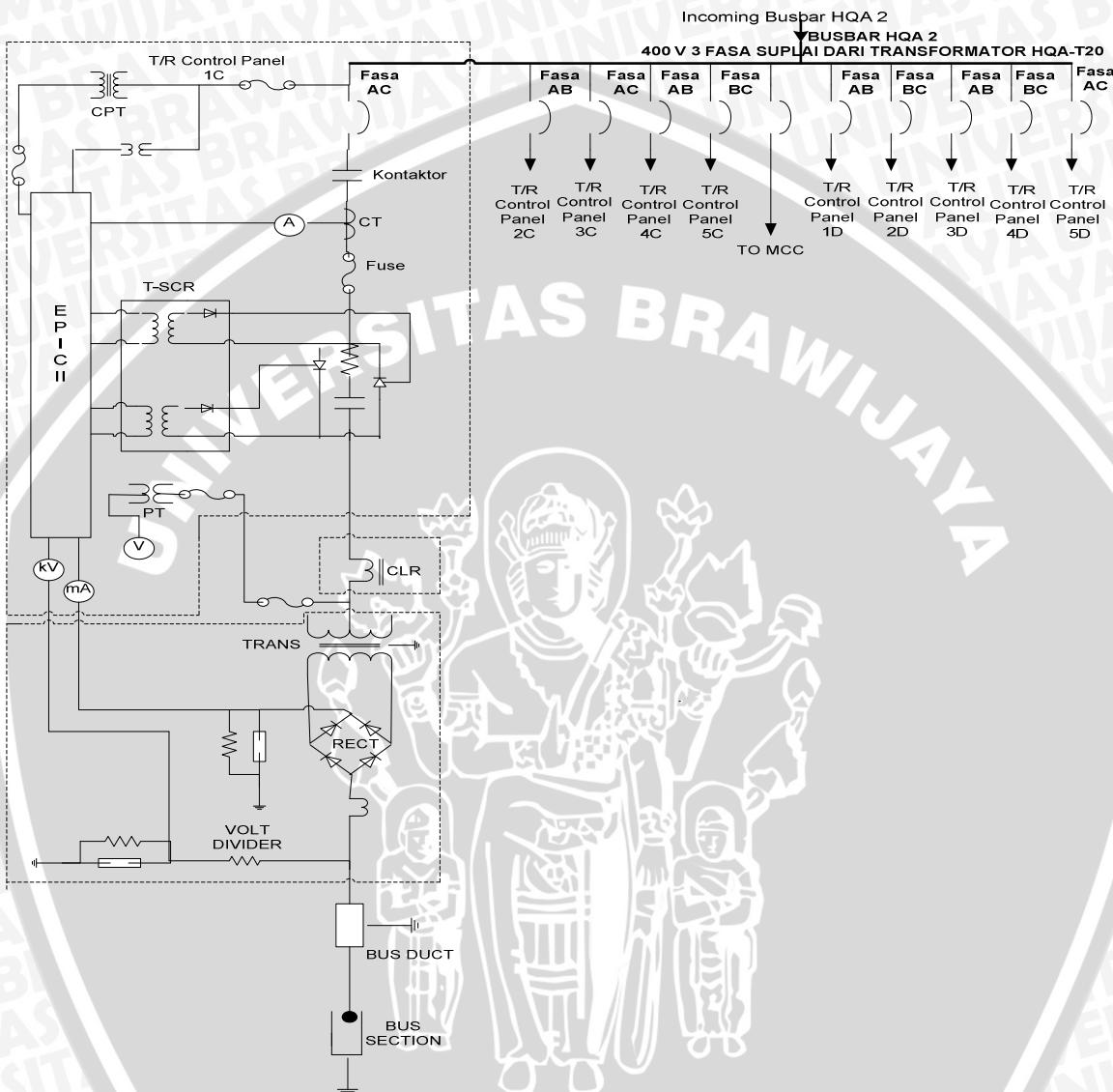


I.5 Data-data Kabel Tipe 2XSEYFGbY 3X185, Transformator HQA-T20, Kabel Tipe 3X1XC750MCM/1X1/0

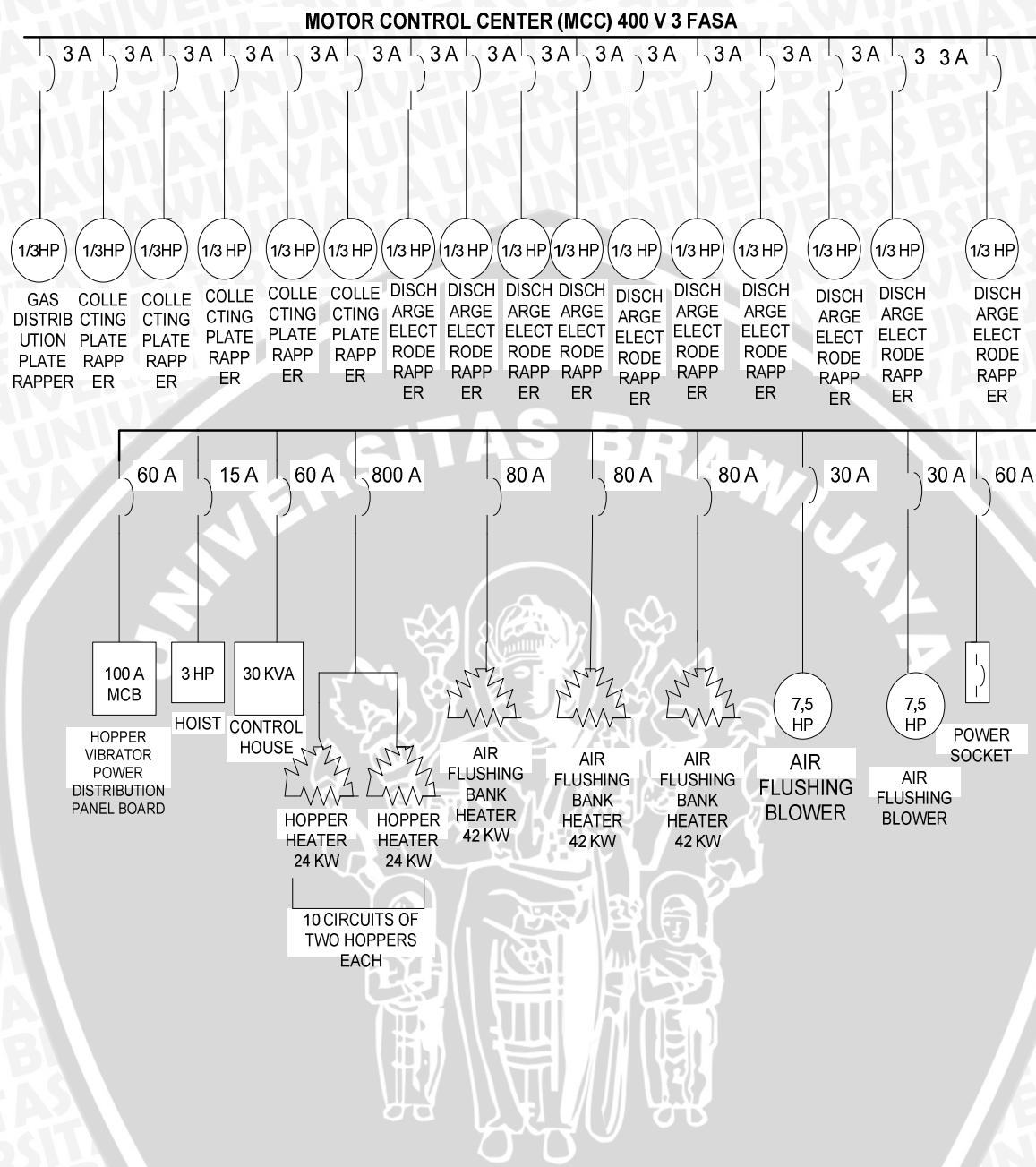


I.6 Data-data Transformator HQA 2



LAMPIRAN II**Switchgear Electrostatic Precipitator****II.1 Panel-Panel yang Berada dalam Switchgear Electrostatic Precipitator**

II.2 Beban-Beban yang Terhubung dengan MCC (*Motor control center*)



LAMPIRAN III

Data-data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa untuk Panel-panel yang Berada dalam *Switchgear Electrostatic Precipitator*

III.1 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada *T/R Control Panel 5D* (Fasa AC) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan *Power Quality Analyzer*

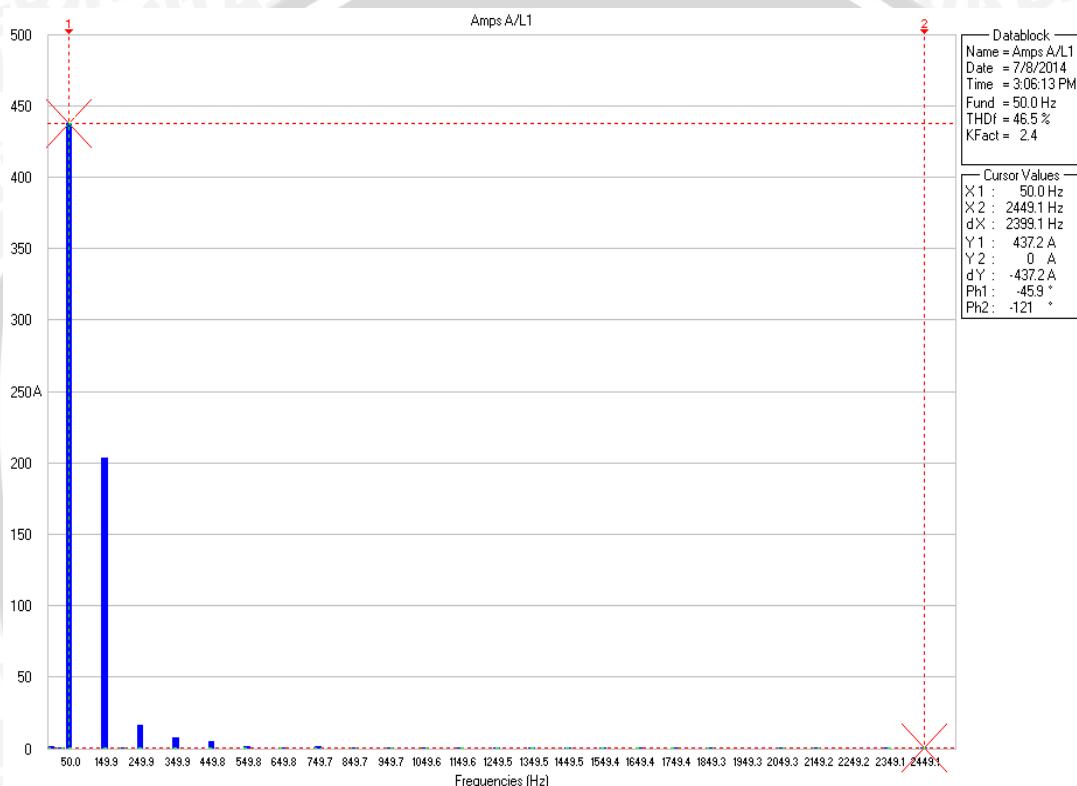


Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada *T/R Control Panel 5D*

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada <i>T/R Control Panel 5D</i>			
Dalam RMS (<i>Root Mean Square</i>)			
50 Hz = 309,14 A	149,9 Hz = 143,04 A	249,9 Hz = 12,56 A	349,9 Hz = 6,02 A
449,8 Hz = 3,31 A	549,8 Hz = 1,42 A	649,8 Hz = 1,25 A	749,7 Hz = 1,54 A
849,7 Hz = 0,71 A	949,7 Hz = 0,35 A	1049,6 Hz = 0,31 A	1149,6 Hz = 0,52 A
1249,5Hz = 0,41 A	1349,5 Hz = 0,26 A	1449,5 Hz = 0,22 A	1549,4 Hz = 0,33 A
1649,4 Hz = 0,16 A	1749,4 Hz = 0,12 A		

III.2 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada T/R Control Panel 4D (Fasa BC) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan Power Quality Analyzer

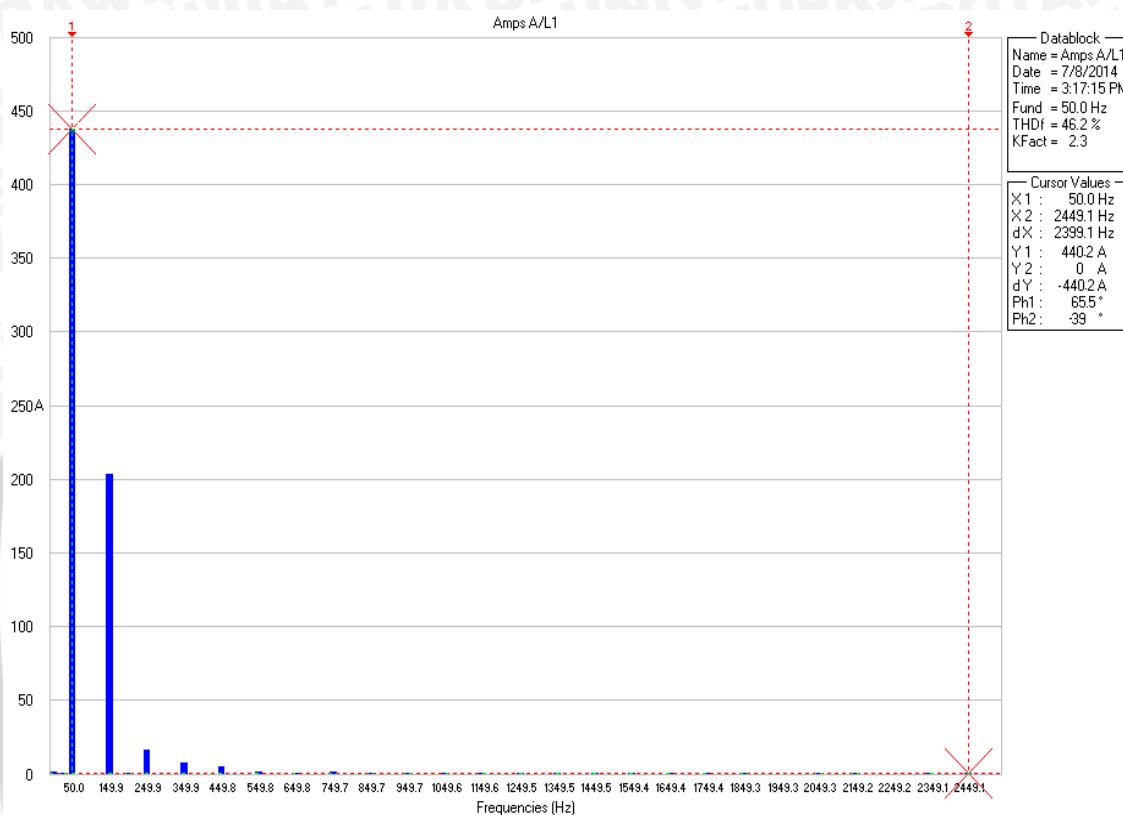


Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada T/R Control Panel 4D

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada T/R Control Panel 4D Dalam RMS (Root Mean Square)			
50 Hz = 311,31A	149,9 Hz = 143,21 A	249,9 Hz = 12,61 A	349,9 Hz = 6,03 A
449,8 Hz = 3,27 A	549,8 Hz = 1,41 A	649,8 Hz = 1,26 A	749,7 Hz = 1,53 A
849,7 Hz = 0,72 A	949,7 Hz = 0,34 A	1049,6 Hz = 0,5 A	1149,6 Hz = 0,52 A
1249,5Hz = 0,41 A	1349,5 Hz = 0,27 A	1449,5 Hz = 0,24 A	1549,4 Hz = 0,34 A
1649,4 Hz = 0,15 A	1749,4 Hz = 0,11 A		

III.3 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada T/R Control

Panel 3D (Fasa AB) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan Power

Quality Analyzer

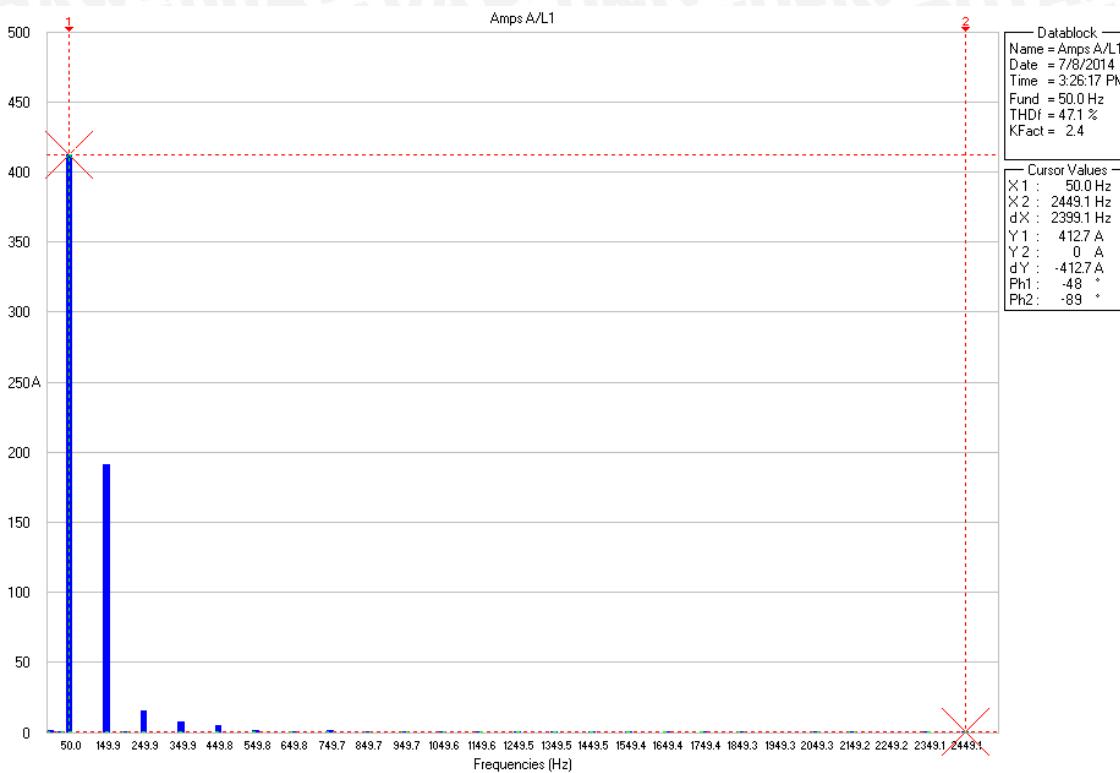


Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada T/R Control Panel 3D

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada T/R Control Panel 3D

Dalam RMS (Root Mean Square)

50 Hz = 291,79 A	149,9 Hz = 136,57 A	249,9 Hz = 11,53 A	349,9 Hz = 5,89 A
449,8 Hz = 2,87 A	549,8 Hz = 1,32 A	649,8 Hz = 1,21 A	749,7 Hz = 1,36 A
849,7 Hz = 0,58 A	949,7 Hz = 0,29 A	1049,6 Hz = 0,27 A	1149,6 Hz = 0,45 A
1249,5 Hz = 0,35 A	1349,5 Hz = 0,19 A	1449,5 Hz = 0,21 A	1549,4 Hz = 0,26 A
1649,4 Hz = 0,13 A	1749,4 Hz = 0,09 A		

III.4 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada T/R Control Panel 2D (Fasa BC) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan Power Quality Analyzer

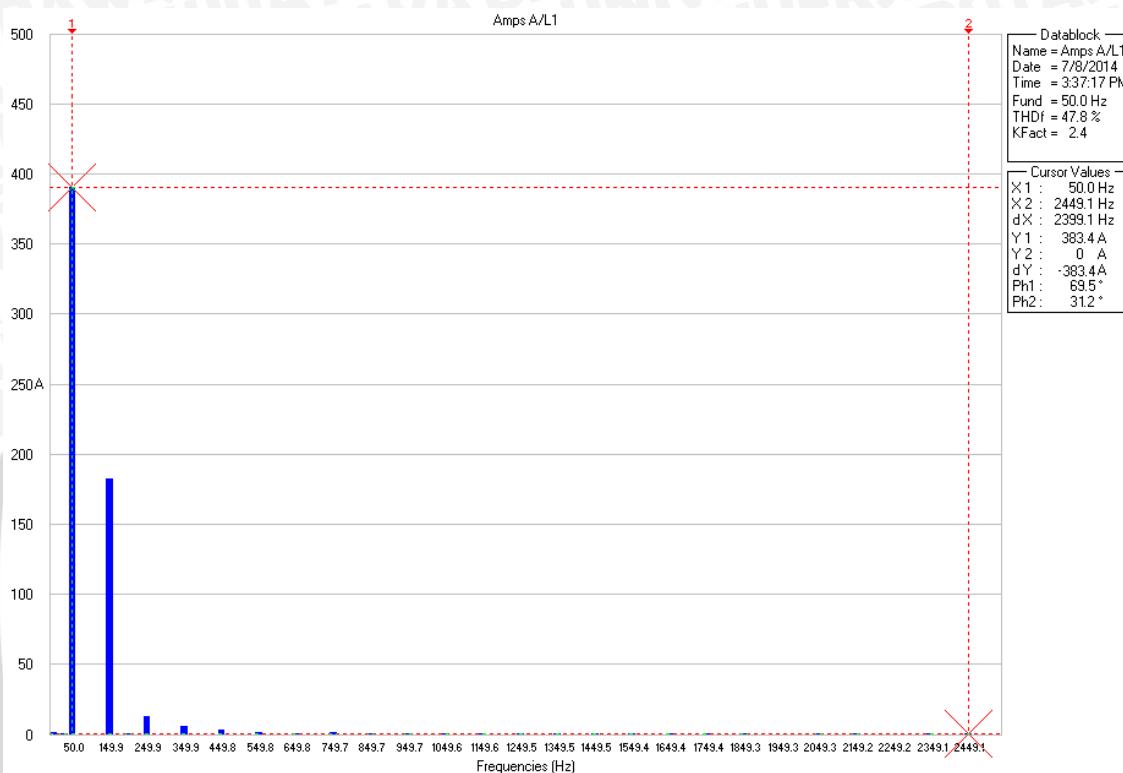


Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada T/R Control Panel 2D

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada T/R Control Panel 3D
Dalam RMS (*Root Mean Square*)

50 Hz = 271,12 A	149,9 Hz = 129,13 A	249,9 Hz = 9,45A	349,9 Hz = 4,11 A
449,8 Hz = 2,01 A	549,8 Hz = 1,14 A	649,8 Hz = 1,01 A	749,7 Hz = 0,95 A
849,7 Hz = 0,47 A	949,7 Hz = 0,23 A	1049,6 Hz = 0,18 A	1149,6 Hz = 0,34 A
1249,5Hz = 0,27 A	1349,5 Hz = 0,13 A	1449,5 Hz = 0,16 A	1549,4 Hz = 0,21 A
1649,4 Hz = 0,1 A	1749,4 Hz = 0,08 A		

III.5 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada T/R Control Panel 1D (Fasa AB) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan Power Quality Analyzer

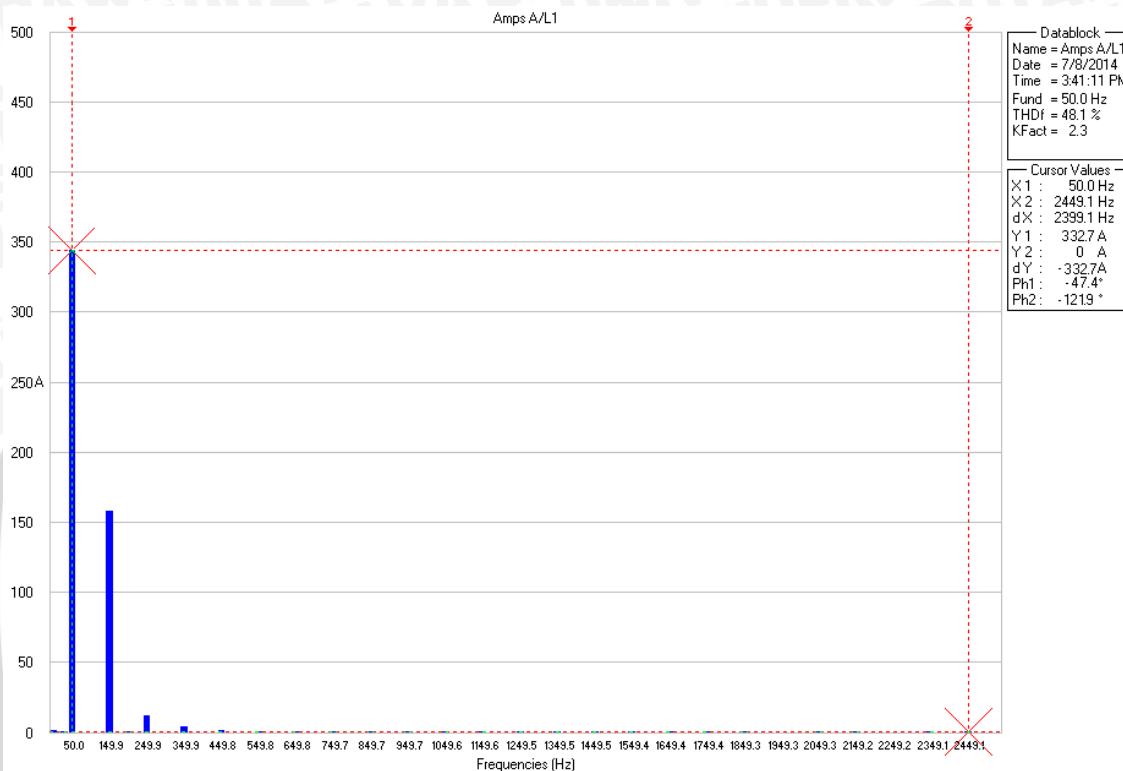


Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada T/R Control Panel 1D

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada T/R Control Panel 3D
Dalam RMS (*Root Mean Square*)

50 Hz = 235,27 A	149,9 Hz = 112,58 A	249,9 Hz = 8,89A	349,9 Hz = 3,28 A
449,8 Hz = 1,55 A	549,8 Hz = 1,02 A	649,8 Hz = 0,89 A	749,7 Hz = 0,76 A
849,7 Hz = 0,28 A	949,7 Hz = 0,16 A	1049,6 Hz = 0,13 A	1149,6 Hz = 0,25 A
1249,5Hz = 0,12 A	1349,5 Hz = 0,11 A	1449,5 Hz = 0,13 A	1549,4 Hz = 0,15 A
1649,4 Hz = 0,09 A	1749,4 Hz = 0,05 A		

III.6 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada T/R Control Panel 5C (Fasa BC) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan Power Quality Analyzer

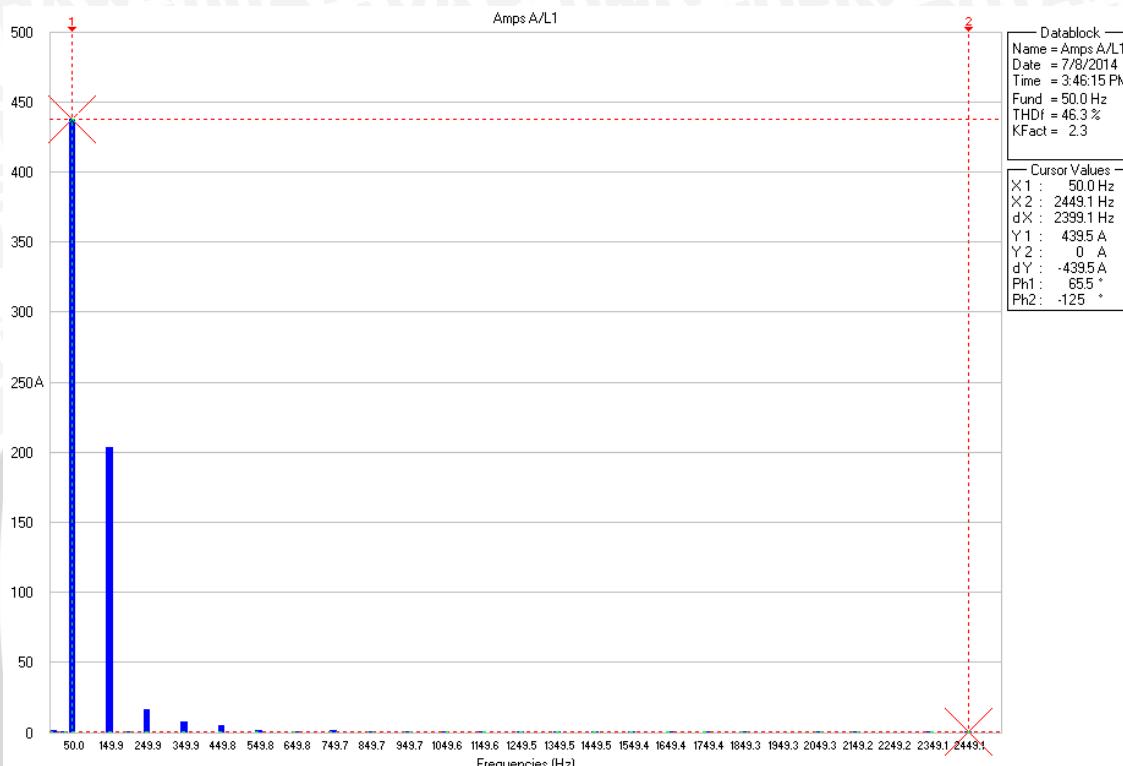


Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada T/R Control Panel 5C

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada T/R Control Panel 5C Dalam RMS (Root Mean Square)			
50 Hz = 310,76 A	149,9 Hz = 143,01 A	249,9 Hz = 12,57 A	349,9 Hz = 6,03 A
449,8 Hz = 3,3 A	549,8 Hz = 1,41 A	649,8 Hz = 1,24 A	749,7 Hz = 1,56 A
849,7 Hz = 0,72 A	949,7 Hz = 0,33 A	1049,6 Hz = 0,31 A	1149,6 Hz = 0,51 A
1249,5 Hz = 0,41 A	1349,5 Hz = 0,25 A	1449,5 Hz = 0,22 A	1549,4 Hz = 0,33 A
1649,4 Hz = 0,16 A	1749,4 Hz = 0,13 A		

III.7 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada T/R Control Panel 4C (Fasa BC) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan Power Quality Analyzer

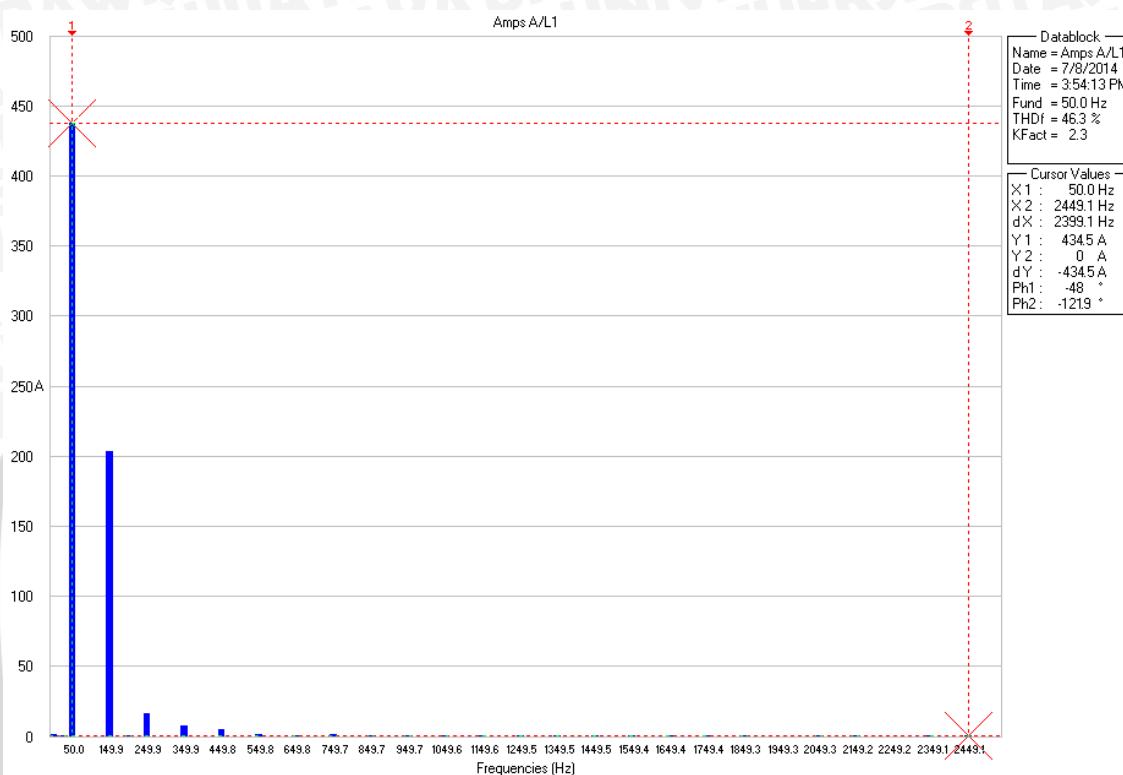


Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada T/R Control Panel 4C

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada T/R Control Panel 4C
Dalam RMS (*Root Mean Square*)

50 Hz = 307,26 A	149,9 Hz = 141,55 A	249,9 Hz = 12,45A	349,9 Hz = 6,01 A
449,8 Hz = 3,26 A	549,8 Hz = 1,41 A	649,8 Hz = 1,26 A	749,7 Hz = 1,55 A
849,7 Hz = 0,72 A	949,7 Hz = 0,32 A	1049,6 Hz = 0,28 A	1149,6 Hz = 0,51 A
1249,5Hz = 0,42 A	1349,5 Hz = 0,28 A	1449,5 Hz = 0,21 A	1549,4 Hz = 0,34 A
1649,4 Hz = 0,17 A	1749,4 Hz = 0,11 A		

III.8 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada T/R Control Panel 3C (Fasa AC) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan Power Quality Analyzer

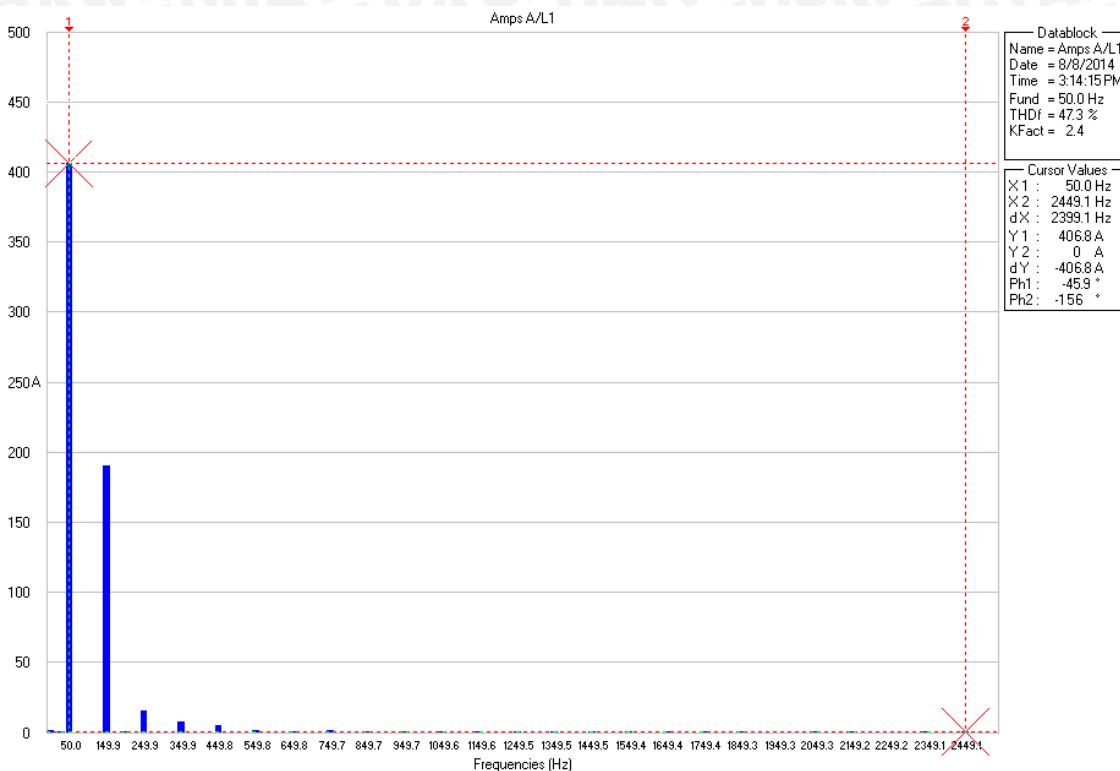


Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada T/R Control Panel 3C

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada T/R Control Panel 4C
Dalam RMS (*Root Mean Square*)

50 Hz = 287,67 A	149,9 Hz = 135,41 A	249,9 Hz = 11,03A	349,9 Hz = 5,01 A
449,8 Hz = 2,79 A	549,8 Hz = 1,25 A	649,8 Hz = 1,22 A	749,7 Hz = 1,34 A
849,7 Hz = 0,56 A	949,7 Hz = 0,28 A	1049,6 Hz = 0,27 A	1149,6 Hz = 0,43 A
1249,5Hz = 0,34 A	1349,5 Hz = 0,19 A	1449,5 Hz = 0,21 A	1549,4 Hz = 0,26 A
1649,4 Hz = 0,13 A	1749,4 Hz = 0,08 A		

III.9 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada T/R Control Panel 2C (Fasa AB) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan Power Quality Analyzer

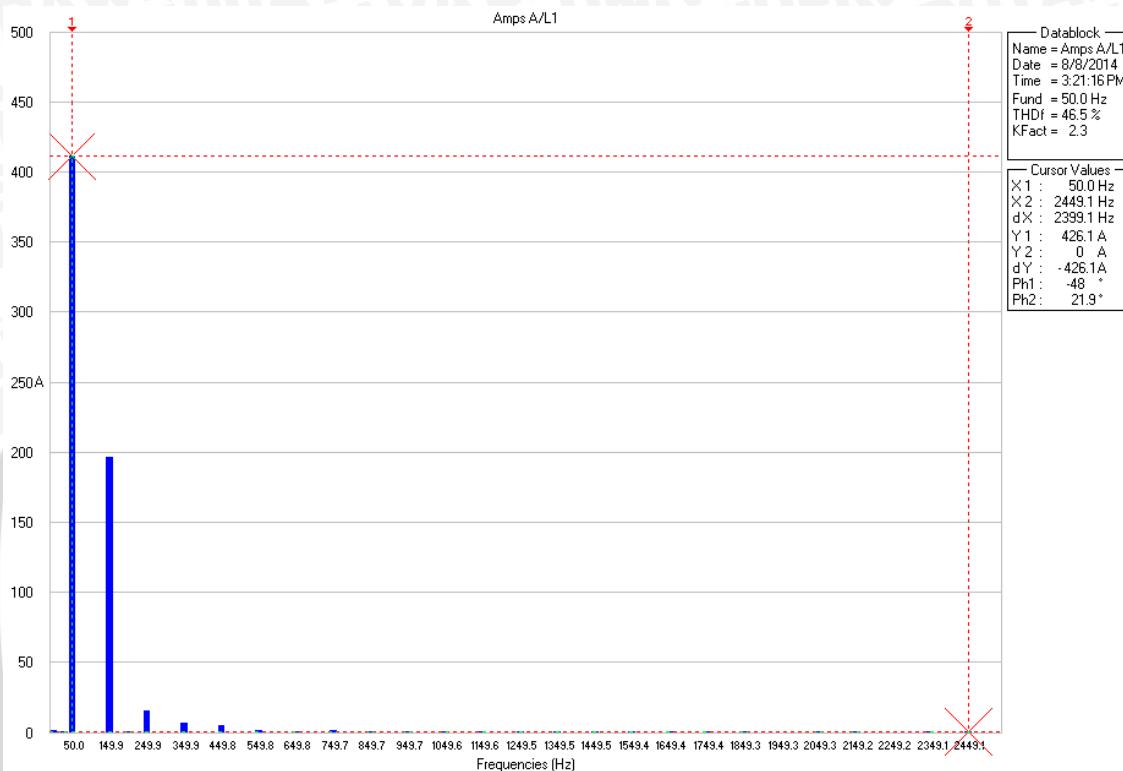


Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada T/R Control Panel 2C

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada T/R Control Panel 2C Dalam RMS (Root Mean Square)			
50 Hz = 301,24 A	149,9 Hz = 139,56 A	249,9 Hz = 11,4 A	349,9 Hz = 5,51 A
449,8 Hz = 3,06 A	549,8 Hz = 1,39 A	649,8 Hz = 1,18 A	749,7 Hz = 1,45 A
849,7 Hz = 0,71 A	949,7 Hz = 0,3 A	1049,6 Hz = 0,27 A	1149,6 Hz = 0,48 A
1249,5Hz = 0,38 A	1349,5 Hz = 0,27 A	1449,5 Hz = 0,21 A	1549,4 Hz = 0,32 A
1649,4 Hz = 0,17 A	1749,4 Hz = 0,09 A		

III.10 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada T/R
Control Panel 1C (Fasa AC) Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan
Power Quality Analyzer

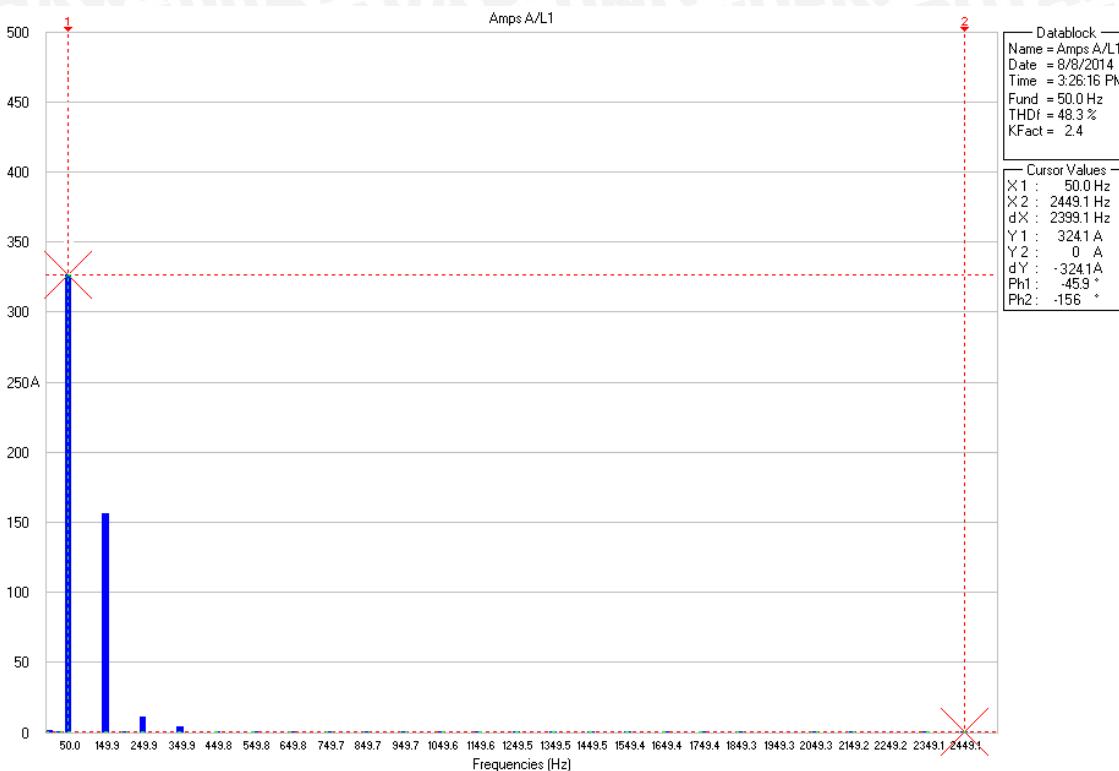


Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada T/R
Control Panel 1C

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada T/R *Control Panel 1C*
Dalam RMS (*Root Mean Square*)

50 Hz = 229,16 A	149,9 Hz = 110,54 A	249,9 Hz = 7,99 A	349,9 Hz = 2,89 A
449,8 Hz = 1,31 A	549,8 Hz = 0,09 A	649,8 Hz = 0,69 A	749,7 Hz = 0,66 A
849,7 Hz = 0,26 A	949,7 Hz = 0,14 A	1049,6 Hz = 011 A	1149,6 Hz = 0,23 A
1249,5Hz = 0,12 A	1349,5 Hz = 0,11 A	1449,5 Hz = 0,12 A	1549,4 Hz = 0,13 A
1649,4 Hz = 0,08 A	1749,4 Hz = 0,04 A		

III.11 Data Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Paling Besar Pada MCC Fasa B Selama 10 Menit Pengukuran Menggunakan *Power Quality Analyzer*

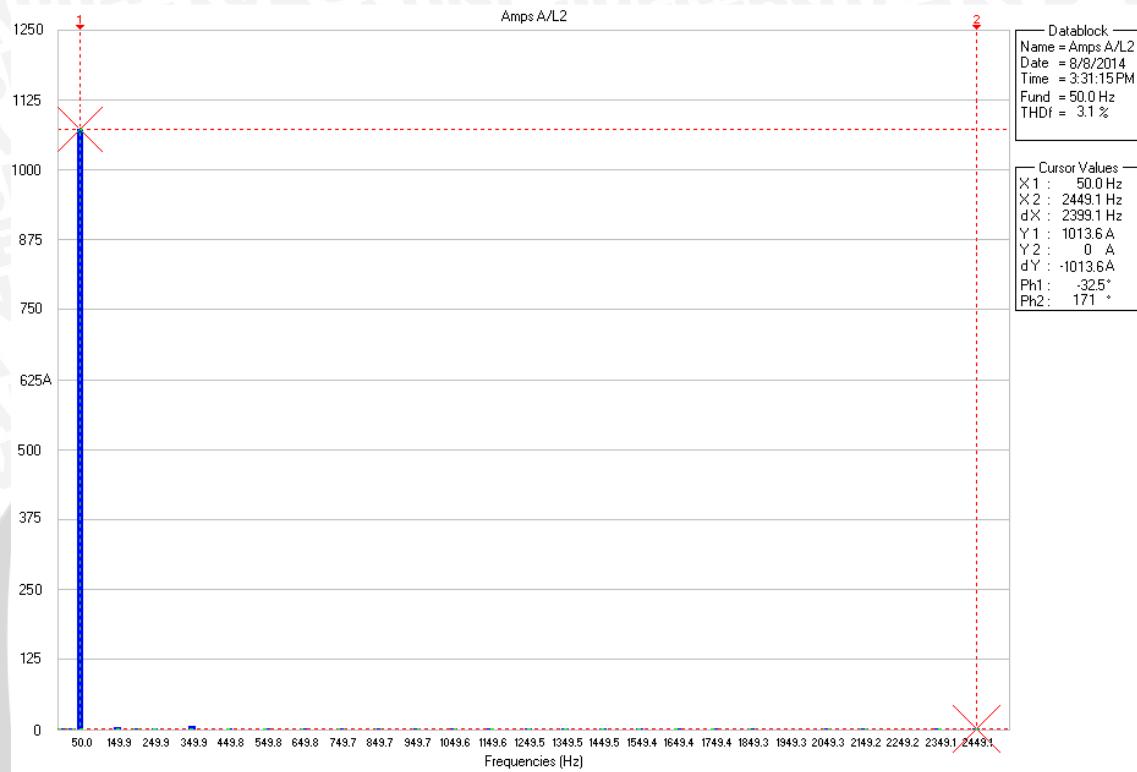


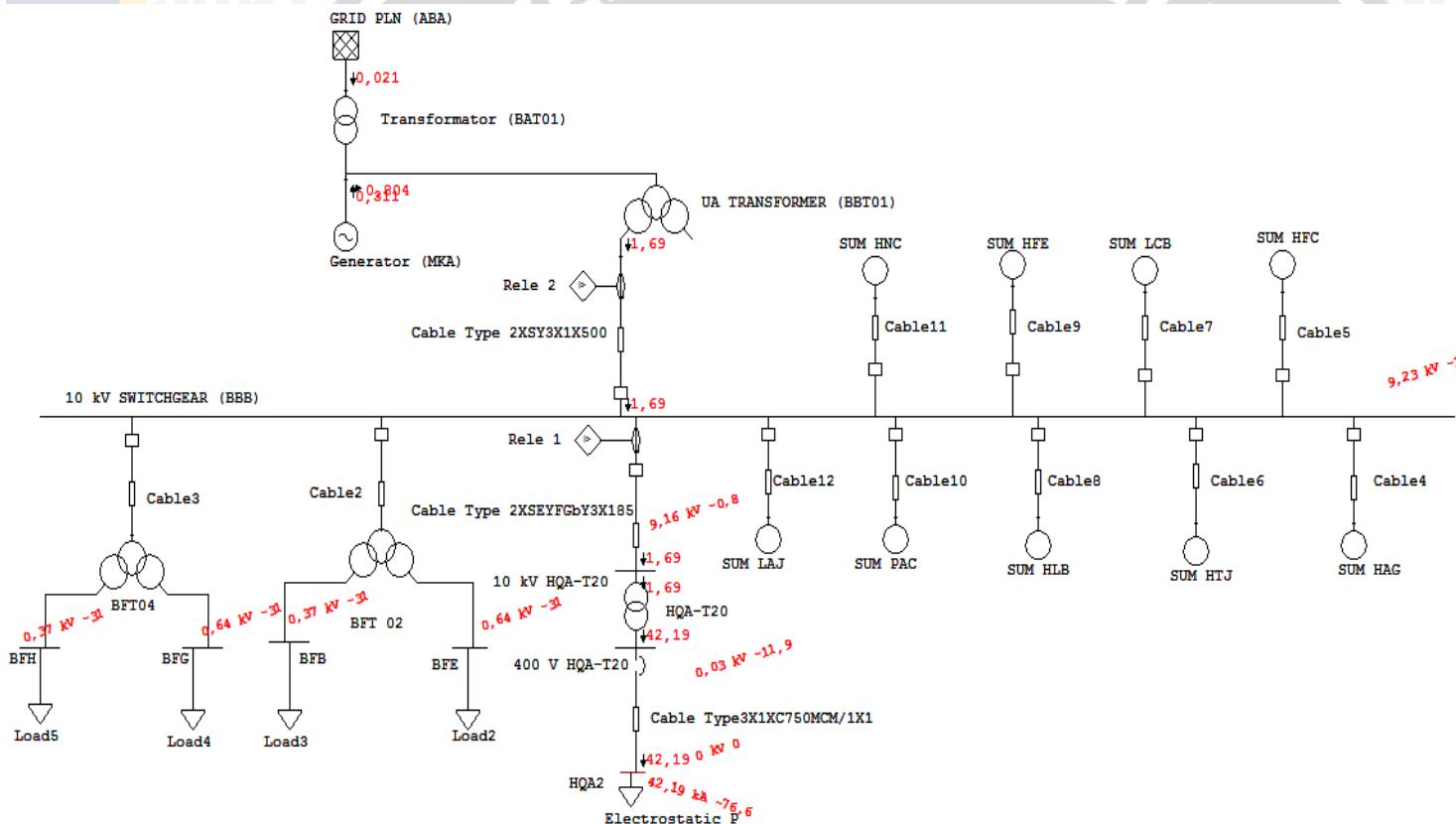
Diagram Batang Arus Puncak Fundamental dan Arus Puncak Harmonisa Pada MCC Fasa B

Tabel Arus Fundamental dan Arus Harmonisa Pada MCC Fasa B Dalam RMS (<i>Root Mean Square</i>)			
50 Hz = 716,7 A	150 Hz = 9,31 A	250 Hz = 19,3 A	350 Hz = 4,64 A
450 Hz = 0,24 A	550 Hz = 2,37 A	650 Hz = 1,01 A	750 Hz = 0,27 A
850 Hz = 0,87 A	950 Hz = 0,74 A	1050 Hz = 0,56 A	1150 Hz = 0,97 A
1250 Hz = 0,79 A	1350 Hz = 0,31 A	1450 Hz = 0,45 A	1550 Hz = 0,1 A
1650 Hz = 0,79 A	1750 Hz = 0,12 A		

LAMPIRAN IV

Hasil Simulasi Arus Hubung Singkat di Busbar HQA 2

IV.1 Gambar Simulasi Arus Hubung Singkat Tiga Fasa di Busbar HQA 2



IV.2 Hasil Simulasi Arus Hubung Singkat di Busbar HQA 2

Project:	ETAP	Page:	10
Location:	7.0.0	Date:	05-24-2015
Contract:		SN:	12345678
Engineer:	Study Case: Single Line	Revision:	Base
Filename: Yes		Config.:	Normal

Short-Circuit Summary Report

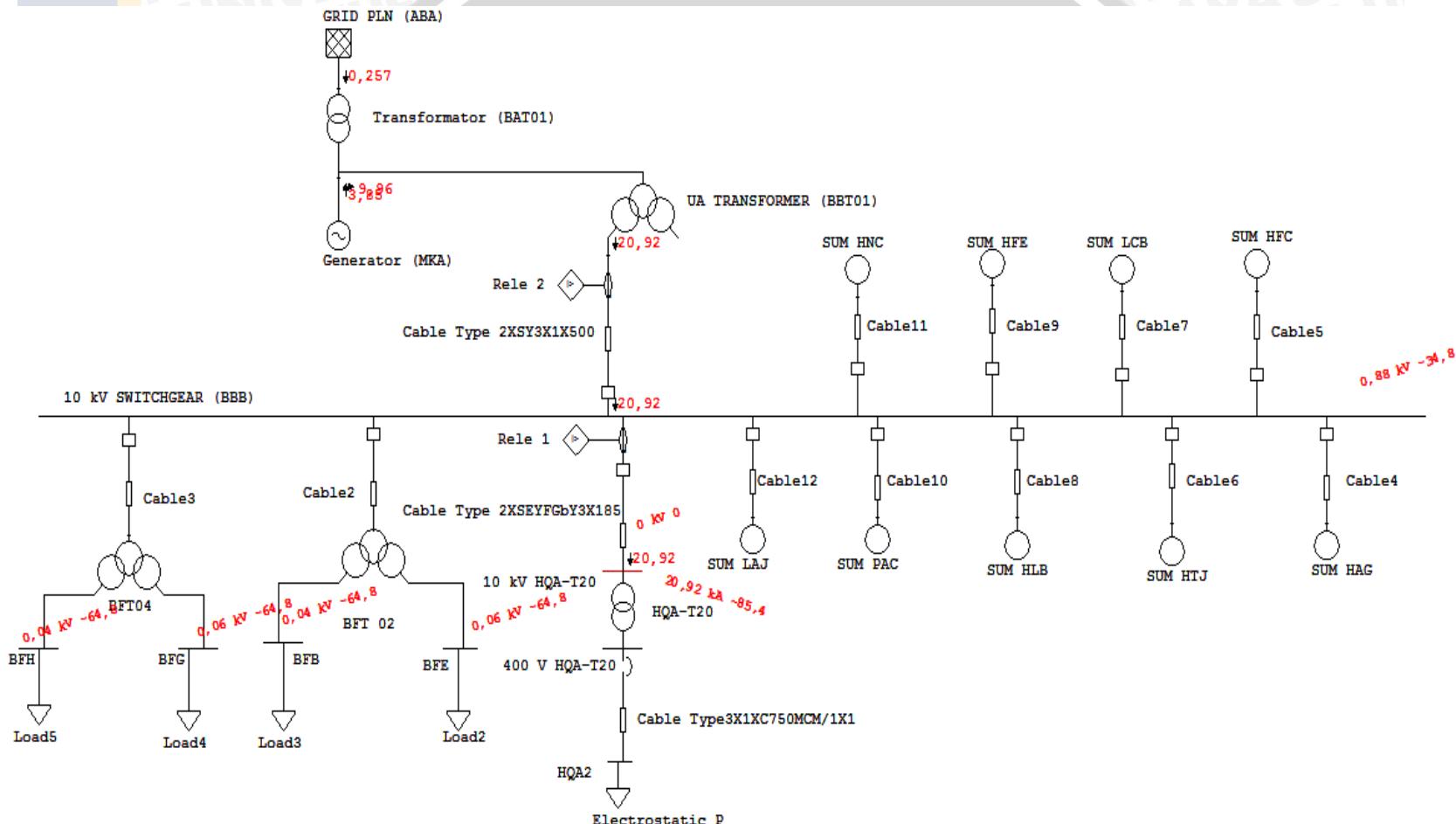
3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus	3-Phase Fault				Line-to-Ground Fault				Line-to-Line Fault				*Line-to-Line-to-Ground				
	ID	kV	I"k	ip	Ik	I"k	ip	Ib	Ik	I"k	ip	Ib	Ik	I"k	ip	Ib	Ik
HQA2		0.400	42.186	89.454	42.186	9.764	20.704	9.764	9.764	36.535	77.471	36.535	36.535	38.882	82.447	38.882	38.882

All fault currents are in rms kA. Current ip is calculated using Method C.

* LLG fault current is the larger of the two faulted line currents.

IV.3 Gambar Simulasi Arus Hubung Singkat Tiga Fasa di Busbar 10 kV HQA- T20



IV.4 Hasil Simulasi Arus Hubung Singkat di Busbar 10 kV HQA- T20

Project:	ETAP	Page:	11
Location:	7.0.0	Date:	05-24-2015
Contract:		SN:	12345678
Engineer:		Revision:	Base
Filename: Yes	Study Case: Single Line	Config.:	Normal

Short-Circuit Summary Report

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus	ID	kV	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground					
			I [*] k	i _p	I _k	I [*] k	i _p	I _b	I [*] k	i _p	I _b	I [*] k	i _p	I _b	I [*] k		
10 kV HQA-T20		10.000	20.922	52.959	20.922	0.480	1.216	0.480	0.480	18.124	45.878	18.124	18.124	18.244	46.181	18.244	18.244

All fault currents are in rms kA. Current i_p is calculated using Method C.

* LLG fault current is the larger of the two faulted line currents.