



TESIS - EE185401

OPTIMASI *TIME DIAL SETTING* (TDS) DAN TIPE KURVA RELAY ARUS LEBIH MENGGUNAKAN *ADAPTIVE MODIFIED FIREFLY ALGORITHM* PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG CIKAMPEK DENGAN MEMPERTIMBANGKAN KARAKTERISTIK BEBAN DAN MANUVER OPERASI

NUGRAHA AGUNG WIBOWO
07111750010005

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019



TESIS - EE185401

OPTIMASI *TIME DIAL SETTING* (TDS) DAN TIPE KURVA RELAY ARUS LEBIH MENGGUNAKAN *ADAPTIVE MODIFIED FIREFLY ALGORITHM* PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG CIKAMPEK DENGAN MEMPERTIMBANGKAN KARAKTERISTIK BEBAN DAN MANUVER OPERASI

NUGRAHA AGUNG WIBOWO
07111750010005

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)

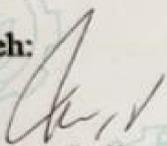
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

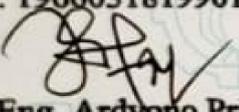
Nugraha Agung Wibowo
NRP. 07111750010005

Tanggal Ujian : 17 Desember 2018
Periode Wisuda : Maret 2019

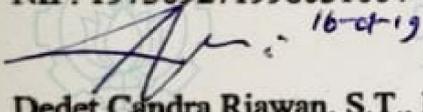
Disetujui oleh:


1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
NIP: 196603181990101001

(Pembimbing I)


2. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
NIP: 197309271998031004

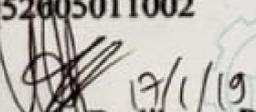
(Pembimbing II)


3. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP: 197311192000031001

(Penguji)


4. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 198109052005011002

(Penguji)


5. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, S.T., M.Sc., Ph.D. (Penguji)
NIP: 198208292006042001

Dekan Fakultas Teknologi Elektro



Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP: 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**OPTIMASI *TIME DIAL SETTING* (TDS) DAN TIPE KURVA RELAY ARUS LEBIH MENGGUNAKAN *ADAPTIVE MODIFIED FIREFLY ALGORITHM* PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG CIKAMPEK DENGAN MEMPERTIMBANGKAN KARAKTERISTIK BEBAN DAN MANUVER OPERASI** ” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2018

Nugraha Agung Wibowo

NRP. 07111750010005

Halaman ini sengaja dikosongkan

**OPTIMASI *TIME DIAL SETTING* (TDS) DAN TIPE KURVA
RELAY ARUS LEBIH MENGGUNAKAN *ADAPTIVE
MODIFIED FIREFLY ALGORITHM* PADA SISTEM
KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG CIKAMPEK DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN KARAKTERISTIK BEBAN DAN
MANUVER OPERASI**

Nama mahasiswa : NUGRAHA AGUNG WIBOWO
NRP : 07111750010005
Pembimbing : 1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
2. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.

ABSTRAK

Dalam sistem kelistrikan dunia industri sering dijumpai relay arus lebih sebagai salah satu peralatan dalam sistem proteksi listrik. Untuk mendapatkan sistem proteksi yang handal dan selektif, maka diperlukan penentuan dan pengaturan nilai parameter yang tepat pada relay arus lebih. Pengaturan beberapa parameter tersebut adalah arus pick up (I_p), *Time Dial Setting* (TDS), dan tipe kurva, untuk mendapatkan waktu kerja relay (t_{op}) yang sesuai. Sehingga Penentuan nilai TDS dan pemilihan tipe kurva menjadi salah satu permasalahan yang sering ditemukan dikarenakan dalam proses perhitungannya membutuhkan waktu yang sangat lama yang diakibatkan karena. Sehingga metode optimasi dengan menggunakan kecerdasan buatan sangat diperlukan untuk dapat mempercepat proses perhitungan dalam menentukan nilai dari TDS dan tipe kurva yang akan digunakan. Dalam penentuan nilai TDS dan tipe kurva perlu mempertimbangkan batasan – batasan praktis yang sudah ada seperti *decrement curve* pada generator, *damaged curve* peralatan dan *motor starting curve* agar sistem koordinasi yang dihasilkan dapat bekerja secara selective dan dapat melindungi peralatan-peralatan listrik dalam sistem kelistrikan yang ada tanpa mengganggu proses produksi. Penelitian yang digunakan berdasarkan kasus nyata pada dunia industry yaitu PT. Pupuk Kujang Cikampek. Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa metode yang digunakan mampu menghasilkan TDS dan tipe kurva yang sesuai dengan batasan – batasan praktis yang digunakan dan dengan menggunakan AMFA dapat menghasilkan titik konvergensi dengan nilai *best cost* yang lebih baik.

Kata kunci: *firefly Algorithm*, *overcurrent relay*, *coordination protection*, *motor starting curve*

Halaman ini sengaja dikosongkan

TIME DIAL SETTING (TDS) AND CURVE TYPE OPTIMIZATION FOR OVERCURRENT RELAY USING ADAPTIVE MODIFIED FIREFLY ALGORITHM IN PT. PUPUK KUJANG CIKAMPEK CONSIDERING LOAD CHARACTERISTIC AND MANUVER OPERATION

By : Nugraha Agung Wibowo
Student Identity Number : 07111750010005
Supervisor(s) : 1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
2. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.

ABSTRACT

In the industrial world electricity system is often found overcurrent relays as one of the equipment in an electrical protection system. To obtain a reliable and selective protection system, it is necessary to determine and adjust the appropriate parameter values for overcurrent relays. The settings for a number of these parameters are the pickup current, Time Dial Setting (TDS), and curve type, to get the appropriate relay (top) work time. So that the determination of TDS values and selection of curve types is one of the problems that are often found because in the calculation process requires a very long time due to. So that the optimization method using artificial intelligence is very necessary to be able to speed up the calculation process in determining the value of the TDS and the type of curve to be used. In determining the TDS value and curve type it is necessary to consider existing practical limits such as decrement curves on the generator, damaged curve equipment and motor starting curves so that the resulting coordination system can work selectively and can protect electrical equipment in the existing electrical system without disturbing the production process. The research used is based on a real case in the world of industry, namely PT. Pupuk Kujang Cikampek. The results of the research conducted show that the method used is able to produce TDS and type of curves that are in accordance with the practical limits used and by using AMFA can produce a convergence point with a better value for best cost.

Key words: firefly Algorithm ,overcurrent relay, coordination protection, motor starting curve

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin rasa syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat Nya penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul judul “ **OPTIMASI *TIME DIAL SETTING (TDS)* DAN TIPE KURVA RELAY ARUS LEBIH MENGGUNAKAN *ADAPTIVE MODIFIED FIREFLY ALGORITHM* PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG CIKAMPEK DENGAN MEMPERTIMBANGKAN KARAKTERISTIK BEBAN DAN MANUVER OPERASI ”.**

Tesis ini dapat tersusun berkat bantuan dari semua pihak, untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan Tesis ini, tak lupa penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Sumpeno Widiyanto, Ibu Eni Rahayu Handayani, Ayah Zamzami Abubakar dan Ibu Nailil Muna yang selalu memberikan motivasi, nasihat , petuah dan doanya selalu sehingga saya dapat selalu bersemangat untuk menyelesaikan tesis ini.
2. Istri saya Lita Erlisa, anak-anak saya Mas Najandra Oktavian Nugraha dan Mbak Nashira Oktavia Nugraha yang selalu mendampingi, memberikan semangat dan motivasi dan tidak lupa doa yang selalu mendamping saya dalam mengerjakan tesis hingga dapat menyelesaikan tesis ini.
3. Adik kembar saya Nugraha Ngesti Wibowo, adik -adik saya mas Faisal Ridu dan mas Muhammad Riyanando yang selalu memberikan motivasi dan semangat dalam proses penyelesaian tesis ini.
3. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST.,M.Eng yang selaku dosen pembimbing tesis, yang telah membimbing dan memberikan banyak sekali ilmu -ilmu praktis sistem proteksi sehingga dapat sangat membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.
4. Para Managemen Direksi, Manager Listrik & Instrumen , Superintendent Listrik dan teman – teman pemeliharaan listrik PT. Pupuk Kujang Cikampek selaku

pimpinan , atasan dan rekan kerja yang telah memberikan kepercayaan dan beasiswa kepada saya, agar dapat melanjutkan ke jenjang Magister di ITS.

5. Mas Vincentius Rakimahindara dan Mahmud Abuzalata yang selalu membantu, mendampingi, memberikan arahan hingga saya dapat menyelesaikan tesis ini.

6. Rekan – rekan mahasiswa Jurusan Teknik Elektro ITS, khususnya bidang Keahlian Sistem Tenaga (S2) angkatan 2017 yang selalu memberikan motivasi satu sama lain hingga kita bisa sama-sama menyelesaikan tesis ini.

7. Seluruh Dosen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan selama penulis belajar di Institut Sepuluh Nopember.

8. Bapak / Ibu staff Jurusan Teknik Elektro ITS yang selalu membantu dan memberi kelancaran hingga saya dapat menyelesaikan tesis ini.

9. Rekan -rekan AJ-302,Lipist yang telah banyak membantu dan menemani penulis dari pagi hingga malam dalam menyelesaikan tesis ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penyusunan Tesis ini mungkin masih terdapat kekurangan. Namun penulis telah berusaha sekuat tenaga dan pikiran untuk memperoleh hasil Tesis dengan baik. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan penulis demi kesempurnaan Tesis ini.

Akhir kata penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan pembaca pada umumnya.

Surabaya, 11 Desember 2018

Nugraha Agung Wibowo

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Kontribusi	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait	5
2.2 Gangguan Arus Lebih.....	6
2.3 Metode Perhitungan Arus Hubung Singkat	7
2.3.1 Komponen simetri.....	8
2.3.2 Hubung Singkat Tiga Fasa (<i>three phase fault</i>)	10
2.3.3 Hubung Singkat Tak Simetris	10
2.4 Koordinasi Proteksi.....	12
2.4.1 Pengaturan Arus Pickup.....	13
2.4.2 Time Current Characteristic	14
2.4.3 Clearing Time Interval (CTI).....	15
2.5 Batasan – Batasan Praktis Kelistrikan Industri.....	16

2.5.1	<i>Decrement Curve</i>	16
2.5.2	<i>Damaged Curve</i>	18
2.5.3	<i>Motor Starting Curve</i>	20
2.6	Firefly Algorithm	22
2.6.1	Adaptive Modified Firefly Algorithm	23
BAB 3 METODE PENELITIAN		25
3.1	Studi Literatur	25
3.2	Pemilihan dan Pengumpulan Data	26
3.3	Penentuan Batasan Praktis TDS dan Tipe Kurva	27
3.4	Pemodelan Koordinasi Proteksi	28
3.4.1	Sistem Distribusi PT. Pupuk Kujang	29
3.5	Perancangan Master Program	31
3.5.1	Perancangan Firefly Algorithm	31
3.6	Pengujian Hasil Iterasi	36
3.7	Analisa Hasil Pengujian	36
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		37
4.1	Memodelkan <i>Starting Motor Curve</i> , <i>Damaged Curve</i> dan <i>Decrement Curve</i>	37
4.1.1	<i>Cable Damaged Curve</i>	37
4.1.2	<i>Transformer Damaged Curve</i>	39
4.1.3	<i>Decrement Curve</i>	40
4.1.4	<i>Motor Starting Curve</i>	43
4.2	Menentukan <i>Case Study</i> Koordinasi Proteksi Pada PT. Pupuk Kujang Cikampek	45
4.2.1	<i>Case Study-1</i> : Tipikal 1B	47
4.2.2	<i>Case Study-1</i> : Tipikal 2B	47
4.2.3	<i>Case Study-2</i> : Tipikal 1A	48
4.2.4	<i>Case Study-2</i> : Tipikal 2A	49
4.3	Menentukan TDS dan Tipe Kurva Menggunakan <i>Adaptive Modified Firefly Algoritihm</i>	50
4.3.1	Hasil TDS dan Tipe Kurva <i>Case Study-1</i> : Tipikal 1B	52
4.3.2	Hasil TDS dan Tipe Kurva <i>Case Study-1</i> : Tipikal 2B	56
4.3.3	Hasil TDS dan Tipe Kurva <i>Case Study-2</i> : Tipikal 1A	58

4.3.4	Hasil TDS dan Tipe Kurva <i>Case Study-2</i> : Tipikal 2A.....	62
4.4	Analisa Hasil Optimasi TDS & Tipe Kurva Menggunakan AMFA dengan <i>Boundary Evaluation</i>	65
4.4.1	Analisa hasil dengan <i>boundary evaluation motor starting curve</i> ...	65
4.4.2	Analisa hasil dengan <i>boundary evaluation</i> kurva relay	67
4.4.3	Analisa hasil perbandingan optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA <i>boundary evaluation</i> dan <i>conventional method</i>	69
BAB 5 KESIMPULAN.....		73
5.1	Kesimpulan	73
5.2	Saran	73
DAFTAR PUSTAKA		75

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kondisi arus dalam keadaan normal (a) dan saat hubung singkat (b).	7
Gambar 2.2 Vektor diagram komponen simetris	9
Gambar 2.3 Hubung singkat 3 fasa serta pemodelannya	10
Gambar 2.4 Hubung singkat antar fasa serta pemodelannya	11
Gambar 2.5 Hubung singkat dua fasa ke tanah serta pemodelannya	11
Gambar 2.6 Hubung singkat fasa ke tanah serta pemodelannya.....	12
Gambar 2.7 Tipe Kurva Relay dengan Parameter Identik.....	15
Gambar 2.8 Pemodelan CTI pada relay arus lebih	16
Gambar 2.9 <i>Decrement Curve Generator</i> 18 Mva	18
Gambar 2.10 <i>Induction Motor Starting Curve</i>	21
Gambar 3.1 Alur pelaksanaan penelitian	25
Gambar 3.2 <i>Single Line Diagram</i> Skema Proteksi	26
Gambar 3.3 <i>Simplified Single Line Diagram</i> PT. Pupuk Kujang Cikampek.....	28
Gambar 3.4 Sistem Distribusi Pabrik Kujang 1A (<i>Island</i>)	29
Gambar 3.5 Sistem Distribusi Pabrik Kujang 1B (<i>Island</i>).....	30
Gambar 3.6 Sistem Interkoneksi Kelistrikan Kujang 1A dan 1B	30
Gambar 3.7 <i>Flowchart</i> dalam perancangan master program.....	31
Gambar 3.8 Diagram Alir Perancangan <i>Firefly Algorithm</i>	32
Gambar 4.1 <i>Cable damaged curve</i> 120 mm ²	38
Gambar 4.2 Trafo <i>damaged curve</i> TR-NPK2.....	40
Gambar 4.3 <i>Decrement curve</i> generator hitachi	43
Gambar 4.4 <i>Motor starting curve</i> 2209-JCM pabrik kujang 1A	44
Gambar 4.5 <i>Motor starting curve</i> C-002-M pabrik kujang 1B.....	45
Gambar 4.6 Skema Proteksi <i>Case Study-1</i> dan <i>Case Study-2</i>	46
Gambar 4.7 <i>Case study-1</i> : Tipikal 1B.....	47
Gambar 4.8 <i>Case Study-2</i> : Tipikal 2B	48
Gambar 4.9 <i>Case Study-2</i> : Tipikal 1A	49
Gambar 4.10 <i>Case Study-2</i> : Tipikal 2A.....	49
Gambar 4.11 Kurva TCC R1B sebelum <i>boundary evaluation</i>	53
Gambar 4.12 Kurva TCC <i>case study-1:1B</i> setelah <i>boundary evaluation</i>	54

Gambar 4.13 Perbandingan kurva konvergensi AMFA dan FA <i>case study-1</i> :1B	55
Gambar 4.14 Kurva TCC <i>case study-1</i> : Tipikal 2B	57
Gambar 4.15 Perbandingan kurva konvergensi AMFA dan FA <i>case study-1</i> :2B	58
Gambar 4.16 Kurva TCC R1A sebelum <i>boundary evaluation</i>	59
Gambar 4.17 Kurva TCC <i>case study-2</i> : Tipikal 1A	61
Gambar 4.18 Perbandingan kurva konvergensi AMFA dan FA <i>case study-2</i> : 1A	62
Gambar 4.19 Kurva TCC <i>Case Study-2</i> : Tipikal 2A.....	63
Gambar 4.20 Perbandingan kurva konvergensi AMFA dan FA <i>case study-2</i> : 2A	64
Gambar 4.21 Hasil Optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA.....	65
Gambar 4.22 Hasil TDS dan tipe kurva sebelum dilakukan <i>boundary evaluation</i>	66
Gambar 4.23 Hasil TCC <i>case study-1</i> : 2B sebelum adanya <i>boundary evaluation</i>	67
Gambar 4.24 Hasil TDS dan Tipe Kurva menggunakan <i>conventional method</i> pada <i>case study-1</i> : 1B	70
Gambar 4.25 Hasil TDS dan Tipe Kurva menggunakan <i>conventional method</i> pada <i>case study-1</i> : 2B	70
Gambar 4.26 Hasil TDS dan Tipe Kurva menggunakan <i>conventional method</i> pada <i>case study-2</i> : 1A	71
Gambar 4.27 Hasil TDS dan Tipe Kurva menggunakan <i>conventional method</i> pada <i>case study-2</i> : 2A	72

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Koefisien Kurva Relay Inverse Standard IEC	14
Tabel 2.2 Clearing Time Interval Relay.....	16
Tabel 2.3 Batasan Temperature Operasi Kabel [10].....	19
Tabel 2.4 K-Factor Konduktor[10]	19
Tabel 2.5 <i>Emergency overload current</i> pada 40°C[10]	19
Tabel 2.6 Kategori Trafo Rating [17]	20
Tabel 2.7 <i>Thermal Damage</i> trafo category II.....	20
Tabel 3.1 Data Relay PT. Pupuk Kujang Cikampek <i>Case Study-1</i>	27
Tabel 3.2 Data Relay PT. Pupuk Kujang Cikampek <i>Case Study-2</i>	27
Tabel 3.3 Koefisien Kurva Relay Inverse Standard IEC	33
Tabel 4.1 <i>Damage Curve</i> kabel 3/C -120 mm ² PT. Pupuk Kujang Cikampe.....	37
Tabel 4.2 <i>Thermal Damage Curve</i> Trafo TR-NPK2	39
Tabel 4.3 Data Arus Hubung Singkat dan Relay <i>Case Study-1</i>	48
Tabel 4.4 Data Arus Hubung Singkat dan Relay <i>Case Study-2</i>	50
Tabel 4.6 Hasil optimasi TDS dan semua tipe kurva tanpa <i>boundary evaluation</i>	52
Tabel 4.7 Hasil TDS dan tipe kurva setelah dilakukan <i>boundary evaluation</i>	52
Tabel 4.8 Hasil total T _{op} <i>case study-1</i> : Tipikal 1B minimum	54
Tabel 4.9 Hasil optimasi TDS dan semua tipe kurva tanpa <i>boundary evaluation</i>	56
Tabel 4.10 Hasil total T _{op} <i>case study-1</i> : Tipikal 2B minimum	57
Tabel 4.11 Hasil optimasi TDS dan semua tipe kurva tanpa <i>boundary evaluation</i>	58
Tabel 4.12 Hasil TDS dan tipe kurva setelah dilakukan <i>boundary evaluation</i>	60
Tabel 4.13 Hasil total T _{op} <i>case study-2</i> : Tipikal 1A minimum.....	60
Tabel 4.14 Hasil optimasi TDS dan semua tipe kurva tanpa <i>boundary evaluation</i>	62
Tabel 4.15 Hasil total T _{op} <i>case study-2</i> : Tipikal 2A minimum.....	64
Tabel 4.16 Hasil CS-1 : 1B menggunakan AMFA dan <i>Conventional Method</i>	69
Tabel 4.17 Hasil CS-1 : 2B menggunakan AMFA dan <i>Conventional Method</i>	69
Tabel 4.18 Hasil CS-2 : 1A menggunakan AMFA dan <i>Conventional Method</i>	71

Tabel 4.19 Hasil CS-2 : 2B menggunakan AMFA dan Conventional Method..... 71

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

SINGKATAN

<i>CTI</i>	Clearing Time Interval
<i>TCC</i>	Time Current Characteristic
<i>TDS</i>	Time Dial Setting
<i>IEC</i>	International Electrotechnical Commission
<i>FA</i>	Firefly Algorithm
<i>AMFA</i>	Adaptive Modified Firefly Algorithm
PSO	Particle Swarm Optimization
CB	Circuit Breaker
DG	Distributed Generation

SIMBOL

t_{op}	Waktu kerja relay
X_1	Impedansi Urutan Positif
X_2	Impedansi Urutan Negatif
X_0	Impedansi Urutan Nol
K	koefisien relay <i>inverse</i> (IEC) 1
α	koefisien relay <i>inverse</i> (IEC) 2
β	koefisien relay <i>inverse</i> (IEC) 3
I_f	Arus gangguan
I_p	Arus pickup
I_{sc}	Arus Hubung Singkat

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Keandalan dan kemampuan sistem tenaga listrik dalam melayani konsumen bergantung pada sistem proteksi yang digunakan. Proteksi terhadap sistem dan peralatan kelistrikan menjadi hal yang sangat dibutuhkan dalam dunia industri. Sistem proteksi berperan penting dalam mendeteksi adanya gangguan dan dapat mencegah kerusakan yang diakibatkan gangguan tanpa mengurangi kinerja peralatan. Jika sistem proteksi tenaga listrik baik, nilai ekonomis dapat diperoleh karena saat terjadi gangguan, kerusakan peralatan tidak dapat menyebar ke peralatan lain dikarenakan sistem proteksi bekerja sebagaimana mestinya. Koordinasi sistem proteksi yang baik akan mengisolasi daerah gangguan dan mencegah pemadaman di daerah lain. Hal ini dapat meningkatkan keandalan sistem dengan menjaga kontinuitas suplai pada beban.

Relay arus lebih merupakan salah satu perangkat proteksi yang penting dalam sistem tenaga listrik. Hal ini digunakan untuk melindungi peralatan listrik ketika sebuah gangguan atau *overload* terjadi. Pada sistem kelistrikan industri memiliki banyak parameter untuk melakukan perhitungan dan penentuan parameter dalam melakukan perancangan koordinasi pada relay arus lebih, sehingga penentuan parameter tersebut tidaklah mudah untuk dilakukan, oleh sebab itu diperlukan metode optimisasi untuk membantu dalam menyelesaikan masalah dalam penentuan parameter.

Pada penelitian sebelumnya banyak dilakukan optimisasi menggunakan *intelligent computing* untuk melakukan penentuan parameter setting pada relay [1]. Pada penelitian selanjutnya [2] dilakukan optimisasi menggunakan *particle swarm optimization* untuk menentukan t_{op} (waktu operasi relay) agar diperoleh koordinasi relay yang optimum antara relay utama dan cadangan. Pendekatan sistem koordinasi relay arus lebih dengan menggunakan turunan waktu tripping yang bertujuan untuk memperoleh t_{op} yang optimum sehingga didapatkan waktu trip yang lebih cepat sehingga dapat menghindari kegagalan proteksi [3]-[4]. Pada

penelitian ini juga dilakukan optimasi menggunakan metode *adaptived modified firefly algorithm* (AMFA) untuk mendapatkan nilai t_{op} dan I_p (*plug setting*) [5]. Pada penelitian ini dijelaskan juga bahwa dengan adanya *injection* yang berasal dari *distributed generation* (DG) ke dalam suatu sistem jaringan dalam keadaan waktu yang terjadwalkan, dapat mempengaruhi level arus hubung singkat pada sistem jaringan.

Metode optimasi sangatlah diperlukan untuk mempermudah perhitungan dalam penentuan parameter setting relay arus lebih. Penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya sebagian besar metode optimasi yang dilakukan adalah melakukan optimasi penentuan pada TDS saja dan pemilihan tipe kurva diasumsikan hanya memilih salah satu tipe kurva saja dan dilakukan pada level tegangan yang sama. Pada lingkungan dunia industri dalam melakukan proses perancangan dan penentuan parameter setting pada relay arus lebih dibutuhkan parameter Arus *Pick Up*, TDS (*Time Dial Setting*) [6] dan tipe kurva sebagai inputan untuk melakukan setting pada relay arus lebih, agar mendapatkan t_{op} atau waktu kerja relay yang diinginkan. Setiap tipe kurva memiliki konstanta yang berbeda dan nilai TDS yang berbeda untuk dapat menghasilkan t_{op} dalam nilai yang sama. Pada umumnya, penentuan TDS dan tipe kurva biasanya dilakukan operator dengan cara *trial and error* dan pemilihan tipe kurva dilakukan secara bebas tanpa mempertimbangkan hasil yang akan didapatkan dan diperlukan waktu yang cukup lama untuk mendapatkan setting yang sesuai. Dalam permasalahan ini juga sangat dibutuhkan metode optimasi untuk membantu perhitungan dan mempercepat waktu dalam penentuan nilai TDS dan tipe kurva.

Dalam kelistrikan industri permasalahan yang timbul adalah terdapat berbagai macam jenis beban baik itu *rotating machine* (motor induksi) ataupun *static machine*. Dimana yang seperti kita ketahui motor induksi memiliki karakteristik yang berbeda-beda tergantung dari jenis beban yang digerakkan. Permasalahan yang sering ditemui adalah besarnya arus pengasutan motor dan durasi pada saat terjadi pengasutan motor. Dengan banyaknya motor induksi khususnya di tegangan menengah maka pemilihan tipe kurva sangat berperan penting dalam sistem koordinasi proteksi, sehingga perlu dilakukan pemilihan yang selektif dalam menentukan tipe kurva pada relay arus lebih [7]-[8]. Dalam

penelitian yang dilakukan sebelumnya dimana tidak dilakukannya optimasi dalam menentukan tipe kurva, sehingga tipe kurva di setiap relay diasumsikan sama atau hanya memilih salah satu jenis tipe kurva pada relay arus lebih. Dengan tidak mempertimbangkan karakteristik beban sebagai batasan dalam melakukan koordinasi proteksi dan pemilihan tipe kurva diasumsikan sama di setiap relaynya maka hal ini juga yang bisa menyebabkan salah satu terjadinya *malfunction trip* pada sistem proteksi, dimana dengan tidak adanya pemilihan jenis kurva yang tepat maka akan dihasilkan t_{op} yang tidak sesuai dengan yang diharapkan. Hal ini yang perlu dilakukan pengkajian lebih mendalam, Oleh sebab itu dalam penelitian ini dipilih PT Pupuk Kujang Cikampek sebagai object penelitian agar dapat menyelesaikan permasalahan tersebut, dikarenakan dalam sistem kelistrikan disini memiliki bermacam jenis beban yang lebih bervariasi dan memiliki level tegangan yang berbeda di setiap busnya.

Untuk mendapatkan koordinasi yang selektif dan akurat dalam melokalisir gangguan diperlukan setting parameter yang sesuai. Oleh sebab itu penentuan TDS dan pemilihan tipe kurva dalam penelitian ini diharapkan dapat mempertimbangkan *load characteristic* pada sistem kelistrikan yang dilakukan sebagai object penelitian. Sehingga harapan dari peneliti ini adalah untuk mendapatkan nilai TDS dan pemilihan tipe kurva yang optimal sehingga didapatkan sistem koordinasi proteksi yang handal dan selektif,

1.2 Rumusan Masalah

Koordinasi sistem proteksi merupakan salah satu skenario pengamanan yang ditetapkan pada sistem kelistrikan. Suatu sistem dikatakan terkoordinasi dengan baik ketika gangguan yang terjadi dapat diisolasi secara akurat dan terantisipasi oleh breaker backup. Permasalahan yang dihadapi tesis ini adalah menentukan setting parameter pada relay arus lebih. Secara khusus, topik permasalahan yang akan diselesaikan pada tesis ini adalah pengoptimalan untuk penentuan TDS dan tipe kurva pada relay arus lebih dengan mempertimbangkan jenis beban dan manuver operasi. Metode optimasi yang akan dilakukan dalam penelitian ini akan menggunakan *Adaptived Modified Firefly Algorithm* (AMFA) dengan tujuan untuk meminimalkan waktu operasi relay dan dapat memudahkan pengguna dalam menentukan nilai TDS dan tipe kurva.

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah maka tujuan yang ingin dicapai dalam tesis ini adalah :

1. Melakukan pemodelan, simulasi, dan analisa sistem koordinasi dengan mempertimbangkan batasan – batasan praktis yang digunakan untuk terciptanya sistem koordinasi yang handal
2. Menentukan suatu algoritma koordinasi proteksi berbasis *firefly algorithm* yang bersifat adaptif
3. Mendapatkan setting parameter relay arus lebih (TDS, Tipe kurva, t_{op} dan I_p) pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang Cikampek

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tesis ini adalah:

1. Hanya mengamati plant dari PT. Pupuk Kujang Cikampek dan terpusat di sistem radial aktif pada plant tersebut.
2. Tidak mempertimbangkan besaran arus hubung singkat di tegangan rendah
3. Metode yang digunakan adalah *Firefly Algorithm*
4. Jenis beban yang digunakan adalah motor induksi
5. Relay yang akan di optimasi adalah relay arus lebih dengan kode ANSI 51 (*Inverse Relay*)

1.5 Kontribusi

Relevansi dan manfaat yang didapat dari tesis ini adalah:

1. Dapat menyelesaikan permasalahan koordinasi proteksi dalam penentuan nilai TDS dan tipe kurva dengan batasan load karakteristik dan manuver operasi .
2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan sebelumnya [5]- [6] hanya melakukan penentuan nilai TDS saja tanpa mempertimbangkan tipe kurva pada rele arus lebih, sehingga penelitian ini akan melakukan penentuan TDS dan tipe kurva pada rele arus lebih.
3. Memperdalam penelitian tentang optimasi koordinasi proteksi dengan batasan – batasan nyata dalam dunia industri.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Dalam sistem tenaga listrik, keandalan suatu sistem dapat dilihat dari perancangan sistem proteksi yang baik. Sistem proteksi dikatakan baik dan handal jika sistem proteksi dapat mengantisipasi dan mengatasi gangguan pada sistem tenaga listrik. Fungsi utama sistem proteksi dan koordinasinya adalah membatasi durasi kejadian gangguan yang disebabkan kesalahan manusia, kegagalan peralatan dan dapat mengisolir gangguan agar tidak terjadinya *total black out* pada sistem. Selain itu, fungsi lain dari sistem proteksi adalah meminimalkan kerusakan pada peralatan yang terkena imbas gangguan listrik.

Untuk merancang maupun menganalisis sistem proteksi dan koordinasinya pada sistem kelistrikan dibutuhkan pengetahuan mengenai tipe-tipe gangguan, metode perhitungan gangguan, serta cara melakukan koordinasi. Demi mempermudah perhitungan dengan jumlah parameter yang sangat banyak, maka dilakukan metode optimasi perhitungan untuk menentukan nilai parameter yang diinginkan.

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Penelitian ini merujuk pada penelitian sebelumnya [5] dimana dalam penelitian ini peneliti melakukan optimasi koordinasi sistem proteksi pada relay arus lebih untuk mendapatkan kehandalan koordinasi dan t_{op} yang paling minimum. Batasan dari penelitian ini adalah *Coordination Time Interval (CTI)* dimana nilai dari CTI pada sistem koordinasi relay 0.2 – 0.4 s. Untuk mempermudah perhitungan variable dalam menentukan t_{op} maka peneliti menggunakan metode AMFA (*Adaptive Modified Firefy Algorithm*) untuk mendapatkan t_{op} dan I_p . Analisa hasil pada penelitian ini juga dibandingkan dengan metode yang lainnya seperti FA (*Firefly Algorithm*), *Modified Firefly Algorithm* dan PSO (*Particle Swam Optimization*). Dan metode AMFA dibandingkan dengan metode lainnya memiliki kecepatan dalam menemukan konvergensi dalam proses perhitungan t_{op} dan I_p , dan juga mendapatkan hasil t_{op} yang paling optimum dibandingkan dengan metode yang lainnya.

Pada penelitian sebelumnya [6] juga dilakukan optimasi dengan metode yang sama menggunakan metode AMFA untuk menentukan nilai TDS tanpa melihat karakteristik tipe kurva pada relay. Pada penelitian ini peneliti tidak melakukan optimasi untuk nilai I_p dikarenakan nilai dari I_p tidak berubah jika pada suatu sistem kelistrikan jika memiliki beban yang sama. Sehingga dalam tesis ini akan digunakan metode AMFA dalam penentuan nilai TDS dan tipe kurva relay arus lebih dengan mempertimbangkan *load characteristic* dan manuver operasi.

2.2 Gangguan Arus Lebih

Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik sangatlah beragam besaran dan jenisnya. Gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah keadaan yang tidak normal dimana keadaan ini dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Jenis gangguan yang sering terjadi dalam sistem tenaga listrik adalah gangguan yang disebabkan karena terjadinya aliran arus yang berlebih. Kejadian ini dapat disebabkan oleh dua hal yaitu hubung singkat dan daya beban yang berlebih. Daya beban berlebih sebenarnya bukan merupakan gangguan murni, tetapi bila dibiarkan terus menerus berlangsung dapat merusak peralatan listrik yang dialiri arus tersebut. Pada saat gangguan ini terjadi arus yang mengalir melebihi dari kapasitas peralatan listrik dan pengamanan yang terpasang.

Hubung singkat dapat disebabkan dari faktor *external* dan *internal*, faktor *external* sering terjadi akibat dari *human error*. Faktor *internal* sering terjadi yang diakibatkan terjadinya penurunan kekuatan isolasi suatu penghantar sehingga dapat menimbulkan kegagalan isolasi. Kegagalan isolasi dapat diakibatkan beberapa hal seperti :

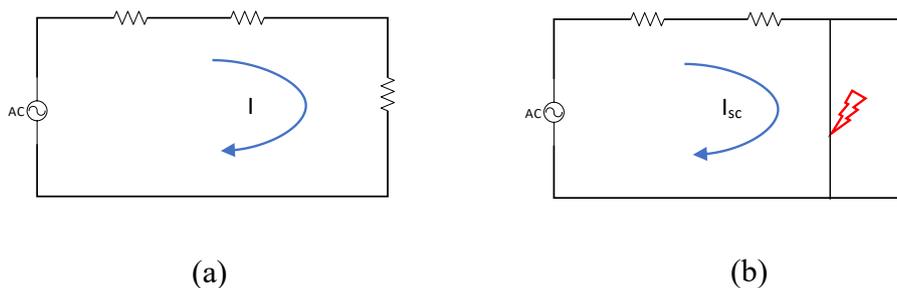
1. Penurunan mutu dan kualitas yang diakibatkan karena polusi oleh debu (*dust*), jelaga (*soot*), dan debu korosif.
2. Tersambar petir yang diakibatkan karena tidak cukup diamankan oleh alat pengamanan petir.
3. Terpaparnya panas yang berlebih, kelembapan maupun kerusakan mekanis.

Gangguan hubung singkat dapat terjadi karena hubung singkat antar dua fasa (*line to line fault*), hubung singkat 3 fasa (*three phase fault*), dan hubung singkat 1 fasa ke tanah (*single phase to ground fault*). Hubung singkat yang paling

sering terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah. Gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi 2 kelompok yaitu gangguan hubung singkat simetris dan gangguan hubung singkat tak simetris. Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak mengalami gangguan. Gangguan yang termasuk dalam hubung singkat simetri adalah gangguan hubung singkat 3 fasa (*three phase fault*), sedangkan gangguan yang lain merupakan gangguan hubung singkat tak simetris.

2.3 Metode Perhitungan Arus Hubung Singkat

Berdasarkan [9], hubung singkat atau *short circuit* adalah gangguan yang terjadi yang dikarenakan terjadinya kontak konduktor baik disengaja ataupun tidak disengaja yang melalui hambatan atau impedansi yang rendah antara dua atau lebih titik yang dalam keadaan normalnya mempunyai beda potensial. Berdasarkan [10], arus listrik merupakan suatu aliran yang terjadi yang diakibatkan adanya beda potensial pada suatu impedansi dalam sebuah sistem. Sehingga total arus yang mengalir pada sistem adalah sumber tegangan dibagi dengan total impedansi sistem, hal ini dapat dilihat pada gambar 2.1(a). Akan tetapi, pada kejadian hubung singkat, dapat dimisalkan suatu impedansi mengalami hubung singkat akibat terdapat sebuah konduktor yang dipasang secara parallel dengan impedansi tersebut (gambar 2.1(b)).



Gambar 2.1 Kondisi arus dalam keadaan normal (a) dan saat hubung singkat (b)

Karena pada kondisi terjadinya gangguan hubung singkat terdapat pengurangan impedansi, sehingga besaran nilai impedansi menjadi lebih rendah maka arus hubung singkat yang terjadi akan lebih besar daripada arus normal.

Selain itu, perubahan kondisi sistem dari normal menjadi hubung singkat terjadi dengan sangat cepat, akan tetapi sistem pada umumnya yang bersifat induktif tidak dapat mengalami perubahan arus secara seketika. Kejadian hubung singkat dibagi kedalam beberapa periode yaitu: *sub-transient* (0,5 cycle), *transient* (1,5-4 cycle), dan *steady state*. Pembagian durasi hubung singkat ini dikarenakan adanya komponen reaktansi yang berbeda. Selanjutnya fungsi pembagian durasi tersebut dapat digunakan sebagai data untuk menentukan kapasitas *circuit breaker* (CB) maupun setting relay.

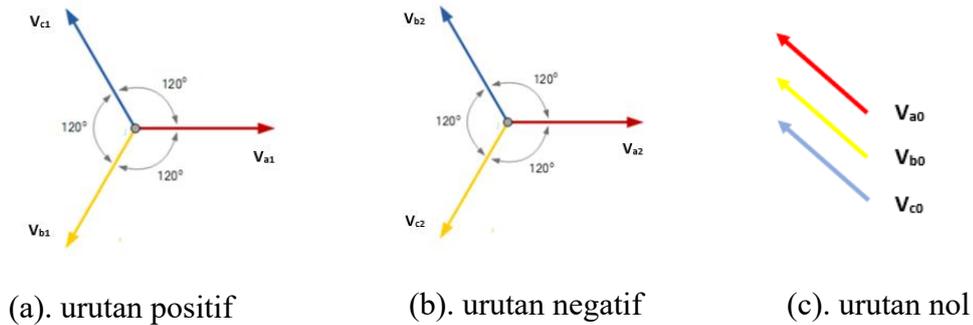
Analisa gangguan hubung singkat dilakukan berdasarkan kesimetrisan gangguan yang terjadi. Analisa gangguan hubung singkat dapat dilakukan pada keadaan simetris. Pada gangguan tak simetris perlu dilakukan metode komponen simetris untuk melakukan analisa hubung singkat.

2.3.1 Komponen simetri

Komponen simetris digunakan untuk menganalisa terutama sistem yang tidak seimbang, seperti saat terjadinya hubung singkat dua fasa, dua fasa ke tanah dan satu fasa ke tanah. Dimana sebuah sistem tak seimbang diubah menjadi tiga rangkaian persamaan yaitu rangkaian urutan positif, urutan negative, dan urutan nol. Tiga fasor tak seimbang dari sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga sistem fasor yang seimbang. Himpunan komponen seimbang itu adalah sebagai berikut [11] :

- Komponen urutan positif, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan terpisah satu dengan yang lainnya dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya.
- Komponen urutan negatif, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan terpisah satu dengan yang lainnya dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya.
- Komponen urutan nol, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lainnya.

Tujuan lain adalah untuk memperlihatkan bahwa setiap fasa dari sistem tiga fasa tak seimbang dapat dipecah menjadi tiga komponen. Dibawah ini merupakan vector diagram untuk komponen urutan positif (a) , komponen urutan negatif (b) , dan komponen urutan nol (c).



Gambar 2.2 Vektor diagram komponen simetris

Komponen simetris berpengaruh terhadap besarnya impedansi saluran. Impedansi saluran suatu sistem tenaga listrik tergantung dari jenis konduktornya, besar kecilnya penampang konduktor dan panjang saluran yang digunakan. Komponen simetris menyebabkan tegangan jatuh sesuai dengan urutan arusnya dan tidak mempengaruhi urutan arus lainnya, sehingga tiap urutan yang seimbang akan terdiri dari suatu jaringan. Ketidakseimbangan arus atau tegangan ini akan menimbulkan pula impedansi urutan positif, urutan negatif , dan urutan nol. Didalam metode komponen simetris dikenal tiga macam impedansi urutan sebagai berikut[11] :

- Impedansi urutan positif (X_1) , adalah impedansi tiga fasa simetris yang terukur bila dialiri oleh arus urutan positif.
- Impedansi urutan negatif (X_2), adalah impedansi tiga fasa simetris yang terukur bila dialiri oleh arus urutan negatif.
- Impedansi urutan nol (X_0), adalah impedansi tiga fasa simetris yang terukur bila dialiri arus urutan nol.

2.3.2 Hubung Singkat Tiga Phasa (*three phase fault*)

Gangguan hubung singkat tiga phasa termasuk dalam klasifikasi gangguan simetris, dimana arus maupun tegangan setiap phasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Sehingga pada sistem seperti ini dapat dianalisa hanya dengan menggunakan komponen urutan positif. Hubung singkat tiga phasa dapat terjadi jika seluruh phasa terhubung menjadi suatu titik. Dalam sistem kelistrikan, kemungkinan kejadian ini sebesar 5%, dikarenakan gangguan ini jarang terjadi, bisa dikatakan gangguan hubung singkat 3 phasa terjadi salah satunya yang diakibatkan karena *human error*. Nilai arus kejadian hubung singkat ini merupakan yang paling besar yang dapat diformulasikan melalui persamaan berikut [12]:

$$I_{SC\ 3\phi} = \frac{V_{LN}}{X_1} \quad (2.1)$$

Dimana :

V_{LN} : tegangan *line to neutral*
 X_1 : reaktansi urutan positif



Gambar 2.3 Hubung singkat 3 phasa serta pemodelannya

2.3.3 Hubung Singkat Tak Simetris

1. Hubung singkat dua phasa (*line to line fault*)

Pada hubung singkat antar phasa, arus pada saluran tidak mengandung urutan nol dikarenakan tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah. Gangguan ini dapat terjadi jika line phasa dengan phasa bertemu dalam suatu titik dan mengakibatkan arus hubung singkat. Pada kondisi real hubung singkat dua phasa memiliki persentase kejadian sebesar 15%. Nilai hubung singkat dua phasa ini sering disebut dengan arus hubung singkat minimum karena banyaknya jumlah impedansi yang berpengaruh [12]:

$$I_{SC\ 2\phi} = \frac{V_{LL}}{X_1 + X_2} \quad (2.2)$$

Dimana :

V_{LL} : tegangan *line to line*

X_1 : reaktansi urutan positif

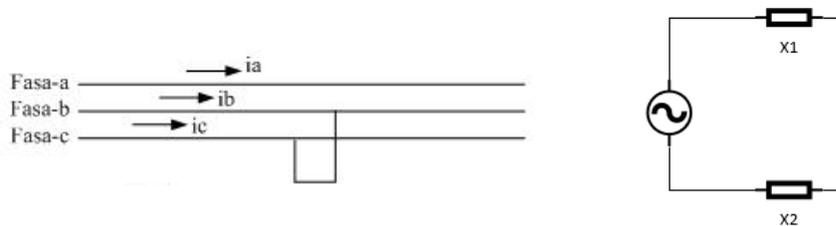
X_2 : reaktansi urutan negatif.

Jika X_1 sama dengan X_2 maka dapat diperoleh:

$$I_{SC\ 2\phi} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{LN}}{2 \cdot X_1} \quad (2.3)$$

Mengacu pada persamaan (2.1), maka:

$$I_{SC\ 2\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{SC\ 3\phi}$$



Gambar 2.4 Hubung singkat antar fasa serta pemodelannya

1. Hubung singkat dua fasa ke tanah (*line line to ground*)

Hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi jika dua buah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat ke tanah. Nilai arus hubung singkat ini dapat diformulasikan sebagai berikut [12] :

$$I_{SC\ 2\phi G} = \frac{3V_{LN} \times X_2}{X_1 X_2 + X_0 (X_1 + X_2)} \quad (2.4)$$

Dimana :

V_{LN} : tegangan *line to netral*

X_1 : reaktansi urutan positif

X_2 : reaktansi urutan negatif

X_0 : reaktansi urutan nol



Gambar 2.5 Hubung singkat dua fasa ke tanah serta pemodelannya

2. Hubung singkat phase ke tanah (*line to ground fault*)

Kejadian hubung singkat yang paling sering terjadi pada sistem kelistrikan dengan persentase sebesar 80%. Hubung singkat ini terjadi saat salah satu phase terhubung dengan tanah baik melalui body peralatan maupun sentuhan dengan peralatan lain (disebut juga sebagai ground fault). Untuk menghitung nilai arus yang mengalir dapat digunakan persamaan berikut[12]:

$$I_{SC\ 1\phi} = \frac{3 \times V_{LN}}{X_1 + X_2 + X_0 + Z_0} \quad (2.5)$$

Dimana :

Z_0 : impedansi ke tanah

V_{LN} : tegangan *line to netral*

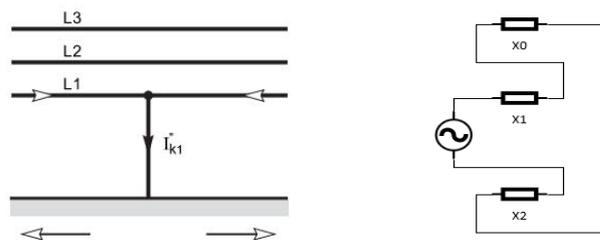
X_1 : reaktansi urutan positif

X_2 : reaktansi urutan negatif

X_0 : reaktansi urutan nol

Apabila nilai Z_0 minimum (mendekati nol), dan X_1 sama dengan X_2 dan X_0 , maka dapat disimpulkan:

$$I_{SC\ 1\phi} = \frac{V_{LN}}{X_1} = I_{SC\ 3\phi} \quad (2.6)$$



Gambar 2.6 Hubung singkat phase ke tanah serta pemodelannya

2.4 Koordinasi Proteksi

Dalam sistem tenaga listrik koordinasi proteksi berperan penting untuk menjaga kestabilan dan kehandalam sistem tenaga listrik. Dengan koordinasi proteksi yang handal dan selektif kontinuitas sistem dapat terjaga dengan baik.

Koordinasi proteksi sistem kelistrikan dengan parameter arus adalah untuk menentukan karakteristik, rating, dan setting dari peralatan pengaman arus lebih yang berfungsi untuk menghindari ataupun mengurangi kerusakan peralatan yang diakibatkan karena gangguan. Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan maka akan semakin sedikit pengaruh gangguan kepada kemungkinan kerusakan alat. Selain itu koordinasi proteksi juga memiliki fungsi yang tak kalah penting adalah untuk melokalisasi luas daerah yang mengalami gangguan menjadi sekecil mungkin. Peralatan pengaman arus lebih bekerja dengan bagian primer dan backup. Bagian primer merupakan barisan pertama dalam menanggulangi kerusakan akibat gangguan. Tentu saja pada bagian primer, diperlukan peralatan yang bekerja lebih cepat dan apabila gagal akan ditanggulangi oleh peralatan backup.

2.4.1 Pengaturan Arus Pickup

Relay arus lebih merupakan jenis relay proteksi yang bekerja berdasarkan prinsip besarnya arus input yang masuk ke dalam peralatan sensing relay. Apabila besaran arus yang masuk melebihi harga arus yang telah disetting (I_p) sebagai standart kerja relay tersebut. Sehingga arus pickup (I_p) memiliki arti sebagai nilai minimum arus yang mengalir sebelum perangkat memulai tindakan. Dengan kata lain prinsip kerja relay arus lebih adalah sebagai berikut:

Jika $I_f \geq I_p$, maka relay mengirimkan sinyal trip

Jika $I_f < I_p$, maka relay tidak bekerja

Dimana :

I_f : Arus gangguan

I_p : Arus pickup

Batas dalam menentukan arus pickup pada relay sebagai pelindung dari beban lebih adalah [10]:

$$1,05 \text{ FLA} < I_p < 1,4 \text{ FLA} \quad (2.7)$$

Sementara untuk batas penentuan arus pickup pada relay sebagai pelindung kejadian hubung singkat, menggunakan arus hubung singkat pembangkitan minimum I_{sc} 2 phasa [10]:

$$1,6 \text{ FLA} < I_p < 0,8 \text{ I}_{sc} \text{ Min} \quad (2.8)$$

Dimana FLA adalah Full Load Ampere yang berarti arus yang mengalir pada beban sesuai daya maksimum dan $I_{sc} \text{ Min}$ adalah arus hubung singkat minimum (ISC 2Ø) dalam durasi steady state (30 cycle).

2.4.2 Time Current Characteristic

Suatu kurva TCC (Time Current Characteristic) berguna untuk menunjukkan waktu kerja operasi peralatan proteksi berdasarkan besaran arus yang mengalir. Kurva TCC juga digunakan sebagai panduan perancangan dalam membuat suatu skema koordinasi proteksi. Dalam hal ini berguna untuk mengetahui apakah terdapat kurva yang bersinggungan dengan kurva yang lain. Relay arus lebih pada umumnya digambarkan dalam suatu kurva satu garis. Pada relay inverse (Kode ANSI 51) terdapat beberapa tipe kurva yang membantu dalam melakukan koordinasi. Tipe kurva ini ditentukan berdasarkan persamaan berikut [13](IEC Standard)

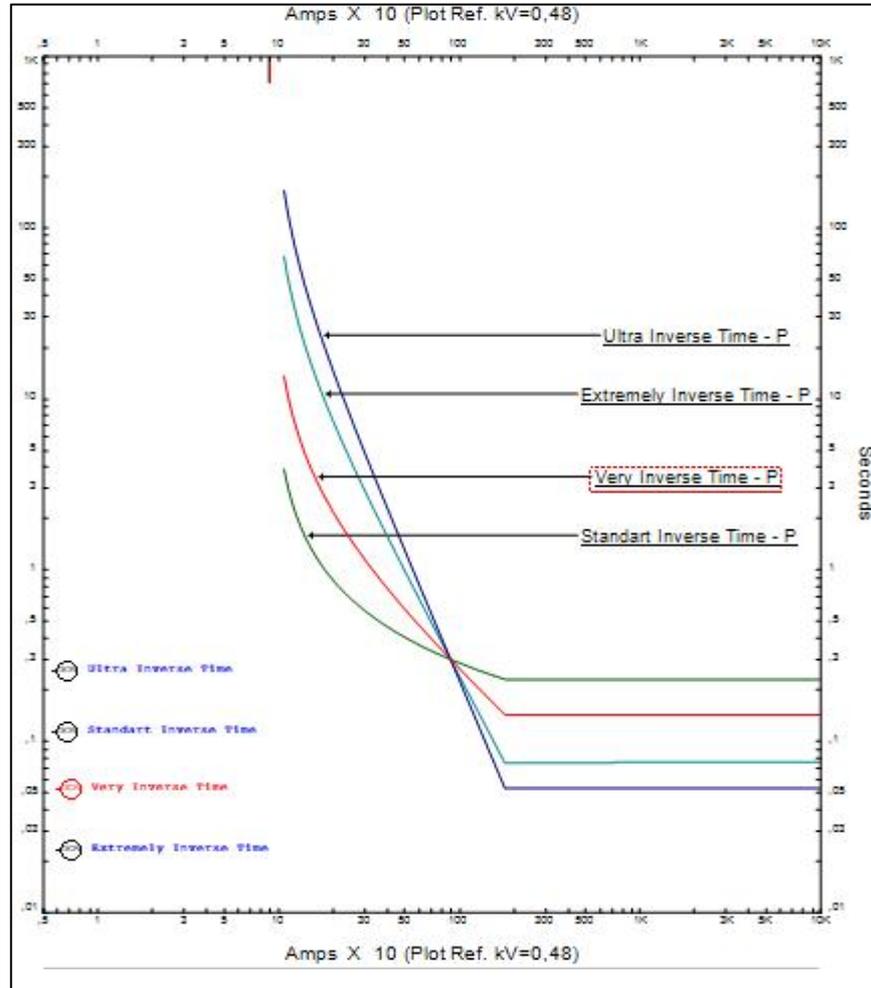
$$t_{op} = \frac{k \times TDS}{\left(\left(\frac{I}{I_p}\right)^\alpha - 1\right)^\beta} \quad (2.9)$$

Dimana t_{op} adalah waktu kerja operasi relay, TDS adalah Time Dial Setting, I adalah arus pada keadaan t_{op} dan I_p adalah arus pickup untuk perlindungan beban lebih. Persamaan (2.9) juga disusun dengan beberapa koefisien yang dilampirkan sebagai berikut [13] :

Tabel 2.1 Koefisien Kurva Relay Inverse Standard IEC

Curve Type	k	α	β
<i>Long Time Inverse</i>	120	1	13,33
<i>Standart Inverse</i>	0,14	0,02	2,97
<i>Very Inverse</i>	13,5	1	1,5
<i>Extremely Inverse</i>	80	2	0,808
<i>Ultra Inverse</i>	315,2	2,5	1

Dalam kurva TCC, perbedaan parameter koefisien dapat digambarkan sebagai berikut:



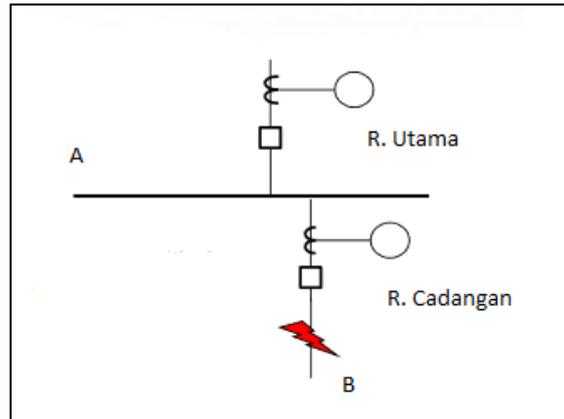
Gambar 2.7 Tipe Kurva Relay dengan Parameter Identik

Pengaruh penentuan TDS pada persamaan 2.9 akan mempengaruhi waktu operasi relay, nilai TDS yang semakin besar akan memperlama waktu operasi relay dan semakin kecil akan mempercepat waktu operasi relay.

2.4.3 Clearing Time Interval (CTI)

CTI adalah interval waktu antar relay yang diizinkan antara relay utama dan relay cadangan[14]. Tanpa adanya interval antar relay, peralatan pengaman mungkin bekerja secara tidak tepat dan dapat memutus aliran daya ke lokasi yang tidak mengalami gangguan. Fungsi kerja CTI dalam dilihat pada gambar 2.8, Jika terjadi gangguan pada area B, maka relay utama utama merasakan, mengoperasikan

& menghapus kesalahan terlebih dahulu. Relay cadangan bekerja menunggu waktu yang cukup untuk memungkinkan pengoperasian relay utama.



Gambar 2.8 Pemodelan CTI pada relay arus lebih

Pada kurva arus dan waktu (TCC), selain memperhatikan koordinasi dengan tidak mentolerir adanya kurva relay yang berpotongan, perlu diperhatikan juga durasi tunggu antar relay. Dengan peralatan yang modern, durasi tunggu antar relay dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti cara kerja relay, overtravel relay, dan toleransi error. Secara ringkas, batasan CTI dapat ditinjau sebagai berikut [10]:

Tabel 2.2 Clearing Time Interval Relay

<i>Relay Operation</i>	<i>Relay Type</i>	
	<i>Electromechanical</i>	<i>Static</i>
<i>CB Opening Time</i>	0,08 s	0,08 s
<i>Relay Overtravel</i>	0,10 s	0,00 s
<i>Relay tolerance & setting errors</i>	0,12 s	0,12 s
<i>CTI Totals</i>	0,30 s	0,20 s

2.5 Batasan – Batasan Praktis Kelistrikan Industri

2.5.1 Decrement Curve

Decrement Curve merupakan kurva yang merepresentasikan arus gangguan yang ditimbulkan dari sebuah generator jika terjadi hubung singkat 3 phasa yang terjadi di terminal generator tersebut [15]. Kurva ini memiliki tujuan sebagai acuan dalam memberikan informasi dari *thermal generator limit*. Arus Hubung singkat ini dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut [16] :

$$i_{ac} = (id'' - id')e^{\frac{-t}{T_d''}} + (id' - id)e^{\frac{-t}{T_d'}} + id \quad 2.10$$

$$i_{dc} = \sqrt{2} \cdot id'' \cdot e^{\frac{-t}{T_a}} \quad 2.11$$

$$E'' = Va + Xd'' \sin\theta$$

$$E' = Va + Xd' \sin\theta$$

$$E = \frac{Va}{Xd} * \frac{If}{Ifg}$$

$$id'' = \frac{E''}{Xd''} \quad 2.11$$

$$id' = \frac{E'}{Xd'} \quad 2.12$$

$$id = \frac{E}{Xd} \quad 2.13$$

$$i_{total} = (i_{ac}^2 + i_{dc}^2)^{1/2} \quad 2.15$$

Dimana :

i_{ac} adalah total ac komponen dari *armature current*

id'' adalah komponen subtransient dari *armature current*

id' adalah komponen transient dari *armature current*

id adalah komponen *steady-state* dari *armature current*

i_{dc} adalah total komponen dc dari *armature current*

i_{total} adalah total rms *asymmetrical* dari *armature current*

e_t adalah tegangan terminal generator (V pu)

Xd'' adalah reaktansi subtransient

Xd' adalah reaktansu transient

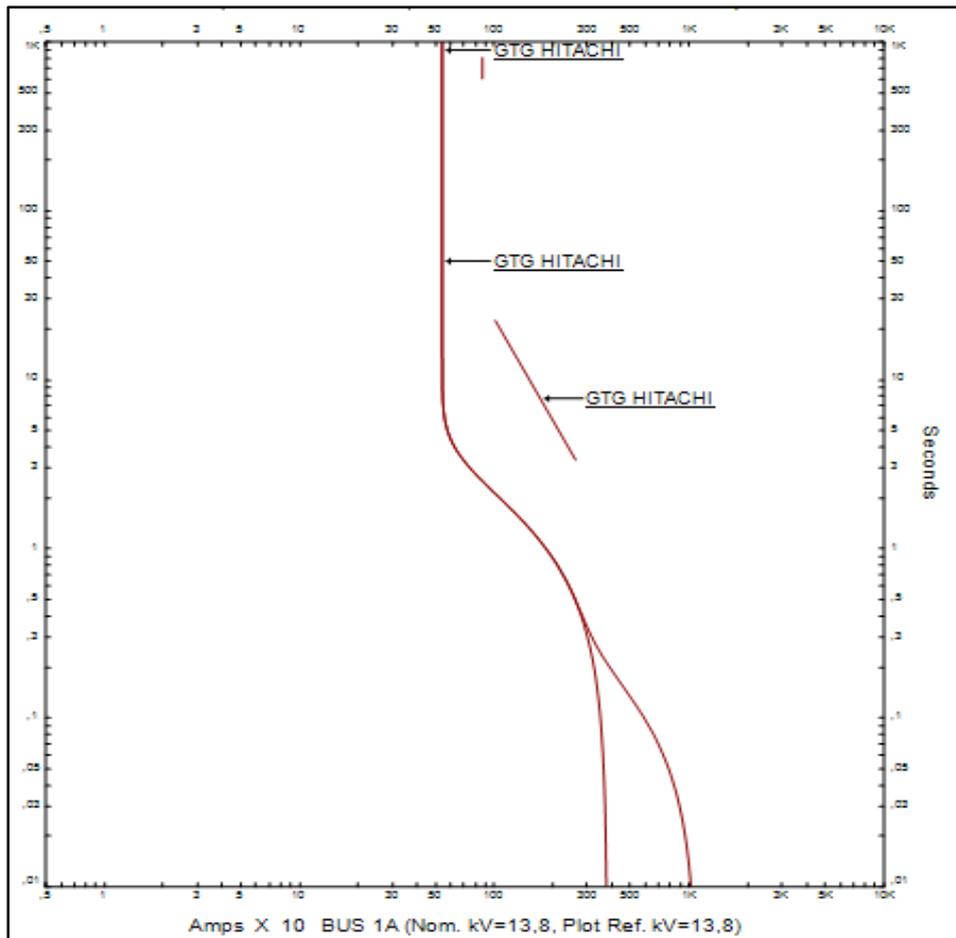
Xd adalah *synchronous* transient

Td'' adalah subtransient *short circuit time constant*

Td' adalah transient *short circuit time constant*

Ta adalah *armature short circuit time constant*

Decrement Curve sangat diperlukan sebagai batasan untuk melakukan koordinasi sistem proteksi, sehingga dengan adanya kurva ini kita bisa mengetahui besaran arus hubung singkat yang diberikan oleh pembangkit kita baik *gas turbine*, *steam turbine generator* dan mempermudah kita dalam mengetahui batasan dalam melakukan *setting* pada suatu relay.



Gambar 2.9 Decrement Curve Generator 18 Mva

2.5.2 Damaged Curve

Damaged Curve pada peralatan sistem tenaga listrik merupakan informasi yang ditujukan untuk mengetahui batas kemampuan dari peralatan listrik jika terjadi gangguan arus hubung singkat atau arus yang berlebih dalam satuan waktu. Penentuan kurva ketahanan pada kabel bertujuan untuk memberikan informasi dasar tentang kurva kerusakan isolasi pada kabel. Pada kabel terdapat *ampacity* konduktor dimana pengertian dari *ampacity* merupakan batasan arus dari kapasitas kerja suatu kabel jika dialiri arus secara terus menerus. Jika kabel dilaliri arus yang memiliki nilai diatas dari *ampacity* kabel secara terus menerus maka isolasi yang terdapat pada kabel akan mengalami kerusakan. Untuk konduktor listrik yang memiliki isolasi memiliki temperature berdasarkan peletakan kabel tersebut, jika diletakkan pada *cable tray* terbuka maka memiliki temperature kerja pada 40°C dan jika diletakkan di dalam tanah maka temperature kerja pada 20°C [10].

Tabel 2.3 Batasan Temperature Operasi Kabel [10]

Type	Voltage	Short Circuit	Emergency	Normal
		0.01 < t < 10 S	10 s < t < 1-6 hrs	t>1-6 hrs
TW	600 V	150° C	85° C	60° C
THWN	600 V	150° C	90° C	75° C
THHN	600 V	150° C	105° C	90° C
XLPE	5 - 15 kV	250° C	130° C	90° C
EPR	5 - 15 kV	250° C	130° C	90° C

Tabel 2.4 K-Factor Konduktor[10]

Cable Size	K Factor			
	Air		UG Duct	Direct Buried
	No Conduit	Conduit		
< #2 AWG	0.33	0.67	1	1.25
#2 - 4/0 AWG	1	1.5	2.5	3
> 4/0 AWG	1.5	2.5	4	6

Tabel 2.5 Emergency overload current pada 40°C[10]

Time	Percent Overload					
	K=0.5	K=1	K=1.5	K=2.5	K=4	K=6
	EPR-XLP	T _n = 90° C		T _E = 90° C		
10	1136	1602	1963	2533	3200	3916
100	374	518	629	807	1018	1244
1000	160	195	226	277	339	407
10000	126	128	132	140	152	168
18000	126	127	128	131	137	147
	THH	T _n = 90° C		T _E = 105° C		
10	725	1020	1248	1610	2033	2487
100	250	338	407	518	651	794
1000	127	146	163	192	229	270
10000	111	112	114	118	124	131
18000	111	111	112	113	116	121
	THW	T _n = 75° C		T _E = 95° C		
10	987	1390	1703	2197	2275	3396
100	329	452	548	702	884	1080
1000	148	117	202	245	298	357
10000	121	123	125	132	142	154
18000	121	121	122	125	130	137

Pada *transformator* juga memiliki kurva ketahanan yang dikategorikan berdasarkan dari kapasitas yang digunakan [17]. Pembacaan *Damaged Curve* pada kurva TCC memberikan informasi jika terdapat arus lebih ataupun hubung singkat yang melewati kurva tersebut maka akan terjadi kerusakan isolasi bahkan kerusakan pada peralatan tersebut. *Damage Curve* pada pada peralatan tidak direkomendasikan dilakukan pengujian untuk menguji ketahan peralatan tersebut dikarenakan dapat mempengaruhi *life time* dari peralatan tersebut [18]. *Damaged Curve* biasanya sudah disediakan oleh engineer dari produsen atau pabrikan dalam bentuk data sheet.

Tabel 2.6 Kategori Trafo Rating [17]

Category	Single Phasa (kVa)	Three Phasa (kVa)
I	5 - 500	15 - 500
II	501 - 1667	501 - 5000
III	1668 - 10000	5001 - 30000
IV	Above 10000	Above 30000

Tabel 2.7 *Thermal Damage* trafo category II

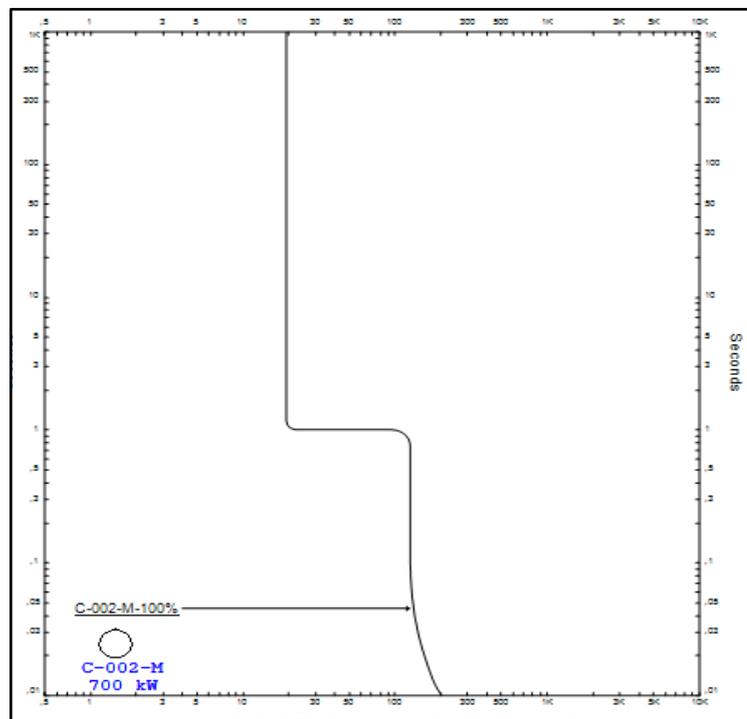
x Rated Current (A p.u.)	Time (sec.)	I ² t (A p.u.-sec.)
2	1800	7200
3	300	2700
4.75	60	1354
6.3	30	1191
11.3	10	1277
25	2	1250

2.5.3 *Motor Starting Curve*

Motor Induksi sangat banyak di ditemukan dalam sistem kelistrikan industri, baik industri pupuk, minyak bumi dan pembangkit listrik. Mayoritas semua industri banyak memanfaatkan motor induksi sebagai penggerak dalam menjalankan proses bisnisnya. Sehingga kapasitas motor induksi yang digunakan bermacam-macam dari kapasitas kecil hingga memiliki kapasitas yang besar. Dalam penggunaan motor induksi dalam ukuran kapasitas yang besar sangat perlu

diperhatikan untuk sistem proteksinya, baik proteksi untuk motor induksi itu sendiri dan sistem proteksi pada sistem jaringan.

Starting Curve pada motor induksi menjelaskan saat pengasutan pada motor dimulai, motor induksi menarik arus yang lebih besar dari kapasitas rating motor dalam waktu yang tertentu hingga mencapai pada kecepatan nominalnya[19]. Arus motor akan mengalami penurunan seiring terjadinya kenaikan kecepatan pada motor tersebut. Sehingga *Starting Curve* pada motor sangat diperlukan sebagai pengawasan pada saat *start-up* karena pada saat itu *thermal stress* yang dihasilkan sangatlah tinggi sehingga dengan adanya *Starting Curve* motor kita dapat melakukan pengawasan serta pengaman yang tepat. Selain itu *Starting Curve* juga dapat digunakan sebagai batasan dalam sistem koordinasi proteksi listrik. Sehingga pemilihan tipe kurva pada relay arus lebih perlu memperhatikan *Starting Curve* pada motor yang dilindungi agar tidak terjadi *malfunction trip* pada saat pengasutan motor dilakukan.



Gambar 2.10 *Induction Motor Starting Curve*

2.6 Firefly Algorithm

Firefly Algorithm atau Algoritma Kunang-Kunang termasuk salah satu algoritma pada bidang *Artificial Intelligence* atau kecerdasan buatan. Pada bidang AI atau kecerdasan buatan ada istilah *swarm intelligence* yang diartikan sebagai desain algoritma atau alat *problem solving* terdistribusi yang terinspirasi oleh perilaku sosial kolektif koloni serangga dan koloni binatang. Sehingga dapat

dikatakan bahwa *Firefly Algorithm* termasuk dalam salah satu kategori dari *swarm intelligence*[20]. *Firefly algorithm* adalah suatu algoritma yang terinspirasi dari perilaku kunang-kunang pada alam bebas. Kunang-kunang yang tersebar memiliki posisi dan intensitas cahaya masing-masing. Pada algoritma ini, setiap kunang-kunang dianggap *unisex* (semua kunang-kunang berjenis kelamin sama) dan ketertarikan kunang-kunang satu dengan lainnya dipengaruhi oleh intensitas cahayanya. Artinya, kunang-kunang yang lebih terang akan didekati oleh kunang-kunang yang redup.

Dalam aplikasinya, intensitas kecerahan tiap kunang-kunang dirumuskan melalui *objective function* persamaan yang akan diselesaikan. Semakin benar nilai pada kunang-kunang tersebut, maka semakin terang intensitas cahayanya. Selanjutnya, dilakukan pembaruan posisi kunang kunang yang terpengaruh oleh intensitas cahaya kunang-kunang lain. Perubahan posisi kunang-kunang dirumuskan melalui persamaan berikut[21]:

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \epsilon \quad 2.10$$

Dimana x adalah posisi kunang-kunang, i adalah posisi kunang-kunang, j adalah posisi kunang-kunang pembanding, β adalah faktor ketertarikan kunang-kunang (*attractiveness*), γ adalah faktor kemampuan penyerapan cahaya, r adalah jarak antara kunang-kunang i dan j , α adalah parameter acak (*randomization*) pergerakan kunang-kunang, dan ϵ adalah suatu vektor berisi konstanta acak yang mengacu pada Distribusi Gaussian.

Koefisien β , γ , dan α bernilai 0 sampai 1. Nilai ini β yang semakin besar akan mempercepat kunang-kunang dalam mendekati kunang-kunang lain yang lebih terang namun dengan hasil yang tidak akurat, sebaliknya jika nilainya

semakin kecil, maka perubahan posisi antar kunang-kunang akan lebih lambat, namun dengan nilai yang akurat. Sementara itu koefisien γ dapat dimisalkan sebagai kondisi cuaca saat pergerakan kunang-kunang. Semakin besar nilai γ berarti kondisi cuaca saat itu sedang berkabut yang mengakibatkan kunang-kunang tidak dapat melihat kunang-kunang yang lebih terang pada posisi yang lebih jauh, sementara jika nilai γ kecil, berarti cuaca saat tersebut dalam kondisi cerah sehingga kunang-kunang dapat melihat kunang-kunang lain walaupun kondisinya sangat jauh. Koefisien α berfungsi sebagai faktor pengali dari nilai vektor kunang-kunang. Semakin besar nilai α berarti gerakan kunang-kunang akan semakin acak dan semakin kecil nilai α berarti gerakan kunang-kunang cenderung diam.

Inisiasi program firefly algorithm dimulai dengan menentukan objective function, lalu membangkitkan populasi awal kunang-kunang yang memiliki intensitas cahaya sebanding dengan nilai fungsi objektif. Setelah itu dilakukan iterasi untuk membandingkan kecerahan kunang-kunang dengan kunang-kunang setelahnya hingga solusi baru dimunculkan. Diakhir iterasi diharapkan seluruh kunang-kunang mengerucut pada suatu nilai yang merupakan solusi terbaik.

2.6.1 Adaptive Modified Firefly Algorithm

Pada *Firefly Algorithm* parameter α memiliki peran penting dalam mengendalikan gerakan random pada *firefly* untuk mendapatkan solusi, dan umumnya mengambil nilai diantara 0 dan 1. Nilai α yang tinggi akan memiliki tingkat keakuratan yang kecil untuk mencari nilai optimal karena perpindahan random pada *firefly* menjadi terlalu lebar dan menyebabkan gerakan *firefly* tidak mengarah ke titik yang diinginkan[5]. Nilai α yang kecil di sisi lain juga akan menghasilkan tingkat konvergensi yang baik untuk perpindahan kunang-kunang menuju titik yang diinginkan. Namun, jika nilai awal dari α diatur pada nilai yang minimum, maka hampir sama dengan menghilangkan perpindahan dari *firefly*. Ini tidak diinginkan dikarenakan perpindahan secara random dapat membantu menemukan koordinasi yang lebih baik. Selain itu, mengurangi nilai α akan menghambat kemampuan untuk memperoleh hasil maksimal konvergensi karena

berkurangnya nilai iterasi maksimum, dan akan mempersulit untuk menemukan titik konvergensi. Karena itu, modifikasi nilai α secara adaptif dapat menjadi solusi untuk dapat mendapat tingkat konvergensi yang lebih baik. AMFA menjamin tingkat konvergensi yang lebih cepat dalam menemukan titik global yang optimum AMFA menurunkan pergerakan acak kunang-kunang dengan cara menerapkan faktor gerakan random α yang dikontrol secara adaptif sesuai dengan perubahan iterasi. Perubahan perpindahan secara dinamis diatur dengan cara persamaan 2.11 berikut[5]:

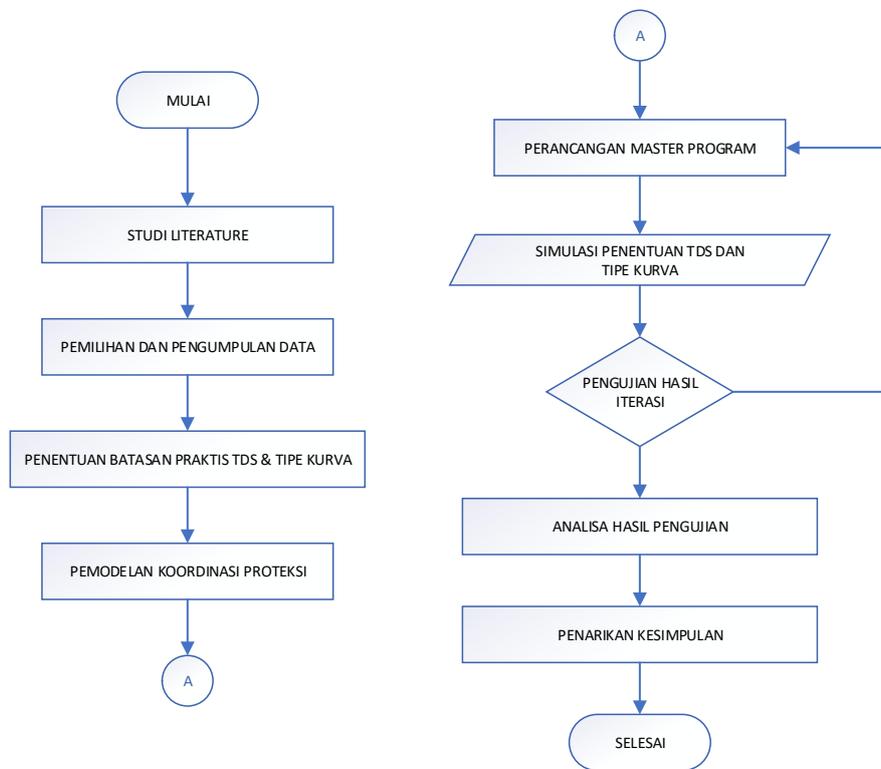
$$\alpha^{k+1} = \alpha^k x \left(\frac{1}{2} x k_{max}\right)^{\frac{1}{k_{max}+1}} \quad 2.11$$

Dimana k merupakan urutan iterasi dari pergerakan *firefly* dan k_{max} merupakan jumlah iterasi maximum.

BAB 3

METODE PENELITIAN

Penelitian tesis bertujuan untuk mendapatkan nilai setting dari *Time Dial Setting* (TDS) dan tipe kurva pada relay arus lebih sehingga diperoleh waktu operasi relay yang optimum dengan mempertimbangkan karakteristik beban. Agar tujuan tersebut tercapai, penelitian dilaksanakan berdasarkan tahapan-tahapan sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 3.1



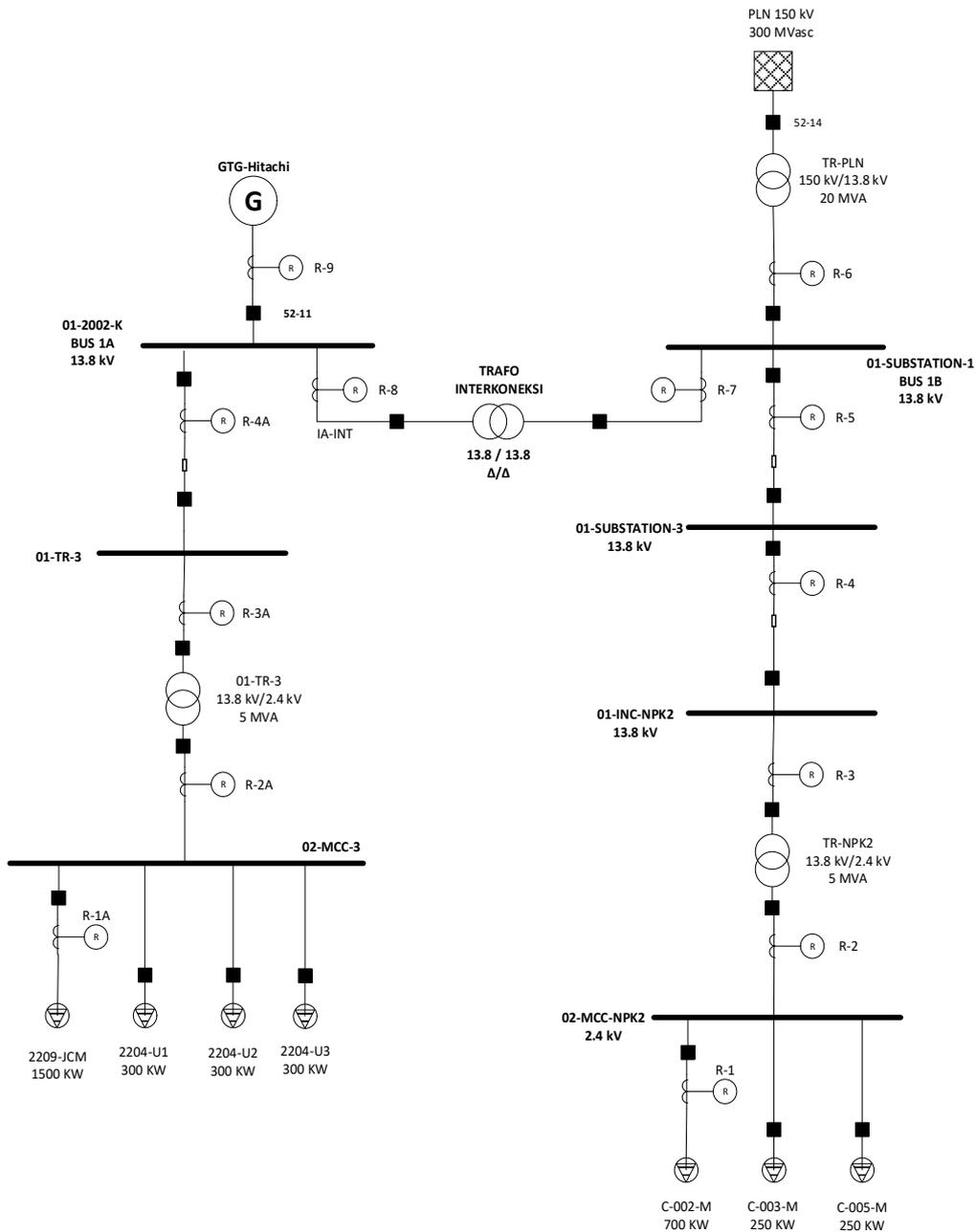
Gambar 3.1 Alur pelaksanaan penelitian

3.1 Studi Literatur

Sebagai proses awal penelitian, dicari literatur dari penelitian serupa yang telah dilakukan sebelumnya, lalu dilakukan kajian untuk mengetahui pengembangan yang dapat dilakukan serta teori yang dapat diterapkan pada tesis ini. Literatur yang dicari berkaitan dengan koordinasi proteksi pada sistem radial aktif, standar yang digunakan pada relay yang digunakan, *datasheet* relay arus lebih dan *firefly algorithm*.

3.2 Pemilihan dan Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini diperlukan pengumpulan data sebagai penunjang dalam proses penelitian yang diambil pada PT. Pupuk Kujang Cikampek. Data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah *single line diagram* pabrik, data *sheet* relay yang digunakan.



Gambar 3.2 Single Line Diagram Skema Proteksi

Tabel 3.1 Data Relay PT. Pupuk Kujang Cikampek *Case Study-1*

No	Used For	Man-ID	Relay Type	ID Tag	Lokasi	Ket
1	Motor	SE	S-40	C-002-M	NPK-2	R-1B
2	Feeder	SE	S-40	02-MCC-NPK2	NPK-2	R-2B
3	Transformer	SE	T-40	TR-NPK-2	NPK-2	R-3B
4	Feeder	SE	S-40	01-INC-NPK2	BAGGING - 1B	R-4B
5	Feeder	SE	S-40	01-INC-SS3	BAGGING - 1B	R-5
7	Feeder	SE	G-80	INC-01-PLN	SS#1	R-7
8	Synchro	SE	Mi-Com	INT-HVCB-A	K1B	R-8
9	Synchro	SE	Mi-Com	INT-HVCB-B	K1A	R-7

Tabel 3.2 Data Relay PT. Pupuk Kujang Cikampek *Case Study-2*

No	Used For	Man-ID	Relay Type	ID Tag	Lokasi	Ket
1	Motor	SE	S-40	2209-JCM	UTILITY 1A	R-1A
2	Feeder	SE	S-40	02-MCC-3	UTILITY 1A	R-2A
3	Transformer	SE	T-80	01-TR-3	UTILITY 1A	R-3A
4	Feeder	SE	T-40	01-2002K	UTILITY 1A	R-4A
5	Feeder	SE	G-80	GTG HITACHI	UTILITY 1A	R-6
6	Synchro	SE	Mi-Com	INT-HVCB-A	K1B	R-7
7	Synchro	SE	Mi-Com	INT-HVCB-B	K1A	R-8

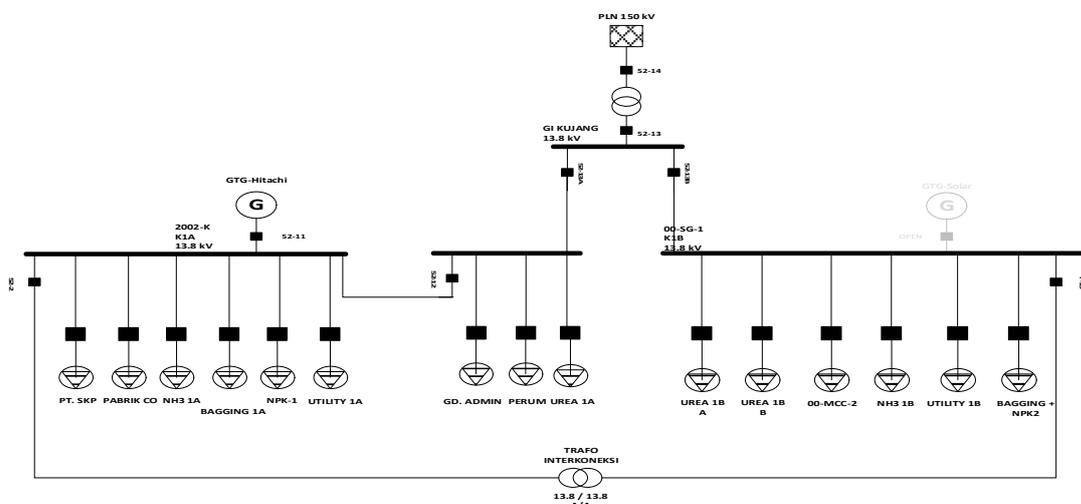
3.3 Penentuan Batasan Praktis TDS dan Tipe Kurva

Penentuan nilai TDS dapat dilakukan dengan cara melakukan perhitungan yang sesuai dengan parameter – parameter di setiap tipe kurva sesuai dengan formulasi yang telah ditentukan. Di setiap tipe kurva memiliki parameter yang berbeda sehingga untuk mendapatkan nilai t_{op} yang diinginkan masing-masing tipe kurva memiliki nilai TDS yang berbeda. TDS yang digunakan pada salah satu tipe kurva tidak dapat digunakan pada tipe kurva yang lain, hal ini disebabkan karena waktu kerja relay yang nantinya dihasilkan akan berbeda. Formulasi untuk mendapat nilai dari TDS dapat diperoleh dari standart yang digunakan di setiap pabrikan relay. Relay arus lebih yang digunakan pada PT. Pupuk Kujang memiliki standart yang sama sehingga formulasi yang digunakan untuk menentukan nilai TDS memiliki formulasi yang sama. Selain itu jumlah dari tipe kurva di setiap relay yang digunakan juga memiliki jumlah yang sama yaitu *standard inverse* (SI), *Very Inverse* (VI), *Long Time Inverse* (LTI), *Extremely Inverse* (EI), dan *Ultra Inverse*

(UI). Sistem koordinasi proteksi dikatakan terkoordinasi dengan baik jika relay dapat kerja dalam waktu yang tepat dan selektif dalam mengisolasi gangguan yang terjadi, *clearing time interval* tiap relay memenuhi persyaratan yang ditentukan dan tipe kurva yang digunakan tidak diperbolehkan berpotongan dengan kurva yang lainnya baik kurva relay maupun kurva peralatan, oleh karena itu pada penelitian ini *decrement curve*, *starting motor curve*, dan *thermal curve* digunakan sebagai batasan – batasan praktis yang digunakan dalam mengkoordinasikan relay proteksi yang berada pada PT. Pupuk Kujang Cikampek.

3.4 Pemodelan Koordinasi Proteksi

PT. Pupuk Kujang Cikampek merupakan industri pupuk yang besar dan kompleks, maka untuk menentukan peralatan proteksi yang akan dikoordinasi, perlu ditentukan tipikal beban hingga ke generator. Pada pemodelan koordinasi proteksi yang akan dilakukan adalah melakukan *initial position* pada tipe kurva relay arus lebih, setelah melakukan *initial position* pada tipe kurva kemudian penentuan nilai TDS dan tipe kurva dilakukan menggunakan algoritma yang telah ditentukan. Pemodelan koordinasi proteksi dilakukan dengan beberapa *case study* sesuai dengan pertimbangan batasan – batasan praktis yang digunakan pada penelitian ini. Salah satu pertimbangan atau *case study* yang dilakukan dalam penelitian ini adalah *starting curve* pada motor induksi dengan kapasitas terbesar di tiap bus yang terpasang sebagai salah satu batasan praktis yang diambil di PT. Pupuk Kujang Cikampek.



Gambar 3.3 *Simplified Single Line Diagram* PT. Pupuk Kujang Cikampek

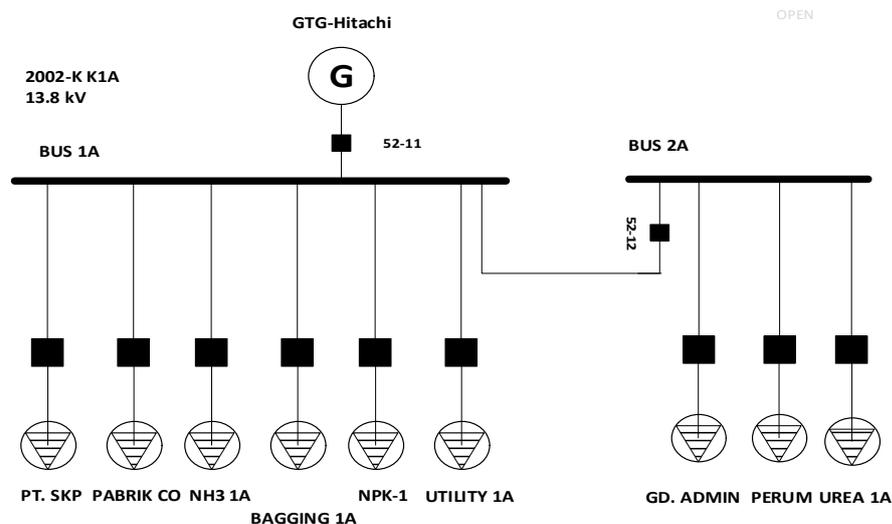
Case Study dalam pemodelan sistem koordinasi proteksi yang dilakukan pada penelitian ini berdasarkan kondisi real dilapangan sehingga manufer operasi pada sistem distribusi yang dilakukan oleh PT. Pupuk Kujang Cikampek perlu dipertimbangkan dalam penelitian ini. Manufer operasi ini dilakukan untuk mengakomodir jika terjadi permasalahan baik eksternal maupun internal yang berkaitan dengan sistem pembangkitan yang terjadi agar proses produksi yang dilakukan tetap terjaga dengan normal.

3.4.1 Sistem Distribusi PT. Pupuk Kujang

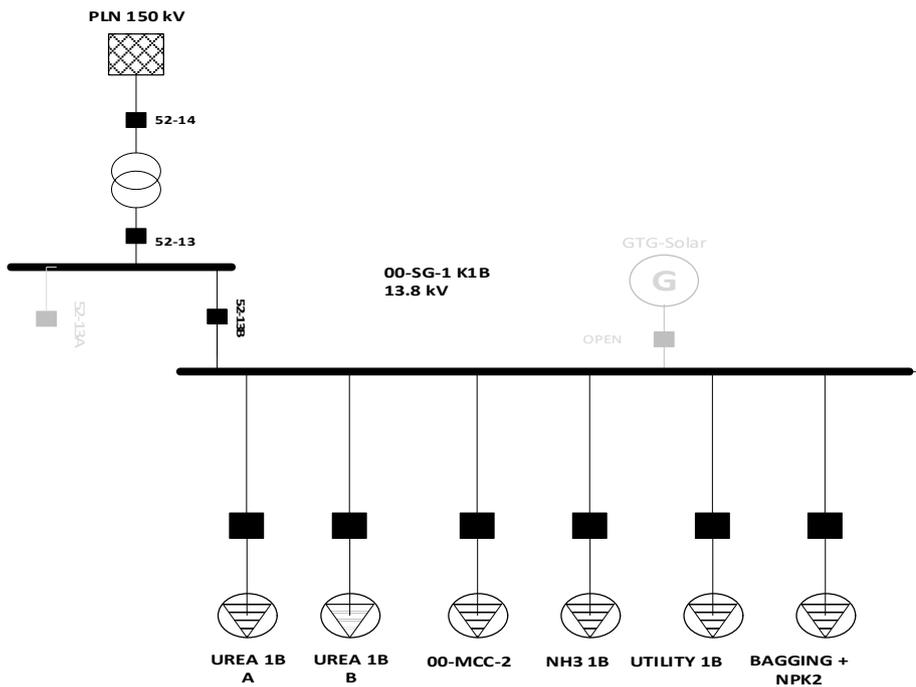
Sistem distribusi kelistrikan di PT. Pupuk Kujang cikampek memiliki 2 pola operasi atau 2 pola manufer operasi. Manufer operasi dilakukan untuk menjaga segala proses produksi berlangsung dengan normal. Jika kondisi tekanan gas, tegangan yang berasal dari power grid dari PLN dalam kondisi normal maka dilakukannya sinkronisasi antar pembangkit untuk mensuplai semua kebutuhan beban pabrik. Jika terjadi *black out* pada salah satu pembangkit ataupun syarat-syarat sinkronisasi tidak terpenuhi maka pola operasi yang dilakukan adalah masing – masing pembangkit beroperasi secara *island* untuk mensuplai kebutuhan dimasing-masing pabrik.

1. Manufer Operasi A

Manufer ini dilakukan jika tidak dapat dilakukannya sinkronisasi antar pembangkit, sehingga pembangkit baik di pabrik A dan pabrik B beroperasi secara *island* untuk mensuplai kebutuhan beban di masing-masing pabrik.



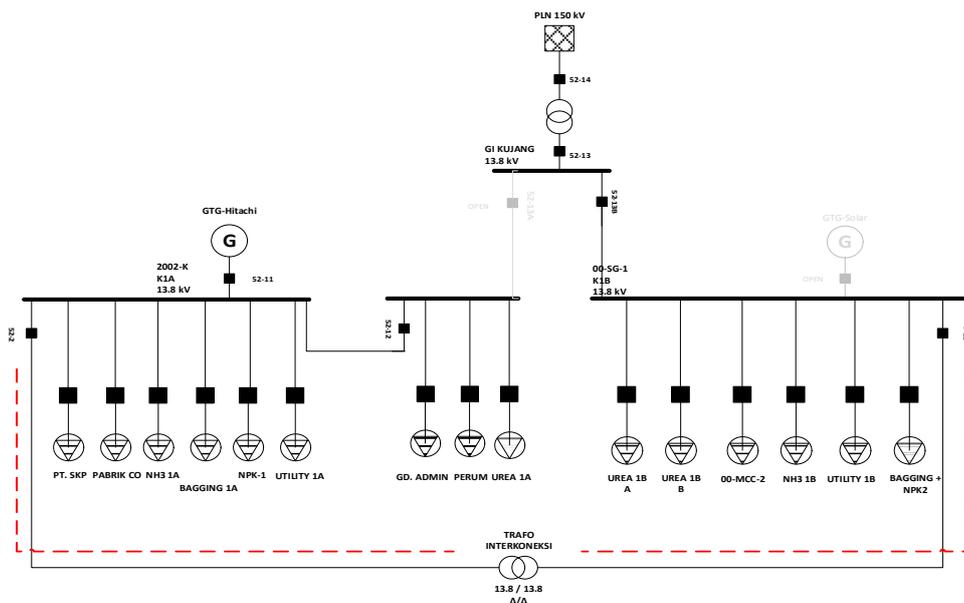
Gambar 3.4 Sistem Distribusi Pabrik Kujang 1A (*Island*)



Gambar 3.5 Sistem Distribusi Pabrik Kujang 1B (*Island*)

2. Manufer Operasi B

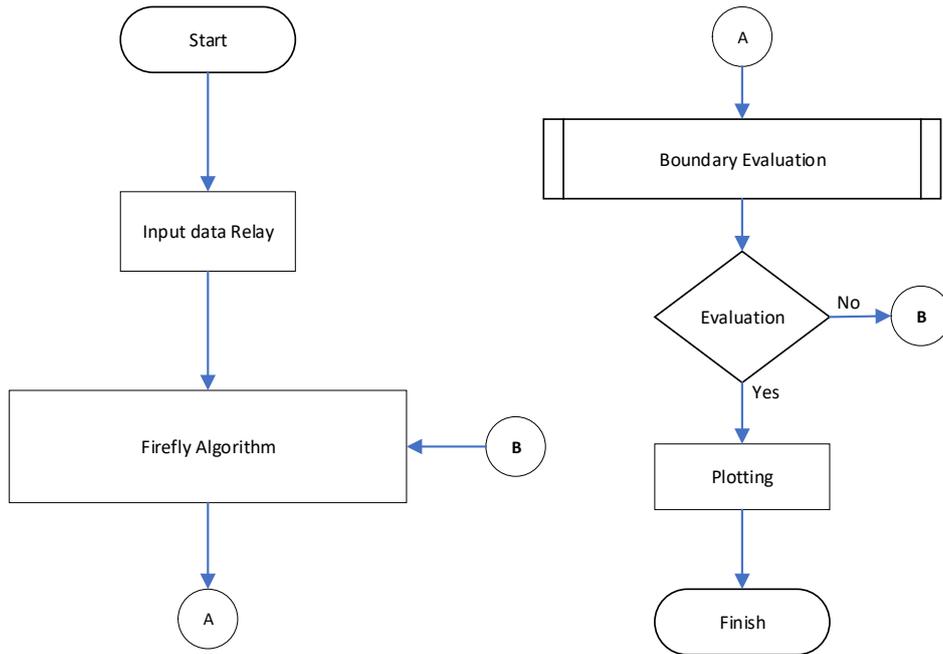
Manufer ini dilakukan jika semua syarat-syarat sinkronisasi terpenuhi maka semua kebutuhan beban pada pabrik kujang A dan B disuppai oleh semua pembangkit dengan sistem interkoneksi. Sistem interkoneksi antar pabrik kujang 1A dan 1B dihubungkan melalui trafo interkoneksi sebesar 12 MVA dengan sistem isolasi.



Gambar 3.6 Sistem Interkoneksi Kelistrikan Kujang 1A dan 1B

3.5 Perancangan Master Program

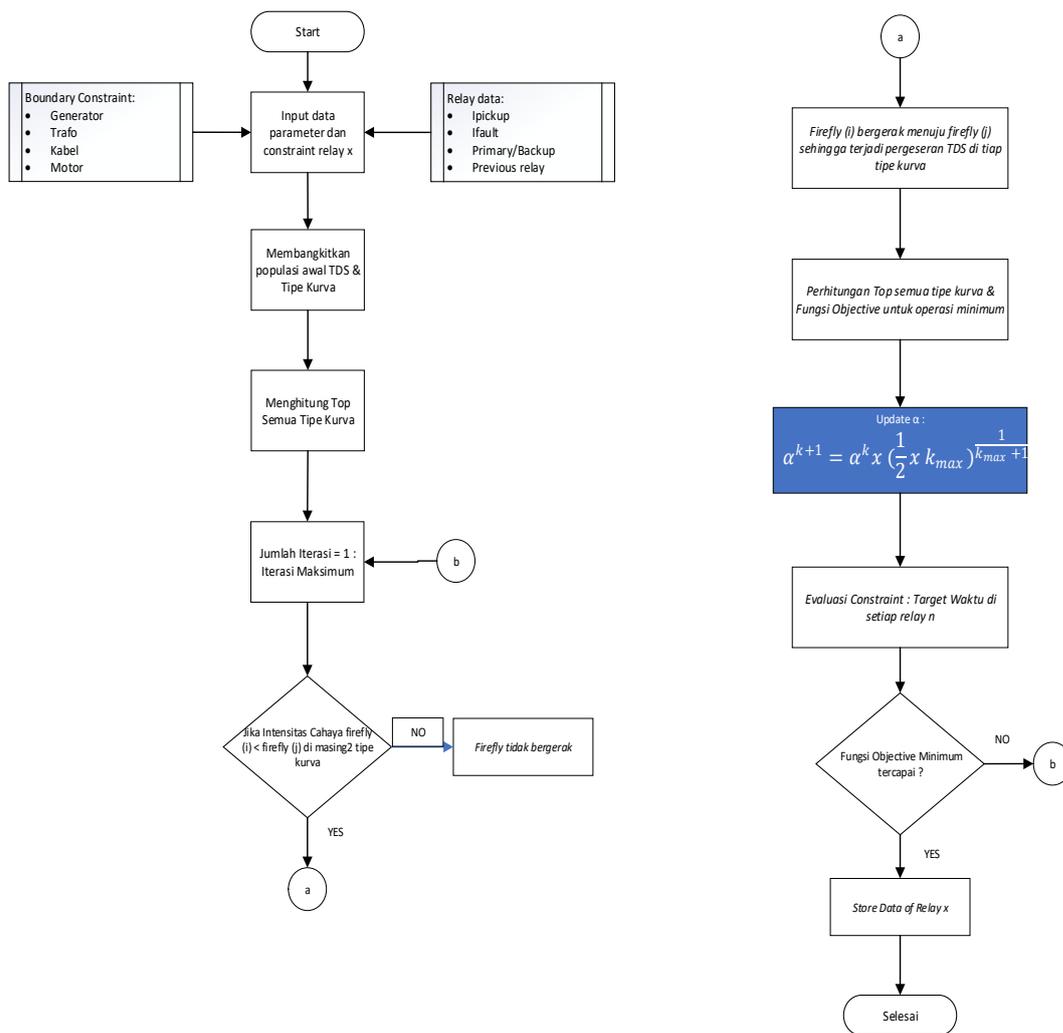
Sebelum memasuki perancangan menggunakan *Firefly Algorithm* dalam melakukan optimasi TDS dan tipe kurva pada relay arus lebih maka akan dilakukan perancangan dalam pembuatan master program dalam penelitian ini, tahapan dalam melakukan perancangan master program adalah sebagai berikut:



Gambar 3.7 *Flowchart* dalam perancangan master program

3.5.1 Perancangan Firefly Algorithm

Firefly algorithm adalah salah satu metode yang memiliki fungsi utama untuk menemukan nilai optimal (minimal atau maksimal) dari sebuah persamaan. Dalam tesis ini algoritma tersebut digunakan sebagai metode untuk menemukan perhitungan dalam menentukan nilai optimasi TDS dan tipe kurva dalam target waktu kerja operasi relay yang ditentukan yang akan dilakukan pada sistem eksisting. Maka dari itu perlu dilakukan pengembangan algoritma dengan maksud untuk mengadaptasi pemodelan sistem kelistrikan dan mempercepat kemampuan konvergensi.



Gambar 3.8 Diagram Alir Perancangan *Firefly Algorithm*

Dalam menentukan optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA ataupun FA diperlukan parameter berupa arus hubung singkat maximum pada relay dalam kondisi sebagai relay *primary* maupun *backup*, arus pick up (I_p), *left and right boundary*, posisi relay dalam skema proteksi dan waktu minimum relay. Waktu minimum relay disini berfungsi untuk membatasi TDS di masing-masing tipe kurva pada relay agar tidak beroperasi dibawah 0.1 detik ketika terjadi gangguan. Hal ini berguna untuk dapat mengantisipasi agar relay tidak beroperasi ketika ada arus inrush yang nilainya lebih besar dari arus pick up relay dalam waktu yang singkat. Dalam melakukan optimasi menggunakan *firefly algorithm* beberapa parameter yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \in \quad (1)$$

$$\alpha = 0.01 \quad n \text{ Pop} = 75$$

$$\gamma = 0.5 \quad \beta_0 = 0.9$$

$$\text{Iterasi Max} = 15$$

Untuk memperbaiki hasil dari setiap iterasi, maka dilakukan modifikasi membuat *firefly algorithm* menjadi lebih adaptif dengan nilai range pada TDS di masing-masing tipe kurva di setiap iterasinya. Hal ini dimaksudkan untuk dapat mempercepat *firefly* mendapatkan titik konvergensi pada nilai akhir. Sehingga tahapan – tahapan melakukan optimasi menggunakan FA adalah sebagai berikut:

1. Menentukan *Objective Function* dan *Constraint*

Fungsi objective dalam penelitian ini akan merepresentasikan dalam melakukan optimasi menentukan waktu kerja relay (Top) berdasarkan tipe kurva dan batasan – batasan yang digunakan. Dimana perumusan dalam menentukan Top adalah sebagai berikut:

$$t_{op} = \frac{k \times TDS}{\left(\left(\frac{I}{I_p}\right)^\alpha - 1\right)^{\beta}} \quad (3.1)$$

$$a_p = \frac{k}{\left(\left(\frac{I}{I_p}\right)^\alpha - 1\right)^{\beta}} \quad (3.2)$$

$$t_{op} = a_p * TDS \quad (3.3)$$

Dimana nilai k , α , dan β berdasarkan dari tipe kurva yang digunakan dengan standart yang digunakan dalam penelitian ini adalah IEC.

Tabel 3.3 Koefisien Kurva Relay Inverse Standard IEC

Curve Type	k	α	β
<i>Long Time Inverse</i>	120	1	13,33
<i>Standart Inverse</i>	0,14	0,02	2,97
<i>Very Inverse</i>	13,5	1	1,5
<i>Extremely Inverse</i>	80	2	0,808
<i>Ultra Inverse</i>	315,2	2,5	1

Constraint yang digunakan dalam melakukan optimasi menggunakan *firefly algorithm* adalah sebagai berikut :

$$\bullet \quad t_{op}^{min} \leq t_{op} \leq t_{op}^{max} \quad (3.4)$$

Keterangan :

$$t_{op}^{min} = 0.1 \text{ s}$$

$$t_{op}^{max} = 1 \text{ s}$$

Hal ini dikarenakan waktu target operasi minimum berfungsi untuk membatasi agar TDS yang terpilih tidak akan menghasilkan waktu operasi rele di bawah 0,1 detik ketika terjadi gangguan, hal ini berfungsi untuk mengantisipasi agar rele tidak beroperasi ketika ada arus *inrush* yang nilainya lebih besar dari *Ipickup* rele namun dalam durasi yang singkat. Sedangkan waktu operasi maksimum digunakan untuk mengantisipasi agar rele tidak ada rele yang beroperasi dengan waktu 1 detik ketika terjadi gangguan karena terlalu lama dan dapat merusak peralatan.

$$\bullet \quad TDS_{min} \leq TDS \leq TDS_{max} \quad (3.5)$$

Keterangan :

$$TDS_{min} = 0.1$$

$$TDS_{max} = 3.2$$

$$\text{Step TDS} = 0.01$$

Batasan TDS ini digunakan berdasarkan dari karakteristik yang berasal dari *manufacture* relay yang digunakan, dimana *manufacture* relay yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan *Schneider Electric*.

$$\bullet \quad t_{opi+1} - t_{opi} \geq CTI ; CTI = 0.2 \text{ s} \quad (3.6)$$

CTI adalah *clearing time interval* yang didapatkan t_{op} yang dihasilkan antar relay sehingga dalam melakukan koordinasi sistem proteksi antar relay memiliki batasan batasan $CTI \quad 0.2s \leq CTI \leq 0.4 \text{ s}$. Dan dipilih CTI dalam penelitian ini sebesar 0.2 detik.

$$\bullet \quad I_{(t)relay} > I_{(t)motor} \quad (3.8)$$

Batasan *motor starting curve* ini digunakan untuk mendapatkan tipe kurva pada relay arus lebih yang paling sesuai dengan karakteristik beban dari motor induksi yang digunakan.

Dimana $I_{(t)motor}$:

$$t = 0 - 0.1 \text{ s} = 1.6 \times \text{LRC} = \text{Assymetrical LRC} ; \text{LRC} = \text{FLA} \times \text{Inrush}$$

$$t = 0.1 \text{ s} - \text{duration start} = \text{LRC}$$

$t > \text{duration start} - \infty = \text{FLA}$

Dari semua *constraint* yang digunakan dalam metode optimasi ini sehingga *objective function* yang akan dikerjakan dengan menggunakan *firefly algorithm* adalah sebagai berikut.

$$Z = \sum_{i=1}^n a_{pi} * TDS_i \quad (3.7)$$

Keterangan :

i = jumlah relay

2. Input Masukan Data

Proses pemasukan data merupakan tahapan awal dalam proses optimasi, dimana dalam tahapan ini adalah melakukan penginputan data seperti :

- Urutan relay
- Arus hubung singkat
- Arus *pickup*
- *Left Boundary* dan *Right Boundary*

3. Initial Position Firefly Algorithm

x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) membuat inisiasi awal atau *initial position* dan sebaran awal dari *firefly*, dimana posisi awal *firefly* merupakan nilai TDS di masing – masing tipe kurva. Pada pembuatan populasi awal sudah dilakukannya penentuan untuk :

γ = koefisien penyerapan cahaya

β_0 = *attractiveness* atau daya tarik *firefly*

α = parameter random

4. Menentukan atau menghitung tingkat intensitas cahaya pada setiap *firefly*, dimana instensitas cahaya pada *firefly* merupakan T_{op} atau waktu operasi relay yang dihasilkan, T_{op} yang nilainya semakin mendekati target maka *firefly* memiliki tingkat intensitas cahaya yang lebih terang, dimana sifat dari *firefly* akan menuju ke kawanan *firefly* yang memiliki intensitas cahaya yang lebih terang.
5. Update pergerakan *Firefly*, dalam proses pergerakan *firefly* menuju kepada *firefly* dengan tingkat intensitas cahaya yang lebih terang, maka diperlukan

update pergerakan *firefly* dengan menggunakan formulasi seperti dibawah ini :

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \in \quad (3.8)$$

3.6 Pengujian Hasil Iterasi

Hasil yang didapatkan berdasarkan hasil iterasi dari *Firefly algorithm* adalah berupa TDS dan tipe kurva yang telah memenuhi *constraint* atau batasan yang digunakan. Hasil pengujian akan berupa tipe kurva hasil optimasi beserta nilai TDSnya dan batasan – batasan yang dimodelkan dalam bentuk kurva seperti *motor starting curve* , *thermal curve* , *decrement curve* dan Tipe kurva relay arus lebih, dan semuanya akan ditampilkan dalam bentuk pemodelan kurva TCC.

3.7 Analisa Hasil Pengujian

Nilai TDS dan tipe kurva yang telah dilakukan perhitungan menggunakan algoritma yang digunakan akan dilakukan analisa berdasarkan dari batasan-batasan praktis yang digunakan. Hasil dari optimasi menunjukkan tipe Kurva dan nilai TDS pada kurva tersebut sudah tidak bersinggungan dengan kurva – kurva batsannya. Dan koordinasi antar relay sudah memenuhi batasan CTI yang ditentukan. Analisa hasil pengujian dapat dilihat pada pemodelan kurva TCC yang dihasilkan, apakah pada kurva TCC terdapat tipe kurva pada relay arus lebih yang saling bersinggungan dengan batasan kurva yang ada atau sudah mendapatkan hasil yang optimum. Jika hasil pengujian didapatkan ada salah satu tipe kurva pada relay bersinggungan maka algoritma yang digunakan akan melakukan penghitungan ulang atau melakukan iterasi ulang hingga mendapatkan hasil yang paling optimum berdasarkan batasan atau pertimbangan yang digunakan. Apabila masih terdapat tipe kurva yang saling bersinggungan antar relay dan CTI yang dimiliki belum sesuai , maka dikaji kembali iterasi *firefly algorithm* dan dilakukan modifikasi. Selain itu, perlu juga dianalisis kebutuhan waktu atau jumlah iterasi algoritma dan kemampuan konvergensi algoritma.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Memodelkan *Starting Motor Curve*, *Damaged Curve* dan *Decrement Curve*

4.1.1 *Cable Damaged Curve*

Cable Damaged Curve merupakan batasan praktis yang akan menjadi salah satu *constraint* pada skema proteksi di PT. Pupuk Kujang Cikampek. Pemodelan dilakukan dengan cara melakukan perhitungan manual untuk mendapatkan besaran nilai arus terhadap perubahan waktu dan hasil dari perhitungan tersebut akan dimodelkan untuk mendapatkan *damaged curve* dari kabel. Pemodelan kabel yang akan digunakan adalah kabel yang terletak diantara pada bus 01-SUBSTATION-3 dan 01-INC-NPK2 yang berukuran 3/C – 120 mm² di tegangan 13.8 kV. Berdasarkan pada tabel 2.3 – 2.5 dan mengacu pada standart [10] maka kabel yang digunakan memiliki batasan temperature 90°C - 250°C. Detail spesifikasi pada kabel yang digunakan:

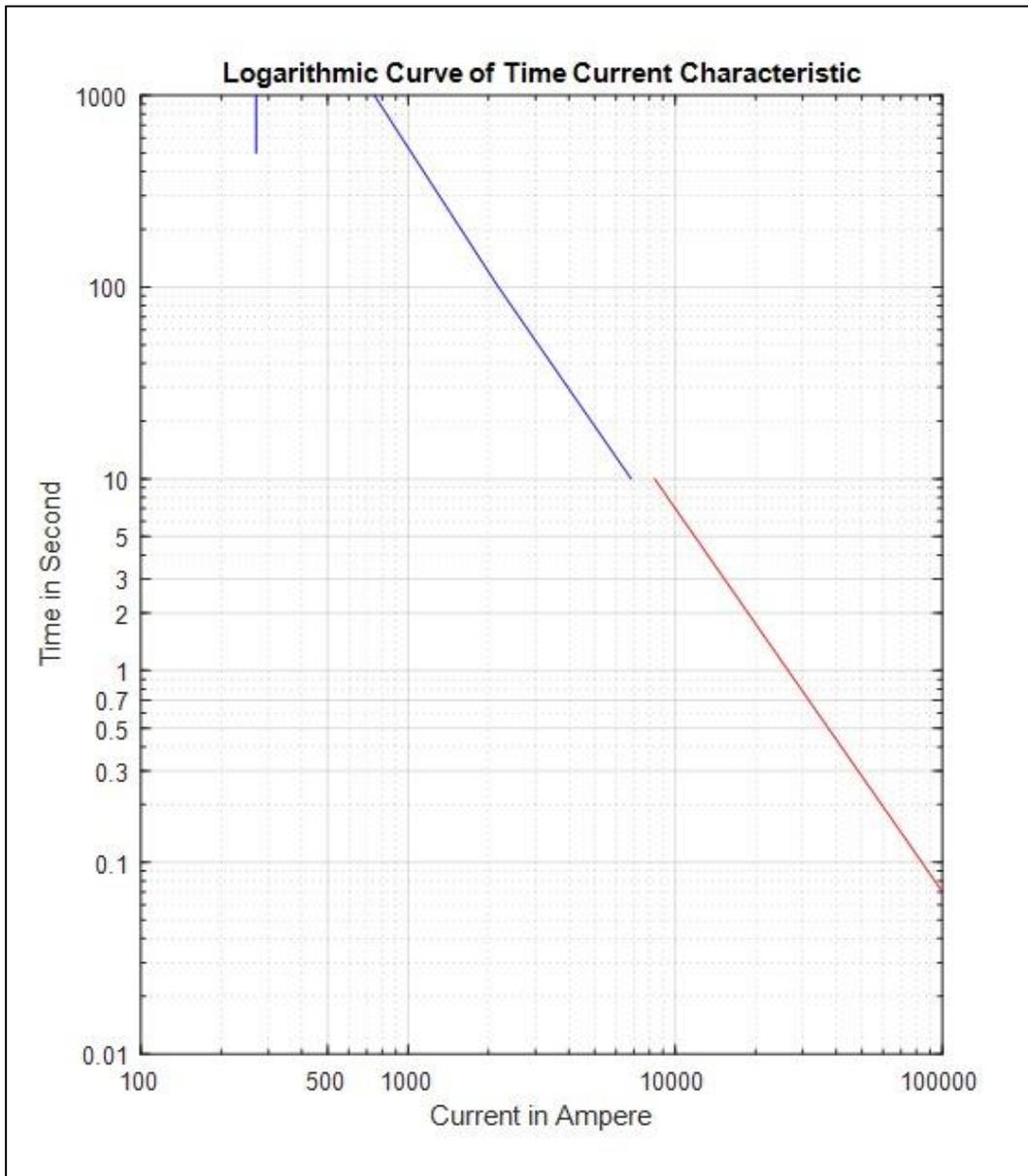
1. *Full Load Ampere* : 270 A
2. Ukuran kabel : 3/C -120 mm²
3. Tegangan Kabel : 15 kV
3. Manufacture : Supreme

Dengan mengacu pada standart yang digunakan maka didapatkan hasil perhitungan untuk mendapatkan *damaged curve* pada kabel 3/C -120 mm² yang tertera pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.1 *Damage Curve* kabel 3/C -120 mm² PT. Pupuk Kujang Cikampek

Thermal Curve			Damaged Curve	
Time	X FLA Current (%)	Current (A)	Time	Current (A)
10	25.33	6839.1	0.01	264711
100	8.07	2178.9	0.1	83709
1000	2.77	747.9	1	26471
10000	1.4	378	10	8371
18000	1.31	353.7		

Dengan data hasil yang didapatkan dari perhitungan manual untuk mendapatkan besaran nilai arus ketahanan dari kabel maka data perubahan arus terhadap satuan waktu pada tabel 4.1 dapat di modelkan pada *software matlab* untuk dapat menggambarkan *damaged curve* pada kabel 3/C-120 mm². Dan hasil pemodelan dari *damaged curve* kabel didapatkan hasilnya seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4.1 *Cable damaged curve* 120 mm²

4.1.2 *Transformer Damaged Curve*

Transformer damaged curve juga diperlukan untuk menjadi batasan praktis dalam skema koordinasi proteksi, dikarenakan selain untuk meningkatkan kehandalan sistem, sistem koordinasi proteksi diperlukan untuk melindungi peralatan agar tidak terjadi suatu kerusakan yang permanent pada peralatan tersebut. Pada skema proteksi yang digunakan pada sistem distribusi kelistrikan PT. Pupuk Kujang Cikampek memiliki trafo dengan spesifikasi seperti dibawah ini.

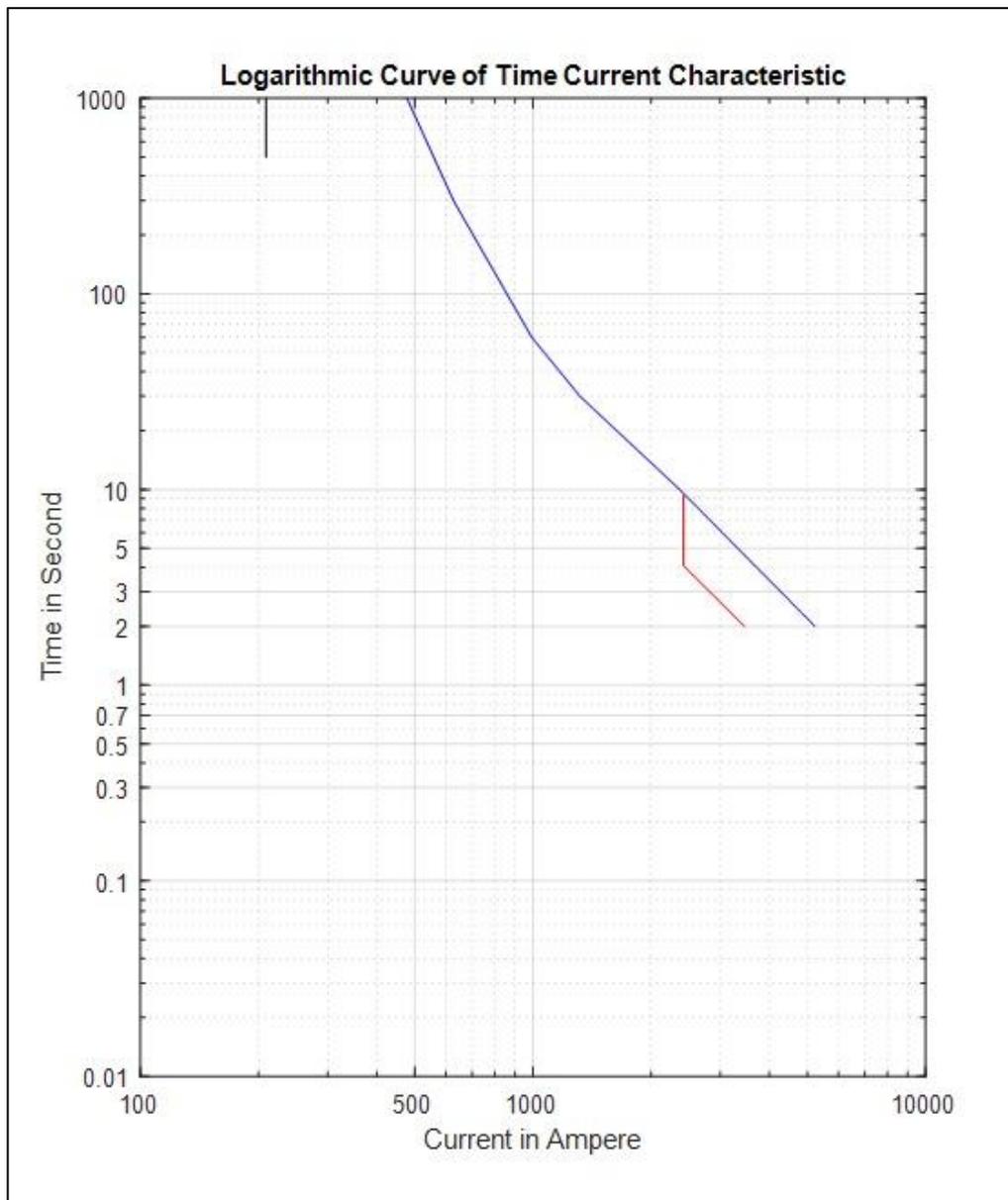
Kapasitas : 5000 kVa
Vector Group : YnD5
Tegangan : 13.8 kV // 2.4 kV
FLA : 210 A // 1203 A
Impedansi : 6.5 %
Type : Oil Filled
Class : ONAN
Category : II

Berdasarkan pengkategorian yang sudah ditentukan oleh standart yang digunakan [18] maka didapatkan hasil perhitungan manual untuk mendapatkan besaran perubahan nilai arus terhadap waktu pada saat terjadi gangguan hubung singkat. Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.2 *Thermal Damage Curve* Trafo TR-NPK2

<i>Thermal Damage</i>		
x Rated Current (A.pu)	Time (s)	Current
2	1800	418
3	300	627
4.75	60	992.75
6.3	30	1316.7
11.3	10	2361.7
25	2	5225

Hasil yang didapatkan pada tabel 4.2 dapat untuk mendapatkan pola dari *thermal damage curve* dari trafo TR-NPK2 seperti yang ditunjukkan dibawah ini.



Gambar 4.2 Trafo *damaged curve* TR-NPK2

4.1.3 *Decrement Curve*

Decrement Curve Generator ini menunjukkan besarnya kontribusi arus hubung singkat maksimum yang dihasilkan oleh generator pada suatu system jika terjadi gangguan di terminal generator tersebut. Untuk mendapatkan besaran arus yang dihasilkan oleh generator dapat dilakukan dengan perhitungan manual dengan cara yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya. Untuk melakukan perhitungan *decrement curve* diperlukannya beberapa data spesifikasi yang dimiliki oleh

generator. Pembangkit listrik pada PT Pupuk Kujang Cikampek memiliki 2 *gas turbine generator* (GTG) dan 1 *power grid* PLN 150 kV. Tetapi dalam operasional sistem pembangkitan yang digunakan hanya 1 GTG Hitachi pada kujung 1A, dikarenakan GTG kujung 1B mengalami kerusakan secara permanent sehingga hingga saat ini tidak digunakan. Sehingga hanya dilakukan pemodelan *Decrement Curve* GTG Hitachi untuk menjadi batasan pada skema proteksi yang dilakukan. Spesifikasi data generator yang dimiliki GTG Hitachi yang diperlukan untuk melakukan perhitungan adalah sebagai berikut:

Power Output	: 21400 kVa
Power Factor	: 0.80
Voltage	: 13800 V
Frequency	: 50
Speed	: 1500 Rpm
Arus Rated	: 621
Reactance	:
X_d	: 161 %
X_d' unsat/sat	: 26.3 % / 23.8 %
X_d'' unsat/sat	: 18.2 % / 16 %
X_0	: 6.1 %
X_2	: 20.9 %
<i>Time Constant</i>	:
T_d'	: 0.87 s
T_d''	: 0.025 s
T_{do}	: 7.63 s
T_a	: 0.20 s
I_f	: 3 a
I_{fg}	: 1 a

Perhitungan menentukan *decrement curve* berdasarkan data spesifikasi GTG Hitachi K1A adalah sebagai berikut :

$$i_{ac} = (id'' - id')e^{\frac{-t}{T_d''}} + (id' - id)e^{\frac{-t}{T_d'}} + id * I_{base}$$

$$i_{dc} = \sqrt{2} \cdot id'' \cdot e^{\frac{-t}{T_a}} * I_{base}$$

$$i_{total} = \sqrt{i_{ac}^2 + i_{dc}^2}$$

$$E'' = Va + Xd'' \sin \theta$$

$$= 1 + 0.16 * \sin 36.86^\circ = 1.096$$

$$id'' = \frac{E''}{Xd''}$$

$$= \frac{1.096}{0.16} = 6.85$$

$$E' = Va + Xd' \sin \theta$$

$$= 1 + 0.24 * \sin 36.86^\circ = 1.144$$

$$id' = \frac{E'}{Xd'}$$

$$= \frac{1.144}{0.24} = 4.77$$

$$E = \frac{Va}{Xd} * \frac{If}{Ifg}$$

$$= \frac{1}{1.61} * \frac{3}{1} = 1.86$$

$$id = \frac{E}{Xd}$$

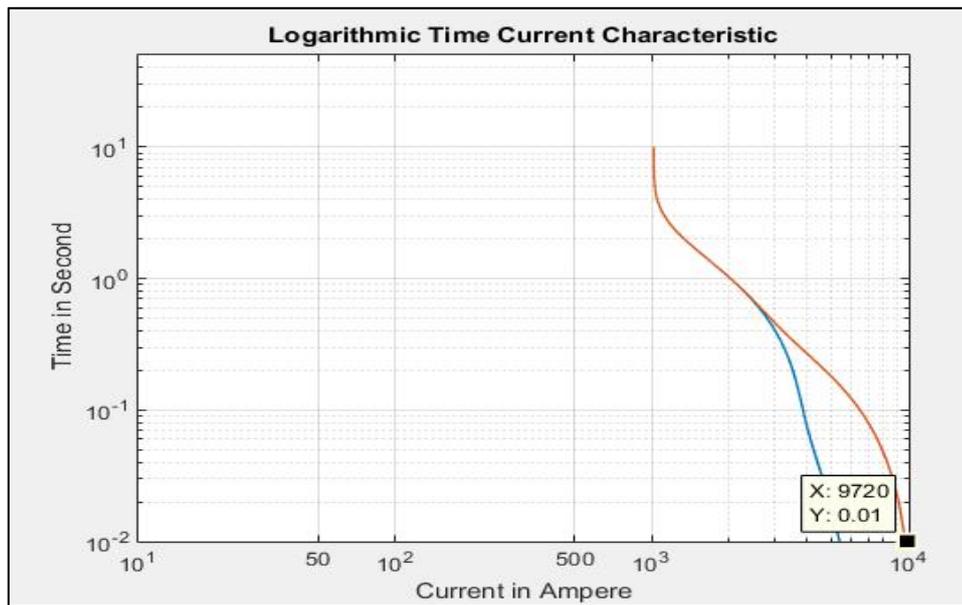
$$= \frac{1.86}{1.61} = 1.16$$

$$i_{ac} = (6.85 - 4.77)e^{\frac{-t}{0.16}} + (4.77 - 1.16)e^{\frac{-t}{0.16}} + 1.16 * 0.88 = 5.33 \text{ kA}$$

$$i_{dc} = \sqrt{2} \cdot 6.85 \cdot e^{\frac{-t}{0.2}} * 0.88 = 8 \text{ kA}$$

$$i_{total} = \sqrt{i_{ac}^2 + i_{dc}^2} = 9.79 \text{ kA}$$

Dari hasil perhitungan diatas maka didapatkan *decrement curve* pada GTG K1A yang di modelkan pada *software matlab* seperti dibawah ini.



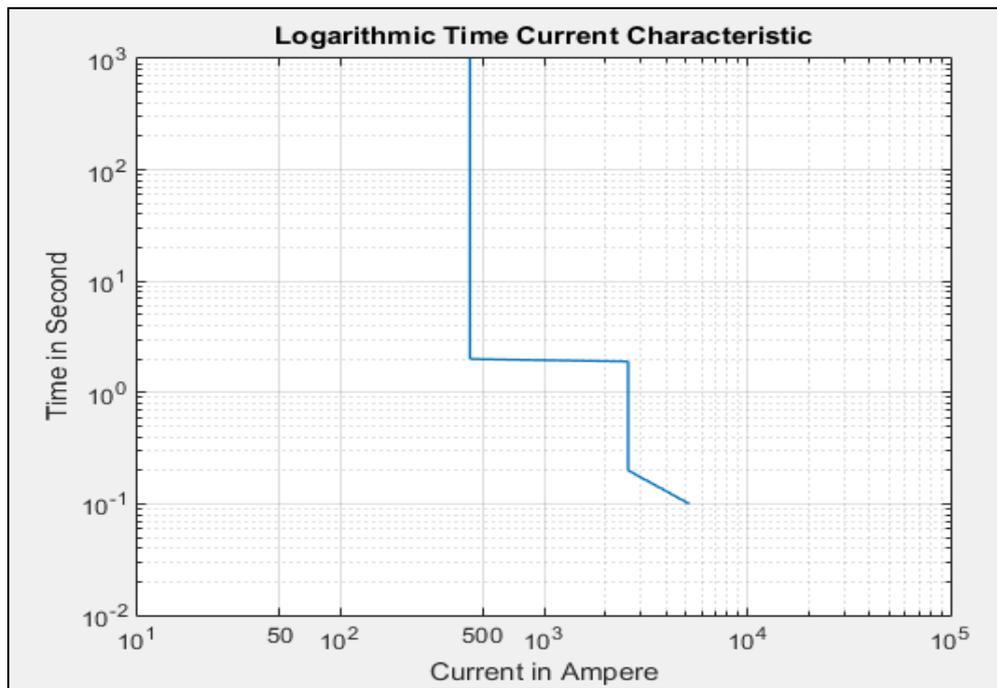
Gambar 4.3 Decrement curve generator hitachi

4.1.4 Motor Starting Curve

Motor starting curve menunjukkan kurva karakteristik arus pengasutan awal pada motor induksi terhadap inersia beban dalam satuan waktu, *motor starting curve* diberikan pada tegangan nominal motor (100%) dan pada tegangan minimum rotor (90%). Dalam pemodelan *motor starting curve* yang mengacu pada standard yang digunakan diperlukan beberapa data spesifikasi yang berasal dari motor induksi seperti *locked rotor current*, arus nominal motor dan data yang lainnya. Motor yang digunakan dalam skema proteksi dalam penelitian ini memiliki kapasitas 700 kW dan 1500 kW, memiliki data spesifikasi motor tersebut adalah :

1. Tag ID : 2209-JCM
- Manufacture : Westing House
- Kapasitas : 1500 kW
- Tegangan : 2400 V
- I rated : 432 A
- LRC : 6.5 x

Berdasarkan data – data spesifikasi motor diatas didapatkan pemodelan *motor starting curve* pada motor 2209-JCM di pabrik Kujang 1A seperti dibawah ini :

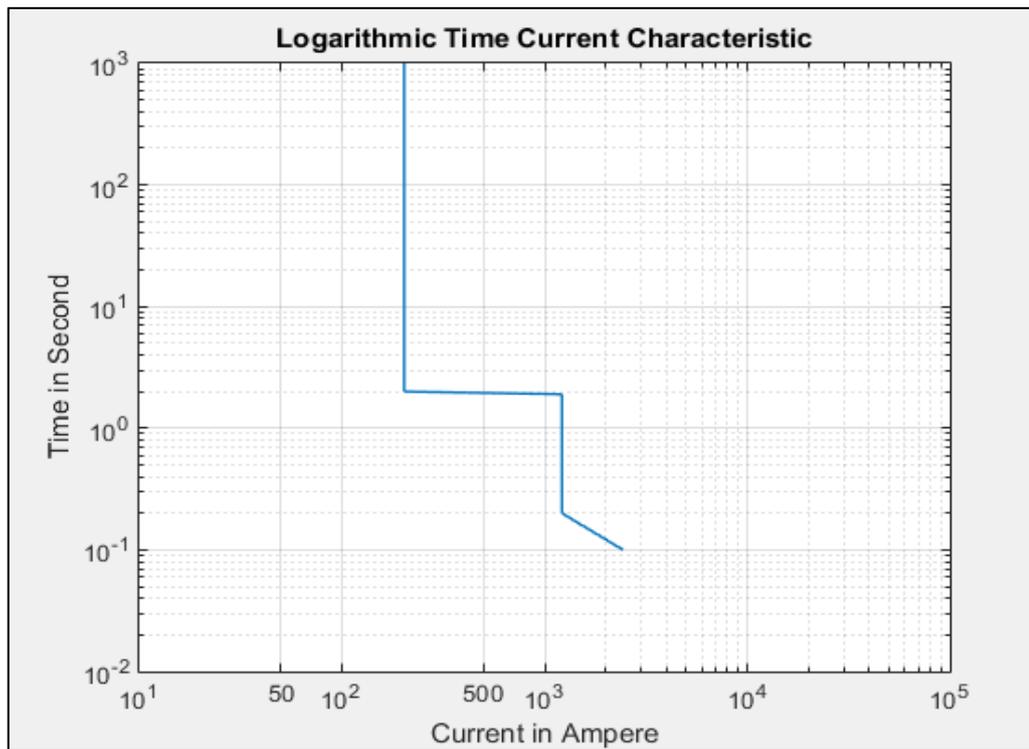


Gambar 4.4 *Motor starting curve* 2209-JCM pabrik kujang 1A

Berdasarkan dari gambar 4.3 untuk pemodelan pada *motor starting curve* 2209-JCM pada pabrik Kujang 1A dapat dilihat bahwa durasi pada motor 2209-JCM memiliki waktu durasi dari kondisi pengatusan awal hingga mencapai nominal speed adalah 2 detik, dalam kondisi real dilapangan motor ini digunakan sebagai penggerak pompa *cooling tower* untuk proses pendinginan dalam proses produksi.

2. Tag ID	: C-002-M
Manufacture	: ABB
Kapasitas	: 700 kW
Tegangan	: 2400 V
I rated	: 203 A
LRC	: 6.5 x

Berdasarkan data – data spesifikasi motor diatas didapatkan pemodelan *motor starting curve* pada motor C-002-M Kujang 1B seperti dibawah ini :

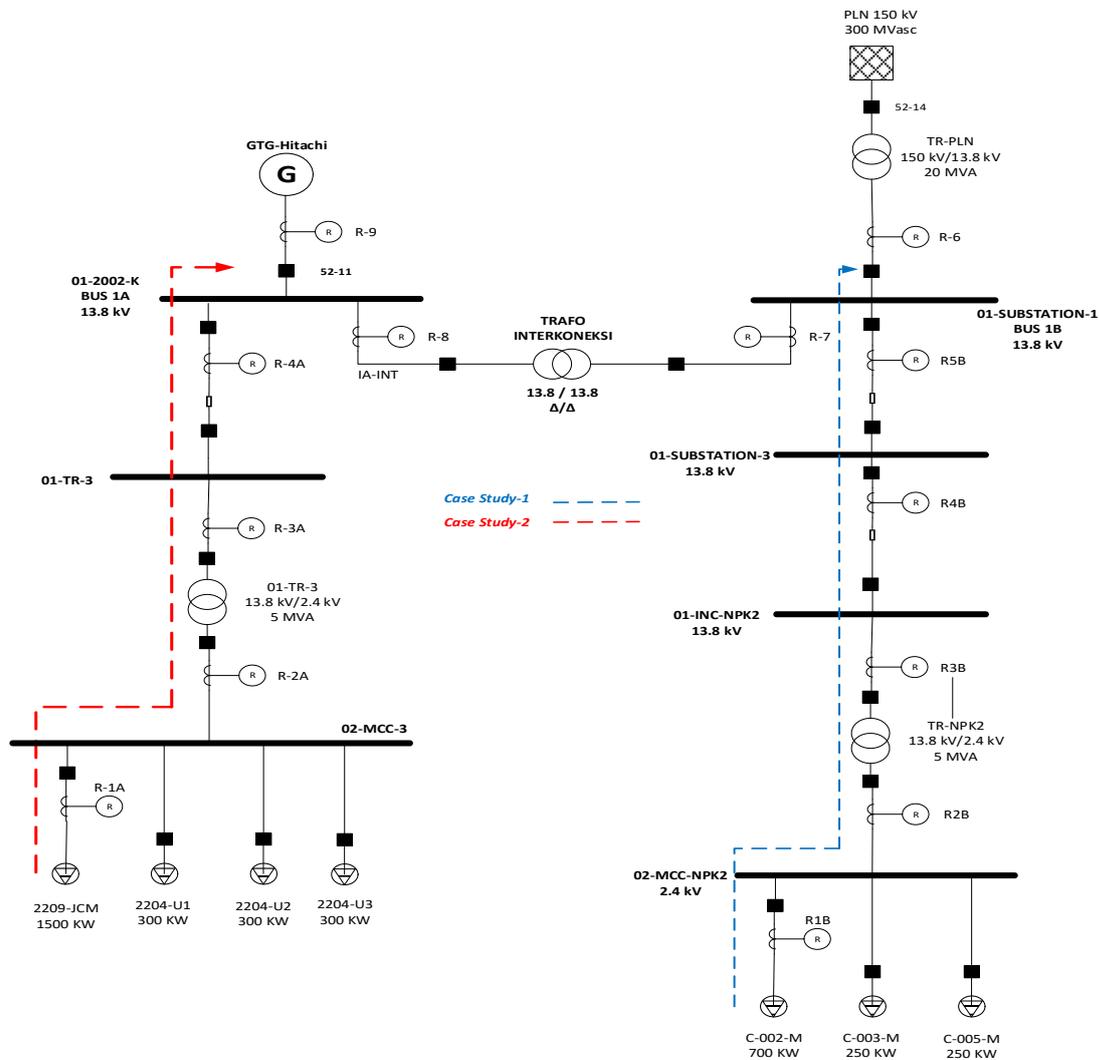


Gambar 4.5 Motor starting curve C-002-M pabrik kujang 1B

4.2 Menentukan Case Study Koordinasi Proteksi Pada PT. Pupuk Kujang Cikampek

Perhitungan optimasi *Time Dial Setting* dan Tipe Kurva pada PT. Pupuk Kujang Cikampek dilakukan pada beberapa *case study* yang dipilih berdasarkan beberapa kasus, seperti saluran terpanjang, beban terbesar dan manufer operasi. Manufer operasi pada sistem ini merupakan sistem sinkronisasi pembangkit antara pembangkit di kujang 1A (GTG Hitachi) dan pembangkit di kujang 1B (*Power Grid* PLN). Manufer operasi menjadi kasus khusus dikarenakan manufer operasi sangat sering dilakukan dikarenakan banyak faktor *eksternal* yang sangat mempengaruhi sistem kestabilan sinkronisasi pada distribusi di PT. Pupuk Kujang Cikampek. Salah satu contoh faktor *eksternal* dalam hal ini adalah tekanan gas pada GTG K1A mengalami penurunan hingga menyentuh *minimum pressure limit for syhcronation* pada kontrol pembangkit, sehingga sistem sinkronisasi tidak dapat dilakukan sehingga pembangkit beroperasi secara *island* untuk mensuplai di masing-masing pabrik.

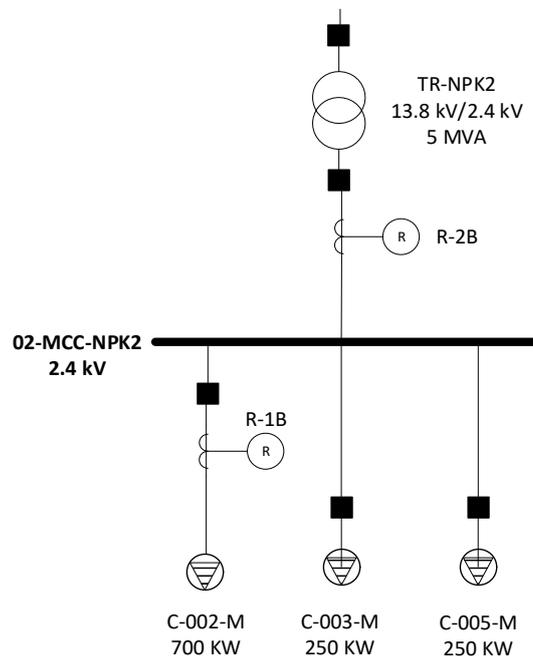
Sehingga dengan mempertimbangkannya manufer operasi skema proteksi yang akan dilakukan akan dibagi menjadi 2 *case study-1* dan *case study-2* dengan beberapa tipikal skema proteksi. Dalam *case study* yang sudah ditentukan maka dibagi beberapa tipikal skema proteksi yang akan di ambil. Beberapa tipikal skema proteksi yang diambil berdasarkan dari letak beban terbesar dalam saluran distribusi listrik PT. Pupuk Kujang Cikampek. Dimana pada jaringan listrik pabrik kujang 1A terdapat motor induksi (2209-JCM) sebesar 1500 kw yang digunakan sebagai penggerak pompa *cooling water* dikawasan *Utility 1A*, di jaringan listrik pabrik kujang 1B terdapat motor induksi (C-002-M) sebesar 700 kw yang digunakan sebagai penggerak *rotating crusher* pada pabrik NPK-2 dan letak motor induksi C-002-M menjadi saluran tepanjang pada jaringan distribusi listrik Pabrik kujang 1B.



Gambar 4.6 Skema Proteksi *Case Study-1* dan *Case Study-2*

4.2.1 Case Study-1 : Tipikal 1B

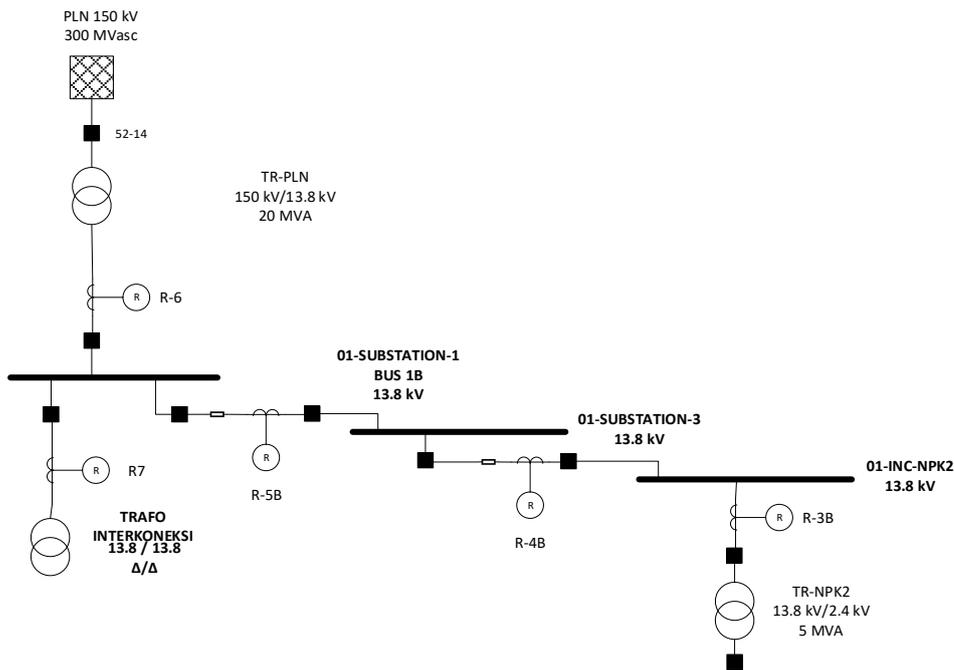
Case Study-1 merupakan saluran terpanjang yang berasal dari beban pada tegangan sebesar 2.4 kV menuju pada *power grid* PLN Kujang 1B yang beroperasi secara *Islanded* untuk mensuplai kebutuhan beban di Pabrik Kujang 1B. Karena dalam case study-1 ini terdapat tegangan *base* yang berbeda maka skema proteksi dibagi menjadi 3 tipikal. Tipikal 1B merupakan skema koordinasi proteksi yang memiliki 2 relay dimana terdapat relay motor C-002-M (R-1B) sebagai *primary* relay dan R-2B sebagai *backup* relay.



Gambar 4.7 Case study-1 : Tipikal 1B

4.2.2 Case Study-1 : Tipikal 2B

Case Study-2: Tipikal B memiliki skema koordinasi proteksi pada sisi jaringan 13.8 kV pada jaringan Kujang 1B. Dimana jalur ini merupakan jalur distribusi terpanjang yang dimiliki oleh Pupuk Kujang Cikampek. Sehingga pola koordinasi proteksi pada tipikal B ini akan dimulai dari TR-NPK2 hingga pada power grid PLN di sisi 13.8 kV. Pada jalur ini akan dilakukan koordinasi proteksi sebanyak 5 buah relay arus lebih yang dimulai dari R-3B (TR-NPK-2) – R4B (01-SUBSTATION-3) – R5B (01-SUBSTATION-1) – R7 (Feeder Interkoneksi K1B)- R6 (Power Grid PLN).



Gambar 4.8 Case Study-2 : Tipikal 2B

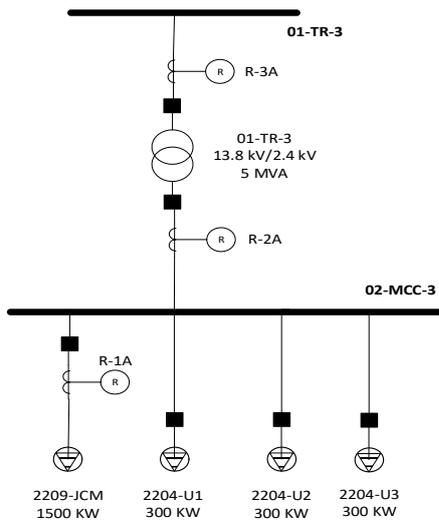
4.2.2.1 Data Arus Hubung Singkat Case Study-1B dan 2B

Tabel 4.3 Data Arus Hubung Singkat dan Relay Case Study-1

No	ID Rele	Type	Tegangan (kV)	Isc Max Utama (A)	Isc Max Backup (A)	CT	I Pick Up	Case Study-1
1	R1B	Motor	2.4	11570	-	300	235	TIPIKAL-1B
2	R2B	Feeder	2.4	10750	10750	1500	1384	
3	R3B	Trafo	13.8	7260	1870	300	240	TIPIKAL-2B
4	R4B	Feeder	13.8	7040	7040	200	360	
5	R5B	Feeder	13.8	9700	6930	600	440	
6	R6	PLN	13.8	6310	3800	1000	750	

4.2.3 Case Study-2 : Tipikal 1A

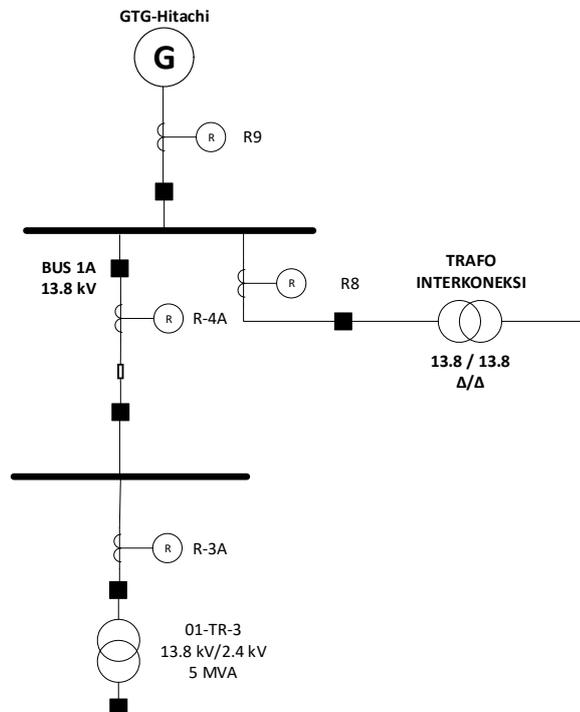
Case Study-2 : Tipikal 1A merupakan skema koordinasi proteksi pada jaringan distribusi Kujang 1A pada sisi tegangan 2.4 kV. Pada skema koordinasi ini memiliki motor induksi sebesar 1500 kw yang terletak pada *utility 1A*. Skema koordinasi proteksi tipikal A ini hanya dilakukan pada 2 relay yaitu R-1A (22090JCM) sebagai *primary relay* dan R-2A (01-TR-3) sebagai *backup relay*.



Gambar 4.9 *Case Study-2* : Tipikal 1A

4.2.4 *Case Study-2* : Tipikal 2A

Case Study-2 : Tipikal 2A memiliki skema koordinasi proteksi pada sisi jaringan 13.8 kV pada jaringan Kujung 1A. Pola koordinasi proteksi pada *case study* tipikal B ini akan dimulai dari 01-TR-3 hingga pada GTG Hitachi K1A. Pada jalur ini akan dilakukan koordinasi proteksi sebanyak 3 buah relay arus lebih yang dimulai dari R-3A (01-TR-NPK) – R4A (BUS-1A) – R5A (GTG Hitachi) .



Gambar 4.10 *Case Study-2* : Tipikal 2A

4.2.4.1 Data Arus Hubung Singkat Case Study-2 : 1A dan 2A

Tabel 4.4 Data Arus Hubung Singkat dan Relay Case Study-2

No	ID Rele	Type	Tegangan (kV)	Isc Max Utama (A)	Isc Max Backup (A)	CT	I Pick Up	Case Study-2
1	R1A	Motor	2.4	17850	-	600	432	TIPIKAL-1A
2	R2A	Feeder	2.4	16360	16360	1000	1384	
3	R3A	Trafo	13.8	11260	2840	300	240	TIPIKAL-2A
4	R4A	Feeder	13.8	10820	10820	600	337	
5	R9	Generator	13.8	7380	6130	1000	750	

4.3 Menentukan TDS dan Tipe Kurva Menggunakan *Adaptive Modified Firefly Algoritihm*

Dalam menentukan optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA ataupun FA diperlukan parameter berupa arus hubung singkat maximum pada relay dalam kondisi sebagai relay *primary* maupun *backup*, arus pick up (I_p), *left and right boundary*, posisi relay dalam skema proteksi dan waktu minimum relay. Waktu minimum relay disini berfungsi untuk membatasi TDS di masing-masing tipe kurva pada relay agar tidak beroperasi dibawah 0.1 detik ketika terjadi gangguan. Hal ini berguna untuk dapat mengantisipasi agar relay tidak beroperasi ketika ada arus inrush yang nilainya lebih besar dari arus pick up relay dalam waktu yang singkat. Dalam melakukan optimasi menggunakan *firefly algorithm* beberapa parameter yang digunakan adalah sebagai berikut ;

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \in$$

$$\alpha = 0.01$$

$$\gamma = 0.5$$

$$\text{Iterasi Max} = 15$$

$$n \text{ Pop} = 75$$

$$\beta_0 = 0.9$$

Untuk memperbaiki hasil dari setiap iterasi, maka dilakukan modifikasi membuat *firefly algorithm* menjadi lebih adaptif dengan nilai range pada TDS di masing-masing tipe kurva di setiap iterasinya. Hal ini dimaksudkan untuk dapat mempercepat *firefly* mendapatkan titik konvergensi pada nilai akhir. Sehingga tahapan – tahapan melakukan optimasi menggunakan FA adalah sebagai berikut:

1. Fungsi objective yang akan dikerjakan dengan menggunakan *firefly algorithm* adalah sebagai berikut.

$$\sum_i^n n \text{ tipe kurva} * \text{target } Top$$

2. x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) membuat inisiasi awal atau *initial position* dan sebaran awal dari *firefly*, dimana posisi awal *firefly* merupakan nilai TDS di masing – masing tipe kurva. Pada pembuatan populasi awal sudah dilakukannya penentuan untuk :

γ = koefisien penyerapan cahaya

β_0 = *attractiveness* atau daya tarik *firefly*

α = parameter random

3. Menentukan atau menghitung tingkat intensitas cahaya pada setiap *firefly*, dimana instensitas cahaya pada *firefly* mewakili nilai TDS yang mendekati dari T_{op} atau waktu operasi relay yang mendekati dari target yang ditentukan, TDS yang nilainya semakin mendekati target maka *firefly* memiliki tingkat intensitas cahaya yang lebih terang, dimana sifat dari *firefly* akan menuju ke kawanan *firefly* yang memiliki intensitas cahaya yang lebih terang.

4. Update pergerakan *Firefly*, dalam proses pergerakan *firefly* menuju kepada *firefly* dengan tingkat intensitas cahaya yang lebih terang, maka diperlukan update pergerakan *firefly* dengan menggunakan formulasi seperti dibawah ini :

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \epsilon$$

4.3.1 Hasil TDS dan Tipe Kurva *Case Study-1* : Tipikal 1B

Pada *case study-1* : Tipikal A memiliki skema koordinasi proteksidi tegangan base di 2.4 kV dan memiliki batasan praktis berupa motor C-002-M sebesar 700 kW, maka didapatkan hasil optimasi menggunakan AMFA sebagai berikut :

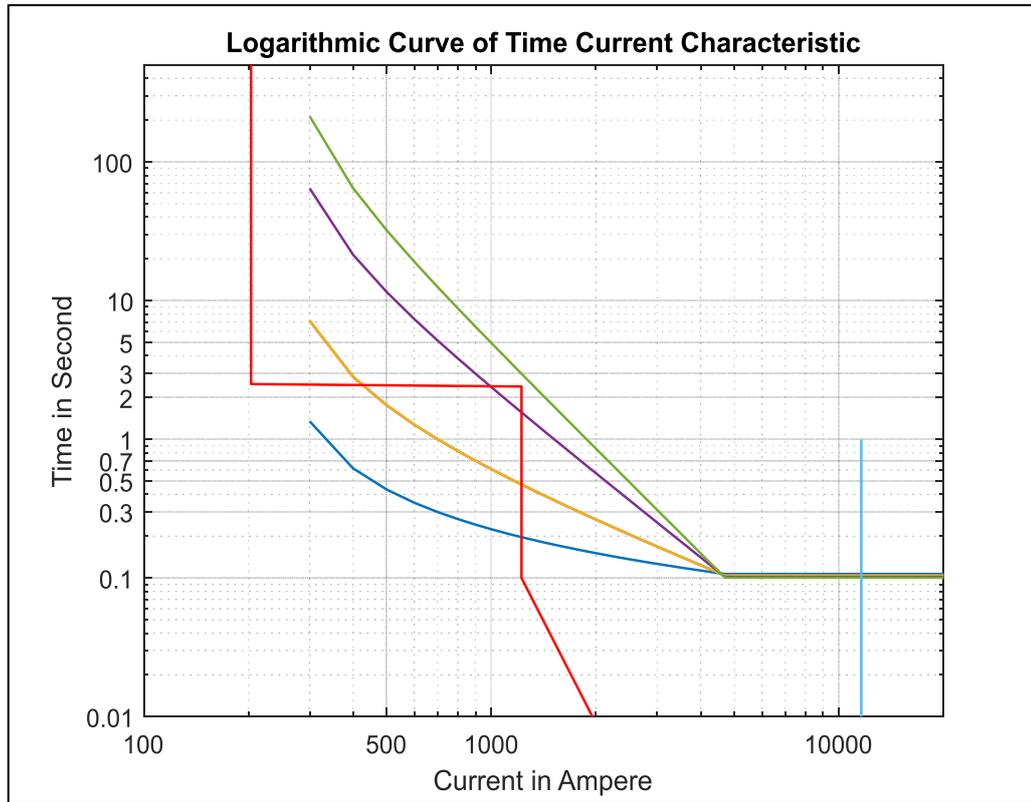
Tabel 4.5 Hasil optimasi TDS dan semua tipe kurva tanpa *boundary evaluation*

<i>ID</i>	<i>TDS/top</i>	<i>SI</i>	<i>VI</i>	<i>LTI</i>	<i>EI</i>	<i>UI</i>
R-1B	TDS	0.14	0.22	0.22	0.41	0.57
	top	0.1022	0.1075	0.1075	0.1001	0.1009
R-2B	TDS	0.27	0.25	0.25	0.18	0.18
	top	0.3045	0.3143	0.3143	0.3001	0.3023
R-3B	TDS	0.28	0.26	0.26	0.19	0.21
	top	0.3098	0.3184	0.3184	0.3108	0.3114

Berdasarkan dari hasil pada tabel 4.6 optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA didapatkan bahwa semua tipe kurva dapat dapat mendekati dari target t_{op} yang telah ditentukan. Jika tidak ada *boundary evaluation* terhadap batasan-batsan praktis yang digunakan berdasarkan hasil diatas kita dapat memilihi semua dari 5 tipe kurva yang di miliki oleh relay 51. Tetapi dengan adanya batasan praktis yang digunakan pada *case study1*: 1B yaitu motor C-002-M sebesar 700 kW didapatkan hasil optimasi setelah dilakukan *boundary evaluation* seperti pada tabel 4.7 dan gambar dibawah ini:

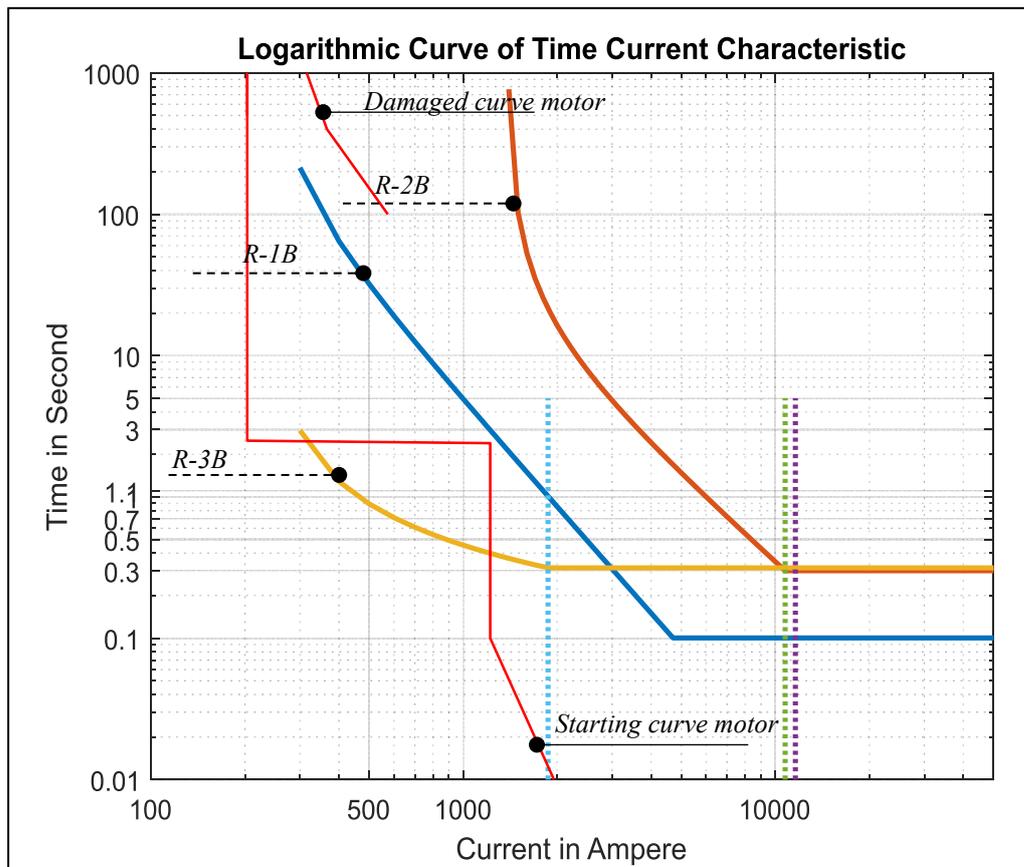
Tabel 4.6 Hasil TDS dan tipe kurva setelah dilakukan *boundary evaluation*

<i>ID</i>	<i>TDS/top</i>	<i>SI</i>	<i>VI</i>	<i>LTI</i>	<i>EI</i>	<i>UI</i>
R-1B	TDS	0.14	0.22	0.22	0.41	0.57
	top	0.1022	0.1075	0.1075	0.1001	0.1009
R-2B	TDS	0.27	0.25	0.25	0.18	0.18
	top	0.3045	0.3143	0.3143	0.3001	0.3023
R-3B	TDS	0.28	0.26	0.26	0.19	0.21
	top	0.3098	0.3184	0.3184	0.3108	0.3114



Gambar 4.11 Kurva TCC R1B sebelum *boundary evaluation*

Berdasarkan dari hasil pada tabel 4.6 dan gambar 4.11 didapatkan optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA dimana semua tipe kurva dapat mendekati dari target t_{op} yang telah ditentukan. Berdasarkan gambar 4.11 tanpa adanya *boundary evaluation* sebagai *constraint* maka akan dihasilkan TDS dan tipe kurva yang bersinggungan dengan kurva *starting motor*, maka dari itu digunakan *boundary evaluation* dalam mengoptimasi TDS dan tipe kurva agar didapatkan TDS dan tipe kurva yang sesuai dengan batasan – batasan praktis yang digunakan dimana dalam *case study ini boundary evaluation* yang digunakan berupa karakteristik kurva *starting motor* C-002-M , sehingga optimasi yang dihasilkan berupa TDS dan tipe kurva yang memiliki waktu kerja relay yang paling minimum serta tipe kurva yang tidak bersinggungan dengan kurva *starting motor* yang digunakan sebagai *constraint*.



Gambar 4.12 Kurva TCC case study-1:1B setelah *boundary evaluation*

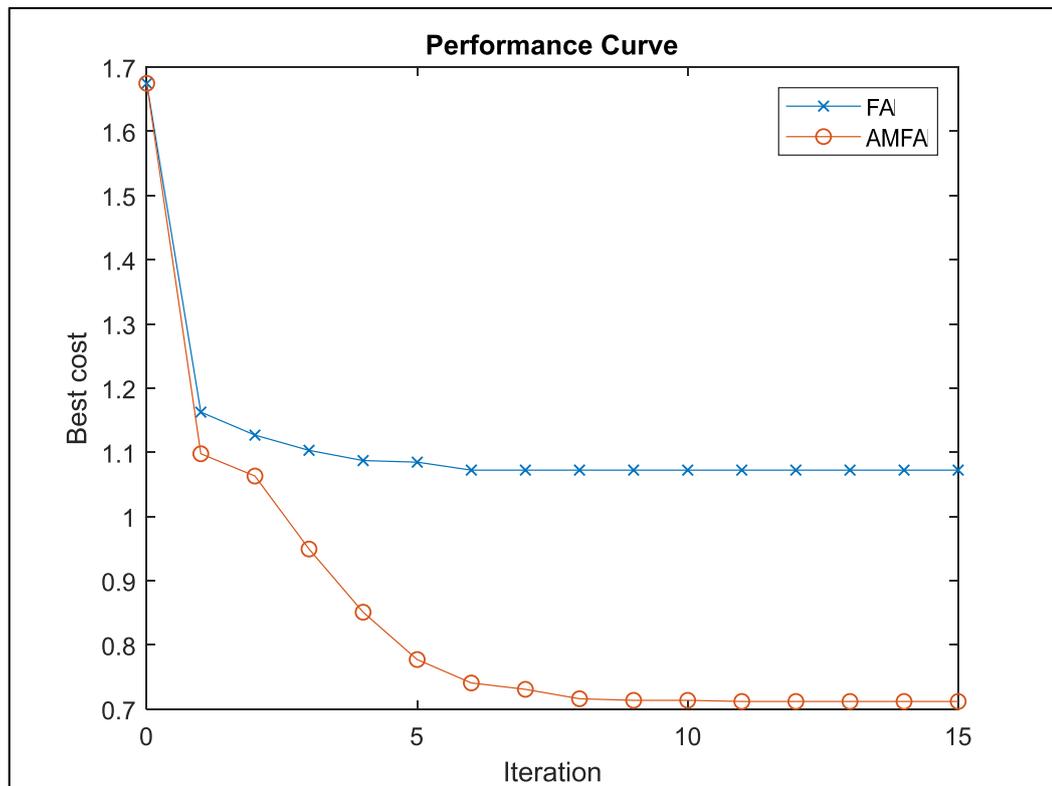
Tabel 4.7 Hasil total T_{op} case study-1 : Tipikal 1B minimum

ID	Curve Code	TDS	Top	Curve Type
R-1B	5	0.57	0.1009	Ultra Inverse
R-2B	4	0.18	0.3001	Extremely Inverse
R-3B	1	0.28	0.3098	Standard Inverse
$\Sigma top\ min$			0.7108	

Berdasarkan tabel 4.8 dimana setelah di lakukan *boundary evaluation* dengan batasan praktis yang berupa *starting motor curve* dan *damaged curve* pada motor C-0002-M didapatkan hasil TDS dan tipe kurva yang tidak dapat digunakan dikarenakan bersinggungan dengan *starting motor curve* sehingga dihasilkan TDS dan tipe kurva yang sesuai` pada R-1B adalah menggunakan dengan tipe *ultra inverse* dengan besaran TDS 0.57 dan mendapatkan target t_{op} sebesar 0.109 detik. Dan pada relay R-2B dan R-3B pemilihan TDS dan tipe kurva didapatkan berdasarkan total t_{op} yang paling minimum, sehingga didapatkan tipe kurva

extremely inverse dengan besaran TDS 0.18 dengan hasil t_{op} 0.3001 detik untuk relay R-2B dan tipe kurva *standart inverse* dengan besaran TDS 0.28 dengan hasil t_{op} 0.3098 detik untuk relay R-3B sehingga didapatkan CTI sebesar 0.2036 detik. Karena R-2B dan R-3B terletak pada jalur yang sama sehingga waktu kerja operasi relay antara kedua relay tersebut akan bekerja secara bersamaan, sehingga CTI yang dimiliki antara kedua relay tersebut akan kurang dari 0.2 detik.

Dengan hasil optimasi pada *case study-1*: Tipika 1B pada relay R-1B, R-2B, dan R-3B menggunakan AMFA didapatkan hasil dalam pencapaian *best cost* yang lebih baik dibandingkan dengan FA. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa AMFA memiliki keunggulan dibandingkan dengan FA yaitu dapat mencapai titik konvergensi dengan hasil yang lebih baik. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.13 yang merepresentasikan titik konvergensi dalam pencapaian target optimasi dalam menentukan TDS dan tipe kurva.



Gambar 4.13 Perbandingan kurva konvergensi AMFA dan FA *case study-1* :1B

4.3.2 Hasil TDS dan Tipe Kurva *Case Study-1* : Tipikal 2B

Pada *case study-1*: Tipikal 2B memiliki skema koordinasi proteksi di sisi tegangan base di 13.8 kV yang memiliki total jumlah relay sebanyak 5 dan memiliki batasan praktis berupa *damaged curve* trafo TR-NPK-2 sebesar 5000 kVa, dan *damaged curve* kabel berukuran 120 mm², maka didapatkan hasil optimasi menggunakan AMFA sebelum dilakukannya *boundary evaluation* :

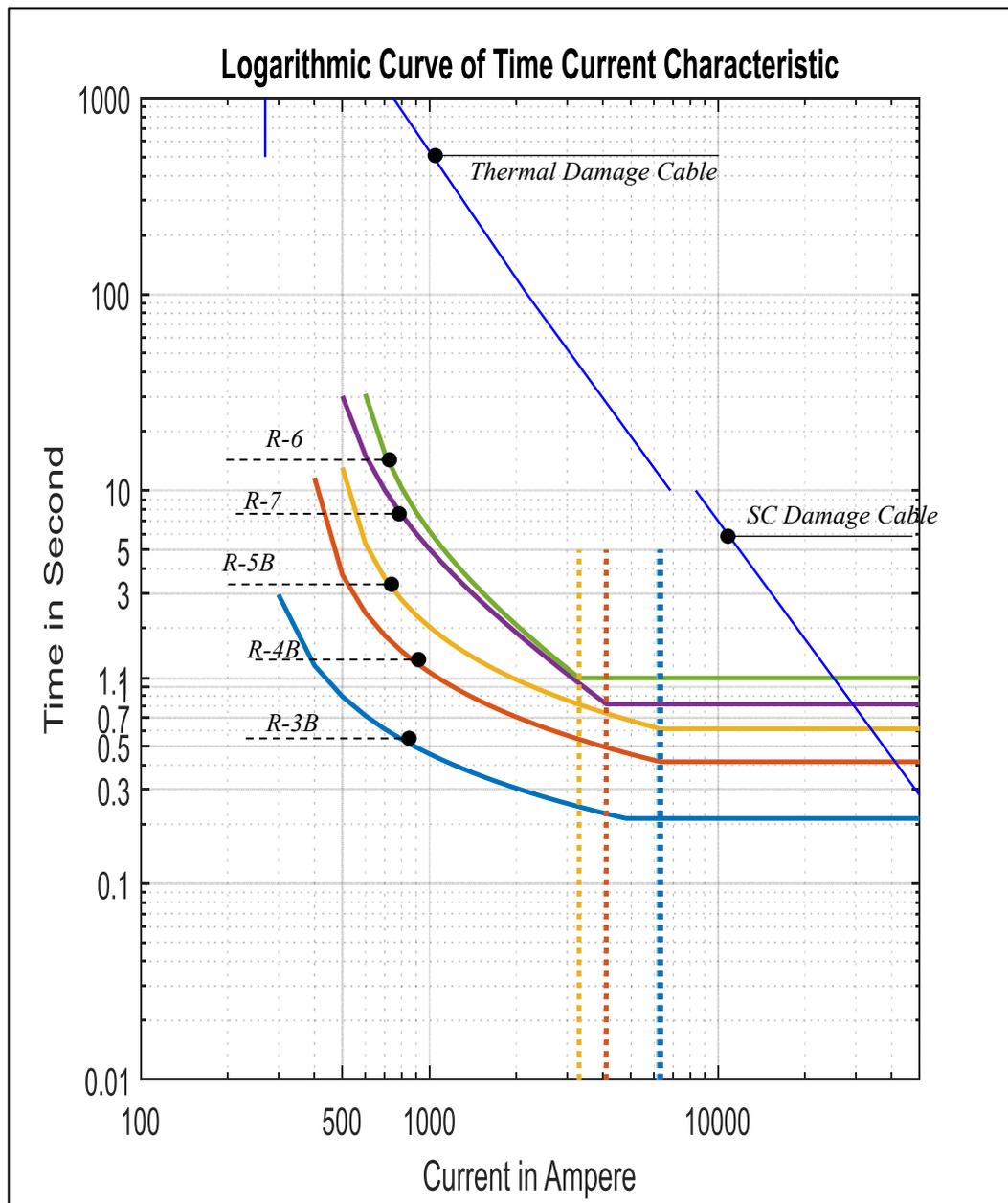
Tabel 4.8 Hasil optimasi TDS dan semua tipe kurva tanpa *boundary evaluation*

ID	TDS/top	SI	VI	LTI	EI	UI
R-3B	TDS	0.28	0.45	0.45	0.85	0.12
	top	0.2138	0.2157	0.2157	0.2192	0.2154
R-4B	TDS	0.52	0.76	0.76	1.26	1.68
	top	0.4076	0.4131	0.4131	0.4125	0.4103
R-5B	TDS	0.71	0.91	0.91	1.27	1.52
	top	0.6102	0.6123	0.6123	0.6124	0.6131
R-7	TDS	0.83	0.81	0.81	0.86	0.87
	top	0.8132	0.8104	0.8104	0.8182	0.8176
R-6	TDS	0.9	0.69	0.69	0.48	0.39
	top	1.1152	1.1087	1.1087	1.1167	1.1184

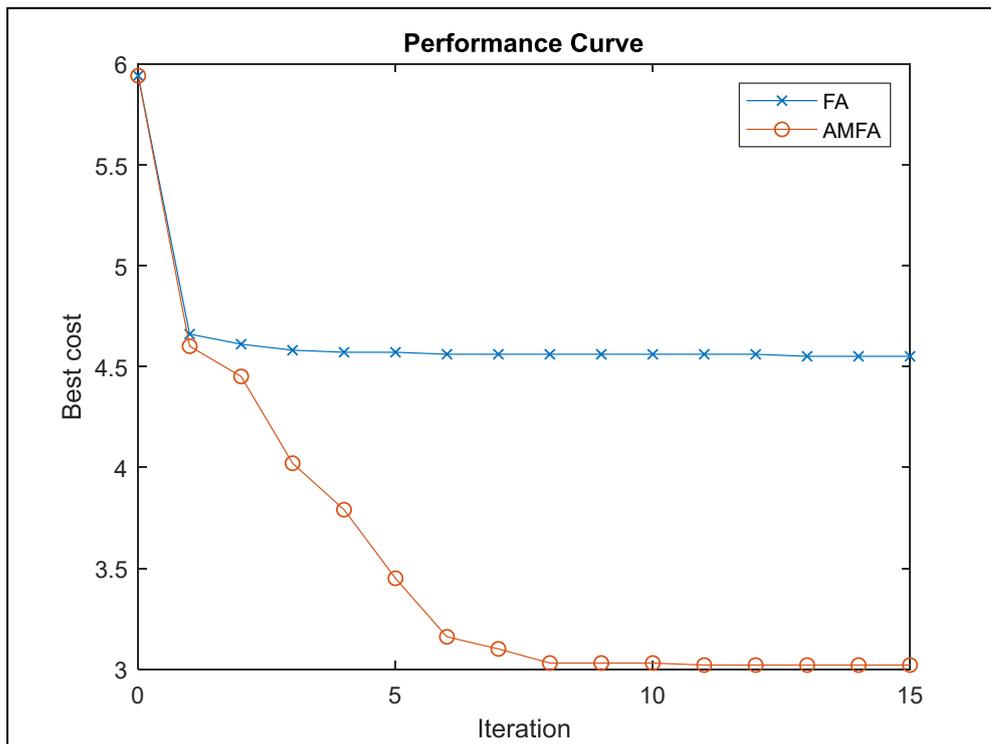
Berdasarkan pada tabel 4.9 hasil optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA didapatkan bahwa semua tipe kurva dapat mencapai target mendekati t_{op} sesuai dengan target yang ditentukan. Jika tidak ada *boundary evaluation* terhadap batasan-batasan praktis yang digunakan berdasarkan hasil diatas kita dapat memilih semua dari 5 tipe kurva yang di miliki oleh relay 51. Pada table 4.10 dan gambar 4.14 merupakan hasil optimasi setelah dilakukannya *boundary evaluation* yang dimana didapatkan TDS dan tipe kurva di setiap relay yang menghasilkan waktu kerja operasi relay atau t_{op} yang paling minimum serta tidak bersinggungan dengan *boundary evaluation* yang digunakan berupa *thermal damage curve* trafo, *thermal damaged curve*. Berdasarkan hasil optimasi pada tabel 4.10 CTI yang dihasilkan masing relay *primary* dan relay *backup* tidak ada yang melebihi standart CTI yang telah ditentukan berdasarkan standart yang digunakan [10] dimana range CTI yang digunakan berdasarkan standart *IEEE 242* adalah $0.2 \text{ s} < \text{CTI} < 0.4 \text{ s}$.

Tabel 4.9 Hasil total T_{op} case study-1 : Tipikal 2B minimum

ID	Curve Code	TDS	top	Curve Type
R-3B	1	0.28	0.2138	Standard Inverse
R-4B	1	0.52	0.4076	Standard Inverse
R-5B	1	0.71	0.6102	Standard Inverse
R-7	2	0.81	0.8104	Very Inverse
R-6	2	0.69	1.1087	Very Inverse
$\Sigma top min$		3.1507		



Gambar 4.14 Kurva TCC case study-1 : Tipikal 2B



Gambar 4.15 Perbandingan kurva konvergensi AMFA dan FA *case study-1:2B*

Berdasarkan gambar 4.15 didapatkan hasil optimasi pada *case study-1: Tipikal 2B* menggunakan AMFA didapatkan hasil dalam pencapaian *best cost* yang lebih baik dibandingkan dengan FA. Dengan melakukan optimasi dengan jumlah relay yang lebih banyak AMFA dapat mencapai titik konvergensi dengan hasil yang lebih baik.

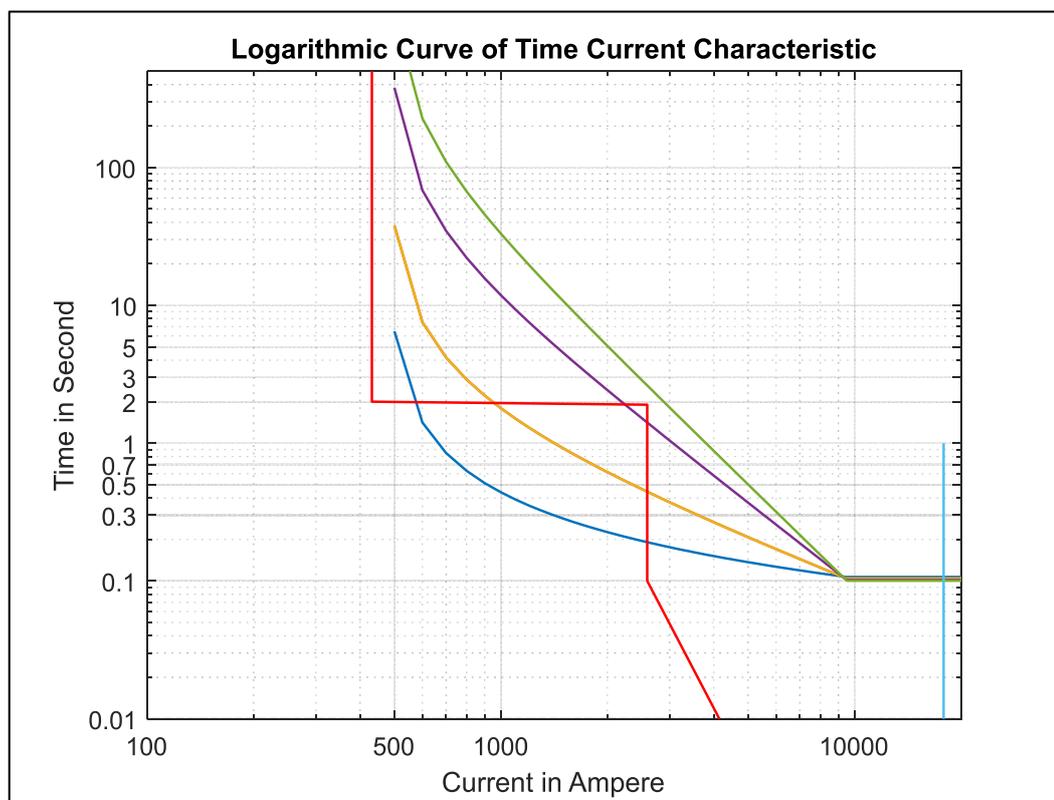
4.3.3 Hasil TDS dan Tipe Kurva *Case Study-2 : Tipikal 1A*

Pada *case study-2 : Tipikal 1A* yang memiliki batasan praktis berupa motor 2209-JCM sebesar 1500 kW, maka didapatkan hasil optimasi menggunakan AMFA sebagai berikut :

Tabel 4.10 Hasil optimasi TDS dan semua tipe kurva tanpa *boundary evaluation*

ID	TDS/top	SI	VI	LTI	EI	UI
R-1A	TDS	0.14	0.22	0.22	0.41	0.57
	top	0.1022	0.1075	0.1075	0.1001	0.1009
R-2A	TDS	0.33	0.37	0.37	0.43	0.46
	top	0.3072	0.3077	0.3078	0.3069	0.3024
R-3A	TDS	0.33	0.37	0.37	0.43	0.46
	top	0.3072	0.3077	0.3078	0.3069	0.3024

Berdasarkan dari hasil pada tabel 4.11 optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA didapatkan bahwa semua tipe kurva dapat dapat mendekati dari target t_{op} yang telah ditentukan. Jika tidak adanya *boundary evaluation* terhadap batasan-batsan praktis yang digunakan berdasarkan hasil diatas kita dapat memilihi semua dari 5 tipe kurva yang di miliki oleh relay 51. Tetapi dengan adanya batasan praktis yang digunakan pada *case study-2*: 1A yaitu *starting motor curve* pada motor 2209-JCM sebesar 1500 kW didapatkan hasil seperti pada tabel 4.13.



Gambar 4.16 Kurva TCC R1A sebelum boundary evaluation

Berdasarkan dari hasil pada tabel 4.11 dan gambar 4.16 didapatkan optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA dimana semua tipe kurva dapat mendekati dari target t_{op} sesuai dengan target yang telah ditentukan. Berdasarkan gambar 4.16 tanpa adanya *boundary evaluation* sebagai *constraint* maka akan dihasilkan TDS dan tipe kurva yang bersinggungan dengan *starting motor curve*, maka dari itu digunakan *boundary evaluation* untuk mendapatkan TDS dan tipe kurva yang memiliki target waktu operasi relay atau t_{op} yang paling minimum

disetiap relay dan tidak melanggar dengan batasan – batasan praktis atau *constraint* yang digunakan.

Tabel 4.11 Hasil TDS dan tipe kurva setelah dilakukan *boundary evaluation*

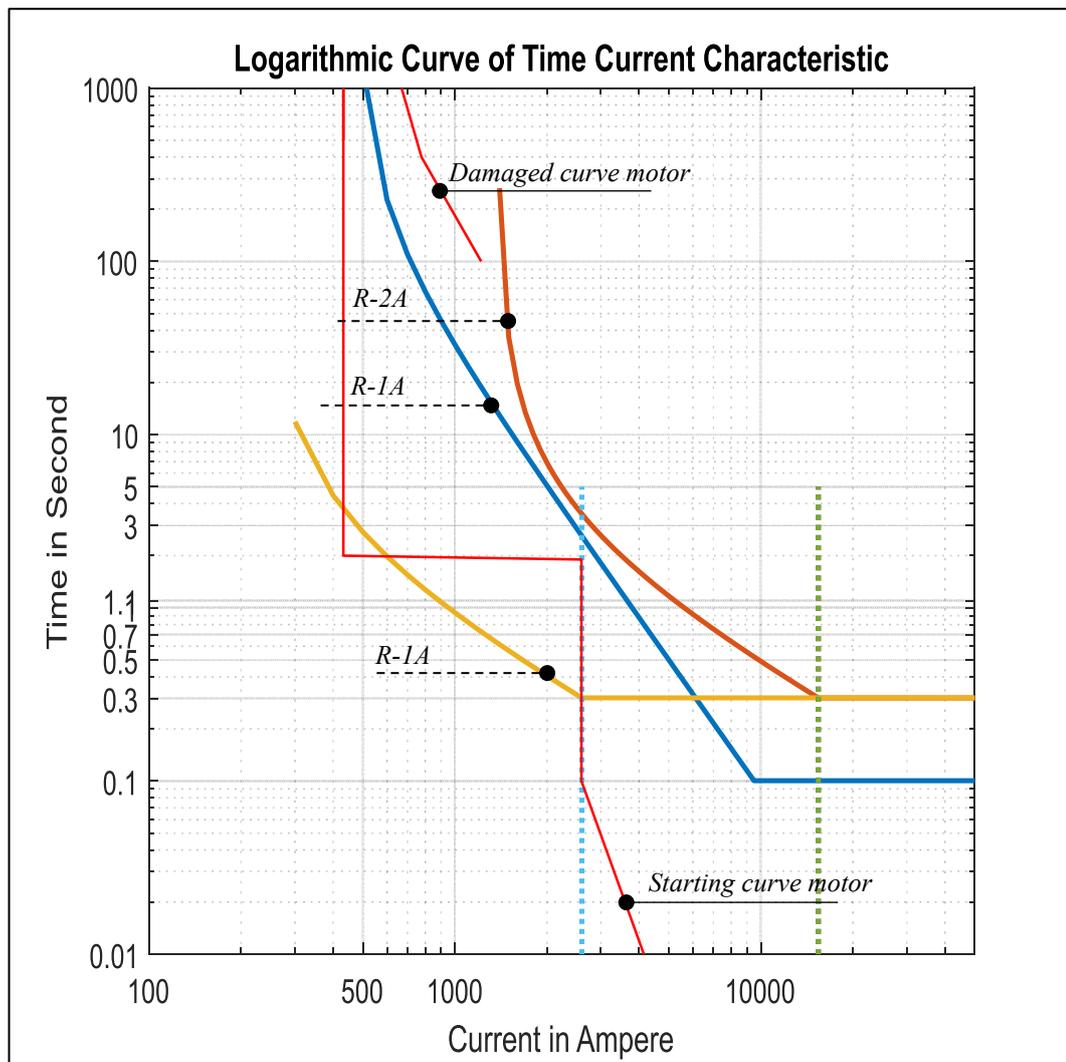
ID	TDS/top	SI	VI	LTI	EI	UI
R-1A	TDS	0.14	0.22	0.22	0.41	0.57
	top	0.1022	0.1075	0.1075	0.1001	0.1009
R-2A	TDS	0.33	0.34	0.34	0.43	0.46
	top	0.3102	0.3018	0.3018	0.3069	0.3074
R-3A	TDS	0.35	0.33	0.33	0.42	0.42
	top	0.3110	0.3020	0.3020	0.3063	0.3044

Setelah di lakukan *boundary evaluation* dengan batasan praktis yang berupa *starting motor curve* dan *damaged curve* pada motor 2209-JCM didapatkan pemilihan hasil TDS dan tipe kurva yang tidak bersinggungan dengan *starting motor curve* sehingga didapatkan hasil TDS dan tipe kurva yang optimum dan sesuai pada R-1A adalah menggunakan dengan tipe *ultra inverse* dengan besaran TDS 0.57 dan mendapatkan target t_{op} sebesar 0.1009 detik. Dan pada R-2A dan R-3A didapatkan hasil dengan TDS dan tipe kurva yang memiliki t_{op} yang paling minimum adalah *very inverse* dengan besaran TDS 0.34 dengan hasil t_{op} 0.3018 detik pada relay R-2A dan tipe kurva *very inverse* dengan besaran TDS 0.33 dengan hasil t_{op} 0.3020 detik pada relay R-3A, sehingga didapatkan CTI sebesar 0.2015 detik. Hal ini menandakan bahwa setelah dilakukan optimasi beserta dilakukannya *boundary evaluation* didapatkan tipe kurva yang tidak bertabrakan dengan batasan *starting motor curve* pada motor 2209-JCM dan dengan dilakukannya metode optimasi didapatkan TDS dan tipe kurva yang memiliki t_{op} yang paling minimum dari semua tipe kurva. Hasil optimasi setelah dilakukannya *boundary evaluation* dapat dilihat pada tabel 4.13 dan gambar 4.16.

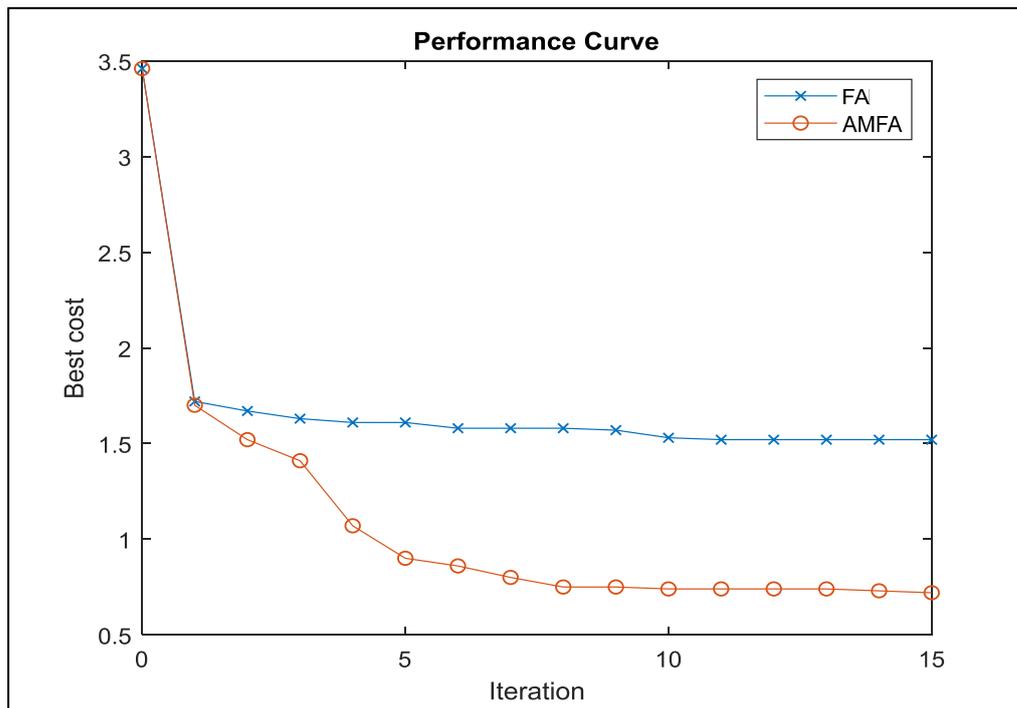
Tabel 4.12 Hasil total T_{op} *case study-2* : Tipikal 1A minimum

ID	Curve Code	TDS	top	Curve Type
R-1A	5	0.57	0.1009	Ultra Inverse
R-2A	2	0.34	0.3018	Very Inverse
R-3A	2	0.33	0.3020	Very Inverse
Σ top min			0.7047	

Dengan hasil optimasi pada *case study-2*: Tipikal 1A pada relay R-1A dan R-2A menggunakan AMFA didapatkan hasil dalam pencapaian *best cost* yang lebih baik dibandingkan dengan FA. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa AMFA memiliki keunggulan yaitu dapat mencapai titik konvergensi dengan hasil yang lebih baik. Kurva konvergensi untuk total t_{op} yang paling minimum dapat dilihat pada gambar 4.18. Kurva konvergensi menjelaskan total waktu operasi relay atau t_{op} berdasarkan dari hasil TDS dan tipe kurva yang paling minimum pada ketiga tipe kurva pada relay arus lebih pada relay R-1A ,R-2A dan R-3A, dimana didapatkan total t_{op} yang paling minimum pada *case study-2* : 1A sebesar 0.7047 detik.



Gambar 4.17 Kurva TCC *case study-2* : Tipikal 1A



Gambar 4.18 Perbandingan kurva konvergensi AMFA dan FA *case study-2* : 1A

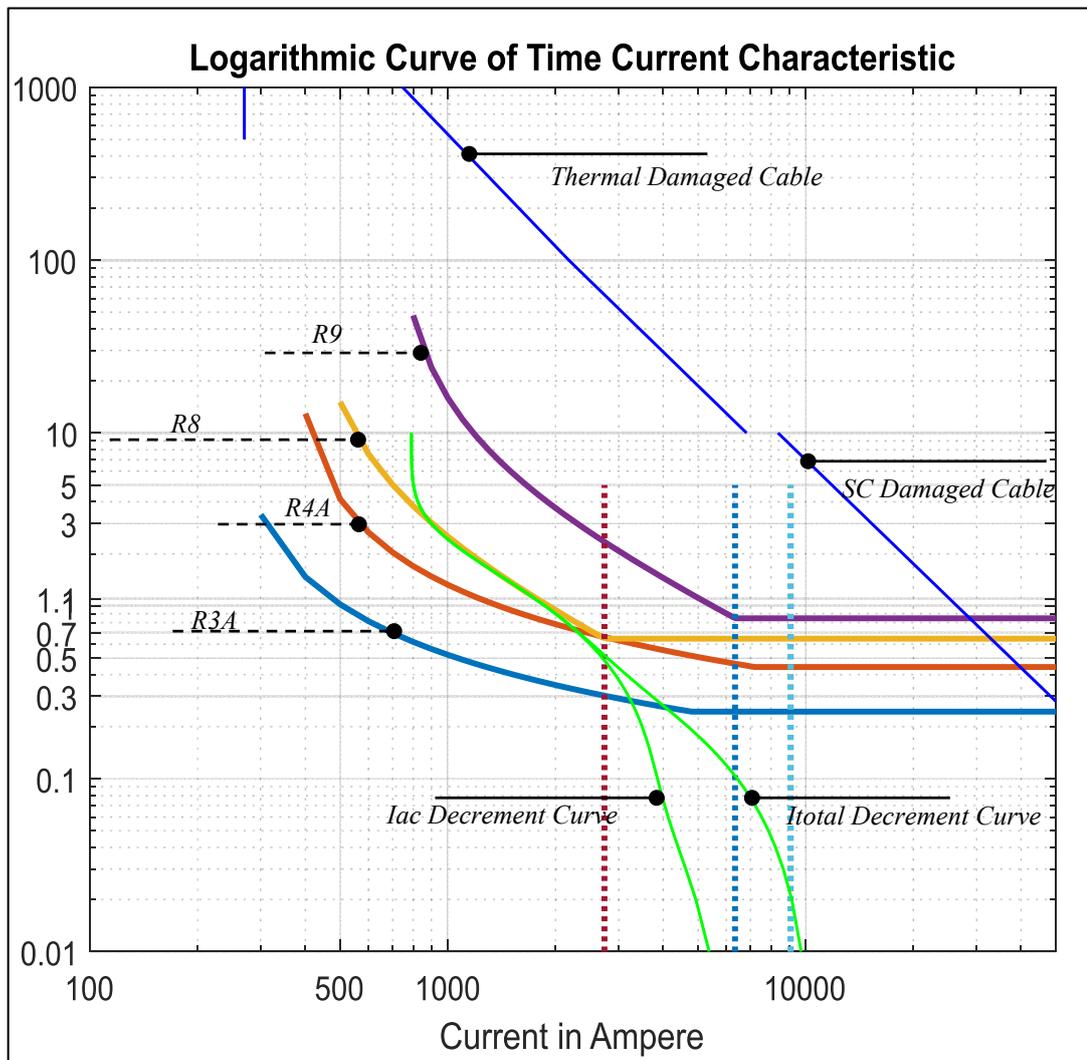
4.3.4 Hasil TDS dan Tipe Kurva *Case Study-2* : Tipikal 2A

Pada *case study-2* : Tipikal 2A memiliki skema koordinasi proteksi di sisi tegangan base di 13.8 kV yang memiliki total jumlah relay sebanyak 4 buah relay dan memiliki batasan praktis berupa *damaged curve* trafo 01-TR-03 sebesar 5000 kVa, *damaged curve* kabel berukuran 120 mm², dan *decrement curve* pada GTG Hitachi K1A dan didapatkan hasil optimasi menggunakan AMFA sebelum dilakukannya *boundary evaluation* sebagai berikut :

Tabel 4.13 Hasil optimasi TDS dan semua tipe kurva tanpa *boundary evaluation*

ID	TDS/top	SI	VI	LTI	EI	UI
R-3A	TDS	0.33	0.51	0.51	0.97	1.37
	top	0.2403	0.2415	0.2415	0.2441	0.2421
R-4A	TDS	0.58	0.93	0.93	1.78	2.5
	top	0.4407	0.4425	0.4425	0.4417	0.441
R-8	TDS	0.54	0.42	0.42	0.3	0.25
	top	0.6428	0.6411	0.6411	0.6481	0.6492
R-9	TDS	0.81	0.76	0.76	0.69	0.66
	top	0.8473	0.8403	0.8403	0.8418	0.8427

Berdasarkan dari hasil pada tabel 4.14 optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA didapatkan bahwa semua tipe kurva dapat mencapai target top sesuai dengan diinginkan. Jika tidak ada *boundary evaluation* terhadap batasan-batasan praktis yang digunakan berdasarkan hasil diatas kita dapat memilih semua dari 5 tipe kurva yang dimiliki oleh relay 51. Kemudian dilakukannya *boundary evaluation* dengan batasan praktis berupa *thermal damage curve* trafo, *thermal damaged curve* kabel, yang membedakan dengan tipikal 2B adalah terdapat batasan praktis berupa *decrement curve* dari GTG Hitachi, dimana *decrement curve* berguna sebagai panduan besaran arus hubung singkat yang dapat dihasilkan oleh GTG Hitachi jika terjadi hubung singkat di terminal generator. Sehingga berdasarkan dari batasan praktis yang digunakan didapatkan hasil sebagai berikut:

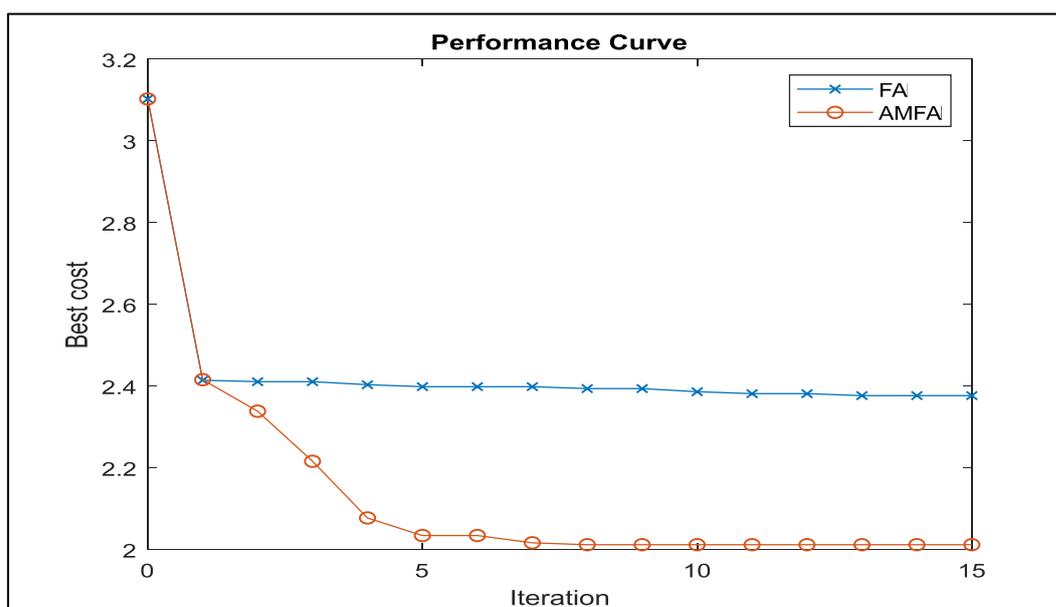


Gambar 4.19 Kurva TCC Case Study-2 : Tipikal 2A

Tabel 4.14 Hasil total T_{op} case study-2 : Tipikal 2A minimum

ID	Curve Code	TDS	top	Curve Type
R-3A	1	0.33	0.2413	Standar Inverse
R-4A	1	0.58	0.4407	Standar Inverse
R-8	2	0.42	0.6411	Very Inverse
R-9	2	0.76	0.8403	Very Inverse
$\Sigma top\ min$			2.1634	

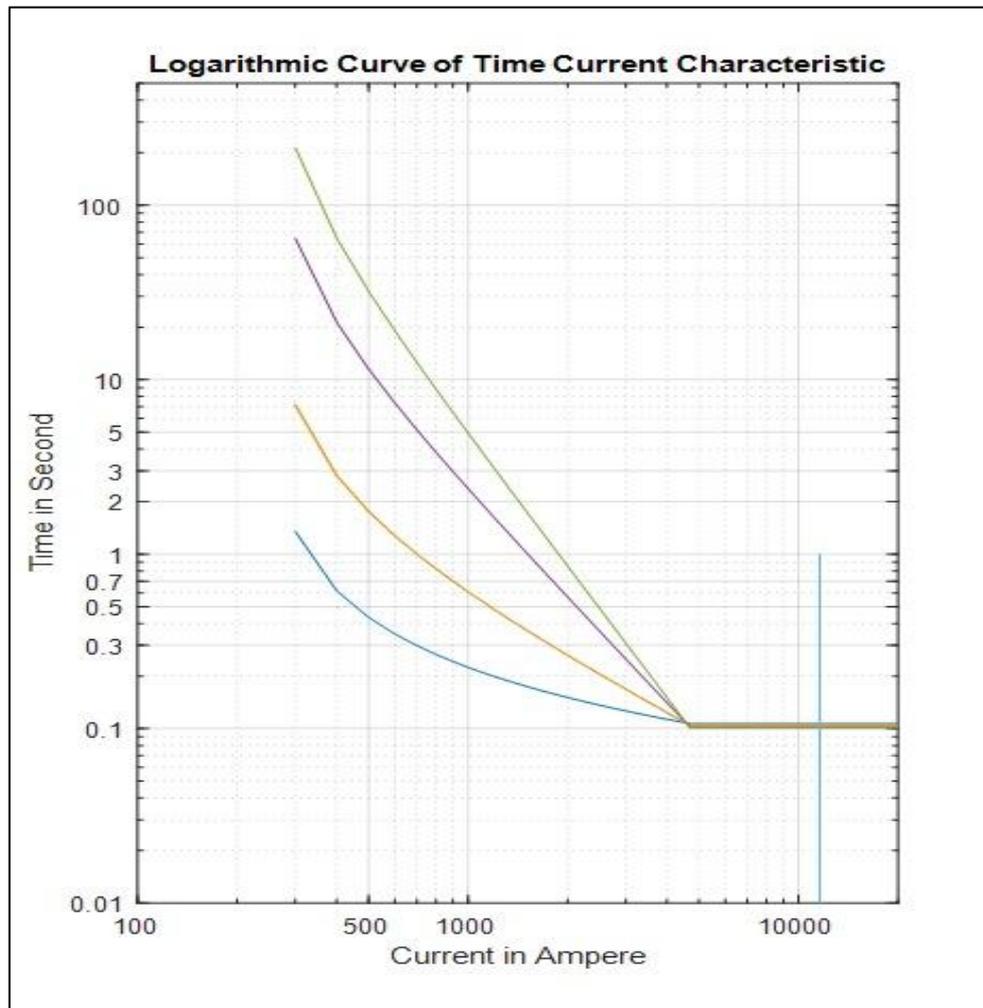
Berdasarkan hasil optimasi dengan dilakukannya *boundary evaluation* maka didapatkan hasil seperti pada tabel 4.15 dimana didapatkan nilai top yang paling minimum disetiap posisi relay dari semua tipe kurva pada relay arus lebih dengan mempertimbangkan *left boundary* sehingga didapatkan TDS dan tipe kurva yang paling optimum dan minimum. Dan *clearing time interval* yang dihasilkan di setiap relay memenuhi syarat yang ditentukan yaitu $0.2\ s < CTI < 0.4\ s$. Sehingga dihasilkan dalam pemodelan kurva TCC seperti gambar 4.20 yang berupa tipe kurva di masing – msaing relay dengan batasan batasan yang digunakan. Dalam melakukan optimasi menggunakan AMFA dapat menghsilkan titik konvergensi dengan hasil TDS dan tipe kurva atau *best cost* yang lebih baik dibandingkan dengan FA. Dengan melakukan optimasi dengan jumlah relay yang lebih banyak AMFA dapat mencapai titik konvergensi dengan hasil yang lebih baik.



Gambar 4.20 Perbandingan kurva konvergensi AMFA dan FA case study-2 : 2A

4.4 Analisa Hasil Optimasi TDS & Tipe Kurva Menggunakan AMFA dengan *Boundary Evaluation*

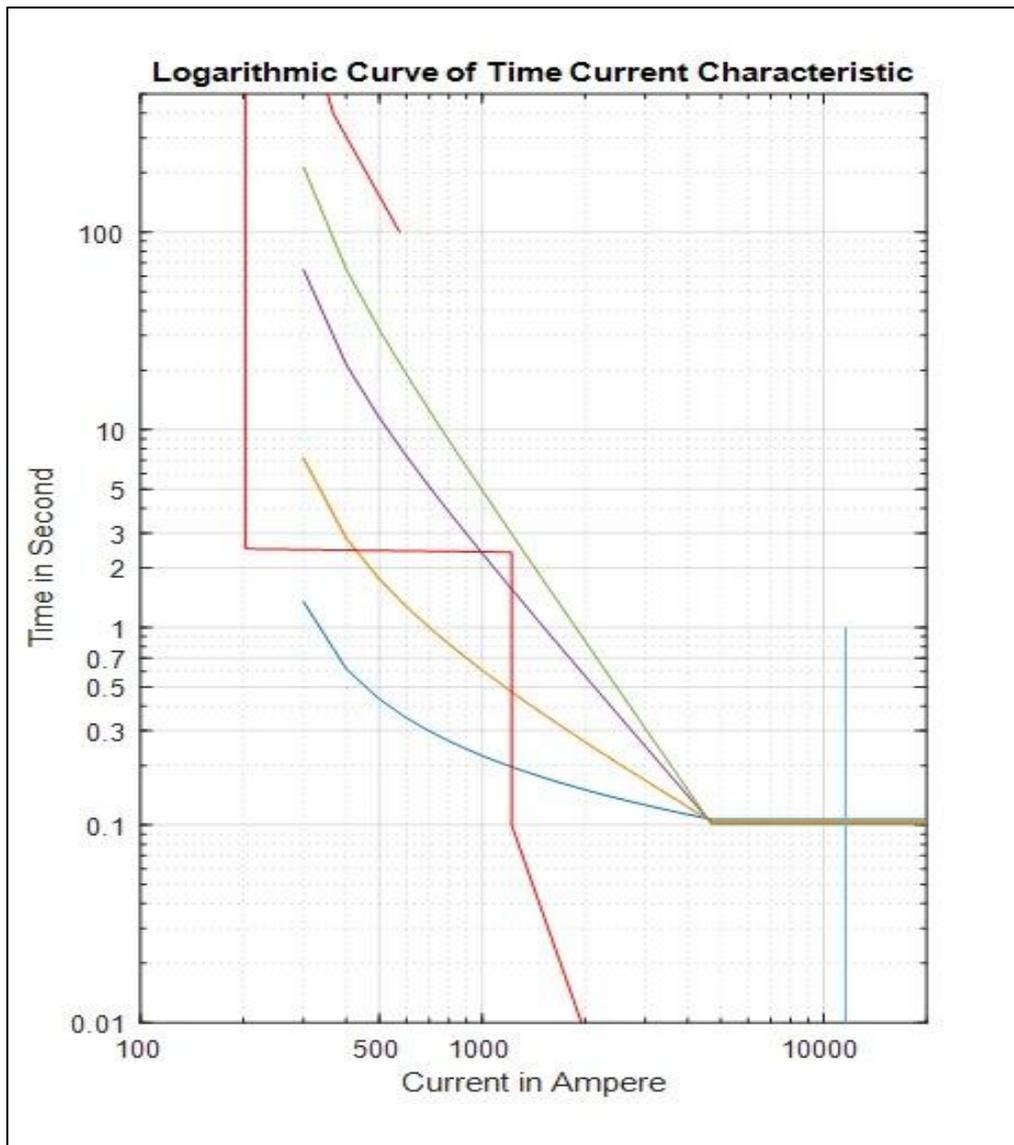
4.4.1 Analisa hasil dengan *boundary evaluation motor starting curve*



Gambar 4.21 Hasil Optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA

Untuk hasil nilai TDS dan Tipe Kurva yang didapatkan menggunakan AMFA didapatkan bahwa jika terjadi gangguan hubung singkat maka tipe kurva pada relay proteksi arus lebih dapat mencapai target t_{op} yang diinginkan hanya memiliki nilai TDS yang berbeda-beda di setiap kurva. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.19 dimana dapat dilihat bahwa semua tipe kurva pada relay arus lebih dapat mencapai target waktu kerja relay sebesar 0.01 s pada saat terjadi arus gangguan yang diperlihatkan pada garis vertical biru. Selain itu berdasarkan pabrikan relay yang gunakan yaitu sepam S, T, dan G series [13], dimana arus gangguan akan berada pada daerah saturasi jika besaran arus gangguan sebesar $20 \times I_{pickup}$,

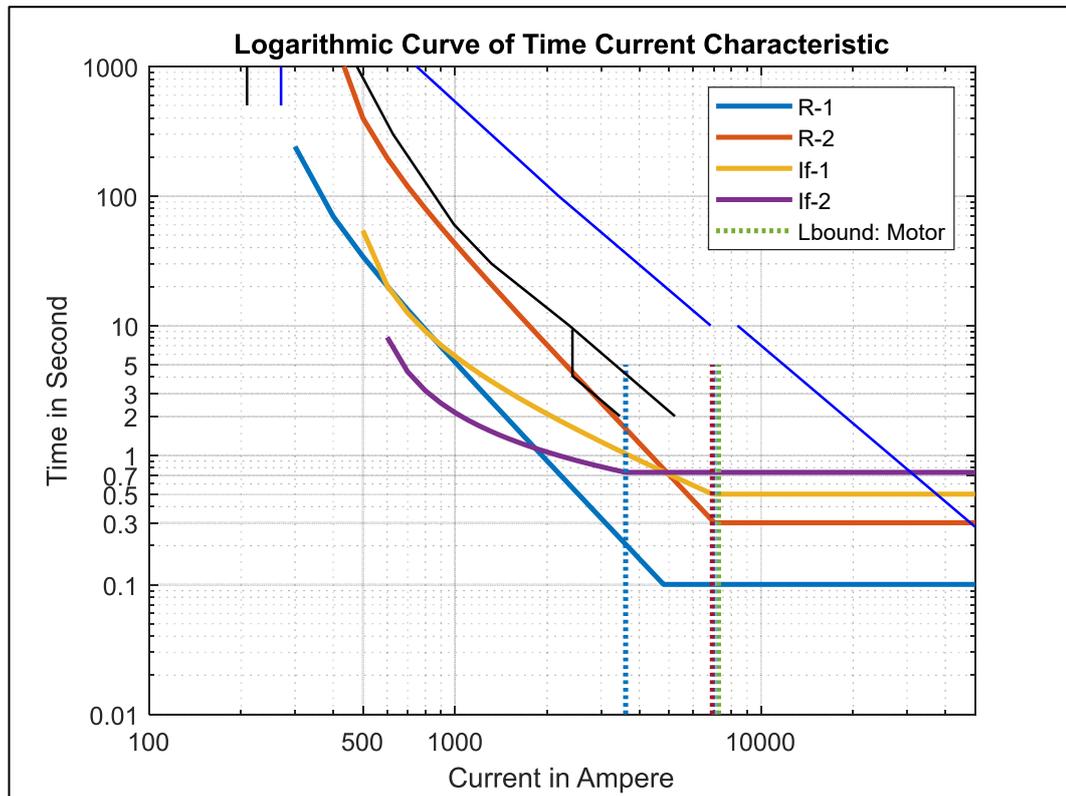
sehingga garis lurus di setiap kurva menunjukkan area saturasi di setiap tipe kurva. Pada gambar 4.21 merupakan tcc kurva dari hasil optimasi TDS dan semua tipe kurva yang ditambahkan dengan motor *starting curve* pada motor C-002-M sebelum dilakukannya *boundary evaluation*, sehingga dapat terlihat ada beberapa tipe kurva yang berhimpit dan bertabrakan.



Gambar 4.22 Hasil TDS dan tipe kurva sebelum dilakukan *boundary evaluation*

4.4.2 Analisa hasil dengan *boundary evaluation* kurva relay

Pada *case study-1* : 2B dengan tidak ada batasan praktis berupa kurva *starting motor* didapatkan hasil optimasi TDS dan tipe kurva berdasarkan pada tabel 4.10 dengan semua tipe kurva pada setiap tipe kurva adalah *standard inverse* dikarenakan pada *case study* ini mempertimbangkan *left boundary* berupa relay yang berada pada posisi sebelumnya dan *right boundary* berupa *thermal curve trafo*. Jika pada *case study* hanya melakukan optimasi hanya untuk mendapatkan nilai t_{op} yang paling minimum di setiap kurva tanpa mempertimbangkan adanya *left boundary* maka akan didapatkan hasil sistem koordinasi tipe kurva antar relay yang bersinggungan dengan relay sebelumnya, hasil TCC ini dapat dilihat pada gambar 4.24 :



Gambar 4.23 Hasil TCC *case study-1*: 2B sebelum adanya *boundary evaluation*

Pada gambar 4.24 apabila kitanya hanya melakukan optimasi dalam menentukan nilai TDS dan tipe kurva dengan mencari nilai yang paling minimum di setiap tipe kurva tanpa mempertimbangkan adanya *left boundary* akan didapatkan tipe kurva yang saling bersinggungan dengan kurva sebelumnya yang dapat menimbulkan *malfunction trip* jika terjadi adanya gangguan hubung singkat.

Sehingga dalam penelitian ini diperlukannya *boundary evaluation* agar hasil optimasi pada TDS dan tipe kurva yang dihasilkan dapat sesuai dengan karakteristik dan batasan praktis yang ada pada real dunia industri. *Boundary evaluation* pada penelitian ini memiliki tahapan sebagai berikut :

1. Proses optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan *adaptive modified firefly* menghasilkan nilai TDS di masing – masing tipe kurva dengan target waktu kerja operasi relay yang sama.
2. Hasil optimasi berupa TDS di masing – masing tipe kurva dilakukan evaluasi terhadap *constraint* atau batasan praktis yang digunakan berupa *motor starting curve* , *decremenet curve* , *cable damaged curve* dan *transformator damaged curve*.
3. Proses evaluasi dilakukan dengan cara melakukan perbandingan besaran arus terhadap waktu yang dimiliki tipe kurva terhadap *boundary* yang digunakan. Jika pada titik waktu yang sama, besaran arus relay kurang dari besaran arus *boundary* maka tipe kurva jenis tersebut akan dilakukan eliminasi dari opsi pemilihan.
4. Setelah dilakukan eliminasi terhadap semua tipe kurva maka akan didapatkan beberapa tipe kurva yang mungkin untuk digunakan. Pemilihan tipe kurva terbaik merupakan tipe kurva yang memiliki jumlah minimum perubahan arus terhadap waktu.
5. Didapatkan plotting *time current curve* relay dengan tipe kurva yang dipilih beserta *boundary* yang digunakan.

Berdasarkan dari hasil yang didapatkan dari beberapa *case study* dan tipikal skema proteksi yang dilakukan didapatkan optimasi menggunakan AMFA kemampuan pergerakan yang lebih baik untuk mengupdate *best cost* yang lebih baik sesuai dengan *constraint* yang digunakan jika dibandingkan dengan FA.. Untuk hasil yang didapatkan pada FA dan AMFA tidak memiliki perbedaan yang significant yang membedakan hanya pada pencapaian titik konvergensi, hal ini dapat dilihat pada salah satu contoh gambar yang menunjukkan titik konvergensi di masing-masing relay.

4.4.3 Analisa hasil perbandingan optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan AMFA *boundary evaluation* dan *conventional method*

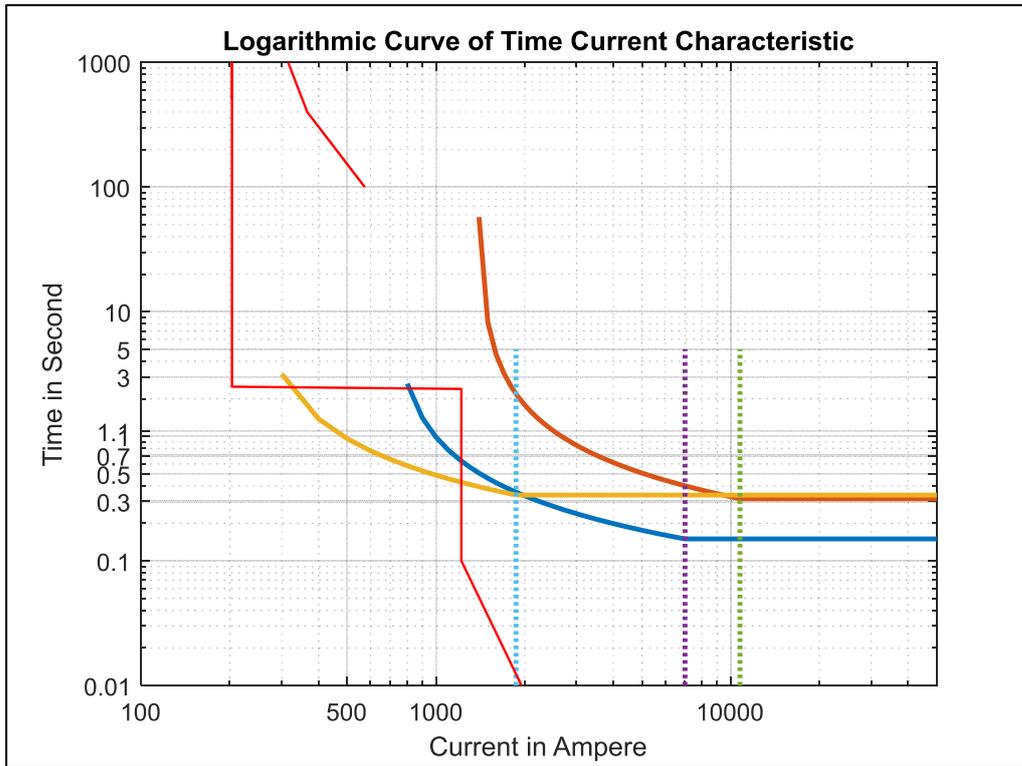
Pada bagian ini akan dilakukannya analisa perbandingan hasil optimasi dalam menentukan nilai TDS dan Tipe Kurva menggunakan *Adaptive Modified Firefly algorithm* (AMFA) dengan menggunakan *boundary evaluation* dengan *Conventional Method* pada semua *case study* baik *case study-1* : 1B dan 2B dan *case study-2* : 1 A dan 2A. Hal ini berguna untuk dapat membandingkan tingkat konvergensi antara metode yang digunakan dengan metode konvensional. Perbandingan tersebut berguna untuk dapat mengetahui perbandingan pencapaian optimasi dalam mendapatkan total waktu kerja operasi relay atau t_{op} yang paling minimum serta pemilihan tipe kurva yang paling minimum dalam sistem koordinasi proteksi. Maka akan dihasilkan hasil seperti pada tabel dan gambar dibawah ini:

Tabel 4.15 Hasil CS-1 : 1B menggunakan AMFA dan *Conventional Method*

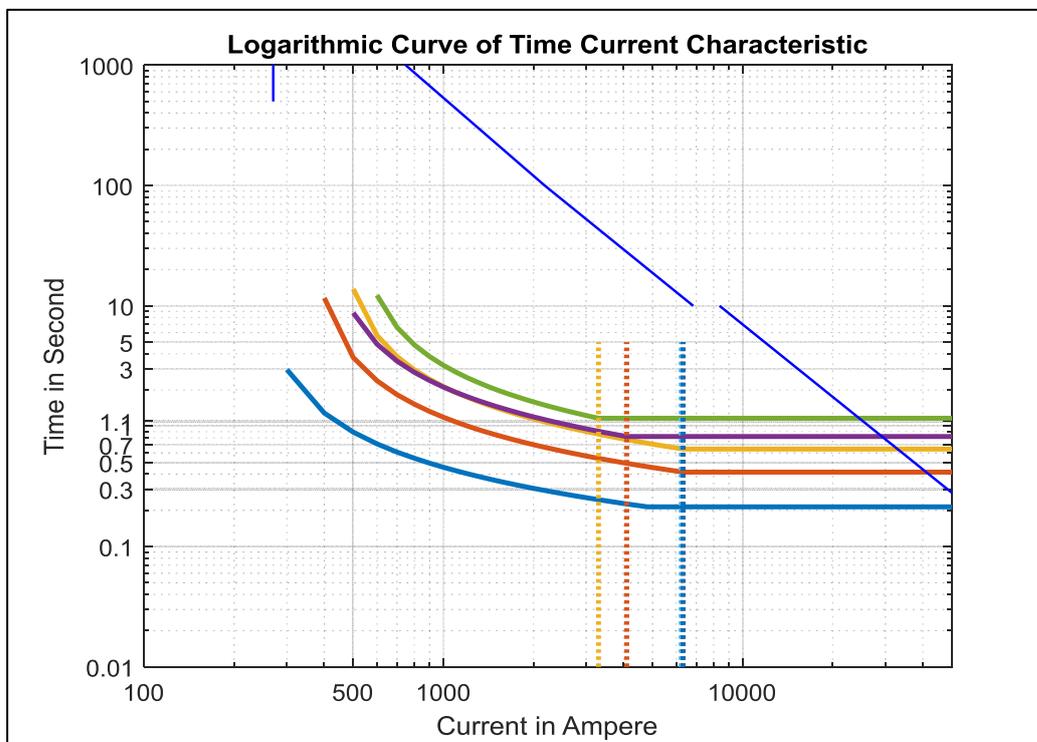
ID	AMFA <i>Boundary Evaluation</i>			Conventional Method		
	TDS	Top	Curve Type	TDS	Top	Curve Type
R-1B	0.57	0.1009	Ultra Inverse	0.15	0.1004	Standard Inverse
R-2B	0.18	0.3001	Extremely Inverse	0.28	0.3075	Standard Inverse
R-3B	0.28	0.3098	Standard Inverse	0.30	0.3102	Standard Inverse
Σtop	0.7108			0.7181		

Tabel 4.16 Hasil CS-1 : 2B menggunakan AMFA dan *Conventional Method*

ID	AMFA <i>Boundary Evaluation</i>			Conventional Method		
	TDS	Top	Curve Type	TDS	Top	Curve Type
R-3B	0.28	0.2138	Standard Inverse	0.28	0.2138	Standard Inverse
R-4B	0.52	0.4176	Standard Inverse	0.51	0.4146	Standard Inverse
R-5B	0.71	0.6102	Standard Inverse	0.75	0.6243	Standard Inverse
R-7	0.81	0.8104	Very Inverse	0.83	0.8311	Standard Inverse
R-6	0.69	1.1087	Very Inverse	0.95	1.2166	Standard Inverse
Σtop	2.9469			3.0866		



Gambar 4.24 Hasil TDS dan Tipe Kurva menggunakan *conventional method* pada *case study-1 : 1B*



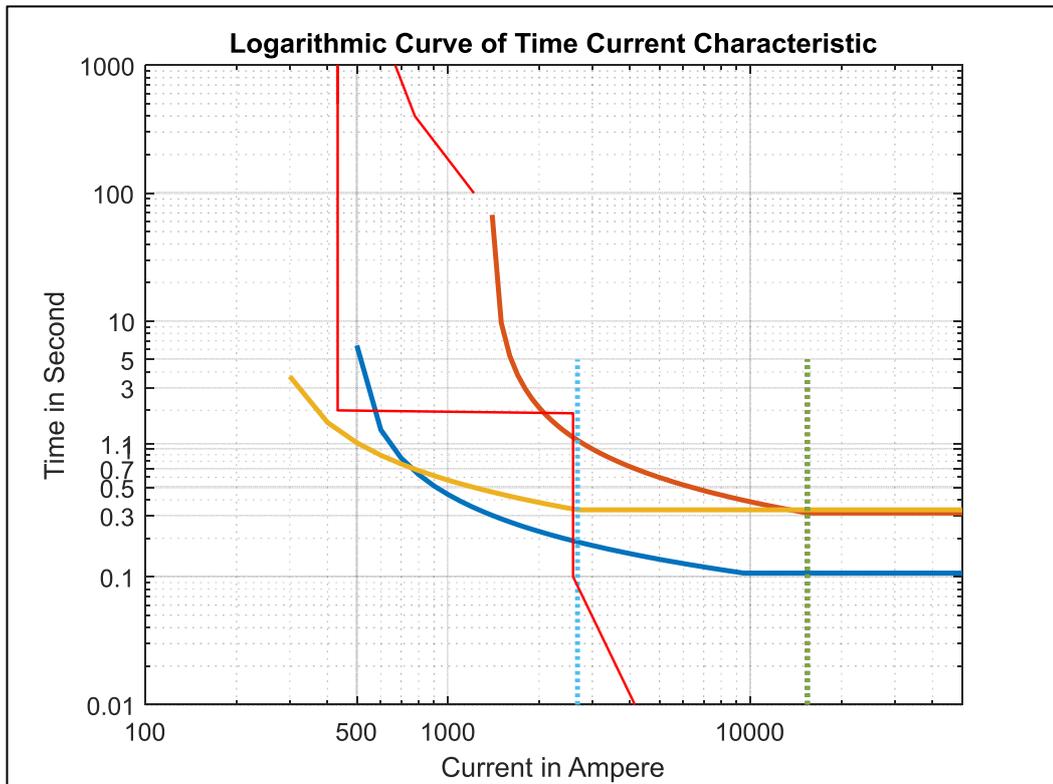
Gambar 4.25 Hasil TDS dan Tipe Kurva menggunakan *conventional method* pada *case study-1 : 2B*

Tabel 4.17 Hasil CS-2 : 1A menggunakan AMFA dan Conventional Method

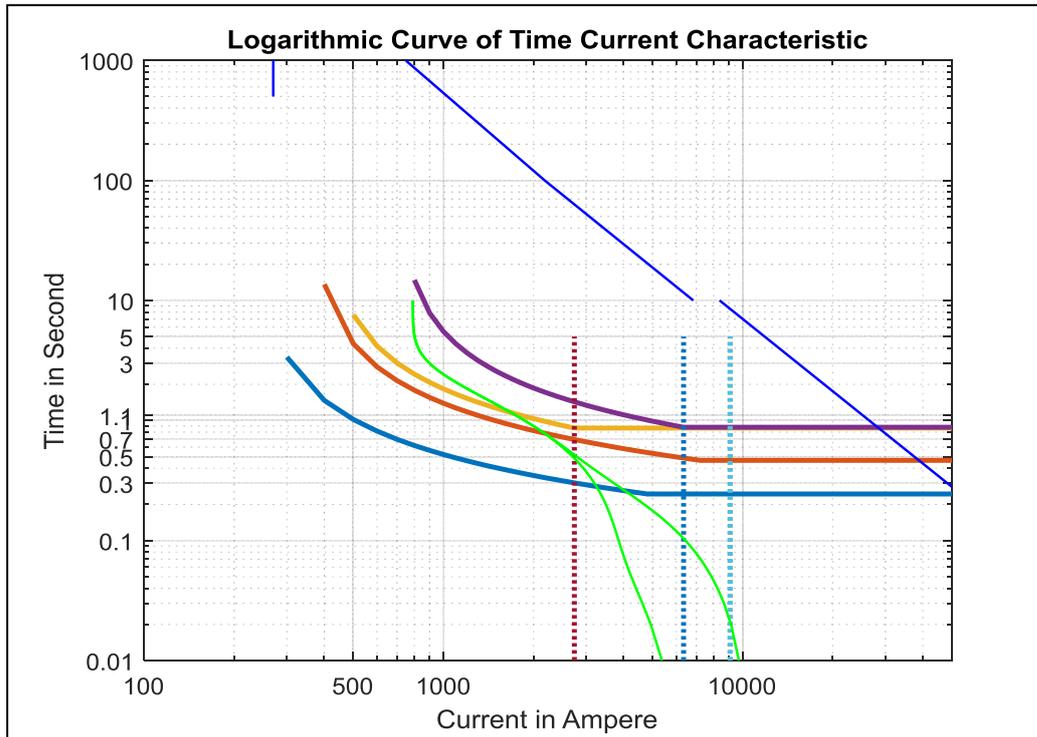
ID	AMFA Boundary Evaluation			Conventional Method		
	TDS	Top	Curve Type	TDS	Top	Curve Type
R-1A	0.57	0.1009	Ultra Inverse	0.14	0.1002	Standard Inverse
R-2A	0.34	0.3018	Very Inverse	0.33	0.3102	Standard Inverse
R-3A	0.33	0.302	Very Inverse	0.35	0.3194	Standard Inverse
Σtop	0.7047			0.7318		

Tabel 4.18 Hasil CS-2 : 2B menggunakan AMFA dan Conventional Method

ID	AMFA Boundary Evaluation			Conventional Method		
	TDS	Top	Curve Type	TDS	Top	Curve Type
R-3A	0.33	0.2413	Standar Inverse	0.33	0.2413	Standar Inverse
R-4A	0.58	0.4407	Standar Inverse	0.61	0.4611	Standard Inverse
R-8	0.42	0.6411	Very Inverse	0.72	0.6682	Standard Inverse
R-9	0.76	0.8403	Very Inverse	0.84	0.8722	Standard Inverse
Σtop	2.1634			2.2428		



Gambar 4.26 Hasil TDS dan Tipe Kurva menggunakan *conventional method* pada *case study-2 : 1A*



Gambar 4.27 Hasil TDS dan Tipe Kurva menggunakan *conventional method* pada case study-2 : 2A

Berdasarkan hasil optimasi TDS dan tipe kurva menggunakan metode AMFA *boundary evaluation* dan dibandingkan dengan metode konvensional dengan tipe kurva yang sama maka didapatkan hasil perbandingan seperti pada tabel 4.16 dan tabel 4.17 dimana dengan metode AMFA dapat memiliki total waktu kerja operasi relay atau t_{op} yang lebih minimum jika dibandingkan dengan metode konvensional. Pada tabel 4.16 dan 4.17 pada relay R-1B dan R-1A proses perhitungan menggunakan metode konvensional mendapat t_{op} yang minimum jika dibandingkan dengan metode AMFA *boundary evaluation*. Tetapi jika dalam proses optimasi dengan mempertimbangkan adanya *motor starting curve* maka tipe kurva pada R-1B dan R-1A akan bersinggungan dengan *motor starting curve*. Maka dari itu t_{op} yang minimum berdasarkan TDS dan tipe kurva yang digunakan di setiap relay jika dibandingkan dengan *constraint* berupa motor induksi bukan merupakan TDS dan tipe kurva yang sesuai sehingga perlu adanya *evaluation boundary* pada hasil TDS dan tipe kurva untuk menghasilkan TDS dan tipe kurva yang paling minimum dan optimal jika dibandingkan dengan adanya *constraint* yang berkaitan dengan batasan-batasan praktis dunia industri.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian yang telah dilakukan dalam melakukan optimasi TDS dan tipe kurva pada relay arus lebih di PT. Pupuk Kujang Cikampek dengan menggunakan metode *Adaptive Modified Firefly Algorithm* dengan mempertimbangkan karakteristik beban dan Manuver Operasi dapat disimpulkan :

1. Hasil optimasi menggunakan AMFA didapatkan semua Tipe Kurva pada relay arus lebih yang digunakan dapat mencapai waktu kerja relay dan *clearing time interval* yang diinginkan dengan nilai TDS yang berbeda, sehingga kita dapat memilih dari beberapa tipe kurva dalam melakukan koordinasi proteksi dengan catatan tanpa adanya batasan – batasan praktis atau karakteristik beban.
2. Dengan adanya *boundary evaluation* pada semua tipe kurva didapatkan hasil tipe kurva yang paling optimum jika dalam sistem koordinasi mempertimbang batasan-batasan praktis yang ada seperti salah satu contohnya adalah *motor starting curve*.
3. Metode optimasi menggunakan *Adaptive Modified Firefly Algorithm* dapat digunakan sebagai alat bantu perhitungan dalam menentukan nilai TDS dan tipe kurva karena memiliki kemampuan yang teliti dan memiliki kecepatan dalam mencapai titik konvergensi.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya akan dilanjutkan sebagai berikut :

1. Perlu dilakukannya dalam sistem kelistrikan yang *loop* atau ring.
2. Optimasi dapat dilakukannya dengan mempertimbangkan kinerja relay *instantaneous* (Kode ANSI 50) agar dapat memperbaiki keandalan relay dalam melakukan setting
3. Dapat dikembangkan untuk mempertimbangkan jumlah tipe kurva di masing – masing pabrikan relay agar lebih dapat diaplikasikan dalam *real case study* di industri.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. W. So and K. K. Li, "Intelligent method for protection coordination," *2004 IEEE Int. Conf. Electr. Util. Deregulation, Restruct. Power Technol. Proc.*, no. April, p. 378–382 Vol.1, 2004.
- [2] M. R. Asadi and S. M. Kouhsari, "Optimal overcurrent relays coordination using particle-swarm-optimization algorithm," in *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2009*, 2009.
- [3] P. P. Bedekar and S. R. Bhide, "Optimum coordination of overcurrent relay timing using continuous genetic algorithm," *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 9, pp. 11286–11292, 2011.
- [4] K. I. Tharakan, "using Firefly and Ant Colony Optimization Algorithm," no. *Iccmc*, pp. 617–621, 2017.
- [5] A. Tjahjono *et al.*, "Adaptive modified firefly algorithm for optimal coordination of overcurrent relays," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 10, pp. 2575–2585, 2017.
- [6] V. R. Mahindhara, M. Pujiantara, and A. Priyadi, "Optimasi Time Dial Setting (TDS) Relay Arus Lebih Menggunakan Adaptive Modified Firefly Algorithm Pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur,"
- [7] Instruction Bulletin 63230-216-208C1, "Sepam TM Series 20 Protective Relays: User Manual, Schneider Electric," 2007.
- [8] M. E. Cooperation, "MP21A Multi-Relay User's Manual," 2004.
- [9] IEC 60909, "Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Calculation of currents," *IEC*, vol. 2, p. 149, 2016.
- [10] IEEE, "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems," *IEEE Std 242*, vol. 3, no. 2, p. 70, 2001.
- [11] W. D. Stevenson and J. J. Grainger, *Power System Analysis*. McGraw-Hill,

1994.

- [12] I. Lazar, “Electrical Systems Analysis and Design for Industrial Plants,” in *McGraw-Hill*, 1980, pp. 16–17.
- [13] S. Electric, “Sepam 1000: Sepam Range Substations, Busbars, Transformers, Motors,” in *Protection and Control*, 1998.
- [14] P. E. Doug Durand, “Overcurrent Protection & Coordination for Industrial Applications,” *IEEE Contin. Educ. Semin.*, 2015.
- [15] C. F. Dalziel, “Decrement curves for power systems,” *Electr. Eng.*, vol. 53, no. 2, pp. 331–338, 1934.
- [16] J. . Das, “Short-Circuits in AC and DC Systems,” 1st ed., Taylor and Francis Group, 2018, pp. 384–385.
- [17] “IEEE Standard for General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers,” *IEEE Std C57.12.01-2015 (Revision of IEEE Std C57.12.01-2005)*. pp. 1–52, 2015.
- [18] “IEEE Guide for Dry-Type Transformer Through-Fault Current Duration,” *IEEE Std C57.12.59-2015 (Revision of IEEE Std C57.12.59-2001)*. pp. 1–21, 2015.
- [19] “IEEE Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines,” *IEEE Std 620-1996*. p. i, 1996.
- [20] X.-S. Yang, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. 2010.
- [21] X.-S. Yang, *Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimisation*, vol. 2. 2010.

BIODATA PENULIS



Nugraha Agung Wibowo, adalah penulis dalam penelitian ini, lahir di Yogyakarta pada tanggal 7 Oktober 1988. Menempuh pendidikan dasar di SDN Ungaran 3 Yogyakarta dan menyelesaikan pada tahun 2001, kemudian menyelesaikan pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Yogyakarta pada tahun 2004, dan pendidikan menengah atas di SMAN 2 Yogyakarta pada tahun 2007. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikannya di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta Teknik Elektro dengan bidang penjurusan di Arus Kuat dan menyelesaikan pendidikan di universitas pada tahun 2011. Pada tahun 2012 penulis memulai karir pekerjaan di salah satu *multinasional company* yang bertempat di Jakarta Timur. Selanjutnya pada tahun 2013 penulis melanjutkan karir pekerjaannya di salah satu Badan Usaha Milik Negara yang bergerak di bidang *fertilizer* dan *petrochemical company* yaitu PT. Pupuk Kujang Cikampek di Departemen Pemeliharaan Listrik dan Instrumentasi. Pada tahun 2017 penulis mendapatkan beasiswa yang diberikan oleh perusahaan untuk melanjutkan pendidikan di S2 Teknik Elektro ITS dengan bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga dengan topik khusus dibidang sistem proteksi industri.