



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS KEJENUHAN TRANSFORMATOR ARUS  
TERHADAP RELE ARUS LEBIH DAN RELE KOORDINASI  
PADA SWITCHGEAR 13.8 kV**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik**

**DESTRA ANDIKA PRATAMA**

**09 06 49 55 70**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
KEKHUSUSAN MANAJEMEN KETENAGALISTRIKAN DAN ENERGI  
SALEMBA  
JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Destra Andika Pratama**

**NPM : 09 06 49 55 70**

**Tanda tangan : **

**Tanggal : Juli 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

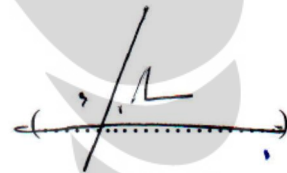
Tesis ini di ajukan oleh :

Nama : Destra Andika Pratama  
NMP : 09 06 49 55 70  
Program Studi : Manajemen Ketenagalistrikan dan Energi  
Judul Tesis : **ANALISIS KEJENUHAN TRANSFORMATOR  
ARUS TERHADAP RELE ARUS LEBIH DAN  
RELE KOORDINASI PADA SWITCHGEAR  
13.8 kV**

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

### DEWAN PENGUJI

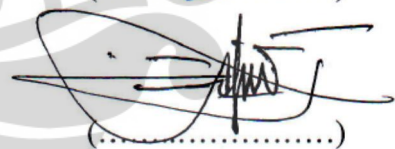
Pembimbing : DR. Ing. Eko Adhi Setiawan, MT



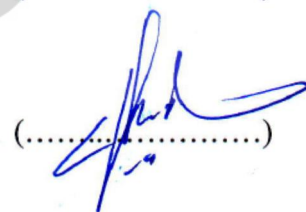
Peguji 1 : Prof. DR. Ir. Rudy Setiabudy, DEA



Peguji 2 : DR. Ir. Ridwan Gunawan, MT



Peguji 3 : Ir. I Made Ardita Y, MT



Ditetapkan di : Depok

Tanggal: 06 Juli 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penelitian tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Jurusan Manajemen Ketenagalistrikan dan Energi pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikannya. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) **Dr. Ing. Eko Adhi Setiawan, MT** selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) **Orang tua dan istri** serta keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
- (3) Seluruh rekan di Teknik Tenaga Listrik dan Energi Universitas Indonesia;
- (4) Seluruh rekan kerja di **Politeknik Negeri Sriwijaya** Palembang dan pihak terkait dari **Asea Brown Boveri (ABB) Indonesia**;
- (5) Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Depok, Juli 2012

Penulis

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

---

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

Nama : Destra Andika Pratama  
NPM : 0906495570  
Program Studi : Manajemen Ketenagalistrikan dan Energi  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Tesis

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

**ANALISIS KEJENUHAN TRANSFORMATOR ARUS TERHADAP RELE ARUS LEBIH DAN RELE KOORDINASI PADA SWITCHGEAR 13.8kV**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal: 06 Juli 2012

Yang Menyatakan



(Destra Andika Pratama)

## ABSTRAK

Nama Mahasiswa: Destra Andika Pratama

Program Studi: Manajemen Ketenagalistrikan dan Energi

Judul: Analisis Kejenuhan Transformator Arus terhadap Rele Arus Lebih dan Rele Koordinasi pada Switchgear 13.8 kV

Dengan menggunakan *Electromagnetic Transient Program* (EMTP) melalui induktor non-linier nya (Type-96), suatu model transien dari transformator arus dipakai untuk menyelidiki pengaruh kejenuhan CT terhadap rele digital arus lebih. Model ini kemudian divalidasikan melalui pengujian di laboratorium dengan peralatan berbasis mikroprosesor untuk mengevaluasi karakteristik kejenuhan CT salah satunya. Faktor-faktor yang mendorong ke arah CT jenuh didiskusikan dan dievaluasi secara komprehensif dengan menggunakan model rele digital arus lebih, guna menyelidiki pengaruh dari pada beban sekunder, level hubung singkat, gangguan asimetris dengan komponen DC offset terhadap kejenuhan suatu CT. Kemudian dilakukan evaluasi antara hasil pengujian terhadap peraturan yang ditetapkan oleh IEEE dengan Standard C37.110-1996. Penelitian ini juga meliputi studi dampak kejenuhan CT terhadap elemen proteksi *instantaneous* dan *time delay* pada rele digital arus lebih serta aplikasinya terhadap rele seting koordinasi pada *MV Switchgear*. Hasil yang didapat adalah cukup memuaskan dan terdapat pula petunjuk dalam pemilihan CT.

Kata kunci: Kejenuhan CT, ATP-EMPT, Rele arus lebih, Koordinasi seting rele.

## ABSTRACT

*Using Electromagnetic Transient Program (EMTP), nonlinear inductor (Type-96) in order to investigate the effects of CT's saturation on digital overcurrent relays the current transformer transient model was implemented. The model was validated by testing in laboratory use the microprocessor devices for evaluate of characteristic of CT saturation one of them. Factors that lead to CT's saturations were comprehensively discussed and evaluated. A typical digital overcurrent relay was tested in the laboratory to investigate the effects of secondary burden, short circuit level, and asymmetrical fault with dc offset components on CT's saturations. Evaluations of test results against the rules, specified by IEEE Standard C37.110-1996 were evaluated. The research includes studying the impact of CT saturation on both the instantaneous and time-delayed element of digital overcurrent relays and the application of relay coordination on MV Switchgear. The results were satisfactory and guidelines for CT's selection were presented.*

*Key words: CT saturation, ATP-EMTP, Overcurrent relay, relay setting coordination.*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN SAMBUNG .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	x
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Motivasi Penelitian .....	2
1.3. Tujuan Penelitian .....	2
1.4. Manfaat penelitian .....	2
1.5. Batasan Masalah .....	2
1.6. Sistematika Penelitian .....	3
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>4</b>
2.1. Metode Untuk Pemodelan CT .....	4
2.2. Persyaratan IEEE/ANSI Untuk Pemilihan CT .....	5
2.3. Pengaruh Kejenuhan CT terhadap Rele Arus Lebih .....	7
<b>3. IMPLEMENTASI MODEL TRANSFORMER ARUS .....</b>	<b>9</b>
3.1. Analisa Transien Transformer Arus .....	10
3.2. Model Matematis dari Representasi Inti Magnetik .....	13
3.3. Validasi Model EMTP Transformer Arus .....	15
3.4. Analisa Kinerja Transformer Arus Menggunakan Model EMTP .....	25
3.4.1. Pengaruh Beban Terhadap Kejenuhan CT .....	26
3.4.2. Pengaruh Tingkat Hubung Singkat Terhadap Kinerja CT .....	31
3.4.3. Pengaruh Rasio X/R Sistem Terhadap Kejenuhan CT .....	35
3.5. Pengujian Hasil Kinerja Transformer Arus Menggunakan EMTP Terhadap Model Rele Digital Arus Lebih .....	43
3.5.1. Komponen Rele Digital .....	43
3.5.2. Pemodelan Rele Digital Arus Lebih .....	45
3.5.2.1. Mengapa Membuat Model Rele Digital Arus Lebih .....	45
3.5.2.2. Pemodelan Rele Digital .....	45
3.5.3. Simulasi Untuk Menguji Pengaruh CT Terhadap Rele Digital Menggunakan Teknik Pemfilteran Kosinus .....	48
<b>4. MENGUJI DAN MENGANALISA PENGARUH KEJENUHAN TRANSFORMER ARUS PADA RELE DIGITAL ARUS LEBIH .....</b>	<b>52</b>
4.1. Penjelasan Pengujian Rele Digital Arus Lebih .....	52
4.2. Kasus dari EMTP Dikembangkan untuk Menguji Rele Digital Arus	

Lebih.....	54
4.3. Pengaruh Arus Simetris terhadap Rele Digital Arus Lebih.....	54
4.4. Pengaruh Arus Asimetris terhadap Rele Digital Arus Lebih .....	69
4.5. Observasi Umum terhadap Hasil Pengujian Laboratorium.....	79
4.6. Evaluasi Respon Rele Digital Arus Lebih dan Hasil Pengujian.....	81
4.6.1. Evaluasi Response Rele Digital Arus Lebih Instantaneous dengan Komponen AC Simetris .....	82
4.6.2. Evaluasi Response Rele Digital Arus Lebih Instantaneous dengan Komponen DC Simetris.....	84
4.6.3. Evaluasi Response Rele Digital Arus Lebih dengan Time Delay ...	88
4.7. Tinjauan Aplikasi.....	96
4.7.1. Area Aplikasi .....	96
4.7.2. Analisis Area Studi Aplikasi.....	98
4.7.3. Studi Kasus Rele Koordinasi .....	105
4.7.4. Prosedur Pemilihan CT yang Tepat Bagi Operasi Rele Digital Arus Lebih Instantaneous .....	113
<b>5. KESIMPULAN.....</b>	<b>114</b>
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>116</b>



## DAFTAR GAMBAR

- Gambar 3.1.Rangkaian Ekuivalen dari Transformer Arus  
Gambar 3.2.Diagram Rangkaian Transformer Arus  
Gambar 3.3.Rangkaian Ekuivalen CT pada Tingkat Eksitasi yang Berbeda  
Gambar 3.4.Bentuk Segmen Linier dari Kurva  $\phi$ -I  
Gambar 3.5.Skematik Diagram dari Rangkaian Pengujian  
Gambar 3.6.Kurva Eksitasi CT Rasio dari Omicron Analyzer  
Gambar 3.7.Langkah Kerja Pembuatan Model CT dengan ATP-EMTP  
Gambar 3.8.Model EMTP dari Transformator Arus TPU 60.11  
Gambar 3.9.Hasil Test Laboratorium  
Gambar 3.10.Perbandingan Tegangan Primer Hasil Lab dan EMTP  
Gambar 3.11.Perbandingan Arus Primer Hasil Lab dan EMTP  
Gambar 3.12.Perbandingan Arus Sekunder Hasil Lab dan EMTP  
Gambar 3.13.Analisa Harmonik dari Keluaran Arus Sekunder Hasil Pengujian Laboratorium dan EMTP  
Gambar 3.14.Model Nonlinier EMTP dari Transformer Arus  
Gambar 3.15.Loop Histeresis CT 1200/5 tap 1200 (Keluaran Subrutin EMTP)  
Gambar 3.16.Injeksi Arus Primer (24.000 RMS Amp)  
Gambar 3.17.Reproduksi Penuh dari Arus Sekunder dengan 8 Ohm  
Gambar 3.18.Permulaan Kejenuhan CT dari Arus Sekunder dengan 13.2 Ohm  
Gambar 3.19.Kejenuhan CT yang Berat dari Arus Sekunder dengan 26.4 Ohm  
Gambar 3.20.Injeksi Arus Primer (24.000 RMS Amp)  
Gambar 3.21.Reproduksi Penuh dari Arus Sekunder (Kasus 1)  
Gambar 3.22.Permulaan Kejenuhan CT dari Arus Sekunder (Kasus 2)  
Gambar 3.23.Kejenuhan CT yang Berat dari Arus Sekunder (Kasus 3)  
Gambar 3.24.Arus Gangguan dengan Komponen AC dan DC  
Gambar 3.25.Model Transformator Arus EMTP unuk Analisa Pengaruh X/R  
Gambar 3.26.Kasus 1(a), Arus Sekunder dengan X/R = 12  
Gambar 3.27.Kasus 1(b), Arus Sekunder dengan X/R = 24  
Gambar 3.28.Kasus 2(a), Arus Sekunder dengan X/R = 12  
Gambar 3.29.Kasus 2(b), Arus Sekunder dengan X/R = 24  
Gambar 3.30.Kasus 3(a), Arus Sekunder dengan X/R = 12  
Gambar 3.31.Kasus 3(b), Arus Sekunder dengan X/R = 24  
Gambar 3.32.Diagram Skematik dari Model Rele Digital  
Gambar 3.33.Program MATHCAD untuk Membuat Model Rele Digital  
Gambar 3.34.Keluaran dari Filter Kosinus pada Rele Digital (Kasus-1)  
Gambar 3.35.Arus Sekunder EMTP (Kasus-2)  
Gambar 3.36.Keluaran Filter Kosinus dari Rele Digital (Kasus-2)  
Gambar 3.37.Arus Sekunder EMTP (Kasus-3)  
Gambar 3.38.Keluaran Filter Kosinus dari Rele Digital (Kasus-3)  
Gambar 4.1.Perangkat Peralatan Pengujian  
Gambar 4.2.Kasus Beban-1, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital  
Gambar 4.3.Respon Rele Digital terhadap Arus yang Diinjeksikan (Kasus-1)  
Gambar 4.4.Simulasi Arus dengan EMTP terhadap Respon Rele pada Kasus-1  
Gambar 4.5.Kasus Beban-2, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital  
Gambar 4.6.Respon Rele Digital Terhadap Arus yang Diinjeksikan (Kasus-2)

Gambar 4.7.Simulasi Arus EMTP Terhadap Respon Rele pada Kasus-2

Gambar 4.8.Kasus-3 Beban, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital

Gambar 4.9.Respon Rele Digital terhadap Arus yang Diinjeksikan (Kasus-3)

Gambar 4.10.Simulasi Arus EMTP Terhadap Respon Rele pada Kasus-3

Gambar 4.11.Respon Rele untuk Tiga Kasus Beban Berbeda, Berbasis pada Pengukuran Arus RMS, yang Terefleksi pada Sisi Primer

Gambar 4.12.Kasus-1 Hubung Singkat Simetris, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital

Gambar 4.13.Respon Rele Digital terhadap Arus Injeksi (Kasus-1)

Gambar 4.14.Simulasi Arus EMTP terhadap Respon Rele pada Kasus-1

Gambar 4.15.Kasus-2 Hubung Singkat Simetris, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital

Gambar 4.16.Respon Rele Digital terhadap Arus Injeksi (Kasus-2)

Gambar 4.17.Simulasi Arus EMTP terhadap Respon Rele pada Kasus-2

Gambar 4.18.Kasus-3 Hubung Singkat Simetris, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital

Gambar 4.19.Respon Rele Digital terhadap Arus Injeksi (Kasus-3)

Gambar 4.20.Simulasi Arus EMTP terhadap Respon Rele pada Kasus-3

Gambar 4.21.Respon Rele untuk Tiga Kasus Hubung Singkat Simetris Berdasarkan Pengukuran Arus RMS

Gambar 4.22.Kasus-1, Gangguan Asimetris dengan  $X/R=24$ , Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital

Gambar 4.23.Respon Rele Digital terhadap Injeksi Arus (Kasus-1)

Gambar 4.24.Simulasi Arus dengan EMTP Terhadap Respon Rele dalam Kasus-1 Terefleksi pada Sisi Primer dari CT 40/5

Gambar 4.25.Kasus-2 Gangguan Asimetris dengan  $X/R$  16, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele digital

Gambar 4.26.Respon Rele Digital terhadap Arus Injeksi (Kasus-2)

Gambar 4.27.Simulasi Arus dengan EMTP Terhadap Respon Rele dalam Kasus-2 Terefleksi pada Sisi Primer dari CT 40/5

Gambar 4.28.Respon Rele untuk Gangguan Asimetris dengan Rasio  $X/R$  yang Berbeda, Kasus-1&2, berdasarkan pada Pengukuran RMS

Gambar 4.29.Gangguan asimetris dengan  $X/R$  24 Kasus-3, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele digital

Gambar 4.30.Respon Rele Digital terhadap Injeksi (Kasus-3)

Gambar 4.31.Simulasi Arus dengan EMTP Terhadap Respon Rele dalam Kasus-3 Terefleksi pada Sisi Primer dari CT 40/5

Gambar 4.32.Gangguan Asimetris dengan  $X/R$  16 Kasus-4, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital

Gambar 4.33.Respon dari Rele Digital terhadap Injeksi Arus (Kasus-4)

Gambar 4.34.Simulasi Arus dengan EMTP Terhadap Respon Rele dalam Kasus-4 Terefleksi pada Sisi Primer dari CT 40/5

Gambar 4.35.Respon Rele untuk Gangguan Asimetris dengan Rasio  $X/R$  yang Berbeda, Kasus-3 &4, berbasis pada Pengukuran RMS

Gambar 4.36.Respons Trip Rele Arus Lebih ABB [36]

Gambar 4.37.Kurva Eksitasi Laboratorium untuk CT 40/5

Gambar 4.38.Respon Rele dengan Seting Instantaneous 87 A untuk Kasus  $X/R$ -3&4

- Gambar 4.39.Studi Kasus dengan  $X/R = 20$ , Beban = 0.1, dan Arus Primer Sebesar 4.761,91 A
- Gambar 4.40.Pengaruh dari Perubahan Beban CT Rasio 40/5 terhadap Rele *Digital Time Delay*
- Gambar 4.41.Pengaruh Gangguan Asimetris pada Rele Digital Waktu Tunda (Kasus 1 & 2) untuk CT Rasio 40/5
- Gambar 4.42.Pengaruh Gangguan Asimetris pada Rele Digital Waktu Tunda (Kasus 3 & 4) untuk CT Rasio 40/5
- Gambar 4.43.Sistem Distribusi Umum dengan CT Rasio Rendah dan Tingkat Hubung Singkat yang Tinggi
- Gambar 4.44.Pengaruh dari Perubahan Beban CT Rasio 20/5 terhadap Rele *Time Delay Digital*
- Gambar 4.45.Pengaruh Gangguan Asimetris pada Rele Digital Waktu Tunda (Kasus 1 & 2) untuk CT Rasio 20/5
- Gambar 4.46.Pengaruh Gangguan Asimetris pada Rele Digital Waktu Tunda (Kasus 3 & 4) untuk CT Rasio 20/5
- Gambar 4.47.*Single Line Diagram* untuk Studi Rele Koordinasi
- Gambar 4.48.Studi Kasus untuk CT rasio 40/5 dengan  $X/R = 6$ , Beban = 0.1  $\Omega$  dan Arus Primer = 12.557A
- Gambar 4.49.Studi Kasus untuk CT rasio 20/5 dengan  $X/R = 6$ , Beban = 0.1  $\Omega$  dan Arus Primer = 4.270A
- Gambar 4.50.Urutan Operasi dari Rele Seting Koordinasi Arus Lebih ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat pada Sisi Motor
- Gambar 4.51.Rele Seting Koordinasi untuk Gangguan Hubung Singkat pada Sisi Trafo Tegangan Rendah
- Gambar 4.52.Urutan Operasi dari Rele Seting Koordinasi Arus Lebih ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat pada Sisi Motor
- Gambar 4.53.Rele Seting Koordinasi untuk Gangguan Hubung Singkat pada Sisi Trafo Tegangan Tinggi

## DAFTAR TABEL

- Tabel 3.1. Percobaan di Laboratorium untuk Mengamati Pengaruh Hubung Singkat pada CT
- Tabel 3.2. Analisa Penyimpangan dari Studi Harmonisa untuk Validasi Model EMTP
- Tabel 3.3. Kasus yang Dilaksanakan untuk Melihat Pengaruh Beban pada CT
- Tabel 3.4. Kasus yang Dilaksanakan untuk Menguji Pengaruh Gangguan Simetris Primer terhadap CT
- Tabel 3.5. Kasus yang Dilakukan untuk Meneliti Pengaruh Rasio X/R terhadap Transformer Current
- Tabel 3.6. Simulasi Kasus terhadap Pemodelan Rele Digital Arus Lebih Instantaneous
- Tabel 4.1. Kasus yang Diterapkan untuk Meneliti Pengaruh Beban terhadap Rele Digital Arus Lebih
- Tabel 4.2. Kasus Dilaksanakan untuk Melihat Pengaruh Gangguan Simetris Primer pada Rele Digital
- Tabel 4.3. Kasus yang Dilakukan untuk Mengamati Pengaruh Rasio X/R pada Rele Digital Arus Lebih
- Tabel 4.4. Waktu Operasi Rele untuk Seting Instantaneous 87 A dengan Rasio X/R sebesar 24 dan 16
- Tabel 4.5. Pengaruh dari Perubahan Beban CT Rasio 40/5 dan Kejenuhan CT pada Waktu Operasi Rele Digital
- Tabel 4.6. Pengaruh Gangguan Asimetris terhadap Rele Digital *Time Delay* (Kasus 1 & 2) untuk CT Rasio 40/5
- Tabel 4.7. Pengaruh Gangguan Asimetris terhadap Rele Digital *Time Delay* (Kasus 3 & 4) untuk CT Rasio 40/5
- Tabel 4.8. Pengaruh dari Perubahan Beban CT Rasio 20/5 dan Kejenuhan CT pada Waktu Operasi Rele Digital
- Tabel 4.9. Pengaruh Gangguan Asimetris terhadap Rele Digital *Time Delay* (Kasus 1 & 2) untuk CT Rasio 20/5
- Tabel 4.10. Pengaruh Gangguan Asimetris terhadap Rele Digital *Time Delay* (Kasus 3 & 4) untuk CT Rasio 20/5

# BAB SATU

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam sistem distribusi listrik, kejenuhan dari pada CT dengan rasio rendah pada lokasi arus gangguan yang tinggi dapat menyebabkan gangguan kerja pada suatu rele arus lebih. Dari berbagai hasil investigasi menyatakan bahwa rele arus lebih bekerja dengan cara yang berbeda selama CT jenuh sehingga karakteristik waktu terhadap arusnya tidak dapat memenuhi karakteristik sesuai dengan yang telah dipublikasikan [1-7]. Permasalahan ini dapat menyebabkan kerugian produksi yang cukup besar pada berbagai industri atau kerusakan pada peralatan listrik yang kritikal. Terdapat panduan dari IEEE untuk aplikasi transformator arus (Standar IEEE C37.110) yang berisi langkah-langkah dalam menghindari pengaruh kejenuhan CT, akan tetapi banyak dari langkah-langkah yang disajikan tersebut menghasilkan CT dengan ukuran besar yang secara praktis dan ekonomis tidak bisa diterima [9]. Pada umumnya, beban kecil yang terhubung ke suatu bus, dengan arus hubungan singkat yang tinggi, biasanya mempunyai CT dengan rasio rendah [10].

### 1.2 Motivasi Penelitian

Dengan adanya perkembangan teknologi *microprocessor* termasuk didalamnya peralatan rele proteksi, dibutuhkan suatu kajian dalam mengidentifikasi kebenaran suatu algoritma elemen proteksi tersebut. Teknologi *microprocessor* perkembangannya tidak sebatas rele proteksi saja, namun teknologi ini sudah menjangkau ke peralatan instrumentasi pengujian untuk berbagai jenis tipe aparatur kelistrikan, termasuk teknologi alat uji rele proteksi dan transformer arus yang berbasis *microprocessor*. Kajian ini dilakukan untuk memverifikasi fungsi peralatan tersebut terhadap standar peraturan yang telah ada dan berhubungan terhadap pemilihan CT.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tesis ini bertujuan menyelidiki perilaku transien dari CT dan dampaknya terhadap rele digital arus lebih dengan tingkat arus gangguan yang tinggi. Di dalam standar ANSI/IEEE C57.13 dan C37.110 tidak ditemukan petunjuk yang jelas terhadap intensitas kejenuhan CT serta dampak yang mungkin terjadi pada operasi rele arus lebih. Oleh karena itu perlu dilakukan penyelidikan terhadap kriteria kejenuhan CT yang telah ditetapkan oleh standar, sehingga dimensi ukuran serta tingkat akurasi dan rasio yang rendah dari CT masih dapat digunakan pada tingkat gangguan hubung singkat yang tinggi.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Dengan adanya kajian ini diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan kajian dan rekomendasi strategis dalam pemilihan CT terhadap level arus hubung singkat yang tinggi, sehingga dapat dijadikan sebagai salah satu bahan referensi dalam memilih CT oleh para “protection engineer” dan pemegang kebijakan dalam upaya menurunkan rasio kegagalan operasi dan “blackout” pada industri atau utiliti mereka.

### 1.5 Batasan Penelitian

Ruang lingkup atau batasan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat model transformator arus *single phase* kelas 10P20, 5VA; dengan melakukan konversi dari data kurva eksitasi  $V_{rms} - I_{rms}$  yang didapatkan dari hasil pengujian sebelumnya menjadi data  $\varphi_{peak} - I_{peak}$  menggunakan sub-rutin “Satura” kemudian menyediakan histeresis tertutup yang dibutuhkan oleh *nonlinier* semu tipe-96 menggunakan sub-rutin “Hysteresis” dengan ATP-EMTP.
2. Menvalidasi model EMTP transformator arus; dengan menciptakan kondisi operasi yang serupa dengan hasil pengujian sesungguhnya di laboratorium Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan Bidang Penelitian Sistem Transmisi dan Distribusi PLN (Persero) pada transformator arus ABB tipe TPU 60.11.

3. Mensimulasi dan menyelidiki pengaruh dari pada kinerja transformator arus kelas C800 terhadap faktor-faktor berikut:
  - Beban sekunder dan pengaruhnya terhadap kejenuhan CT.
  - Level hubung singkat dan dampaknya terhadap operasi CT.
  - Pengaruh rasio X/R (DC Offset) terhadap kejenuhan CT.
4. Mendemonstrasikan dan menyelidiki pengaruh kejenuhan transformator arus terhadap sebuah model rele digital arus lebih dengan metode filter kosinus.
5. Menguji dan menganalisa pengaruh CT jenuh pada suatu rele digital arus lebih merek ABB, sehingga ukuran kinerja dari suatu transformator arus dalam melakukan reproduksi secara akurat arus primer ke dalam sekunder baik bentuk gelombang maupun besaran dapat ditinjau pengaruhnya dari pada komponen AC simetris dan komponen DC Offset.

## 1.6 Sistematika Penelitian

Bab satu dalam tesis ini menyampaikan mengenai latar belakang, motivasi, tujuan, manfaat serta batasan masalah dari pada penelitian. Bab dua dari tesis ini menyajikan satu survei literatur untuk mendokumentasikan perilaku transien dari CT dan rele digital arus lebih dengan tingkat gangguan yang tinggi. Bab 3 menyajikan hasil pengujian arus yang meneliti karakter terhadap rele arus lebih berbasis *microprocessor*. Bab ini juga mendiskusikan teori dan formulasi model dari CT yang akan digunakan untuk mengevaluasi kinerja dari rele proteksi. Rincian validasi model disajikan juga dalam Bab ini, termasuk menggambarkan pemodelan dari rele digital arus lebih pada umumnya dan menyelidiki pengaruh CT terhadap rele yang dimodelkan. Bab 4 mendemonstrasikan dan menyelidiki pengaruh beban sekunder, level hubung singkat, rasio X/R (DC Offset) terhadap perilaku CT. Pengaruh kejenuhan CT terhadap rele arus lebih berbasis *microprocessor* akan dievaluasi dengan cara melakukan berbagai pengujian laboratorium terhadap rele arus lebih tersebut, dan juga termasuk evaluasi yang akan mempertimbangkan operasi dari pada elemen proteksi *instantaneous* dan *time delay* pada rele digital arus lebih. Bab 5 berisi kesimpulan dari hasil evaluasi penyelidikan.

## BAB DUA

### TINJAUAN PUSTAKA

Survei literatur dilakukan untuk meninjau kembali metode pemodelan CT, pengaruh kejenuhan CT dan untuk menyelidiki kriteria CT yang dipublikasikan. Selain dari pada itu, akan disampaikan pula penelitian-pelitan yang mencakup pengaruh kejenuhan CT terhadap rele digital arus lebih.

#### 2.1 Metode Untuk Pemodelan CT

Sebagian besar dari berbagai makalah yang dipublikasikan telah mempertimbangkan penggunaan EMTP dalam memodelkan suatu transformator arus [11-17]. Pemodelan CT sangat penting untuk mempelajari kejenuhan dari pada transformator arus dan pengaruhnya terhadap kinerja rele proteksi. Cukup banyak model inti besi yang telah dipelajari dan dipertimbangkan dan sebagian besar dari penelitian tersebut telah menggunakan EMTP dan *Alternatif Transients Program* (ATP) dengan model induktornya, sebab dengan model tersebut dapat memperoleh hasil yang akurat dan dapat diterima dengan cukup mudah.

EMTP dan ATP menyediakan dua kelas dari unsur-unsur non-linier, yang meliputi model ketidaklinieran sesungguhnya (*true nonlinear*) (Type-93) dan dua model ketidaklinieran semu (*pseudo nonlinear*) (Type-96 dan Type-98). Di model *true nonlinear*, ketidaklinearan dengan jelas didefinisikan sebagai suatu fungsi *nonlinear*. EMTP dan ATP kemudian memecahkan kombinasi dari persamaan *nonlinear* serta ekuivalen sistem yang sesuai dengan masing-masing tahap dengan menggunakan prosedur iterasi Newton Raphson. Kerugian dari metode ini adalah persamaan flux harus disediakan untuk membuat model CT. Dalam model non-linier semu, ketidak linieran didefinisikan sebagai jumlah dari bagian segmen linier. Pada kasus tertentu dari induktor *nonlinier*, setiap tahap flux dimonitor untuk menentukan segmen linier mana yang harus digunakan untuk menghitung induktansi pada tahap tersebut. Metode ini tidak memodelkan ketidak linieran sesungguhnya karena program mengandalkan hasil waktu tahap sebelumnya



untuk memutuskan segmen mana untuk beroperasi selanjutnya. Reaktor non linier Tipe 96, berperan terhadap pengaruh histeresis dalam inti trafo dan memungkinkan untuk menganalisa pengaruh dari flux residu yang tersisa pada CT sesudah terputusnya arus primer. Banyak makalah penelitian menunjukkan bahwa induktor *nonlinier* EMTP (Type-96) sangat efektif dalam meneliti kinerja rele di bawah kondisi transien [11, 12, 15, 16].

## 2.2 Persyaratan IEEE/ANSI untuk Pemilihan Rating CT

Perilaku CT dalam posisi *steady state* dan kondisi gangguan simetris dijelaskan dengan baik dalam standar ANSI/IEEE C57.13-1993 [18]. Standar ini menetapkan kondisi-kondisi untuk desain CT dimana "rating tegangan terminal sekunder transformator arus adalah tegangan yang dikirimkan CT terhadap beban standar pada 20 kali lipat rating arus sekunder tanpa melebihi rasio koreksi 10%. Lagipula, rasio koreksi dibatasi hingga 10% pada tingkat arus apapun dari 1 hingga 20 kali rating arus sekunder pada beban standar yang digunakan untuk rating tegangan terminal sekunder". Bagaimanapun juga, arus asimetris dapat menyebabkan CT menjadi jenuh dengan nilai arus yang jauh lebih kecil dari pada arus simetris tanpa DC offset [19, 20]. Di dalam standar ANSI/IEEE C57.13 dan C37.110 tidak menunjukkan intensitas kejenuhan serta dampak yang mungkin terjadi pada operasi rele arus lebih. Untuk mempelajari dampak kejenuhan CT terhadap peralatan proteksi, diperlukan suatu analisa tambahan [21].

Walaupun terdapat beberapa kepentingan yang mengikat terhadap aplikasi transformator arus bagi rele, hanya sedikit aturan yang ditulis dalam pemilihan rating CT [21]. Suatu standar yang cukup penting yaitu C37.110. 1996, berisi beberapa kaidah pemilihan CT yang secara umum digunakan untuk menghindari kejenuhan AC dan DC adalah sebagai berikut:

Untuk menghindari *AC saturation*, CT harus dapat digunakan pada tegangan jenuh:

$$V_x \geq I_s \cdot Z_s \quad (2.1)$$

**Dimana:**

$I_S$  adalah arus primer dibagi dengan perbandingan lilitan

$Z_S$  adalah beban sekunder CT

$V_X$  adalah tegangan jenuh CT

Rating tegangan terminal sekunder transformator arus adalah tegangan yang akan dikirimkan CT untuk suatu beban standar pada 20 kali lipat rating arus sekunder tanpa melebihi rasio koreksi 10%. Oleh karena itu, persamaan (2.1) dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$20 \geq I_f \cdot Z_b \quad (2.2)$$

**Dimana:**

$I_f$  adalah arus gangguan maksimum dalam per unit rating CT

$Z_b$  adalah beban CT dalam per unit beban standar

Selain dari pada itu, standar C37.110.1996 juga menyoroti kriteria untuk menghindari kejenuhan terhadap komponen DC dalam bentuk gelombang primer sebagai berikut:

$$V_X \geq I_S \cdot Z_S \left(1 + \frac{X}{R}\right) \quad (2.3)$$

**Dimana:**

$X$  dan  $R$  adalah reaktansi serta resistansi sistem primer sampai dengan titik gangguan. Serupa dengan kejenuhan AC, persamaan (2.3) ditulis kembali sebagai berikut:

$$20 \geq \left| \frac{X}{R} + 1 \right| \cdot I_f \cdot Z_b \quad (2.4)$$

**Dimana:**

$I_f$  adalah arus gangguan maksimum dalam per unit rating CT

$Z_b$  adalah beban CT dalam per unit beban standar

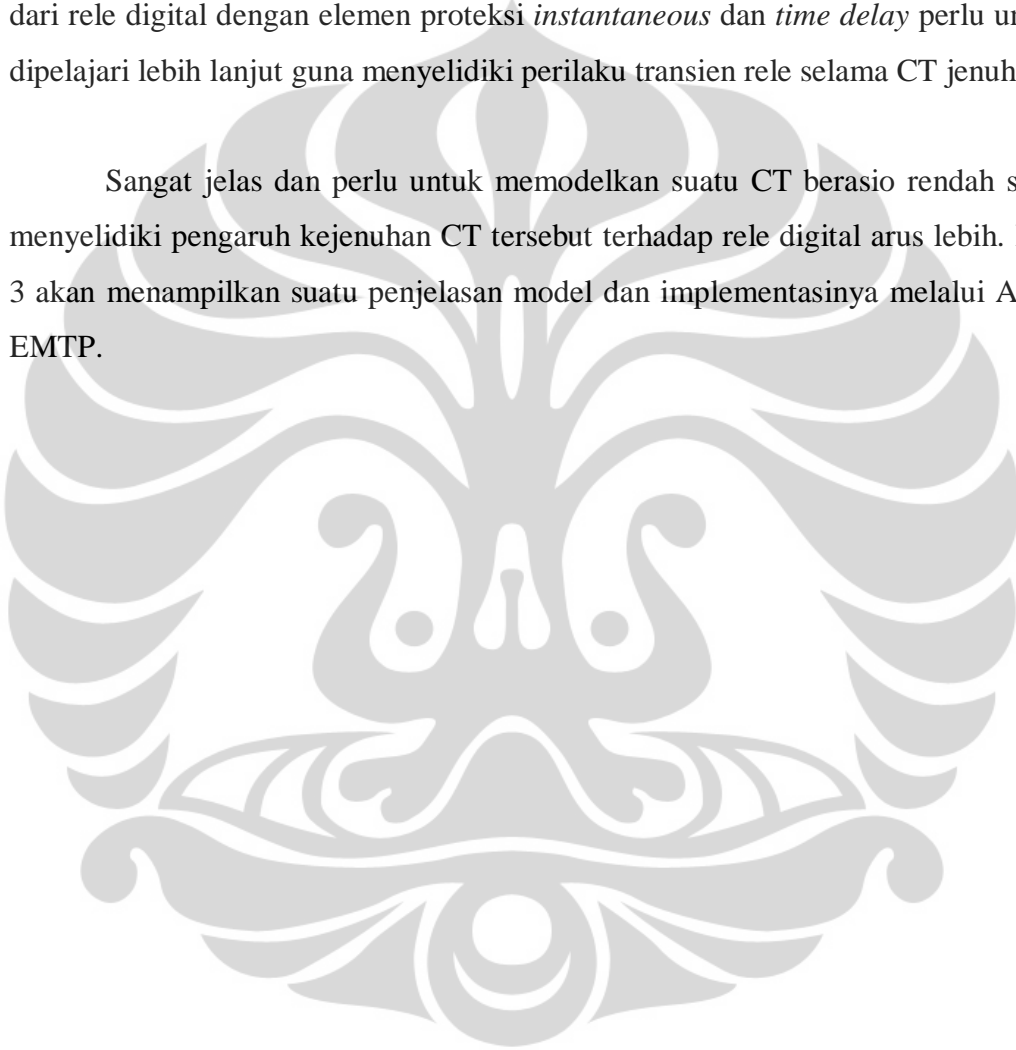
Bagaimanapun juga dengan peraturan dari standar tersebut seringkali CT yang dihasilkan adalah berukuran besar dan tidak praktis, yang tidak dapat diterima secara ekonomis. Oleh karena itu benar adanya dimana CT yang berukuran kecil dan terhubung ke suatu bus dengan arus hubung singkat tinggi, ternyata dapat melebihi 200 kali rating arus primer CT [16]. Standar *IEEE C37.110-1996* tidak memberikan panduan untuk aplikasi lainnya sehingga aturan ini tidak dapat dipergunakan. Inti dengan ukuran kecil, kabel yang panjang, beban yang besar, dan DC Offset akan memicu timbulnya kejenuhan CT [21]. Selain dari pada itu, standar tersebut di atas tidak menentukan intensitas kejenuhan CT serta pengaruhnya terhadap rele arus lebih.

### **2.3 Pengaruh Kejenuhan CT Terhadap Rele Arus lebih**

Banyak makalah yang telah menyelidiki penyimpangan bentuk gelombang yang berhubungan dengan kejenuhan CT dan pengaruhnya terhadap rele elektromekanik arus lebih [1-7], akan tetapi rele jenis ini dianggap telah usang dan tidak diproduksi lagi. Sebagai alternatifnya, untuk instalasi listrik baru dilakukanlah instalasinya dengan menggunakan rele yang berbasis *microprocessor*. Hanya sedikit makalah yang telah memperhitungkan pengaruh dari kejenuhan CT terhadap rele berbasis *microprocessor* [13, 22]. Operasi dari rele berbasis *microprocessor* ini belum dipahami sepenuhnya terhadap pengaruh CT jenuh pada saat terjadi arus gangguan yang besar. Hal ini menyebabkan kebutuhan untuk melakukan penelitian terhadap perilaku transien dari pada rele tersebut selama CT jenuh. Kojovic telah mempertimbangkan pengaruh penyimpangan bentuk gelombang, terhadap rele proteksi, termasuk rele berbasis *microprocessor*. Makalah tersebut berusaha menunjukkan, secara teoritis dan melalui test laboratorium, terhadap pengaruh dari pada harmonisa terhadap berbagai jenis rele proteksi [13]. Ditunjukkan pula bahwa kinerja rele tersebut dipengaruhi oleh DC offset dan kejenuhan CT. Selain itu, tidak ada panduan yang menyediakan dalam suatu literatur dengan jelas dan praktis dalam memilih CT, untuk memastikan kinerja suatu rele arus lebih.

Dalam banyak kasus, CT yang telah jenuh dapat gagal dalam mengirim suatu reproduksi sesungguhnya dari arus primer selama tingkat gangguan yang tinggi, oleh karena itu dapat menyebabkan suatu operasi yang tidak diinginkan. Salah satu dari bahasan yang paling penting adalah mencakup CT berasio rendah dalam suatu area sistem tegangan rendah, terutama sekali dalam aplikasi penggunaan rele pada *metal enclosed switchgear* 2.4-13.8 kV [1, 3, 10]. Operasi dari rele digital dengan elemen proteksi *instantaneous* dan *time delay* perlu untuk dipelajari lebih lanjut guna menyelidiki perilaku transien rele selama CT jenuh.

Sangat jelas dan perlu untuk memodelkan suatu CT berasio rendah serta menyelidiki pengaruh kejenuhan CT tersebut terhadap rele digital arus lebih. Bab 3 akan menampilkan suatu penjelasan model dan implementasinya melalui ATP-EMTP.



## BAB TIGA

### IMPLEMENTASI MODEL TRANSFORMATOR ARUS

Bab ini mendiskusikan teori dan formulasi model dari suatu transformator arus dalam mengevaluasi kinerja rele proteksi. Hanya sedikit makalah dan penelitian yang telah membahas kinerja serta respon rele arus lebih berbasis *microprocessor* ini terhadap kejenuhan CT. Rele jenis ini menjalankan suatu algoritma dalam prosedur matematis sehingga dapat menghasilkan fungsi analisa karakteristik yang dapat dengan mudah digambarkan oleh suatu persamaan. Kunci dari perilaku rele berbasis *microprocessor* berada pada perhitungan dan respon pengukuran dari pada transformator arus dengan filter digital dan kemampuannya untuk membandingkan respon penyimpangannya terhadap gelombang sinusoidal ideal. Oleh karena itu, transformator arus dan pemodelan rele merupakan hal yang sangat penting untuk mengevaluasi kinerja suatu peralatan proteksi.

Bab ini menjelaskan sekumpulan perangkat lunak yang digunakan untuk menguji perilaku dan kinerja transformator arus. Perangkat-perangkat tersebut adalah sebagai berikut:

- Alternatif Transients Program (ATP) dari Electromagnetic Transient Program (EMTP) digunakan untuk implementasi model transien transformator arus.
- ATPDraw adalah suatu pra-prosesor berbasis grafik antarmuka Windows dari ATP. Rangkaian transformator arus dan model dapat digambar dengan cara memilih komponen yang tersedia dalam program. Kemudian ATPDraw akan menciptakan berkas sebagai masukan untuk menjalankan ATP.
- Program prosesor output (TOP) adalah suatu *post processor* berbasis grafik untuk data transien yang akan digunakan untuk mengkonversi keluaran dari program ATPDraw menjadi berkas teks untuk memudahkan penggunaan dalam hubungannya dengan perangkat lunak MATHCAD yang digunakan untuk pemodelan rele digital.

### 3.1 Analisis Transien Transformator Arus

Rangkaian ekuivalen dari suatu transformator arus diperlihatkan dalam Gambar 3.1 [23-29]. Untuk CT ideal, CT tersebut beroperasi dengan suatu keseimbangan belitan ampere:

$$I_p \cdot N_p = I_s \cdot N_s \quad (3.1)$$

Dimana:

$I_p, I_s$  adalah arus CT primer dan sekunder

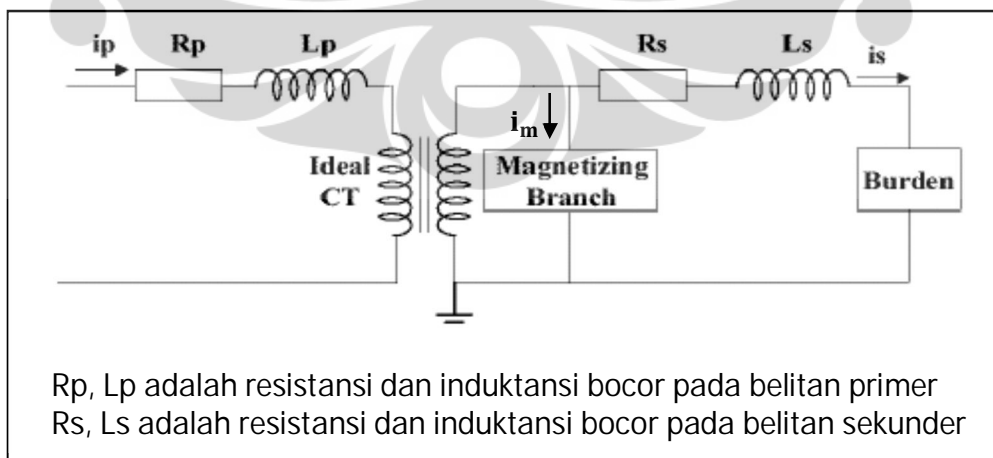
$N_p, N_s$  adalah jumlah belitan primer dan sekunder

CT sesungguhnya tidak berperilaku sebagai suatu trafo arus ideal. Tegangan sekunder CT dihasilkan oleh tingkat perubahan flux dalam inti. Untuk menghasilkan flux dalam inti CT, dibutuhkan arus magnetisasi (eksitasi). Hal ini menyebabkan adanya penyimpangan (*errors*) rasio dan fasa. Oleh karena itu, persamaan dari CT sesungguhnya dapat ditulis menjadi:

$$I'_p = I_s + I_m \quad (3.2)$$

Dimana:

$I'_p$  adalah arus primer mengacu pada sekunder, dan  $I_m$  adalah arus magnetisasi.



**Gambar 3.1** Rangkaian Ekuivalen dari Transformator Arus

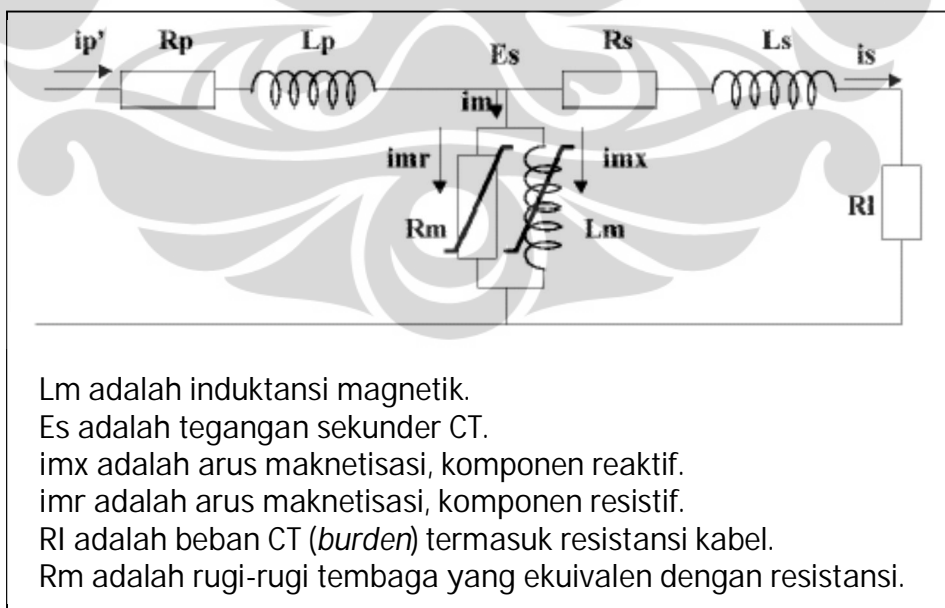
Dalam kondisi *steady state*, semua kinerja transformator arus dapat diukur dengan menggunakan persamaan fundamental (3.3).

$$E = 4.44 \cdot B_S \cdot A \cdot N \cdot f \quad (3.3)$$

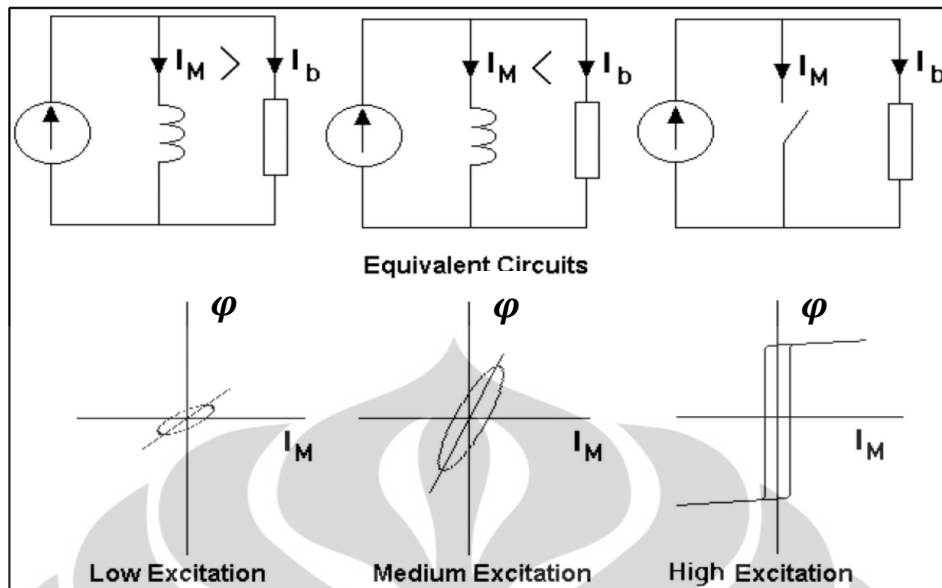
**Dimana:**

$B_S$  adalah kerapatan flux maksimum dalam inti (Telsa),  $A$  adalah luas penampang efektif inti ( $m^2$ ),  $N$  adalah rasio trafo, dan  $f$  adalah frekuensi system (Hz). Penggunaan persamaan fundamental trafo akan bermanfaat bila tersedia informasi terhadap karakteristik kerapatan flux besi CT dan luas penampang. Informasi-informasi tersebut seringkali tidak tersedia.

Untuk tujuan analisa transien, rangkaian ekuivalen telah dijabarkan kembali pada Gambar 3.2, guna menyelidiki perilaku non-linier dari CT. Kaki magnetisasi dari transformator arus dapat direpresentasikan oleh Gambar 3.3 dalam memvisualisasikan fenomena non-linier dari rangkaian magnetisasi. Untuk setiap tingkat eksitasi, digunakan suatu nilai reaktansi yang berbeda. Dalam Gambar 3.3, diperlihatkan tiga diagram B-H, antara flux dan arus magnetisasi  $I_m$ , yang mewakili tingkat eksitasi rendah, menengah, dan tinggi.



**Gambar 3.2** Diagram Rangkaian Transformator Arus



**Gambar 3.3** Rangkaian Ekuivalen CT pada Tingkat Eksitasi yang Berbeda

Pada eksitasi rendah, kemiringan  $d\phi/dI$  merepresentasikan induktansi yang rendah. Kemiringan yang rendah ini merepresentasikan arus magnetisasi yang tidak sebanding terhadap arus beban pada eksitasi rendah. Pada eksitasi menengah,  $d\phi/dI$  relatif lebih tinggi dan arus magnetisasi adalah lebih kecil dibandingkan dengan arus beban. Pada eksitasi tinggi, kemiringan adalah tanpa batas dan merupakan konsep dari pada kerusakan impedansi secara keseluruhan. Semua yang tampak adalah daerah *loop hysteresis* yang mewakili rugi-rugi seperti yang terlihat pada Gambar 3.3 dan jika tidak, hanya ada suatu perubahan dalam flux yaitu dari  $-\phi$  menjadi  $\phi$ . Perubahan berlangsung selama sebagian siklus arus. Fakta menyatakan bahwa arus magnetisasi terbukti begitu kecil dibandingkan dengan rasio arus selama transisi dan dapat diabaikan. Karena itu, peristiwa kejenuhan ini dapat dengan baik direpresentasikan oleh *volt time switch* seperti diperlihatkan gambar diatas, yang terbuka selama terjadi tingkat perubahan flux dan menutup selama jenuh [1, 23]. Daerah volt-waktu dari gelombang tegangan beban merepresentasikan flux terhadap persamaan berikut ini:

$$V = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \tag{3.4}$$



### 3.2 Model Matematis Dari Representasi Inti Magnetik

Ukuran dari suatu kinerja transformator arus merujuk pada kemampuannya untuk melakukan reproduksi secara akurat dari arus primer dalam ampere sekunder, baik dalam bentuk gelombang dan dalam *magnitude*. Terdapat dua bagian yaitu (1) kinerja dalam komponen AC simetris, dan (2) kinerja dalam komponen DC offset [27]. CT dengan teknologi yang terkini dapat melakukan sesuatu yang luar biasa dalam mereproduksi bentuk gelombang selama belum terjadi kejenuhan. Pengaruh utama non-linier dalam inti besi adalah kejenuhan, arus eddy, dan histeresis [16]. Karena itu, banyak penyelidikan dilakukan untuk mempelajari ketidak linieran dalam suatu transformator arus dan pengaruh dari kejenuhan CT terhadap rele proteksi [30, 31, 32].

Untuk dapat secara akurat membuat model transformator arus, dua hal berikut yang harus dilakukan:

1. Konversi dari data kurva eksitasi  $V_{rms} - I_{rms}$  menjadi data  $\phi_{peak} - I_{peak}$  dengan mengabaikan *loop hysteresis*.
2. Menyediakan data *loop hysteresis* yang diperlukan oleh model reaktor semu non-linier tipe 96.

Algoritma untuk menghitung karakteristik kejenuhan dari inti besi trafo telah dibuktikan oleh berbagai makalah yang berbeda melalui pengukuran laboratorium [11]. Seperti terlihat pada Gambar 3.3, cabang eksitasi direpresentasikan oleh suatu induktansi *nonlinier* yang diparalel dengan suatu resistansi *nonlinier*. Karakteristik non-linier dihitung sesuai dengan asumsi berikut:

- Kurva  $\phi$ -I adalah simetris terhadap titik awalnya ( $L_k$  merupakan kemiringan segmen k dari kurva  $\phi$ -I).
- Resistansi belitan dan induktansi bocor diabaikan dalam analisa ini.

Suatu algoritma yang menggunakan titik-titik data  $V_{rms} - I_{rms}$  dari pada kurva eksitasi sekunder CT digunakan untuk menghitung nilai puncak kurva  $\phi$ -I

yang hasilnya adalah suatu bagian model linier karena hanya sejumlah kecil dari titik-titik data yang telah digunakan, biasanya 10 atau kurang.

Konversi dari nilai tegangan rms terhadap flux hanyalah suatu prosedur penskalaan kembali. Untuk setiap segmen linier di kurva  $\varphi$ -I,

$$\varphi_k = \frac{\sqrt{2}}{\omega} \cdot V_k \quad (3.5)$$

Dengan asumsi  $\varphi_k(\theta) = \varphi_k \sin \theta$ , maka untuk segmen, arus puncak diperoleh dengan cara mengevaluasi  $I_{k-rms}$  setiap segmen k, menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} I_{k-rms}^2 &= \frac{2}{\pi} \left( \int_0^{\theta_1} \left( \frac{\varphi_k \sin \theta}{L_1} \right)^2 d\theta \right. \\ &\quad + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left( I_1 + \frac{\varphi_k \sin \theta - \varphi_1}{L_2} \right)^2 d\theta + \dots \\ &\quad \left. + \int_{\theta_{k-1}}^{\pi/2} \left( I_k + \frac{\varphi_k \sin \theta - \varphi_{k-1}}{L_k} \right)^2 d\theta \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

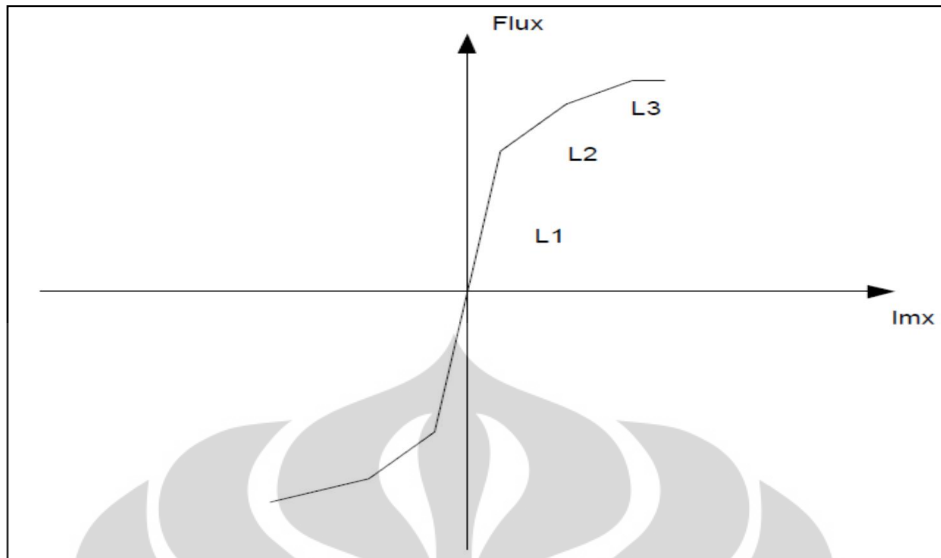
Dalam Gambar 3.4 hanya segmen terakhir  $L_k$  yang tidak diketahui. Oleh karena itu, persamaan dapat ditulis ulang dalam bentuk:

$$a_{1k} Y_k^2 + b_{1k} Y_k + c_{1k} = 0 \quad (3.7)$$

Jika konstanta  $a_{1k}$ ,  $b_{1k}$ , dan  $c_{1k}$  diketahui,  $Y_k = 1/L_k$  dapat dihitung.  $Y_k$  selanjutnya dapat diselesaikan dari persamaan 3.7 dan harus bernilai positif. Arus puncak  $i_{1k}$  dihitung menurut persamaan berikut dan diperlihatkan oleh Gambar 3.4:

$$i_k = i_{k-1} + Y_k (\varphi_k - \varphi_{k-1}) \quad (3.8)$$

Kemudian, satu titik dimasukkan ke dalam *HISTERESIS subroutine* pada ATP untuk dapat memberikan data *loop* histeresis. Rutin berisi lintasan yang sudah ditentukan dalam bidang  $\varphi$ -I untuk memutuskan jalur yang mengikutinya ketika flux meningkat ataupun berkurang [33].

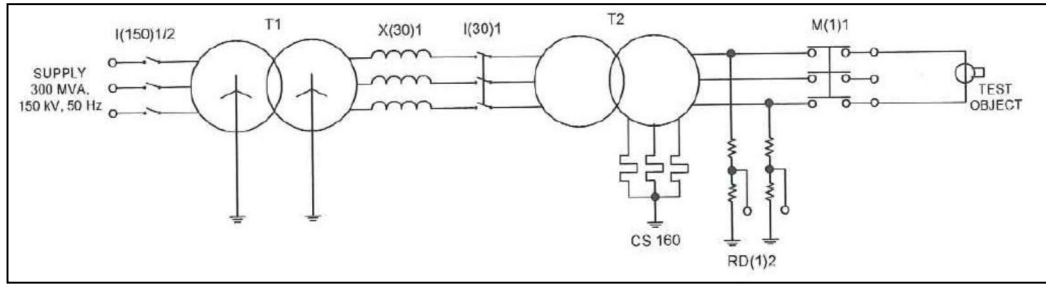


**Gambar 3.4** Bentuk Segmen Linier dari Kurva  $\phi$ -I

### 3.3 Validasi Model EMTP Transformator Arus

Untuk membuat kondisi operasi yang serupa seperti pada pengukuran sesungguhnya, maka tes laboratorium dilaksanakan untuk memvalidasi model tersebut. Peralatan penguji sistem injeksi primer digunakan untuk melaksanakan berbagai jenis pengujian terhadap transformator arus. Dalam *set-up* pengujian, peralatan berbasis *microprocessor* digunakan dalam hal pengujian tersebut untuk melacak dan menangkap sinyal sekunder dari pada transformator arus. Gambar 3.5 memperlihatkan *setup* pengujian.

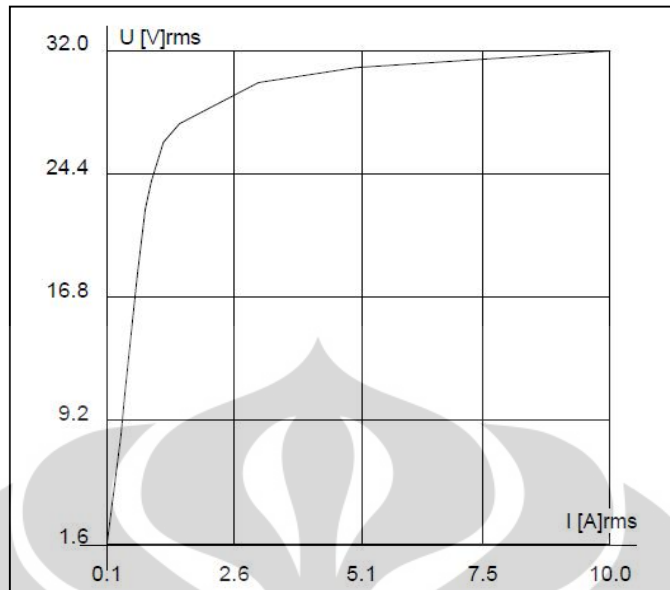
Transformator arus ABB tipe TPU 60.11 dengan rasio 40/5 kelas 10P20 diuji dalam Laboratorium di Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan Bidang Penelitian Sistem Transmisi dan Distribusi PLN (Persero). Transformator arus diarahkan untuk mencapai jenuh dan arus sekunder yang ditangkap oleh fitur *Digital Events Recording* berbasis *microprocessor* kemudian dibandingkan dengan hasil dari EMTP. Data hasil pengujian laboratorium dibandingkan dengan hasil EMTP guna memvalidasi hasilnya dan untuk memastikan keberadaan pemodelan yang sesuai dengan transformator arus yang ada.



**Gambar 3.5** Skematik Diagram dari Rangkaian Pengujian

Sebelumnya, pengujian kurva eksitasi pada CT telah dilakukan terhadap transformator arus tipe TPU 60.11 untuk memperoleh kurva eksitasi tersebut yang ada dengan menggunakan OMICRON (CT Analyzer). Pengujian dilakukan dengan cara menyuntikan arus di sisi primer CT rasio 40/5 kemudian pengukuran dari pada kurva  $V - I$  dilakukan sesuai dengan standar ANSI/IEC 60044. Kurva eksitasi  $V_{rms} - I_{rms}$  diperlihatkan dalam Gambar 3.6.

Beban dari suatu transformator arus, seperti yang ditentukan dalam standar IEEE C37-110, adalah merupakan suatu properti dari rangkaian yang terhubung ke lilitan sekunder, sehingga dapat menentukan daya aktif dan reaktif pada sisi terminal sekunder. Beban dinyatakan baik sebagai total impedansi *ohms*, bersama dengan komponen resistansi dan reaktansi, atau sebagai total *volt ampere* dan faktor daya peralatan sekunder yang menjurus pada nilai yang ditentukan dari frekuensi serta arus. Ketelitian CT didefinisikan oleh standar IEEE C37-110-1996, adalah sejauh mana arus pada rangkaian sekunder mampu mereproduksi arus pada rangkaian primer dan ini dinyatakan dengan rasio. Kelas ketelitian dapat diperoleh dengan perhitungan atau dengan cara pengujian, diikuti oleh tegangan terminal sekunder minimum dimana transformator akan menghasilkan 20 kali rating arus sekunder dengan beban standar tanpa melebihi batas kelas akurasi (10%).



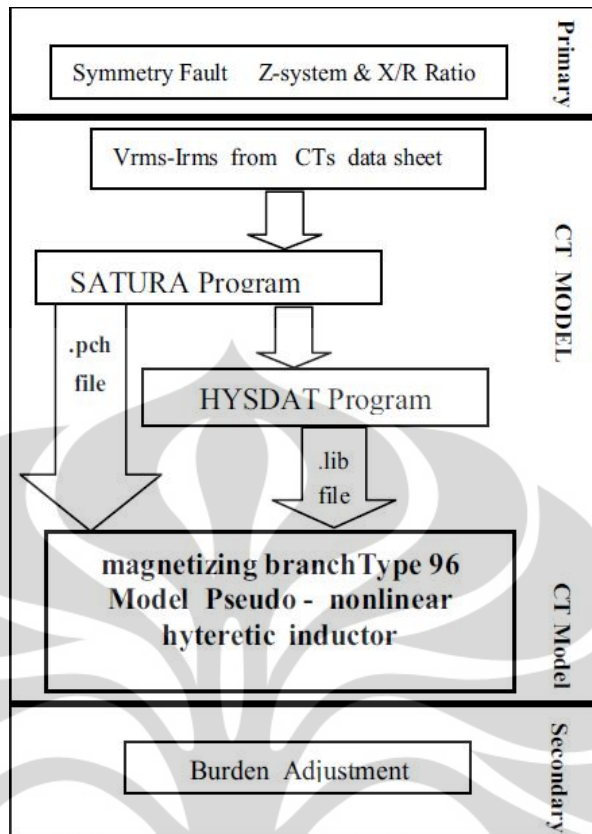
**Gambar 3.6** Kurva Eksitasi CT Rasio 40/5 dari Omicron Analyzer

Transformator arus yang dipilih untuk pengujian mempunyai kelas 10P20, 5VA. Oleh karena itu, beban maksimum adalah 0.2 ohm. Beban ini tidak meliputi resistansi sekunder dari pada transformator arus. Tabel 3.1, memperlihatkan pengaruh dari beban yang terhubung dengan transformator arus dan kemampuannya untuk melakukan reproduksi sinyal primer terhadap sisi sekunder. Beban standar yang mencakup faktor daya, dengan perhitungan yang sederhana untuk tegangan terminal sekunder  $V_s$  juga turut dipertimbangkan. Beban yang diperlihatkan dalam Tabel 3.1 adalah beban total, mencakup resistansi sekunder dari CT, resistansi kawat, dan resistansi variabel.

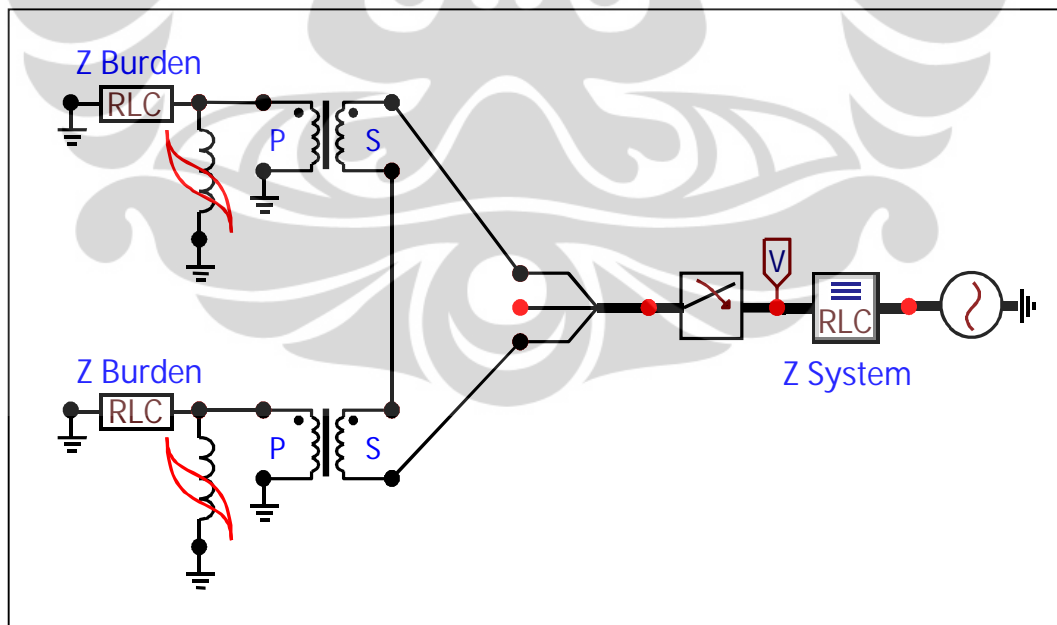
**Tabel 3.1** Percobaan di Laboratorium untuk Mengamati Pengaruh Hubung Singkat pada CT

Ijeksi Arus Primer	Total Beban (Ohm)			Pengaruh pada Arus Sekunder
	Kasus	R	X	
328 x Rating Arus CT (13.120 RMS Current)	Short Time	0.16	0.12	Kejenuhan yang besar pada CT
Sesuai standar IEEE/ANSI C37.110, tegangan jenuh adalah; $V_S = I_S * (R_S + Z_b) = 1640*(0.2) = 328V$				terefleksi pada arus sekunder yang kecil

Gambar 3.7 menunjukkan langkah kerja dalam proses pemodelan CT dengan menggunakan ATP-EMTP. Adapun langkah kerja proses pemodelan CT dimulai dari konversi data kurva eksitasi  $V_{rms} - I_{rms}$  menjadi  $\phi_{peak} - I_{peak}$  menggunakan subrutin “satura”. Kemudian nilai tertinggi  $\phi_{peak} - I_{peak}$  digunakan oleh subrutin “Hysteresis” untuk diskala kembali membentuk *loop hysteresis* yang digunakan sebagai masukan bagi induktor *nonlinier* semu tipe 96. Setelah itu baru kemudian dilakukan simulasi sesuai dengan uji CT sebenarnya di laboratorium. Gambar 3.8 memperlihatkan model CT pada EMTP (*Type-96*) dan *saturable transformer* untuk menghasilkan keluaran yang serupa dengan hasil uji di laboratorium. Gambar 3.9 memperlihatkan respon transien CT yang diperoleh secara percobaan di laboratorium dengan nilai beban dan arus primer yang telah ditentukan.



**Gambar 3.7** Langkah Kerja Pembuatan Model CT dengan ATP-EMTP

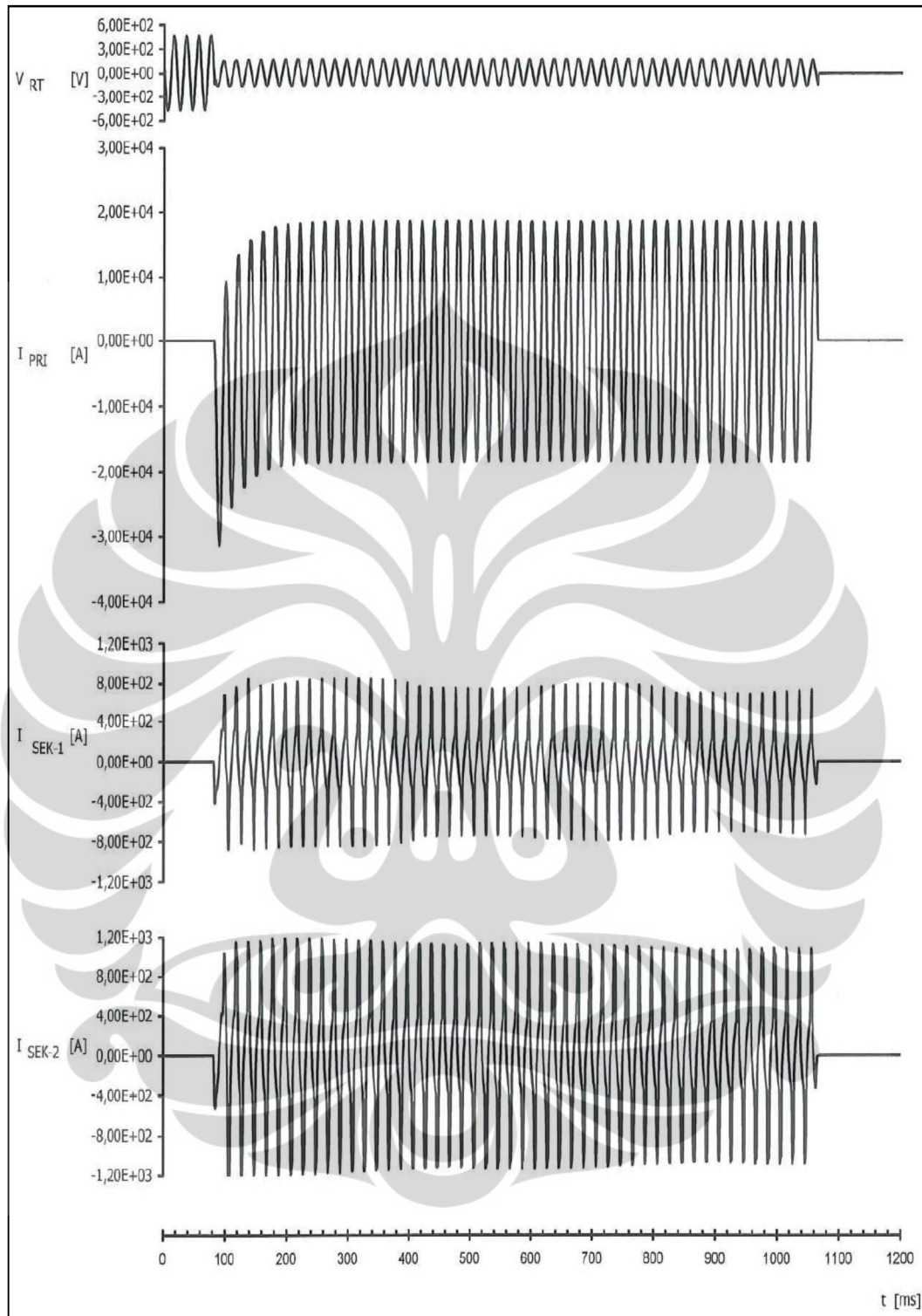


**Gambar 3.8** Model EMTP dari Transformator Arus TPU 60.11

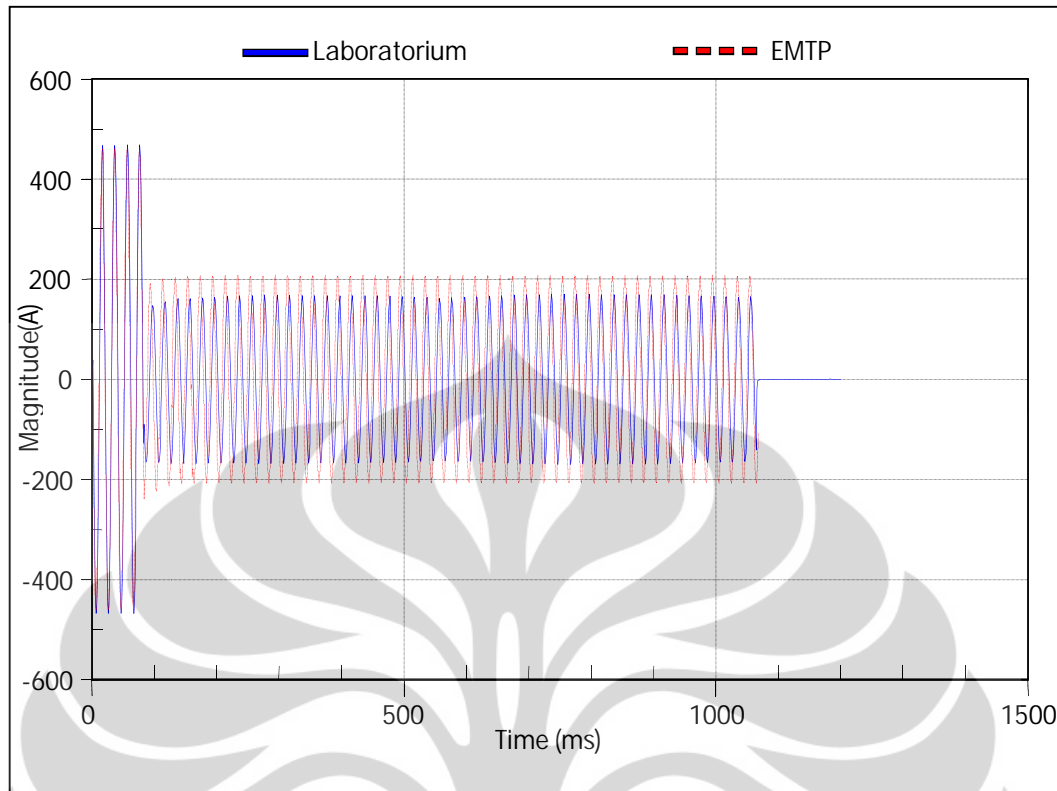
Pengaruh dari kejenuhan CT diperlihatkan pada arus primer yang dengan jelas tidak direproduksi di sekunder. Dalam model EMTP, digunakan data dan parameter eksperimental yang sama, termasuk beban sekunder aktual. Analisa dari hasil EMTP menunjukkan bahwa respon transien CT yang diperoleh dengan menggunakan model CT tersebut memberikan hasil yang cukup memuaskan dan mendekati nilai aktual. Gambar 3.10-3.12 membandingkan antara hasil laboratorium dan model EMTP.



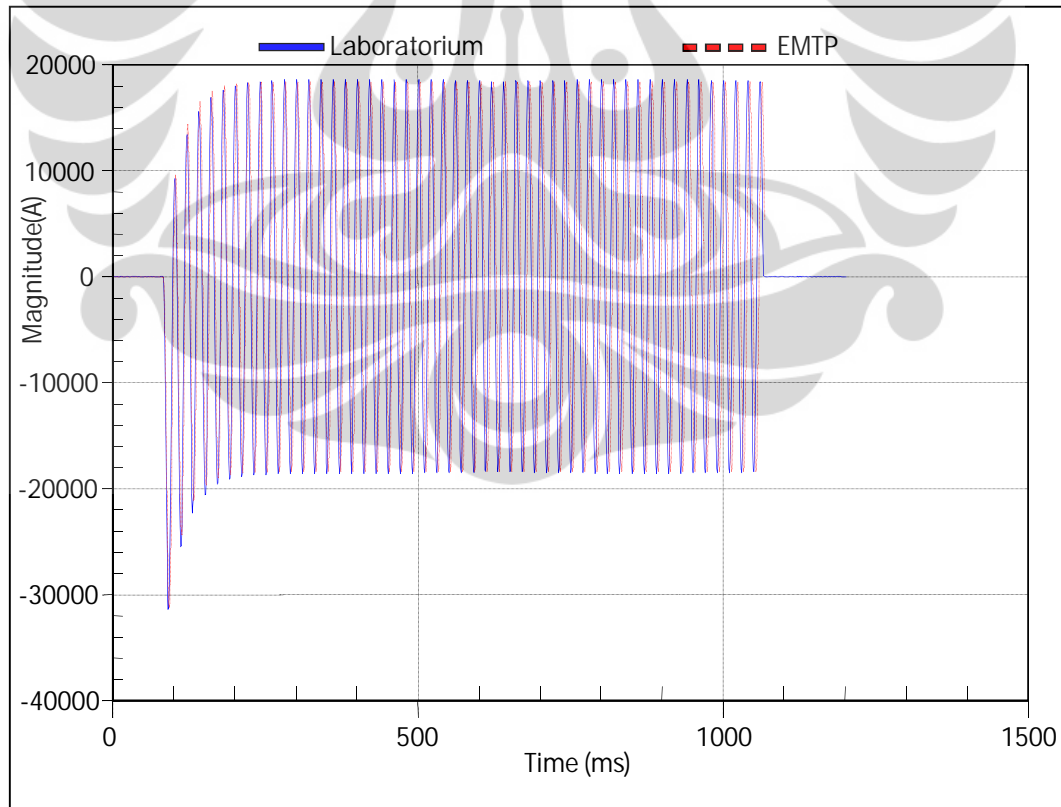




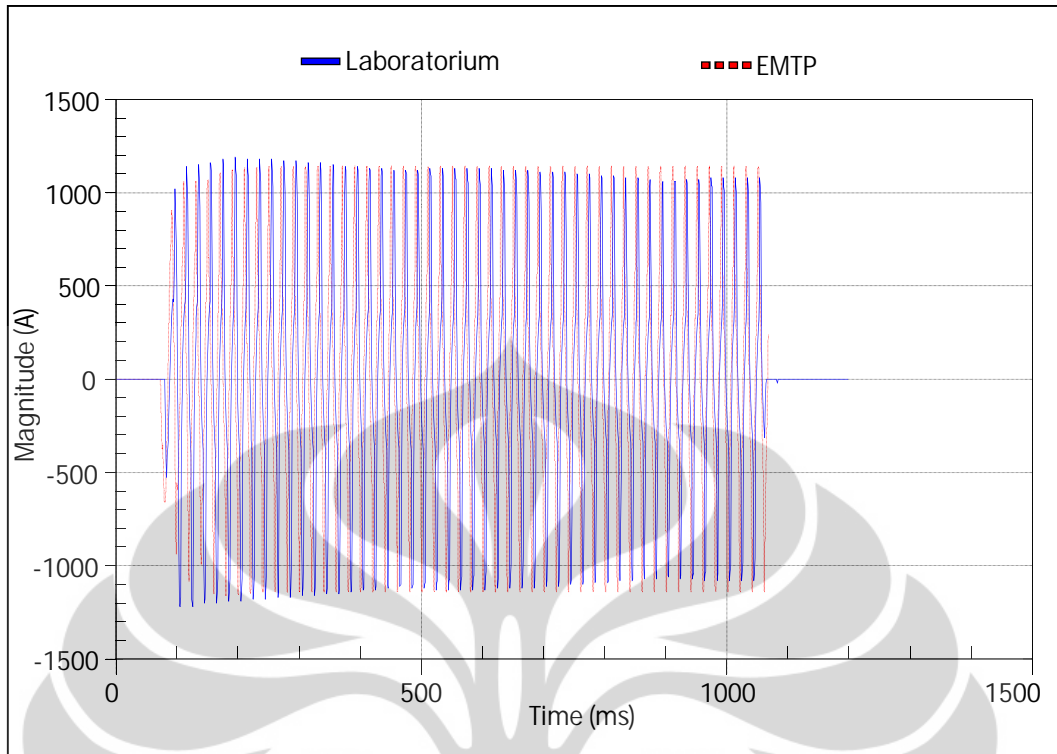
**Gambar 3.9** Hasil Test Laboratorium



**Gambar 3.10** Perbandingan Tegangan Primer Hasil Lab dan EMTP

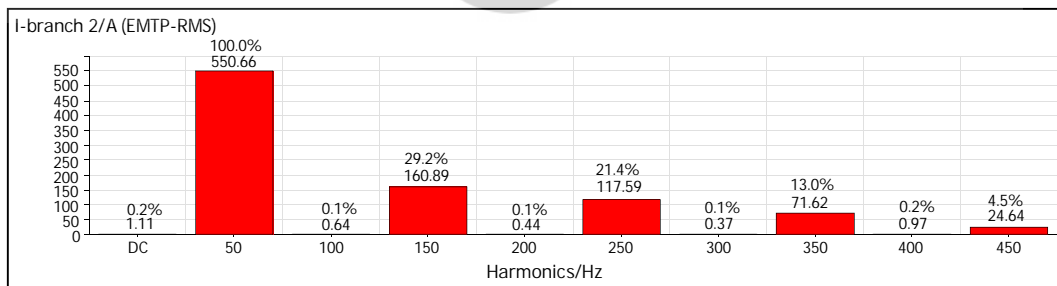
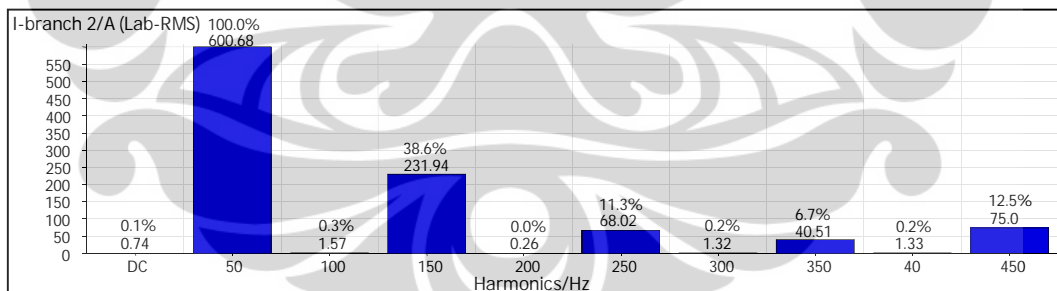


**Gambar 3.11** Perbandingan Arus Primer Hasil Lab dan EMTP



**Gambar 3.12** Perbandingan Arus Sekunder Hasil Lab dan EMTP

Analisa harmonisa dengan menggunakan EMTP, dilakukan untuk membandingkan respon transien CT antara hasil pengujian dan pemodelan.



**Gambar 3.13** Analisa Harmonisa dari Keluaran Arus Sekunder Hasil Pengujian Laboratorium dan EMTP

Untuk meneliti harmonisa dari hasil EMTP dan laboratorium, suatu analisa harmonisa dilakukan pada nilai keluaran dari pada arus dengan cara mengukur faktor total harmonik distorsi (THD) sesuai standar IEEE 519-1992 [35]. THD didefinisikan sebagai perbandingan dari jumlah kandungan *root mean square* harmonisa terhadap nilai *root mean square* fundamental, yang dinyatakan sebagai persentase *fundamental*. THD dapat dihitung melalui rumus berikut:

$$THD = \sqrt{\frac{\text{jumlah semua kuadrat amplitudo dari seluruh arus harmonik}}{\text{kuadrat dari amplitudo arus fundamental}}} \quad (3.9)$$

Sinyal keluaran dari arus, yang diperoleh melalui pengujian laboratorium dan simulasi EMTP mengandung harmonisa, sebagaimana yang diperlihatkan dalam Gambar 3.13 yang hubungannya dengan pengaruh kejenuhan CT sehingga perlu dilakukan pula perhitungan THD untuk kasus tersebut. Tabel 3.2 menyoroti tingkat THD pada kasus tersebut. Hasilnya menunjukkan bahwa perhitungan faktor harmonisa untuk sinyal yang disimulasikan lebih rendah dari hasil pengujian laboratorium. Hal ini disebabkan oleh pengaruh “high oscillation” yang terjadi pada setiap segmen pengukuran yang ditangkap oleh *Disturbance Event Recorder* (DER) yang memiliki respon yang rendah dan tanpa proses filter yang baik.

**Tabel 3.2** Analisis Penyimpangan dari Studi Harmonisa untuk Validasi Model EMTP

Kasus	Faktor Distorsi (THD) sesuai IEEE 519-1992		
	Hasil Lab	Hasil EMTP	Perbedaan
Short Time - SEK 2	42.67%	38.72%	3.95%

Perbandingan antara respon transien yang diperoleh melalui test laboratorium pada CT sebenarnya dan yang diperoleh melalui simulasi dengan menggunakan EMTP mengungkapkan hal-hal sebagai berikut:

- Model CT berbasis EMTP, menggunakan model induktor *nonlinier* (*Type-96*) merupakan cara yang mudah guna mensimulasikan transien gangguan untuk

studi rele. Model ini dapat dengan mudah dihubungkan ke suatu model EMTP dari sistem jaringan tenaga.

- Kandungan harmonisa dari sinyal keluaran baik terhadap hasil pengujian laboratorium maupun simulasi membuktikan tercapainya suatu pemodelan CT yang dapat diterima.
- Model CT, yang menggunakan elemen *Type-96* bersifat sensitif terhadap pemilihan titik jenuh yang dibutuhkan untuk pembangkitan histeresis. Titik tersebut tidak secara tepat bisa ditentukan dengan kurva  $V - I$ . Titik yang dipilih dalam kejenuhan yang lebih dalam, memberikan hasil yang memuaskan dan mendekati nilai sebenarnya.
- Model CT yang dikembangkan EMTP dapat secara efektif digunakan untuk menguji rele digital karena model tersebut menyediakan representasi yang sangat akurat terhadap kinerja CT sebenarnya.

Setelah berhasil memvalidasi model CT yang dikembangkan oleh EMTP, model tersebut akan digunakan dalam mendemonstrasikan dan menyelidiki pengaruh beban sekunder, *level* hubung singkat, rasio  $X/R$  (*DC Offset*) terhadap perilaku CT.

### **3.4 Analisa Kinerja Transformer Arus Menggunakan Model EMTP**

Model CT dari EMTP yang telah dikembangkan dan divalidasi sebelumnya, digunakan untuk mendemonstrasikan dan menyelidiki pengaruh dari pada faktor-faktor berikut:

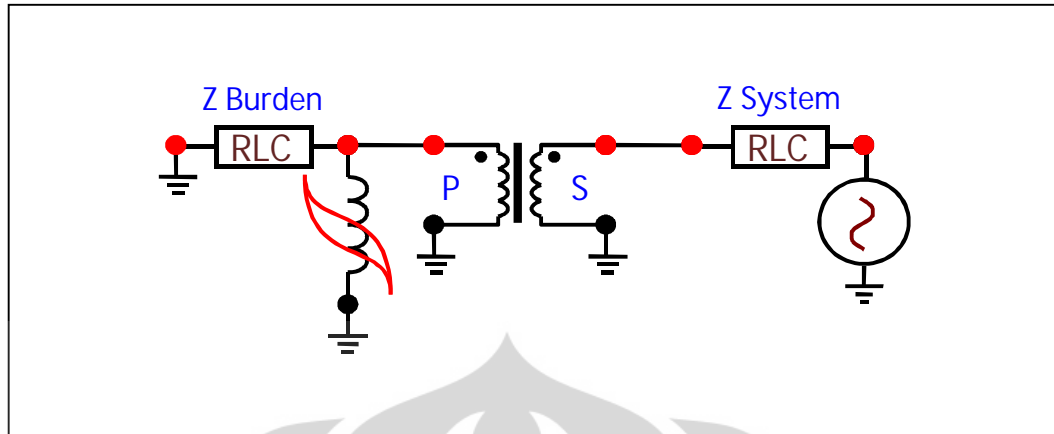
- Beban sekunder serta pengaruhnya terhadap kejenuhan CT.
- *Level* hubung singkat dan dampaknya terhadap operasi CT.
- Pengaruh rasio  $X/R$  (*DC Offset*) terhadap kejenuhan CT.

Penelitian item-item diatas akan memberikan bantuan penting yang diperlukan untuk dapat mengetahui pengaruh CT terhadap rele proteksi dan sebagai suatu sistem proteksi pada akhirnya. Pemahaman penuh terhadap perilaku CT ternyata memudahkan penyelidikan serta evaluasi respon rele digital arus

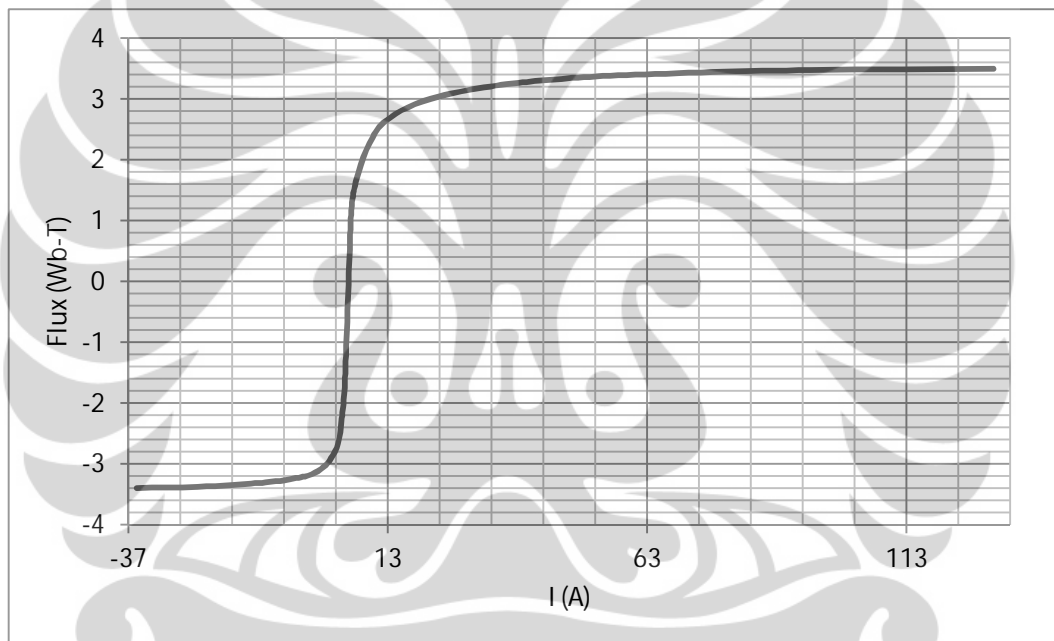
lebih terhadap kejadian transien. Untuk tujuan analisa tersebut, digunakan CT multi rasio (1200/5), kelas C800 dengan tap 1200 guna menguji pengaruh faktor-faktor tersebut di atas. Gambar 3.14 dan 3.15 memperlihatkan model non-linier EMTP (*Type-96*) untuk CT serta loop histeresis yang dikembangkan untuk CT 1200/5 pada tap 1200. Model non-linier EMTP terdiri dari suatu transformator ideal dan induktor *nonlinier* untuk turut memperhitungkan ketidak linieran suatu transformator arus. Beban dari CT direpresentasikan oleh rangkaian seri resistor dan reaktor seperti diperlihatkan dalam model. Bagian segmen linier dari loop histeresis, ditampilkan dalam Gambar 3.15, yang diperoleh sebagai keluaran dari sub rutin EMTP yang seperti diterangkan sebelumnya.

#### **3.4.1 Pengaruh Beban Terhadap Kejenuhan CT**

Beban suatu transformator arus, seperti dijelaskan dalam standar IEEE C37-110 adalah properti dari rangkaian yang terhubung ke rangkaian sekunder dan terhubung ke lilitan sekunder sehingga dapat menentukan daya aktif dan reaktif pada terminal sekunder. Beban dapat dinyatakan, baik sebagai total ohm impedansi bersama dengan komponen efektif dari resistansi dan reaktansi, maupun sebagai total volt-ampere dan faktor daya peralatan sekunder. Tingkat akurasi CT didefinisikan oleh standar IEEE C37-110-1996, sejauh mana arus pada rangkaian sekunder melakukan reproduksi arus rangkaian primer dalam proporsi yang dinyatakan oleh rasio, dan merepresentasikan hubungan fasa dari arus primer. Kelas akurasi dapat diperoleh dengan cara perhitungan atau melalui penyelidikan. Penyelidikan akan menentukan tegangan terminal sekunder minimum dimana trafo akan menghasilkan 20 kali rating arus sekunder dengan beban standar tanpa melebihi batas kelas ketelitian (10%).



**Gambar 3.14** Model *Nonlinear* EMTP dari Transformator Arus



**Gambar 3.15** Loop Histeresis CT 1200/5 tap 1200 (Keluaran Subrutin EMTP)

Seperti yang telah ditekankan sebelumnya dan untuk tujuan analisa, dimana suatu trafo arus dengan beban standar bisa mengirimkan 20 kali rating dari pada arus sekunder tanpa melewati koreksi rasio 10%. Transformator arus yang dipergunakan untuk analisa tersebut telah disampaikan dalam makalah yang juga telah dipublikasikan [7, 17, 38]. CT dengan kelas C800 pada tap maksimum (1200/5) memiliki kemampuan tegangan sekunder berbanding lurus dengan hubungan tap, CT yang dipergunakan adalah tegangan (1200/1200 x 800V) atau 800V. Dua puluh kali rating arus sekunder adalah 100 A. Oleh karena itu, beban

maksimum adalah 800/100 atau 8 ohm. Beban ini tidak meliputi resistansi sekunder dari transformator arus.

Tabel 3.3, memperlihatkan studi kasus yang menyelidiki pengaruh dari beban yang telah terhubung CT terhadap kejenuhan yang terjadi dan kemampuannya untuk melakukan reproduksi arus primer terhadap sisi sekundernya. Tegangan beban  $V_b$  yang dianggap resistif untuk merefleksikan kondisi terburuk. Nilai beban yang diperlihatkan dalam Tabel 3.3 adalah beban total, yang mencakup resistansi sekunder dari CT. Kasus pertama menggunakan beban standar pada CT, seperti yang terdapat dalam simulasi. Nilai beban kemudian ditingkatkan guna menunjukkan pengaruh dari pada beban tambahan terhadap kinerja CT. Harus dipertimbangkan pula dalam prakteknya, bahwa CT kadang-kadang ditempatkan jauh dari rele proteksi sehingga menghasilkan beban yang lebih tinggi bagi CT.

**Tabel 3.3** Kasus yang Dilaksanakan Dalam Melihat Pengaruh Beban pada CT

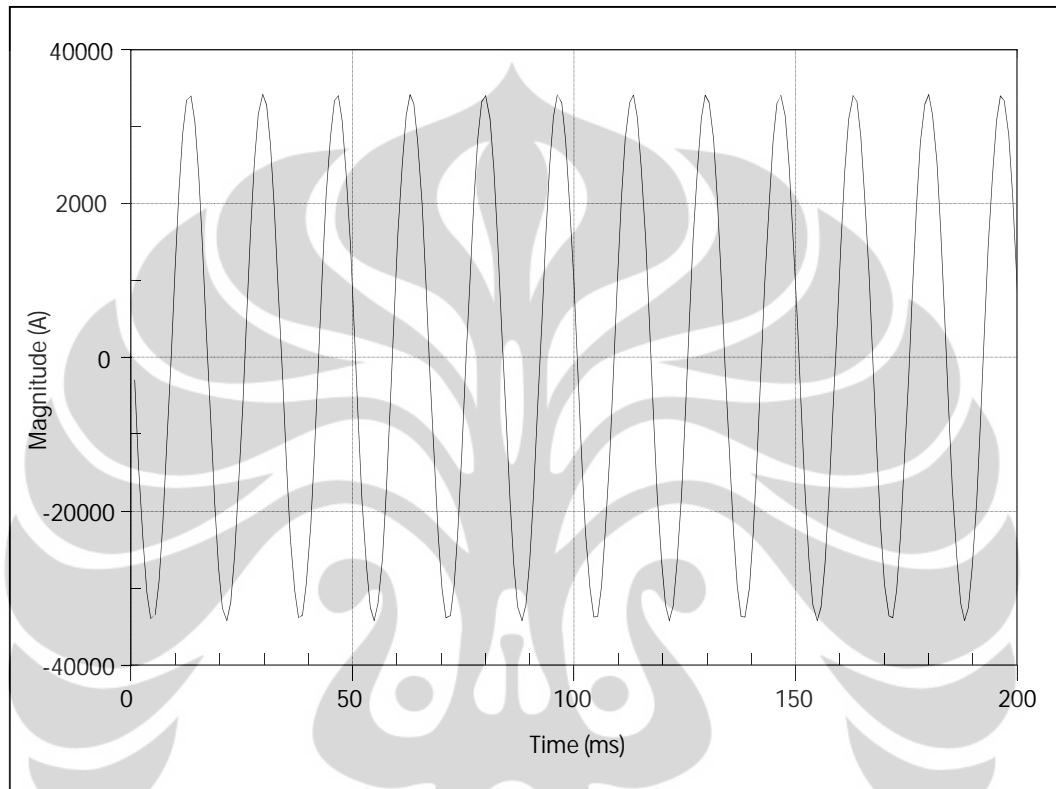
Injeksi Arus Primer (A)	Beban (Ohm)	
	20 X CT Rating Current (24.000 RMS Current)	Kasus-1
Kasus-2		13, 2
Kasus-3		26, 4

Gambar 3.16 memperlihatkan arus primer yang diinjeksikan dengan 20 kali arus rating CT dan Gambar 3.17 memperlihatkan keluaran arus sekunder dari CT ketika beban standar digunakan. Arus primer direproduksi secara akurat tanpa ada kejenuhan pada CT. Besaran serta bentuk dari keluaran CT diperoleh secara akurat, sebagaimana yang diharapkan, tanpa terdapat kejenuhan pada CT.

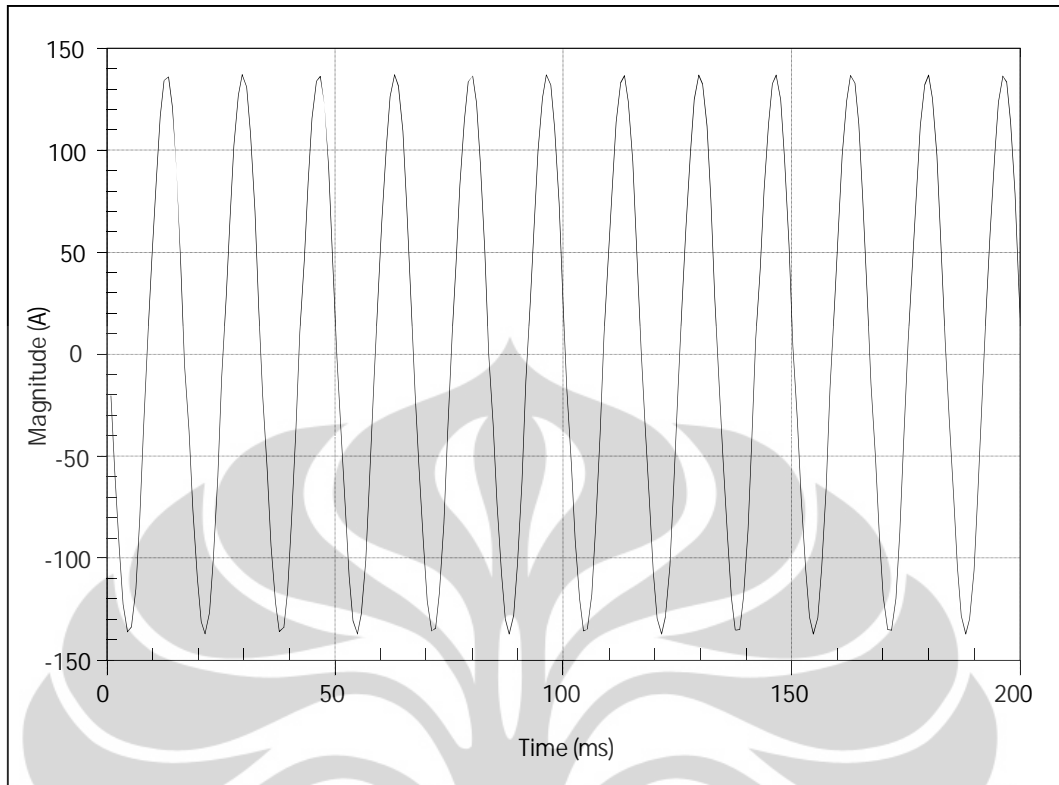
Dalam Kasus 2, beban sekunder ditingkatkan menjadi 13.2  $\Omega$  dan sebagai akibatnya timbul kejenuhan pada CT seperti diperlihatkan dalam Gambar 3.18. Besar keluaran CT yang teramati adalah 136 A, tidak sesuai dengan besar yang diperkirakan sehingga bentuk sinyal sekunder menjadi sedikit terdistorsi. Beban



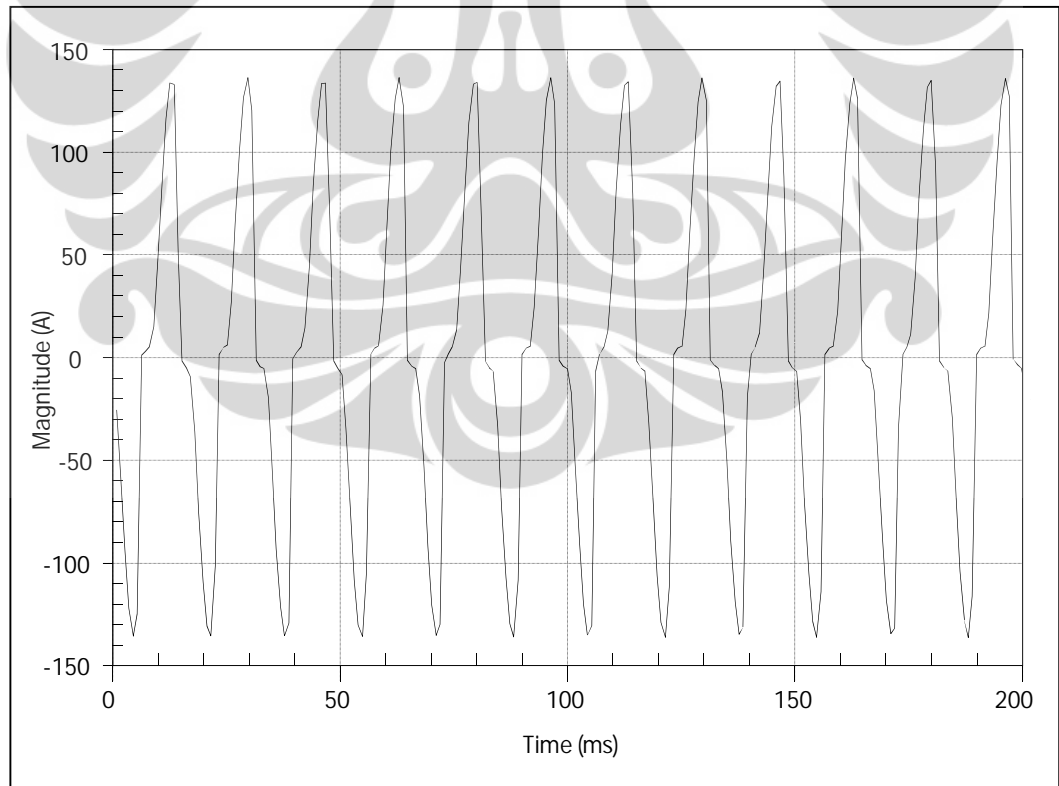
sekunder kemudian meningkat hingga  $26.4 \Omega$  (3,3 kali beban standar). Besar arus sekunder secara signifikan berkurang hingga 12% dan bentuk gelombang hasilnya terdistorsi seperti diperlihatkan dalam Gambar 3.19 dimana CT mengalami kejenuhan yang berat.



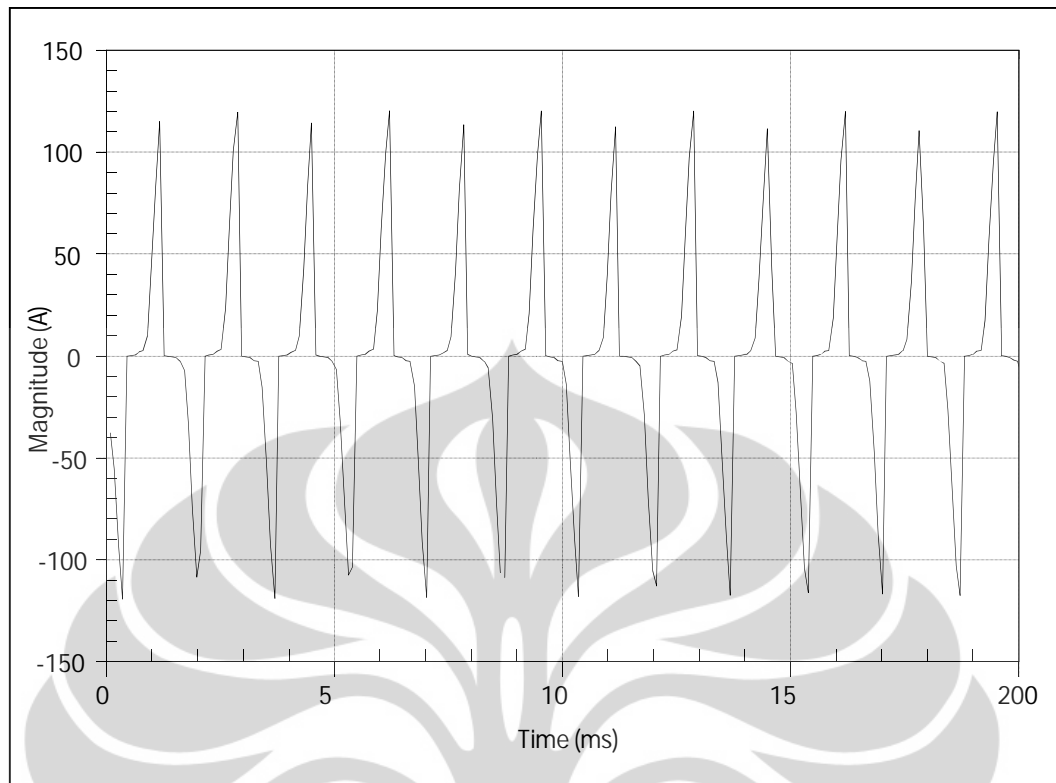
**Gambar 3.16** Injeksi Arus primer (24.000 RMS Amp)



**Gambar 3.17** Reproduksi Penuh pada Arus Sekunder dengan 8 Ohm



**Gambar 3.18** Permulaan Kejenuhan CT pada Arus Sekunder dengan 13,2 Ohm



**Gambar 3.19** Kejenuhan CT yang Berat dari Arus Sekunder dengan 26,4 Ohm

### 3.4.2 Pengaruh Level Hubung Singkat Terhadap Kinerja CT

Secara umum, rasio CT dipilih untuk memenuhi persyaratan arus beban maksimum, misalnya, desain arus beban maksimum tidak boleh melebihi arus primer dari rating CT. Rasio CT tertinggi yang diizinkan biasanya harus digunakan untuk meminimumkan beban dari pengawatan dan untuk memperoleh kemampuan serta kinerja tertinggi dari CT. Besar CT harus sedemikian rupa sehingga arus sekunder CT tidak melebihi 20 kali rating arus dalam kondisi gangguan primer simetris.

Penggunaan CT dengan rasio rendah terhadap rangkaian dengan tingkat arus gangguan yang sangat tinggi menyebabkan timbulnya masalah dengan berkurangnya kemampuan CT. Permasalahan ini dapat diminimumkan dengan menggunakan rasio CT tertinggi yang kompatibel dengan rele dan instrumen yang berarus rendah. Dalam analisa ini, perilaku CT diuji, dengan mempertimbangkan

beban standar, untuk menunjukkan kinerjanya dalam berbagai tingkat hubung singkat simetris. Ringkasan dari analisa ini ditampilkan dalam Tabel 3.4.

**Tabel 3.4** Kasus yang Dilaksanakan untuk Menguji Pengaruh Gangguan Simetris Primer terhadap CT

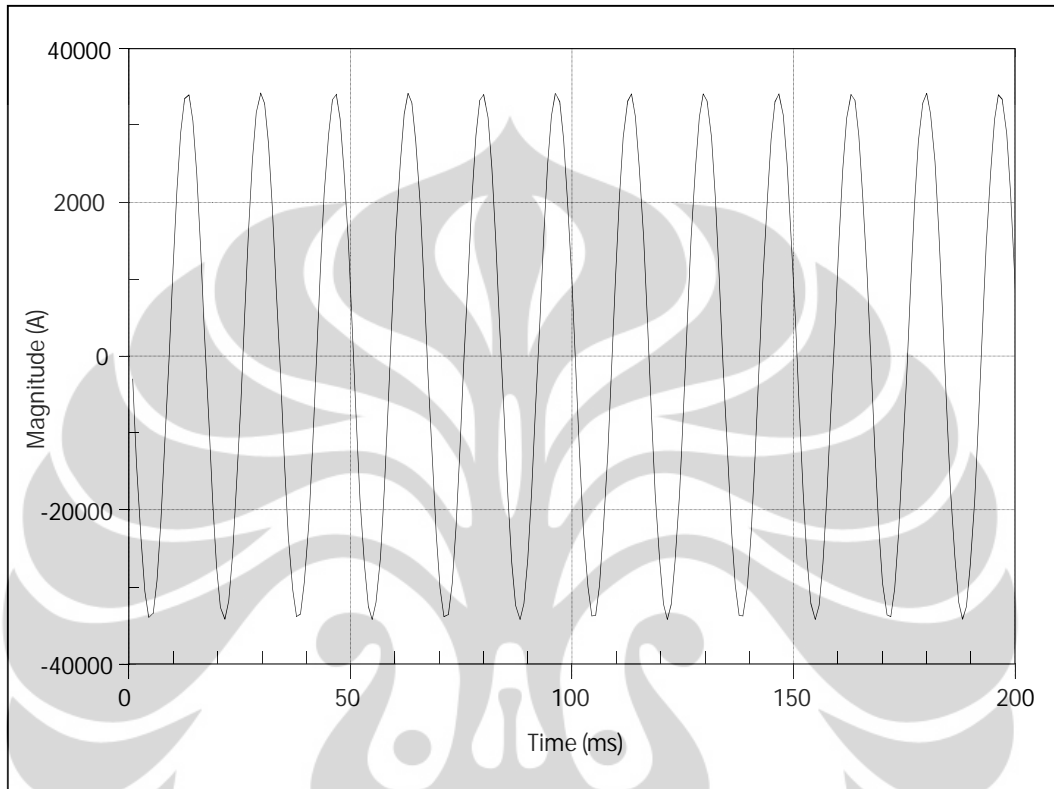
Injeksi Arus Primer (A)	Beban (Ohm)
<b>Kasus-1</b> 20 X Arus Rating CT (24.000 RMS Current)	Standar Beban (8)
<b>Kasus-2</b> 30 X Arus Rating CT (36.000 RMS Current)	
<b>Kasus-3</b> 40 X Arus Rating CT (48.000 RMS Current)	

Pada Kasus 1, diinjeksikan arus primer sebesar 20 kali rating CT pada standar beban sekunder. Gambar 3.20 memperlihatkan arus injeksi primer yang disimulasikan. Reproduksi penuh dari arus primer pada sekunder CT tercapai dan diperlihatkan dalam Gambar 3.21. Besar arus primer direproduksi secara akurat pada sekunder CT tanpa adanya penyimpangan.

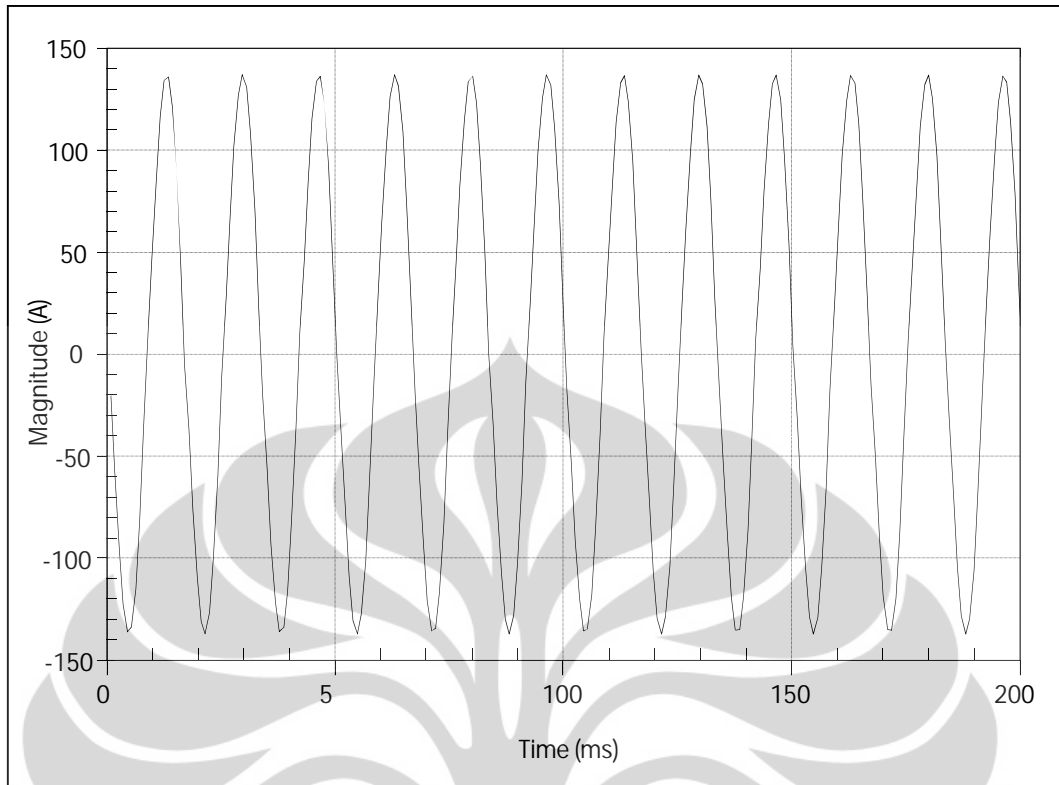
Untuk Kasus 2, arus gangguan simetris kemudian dinaikkan hingga 30 kali rating CT. Seperti terlihat dalam Gambar 3.22, terjadi permulaan kejenuhan CT dan bentuk gelombang arus sekunder mengalami sedikit distorsi. CT yang ideal merefleksikan gelombang arus sinusoidal dengan nilai puncak sebesar 233 A. Sehubungan dengan terjadi kejenuhan pada CT, maka arus puncak hanya sebesar 207 A.

Dalam Kasus 3, arus gangguan simetris yang sangat tinggi diinjeksikan ke dalam CT. Arus yang diinjeksikan adalah 40 kali rating CT. Sebagai hasilnya, kejenuhan CT yang cukup berat dirasakan pada terminal sekunder CT. Baik besaran maupun bentuk dari arus sekunder secara signifikan pengaruhnya seperti diperlihatkan dalam Gambar 3.23. CT yang ideal merefleksikan sinyal arus

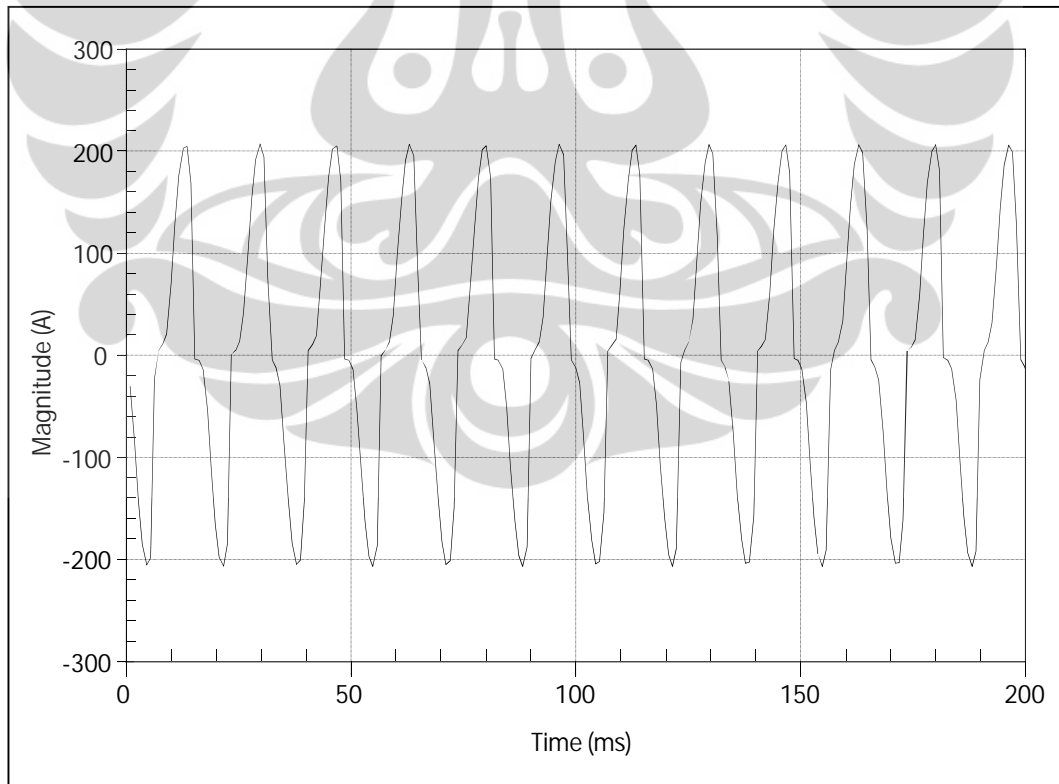
primer dengan nilai puncak sebesar 282 A. Ternyata, dengan model simulasi tersebut menunjukkan bahwa CT mampu untuk mengirim arus sekunder terdistorsi dengan puncak hanya sebesar 274 A.



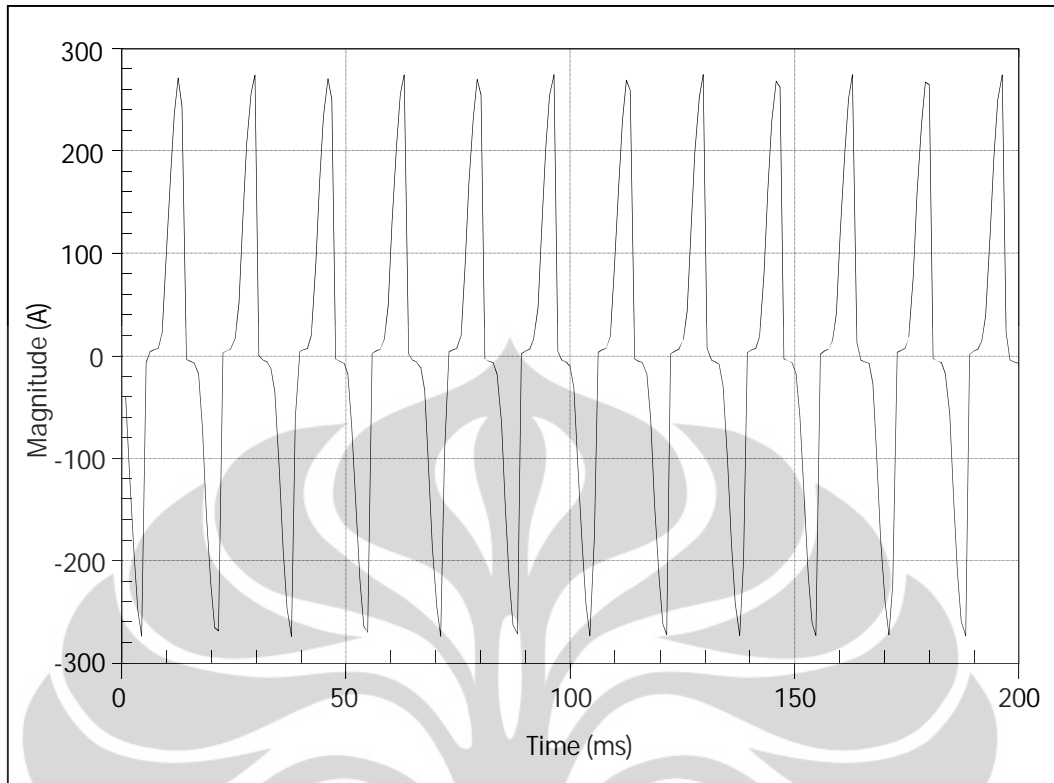
**Gambar 3.20** Injeksi Arus primer (24.000 RMS Amp)



**Gambar 3.21** Reproduksi Penuh pada Arus Sekunder (Kasus-1)



**Gambar 3.22** Permulaan Kejenuhan CT pada Arus Sekunder (Kasus-2)



**Gambar 3.23** Kejenuhan CT yang Berat pada Arus Sekunder (Kasus-3)

### 3.4.3 Pengaruh Rasio X/R pada Sistem Terhadap Kejenuhan CT

Kinerja CT dipengaruhi secara signifikan oleh komponen DC dari arus AC. Ketika terjadi perubahan arus dalam sistem primer AC, satu atau lebih dari arus tiga-fasa dapat berisi beberapa *DC Offset*. DC ini sebagai hasil dari kebutuhan untuk memenuhi dua persyaratan berlawanan yang dapat terjadi yaitu: (1) dalam jaringan yang sangat induktif, gelombang arus harus mendekati bentuk maksimum ketika tegangan mencapai atau mendekati nol, dan (2) arus aktual pada saat terjadinya perubahan, yang ditentukan oleh kondisi jaringan sebelumnya [17].

Selama gangguan asimetris, arus gangguan dapat diwakili oleh dua bagian, yaitu komponen DC dan AC sebagai berikut:

$$I_{\text{Fault}} = I_{\text{dc}} + I_{\text{ac}} \quad (3.10)$$

Total arus gangguan dapat ditulis kembali sebagai:

$$I_{\text{Fault}} = I_{\text{F}} \cdot \left( e^{-\frac{R}{L}t} - \cos(\omega t) \right) \quad (3.11)$$

Gambar 3.24 menunjukkan daerah *volt time* berbayang yang dihasilkan oleh arus gangguan asimetris. Di sini  $I_F$  adalah besar arus gangguan dalam sekunder,  $Z_b$  adalah impedansi beban, dan  $L/R$  adalah konstanta waktu dari rangkaian gangguan primer. Gelombang sinusoidal dan komponen eksponensial dari gelombang ditampilkan terputus-putus sebagai perbandingan. Gelombang sinusoidal dan eksponensial merepresentasikan gangguan asimetris seperti dalam Persamaan (3.11). Plot pada gambar menunjukkan perubahan tegangan beban terhadap waktu. Daerah *volt time* dari gangguan asimetris ditingkatkan serta dibandingkan dengan gelombang sinusoidal normal sehingga akan mempengaruhi kinerja CT serta rele.

Tegangan beban dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V = I_F \cdot Z_b \cdot \left( e^{-\frac{R}{L}t} - \cos(\omega t) \right) \quad (3.12)$$

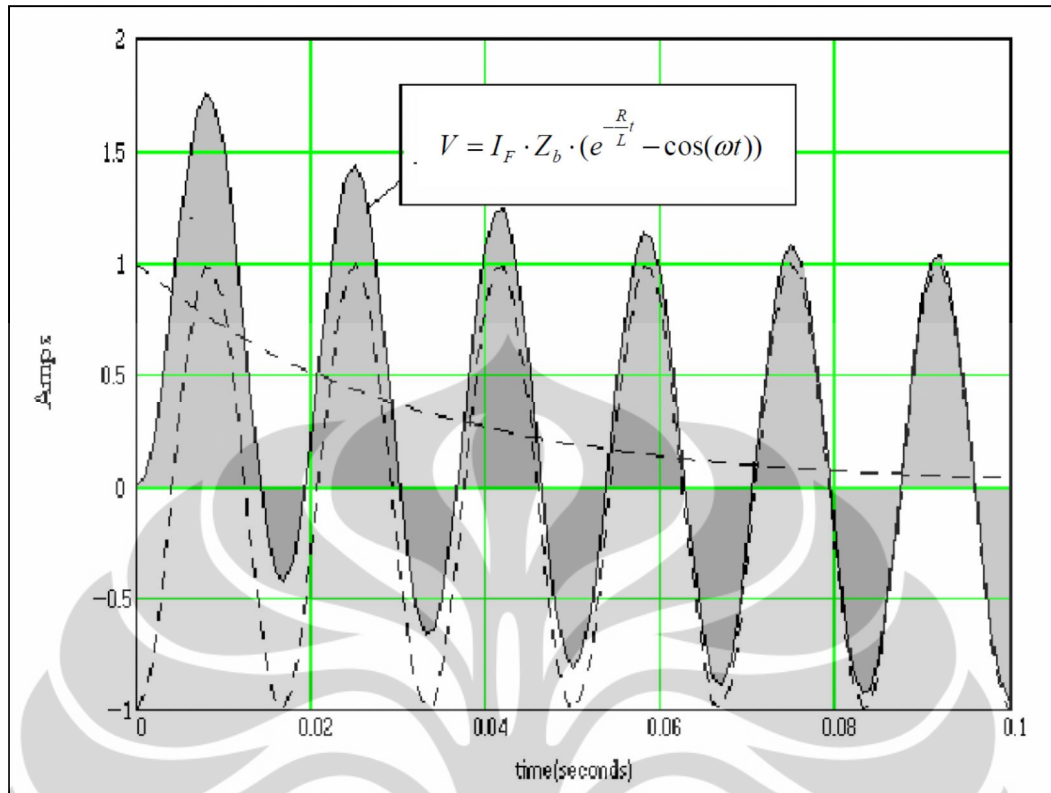
Tegangan beban  $V$  berhubungan dengan  $N$  belitan inti dan kecepatan perubahan flux inti oleh induksi diperlihatkan dalam persamaan [33]:

$$V = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (3.13)$$

Kita bisa mengintegrasikan Persamaan (3.13) untuk menunjukkan bahwa kerapatan flux dalam inti direpresentasikan oleh suatu daerah di bawah bentuk gelombang tegangan. Dengan kata lain, untuk suatu arus gangguan sekunder tertentu, diperlukan lebih banyak tegangan beban dari CT dan kerapatan fluks inti yang sebanding dengan integral waktu dari tegangan. Oleh karena itu, gandengan fluks dalam inti diberikan oleh integral dari Persamaan (3.14) dimana flux dinyatakan sebagai kerapatan flux  $\mathbf{B}$  dikali daerah luas penampang  $\mathbf{A}$ .

$$\phi \cdot N = B \cdot A \cdot N = \int_0^t V \cdot dt. \quad (3.14)$$





**Gambar 3.24** Arus Gangguan dengan Komponen AC dan DC [21]

Dengan menggunakan persamaan tegangan beban asimetris (3.13) dan disubstitusi ke dalam Persamaan (3.14) menghasilkan persamaan berikut:

$$B_s \cdot N \cdot \omega \cdot A = I_F \cdot Z_b \left[ -\frac{\omega L}{R} \int_0^t e^{-\frac{R}{L}t} \left| -\frac{R}{L} dt \right| - \int_0^t \cos(\omega t) (\omega dt) \right] \quad (3.15)$$

Dalam Persamaan (3.15), batas integral dari eksponensial adalah perbandingan  $X/R$  dari rangkaian primer. Karena integral batas dari kosinus adalah kesatuan, persamaan tersebut bisa ditulis sebagai berikut:

$$B_s \cdot N \cdot \omega \cdot A = \left| \frac{X}{R} + 1 \right| \cdot I_F \cdot Z_b \quad (3.16)$$

Persamaan (3.16) menunjukkan rating tegangan dalam kaitannya dengan parameter fisik dari CT, yaitu kerapatan flux jenuh  $B_s$ , perbandingan belitan  $N$ , luas penampang inti  $A$ , dan frekuensi sistem  $f$ .

Bentuk yang berbeda dari Persamaan (3.16) dapat dihasilkan dengan cara mengenali bahwa rating tegangan adalah 20 kali tegangan yang melewati beban standar pada rating arus. Jika kemudian arus gangguan  $I_F$  dinyatakan dalam per

unit dari rating arus dan beban  $Z_b$  dalam per unit beban standar, maka Persamaan (3.16) menjadi kriteria standar IEEE yang sederhana untuk menghindari kejenuhan CT adalah:

$$20 \geq \left| \frac{X}{R} + 1 \right| \cdot i_f \cdot z_b \quad (3.17)$$

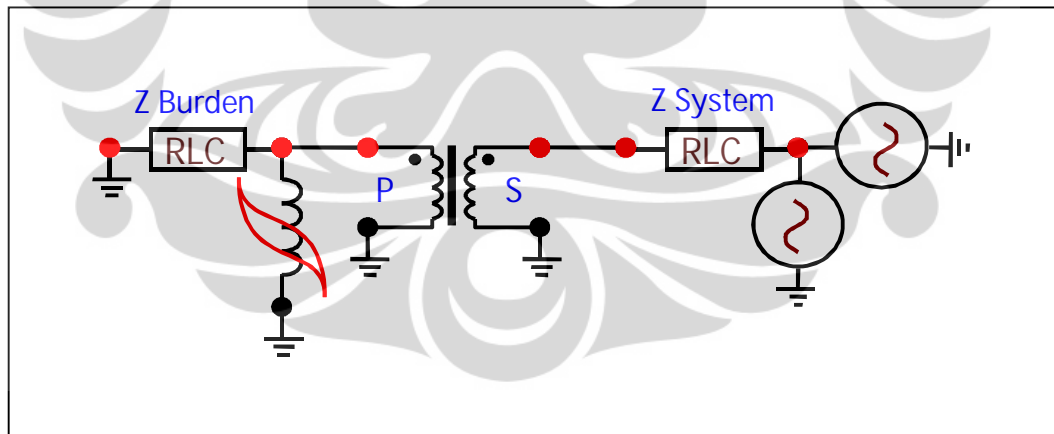
**Dimana:**

$i_f$  adalah arus gangguan maksimum dalam per unit rating CT

$z_b$  adalah beban CT dalam per unit beban standar

$\frac{X}{R}$  adalah rasio X/R dari rangkaian gangguan primer

Model CT pada EMTP, dalam Gambar 3.25 telah dikembangkan untuk meneliti pengaruh rasio X/R terhadap kinerja transformator arus. Berbagai kasus telah diterapkan, dengan rasio X/R dan dengan besar injeksi arus primer yang berbeda, dengan asumsi beban standar tanpa ada flux remanensi dalam inti CT. Tabel 3.5, meringkas penelitian yang dilaksanakan dengan menggunakan model CT pada EMTP yang telah dikembangkan.

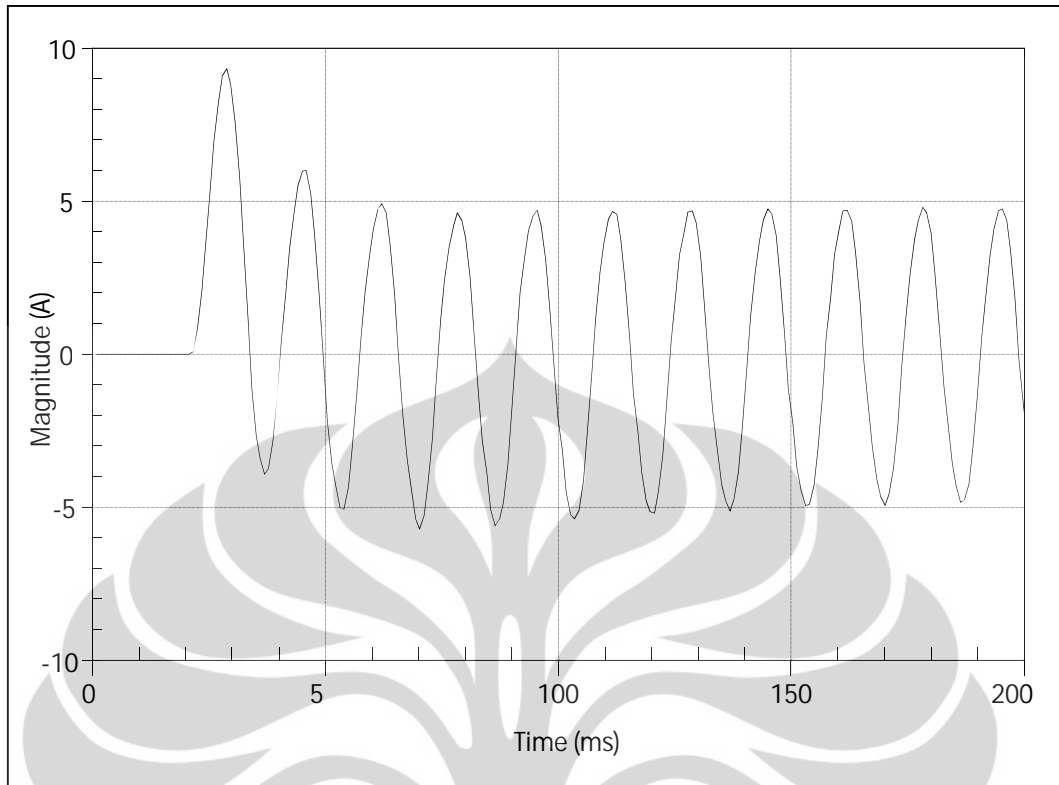


**Gambar 3.25** Model Transformator Arus EMTP untuk Analisa Pengaruh X/R

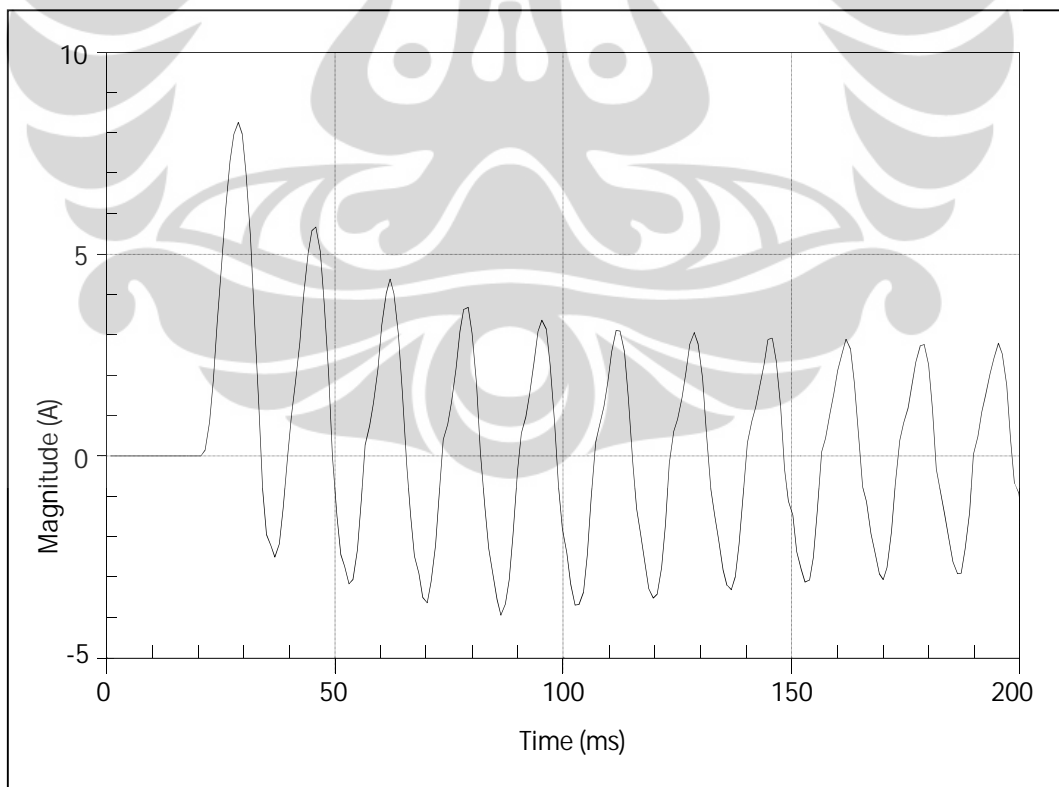
**Tabel 3.5** Kasus yang Dilakukan untuk Meneliti Pengaruh Rasio X/R terhadap Transformator Arus

Kasus	Injeksi Arus Primer	Rasio X/R	Kriteria dari Persamaan (3.17)
1(a)	0.98 x Arus Rating CT	12	$(X/R+1)*I_f*Z_b = 13$
1(b)		24	$(X/R+1)*I_f*Z_b = 25$
2(a)	1.70 x Arus Rating CT	12	$(X/R+1)*I_f*Z_b = 22$
2(b)		24	$(X/R+1)*I_f*Z_b = 43$
3(a)	3.20 x Arus Rating CT	12	$(X/R+1)*I_f*Z_b = 42$
3(b)		24	$(X/R+1)*I_f*Z_b = 80$

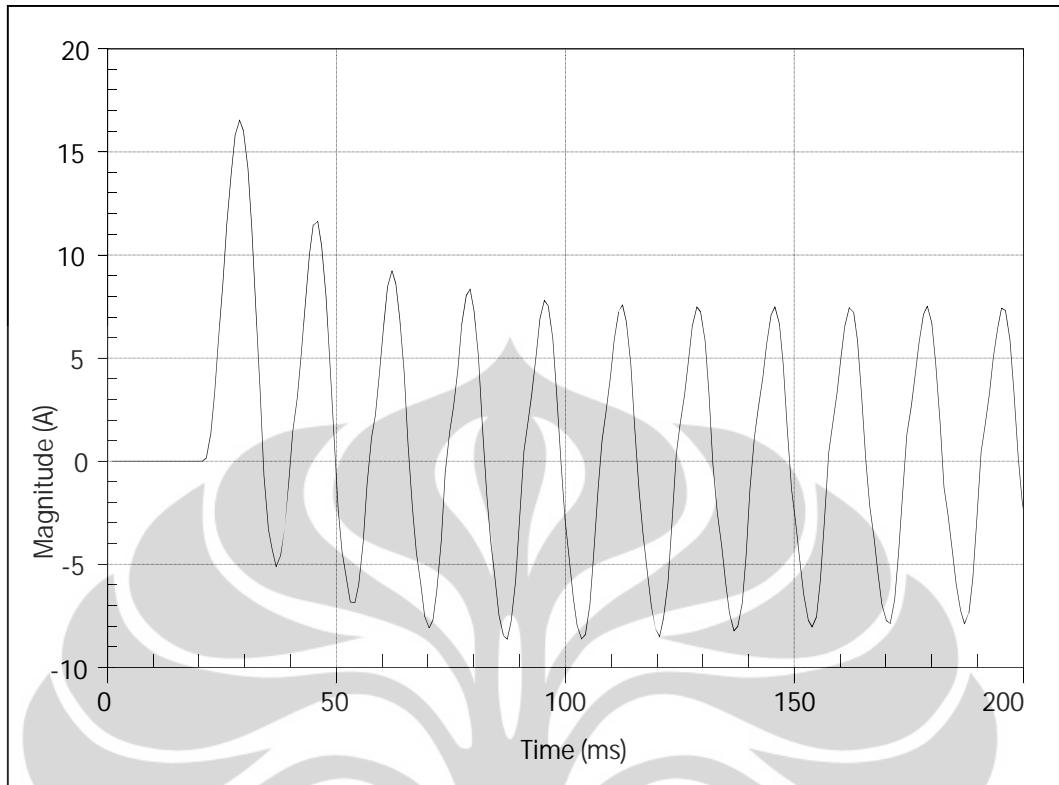
Kasus-1 (a) merepresentasikan keluaran arus sekunder dari model CT yang dikembangkan dengan DC offset ( $X/R = 12$ ) sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 3.26. Keluaran direproduksi dengan akurat dan kejenuhan dapat dihindari karena terpenuhinya kriteria dari standar IEEE C37.110-1996 pada Persamaan 3.17. Kasus 1 (b) serupa dengan kasus sebelumnya, kecuali bahwa rasio X/R sistem ditingkatkan menjadi 24. Gambar 3.27 menunjukkan permulaan kejenuhan CT. Dalam kasus-2 (a) dan kasus-2 (b), arus gangguan primer yang lebih tinggi diinjeksikan dengan rasio X/R sistem sebesar 12 dan 24 secara berturut-turut. CT menjadi jenuh dimulai dari siklus kedua seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 3.28 dan 3.29. Dalam kasus 3 (a) dan kasus 3 (b), arus sekunder CT mengalami kejenuhan cukup berat dan puncaknya tetap rendah dan terdistorsi selama dua siklus berikutnya seperti diperlihatkan dalam Gambar 3.30 serta 3.31.



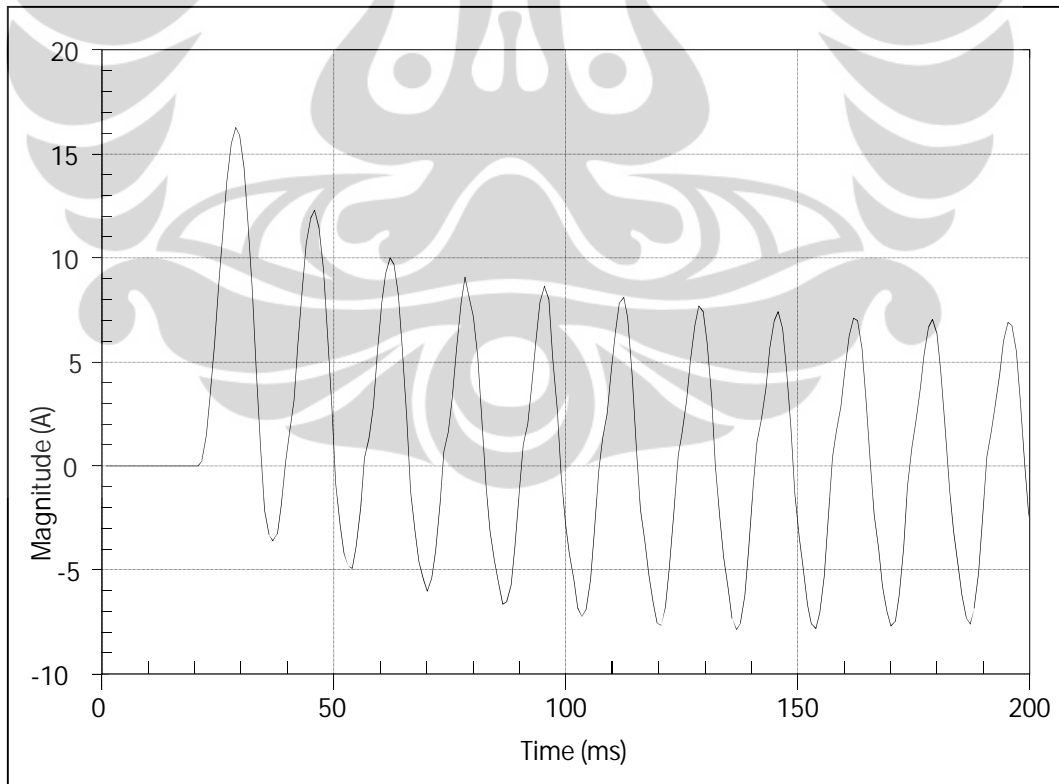
**Gambar 3.26** Kasus 1 (a), Arus Sekunder dengan  $X/R = 12$



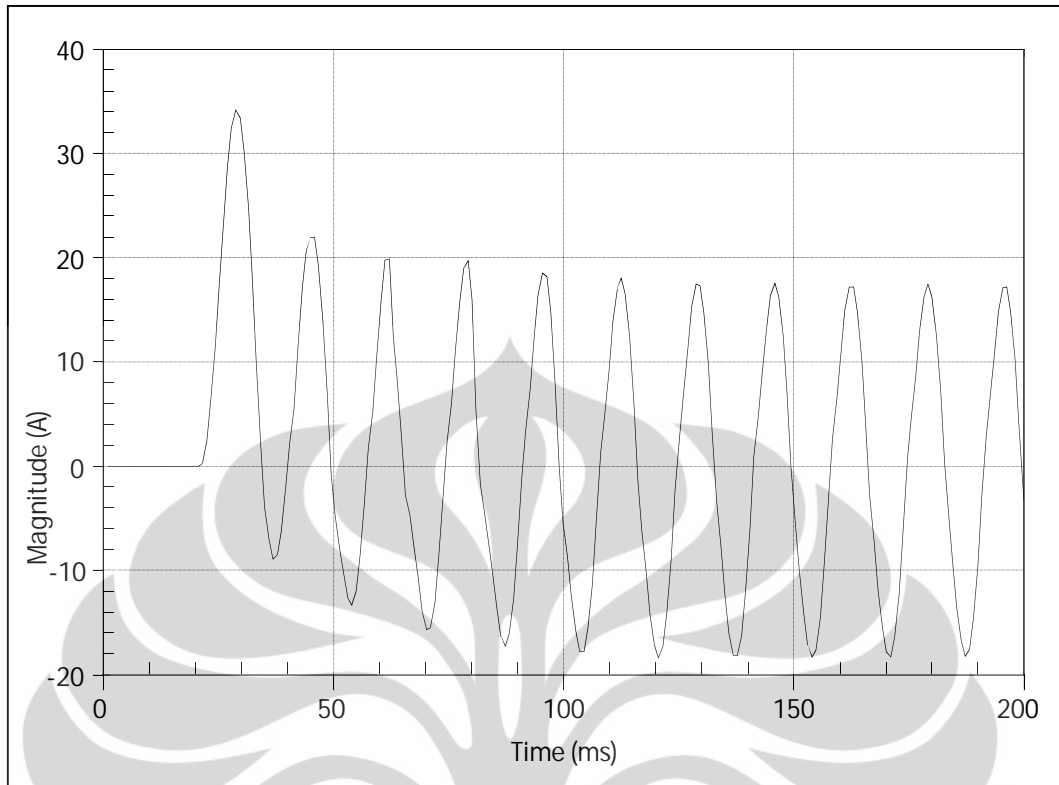
**Gambar 3.27** Kasus 1 (b), Arus Sekunder dengan  $X/R = 24$



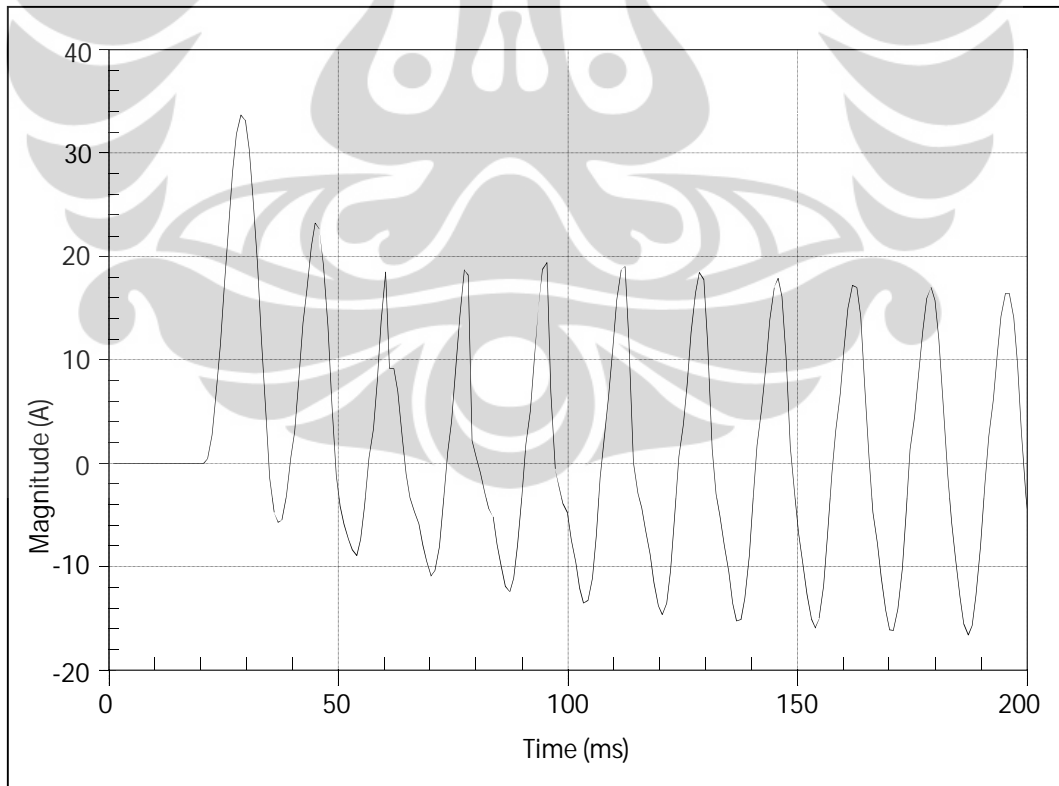
**Gambar 3.28** Kasus 2 (a), Arus Sekunder dengan  $X/R= 12$



**Gambar 3.29** Kasus 2 (b), Arus Sekunder dengan  $X/R= 24$



**Gambar 3.30** Kasus 3 (a), Arus Sekunder dengan  $X/R= 12$



**Gambar 3.31** Kasus 3 (b), Arus Sekunder dengan  $X/R= 24$



Phenomena *aliasing* berasal dari munculnya sinyal berfrekuensi tinggi, yang merusak sinyal yang diinginkan. Pengaruh ini dapat dieliminasi dengan cara menyaring komponen frekuensi tinggi yang berasal dari sinyal masukan. Elemen yang dapat memenuhi fungsi ini disebut *filter anti aliasing*. "Kriteria Nyquist" menyatakan bahwa untuk menghindari penyimpangan *aliasing*, frekuensi di atas satu setengah sampling harus dihilangkan [29].

Rele *microprocessor* berperan penting dalam menghitung respon *filter digital* dan membandingkan penyimpangan tersebut terhadap sinyal gelombang sinusoidal ideal. Hal ini diperoleh dengan melakukan sampling arus dan/atau tegangan gelombang sinusoidal pada suatu interval waktu. Sejumlah ketetapan dari *instantaneous samples* per setiap siklus dikonversikan menjadi kuantitas digital melalui konverter A/D dan disimpan untuk pemrosesan. *Filter digital* merupakan proses sederhana dari perkalian sampel yang berurutan oleh suatu koefisien yang ditentukan sebelumnya dan kemudian mengkombinasikannya untuk memperoleh kuantitas digital yang merepresentasikan komponen fasor dari sinyal masukan.

Istilah "penyaringan" digunakan karena besar komponen dapat berubah ketika *sampling interval* bersifat tetap dan masukan frekuensi berubah. Keluaran dari *filter* kemudian bervariasi dalam hal *magnitude* dan *phasa* sebagai fungsi dari masukan frekuensi yang digunakan lebih dari dua sampel setiap siklus, dan koefisien *filter* diskala untuk memperoleh respon frekuensi yang diinginkan. *Full cycle cosine filter* dengan 16 sampel/siklus pada kenyataannya cocok bagi rele proteksi. Selama mengekstrak gelombang fundamental, *filter* juga dapat menolak semua harmonisa, termasuk eksponensial yang meluruh.

$$CFC_n = \cos \left[ \frac{2\pi}{16} \cdot n \right] \quad (3.18)$$

$$|X_{\text{smp}l+\text{spc}}| = \frac{2}{N+1} \sum_{n=0}^N |_{\text{smp}l+\text{spc}-n} CFC_n \quad (3.19)$$

$$|I_0|_{\text{smp}l+\text{spc}} = \sqrt{(LX_{\text{smp}l+\text{spc}})^2 + \left( LX_{\text{smp}l+\text{spc}\frac{\text{spc}}{4}} \right)^2} \quad (3.20)$$

$$I_{0\text{smp}l+\text{spc}} = |X_{\text{smp}l+\text{spc}}| + j \cdot |X_{\text{smp}l+\text{spc}\frac{\text{spc}}{4}}| \quad (3.21)$$



**Dimana:**

$N$	= 15
$n$	= 0, 1, 2, ..., $N$
$s_{mpl}$	= Urutan sampel 0, 1, 2, 3, .....
$s_{pc}$	= Jumlah sampel tiap siklus (16)
$I_{s_{mpl}+s_{pc}-n}$	= Sampel arus
$I_{X_{s_{mpl}+s_{pc}}}$	= Keluaran filter
$I_o$	= Fasor arus yang dihasilkan filter

Dalam persamaan kosinus (3.19), setiap nilai dari urutan sampel ( $s_{mpl}$ ) menunjukkan bahwa terdapat 16 sampel dari arus telah disimpan. Indeks  $n$ , dalam persamaan, berkisar antara 0 hingga 15 sehingga koefisien dan menjumlahkan sampel dalam menghasilkan keluaran. Dengan 16 sampel setiap siklus, 4 sampel merepresentasikan 90 derajat listrik. Oleh karena itu, keluaran yang ada bersama dengan empat sampel keluaran terekam sebelum menetapkan komponen real dan semu dari fasor [22].

### **3.5.2 Pemodelan Rele Digital Arus Lebih**

#### **3.5.2.1 Mengapa Membuat Model Rele Arus lebih Digital**

Dibandingkan dengan rele elektromekanik, rele *microprocessor* menjalankan suatu algoritma yang merupakan prosedur matematis. Rele ini menghasilkan karakteristik analitik yang dapat digambarkan dengan akurat oleh suatu persamaan. Oleh karena itu, menjadi hal yang mudah untuk menghitung respon terhadap bentuk gelombang yang dihitung dan terdapat keakuratan bagi operasi rele selama kondisi abnormal. Rele *microprocessor* berperan penting dalam menghitung respon *filter digital* dan membandingkan penyimpangannya terhadap sinyal gelombang sinusoidal ideal.

#### **3.5.2.2 Pemodelan Rele Digital**

Sejalan dengan yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, rele digital terdiri dari komponen utama sebagai berikut:


- *Analog low pass filter (LPF)*
- *Konverter analog ke digital*
- *Filter Digital*

Sebuah rele digital arus lebih *instantaneous* pada umumnya, menggunakan teknik penyaringan kosinus dan dapat dimodelkan untuk menguji perilakunya terhadap bentuk gelombang arus yang sangat jenuh. Gambar 3.33, memperlihatkan program MATHCAD yang digunakan untuk memodelkan rele digital arus lebih [22].



```

Import data from an external file into matrix "Data"

Data := 

Count rows of matrix "Data:"
R := rows(Data) - 1
Create an index "i" as a row pointer:
i := 0 .. R
Create time vector "t" and current vector "I" from imported data and calculate the data time-step, Δt :
t := Data<0>
IR := Data<1>
Calculate the data time-step, Δt:
Δt := t1 - t0
Enter the number of samples per cycle of the relay :
RS := 16
Calculation the number of samples to create an averaging LP filter with a cutoff frequency at 1/2 the
sampling frequency:
LPW := floor(  $\frac{2}{60 \cdot \Delta t \cdot RS}$  )
Averaging filter:
LP(a) :=  $\left(1 + \frac{1}{RS}\right) \cdot \sum_{k=0}^{LPW-1} \frac{IR_{a-LPW+k}}{LPW}$ 
Calculate LP filtered current:
ii := LPW .. R
Iii := LP(ii)
Calculate the number of relay samples available in the data and create an index "s" as a row pointer:
S := floor(tR · 60 · RS)
s := 0 .. S
Create a vector "Ia" representing the samples relay values:
Ias := linterp(t, I,  $\frac{s}{RS \cdot 60}$ )
Create a filter index "if" and apply a full-cycle cosine filter "IF" to vector "Ia:"
if := (RS - 1) .. S
IFif :=  $\frac{2}{RS} \cdot \sum_{k=0}^{RS-1} \left[ \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{RS}\right) \cdot Ia_{[if-(RS-1)]+k} \right]$ 
Create a vector index "iv" and form vector current "Icpv" from 90-degree-interval filtered quantities:
iv := (RS + 1) .. S
Icpviv := IFiv + iIF $iv - \frac{RS}{4}$ 
miv :=  $\sqrt{(IF_{iv})^2 + \left(IF_{iv - \frac{RS}{4}}\right)^2}$ 
Calculation of digital filter output magnitude and waveforms
Magnitudeiv := miv
Filteroutputiv := Iaiv

```

**Gambar 3.33** Program MATHCAD untuk Membuat Model Rele Digital

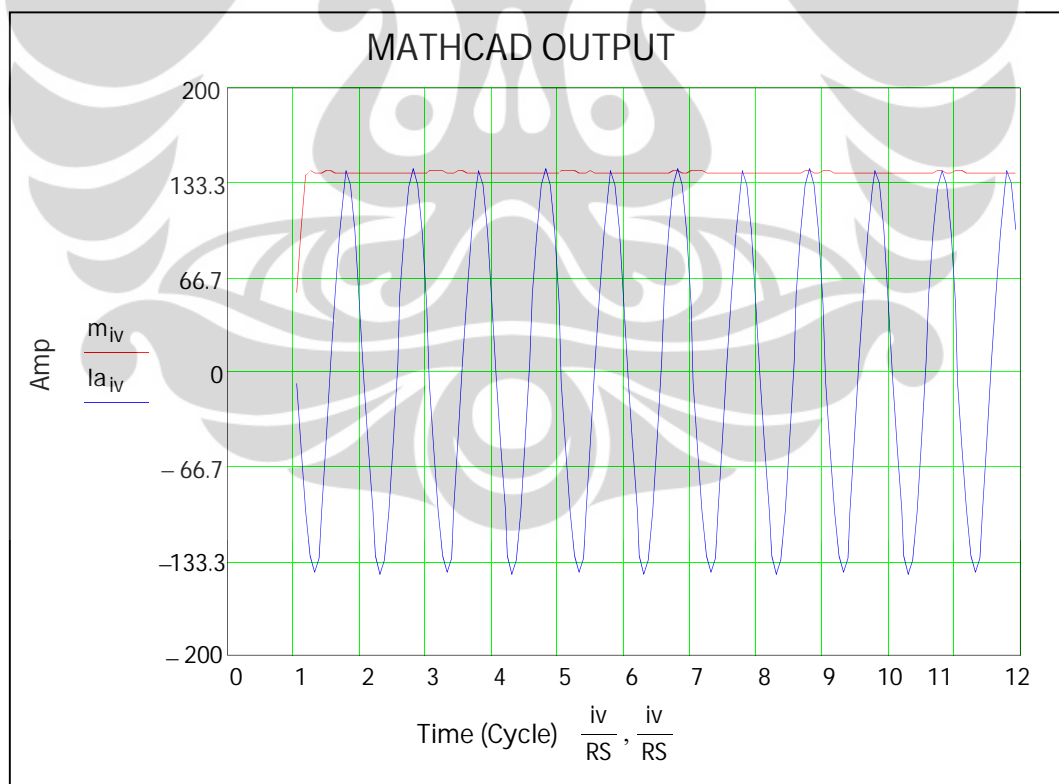
### 3.5.3 Simulasi Untuk Menguji Pengaruh CT terhadap Rele Digital Menggunakan Teknik Pemfilteran Kosinus

Dalam bagian ini, tiga studi kasus akan disajikan untuk menguji perilaku rele digital *instantaneous*. Uraian kasus dan hasil diringkas dalam Tabel 3.6 dengan menggunakan CT 1200/5, yang telah dimodelkan dalam sub bab sebelumnya.

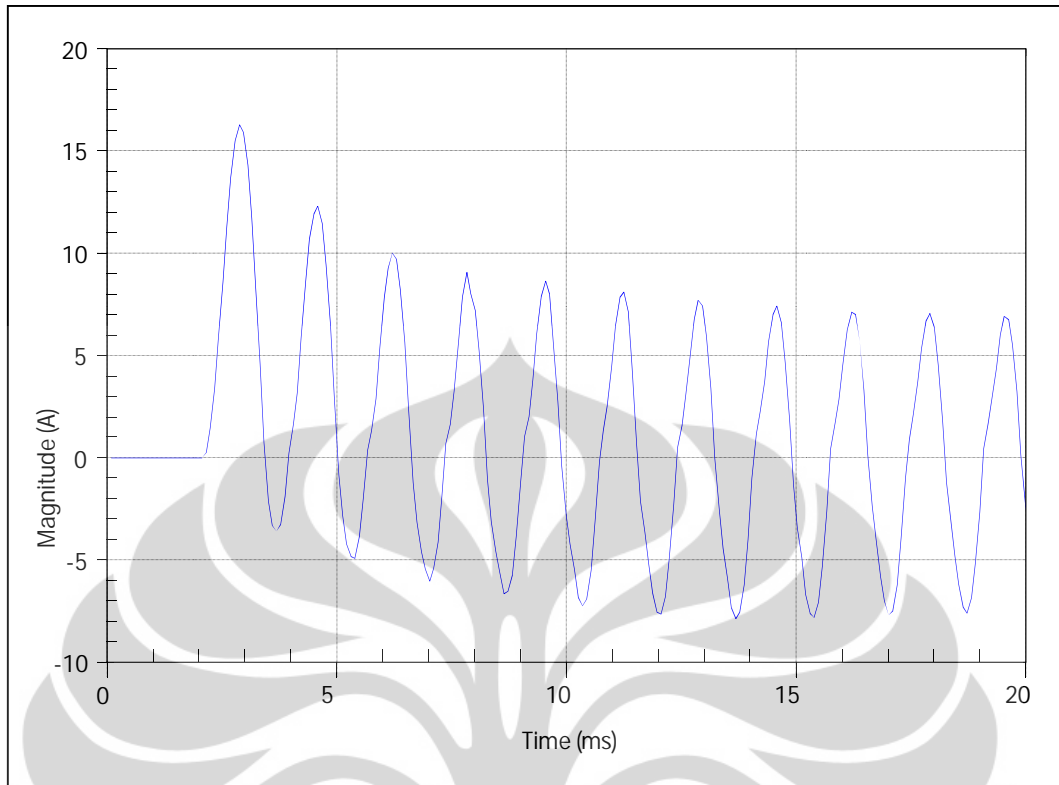
Pada kasus-1, gangguan simetris dengan 20 kali rating CT dengan beban standar disimulasikan dengan menggunakan EMTP. Diharapkan tidak terjadi kejenuhan pada arus sekunder. Arus sekunder di masukkan ke dalam perangkat lunak MATHCAD dan keluaran rele ditampilkan dalam Gambar 3.34. Rele akan melihat arus puncak setelah perlambatan kurang lebih satu siklus. Pada kasus-2, arus gangguan asimetris dengan permulaan kejenuhannya diinjeksikan ke rele. Arus sekunder dari EMTP yang disimulasikan dengan injeksi arus diperlihatkan dalam Gambar 3.35. Respon rele diperlihatkan dalam Gambar 3.36. Besaran yang lebih rendah dari arus sekunder sebesar 7A, dapat dilihat oleh rele setelah enam siklus. Pada kasus-3, kejenuhan sinyal arus yang lebih berat diperlihatkan dalam Gambar 3.37. Respon dari rele lebih panjang (sekitar 10 siklus) untuk dapat melihat arus puncak seperti diperlihatkan dalam Gambar 3.38.

**Tabel 3.6** Simulasi Kasus terhadap Pemodelan Rele Digital *Instantaneous*

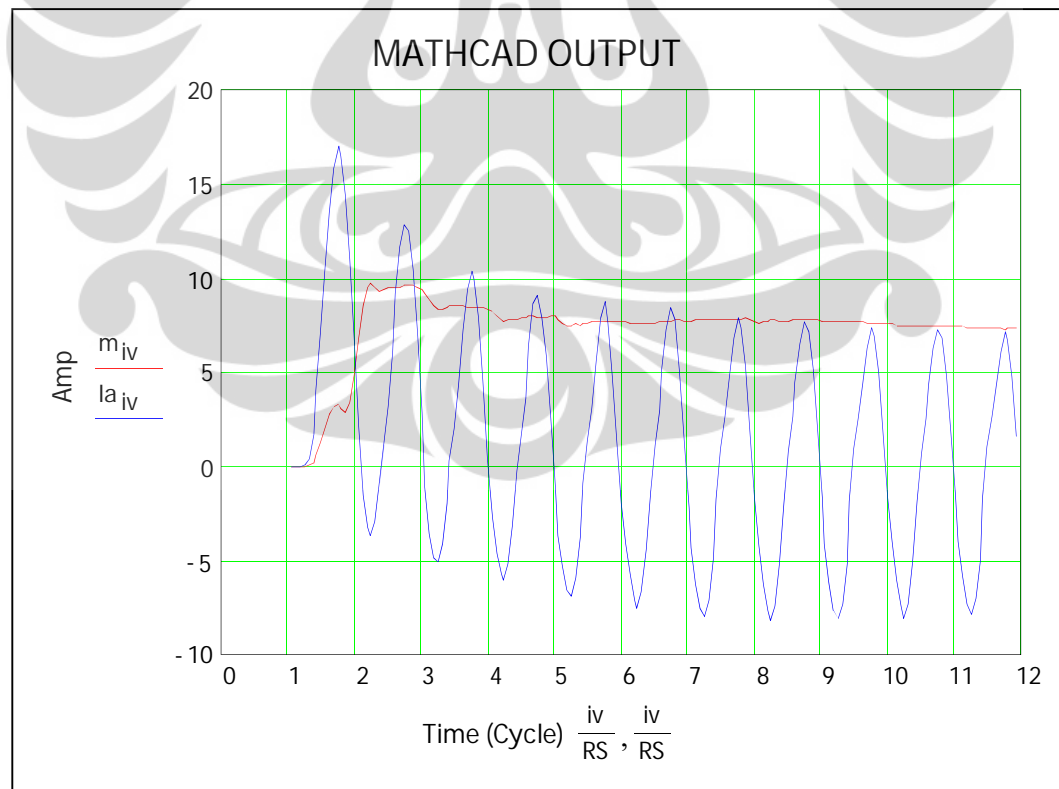
Kasus	Penjelasan Kasus	Arus Simetris Primer	Hasil Analisa
1	Dilakukan gangguan simetris tanpa ada kejenuhan	20 X CT pada beban standar	Nilai puncak sekunder yang diharapkan sebesar 134.4A yang dapat dilihat rele setelah 1.1 siklus
2	Dilakukan gangguan asimetris dengan permulaan jenuh	1.7 x CT dengan beban standar dan $X/R = 24$	Nilai puncak sekunder yang diharapkan sebesar 10A. Sebesar 7A saja yang dapat dilihat oleh rele setelah 6 siklus.
3	Dilakukan gangguan asimetris dengan kejenuhan yang berat	3.2 x CT dengan beban standar dan $X/R = 24$	Nilai puncak sekunder yang diharapkan sebesar 20A. Sebesar 17A saja yang dapat dilihat oleh rele setelah 10 siklus



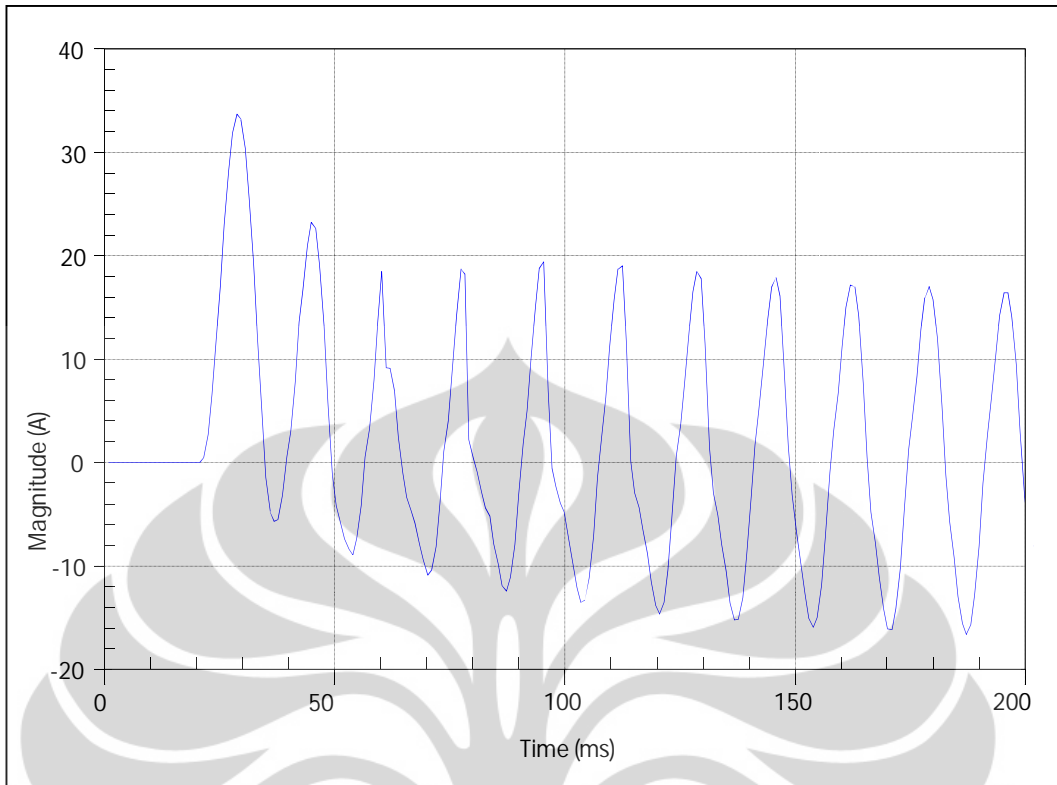
**Gambar 3.34** Keluaran dari Filter Kosinus pada Rele Digital (Kasus-1)



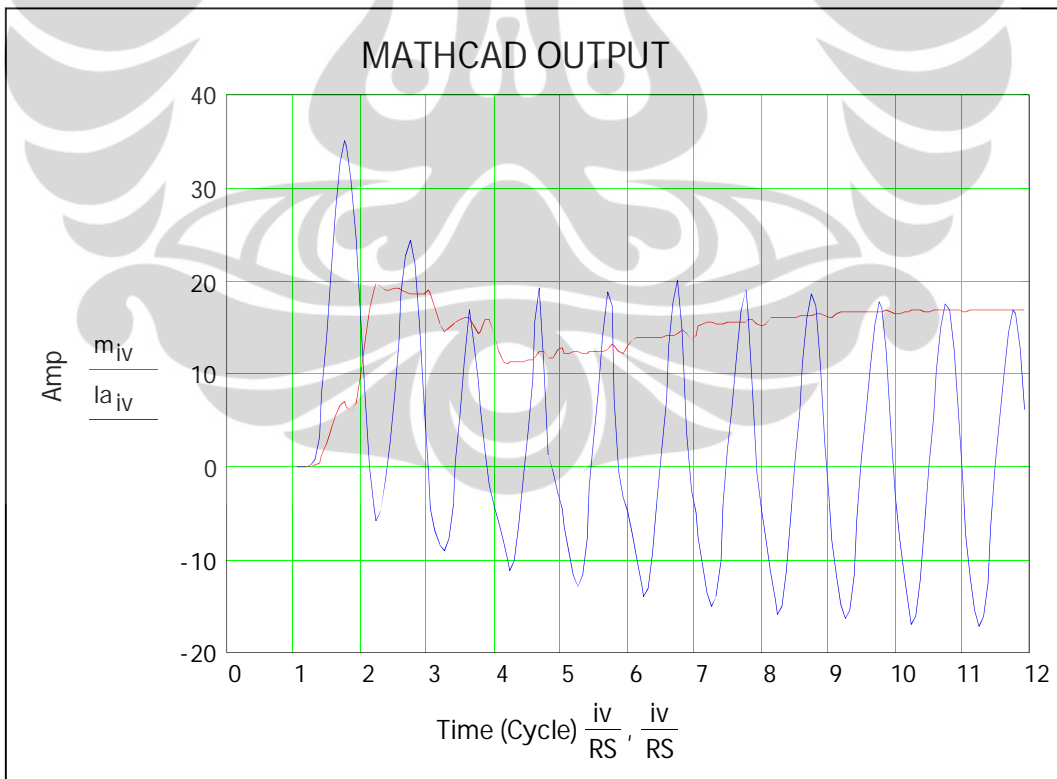
**Gambar 3.35** Arus Sekunder EMTP (Kasus-2)



**Gambar 3.36** Keluaran Filter Kosinus dari Rele Digital (Kasus-2)



**Gambar 3.37** Arus Sekunder EMTP (Kasus-3)



**Gambar 3.38** Keluaran Filter Kosinus pada Rele Digital (Kasus-3)

## **BAB EMPAT**

# **PENGUJIAN DAN ANALISA PENGARUH KEJENUHAN TRANSFORMER ARUS PADA RELE DIGITAL ARUS LEBIH**

Ukuran kinerja suatu transformator arus adalah kemampuannya untuk melakukan reproduksi secara akurat arus primer pada ampere sekunder baik dalam bentuk gelombang maupun besarnya. Terdapat dua bagian yang dapat uji : (1) kinerja terhadap komponen AC simetris, dan (2) kinerja terhadap komponen *DC Offset*. Dampak dari dua bagian ini adalah kejenuhan pada CT, yang dapat mempengaruhi operasi peralatan proteksi. Dampaknya bervariasi dan tergantung pada jenis peralatan proteksi, prinsip operasi, dan skema proteksi secara keseluruhan. Dalam bab ini, pengaruh kejenuhan CT terhadap rele arus lebih berbasis mikroprosesor akan dievaluasi dengan cara melakukan berbagai pengujian laboratorium terhadap rele arus lebih berbasis mikroprosesor dari (Asea Brown Boveri) tipe REF-630. Evaluasi telah dilaksanakan dengan mempertimbangkan operasi waktu instan dan waktu tunda pada rele digital arus lebih.

### **4.1 Penjelasan Pengujian Rele Digital Arus Lebih**

Seperangkat peralatan dan perangkat lunak digunakan untuk menguji perilaku serta kinerja transien dari rele digital arus lebih selama CT jenuh. Perangkat ini adalah sebagai berikut:

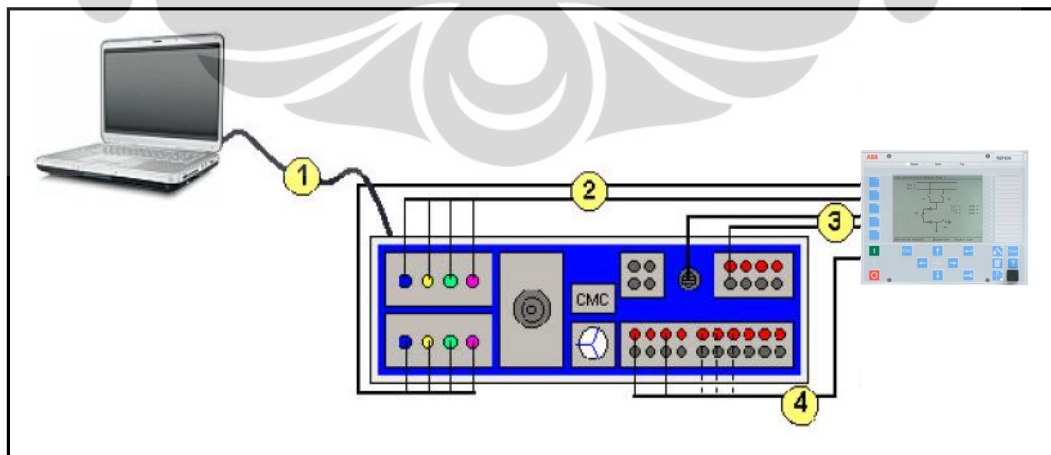
- Model transien EMTP untuk transformator arus akan digunakan dalam menyelidiki distorsi bentuk gelombang sehubungan dengan kejenuhan CT dan pengaruhnya terhadap rele arus lebih berbasis mikroprosesor. Model tersebut telah dipilih dan divalidasi seperti yang telah diterangkan dalam Bab-3.
- OMICRON CMC 356 adalah bagian dari suatu sistem pengujian berisi tidak hanya peralatan pengujian itu sendiri, tetapi juga termasuk laptop



dan software pengujian yaitu "OMICRON Test Universe". Sistem pengujian injeksi arus sekunder tersebut merupakan phasa tunggal saja dengan kemampuan sampai dengan 160 A. Peralatan pengujian mempunyai kemampuan untuk menyuntikkan file dalam format *commontrade* ke dalam rele. Konfigurasi dan kontrol dari CMC 356 dilakukan melalui software yaitu *OMICRON Test Universe* yang dapat menyuntikkan arus untuk setiap kasus transien yang telah dikembangkan pada model transien CT oleh EMTP ke dalam rele digital arus lebih.

- Sistem proteksi arus lebih berbasis mikroprosesor (ABB REF-630) dan pengujiannya telah dilakukan. Perilaku rele yang memiliki sampling rate 32 sampel/siklus telah direkam dan proses kejadiannya tersebut dapat diunduh dari rele untuk analisa lebih lanjut [36].

Gambar 4.1 memperlihatkan rangkaian yang digunakan untuk pengujian perilaku transien dari rele digital arus lebih. Pengujian dilaksanakan melalui perangkat lunak *Omicron Test Universe* dengan cara mengontrol peralatan injeksi arus sekunder tersebut untuk mensimulasikan kasus transien yang telah dikembangkan pada model CT oleh EMTP. Setiap kasus yang dibuat oleh EMTP dapat menghasilkan suatu model dengan kemampuan arus primer yang tinggi dan dapat diterima oleh CT. Hal ini dapat mengeliminasi kebutuhan akan suatu peralatan injeksi arus primer dan CT beserta kabel-kabelnya.



**Gambar 4.1** Perangkat Peralatan Pengujian

## 4.2 Kasus dari EMTP Dikembangkan untuk Menguji Rele Digital Arus Lebih

Transformator arus dengan rasio 40/5 kelas 10P20, 5VA seperti yang telah dideskripsikan dalam Bab-3, digunakan untuk membuat berbagai kasus penelitian melalui model EMTP yang keluarannya dapat digunakan untuk dimasukkan ke dalam *OMICRON CMC 356*, dengan format *commontrade*. Studi terhadap beberapa faktor berikut ini digunakan untuk menyelidiki kinerja dari pada rele digital arus lebih:

- Beban sekunder dan pengaruhnya terhadap rele digital arus lebih.
- Level hubung singkat dan dampaknya terhadap operasi CT serta kinerja rele.
- Pengaruh dari Rasio X/R (DC Offset) terhadap kejenuhan CT dan dampaknya pada rele digital arus lebih.

## 4.3 Pengaruh Arus Simetris Terhadap Rele Digital Arus Lebih

Dalam bagian ini, evaluasi dari kinerja rele digital yang diakibatkan oleh kejenuhan CT akibat dari pada arus AC simetris dilakukan dengan mempertimbangkan dua faktor sebagai berikut:

- Beban dari pada transformator arus.
- Besar arus gangguan simetris

Seperti yang telah digambarkan dalam Bab 3, beban *ohmic* yang lebih tinggi dari pada beban standar sekunder CT telah menghasilkan kejenuhan yang lebih besar pada inti, dan juga penyimpangan yang lebih besar pada bentuk gelombang arus sekunder. Penyebabnya karena pada arus sekunder tertentu memerlukan lebih banyak tegangan dari CT untuk suatu beban yang lebih tinggi, dimana kerapatan flux inti sebanding dengan integral waktu dari tegangan. Ketika inti menjadi jenuh, arus yang signifikan dialihkan melalui cabang magnetisasi CT, dan arus sekunder yang diinginkan menjadi berkurang serta terdistorsi [38].

Bagi CT, rele arus lebih berbasis mikroprosesor mempunyai impedansi sangat rendah dan dapat diabaikan dalam menghitung kejenuhan dari pada CT [39]. Impedansi lilitan kawat pada CT serta rele yang interkoneksi dengan CT menjadi penyebab utama bagi kejenuhan CT. Sebagai contoh, CT yang terletak pada sisi tegangan tinggi transformator, memerlukan kawat yang panjang agar dapat terhubung ke rele di dalam suatu bangunan sub-station.

Tabel 4.1 memaparkan ringkasan kasus, yang dikembangkan oleh EMTP untuk beban sekunder CT yang berbeda dan telah dilakukan injeksi ke rele digital arus lebih melalui peralatan pengujian sekunder yaitu *OMICRON CMC 356*. Semua kasus ini dikonversikan oleh EMTP ke file dalam format *commontrade* dengan tujuan agar pengujian rele digital tersebut dapat dilakukan melalui peralatan injeksi arus sekunder yang ada. Beban yang disebabkan oleh lilitan pada CT dan kabel eksternal yang menuju rele merupakan penyebab kejenuhan sedangkan beban pada rele itu sendiri bernilai sangat kecil dan dapat diabaikan. Dalam ketiga kasus tersebut, diasumsikan bahwa terdapat rangkaian *loop* dari kabel #10 AWG ( $1.0 \Omega / 1000\text{-ft}$ ) adalah 250 ft, 500 ft, dan 2000 ft secara berturut-turut.

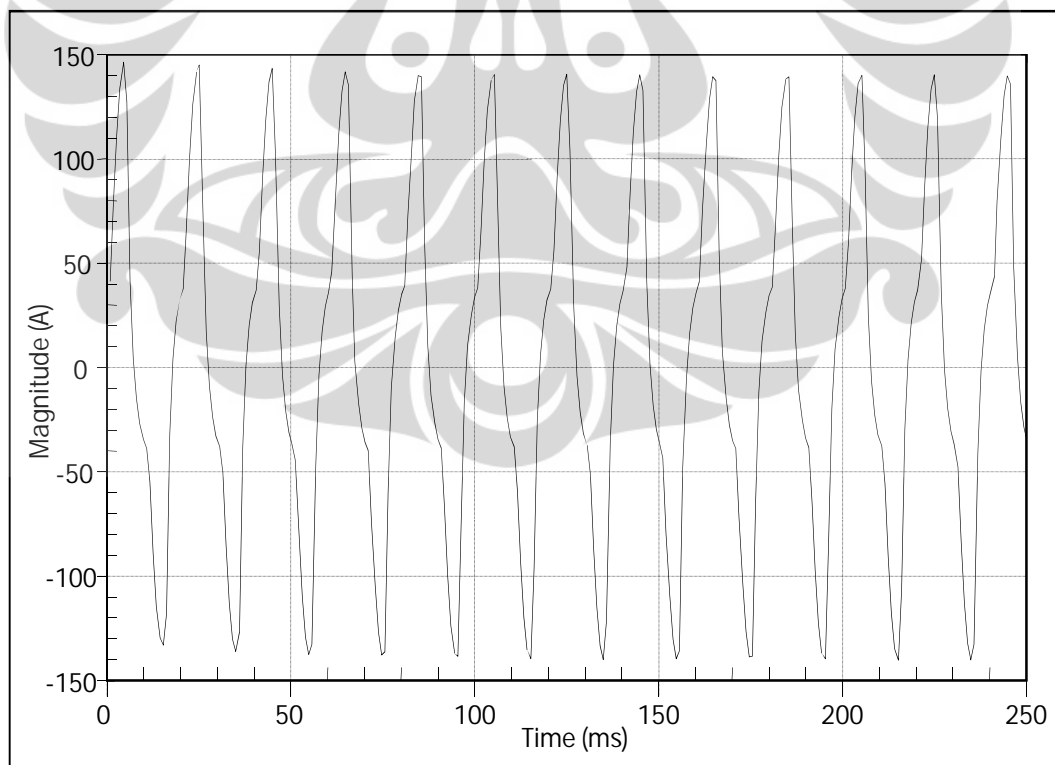
**Tabel 4.1.** Kasus yang Diterapkan untuk Meneliti Pengaruh Beban terhadap Rele Digital Arus Lebih

Injeksi Arus Primer ke Model EMTP CT 40/5	Beban		
	Kasus	Nilai (Ohm)	Kelipatan dari Beban Standar
20 X Arus Rating CT (800 RMS Current)	Kasus 1	0.25	1.25
	Kasus 2	0.5	2.50
	Kasus 3	2.0	10.0

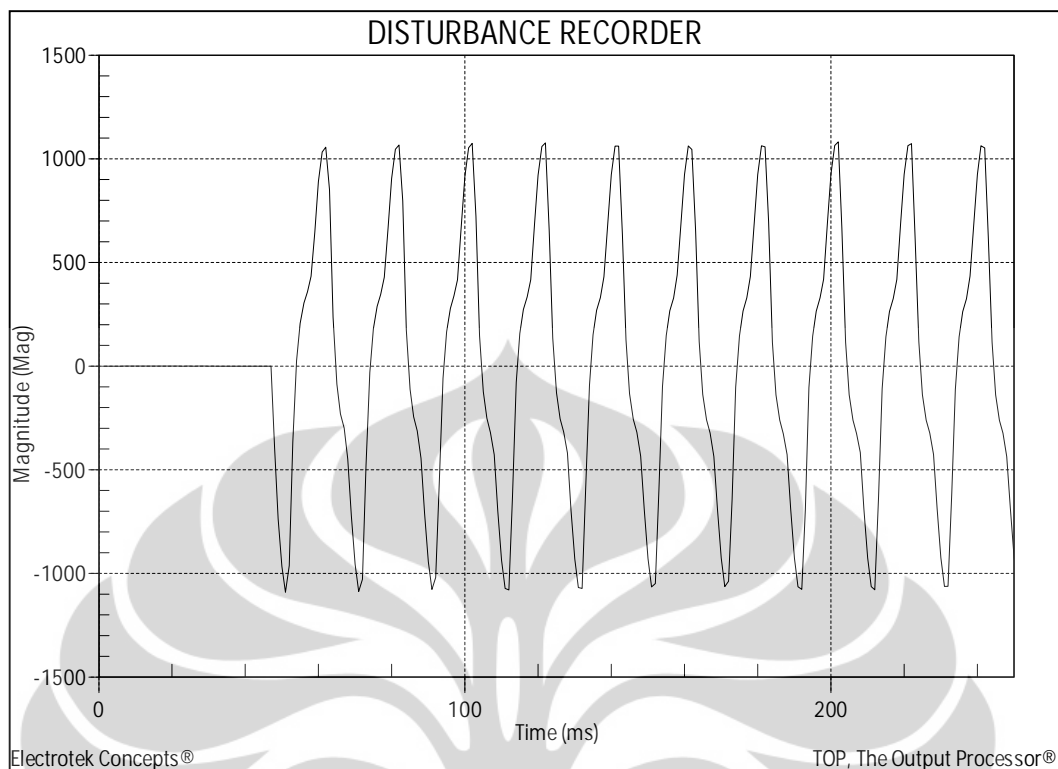
Gambar 4.2 memperlihatkan arus simulasi dari EMTP untuk kasus-1 yang telah diinjeksikan ke dalam rele digital arus lebih. Respon rele diperlihatkan dalam Gambar 4.3. Dapat dilihat bahwa telah terjadi kejenuhan CT pada arus EMTP yang diinjeksikan. Tidak terdapat offset transien yang meluruh dari sinyal,

artinya rele telah melakukan reproduksi sinyal masukan arus dengan lebih akurat. Gambar 4.4 membandingkan antara kasus simulasi EMTP dan respon rele. Gambar tersebut menunjukkan bahwa besar kedua sinyal adalah hampir sama. Respon rele memberikan besaran arus sekunder yang lebih rendah dan tetap, dibandingkan dengan arus simulasi EMTP. Teramati sekitar 33% pengurangan dalam besaran arus, dibandingkan dengan sinyal arus EMTP yang diinjeksikan.

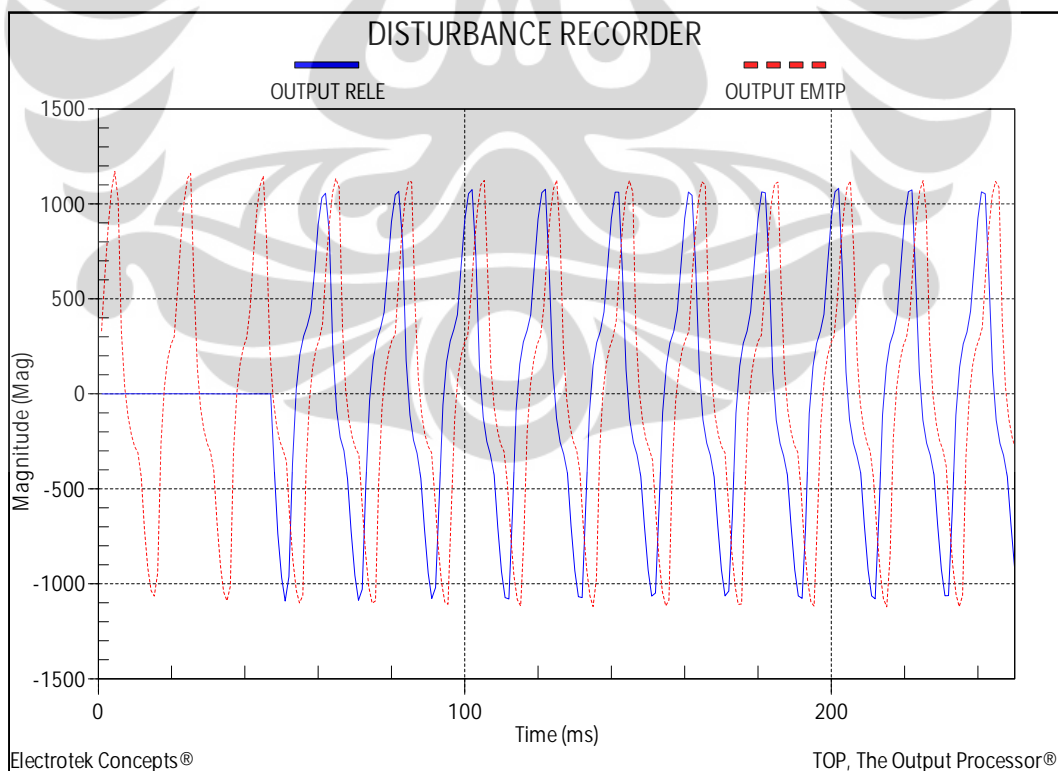
Gambar 4.5 memperlihatkan arus simulasi yang diinjeksikan ke dalam rele digital arus lebih. Kali ini, beban sekunder CT ditingkatkan dan awal dari kejenuhan yang cukup berat mulai dapat terdeteksi. Respon rele diperlihatkan dalam Gambar 4.6. Serupa dengan kasus-1, peluruhan offset transien tidak dirasakan oleh rele yang kemudian mereproduksi bentuk yang sama dari bentuk gelombang arus yang diinjeksikan. Gambar 4.7 membandingkan antara kasus simulasi dan respon rele. Gambar tersebut menunjukkan bahwa besar dari keduanya tidak sama. Tercatat juga sekitar 36% pengurangan dalam besaran arus yang diamati, dibandingkan dengan sinyal arus EMTP yang diinjeksikan.



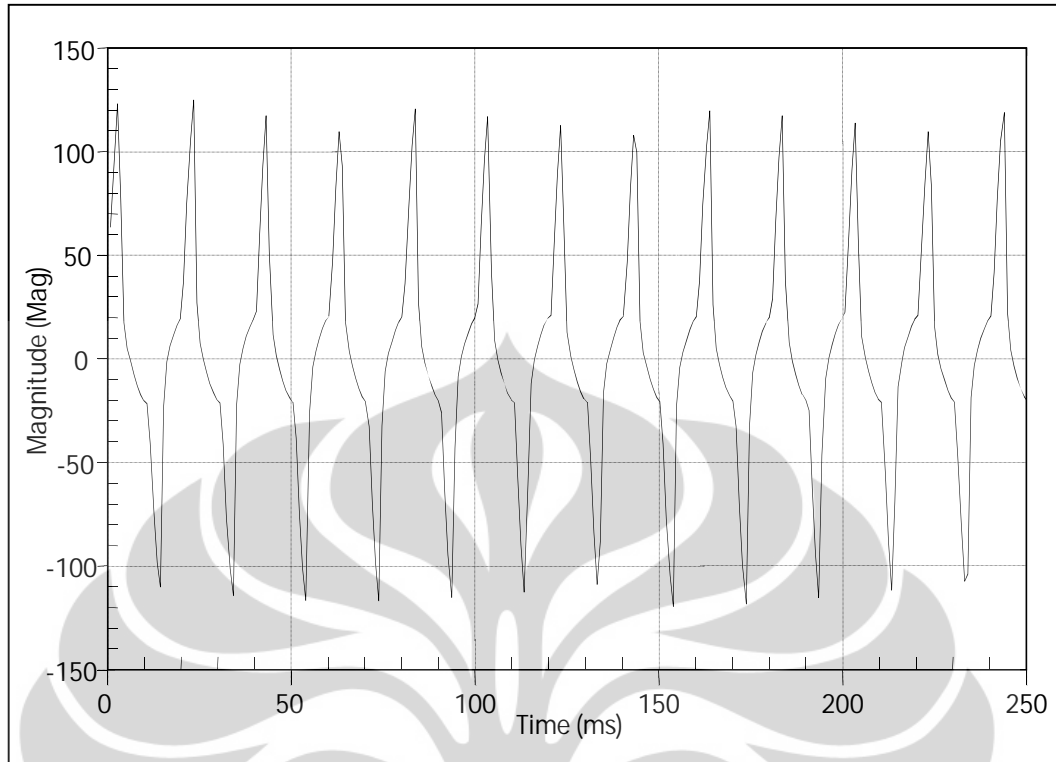
**Gambar 4.2** Kasus Beban-1, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital



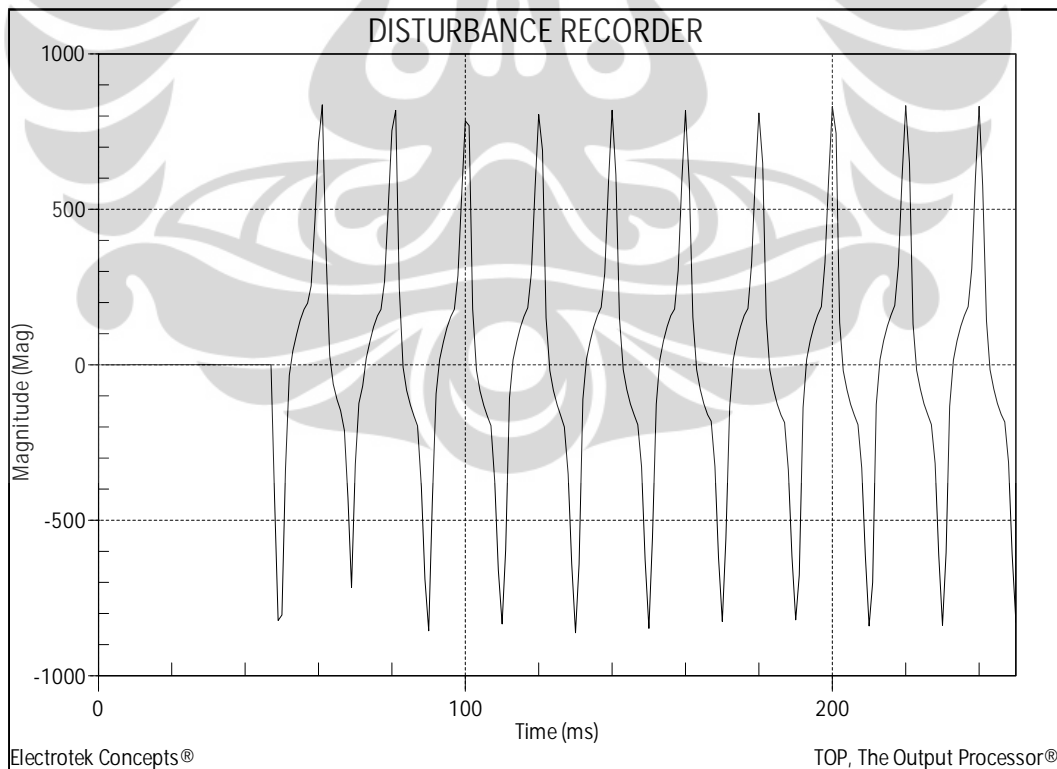
**Gambar 4.3** Respon Rele Digital terhadap Arus yang Diinjeksikan (Kasus-1)



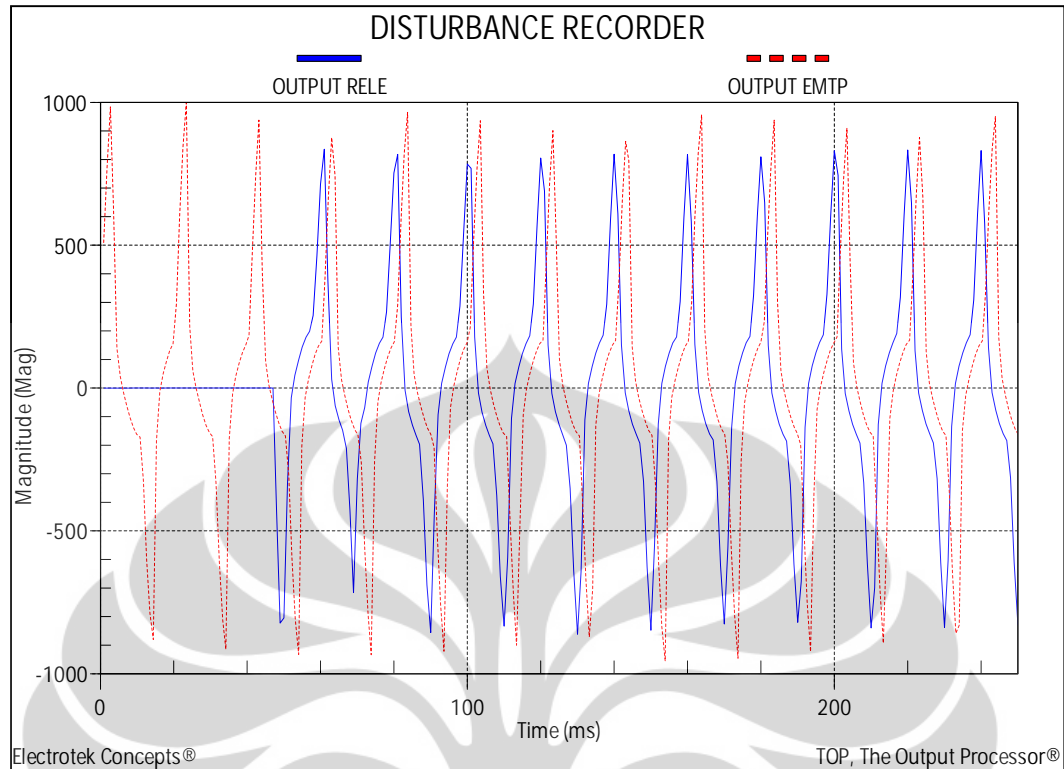
**Gambar 4.4** Simulasi Arus EMTP terhadap Respon Rele pada Kasus-1



**Gambar 4.5** Kasus Beban-2, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital

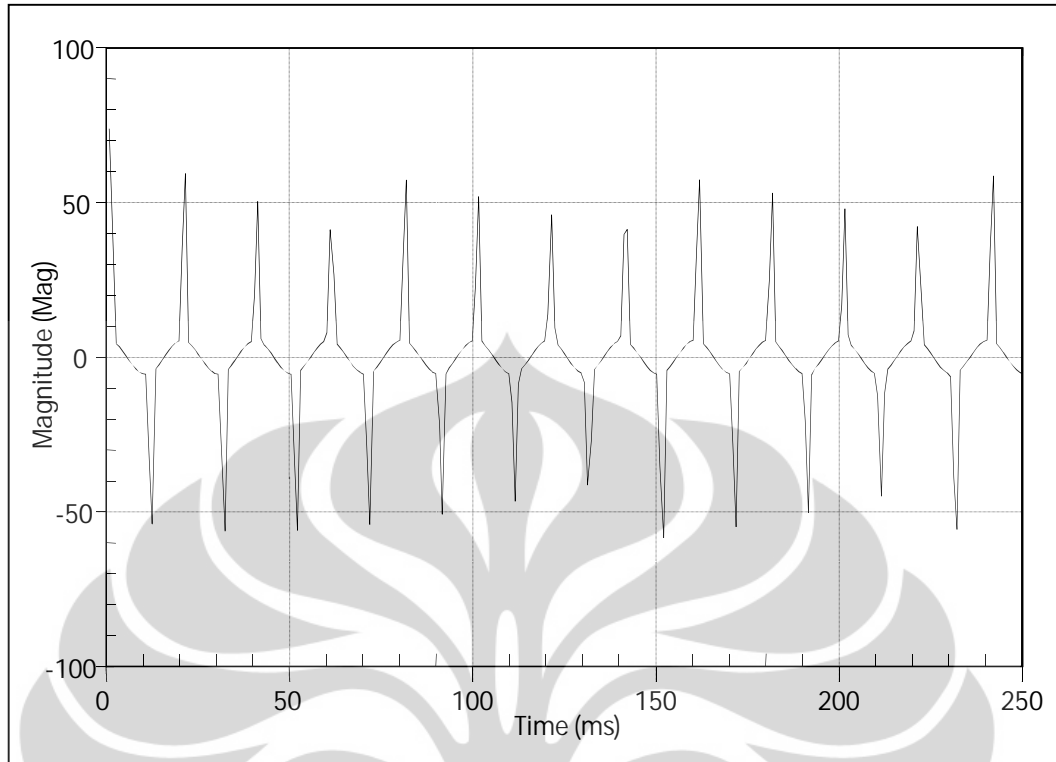


**Gambar 4.6** Respon Rele Digital terhadap Arus yang Diinjeksikan (Kasus-2)

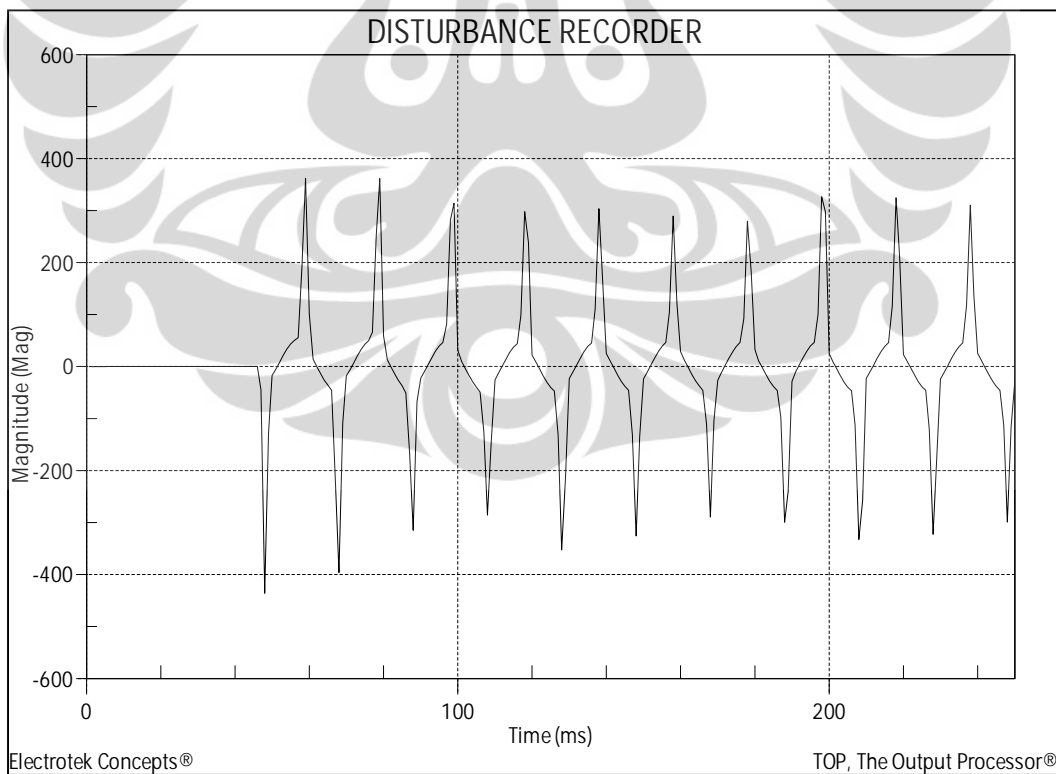


**Gambar 4.7** Simulasi Arus EMTP terhadap Respon Rele pada Kasus-2

Kasus ketiga menggunakan 10 kali lipat beban standar. Sebagai hasilnya, tercatat bahwa kejenuhan CT yang berat terlihat dari arus sekunder. Besar dan bentuk dari sinyal arus benar-benar terdistorsi seperti terlihat pada simulasi arus EMTP dalam Gambar 4.8. Besar arus berkurang sekitar 89% dari besar arus sekunder yang diharapkan. Bentuk sinyal benar-benar terdistorsi, meskipun arus primer berbentuk sinusoidal murni. Respon dari rele digital diperlihatkan dalam Gambar 4.9. Bagaimanapun juga, besaran arus yang lebih rendah telah dirasakan oleh rele dan serupa dengan kasus sebelumnya. Gambar 4.10 membandingkan arus simulasi dan respon rele. Terdapat sekitar 41% pengurangan dalam besaran arus yang diamati. Nilai RMS arus yang dirasakan oleh rele digital arus lebih, diperlihatkan dalam Gambar 4.11. Gambar tersebut menunjukkan bahwa kemampuan rele untuk melakukan reproduksi arus yang diinjeksikan menjadi berkurang seiring dengan peningkatan beban. Evaluasi lebih lanjut terhadap sinyal arus ini akan disampaikan dalam bagian 4.5 dan 4.6.

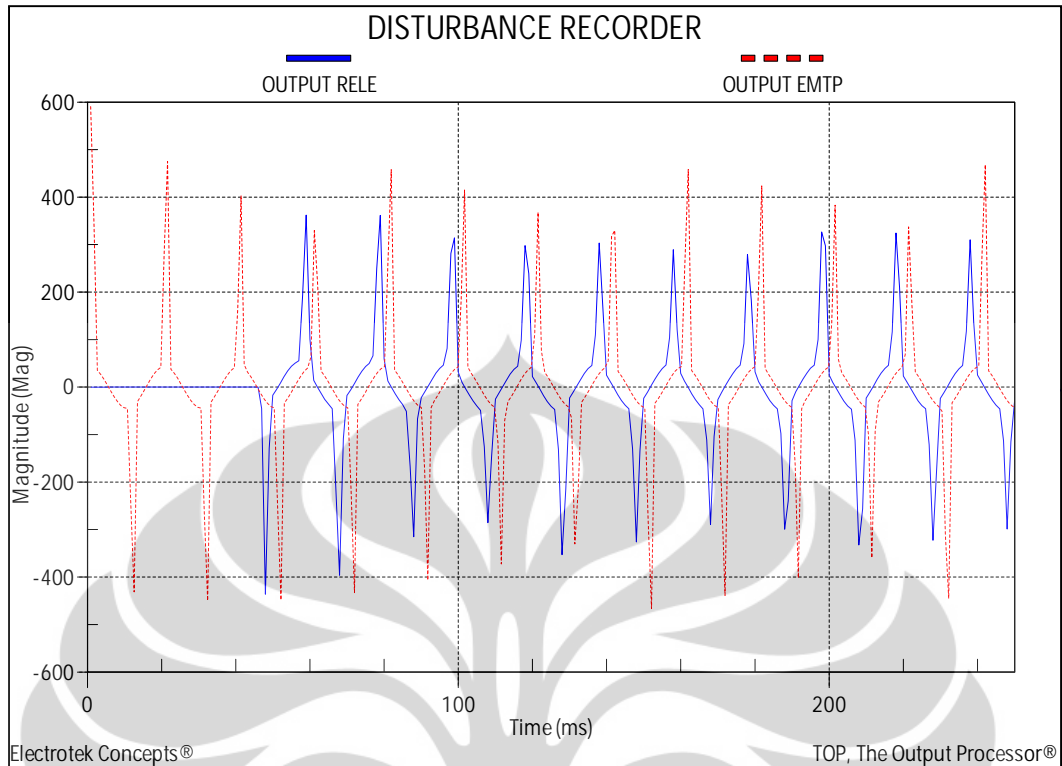


**Gambar 4.8** Kasus Beban-3, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital

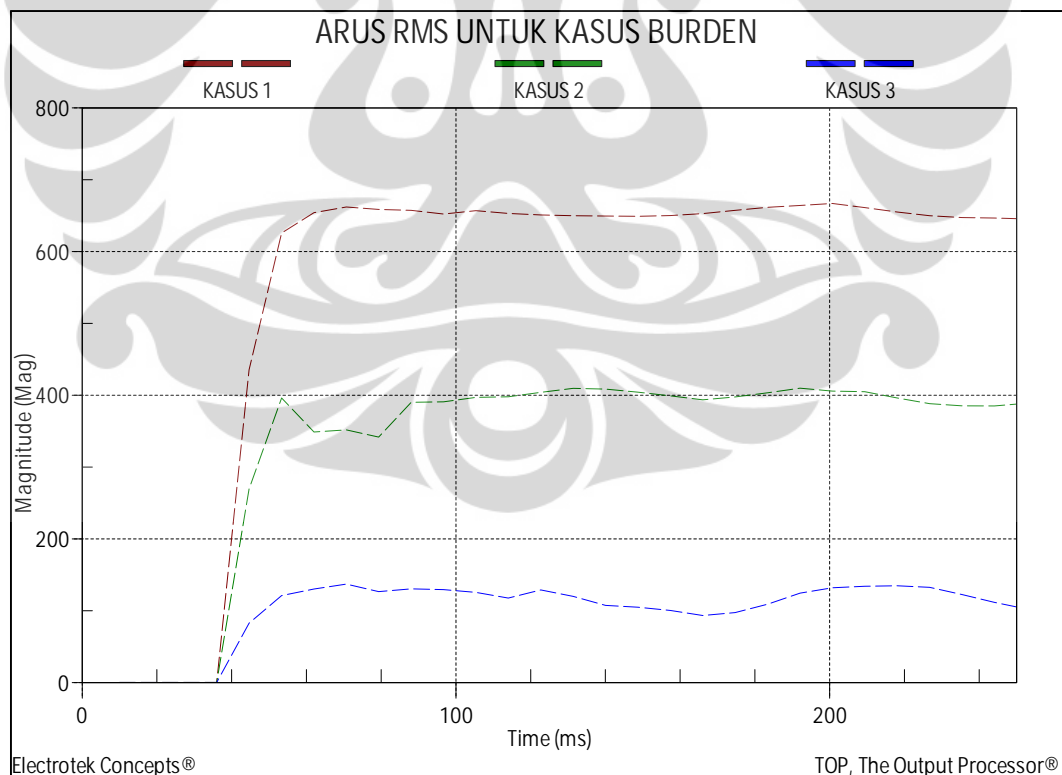


**Gambar 4.9** Respon Rele Digital terhadap Arus yang Diinjeksikan (Kasus-3)





**Gambar 4.10** Simulasi Arus EMTP Terhadap Respon Rele pada Kasus-3



**Gambar 4.11** Respon Rele untuk Tiga Kasus Beban Berbeda, Berbasis pada Pengukuran Arus RMS, yang Terefleksi pada Sisi Primer

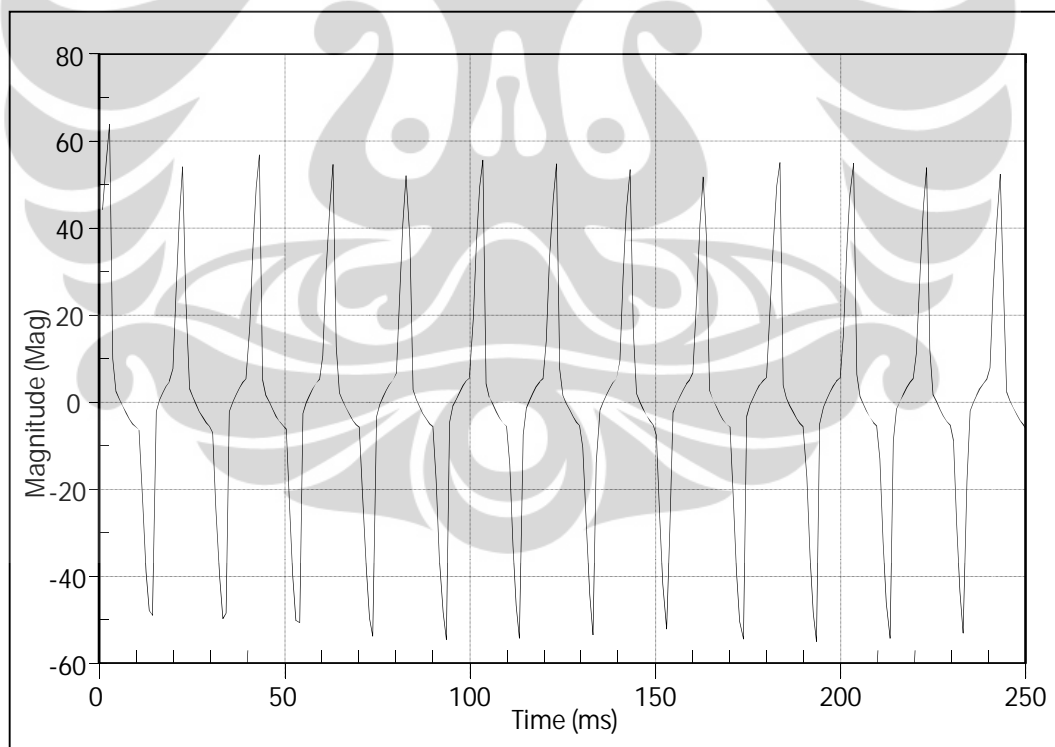
Pengujian selanjutnya adalah melakukan pengamatan terhadap penggunaan CT berasio rendah dalam suatu rangkaian dengan arus gangguan yang tinggi, dengan mempertimbangkan beban sebesar  $1 \Omega$ , dengan asumsi bahwa keseluruhan rangkaian menggunakan kabel berukuran #10 AWG ( $1.0 \Omega / 1000\text{-ft}$ ) sepanjang 1000 ft. Pengujian telah dilakukan terhadap berbagai tingkat hubung singkat AC simetris yang seperti diperlihatkan dalam Tabel 4.2.

Gambar 4.12 memperlihatkan simulasi arus untuk kasus-1, di mana telah diinjeksikan arus sebesar 10 kali rating CT ke model EMTP tersebut dengan 5 kali lipat beban sekunder standar. Sinyal menunjukkan awal dari suatu kejenuhan CT. Bentuk dari gelombang sedikit terdistorsi. Respon rele hampir sama dengan arus yang diinjeksikan seperti diperlihatkan dalam Gambar 4.13. Respon rele dan arus sekunder yang disimulasikan dapat dibandingkan dengan mengacu pada Gambar 4.14.

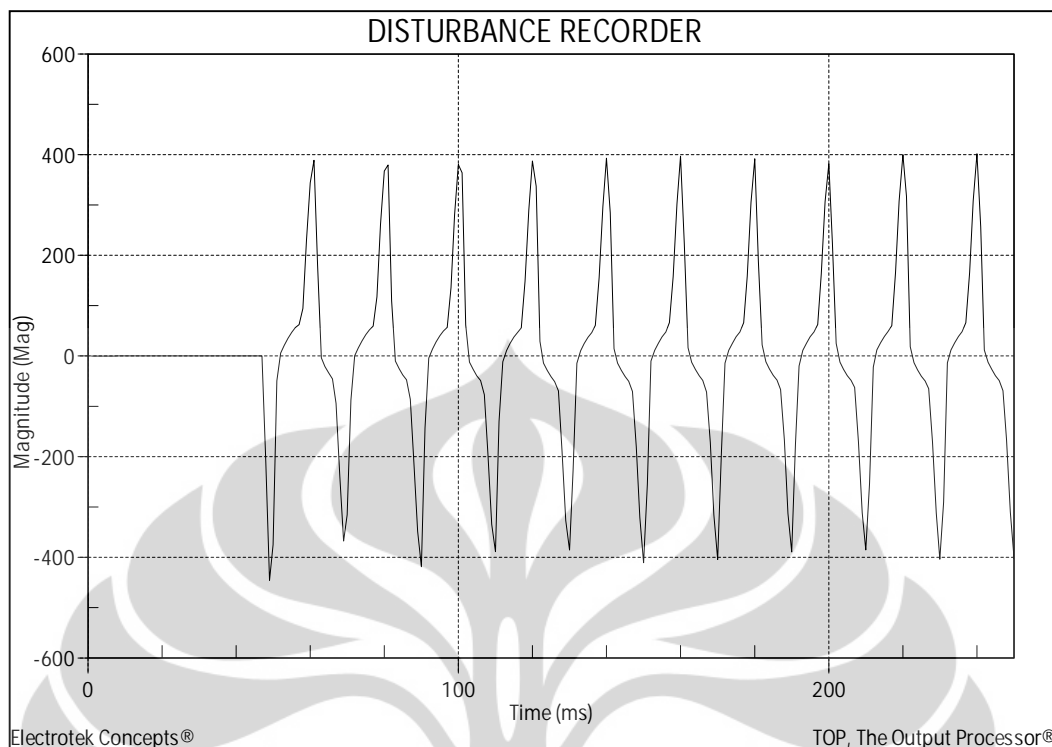
Gambar 4.15 memperlihatkan simulasi arus untuk kasus-2, di mana diinjeksikan 15 kali rating CT terhadap model CT dengan beban sekunder standar sebesar 5 kali lipat. Sinyal menunjukkan kejenuhan simetris yang lebih berat. Bentuk dari gelombang dan besaran arus sekunder terpengaruh dan terdistorsi. Respon rele sedikit hampir sama dengan arus yang diinjeksikan dan terlihat dalam Gambar 4.16. Respon rele dan simulasi arus sekunder dapat dibandingkan dengan mengacu pada Gambar 4.17. Besar keluaran dari rele berkurang sebesar 36% dibandingkan dengan arus yang diinjeksikan.

**Tabel 4.2** Kasus yang Dilaksanakan untuk Melihat Pengaruh Gangguan Primer Simetris pada Rele Digital

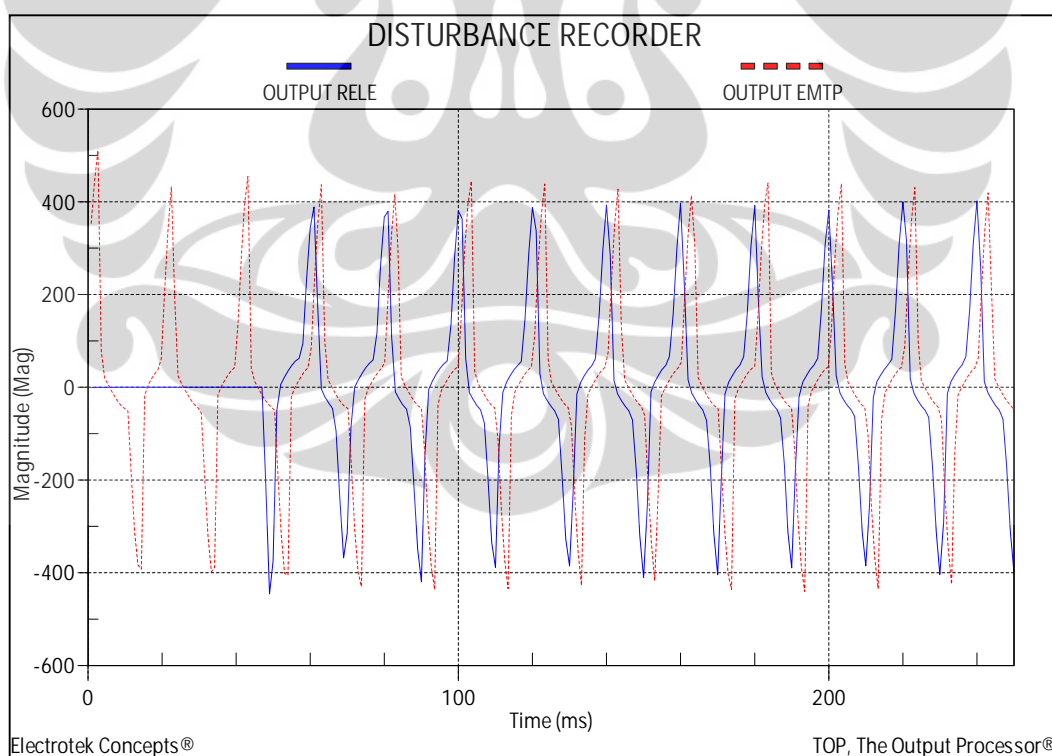
Injeksi Arus Primer ke dalam Model EMTP dengan CT Rasio 40/5	Beban (Ohm)
Kasus-1 10 X Arus Rating CT (400 RMS Current)	1.0 (5 X Standar Beban)
Kasus-2 15 X Arus Rating CT (600 RMS Current)	
Kasus-3 30 X Arus Rating CT (1200 RMS Current)	



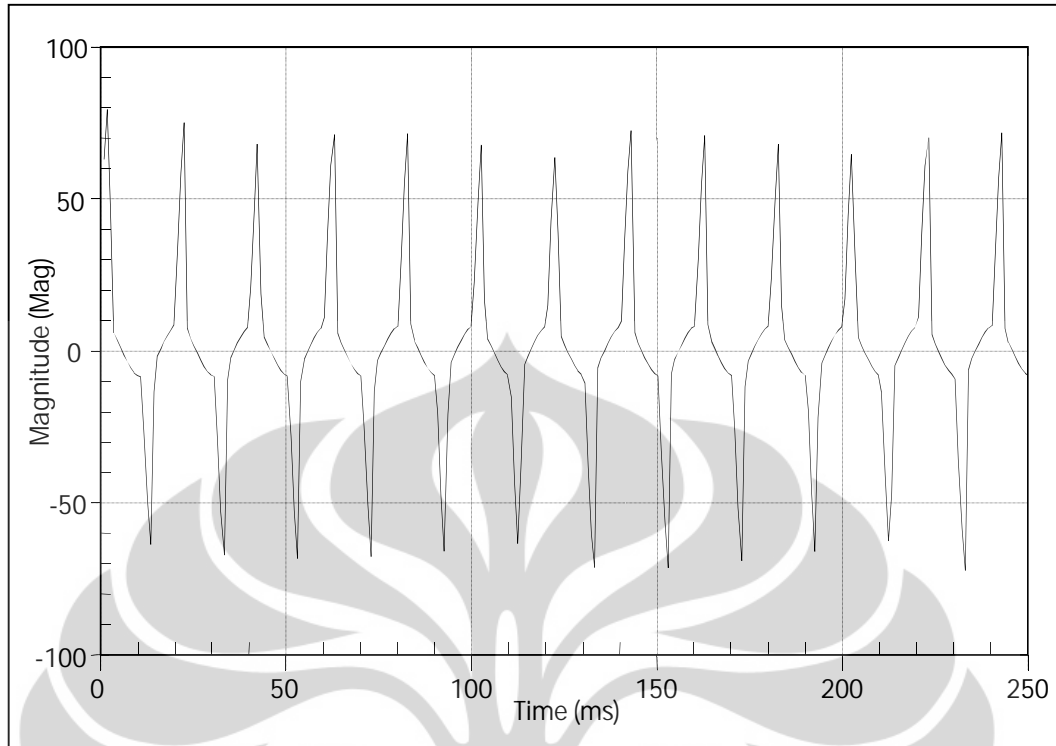
**Gambar 4.12** Kasus-1 Hubung Singkat Simetris, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital



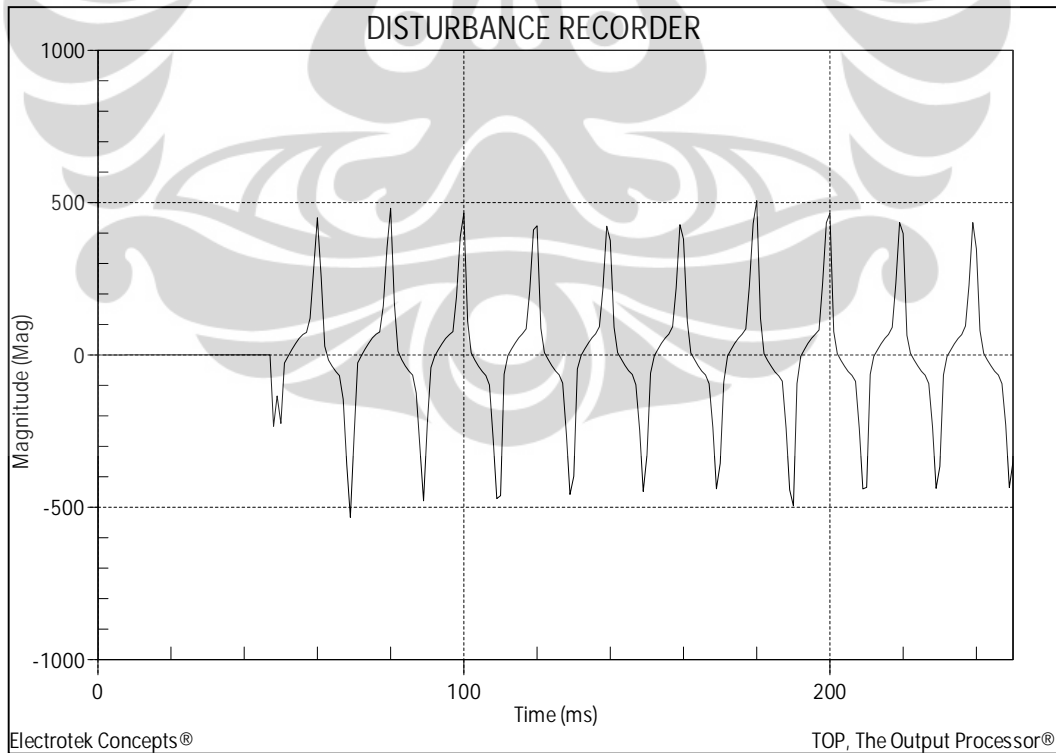
**Gambar 4.13** Respon Rele Digital terhadap Arus Injeksi (Kasus-1)



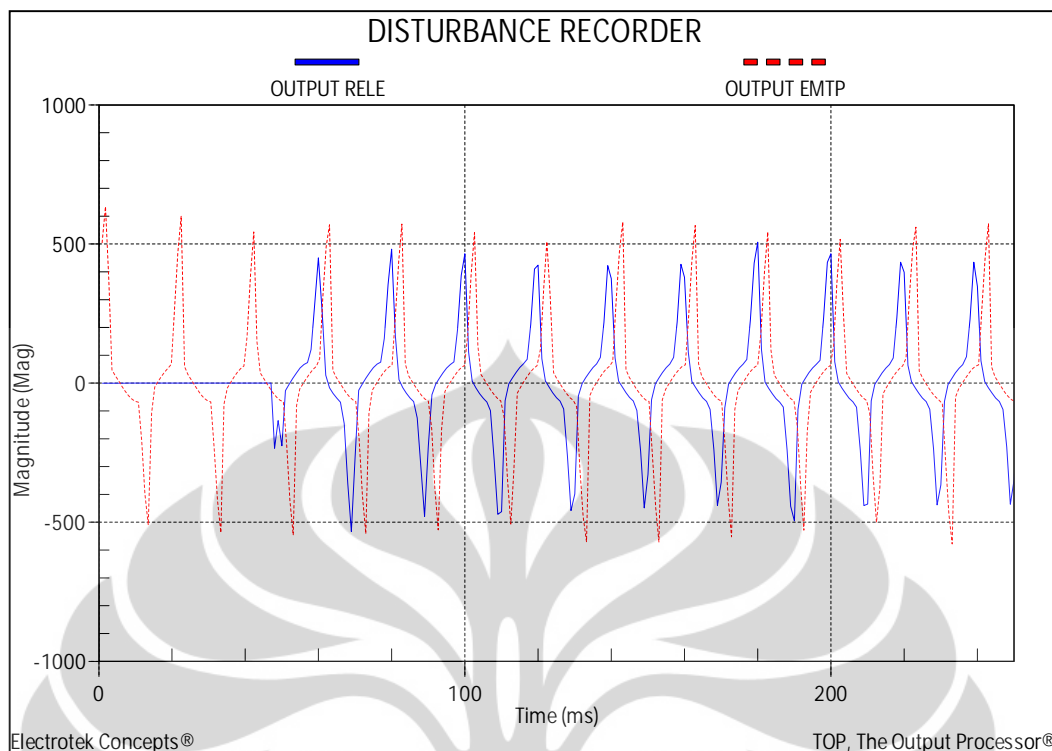
**Gambar 4.14** Simulasi Arus di EMTP terhadap Respon Rele pada Kasus-1



**Gambar 4.15** Kasus-2 Hubung Singkat Simetris, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital



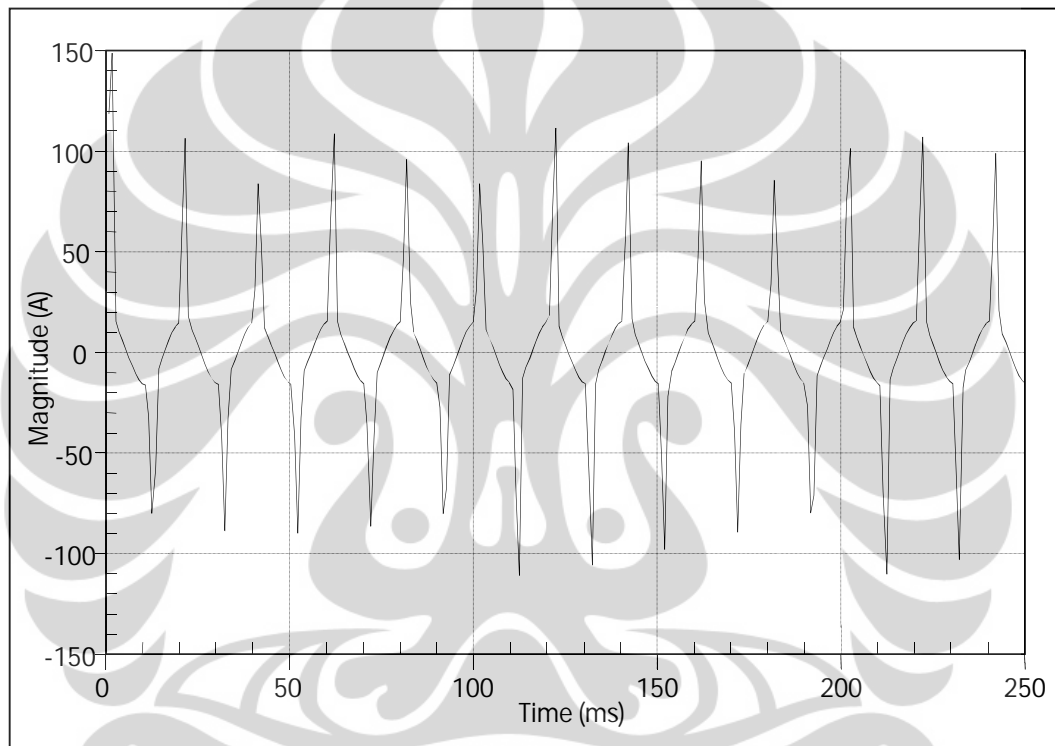
**Gambar 4.16** Respon Rele Digital terhadap Arus Injeksi (Kasus-2)



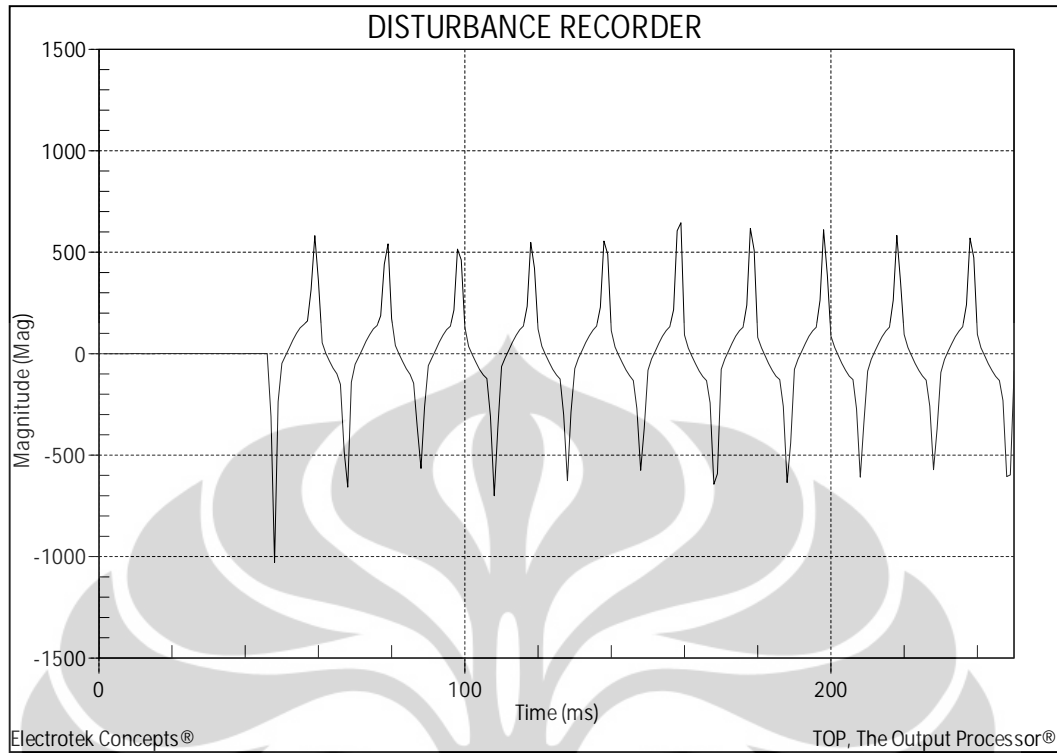
**Gambar 4.17** Simulasi Arus EMTF terhadap Respon Rele pada Kasus-2

Dilakukan pula suatu kasus hubung singkat yang lebih berat, di mana arus sebesar 30 kali rating CT dengan 5 kali beban sekunder standar telah diinjeksikan ke dalam rele digital arus lebih. Seperti diperlihatkan dalam Gambar 4.18, sinyal menunjukkan kejenuhan simetris yang sangat berat. Bentuk gelombang dan besar arus sekunder sangat terpengaruh oleh distorsi. Besaran arus berkurang hingga sekitar 17% dari besar arus sekunder yang diharapkan. Respon rele sama dengan arus yang diinjeksikan pada setengah siklus pertama, kemudian respon arus rele mulai meluruh seperti terlihat dalam Gambar 4.19. Arus yang dirasakan oleh rele berkurang secara signifikan hingga sekitar 39% dari arus yang diinjeksikan. Ujung runcing dari bentuk gelombang yang diinjeksikan tidak dapat dilihat oleh respon rele. Hal ini terutama karena rendahnya tingkat sampling rele (32 sampel/ siklus) di mana isi harmonisa dengan frekuensi tinggi tidak dapat ditangkap oleh rele. Walaupun CT memperlihatkan kejenuhan yang berat, namun besar arus relatif dapat dikirimkan ke rele, yang berarti bahwa rele instantaneous dapat beroperasi dengan baik. Gambar 4.20 membandingkan sinyal arus simulasi dengan respon rele.

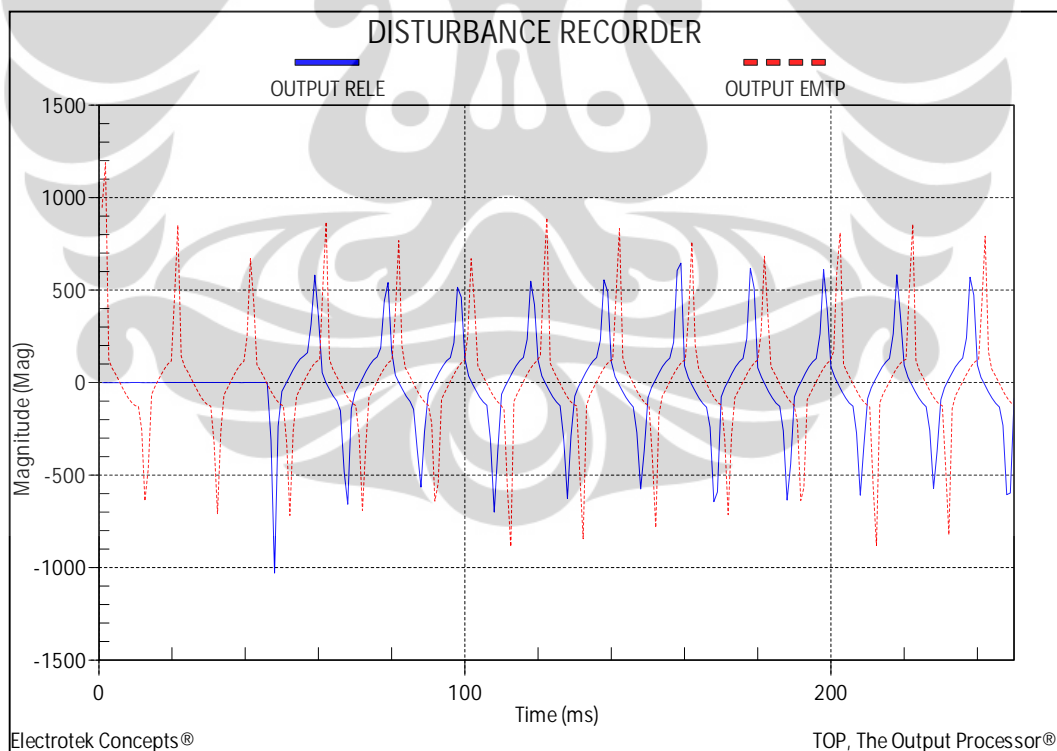
Nilai arus yang dilihat oleh rele digital dalam tiga kasus tersebut diperlihatkan dalam Gambar 4.21. Gambar menunjukkan bahwa kemampuan rele untuk melakukan reproduksi arus yang diinjeksikan berkurang ketika tingkat gangguan simetris bertambah. Dengan mempertimbangkan kasus terburuk, rele dapat merasakan arus sebesar 179A, meskipun terjadi kejenuhan CT yang sangat berat. Evaluasi lebih lanjut dari nilai arus ini akan disampaikan dalam bagian 4.5 dan 4.6.



**Gambar 4.18** Kasus-3 Hubung Singkat Simetris, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital

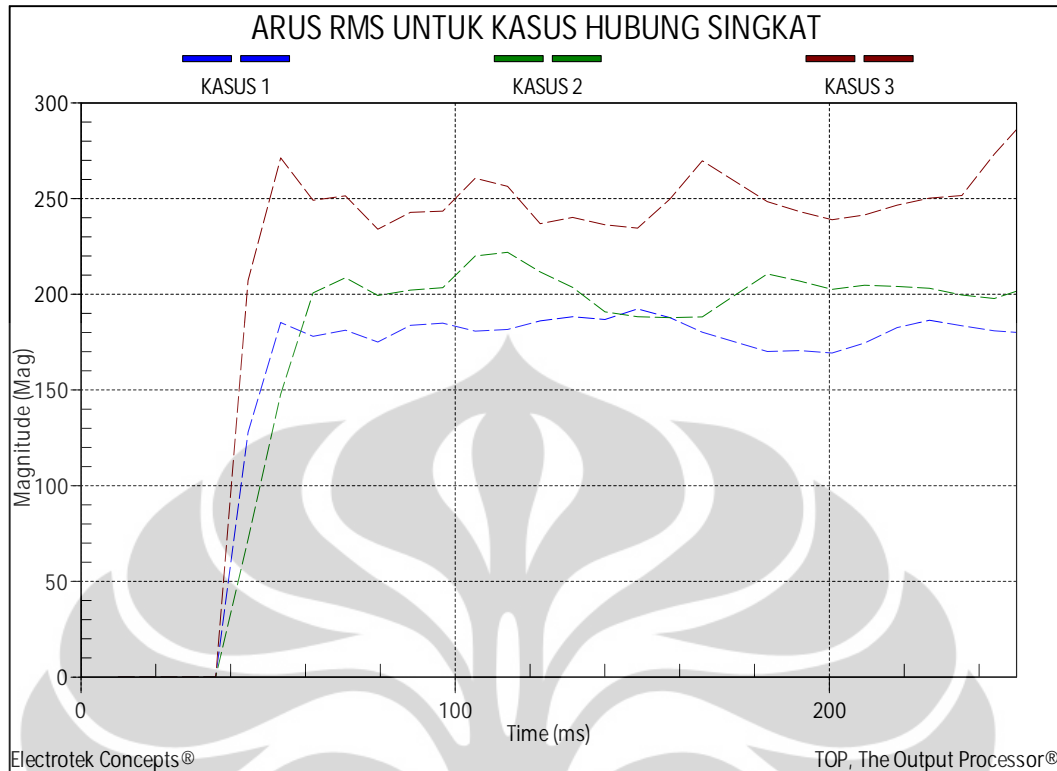


**Gambar 4.19** Respon Rele Digital terhadap Arus Injeksi (Kasus-3)



**Gambar 4.20** Simulasi Arus EMTP terhadap Respon Rele pada Kasus-3





**Gambar 4.21** Respon Rele untuk Tiga Kasus Hubung Singkat Simetris Berdasarkan Pengukuran Arus RMS

#### 4.4 Pengaruh Arus Asimetris Terhadap Rele Digital Arus Lebih

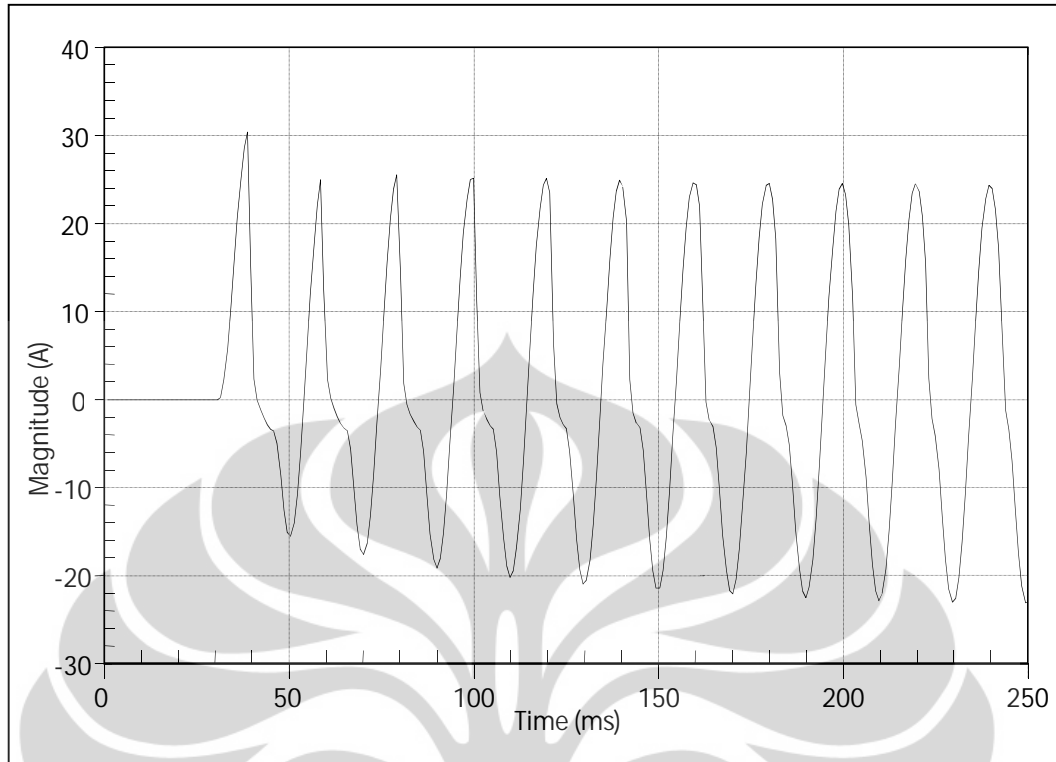
Dampak dari gangguan asimetris terhadap CT dan pengaruh yang ditimbulkan terhadap rele arus lebih berbasis mikroprosesor akan diselidiki dalam bagian ini. Tabel 4.3 menunjukkan ringkasan kasus, yang dikembangkan dan diinjeksikan pada rele digital arus lebih melalui *OMICRON CMC356*. Tujuannya adalah untuk menguji perilaku transien rele digital arus lebih dan responnya terhadap perubahan rasio  $X/R$ . Semua kasus yang dikembangkan telah berdasarkan pada beban  $0.5 \Omega$  (2.5 kali beban standar).

Dalam Kasus-1, arus primer yang relatif rendah diinjeksikan ke dalam rele dengan *DC Offset* dimana konstanta waktu adalah 0.078 detik atau rasio  $X/R$  adalah 24. Gambar 4.22 memperlihatkan arus sekunder yang disimulasikan. CT didorong ke arah jenuh pada setengah siklus pertama dan puncak arus tetap

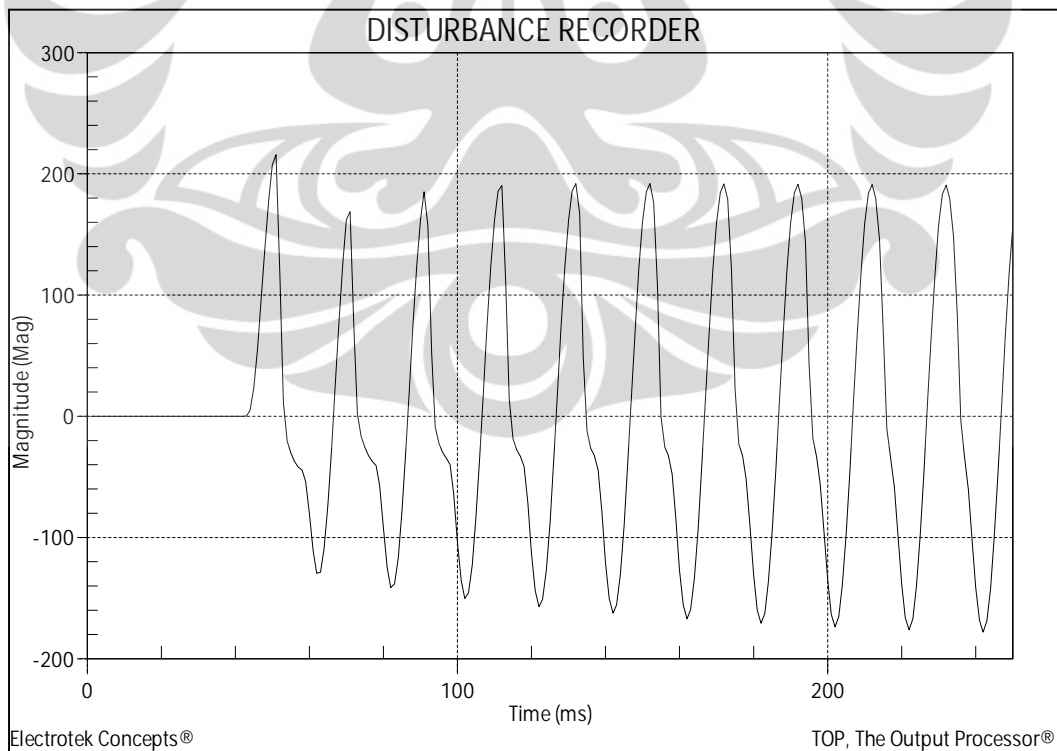
rendah serta terdistorsi selama satu siklus. Setelah itu, sinyal sinusoidal kembali pulih setelah pengaruh *DC Offset* hilang. Respon dari rele dapat diperkirakan nilai puncak dari kejenuhan arus sekunder seperti terlihat dalam Gambar 4.23. Gambar 4.24 menunjukkan arus sekunder yang diinjeksikan dan respon arus rele hampir serupa 2.5 siklus dari setengah siklus pertama diperlihatkan dari pada respon rele yang merepresentasikan kondisi sebelum gangguan.

**Tabel 4.3** Kasus yang Dilakukan untuk Mengamati Pengaruh Rasio X/R pada Rele Digital Arus Lebih

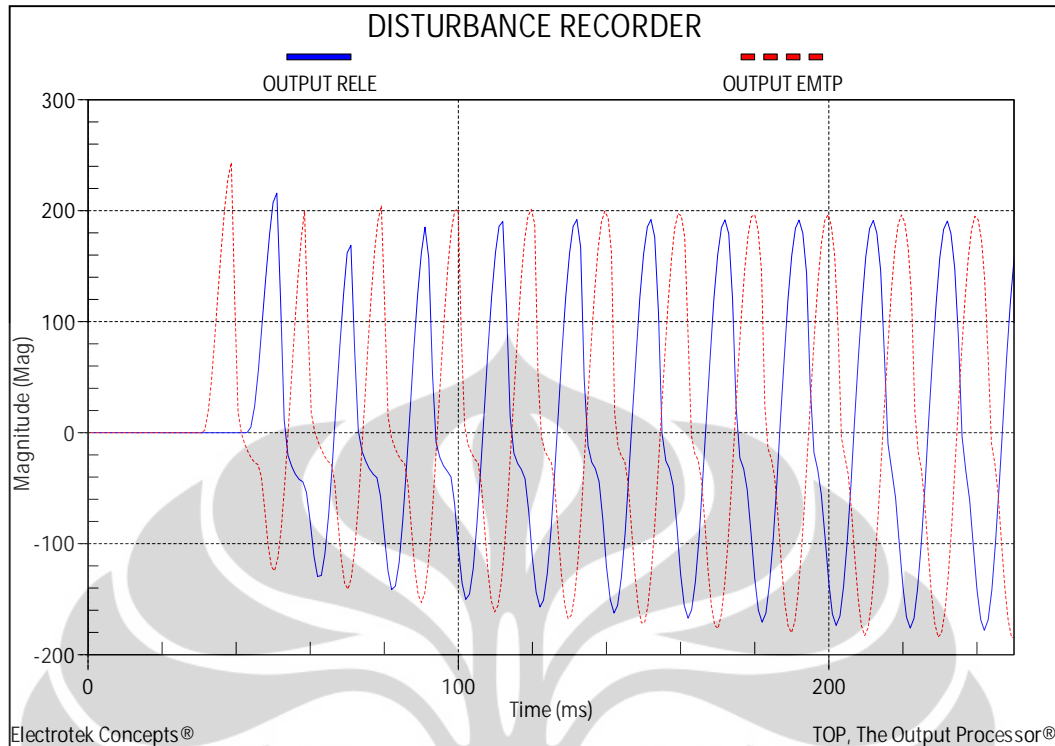
Kasus	Injeksi Arus Primer terhadap Model CT 40/5 dengan EMTP	Konstanta Waktu	Rasio X/R	Tegangan Jenuh Menggunakan Kriteria Persamaan (4.8)
1	3.25 x Arus Rating CT	0.078 s	24	203.1
2		0.052 s	16	138.1
3	20 x Arus Rating CT	0.078 s	24	1250
4		0.052 s	16	850



**Gambar 4.22** Kasus-1, Gangguan Asimetris dengan  $X/R = 24$ , Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital

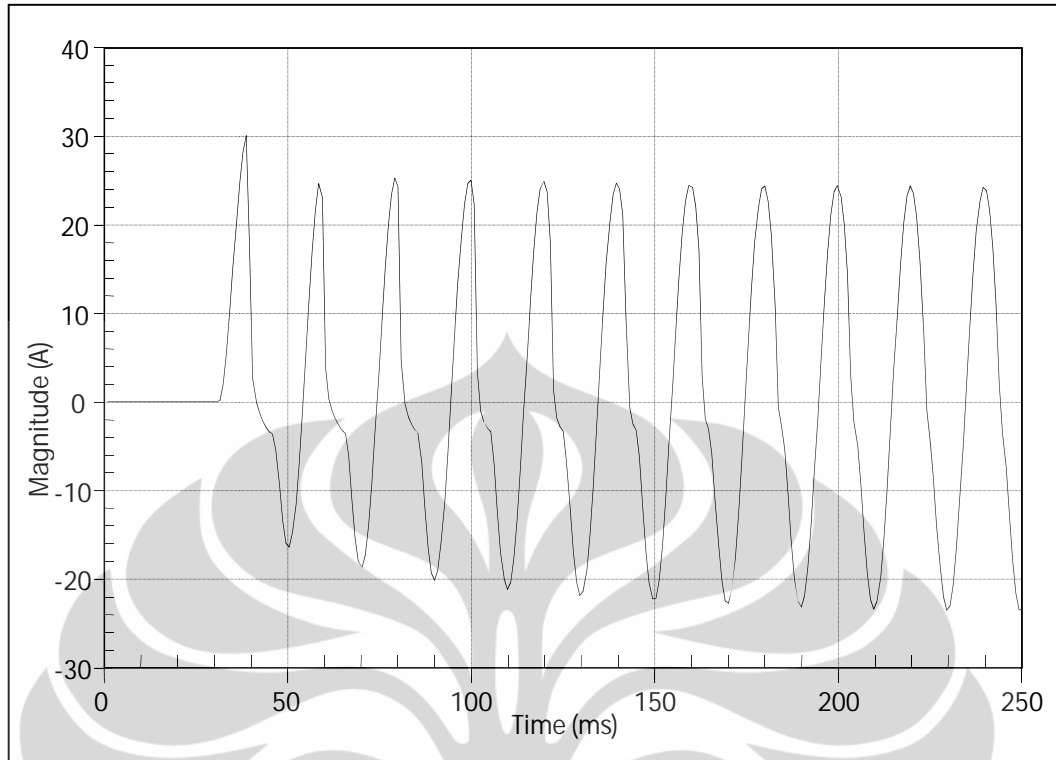


**Gambar 4.23** Respon Rele Digital terhadap Injeksi Arus (Kasus-1)

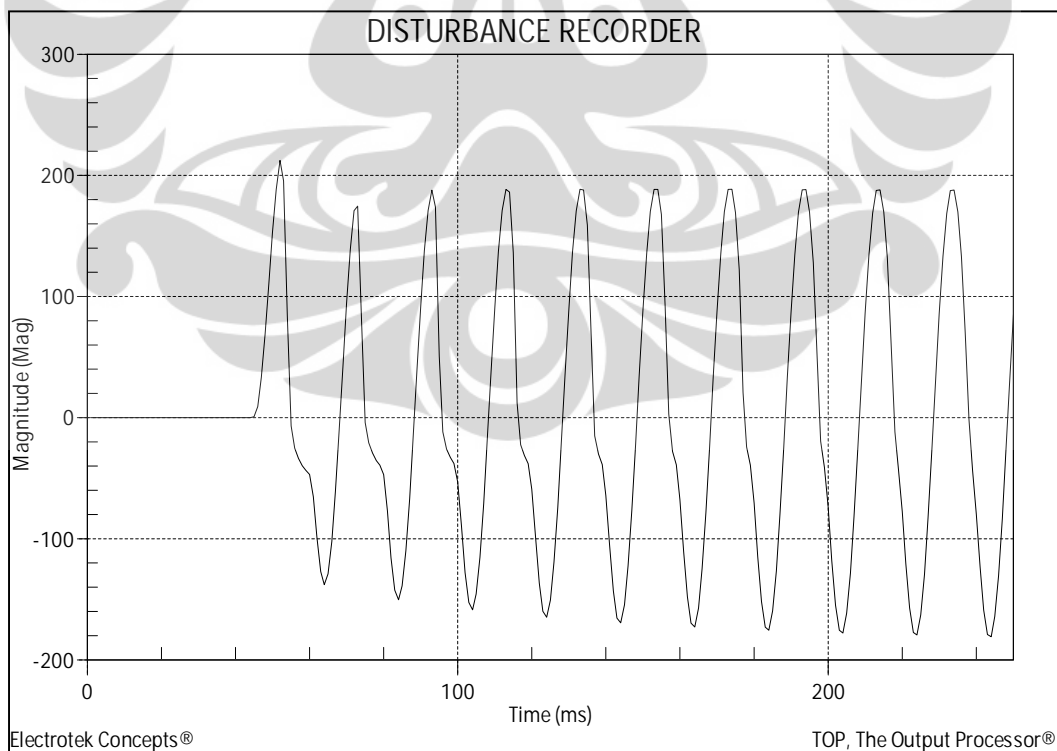


**Gambar 4.24** Simulasi Arus dengan EMTP terhadap Respon Rele dalam Kasus-1 (Terefleksi pada Sisi Primer dari CT 40/5)

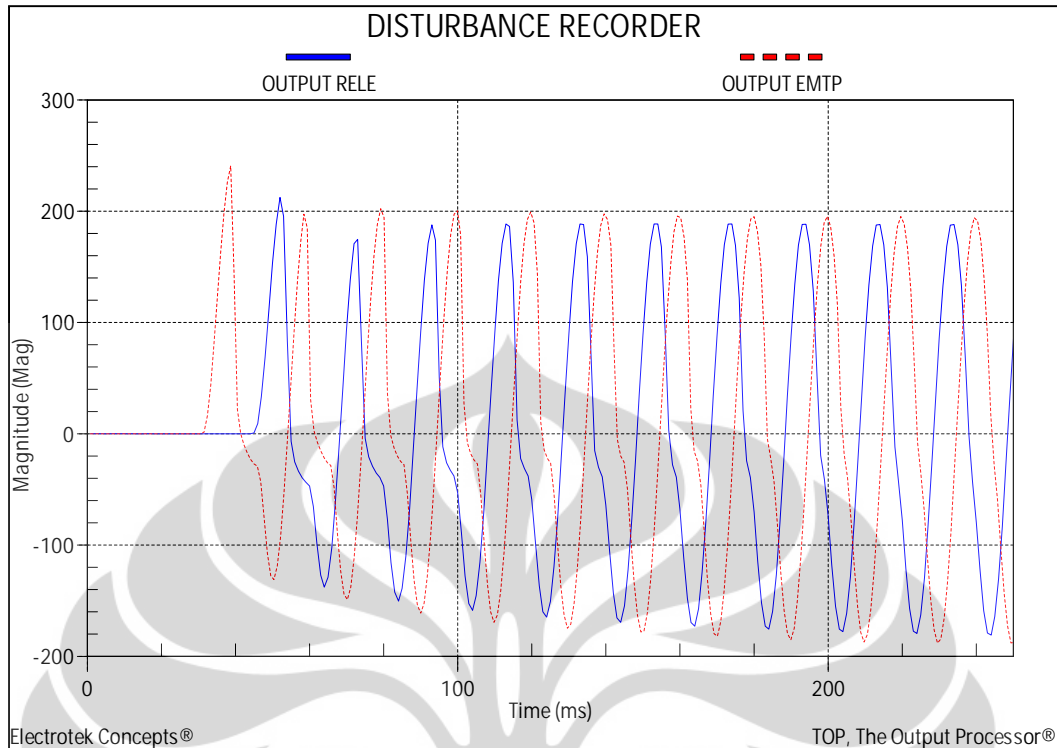
Dalam kasus-2, digunakan arus injeksi yang sama, tetapi dengan menurunkan rasio ( $X/R = 16$ ). Gambar 4.25 memperlihatkan arus sekunder yang disimulasikan. CT dibuat menjadi jenuh dan nilai puncak arus tetap rendah serta terdistorsi selama kurang dari satu siklus. Ternyata sinyal sinusoidal kembali pulih lebih cepat setelah hilangnya pengaruh dari *DC Offset*. Serupa dengan kasus-1, respon rele bisa memprediksi puncak kejenuhan dari arus sekunder seperti diperlihatkan dalam Gambar 4.26. Gambar 4.27 menunjukkan bahwa arus sekunder yang diinjeksikan dan respon arus rele hampir serupa. Gambar 4.28 memperlihatkan nilai RMS dari arus sekunder untuk kedua kasus. Pengaruh perubahan rasio  $X/R$  sistem pada rele digital arus lebih diperlihatkan dalam gambar tersebut. Nilai RMS menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio  $X/R$ , respon dari rele digital menjadi lebih lambat. Besar arus RMS berkurang ketika rasio  $X/R$  meningkat.



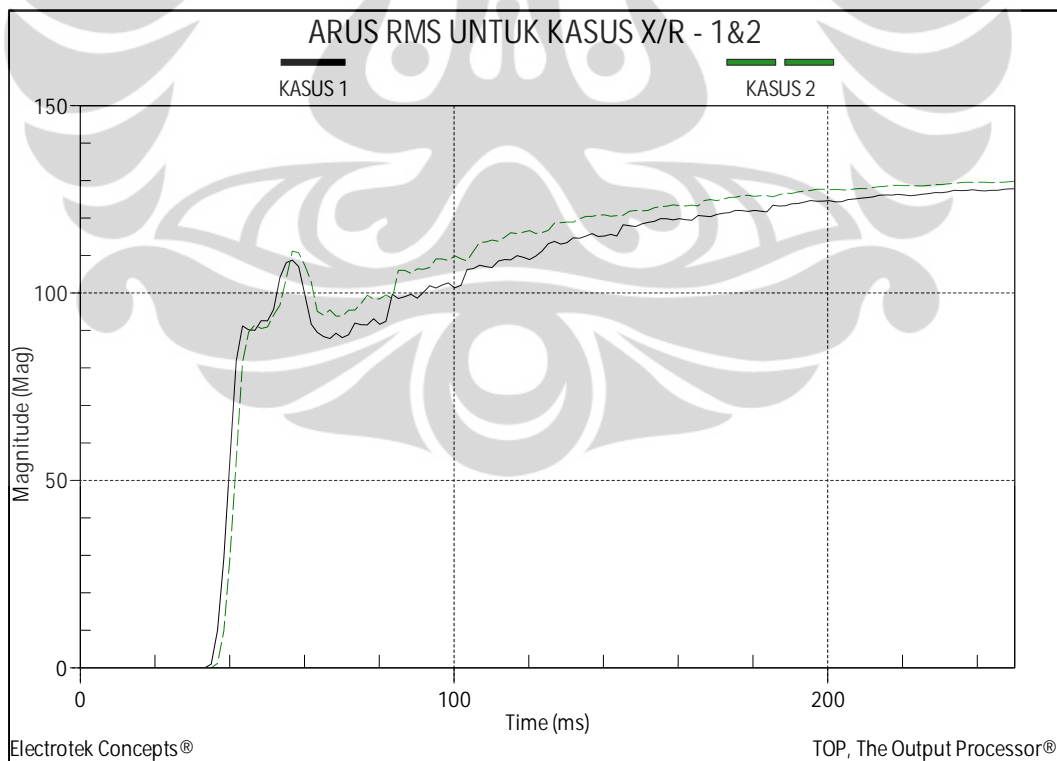
**Gambar 4.25** Kasus-2 Gangguan Asimetris dengan X/R 16, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital



**Gambar 4.26** Respon Rele Digital terhadap Arus Injeksi (Kasus-2)



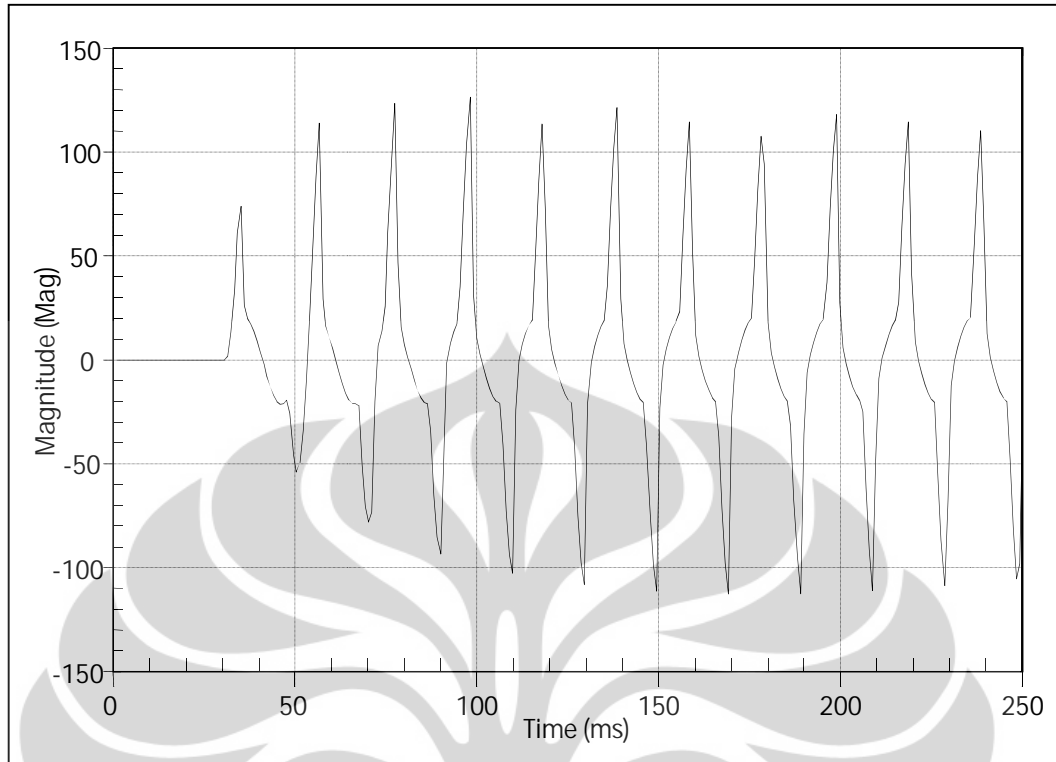
**Gambar 4.27** Simulasi Arus EMTP terhadap Respon Arus Rele dalam Kasus-2 (Terefleksi pada Sisi Primer CT 40/5)



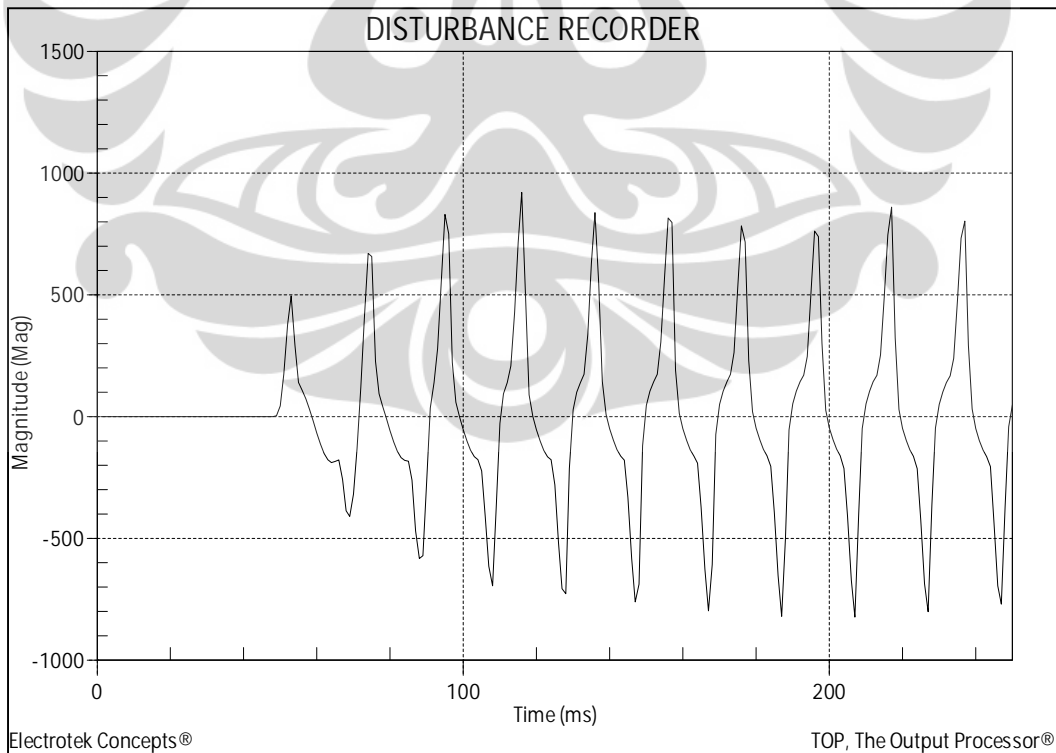
**Gambar 4.28** Respon Rele untuk Gangguan Asimetris dengan Rasio X/R yang Berbeda, Kasus-1&2 berdasarkan pada Pengukuran RMS

Simulasi arus sekunder untuk Kasus-3 diperlihatkan dalam Gambar 4.29. Arus injeksi yang sangat tinggi dilakukan pada sisi primer CT (20 X CT) dengan beban sekunder yang sama dan rasio X/R adalah 24. Kejenuhan CT dibuat menjadi jenuh lebih berat dan arus sekunder ternyata tetap rendah serta terdistorsi selama dua siklus. Respon rele terhadap arus yang diinjeksikan hampir serupa, dan bentuknya seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.30. Terdapat pengurangan besaran arus dari respon rele sekitar 34%, dibandingkan dengan arus yang disimulasikan seperti diperlihatkan dalam Gambar 4.31.

Dalam Kasus-4, digunakan arus injeksi yang sama, tetapi dengan menurunkan rasio X/R ( $X/R = 16$ ). Gambar 4.32 memperlihatkan simulasi arus sekunder yang telah dilaksanakan. CT dibuat menjadi sangat jenuh dan arus terendah serta terdistorsi selama satu siklus. Serupa dengan kasus-3, respon rele segera bisa memprediksi puncak kejenuhan dari arus seperti diperlihatkan dalam Gambar 4.33. Gambar 4.34 menunjukkan bahwa arus sekunder yang diinjeksi dan respon arus sekunder dari rele adalah hampir serupa. Gambar 4.35 memperlihatkan nilai RMS arus sekunder untuk kedua kasus. Nilai arus RMS direfleksikan pada nilai primer dengan menggunakan CT rasio 40/5. Diperlihatkan juga pengaruh dari perubahan rasio X/R sistem pada rele digital arus lebih. Nilai arus RMS menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio X/R, semakin lambat respon dari rele digital. Nilai RMS arus berkurang ketika rasio X/R meningkat. Dibandingkan dengan kasus 1&2, respon rele lebih lama untuk melakukan reproduksi arus sekunder yang diharapkan karena hal tersebut sehubungan dengan arus injeksi primer yang tinggi (20 X CT).

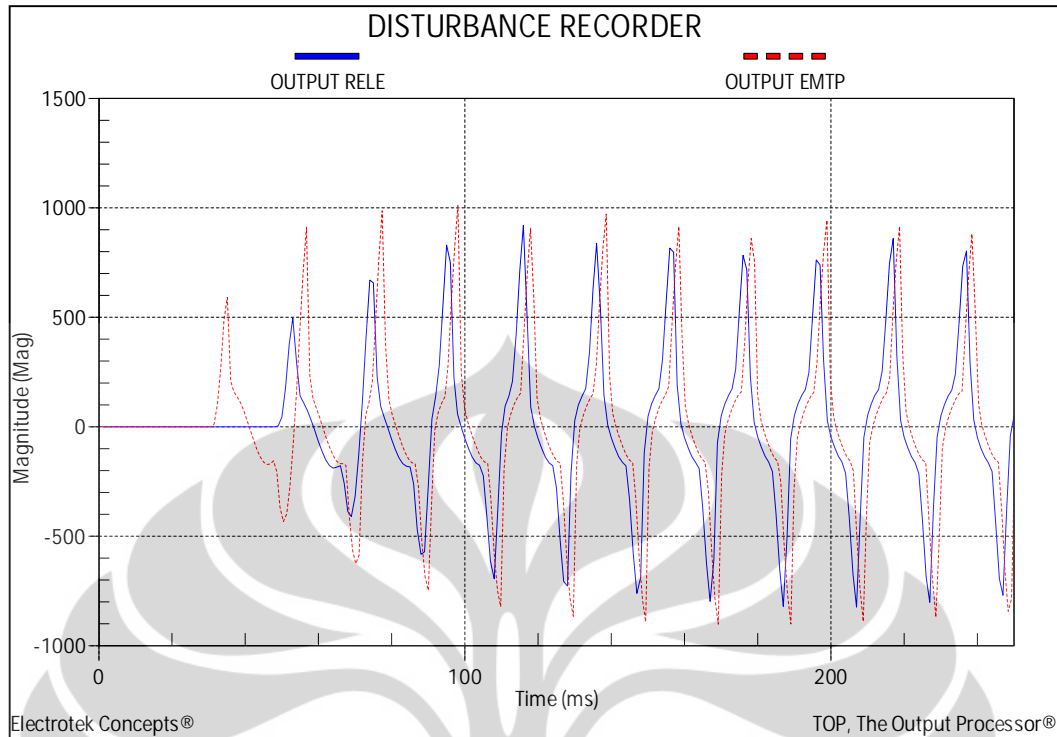


**Gambar 4.29** Gangguan asimetris dengan X/R 24 Kasus-3, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Relé Digital

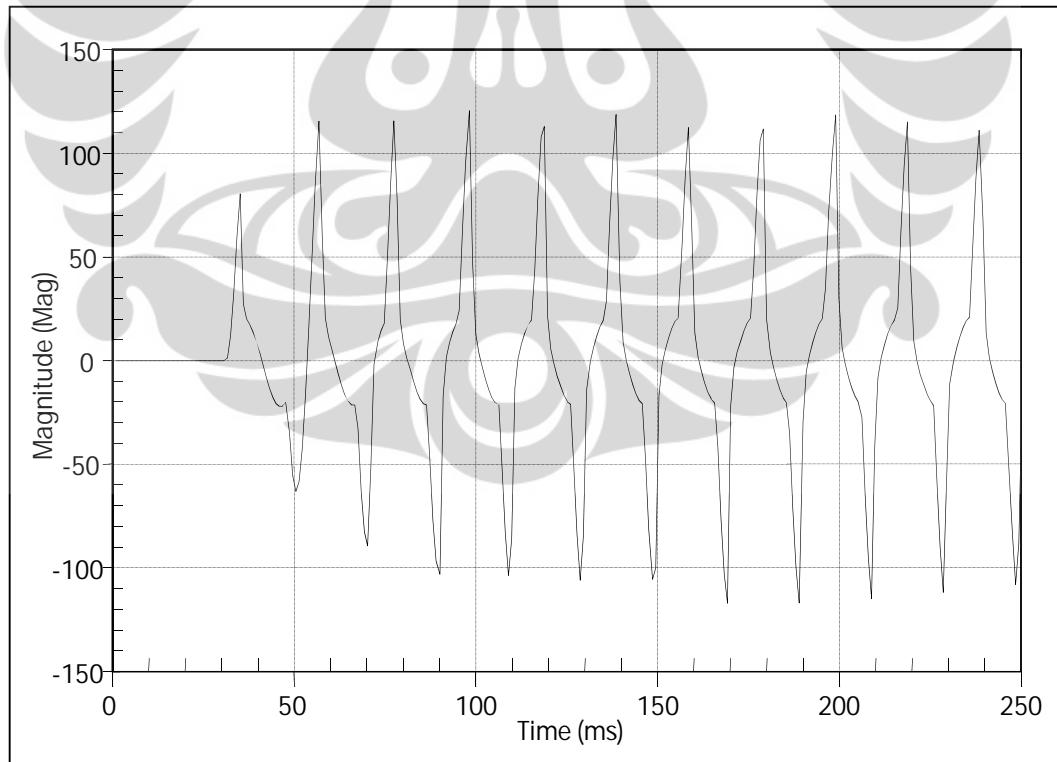


**Gambar 4.30** Respon Relé Digital terhadap Injeksi (Kasus-3)

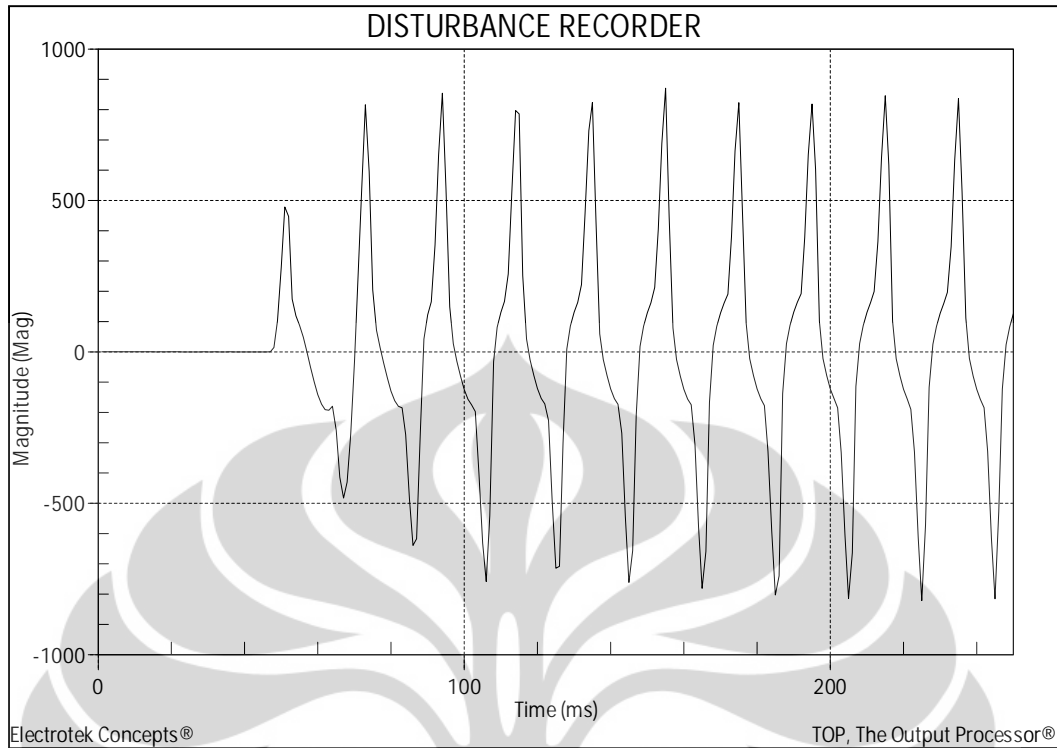




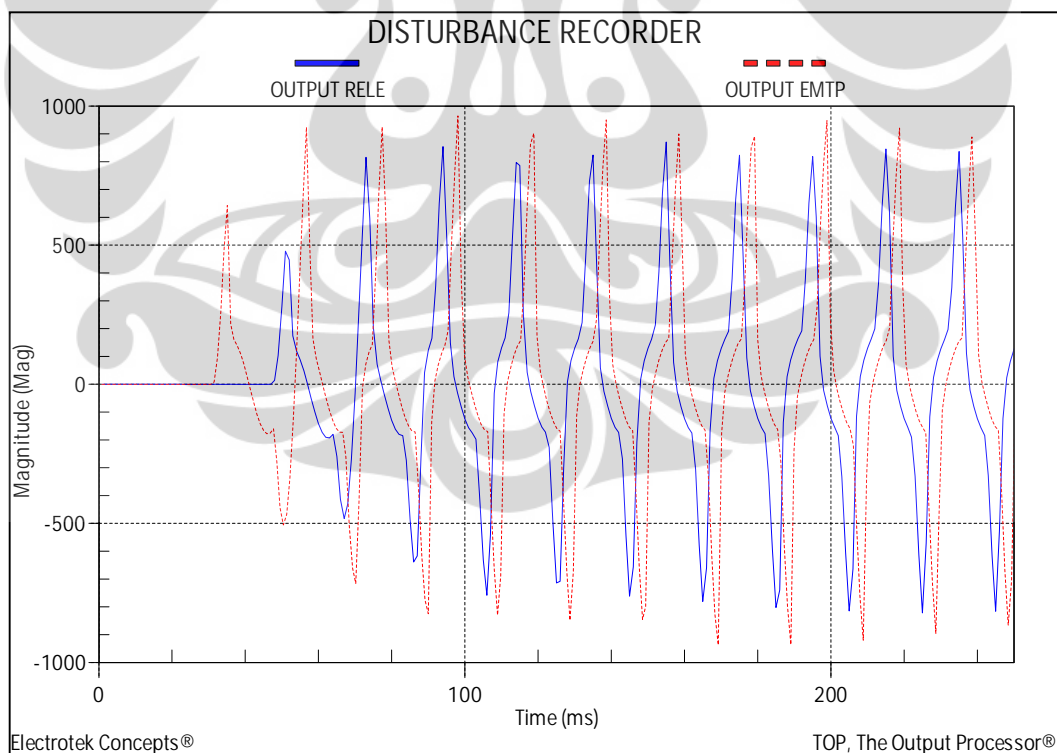
**Gambar 4.31** Simulasi Arus EMTP terhadap Respon Rele Arus dalam Kasus-3 (Terefleksi pada Sisi Primer CT 40/5).



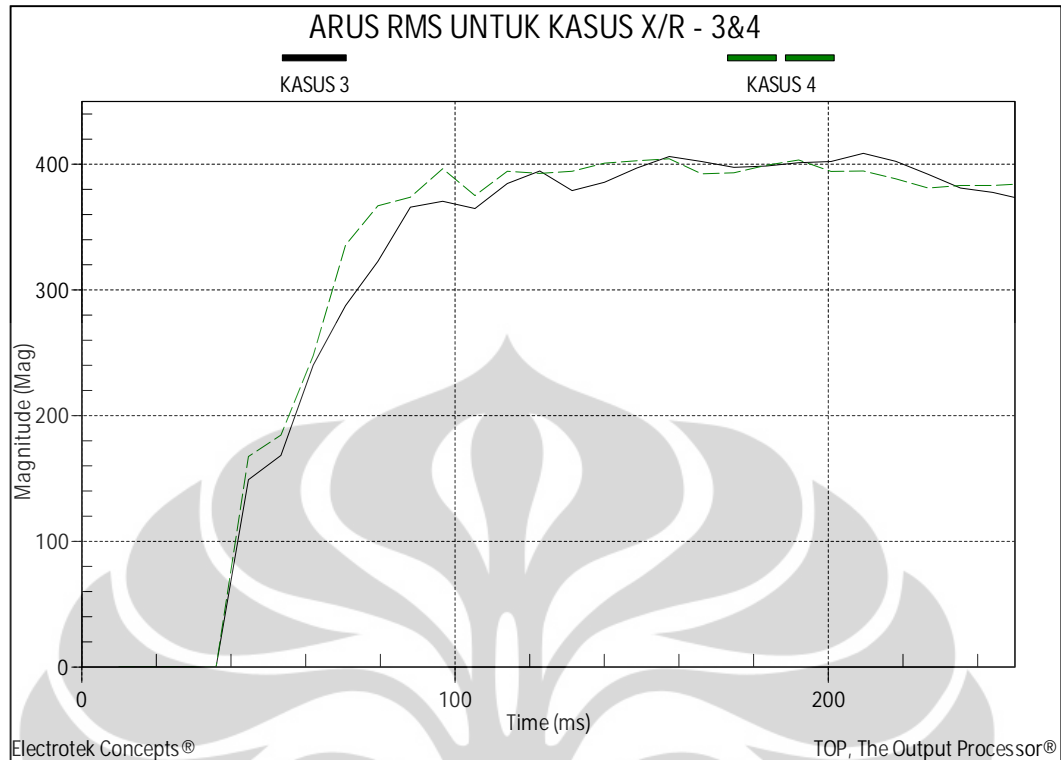
**Gambar 4.32** Gangguan Asimetris dengan X/R 16 Kasus-4, Injeksi Sinyal COMTRADE pada Rele Digital



**Gambar 4.33** Respon dari Rele Digital terhadap Injeksi Arus (Kasus-4)



**Gambar 4.34** Simulasi Arus EMTP terhadap Respon Rele Arus dalam Kasus-4  
(Terefleksi pada Sisi Primer CT 40/5)



**Gambar 4.35** Respon Rele untuk Gangguan Asimetris dengan Rasio X/R yang Berbeda, Kasus-3 &4, berbasis pada Pengukuran RMS

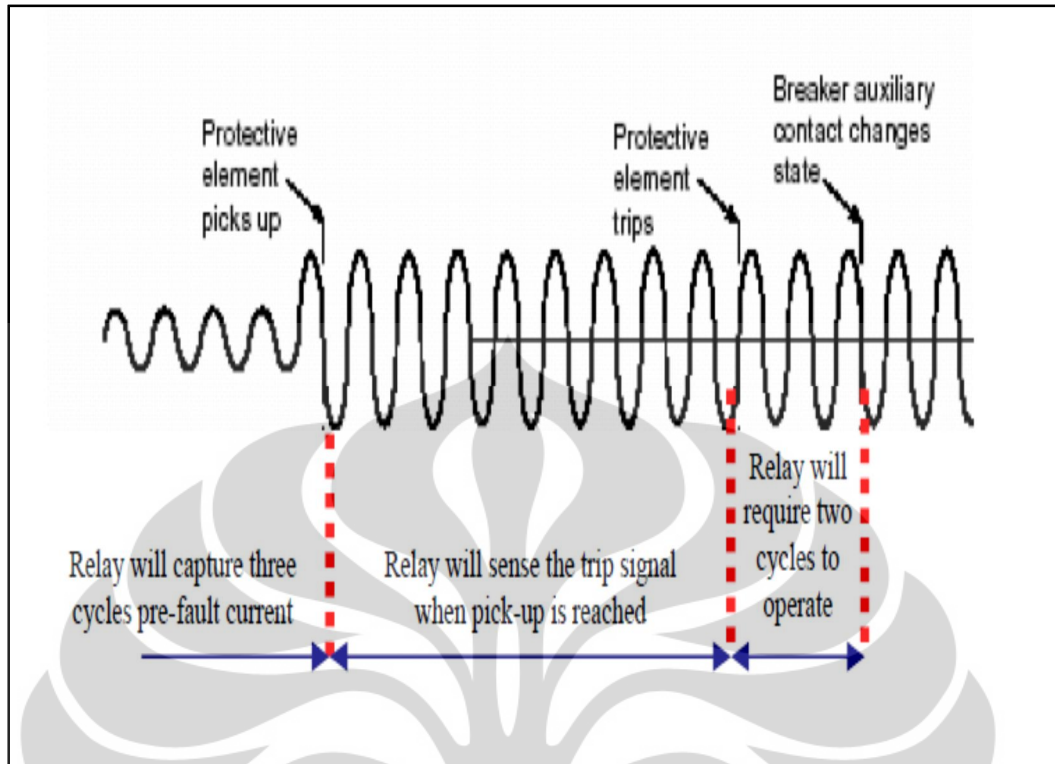
#### 4.5 Observasi Umum terhadap Hasil Pengujian Laboratorium

Setelah melakukan pengujian pada laboratorium maka didapat hasil observasi secara umum terhadap sinyal yang tertangkap oleh rele digital arus lebih merek ABB tipe REF630 ditemukan hal-hal sebagai berikut :

- Seperti tertulis pada manual rele ABB dan seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.36, rele tersebut mempunyai fitur sebagai berikut:
  1. Rele menangkap sinyal dan menunjukkan 3 siklus sebelum di *trigger* tanpa ada arus yang diinjeksikan selama pengujian. Hal ini akan terlihat waktu tunda pada sinyal yang ditangkap oleh rele, dibanding dengan sinyal EMTP yang diinjeksikan.
  2. Rele hanya membutuhkan setengah siklus untuk men-*trigger*. Waktu tunda antara sinyal yang ditangkap dan sinyal EMTP yang diinjeksikan

hanyalah satu siklus.

3. Tindakan *trip* akan diberikan jika besar arus telah mencapai *set-point* dan berlanjut hingga selama satu setengah siklus. Waktu tunda untuk 1.5 siklus ini memungkinkan transien siap menyediakan data yang lebih akurat.
  4. Kecepatan *sampling rate* (32 sampel/siklus) dari fitur pencatat dalam rele telah digunakan selama pengujian di laboratorium dengan cukup baik. Sebagai perbandingan, model EMTP mempunyai tingkat *sampling* yang cukup baik dalam menangkap komponen frekuensi tinggi dari sinyal sekunder, keadaan ini lah yang menghasilkan perbedaan besar antara sinyal yang ditangkap rele dan sinyal yang diinjeksikan oleh EMTP.
- Dalam analisa arus gangguan simetris, pengurangan antara 17-40% pada besaran arus sekunder telah dialami oleh sinyal yang telah ditangkap oleh rele, dibandingkan dengan sinyal arus sekunder yang telah diinjeksikan EMTP. Untuk operasi *instantaneous*, rele di set serendah mungkin yang berdasarkan persyaratan beban sehingga besarnya pengurangan ini tidak terlalu menjadi perhatian bagi operasi suatu rele tersebut. Analisa rinci dan evaluasi dari isu ini dijelaskan dalam sub bab selanjutnya.



**Gambar 4.36** Respon Trip dari Rele Arus Lebih ABB [36]

#### 4.6 Evaluasi terhadap Respon Rele Digital dan Hasil Pengujian

Seperti yang telah diterangkan sebelumnya, tingkat kejenuhan pada CT ditentukan oleh tegangan jenuh  $V_s$ . Tegangan jenuh dari CT rasio 40/5, yang digunakan dalam pengujian di dapat pada tegangan 26V. Kurva eksitasi untuk CT tersebut telah diperoleh melalui pengujian, seperti diterangkan dalam Bab 3 dan ditampilkan dalam Gambar 4.37. Standar IEEE C37-110-1996 telah memberikan kaidah pemilihan CT untuk menghindari kejenuhan AC maupun DC. Dalam bagian ini, kaidah tersebut akan dievaluasi baik untuk gangguan simetris maupun asimetris. Pertama-tama, kriteria kejenuhan AC dievaluasi. Kemudian ditinjau pula terhadap kriteria dari standar IEEE C37-110-1996 untuk menghindari kejenuhan dengan komponen DC dalam bentuk gelombang.

#### 4.6.1 Evaluasi Respon Rele Digital Arus Lebih *Instantaneous* dengan Komponen AC Simetris

Untuk menghindari kejenuhan AC, persyaratan dari persamaan berikut harus dipenuhi:

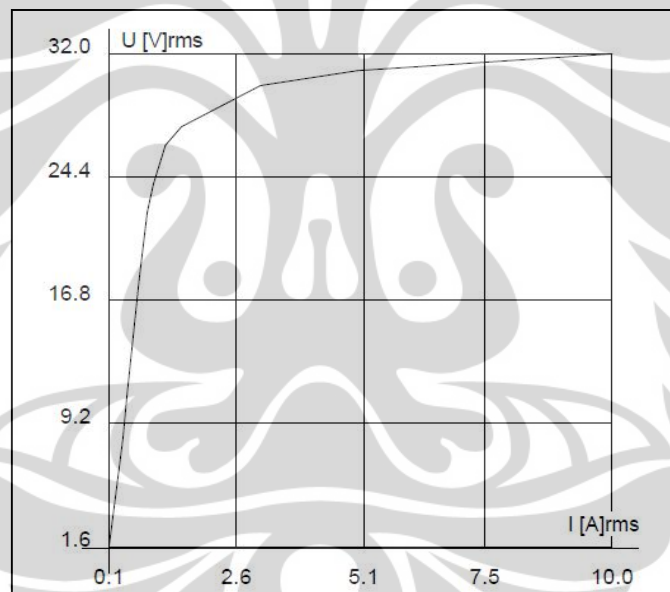
$$V_S \geq i_f \cdot Z_b \quad (4.1)$$

Dimana:

$i_f$  adalah arus gangguan maksimum dalam per unit rating CT

$Z_b$  adalah beban CT dalam per unit beban standar

$V_S$  adalah tegangan jenuh CT dalam per unit dan bernilai 20



**Gambar 4.37** Kurva Eksitasi Hasil Uji Laboratorium pada CT rasio 40/5

Tegangan jenuh dalam Persamaan (4.1) dibatasi hingga 20 kali rating arus sekunder pada beban standar tanpa melebihi batas kelas akurasi rele. Oleh karena itu, Persamaan (4.1) dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$20 \geq i_f \cdot Z_b \quad (4.2)$$

Dengan menggunakan rating primer CT adalah 40 A, maka kriteria 20 kali CT rating untuk arus gangguan menjadi sebesar 800A terlihat dalam persamaan berikut:

$$i_f \geq \frac{I_{max}}{CT_{rating}} = \frac{800}{40} = 20 \quad (4.3)$$

Dengan menggunakan CT kelas 10P20, 5VA dimana beban standarnya adalah sebesar 0.2  $\Omega$  serta beban CT maksimum yang digunakan dalam analisa beban pada bagian 4.3, adalah 2  $\Omega$ :

$$Z_b \geq \frac{Z_{burden}}{Z_{stad}} = \frac{2.0}{0.2} = 10 \quad (4.4)$$

Oleh karena itu, tegangan jenuhnya dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (4.1):

$$V_S \geq i_f * Z_b = 20 * 10 = 200 \quad (4.5)$$

Dalam Gambar 4.11, untuk beban 2  $\Omega$ , rele terbukti memberikan respon secara instan dengan waktu tunda maksimum 2.3 siklus pada gangguan primer 87A. Waktu untuk operasi rele ditambahkan ke waktu tunda maksimum (2 siklus). Sehingga operasi rele di dalam waktu ini bisa diterima dan dapat menjaga koordinasi rele dengan peralatan proteksi di bagian hulu / *upstream*. Oleh sebab itu, transformator arus yang digunakan oleh rele mikroprosesor tersebut harus memenuhi dari kriteria berikut ini, supaya untuk memastikan rele tersebut sesuai operasinya sehingga dapat diterima:

$$200 \geq i_f * Z_b \quad (4.6)$$

Untuk meneliti respon dari rele digital *instantaneous* digunakan contoh rele arus lebih mikroprosesor dengan seting *instantaneous* adalah 87 A. Gambar 4.11, menunjukkan bahwa rele digital tersebut telah memberikan reaksi secara instan dengan waktu tunda maksimum 2.3 siklus pada beban 10 kali beban standar. Dalam contoh ini, rele menggunakan CT rasio 40/5, kelas 10P20, dengan total beban 0.1, karena asumsi kabel yang digunakan berukuran #10 AWG dengan rangkaian *loop* sepanjang 100 feet. Maka arus gangguan maksimum untuk suatu

operasi yang aman dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$I_{MAX} = \frac{ANSIClass}{100 \cdot Z_b} \cdot V_{Burden} \cdot CT_{Rating} \quad (4.7)$$

Arus gangguan maksimum untuk contoh sebelumnya dapat dihitung sebagai berikut:

$$I_{MAX} = \frac{20}{100 \cdot 0.1} \cdot 200 \cdot 40 = 16.000 \text{ A} \quad (4.8)$$

Operasi *instantaneous* dari CT rasio 40/5 adalah 87 A dalam 2.3 siklus selama tegangan jenuh tersebut untuk rele mencapai trip. Hal ini telah menjadi solusi atas permasalahan terhadap pemilihan CT dengan kriteria 20 kali rating berdasarkan pada tingkat hubung singkat yang ada dan akan mengurangi biaya yang diperlukan untuk rasio CT yang lebih tinggi dengan kelas yang lebih tinggi.

#### 4.6.2 Evaluasi Respon Rele Digital Arus Lebih *Instantaneous* dengan Komponen DC Asimetris

Bagian ini membahas evaluasi pengaruh gangguan arus asimetris dengan *DC Offset*, terhadap operasi rele digital *instantaneous*. Sesuai standar IEEE C37-110-1996, persamaan berikut harus terpenuhi untuk menghindari kejenuhan DC:

$$V_S \geq \left| \frac{X}{R} + 1 \right| \cdot i_f \cdot Z_b \quad (4.9)$$

**Dimana:**

- $i_f$  adalah arus gangguan maksimum dalam per-unit dari rating CT
- $Z_b$  adalah beban CT dalam per-unit standar beban
- $V_S$  adalah tegangan jenuh CT dalam per-unit dan bernilai 20
- $\frac{X}{R}$  adalah rasio X/R dari rangkaian gangguan primer

Dalam hal ini, digunakan rasio X/R 24 dan 16 di dalam kasus 3 & 4 untuk analisa gangguan asimetris. Kedua kasus tersebut dianggap sebagai kasus terburuk di antara kasus asimetris seperti yang terlihat dalam Tabel 4.3. Dengan mengacu pada Gambar 4.38, diperhitungkan pula nilai seting rele *instantaneous* sebesar

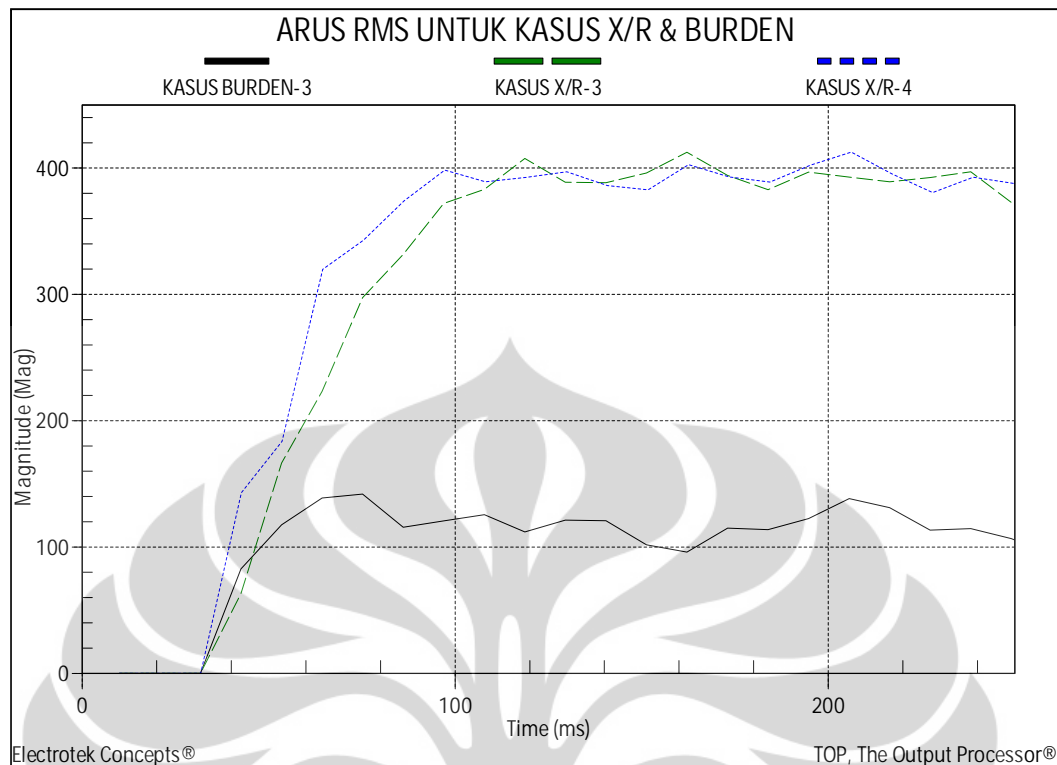


87 A. Sehingga, waktu tunda dari operasi rele dihitung dengan pertimbangan waktu yang dibutuhkan bagi rele untuk beroperasi (2 siklus), seperti diperlihatkan dalam Tabel 4.4.

Dari Tabel 4.4, waktu tunda untuk trip pada suatu rele arus lebih berbasis mikroprosesor sebesar 3.9 siklus dan 2.6 siklus untuk gangguan asimetris dengan rasio X/R 24 dan 16 secara berturut-turut. Operasi rele tersebut dapat diterima karena bisa dikoordinasikan dengan peralatan proteksi pada bagian hulu bias tercapai. Tegangan jenuh dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.9 dan didapat sebesar 1250 V serta 850 V untuk kedua kasus tersebut. Operasi dari elemen *instantaneous* untuk tegangan ini dapat diterima. Tegangan jenuh dari CT rasio 40/5 kelas 10P20, hanya mencapai 26V (20 dalam per-unit) dan Persamaan (4.9) tidak terpenuhi.

**Tabel 4.4** Waktu Operasi Rele dengan Seting *Instantaneous* 87A dengan Rasio X/R Sebesar 24 dan 16

Seting Arus Instan (A)	Kasus	Waktu Tunda Trip		Perhitungan Tegangan Kejenuhan dengan Persamaan (4.9)
		Detik	Siklus	
87A	Kasus-3 X/R = 24	0.078	3.9	1250
	Kasus-4 X/R = 16	0.052	2.6	850



**Gambar 4.38** Respon Rele dengan Seting Instan 87 A untuk Kasus X/R-3&4

Dengan menggunakan 10P20, 5VA dan beban standar  $0.2 \Omega$  serta beban CT adalah  $0.5 \Omega$ , yang digunakan dalam kasus X/R:

$$Z_b \geq \frac{Z_{\text{Burdan}}}{Z_{\text{Stad}}} = \frac{0.5}{0.2} = 2.5 \quad (4.10)$$

Oleh karena itu, dengan rasio X/R 24, tegangan beban dapat dihitung sebagai berikut:

$$V_s \geq \left| \frac{X}{R} + 1 \right| \cdot i_f \cdot z_b = (24 + 1) \cdot 20 \cdot 2.5 = 1250 \quad (4.11)$$

Sehingga, transformator arus yang digunakan oleh rele mikroprosesor harus memenuhi kriteria berikut:

$$1250 \geq \left| \frac{X}{R} + 1 \right| \cdot i_f \cdot z_b \quad (4.12)$$

Untuk tujuan evaluasi, dipergunakanlah rele arus lebih berbasis mikroprosesor dengan seting *instantaneous* adalah 87A. Rele yang digunakan dengan CT berasio 40/5, kelas 10P20, 5VA, dengan total beban 0.1, dari rangkaian loop sepanjang

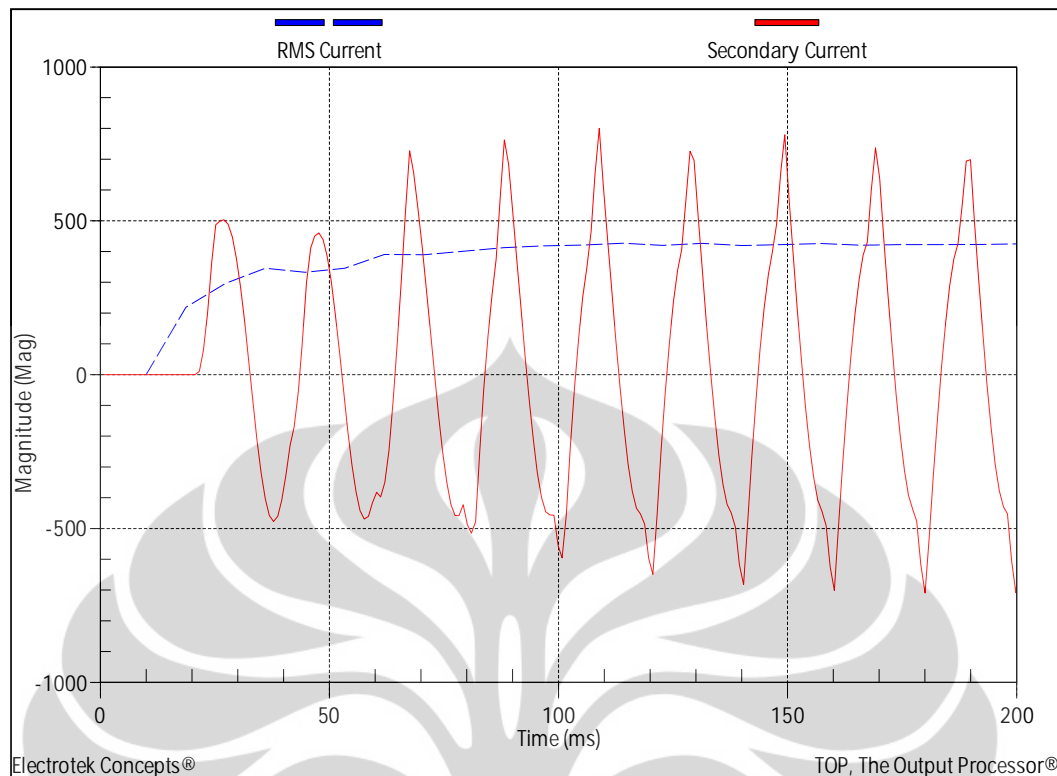
100 feet dengan menggunakan kabel berukuran #10 AWG dan Rasio X/R adalah 20. Kemudian, arus gangguan maksimum operasi yang aman dapat dihitung sebagai berikut:

$$I_{MAX} = \frac{ANSIClass}{100 \cdot Z_b} \cdot \frac{V_{Burden}}{(1 + \frac{X}{R})} \cdot CT_{Rating} \quad (4.13)$$

$V_{Burden}$  perhitungan yang dapat diterima adalah 1250V seperti pada Persamaan (4.12). Oleh karena itu, gangguan maksimum untuk operasi yang aman dapat diperoleh dari Persamaan (4.13):

$$I_{MAX} = \frac{20}{100 \cdot 0.1} \cdot \frac{1250}{(1+20)} \cdot 40 = 4.761,91 \text{ A} \quad (4.14)$$

Hasil ini dapat divalidasi dengan menggunakan model EMTP yang telah dikembangkan bagi CT rasio 40/5. Karena respon rele hampir sama dengan arus sekunder EMTP, keluaran arus sekunder yang akan digunakan untuk memvalidasi operasi rele adalah dengan nilai X/R 20, beban sekunder 0.1 ohm, dan tingkat gangguan primer sebesar 4.761,91 A. Gambar 4.39 menunjukkan bahwa arus 87 A dapat dirasakan setelah setengah siklus. Dengan mengingat waktu operasi rele (2 siklus), total waktu tunda berada sekitar dua setengah siklus dan operasi rele yang diinginkan akan tercapai.



**Gambar 4.39** Studi Kasus dengan  $X/R=20$ , Beban=0.1 dan Arus Primer Sebesar 4.761,91 A

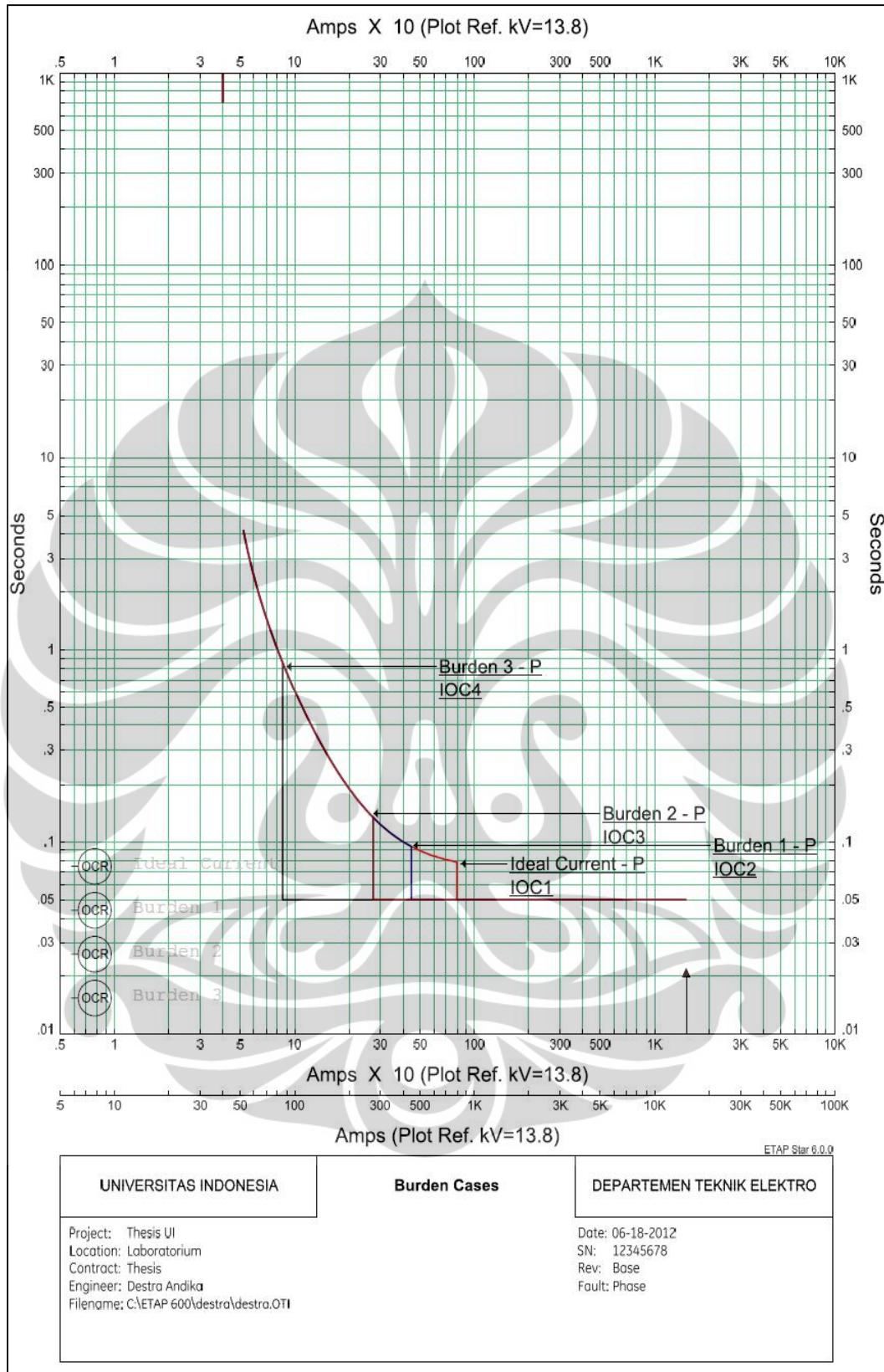
Seperti digambarkan dalam contoh sebelumnya, operasi *instantaneous* dengan CT rasio 40/5 dapat dijamin dengan tegangan jenuh 200 V dan Rasio  $X/R$  adalah 20, dengan waktu tunda sekitar 3.9 siklus untuk mengoperasikan trip pada rele. Hal ini dapat mengeliminasi kebutuhan dalam memenuhi persyaratan dari Persamaan (4.9) untuk CT rating dengan DC Offset. Berdasarkan pada analisa ini, rating CT dapat dipilih berdasarkan tingkat hubung singkat yang ada, beban sekunder yang terhubung, rasio  $X/R$ , dan waktu tunda trip rele yang diperlukan. Sehingga, kebutuhan akan rasio CT yang lebih tinggi bisa diatasi.

#### 4.6.3 Evaluasi Respon Rele Digital Arus Lebih dengan *Time Delay*

Kejenuhan pada CT tidak hanya berdampak pada operasi rele digital *instantaneous* arus lebih. Tetapi juga mempengaruhi operasi rele digital arus lebih dengan *time delay*. Dampak dari gangguan simetris dan asimetris, menghasilkan kejenuhan CT yang berdampak terhadap rele digital arus lebih, hal ini berdasarkan

dari hasil pengujian laboratorium sebelumnya, yang telah diperlihatkan dalam bagian 4.3. dan 4.4 berturut-turut. Untuk tujuan analisa, dipilih rele digital arus lebih ABB dengan kurva karakteristik *IEEE Very Inverse*. Dalam pengujian ini dipilih seting *pickup* 40A untuk CT 40/5 kelas 10P20.

Pertama-tama, akan dievaluasi dampak dari perubahan beban sekunder pada CT terhadap rele digital dengan *time delay*. Gambar 4.40 memperlihatkan kurva dari pada rele digital arus lebih. Dengan asumsi bahwa level gangguan adalah 20 X rating CT (800A), dan waktu operasi dari rele digital bervariasi tergantung pada nilai beban. Seperti digambarkan dalam bagian 4.4, besaran dan bentuk dari arus sekunder akan lebih dipengaruhi ketika beban sekunder CT meningkat. Besaran *magnitude* yang lebih kecil akan dilihat oleh rele dan akhirnya akan mempengaruhi operasi rele digital waktu tunda. Tabel 4.5, meringkas waktu operasi dari rele digital dalam perbandingannya terhadap kasus ideal, dimana tidak ada kejenuhan yang terjadi.



**Gambar 4.40** Pengaruh dari Perubahan Beban CT Rasio 40/5 terhadap Rele *Digital Time Delay*

**Tabel 4.5** Pengaruh dari Perubahan Beban CT Rasio 40/5 dan Kejenuhan CT pada Waktu Operasi Rele Digital

Kasus	Arus Sekunder yang Dirasakan Rele Digital sewaktu terjadi Gangguan Primer Sebesar 800A	Waktu Operasi (Detik)	Perbedaan Waktu (Detik)
Kasus Ideal	100A	0.08	
Kasus-1, dengan 0.25 $\Omega$	56A	0.09	0.01
Kasus-2, dengan 0.5 $\Omega$	34A	0.14	0.06
Kasus-3, dengan 2 $\Omega$	11A	0.85	0.77

Idealnya, rele diharapkan dapat merasakan 100A, jika dapat dihasilkan reproduksi yang baik dari arus primer. Akan tetapi hal ini tidak terjadi. Dalam semua kasus beban, yang disampaikan dalam bagian 4.3, dimana arus primer sebesar 800 A diinjeksikan pada 40/5 CT dalam pengujian laboratorium.

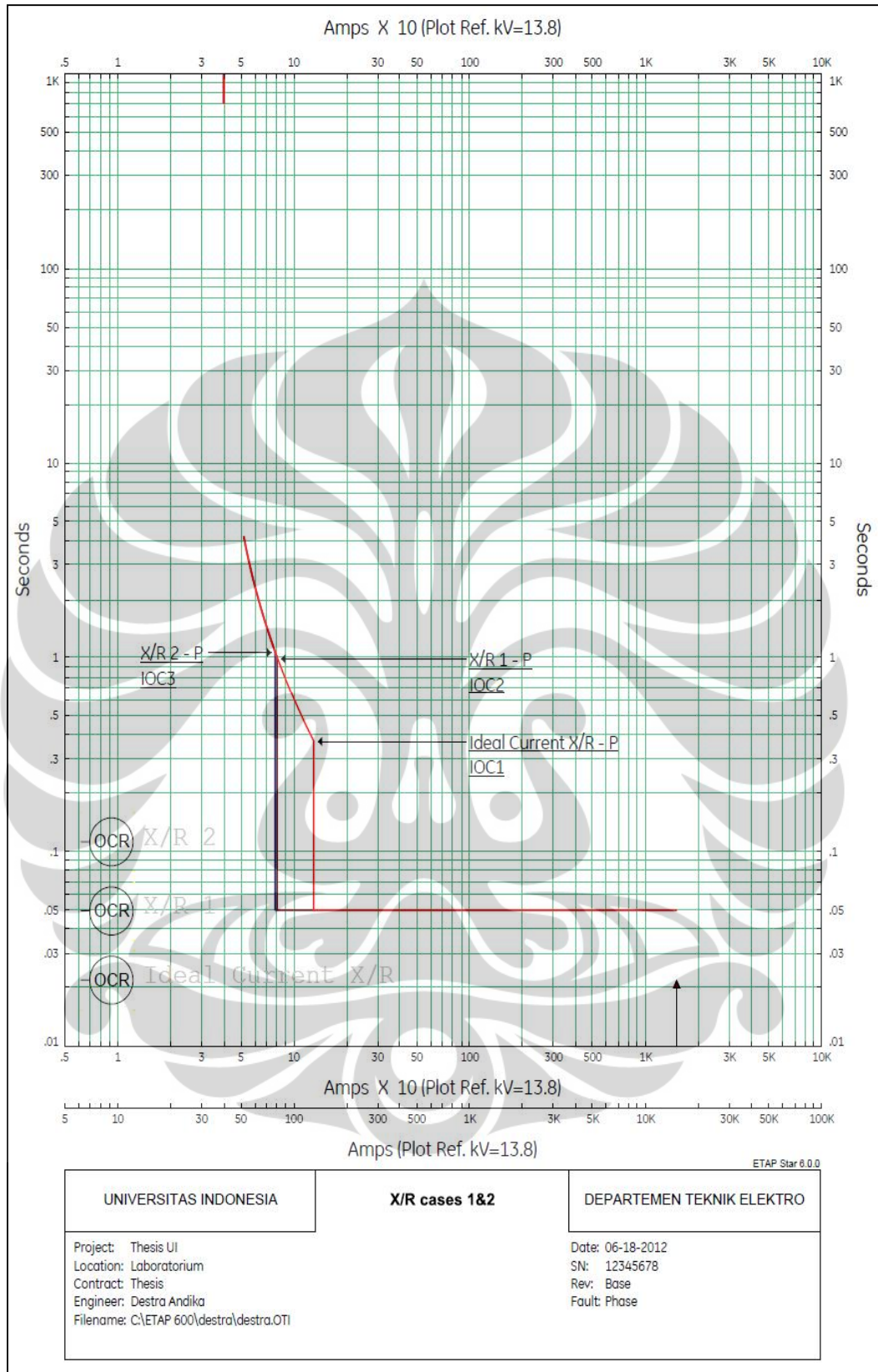
Gambar 4.40 menunjukkan arus sebesar 56A, 34A, dan 11A yang dirasakan oleh rele untuk beban sekunder 0.25, 0.5, dan 2.0 ohm secara berturut-turut. Dampak terhadap waktu operasi rele akan bervariasi dalam tiga kasus tersebut. Gambar 4.40 membandingkan waktu operasi rele kasus ideal terhadap tiga kasus lainnya. Dari karakteristik arus-waktu sangat jelas diketahui bahwa akan dialami suatu *time delay* yang signifikan pada beban kasus-3 di mana operasi rele akan tertunda sekitar 0.77 detik. Hal ini mungkin akan menyebabkan kesalahan koordinasi dengan rele *upstream*.

Sekarang, pengaruh dari gangguan asimetris dengan DC Offset terhadap operasi *time delay* pada rele digital akan diuji. Akan dilakukan evaluasi terhadap studi kasus yang disampaikan dalam Table 4.3. Dalam kasus 1 dan 2 telah diinjeksikan arus primer sebesar 130A pada CT 40/5. Akan tetapi, rele merasakan

arus yang lebih rendah untuk kedua kasus tersebut, dengan *time delay* yang cukup besar seperti diperlihatkan dalam Gambar 4.28. *Time delay* tersebut dihitung dan ditambahkan *time delay* dari kasus ideal. Nilai perhitungan *time delay* disampaikan dalam Tabel 4.6 untuk kedua kasus tersebut. Gambar 4.41 menunjukkan bahwa suatu *time delay* sebesar 0.56 dan 0.68 detik akan dirasakan pada kasus 1 serta 2, bila dibandingkan dengan kasus ideal.







**Gambar 4.41** Pengaruh Gangguan Asimetris pada Rele Digital Waktu Tunda (Kasus 1 & 2) untuk CT Rasio 40/5

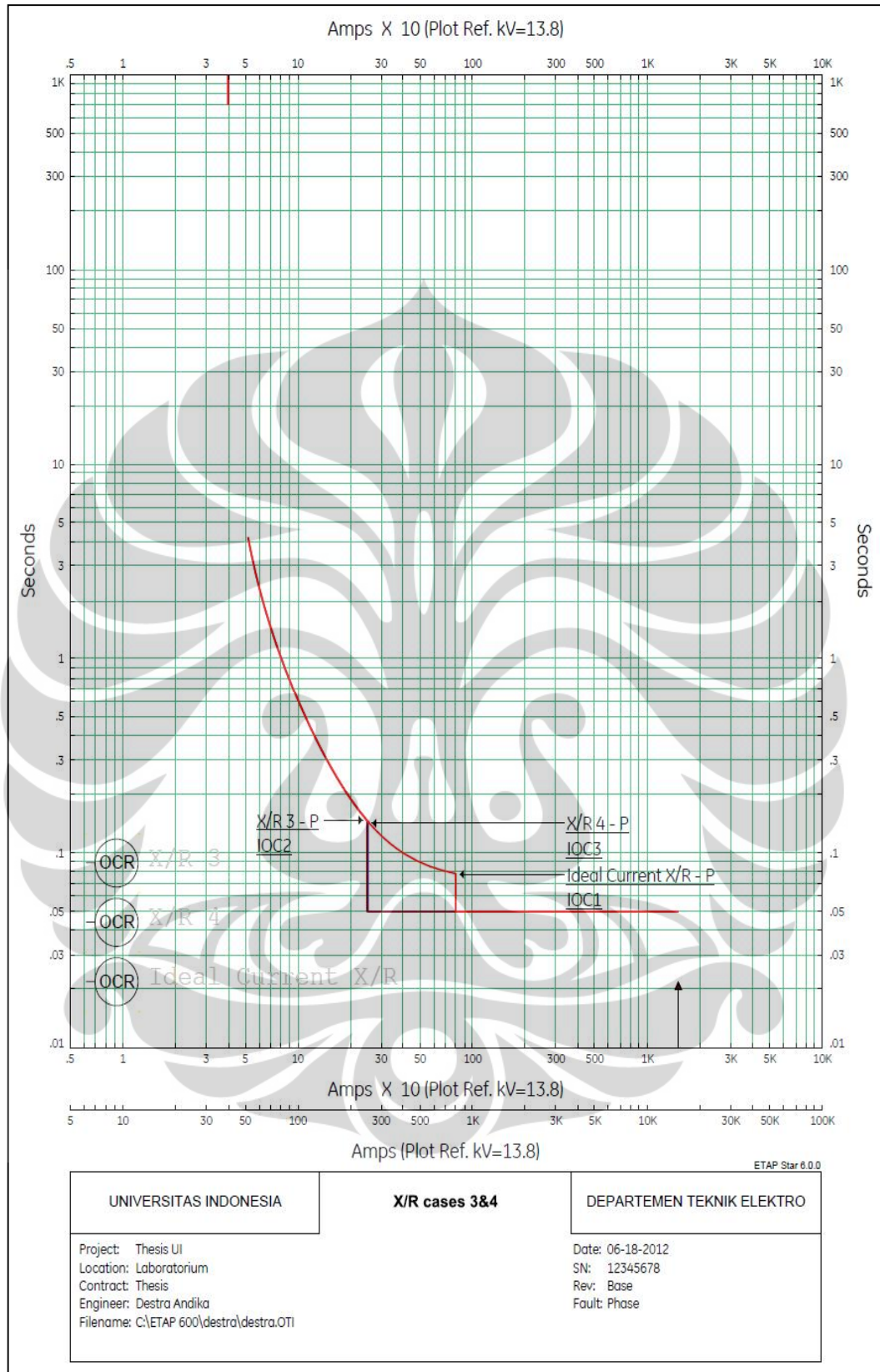
**Tabel 4.6** Pengaruh Gangguan Asimetris terhadap Rele Digital *Time Delay* (Kasus 1 & 2) untuk CT Rasio 40/5

Kasus	Arus Sekunder yang Dirasakan Rele Digital Sewaktu Terjadi Gangguan Primer Sebesar 130A	Waktu Operasi (Detik)	Perbedaan Waktu (Detik)
Kasus Ideal	16.3A	0.39	
X/R = 24, Kasus-1	10.0A	0.95	0.56
X/R = 16, Kasus-2	9.8A	1.07	0.68

Dalam kasus 3 dan 4, seperti disampaikan dalam Tabel 4.3, arus primer sebesar 800A diinjeksikan pada CT 40/5. Akan tetapi, rele merasakan arus yang lebih rendah untuk kedua kasus, dengan *time delay* yang cukup besar seperti diperlihatkan dalam Gambar 4.35. Keadaan ini telah dihitung dan ditambahkan ke *time delay* dari kasus ideal. Nilai *time delay* hasil perhitungan disampaikan dalam Tabel 4.7 untuk kedua kasus tersebut. Gambar 4.42 menunjukkan bahwa waktu tunda sebesar 0.071 dan 0.015 detik akan dirasakan untuk kasus 3 serta 4, yang dibandingkan dengan kasus ideal.

**Tabel 4.7** Pengaruh Gangguan Asimetris terhadap Rele Digital *Time Delay* (Kasus 3 & 4) untuk CT Rasio 40/5

Kasus	Arus Sekunder yang Dirasakan oleh Rele Digital sewaktu Terjadi Gangguan Primer Sebesar 800 A	Waktu Operasi (Detik)	Perbedaan Waktu (Detik)
Kasus Ideal	100A	0.079	
X/R = 24, Kasus-3	31.1A	0.15	0.071
X/R = 16, Kasus-4	31.5A	0.13	0.015



**Gambar 4.42** Pengaruh Gangguan Asimetris pada Rele Digital Waktu Tunda (Kasus 3 & 4) untuk CT Rasio 40/5

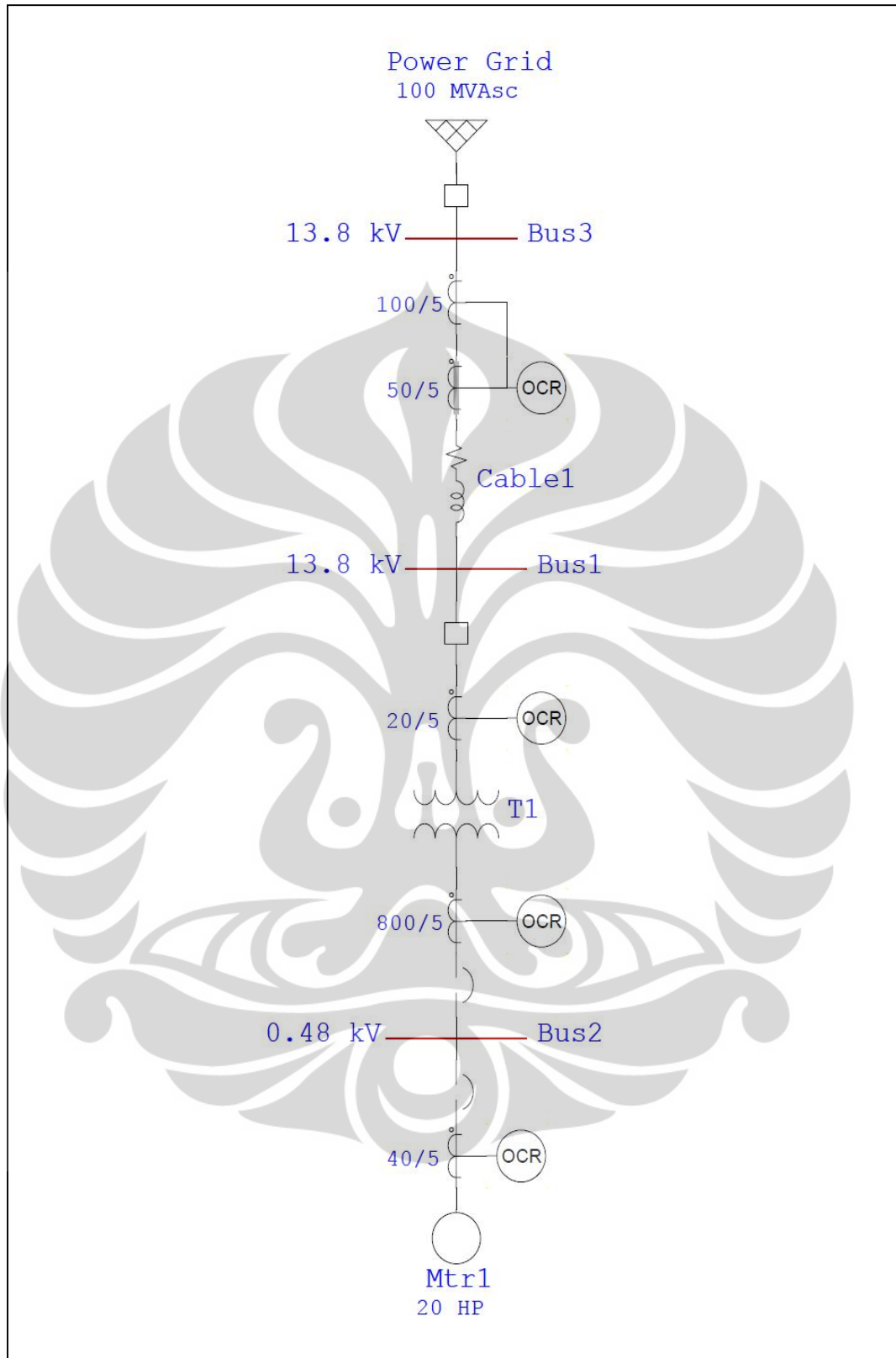
## 4.7 Tinjauan Aplikasi

### 4.7.1 Area Aplikasi

Dalam jaringan distribusi, beban yang relatif kecil, mungkin bisa terhubung ke suatu bus dengan arus hubungan singkat yang tinggi. Hal ini terutama disebabkan masalah keekonomian atau permasalahan keterbatasan ruang, di mana pada kenyataannya selalu dijumpai kesulitan untuk memasang CT yang berukuran besar. Arus maksimum untuk masing-masing beban mungkin saja kecil, sehingga rasio CT yang dipilih cenderung rendah guna memberikan proteksi termal pada beban lebih. Pemilihan rasio yang rendah menyebabkan rendahnya kelas akurasi, dan biasanya kurang dari 100. Hal tersebut sebetulnya tidak bermasalah pada keadaan beban lebih moderat akan tetapi tidak akan cukup baik untuk keadaan arus hubung singkat.

Gambar 4.43 menampilkan dua contoh dari CT dengan rasio rendah yang terhubung ke suatu bus dengan tingkat hubung singkat yang tinggi. Sebuah transformator dengan arus beban penuh sisi primer sebesar 16.73A dengan rasio CT 20/5 sudah cukup dapat memberikan proteksi beban lebih. Sebuah motor dengan arus beban penuh sebesar 22.88A. Rating hubung singkat pada sisi primer transformer adalah 210 kali rating CT dan pada sisi motor adalah 197.5 kali rating CT. Oleh karena itu, perlu diperhatikan respon dari pada rele *instantaneous* terhadap *level* arus hubung singkat tersebut untuk masing-masing CT.

Hasil dari pengujian rele digital arus lebih diatas menunjukkan bahwa rele digital *instantaneous* dapat beroperasi dengan baik pada CT dengan rasio rendah dengan tingkat hubung singkat yang tinggi. Kriteria dari standar IEEE bagi rele *instantaneous* tidak wajib diikuti. Rating CT dapat dipilih berdasarkan pada tingkat hubung singkat yang ada, beban sekunder yang terhubung, rasio X/R, dan waktu tunda *trip* rele yang cukup diketahui. Sehingga, kebutuhan akan CT dengan rasio dan kelas yang lebih tinggi dapat dihilangkan. Hal ini akan menjadi solusi terhadap masalah keterbatasan ruang bagi CT dengan rasio tinggi dan akan mengurangi biaya yang dibutuhkan oleh suatu sistem distribusi.



**Gambar 4.43** Sistem Distribusi Umum dengan CT Rasio Rendah dan Tingkat Hubung Singkat yang Tinggi

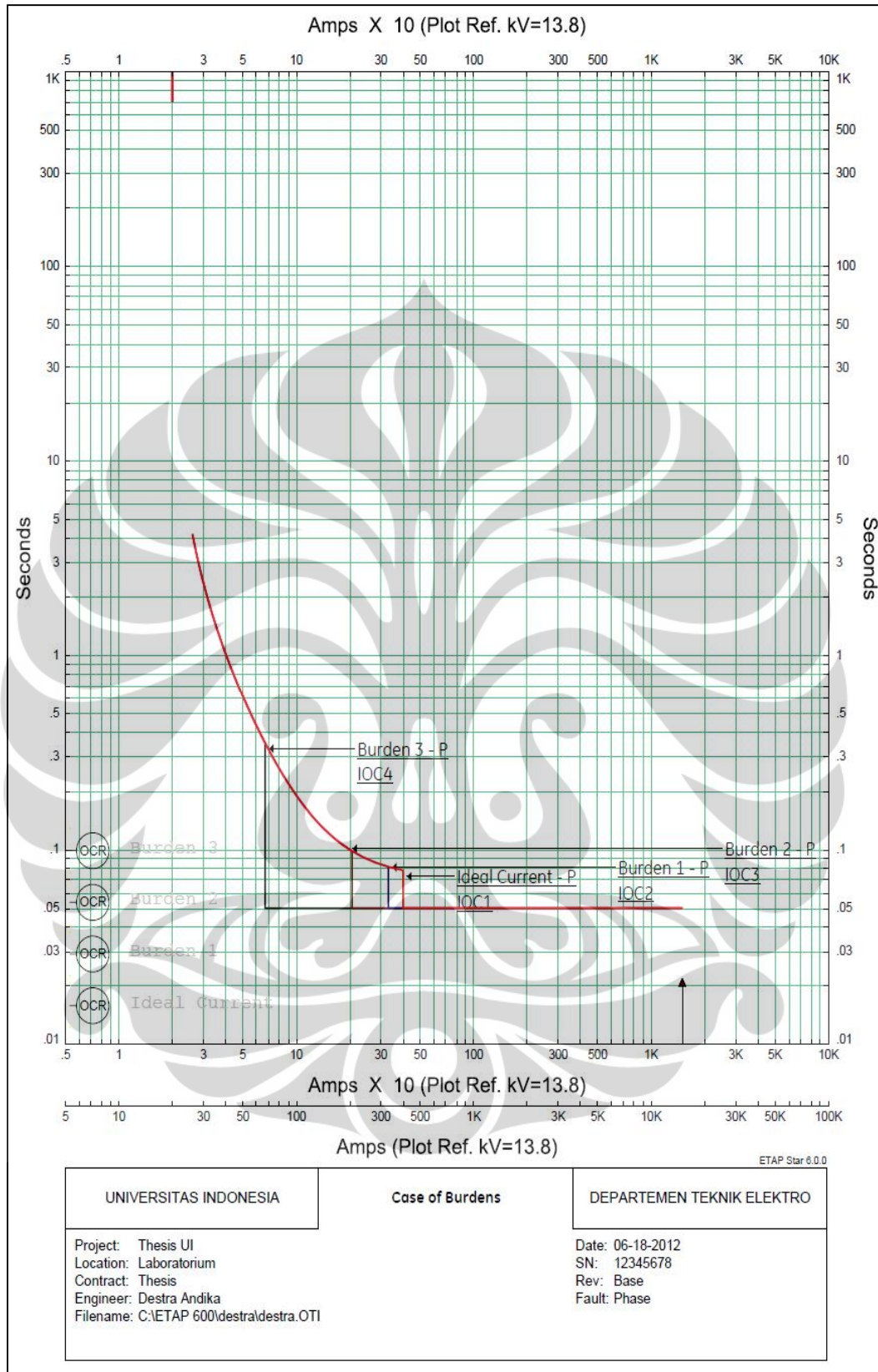
#### 4.7.2 Analisis terhadap Area Aplikasi

Dampak dari gangguan simetris dan asimetris, menghasilkan kejenuhan pada CT dan berdampak terhadap rele digital arus lebih yang berdasarkan dari hasil pengujian laboratorium sebelumnya, dan telah dijelaskan dalam bagian 4.3. dan 4.4 berturut-turut. Untuk tujuan analisa, dipilih rele digital arus lebih ABB dengan kurva karakteristik *IEEE Very Inverse*. Dalam pengujian ini dipilih seting *pickup* 40A untuk CT 40/5 dan 20 A untuk CT 20/5.

Pada bagian 4.6.3 telah dievaluasi dampak dari perubahan beban sekunder pada CT rasio 40/5 terhadap rele digital dengan *time delay*. Gambar 4.41 memperlihatkan kurva dari pada rele digital arus lebih. Dengan asumsi bahwa level gangguan adalah 20 kali rating CT (800A).

Kemudian, pengaruh dari gangguan asimetris dengan DC Offset terhadap operasi *time delay* pada rele digital telah diuji serta dilakukan evaluasi terhadap kasus yang telah dijelaskan dalam Table 4.3. Dalam kasus 1 dan 2 telah diinjeksikan arus primer sebesar 130A pada CT 40/5. Setelah itu dalam kasus 3 dan 4, seperti disampaikan dalam Tabel 4.3, arus primer sebesar 800A juga telah diinjeksikan pada CT 40/5 dengan hasil dan analisisnya yang telah disampaikan pula.

Untuk CT rasio 20/5 kelas 10P20, dengan menggunakan EMTP dan kurva eksitasi hasil dari percobaan di laboratorium juga mengevaluasi mengenai dampak perubahan beban sekunder dari CT terhadap rele digital dengan *time delay*. Gambar 4.44 memperlihatkan kurva pada rele digital arus lebih. Dengan asumsi bahwa level gangguan adalah 20 kali rating CT (400A), dan waktu operasi dari rele digital juga bervariasi tergantung pada nilai beban yang berbeda. Hasil simulasi EMTP menggambarkan, besaran dan bentuk dari arus sekunder akan lebih dipengaruhi ketika beban sekunder CT meningkat. Besaran *magnitude* yang lebih kecil akan dilihat oleh rele dan pada akhirnya akan mempengaruhi operasi rele waktu tunda. Tabel 4.8, meringkas waktu operasi dari rele digital dalam perbandingannya terhadap kasus ideal, dimana tidak ada kejenuhan yang terjadi.



**Gambar 4.44** Pengaruh dari Perubahan Beban CT Rasio 20/5 terhadap Rele *Time Delay Digital*

**Tabel 4.8** Pengaruh dari Perubahan Beban CT Rasio 20/5 dan Kejenuhan CT pada Waktu Operasi Rele Digital

Kasus	Arus Sekunder yang Dirasakan Rele Digital sewaktu terjadi Gangguan Primer Sebesar 400A	Waktu Operasi (Detik)	Perbedaan Waktu (Detik)
Kasus Ideal	100A	0.078	
Kasus-1, dengan 0.125Ω	82A	0.083	0.005
Kasus-2, dengan 0.25Ω	52A	0.100	0.022
Kasus-3, dengan 1Ω	17A	0.350	0.272

Idealnya, rele juga diharapkan dapat merasakan arus 100A, jika dapat dihasilkan reproduksi yang baik dari arus primer. Akan tetapi hal ini tidak terjadi. Untuk semua kasus beban, arus primer sebesar 400 A diinjeksikan pada 20/5 CT dalam pengujian EMTP.

Dampak terhadap waktu operasi rele akan bervariasi dalam tiga kasus tersebut diatas. Gambar 4.44 membandingkan waktu operasi rele kasus ideal terhadap tiga kasus lainnya. Dari karakteristik arus-waktu sangat jelas diketahui bahwa akan dialami suatu *time delay* yang signifikan pada beban kasus-3 di mana operasi rele akan tertunda sekitar 0.272 detik.

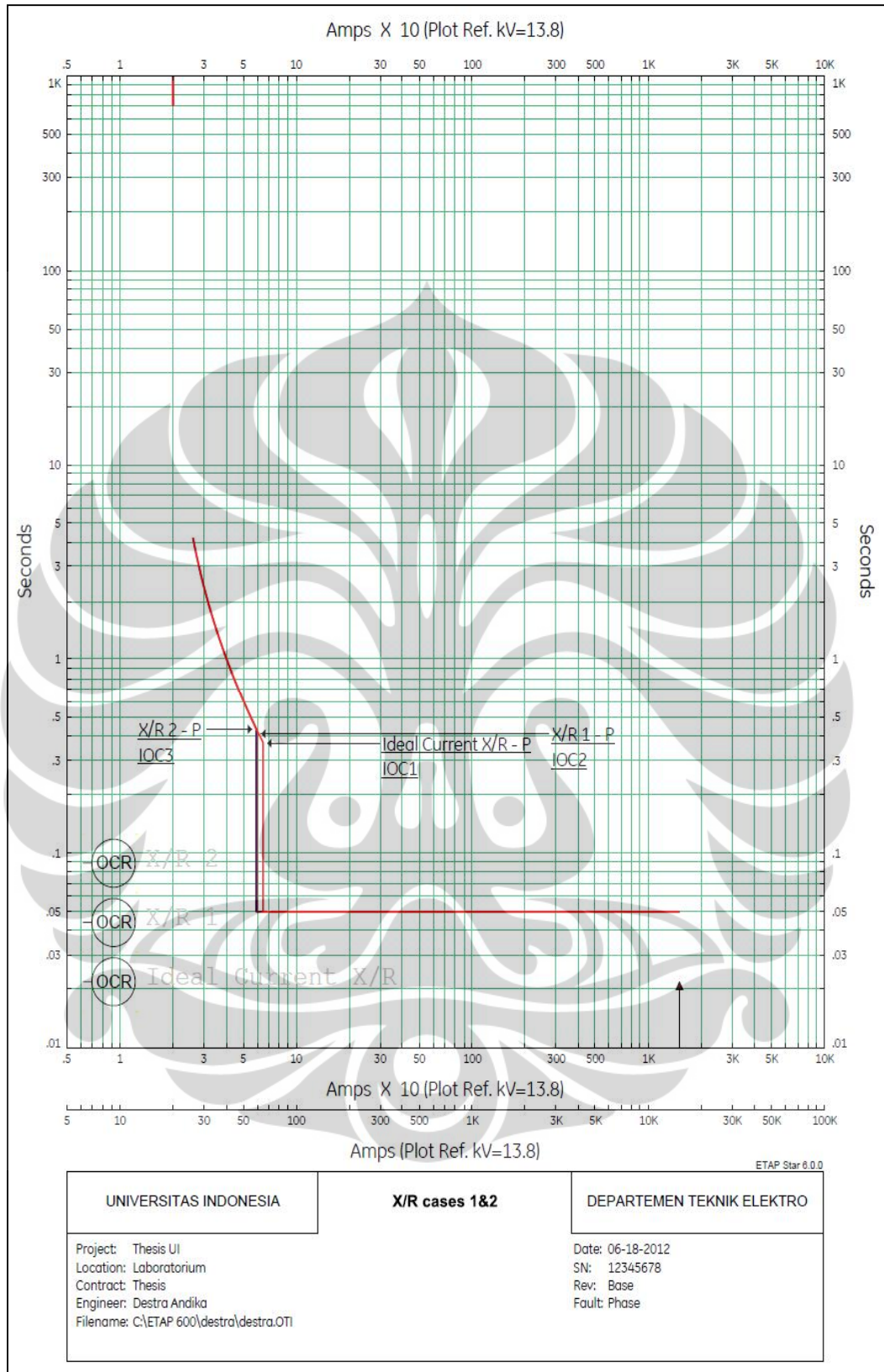
Pengaruh dari gangguan asimetris DC Offset terhadap operasi *time delay* pada rele digital akan diuji. Dalam kasus 1 dan 2 telah diinjeksikan arus primer sebesar 65A pada CT 20/5. Akan tetapi, rele merasakan arus yang lebih rendah untuk kedua kasus tersebut, dengan *time delay* yang cukup besar. *Time delay* tersebut dihitung dan ditambahkan *time delay* dari kasus ideal. Nilai perhitungan *time delay* disampaikan dalam Tabel 4.9 untuk kedua kasus tersebut. Gambar 4.45



menunjukkan bahwa suatu *time delay* sebesar 0.03 dan 0.08 detik akan dirasakan pada kasus 1 serta 2, bila dibandingkan dengan kasus ideal.

**Tabel 4.9** Pengaruh Gangguan Asimetris terhadap Rele Digital *Time Delay* (Kasus 1 & 2) untuk CT Rasio 20/5

<b>Kasus</b>	<b>Arus Sekunder yang Dirasakan Rele Digital Sewaktu Terjadi Gangguan Primer Sebesar 65A</b>	<b>Waktu Operasi (Detik)</b>	<b>Perbedaan Waktu (Detik)</b>
Kasus Ideal	16.3A	0.37	
X/R = 24, Kasus-1	15.0A	0.40	0.03
X/R = 16, Kasus-2	14.8A	0.45	0.08



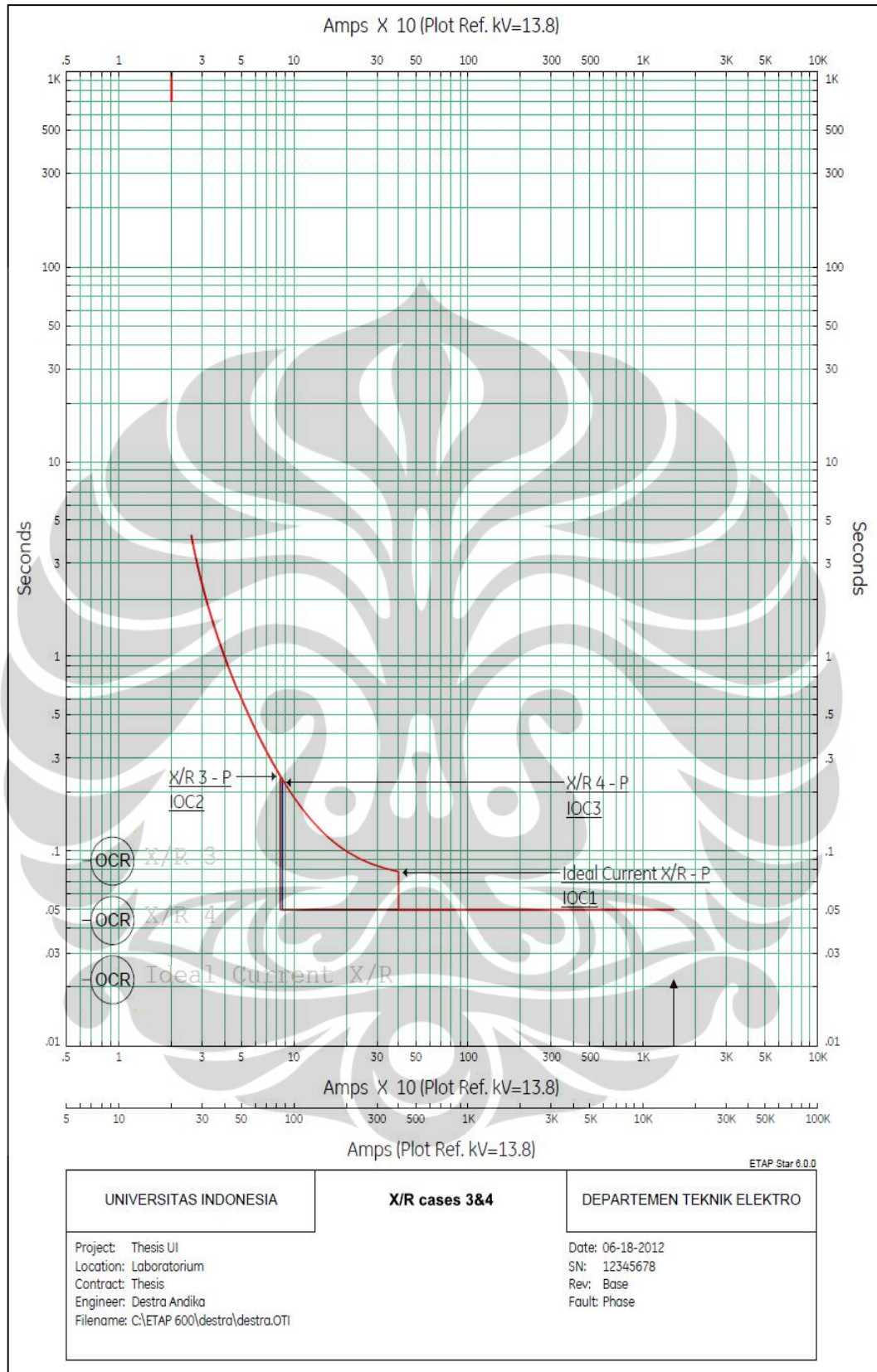
**Gambar 4.45** Pengaruh Gangguan Asimetris pada Rele Digital Waktu Tunda (Kasus 1 & 2) untuk CT Rasio 20/5

Dalam kasus 3 dan 4, arus primer sebesar 100A diinjeksikan pada CT 20/5. Akan tetapi, rele merasakan arus yang lebih rendah untuk kedua kasus, dengan *time delay* yang cukup besar. Keadaan ini telah dihitung dan ditambahkan ke *time delay* dari kasus ideal. Nilai *time delay* hasil perhitungan disampaikan dalam Tabel 4.10 untuk kedua kasus tersebut. Gambar 4.46 menunjukkan bahwa waktu tunda sebesar 0.17 dan 0.15 detik akan dirasakan untuk kasus 3 serta 4, yang dibandingkan dengan kasus ideal.

Berdasarkan pada hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa rele digital arus lebih *instantaneous* dapat beroperasi dengan CT rendah, untuk aplikasi dan kondisi tertentu. Pada sisi lain, rele *time delay* digital dapat secara signifikan dipengaruhi oleh efek saturasi CT, walaupun arti dari saturasi bervariasi, tergantung pada tingkat gangguan, sistem Rasio X/R, beban sekunder.

**Tabel 4.10** Pengaruh Gangguan Asimetris terhadap Rele Digital *Time Delay* (Kasus 3 & 4) untuk CT Rasio 20/5

<b>Kasus</b>	<b>Arus Sekunder yang Dirasakan oleh Rele Digital sewaktu Terjadi Gangguan Primer Sebesar 400 A</b>	<b>Waktu Operasi (Detik)</b>	<b>Perbedaan Waktu (Detik)</b>
Kasus Ideal	100A	0.08	
X/R = 24, Kasus-3	20.9A	0.25	0.17
X/R = 16, Kasus-4	21.6A	0.23	0.15



**Gambar 4.46** Pengaruh Gangguan Asimetris pada Rele Digital Waktu-Tunda (Kasus 3 & 4) untuk CT Rasio 20/5

### 4.7.3 Studi Kasus terhadap Rele Koordinasi

Sebuah studi kasus akan dilakukan untuk menunjukkan area aplikasi rele koordinasi dari temuan tesis. Akan dipilih sebuah trafo dengan rating 630KVA. Beban sekunder pada masing-masing adalah  $0.1 \Omega$  atau dengan kabel kontrol sepanjang 100 *feet* yang berukuran #10 AWG serta rasio sistem X/R adalah 6. Sebuah rele digital arus lebih dipasang pada sisi tegangan primer dan sisi beban sekunder trafo yaitu motor untuk memberikan proteksi terhadap beban lebih dan hubung singkat. CT yang dipilih berdasarkan arus beban penuh dari sisi primer transformator adalah sebesar 16.73A dan beban motor bagi sekunder transformator sebesar 22.88A. Suatu CT rasio 40/5 dan 20/5, dengan kelas akurasi 10P20 dipilih untuk melindungi primer transformator dan motor dari beban lebih dan hubung singkat seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.47.

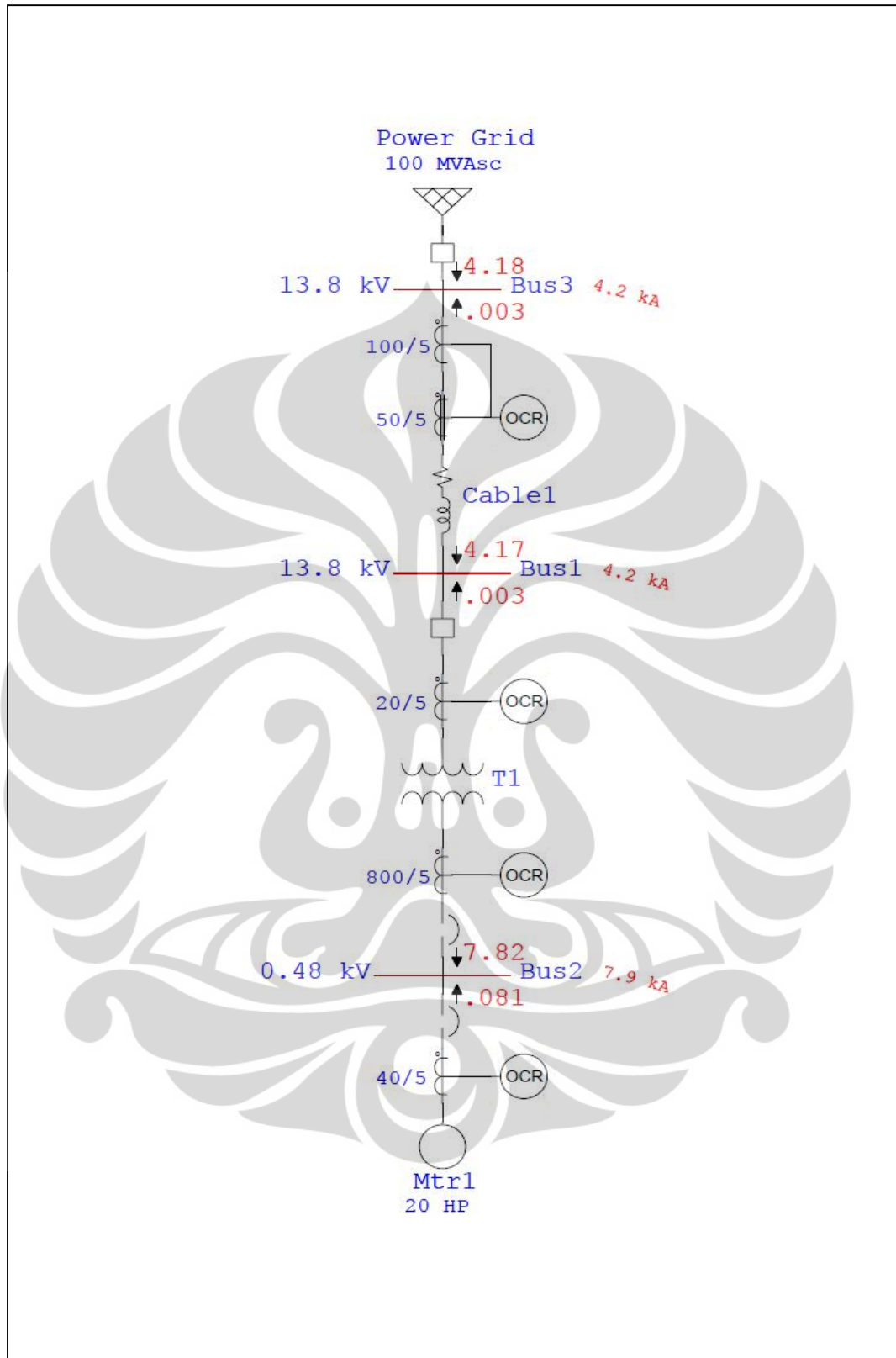
Berdasarkan bagian 4.6, telah dibuktikan bahwa rele digital arus lebih telah beroperasi dengan baik pada CT rasio 40/5 kelas 10P20, dengan seting *instantaneous* sebesar 87A dalam waktu tidak lebih dari 2.3 siklus untuk waktu tundanya. Serta dengan nilai seting *instantaneous* sebesar 67A dalam waktu tidak lebih dari 1.3 siklus untuk waktu tundanya pada CT rasio 20/5. Jika dipenuhinya tegangan beban sebesar 1250 maka kriteria tersebut akan digunakan untuk memeriksa kecukupan dari CT yang dipilih terhadap *level* hubung singkat yang ada:

$$1250 \geq \left| \frac{X}{R} + 1 \right| \cdot i_f \cdot z_b \quad (4.15)$$

Arus gangguan maksimum dengan seting *instantaneous* untuk CT rasio 40/5 serta 20/5 adalah 87A dan 67A yang dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$I_{MAX} = \frac{ANSIClass}{100 \cdot Z_b} \cdot \frac{V_{Burden}}{\left(1 + \frac{X}{R}\right)} \cdot CT_{Rating} \quad (4.16)$$

Arus gangguan maksimum untuk memastikan operasi yang aman bagi CT rasio 40/5 dapat diperoleh dari persamaan (4.16):



**Gambar 4.47** *Single Line Diagram* untuk Studi Rele Koordinasi

$$I_{MAX} = \frac{20}{100 \cdot 0.1} \cdot \frac{1250}{(1+6)} \cdot 40 = 14.285,71 \text{ A} \quad (4.17)$$

Sedangkan arus gangguan maksimum untuk memastikan operasi aman bagi CT rasio 20/5 dapat juga diperoleh dari persamaan (4.16) tersebut adalah:

$$I_{MAX} = \frac{20}{100 \cdot 0.1} \cdot \frac{1250}{(1+6)} \cdot 20 = 7.142,66 \text{ A} \quad (4.18)$$

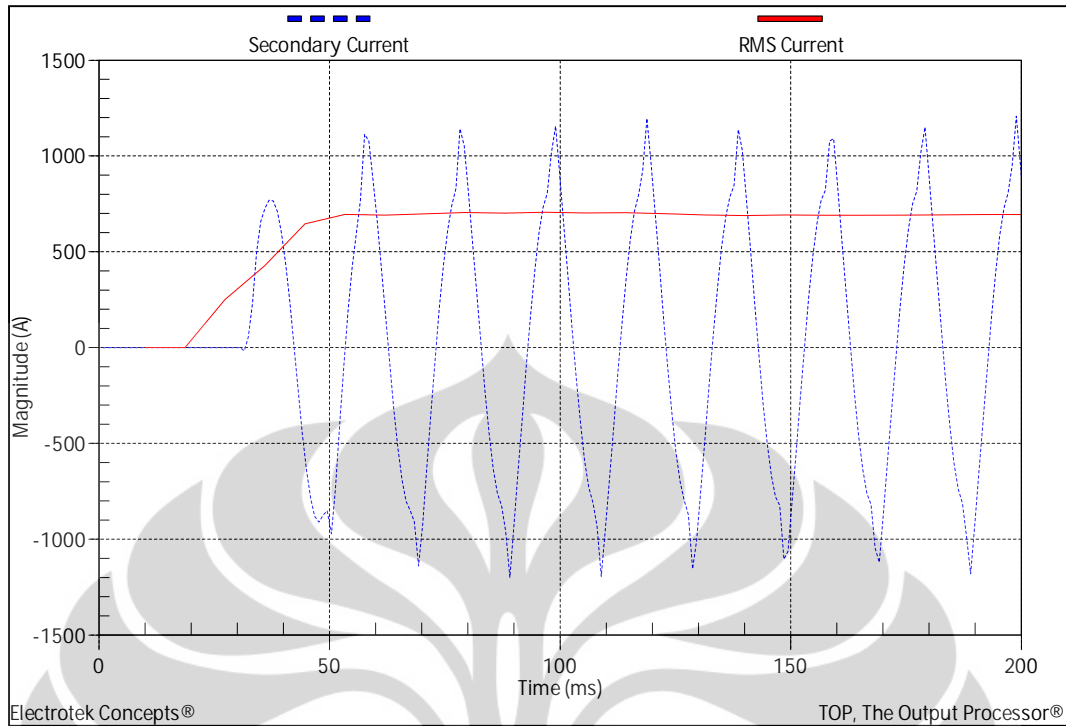
Operasi *instantaneous* pada rele arus lebih dengan menggunakan CT rasio 40/5 dan rasio 20/5 dapat dijamin penggunaannya terhadap arus gangguan hubung singkat sebesar 357 kali rating CT dengan rasio X/R adalah 6. Gambar 4.48 memperlihatkan respon rele digital arus lebih dengan hubung singkat 7.900A pada CT berasio 40/5 yang telah dijelaskan. Keadaan ini mengkonfirmasi bahwa rele digital *instantaneous*, dengan seting *instantaneous* sebesar 87A, akan memberikan reaksi terhadap gangguan seperti kasus ini tidak lebih dari satu setengah siklus.

Gambar 4.49 memperlihatkan respon rele dengan gangguan hubung singkat 4.270A pada CT berasio 20/5, hal ini menunjukkan sekaligus bahwa rele digital arus lebih, dengan seting *instantaneous* sebesar 67 A, akan memberikan reaksi terhadap gangguan seperti kasus ini juga tidak lebih dari satu setengah siklus. Untuk tujuan perbandingan, terhadap standar IEEE C37.110-1996 dalam pertimbangan pemilihan CT bagi studi kasus ini, adalah dimana persamaan berikut ini harus dipenuhi:

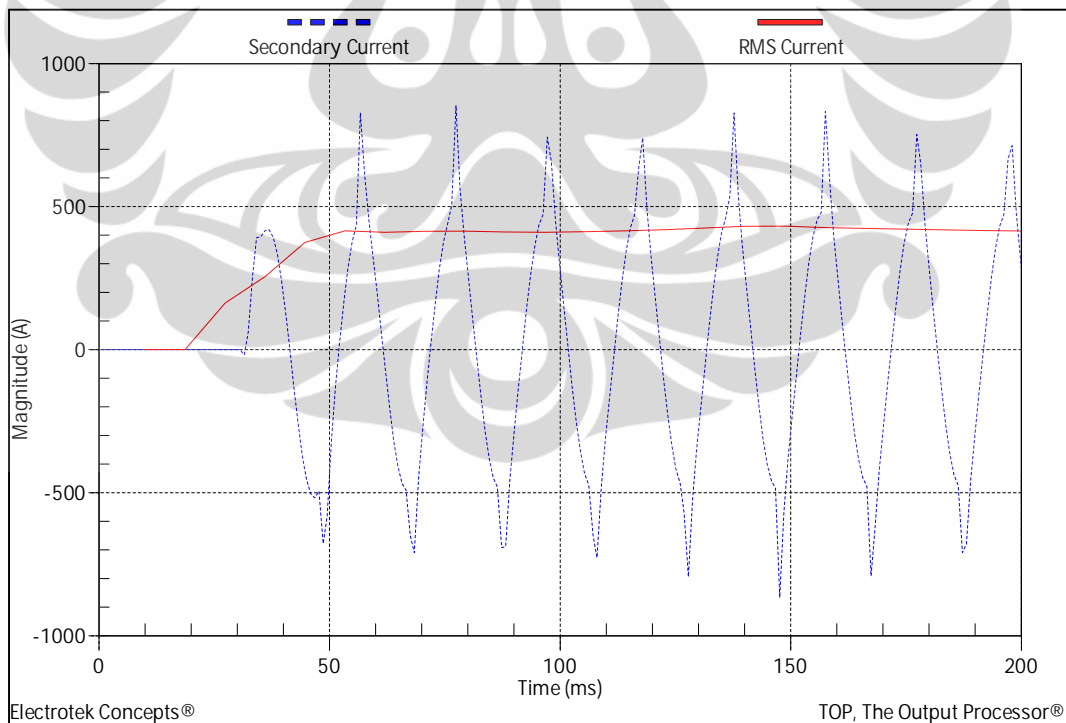
$$20 \geq \left| \frac{X}{R} + 1 \right| \cdot i_f \cdot z_b \quad (4.19)$$

Untuk memenuhi persyaratan dari persamaan (4.19), maka diperlukan suatu CT dengan rasio 400/5 dan 300/5 kelas akurasi 10P20. Kemudian nilai tersebut dimasukkan kedalam persamaan (4.19), sehingga:

$$20 \geq |6 + 1| \cdot 20 \cdot 0.1 = 14 \quad (4.20)$$

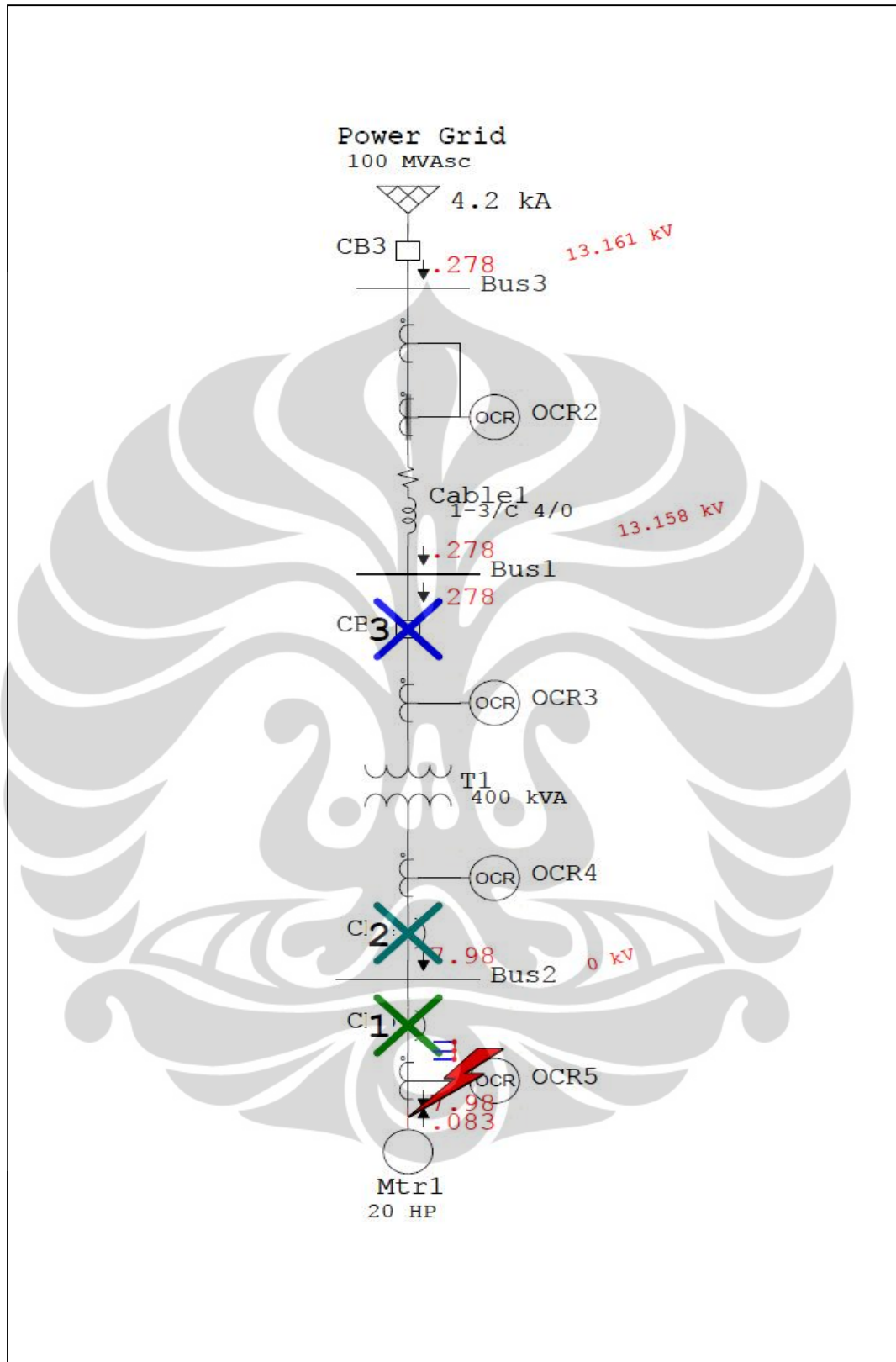


**Gambar 4.48** Studi Kasus untuk CT rasio 40/5 dengan  $X/R = 6$ , Beban =  $0.1 \Omega$  dan Arus Primer = 7.900A

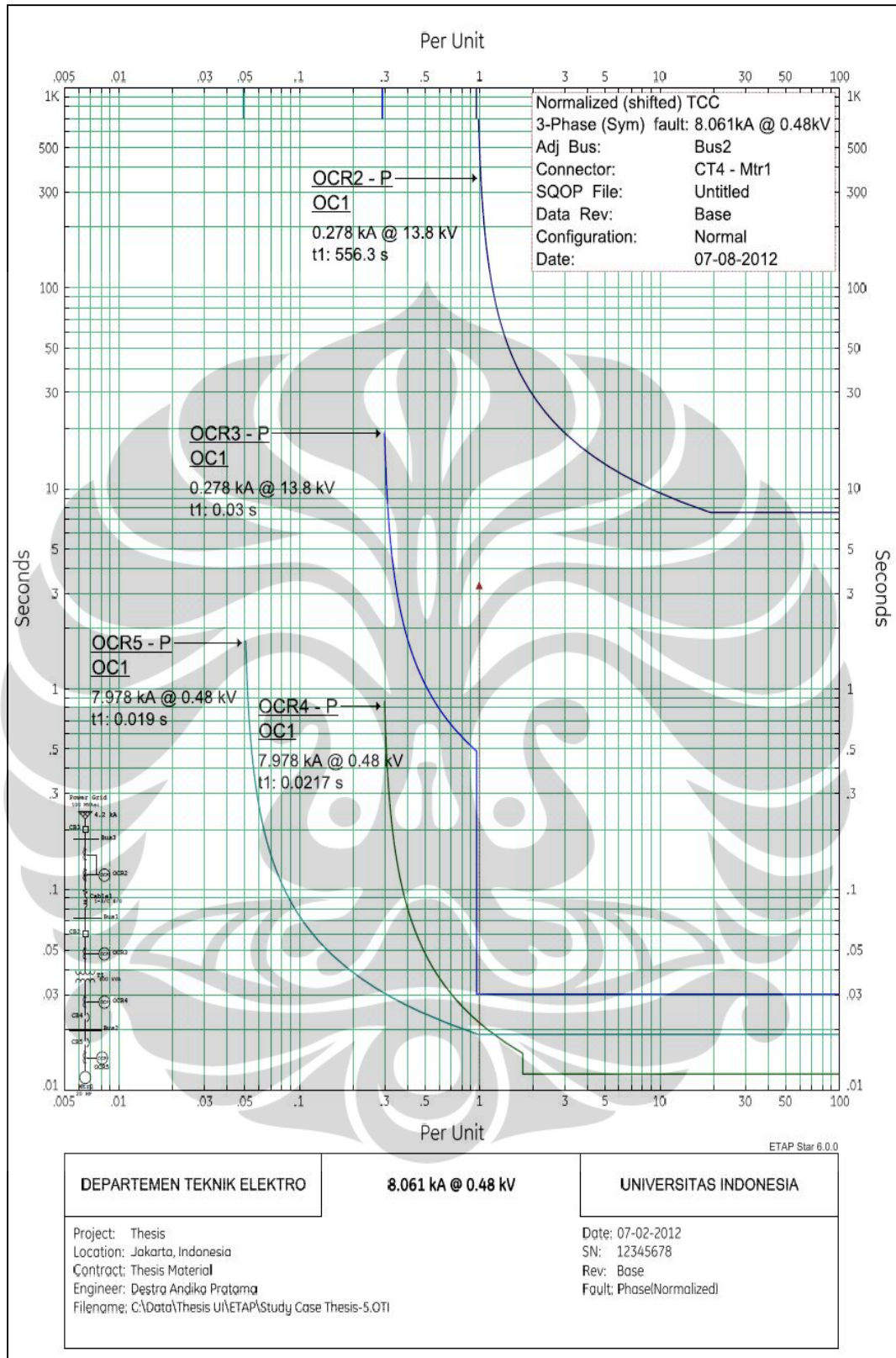


**Gambar 4.49** Studi Kasus untuk CT rasio 20/5 dengan  $X/R = 6$ , Beban =  $0.1 \Omega$  dan Arus Primer = 4.270A

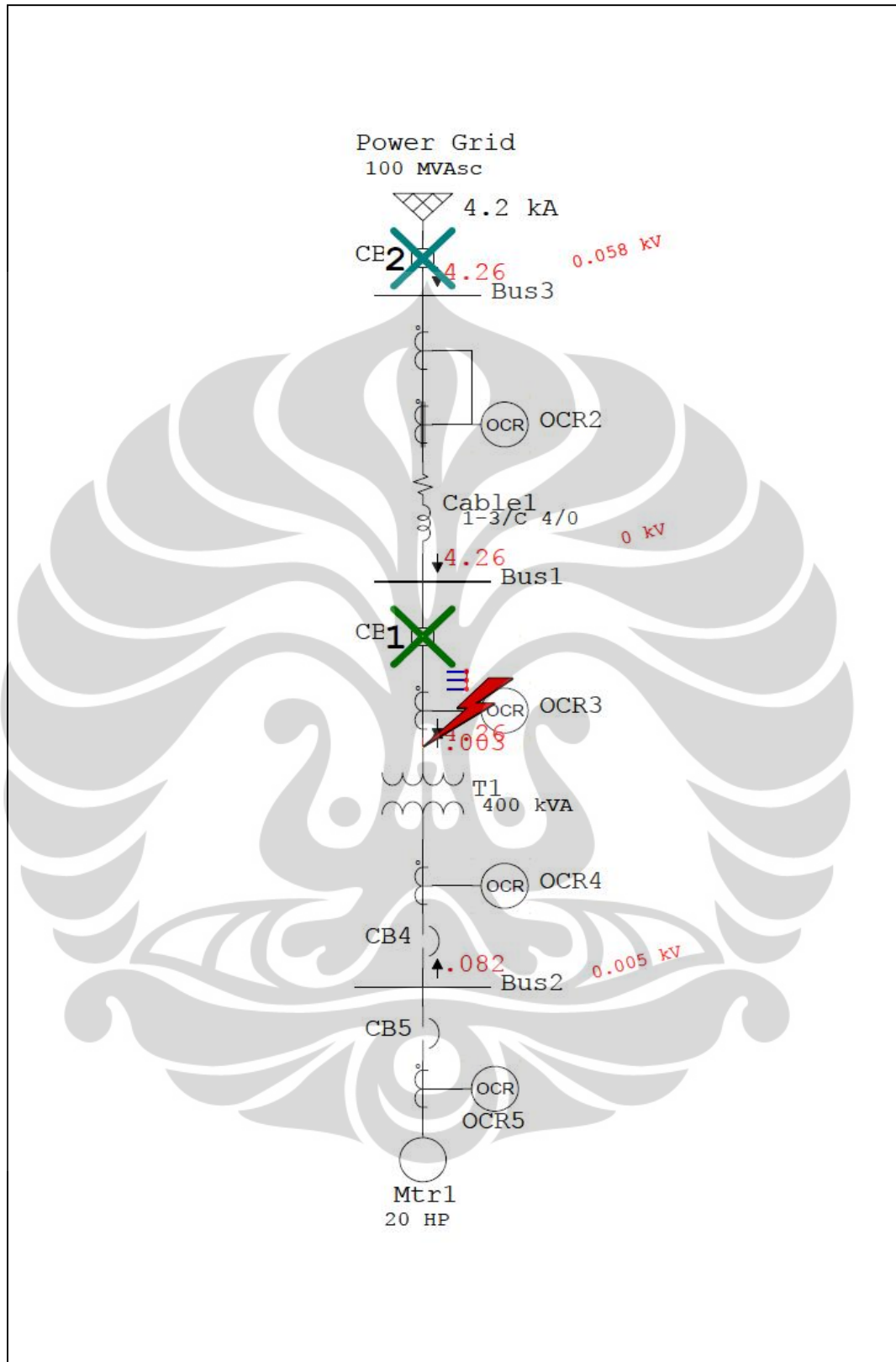




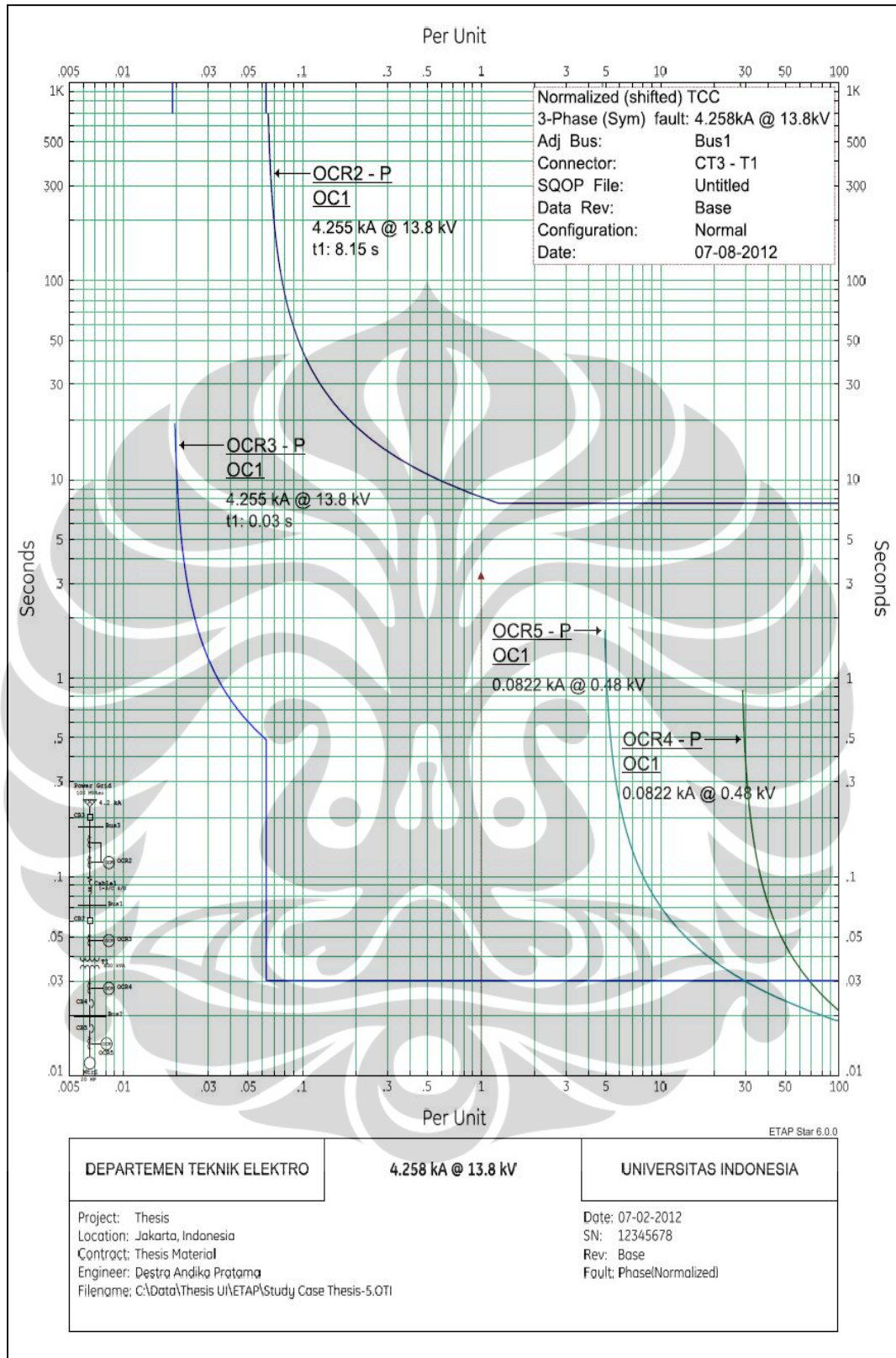
**Gambar 4.50** Urutan Operasi dari Rele Seting Koordinasi Arus Lebih ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat pada Sisi Motor



**Gambar 4.51** Rele Seting Koordinasi untuk Gangguan Hubung Singkat Pada Sisi Motor



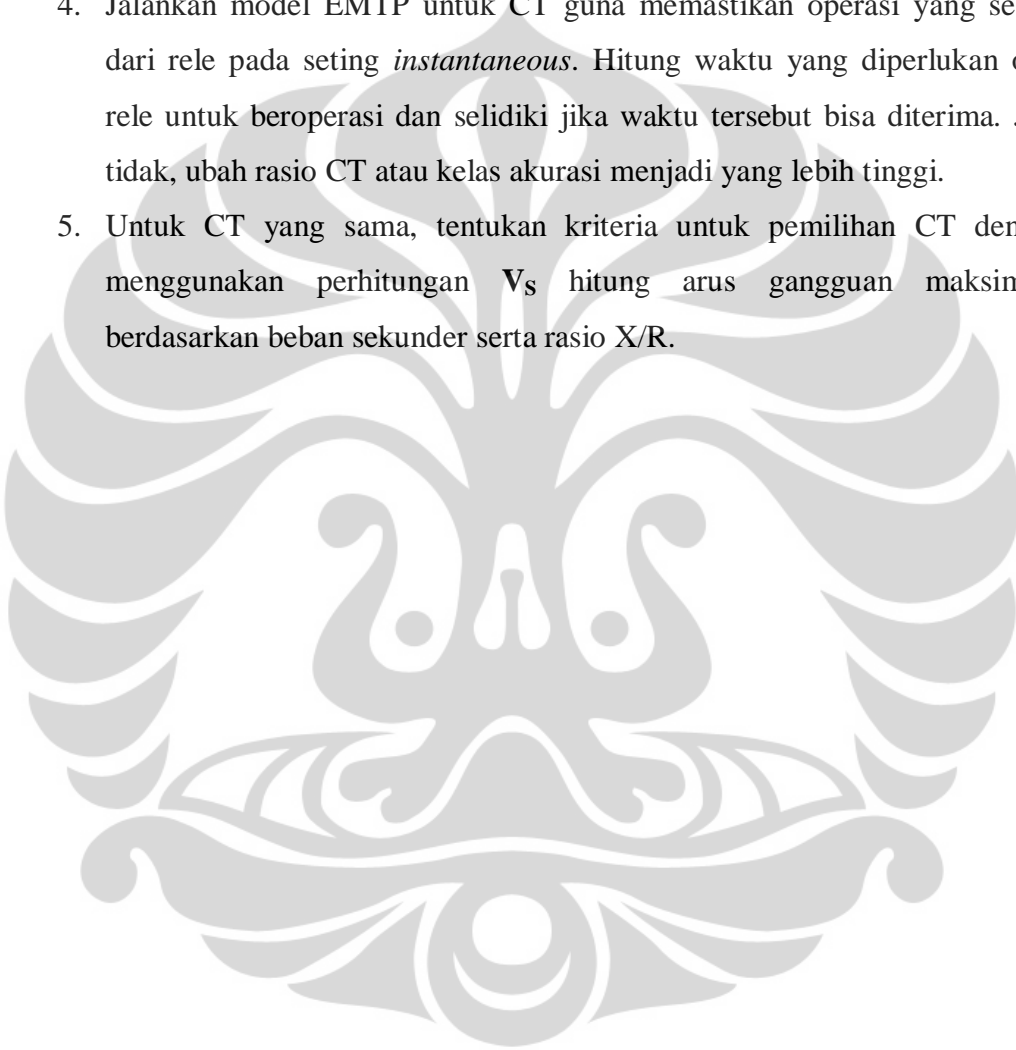
**Gambar 4.52** Urutan Operasi dari Rele Seting Koordinasi Arus Lebih ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat pada Sisi Trafo Tegangan Tinggi



**Gambar 4.53** Rele Seting Koordinasi untuk Gangguan Hubung Singkat pada Sisi Trafo Tegangan Tinggi

#### 4.7.4 Prosedur Pemilihan CT yang Tepat Bagi Operasional Rele Digital Arus Lebih *Instantaneous*

1. Pilih rasio CT berdasarkan persyaratan beban.
2. Hitung seting rele *instantaneous* yang diperlukan.
3. Gunakan persamaan (4.18) untuk menghitung  $V_s$ .
4. Jalankan model EMTP untuk CT guna memastikan operasi yang sesuai dari rele pada seting *instantaneous*. Hitung waktu yang diperlukan oleh rele untuk beroperasi dan selidiki jika waktu tersebut bisa diterima. Jika tidak, ubah rasio CT atau kelas akurasi menjadi yang lebih tinggi.
5. Untuk CT yang sama, tentukan kriteria untuk pemilihan CT dengan menggunakan perhitungan  $V_s$  hitung arus gangguan maksimum berdasarkan beban sekunder serta rasio X/R.



## BAB LIMA

### KESIMPULAN

Implementasi dari model transformator arus dapat diterima dan presisi dengan menggunakan model induktor *nonlinear* (*Type-96*) dalam EMTP. Model tersebut merupakan cara yang paling mudah untuk menguji perilaku transien dari CT dan rele digital arus lebih. Model ini telah divalidasi dan diuji dalam laboratorium untuk memastikan kesesuaian serta akurasinya.

Model CT ini selanjutnya digunakan untuk mendemonstrasikan dan menyelidiki pengaruh dari beban sekunder, tingkat hubung singkat simetris, rasio X/R sistem (*DC Offset*) pada transformator arus. Analisa semacam itu sangat penting untuk mempelajari pengaruh dari kejenuhan CT terhadap rele proteksi dan akibatnya terhadap sistem proteksi. Pemahaman yang penuh dari perilaku CT memungkinkan penelitian untuk evaluasi respon dari rele digital arus lebih terhadap kejadian transien.

Dalam tesis ini telah menyelidiki pengaruh dari kejenuhan CT dan dampaknya terhadap rele digital arus lebih dengan melakukan test di laboratorium. Berbagai studi kasus telah dilakukan menggunakan model CT dengan EMTP untuk menyelidiki pengaruh dari beban sekunder, tingkat hubung singkat simetris, rasio X/R sistem (*DC Offset*), terhadap kejenuhan yang terjadi pada CT. Kemudian juga telah diselidiki operasi dari rele digital arus lebih *instantaneous* dan *time delay*. Semua kasus yang telah diinjeksikan ke dalam rele menggunakan peralatan injeksi sekunder, setelah terlebih dahulu mengubah setiap berkas kasus menjadi format *commontrade*.

Tujuan dari analisa ini adalah untuk mengatasi penggunaan rating CT dalam jaringan distribusi dengan arus gangguan melebihi 200 kali rating CT primer serta mengetahui kriteria persyaratan dari standar IEEE C37.110-1996 yang pada kenyataannya tidak dapat dipenuhi, dikarenakan oleh keterbatasan ukuran dimensi CT maupun ukuran serta panjang nya kawat sekunder ke CT.

Berdasarkan pada hasil simulasi dan percobaan, maka pemilihan CT dapat dilakukan berdasarkan pada waktu operasi dari pada rele *instantaneous*. Sebagai contoh, CT yang dialiri diatas 100 kali arus gangguan masih dapat bekerja tanpa masalah dan tanpa harus memenuhi kriteria dari standar IEEE C37.110-1996. CT yang mengalami kejenuhan tersebut, masih dapat memberikan arus yang cukup pada rele digital arus lebih *instantaneous*.

Pengembangan lainnya adalah dengan melanjutkan pengujian terhadap rele digital arus lebih dengan menggunakan ukuran CT yang berbeda serta kelas ketelitian yang berbeda pula, sehingga dapat sampai pada satu kriteria yang pasti serta praktis dalam hal pemilihan CT. *Disturbance fault recorder digital* dengan laju sampling yang lebih tinggi akan memberikan hasil yang lebih akurat. Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa penerapan kriteria dari standar IEEE C37.110-1996 menjadi tidak praktis dan tidak ekonomis karena akan menghasilkan rasio CT dan tingkat akurasi yang relatif lebih tinggi.

## DAFTAR REFERENSI

- [1] John R. Linders, C. W. Barnett, J. W. Chadwick, P. R. Drum, K. J. Khunkhun, Stanley E. Zocholl, W. C. Kotheimer, P. A. Kotos, D. W. Smaha, P. B. Winston and W. Walton, "Rele Performance Considerations with Low-Ratio CT's and High-Fault Currents," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 31, No.2, pp. 392-403, March/April, 1995.
- [2] Lj. A. Kojovic, "Impact of Current Transformers Saturation on Overcurrent Protection Operation," Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Volume: 3, pp. 1078-1083, July 2002.
- [3] B. Bridger and Ted A. Burse, "Operation of Ground Sensor Reles Under Conditions of Partial CT Saturation," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 33, No.4, pp. 1111-1116, July/August, 1997.
- [4] Jiuping Pan, Khoi Vu and Yi Hu, "An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 19, No.4, pp-1623-1628, October, 2004.
- [5] Y. C. Kang, S. H. Ok, S. H. Kang and P. A. Crossley, "Design and Evaluation of an Algorithm for Detecting Current Transformer Saturation," IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol 151, No.1, pp-27-35, January, 2004.
- [6] Yong Cheol Kang, Ui Jai Lim, Sang Hee Kang and Peter A. Crossley, "Compensation of the Distortion in the Secondary Current Caused by Saturation and Remanence in a CT," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 19, No.4, pp-1642-1649, October, 2004.
- [7] Cheng Li-jun, "The Research of the Sampling Method for CT saturation for Numerical Busbar Protection," Development in Power System Protection, 2004, Eighth IEE International Conference, Vol 1, pp-384-386, April, 2004.
- [8] IEEE C37.110-1996 Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes.
- [9] M. W. Conroy, B. D. Nelson, B. Bozoki, J. W. Chadwick, P. R. Drum, L. L. Dovark, I. Hasenwinkle, J. Huddkeston, W. C. Kitheimer, J. R. Linders, M. J. McDonald, G. R. Moskos, G. C. Parr, R. Ryan, E. T. Sage, D. W. Smaha, K. A. Stephan, J. E. Stephens, J. T. Uchiyama and S. Zocholl, "C37.110 Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Purposes," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 14, No.1, pp. 94-97, January 1999.
- [10] Stanley E. Zocholl and Joe Mooney, "Primary High-Current Testing of Reles with Low Ratio Current Transformers," Pulp and Paper Industry Technical Conference 2004, pp. 192-197, July 2004.



- [11] D. A. Tziouvaras, P. MacLaren, G. Alexander, D. Dawson, J. Esztergalyos, C. Fromen, M. Glinkowski, I. Hasenwinkle, M. Kezunovic, L. Kojovic, B. Kotheimer, R. Kuffel, J. Nordstrom and S. Zocholl, "Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers," IEEE Transactions on Power System, Vol 15, No.1, pp. 62-72, January 2000.
- [12] M. Kezunovic, C. W. Fromen and F. Phillips, "Experimental Evaluation of EMTPBased Current Transformer Models for Protective Rele Transient Study," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 9, No.1, pp. 405-413, Jan. 1994.
- [13] Lj. A. Kojovic, "Comparison of Different Current Transformer Modeling Techniques for Protection System Studies," Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Volume: 3, pp. 1084-1089, July 2002.
- [14] Chuk-Hwan Kim, Myung-Hee Lee, Raj K. Aggarwal and Allan T. Johns, "Educational Use of EMTP MODELS for the study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines ," IEEE Transactions on Power Systems, Vol 15, No.1, pp. 9-15, February, 2000.
- [15] A. Chaudhary, Kwa-Sur Tam and A. G. Phadke, "Protection System Representation in the Electromagnetic Transient Program," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 9, No.2, pp. 700-711, April 1994.
- [16] Washington L. A. Neves and Hermann W. Dommel, "On Modeling Iron Core Nonlinearities," IEEE Transactions on Power System, Vol 8, No. 2, pp. 417-425, May 1993.
- [17] Ralph Folkers "Determine Current Transformer Suitability Using EMTP Models" [www.selinc.com](http://www.selinc.com).
- [18] IEEE C57.13-1993 Standard Requirements for Instrument Transformers.
- [19] N. T. Stringer, "The effect of DC Offset on Current-Operated Relays," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 34, No.1, pp. 30-34, January/February, 1998.
- [20] G. Benmouyal and S. E. Zocholl, "The Impact of High Fault Current and CT Rating Limits on Overcurrent Protection," [www.selinc.com](http://www.selinc.com).
- [21] Stanley E. Zocholl, Jeff Roberts, and Gabriel Benmouyal, "Selecting CTs to Optimize Rele Performance," Proceedings of the 23rd Annual Western Protective Rele Conference, Spokane, WA, October 15 – 17, 1996.
- [22] Stanley E. Zocholl and Gabriel Benmouyal, "How *Microprocessor* Relays Respond to Harmonics, Saturation, and Other Wave Distortions," Proceedings of the 24th Annual Western Protective Rele Conference, Spokane, WA, October 21 – 23, 1997.

- [23] Stanley E. Zocholl and D.W. Smaha, "Current Transformer Concepts," Proceedings of the 46th Annual Georgia Tech Protective Relays Conference, Atlanta, GA, April 29 – May 1, 1992.
- [24] H. O. Pascual, J. L. Dampe and J. A. Rapallini, "Behavior of Current Transformers (CT's) Under Severe Saturation Conditions," IPST Conference, 2001. [www.ipst.org](http://www.ipst.org).
- [25] Lj. A. Kojovic, "Guidelines for Current Transformers Selection for Protection System," Power Engineering Society Summer Meeting, 2001 IEEE, Volume: 1, pp.593- 598, July 2001.
- [26] J. R. Marti, L. R. Linares and H. W. Dommel, "Current Transformers and Coupling- Capacitor Voltage Transformers in Real-Time Simulations," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 12, No.1, pp. 164-168, January 1997.
- [27] Blackburn, J. Lewis, *Protective Relaying, Principles and Applications*, New York: Marcel Eecker, Inc., Chapters 5 & 8, 1987. "
- [28] D. W. Ackermann, "Current Transformer Measurements of Distorted Current Waveforms with Secondary Load Impedance," IEEE Transactions on Power System, Vol 8, No 2, May 1999.
- [29] Walter A. Elmore, *Protective Relaying Theory and Applications*, New York: Marcel Eecker, Inc., Chapters 5, 1994. "
- [30] S. Bittanti, F. Cuzzola, F. Lorito and G. Poncia, "Compensation of Nonlinearities in a Current Transformer for the Reconstruction of the Primary Current," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol 9, No.4, pp.565-573, July 2001
- [31] Silvano Casoria and Gilbert Sybille, "Hysteresis Modeling in the Matlab/Power System Blockset," [www.transenergie-tech.com](http://www.transenergie-tech.com).
- [32] Francisco de leon and Adam Semlyen, "A Simple Representation of Dynamic Hysteresis Losses in Power Transformers, " IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 10, No.1, pp. 315-321, January 1995.
- [33] Instruction Manual for alternative transients program (ATP).
- [34] Reference Manual for OMICRON-CPC-100, Primary Test System for Substation Equipment
- [35] IEEE C37.519-1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [36] Instruction Manual for Feeder Protection (ABB-REF630)

[37] Operations Manual for OMICRON-CMC-256, PC controlled test device for protective relays and transducers.

[38] Ibrahim. M. El-Amin, Senior Member, IEEE, and Nabil. H. Al-Abbas, Member, IEEEZ. Saturation of Current Transformers and its Impact on Digital Overcurrent Relays.

[39] Operation Technology, Inc. ETAP® 6.00 User Guide.

