



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**STUDI PENCEGAHAN FERORESONANSI PADA GARDU  
INDUK TEGANGAN TINGGI 150 KV MENGGUNAKAN  
REAKTOR GANDA**

David Fernady  
NRP 0711134000053

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

**STUDY OF FERRORESONANCE PREVENTION IN 150 KV  
HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS USING DUAL REACTOR**

David Fernady  
NRP 0711134000053

Advisor

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Studi Pencegahan Feroresonansi pada Gardu Induk Tegangan Tinggi 150 kV menggunakan Reaktor Ganda**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan 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, November 2017

David Fernady  
NRP. 0711134000053

**STUDI PENCEGAHAN FERORESONANSI PADA GARDU  
INDUK TEGANGAN TINGGI 150 KV MENGGUNAKAN  
REAKTOR GANDA**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

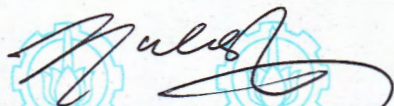
**Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**



**Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**  
NIP. 197007121998021001



**IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.**  
NIP. 197301232002121001



# STUDI PENCEGAHAN FERORESONANSI PADA GARDU INDUK TEGANGAN TINGGI 150 KV MENGGUNAKAN REAKTOR GANDA

**Nama** : David Fernady  
**Pembimbing I** : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
**Pembimbing II** : IGusti NgurahSatriyadiHernanda, ST., MT.

## ABSTRAK

Gangguan sistem tenaga listrik seperti gangguan *switching* dalam sistem transmisi dapat menyebabkan timbulnya fenomena feroresonansi. Feroresonansi atau yang biasa disebut dengan resonansi *non-linier* yaitu suatu fenomena sistem kelistrikan yang terjadi pada kapasitor dan induktor *non-linier* feromagnetik. Gangguan yang digunakan terjadi pada sistem transmisi yaitu pada *Capacitive Voltage Transformator* (CVT). Penanganan yang tepat berupa pendeteksian, identifikasi, pencegahan dan proteksi dibutuhkan untuk mengatasi gangguan ini. Pada studi ini digunakan metode penambahan reaktor ganda pada sisi primer CVT untuk melakukan pencegahan feroresonansi. Reaktor ganda yang dipakai dalam pencegahan ini yaitu suatu *switch* yang dipasang paralel dengan sebuah induktor. Hasil simulasi menunjukkan bahwa feroresonansi dapat dicegah dengan memasukan nilai 0.5 s pada *Tswitch* dan 141.3 mH pada induktor. Hasil analisa dari penelitian Tugas Akhir ini dapat menunjukkan kinerja penambahan reaktor ganda pada CVT untuk dibandingkan dengan metode-metode yang berbeda.

**Kata kunci:** Feroresonansi, *Capacitive Voltage Transformator*, Reaktor Ganda.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## ***STUDY OF FERRORESONANCE PREVENTION IN 150 KV HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS USING DUAL REACTOR***

**Name** : David Fernady  
**Advisor I** : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
**Advisor II** : I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

### ***ABSTRACT***

*The occurrence of power system electricity fault such as switching in transmission system causes existing of ferroresonance phenomenon. Ferroresonance or can be called non-linear resonance is an electrical system phenomenon that occurs in capacitors and feromagnetic non-linear inductor. In this study the occurrence of fault in transmission system assumed in Capacitive Voltage Transformer (CVT). Right treatment such as detection, identification, prevention and protection is needed to solve this problem. In this study, using a methods by adding a dual reactor to the primary side of the CVT to prevent ferroresonance. Dual reactor used in this prevention is a switch that is installed in parallel with an inductor. The simulation results show that ferroresonance can prevented by entering a value of 0.5 s on Tswitch and 141.3 mH at inductor. The results of the analysis of this thesis can show performance of this methods dual reactor addition on CVT compared with different methods.*

***Keywords : Ferroresonance, Capacitive Voltage Transformator, Dual Reactor.***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Yang Maha Esayang senantiasa melimpahkan rahmat dan anugerah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Tugas Akhir Yng berjudul “**Studi Pencegahan Feroresonansi pada Gardu Induk Tegangan Tinggi 150 kV menggunakan Reaktor Ganda**” ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak I Gusti Ngurah Satryadi Hernanda, atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Orang tua, kakak, adek serta keluarga penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Irma Novika Herawati yang selalu menasihati, menyemangati, menjadi tempat sharing, menemani dalam suka dan duka, serta menjadi tempat mencurahkan segala gundah selama ini.
4. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Departemen Teknik Elektro-FTE, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
5. Teman-teman Elektro ITS Angkatan 2013 (e53) yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman Tugas Akhir topic Feroresonansi yang saling membantu demi tercapainya kelulusan Tugas Akhir bersama.
7. Teman-teman SD yang selalu memberikan motivasi agar penulis bisa menjadi wisuda ke-117.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, November 2017

**Penulis**

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## DAFTAR ISI

	Hal.
<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Sistematika Penulisan .....	2
<b>BAB II SISTEM TRANSMISI DAN TRANSFORMATOR TEGANGAN KAPASITIF</b>	
2.1 Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.2 Sistem Transmisi .....	6
2.2.1 Permasalahan Dalam Sistem Transmisi .....	7
2.3 Gardu Induk .....	8
2.3.1 Gardu Induk Konvensional .....	8
2.4 Transformator .....	9
2.4.1 Prinsip Induksi Pada Transformator .....	10
2.4.2 Ketidaklinieran Pada Inti Transformator .....	11
2.5 Trafo Tegangan .....	12
2.5.1 Trafo Tegangan Magnetik .....	12
2.5.2 Trafo Tegangan Kapasitif (CVT) .....	15
2.6 Resonansi .....	20
2.7 Feroresonansi .....	21
2.7.1 Pengertian Feroresonansi .....	21
2.7.2 Penyebab Timbulnya Feroresonansi .....	22
2.7.3 Gejala-gejala Feroresonansi .....	23
2.7.4 Klasifikasi Feroresonansi .....	24

## **BAB III METODE REAKTOR GANDA DAN PEMODELAN FERORESONANSI**

3.1 Reaktor Ganda.....	27
3.2 Perangkat Lunak ATP ( <i>Alternative Transient Program</i> )	27
3.2.1 ATPDraw.....	28
3.3 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi .....	29
3.3.1 Rangkaian Pemodelan CVT .....	29
3.3.2 Rangkaian Normal.....	31
3.3.3 Rangkaian Feroresonansi Akibat <i>Switching</i> CB.....	32

## **BAB IV HASIL DAN ANALISA DATA**

4.1 Hasil Simulasi Feroresonansi .....	34
4.1.1 Kondisi Pada Saat Normal .....	34
4.1.2 Kondisi Pada Saat Operasi <i>Switching</i> CB.....	35
4.2 Hasil Analisis Pencegahan Feroresonansi menggunakan Reaktor Ganda.....	37
4.2.1 Kondisi Pada Saat Normal.....	37
4.2.2 Kondisi Pada Saat Operasi <i>Switching</i> CB ( $T_{switch} = konstan$ , dan $L = variable$ ).....	38
4.2.2.1 Kondisi Pada Saat <i>Topen</i> $T_{switch} 0.5$ & $L 140$ mH... 38	
4.2.2.2 Kondisi Pada Saat <i>Topen</i> $T_{switch} 0.5$ & $L 140.3$ mH.. 39	
4.2.2.3 Kondisi Pada Saat <i>Topen</i> $T_{switch} 0.5$ & $L 140.5$ mH.. 40	
4.2.2.4 Kondisi Pada Saat <i>Topen</i> $T_{switch} 0.5$ & $L 140.7$ mH.. 41	
4.2.2.5 Kondisi Pada Saat <i>Topen</i> $T_{switch} 0.5$ & $L 141$ mH.... 42	
4.2.2.6 Kondisi Pada Saat <i>Topen</i> $T_{switch} 0.5$ & $L 141.3$ mH.. 42	
4.2.2.7 Kondisi Pada Saat <i>Topen</i> $T_{switch} 0.5$ & $L 141.5$ mH.. 43	
4.2.3 Kondisi Pada Saat Operasi <i>Switching</i> CB ( $T_{switch} = variable$ , dan $L = konstan$ ).....	46
4.2.3.1 Kondisi Pada Saat <i>Topen</i> $T_{switch} 0$ & $L 141.3$ mH... 46	
4.2.3.2 Kondisi Pada Saat <i>Topen</i> $T_{switch} 0.1$ & $L 141.3$ mH.. 47	
4.2.3.3 Kondisi Pada Saat <i>Topen</i> $T_{switch} 0.3$ & $L 141.3$ mH.. 48	

## **BAB V PENUTUP**

5.1 Kesimpulan .....	51
5.2 Saran .....	51

<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	53
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	55

## DAFTAR GAMBAR

	Hal
<b>Gambar 2.1</b>	Sistem Tenaga Listrik ..... 5
<b>Gambar 2.2</b>	Gardu Induk Konvensional ..... 9
<b>Gambar 2.3</b>	Konstruksi Transformator ..... 10
<b>Gambar 2.4</b>	Kurva Histerisis ..... 11
<b>Gambar 2.5</b>	Rangkaian Trafo Tegangan Magnetik ..... 13
<b>Gambar 2.6</b>	Konstruksi Trafo Tegangan Kutub Tunggal & Ganda.. 14
<b>Gambar 2.7</b>	Konstruksi Badan Trafo Tegangan Magnetik ..... 15
<b>Gambar 2.8</b>	Rangkaian Lengkap Trafo Tegangan Kapasitif ..... 17
<b>Gambar 2.9</b>	Konstruksi Trafo Tegangan Kapasitif ..... 19
<b>Gambar 2.10</b>	Resonansi Seri ..... 20
<b>Gambar 2.11</b>	Rangkaian Pemodelan Feroresonansi ..... 23
<b>Gambar 2.12</b>	Kurva Saturasi Induktor non- <i>linier</i> ..... 23
<b>Gambar 2.13</b>	Model Fundamental ..... 24
<b>Gambar 2.14</b>	Model subharmonik ..... 25
<b>Gambar 2.15</b>	Model <i>quasi-periodik</i> ..... 25
<b>Gambar 2.16</b>	Model <i>chaotik</i> ..... 26
<b>Gambar 3.1</b>	Pemodelan Rangkaian Reaktor Ganda ..... 27
<b>Gambar 3.2</b>	Pemodelan CVT ..... 29
<b>Gambar 3.3</b>	Kurva Magnetisasi pada CVT ..... 30
<b>Gambar 3.4</b>	Pemodelan Rangkaian Normal ..... 31
<b>Gambar 3.5</b>	Pemodelan Rangkaian akibat <i>Switching</i> ..... 32
<b>Gambar 4.1</b>	<i>Layout</i> tipikal Gardu Induk 150 kV ..... 33
<b>Gambar 4.2</b>	<i>Single Line Diagram</i> ..... 33
<b>Gambar 4.3</b>	Data Trafo Tegangan Kapasitif (CVT) ..... 34
<b>Gambar 4.4</b>	Respon Tegangan sisi primer pada Kondisi Normal... 35
<b>Gambar 4.5</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada Kondisi Normal 35
<b>Gambar 4.6</b>	Respon Tegangan sisi primer saat Operasi <i>Switching</i> . 36
<b>Gambar 4.7</b>	Respon Tegangan sisi sekunder saat Operasi <i>Switching</i> ..... 36
<b>Gambar 4.8</b>	Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda ..... 37
<b>Gambar 4.9</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda .. 37
<b>Gambar 4.10</b>	Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda ..... 38

<b>Gambar 4.11</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda .....	38
<b>Gambar 4.12</b>	Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda .....	39
<b>Gambar 4.13</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda .....	39
<b>Gambar 4.14</b>	Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda .....	40
<b>Gambar 4.15</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda .....	40
<b>Gambar 4.16</b>	Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda .....	41
<b>Gambar 4.17</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda .....	41
<b>Gambar 4.18</b>	Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda .....	42
<b>Gambar 4.19</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda .....	42
<b>Gambar 4.20</b>	Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda .....	43
<b>Gambar 4.21</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda .....	43
<b>Gambar 4.22</b>	Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda .....	46
<b>Gambar 4.23</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda .....	46
<b>Gambar 4.24</b>	Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda .....	47
<b>Gambar 4.25</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda .....	47
<b>Gambar 4.26</b>	Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda .....	48
<b>Gambar 4.27</b>	Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda .....	48

## DAFTAR TABEL

	Hal
<b>Tabel 2.1</b>	Perbandingan antara Resonansi Linier dengan Feroresonansi..... 22
<b>Tabel 3.1</b>	Data Trafo Tegangan Kapasitif..... 30
<b>Tabel 3.2</b>	<i>Characteristic</i> Induktor Non-Linier..... 30
<b>Tabel 4.1</b>	Hasil Simulasi dengan $T_{switch} = 0.5$ dan $L = variable$ pada sisi primer..... 44
<b>Tabel 4.2</b>	Hasil Simulasi dengan $T_{switch} = 0.5$ dan $L = variable$ pada sisi sekunder..... 44
<b>Tabel 4.3</b>	Respon Tegangan sisi primer $T_{switch} = 0.5$ dan $L = variable$ ..... 45
<b>Tabel 4.4</b>	Respon Tegangan sisi sekunder $T_{switch} = 0.5$ dan $L = variable$ ..... 45
<b>Tabel 4.5</b>	Hasil Simulasi dengan $T_{switch} = variable$ dan $L = 141.3$ mH pada sisi primer..... 49
<b>Tabel 4.6</b>	Hasil Simulasi dengan $T_{switch} = variable$ dan $L = 141.3$ mH pada sisi sekunder..... 49

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada era kini listrik sudah menjadi bahan yang sangat penting bagi kehidupan sehari-hari. Pentingnya listrik ini tidak terlepas dari suatu sistem kelistrikan yaitu sistem transmisi. Perkembangan teknologi yang sangat maju menyebabkan sistem transmisi harus memiliki tingkat ketersediaan, kestabilan, dan keandalan yang tinggi. Untuk mendapatkan sistem transmisi secara maksimal maka perlu efektifitas dan stabilitas baik dari segi peralatan, pengoperasian, pemakaian, pengamanan, dan sebagainya. Salah satu dari peralatan listrik yang dituntut harus selalu bekerja dengan baik adalah transformator.

Transformator dalam sistem transmisi merupakan peralatan listrik yang menjadi inti dari penyaluran listrik kepada konsumen. Salah satu jenis transformator yang banyak penggunaannya dalam sistem tenaga adalah transformator tegangan (*voltage transformer*). Transformator tegangan adalah transformator satu fasa *step-down* yang mentransformasi tegangan sistem ke suatu *level* tegangan rendah, sehingga mampu digunakan untuk perlengkapan lampu indikator, alat ukur, rele, dan alat sinkronisasi[1]. Transformator tegangan dibedakan menjadi dua jenis, yaitu Transformator Tegangan Magnetik dan Transformator Tegangan Kapasitif. Pada Transformator Tegangan Kapasitif terdapat pembagian tegangan kapasitif yang diselipkan suatu trafo penengah (*intermediate transformer*) yang merupakan induktor non-linier. Rangkaian ini membentuk suatu rangkaian tertutup dengan suatu induktor non-linier yang berpeluang menimbulkan gejala feroresonansi[2]. Feroresonansi atau resonansi non-linier adalah fenomena gangguan yang terjadi akibat adanya interaksi berupa resonansi antara kapasitor dan induktor non-linier yang terjadi di jaringan listrik pada suatu sistem tenaga listrik. Feroresonansi sendiri tidak dapat dihindari ataupun diprediksi kapan terjadi. Feroresonansi dapat menyebabkan tegangan lebih dan arus lebih dalam sistem tenaga listrik dan dapat menimbulkan risiko bagi sistem transmisi dan distribusi, peralatan dan operator. Segala gangguan yang dapat menyebabkan turunnya kinerja dari peralatan listrik atau bahkan dapat merusaknya, harus dapat dicari solusi pencegahan maupun penanganannya. Salah satu cara yang efektif yakni dengan melakukan

pemasangan reaktor ganda pada sisi primer Transformator Tegangan Kapasitif.

Masalah yang dibahas dalam studi ini adalah bagaimana mengetahui fenomena feroresonansi pada sistem tenaga listrik dengan melakukan simulasi pada pemodelan sebuah rangkaian ekivalen feroresonansi. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisa pemasangan reaktor ganda sebagai salah satu cara mencegah feroresonansi menggunakan perangkat lunak *ATPDraw*. Sedangkan tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah mengetahui pengaruh pemasangan reaktor ganda terhadap sistem tenaga yang mengalami feroresonansi.

Metode yang digunakan dalam studi ini, yang pertama adalah melakukan studi literatur dan pengumpulan data mengenai feroresonansi. Setelah mengumpulkan data-data yang dibutuhkan maka langkah yang kedua adalah membuat pemodelan rangkaian feroresonansi dan memasukkan parameter-parameter dari rangkaian feroresonansi seperti nilai kapasitor, induktansi non-linier dan nilai resistansi pada perangkat lunak *ATPDraw*. Setelah melakukan pemodelan rangkaian, maka langkah yang ketiga adalah melakukan simulasi rangkaian. Hasil dari simulasi berupa grafik fungsi tegangan terhadap waktu yang menunjukkan feroresonansi dan grafik hasil pencegahan feroresonansi. Kemudian langkah terakhir yaitu melakukan analisis dari hasil simulasi yang telah dibuat supaya bisa digunakan sebagai rujukan untuk menarik suatu kesimpulan.

## **1.2 Sistematika Penulisan**

Sistematika dalam penulisan buku Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bagian. Dalam bab I berisikan pendahuluan yang mengandung latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, manfaat serta relevansi yang dicapai dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini.

Dalam bab II berisikan tentang teori-teori penunjang yang bersangkutan dengan sistem tenaga listrik, teori dasar transformator dan transformator tegangan kapasitif yang digunakan dalam studi ini.

Dalam bab III berisikan tentang teori dasar feroresonansi dan metode reaktor ganda dalam pencegahan feroresonansi.

Dalam bab IV berisikan tentang hasil simulasi pemodelan feroresonansi, serta analisa hasil simulasi pencegahan feroresonansi menggunakan reaktor ganda.

Dalam bab V berisikan tentang penarikan kesimpulan dari studi yang dilakukan melalui sebuah simulasi rangkaian feroresonansi dan saran yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya.

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

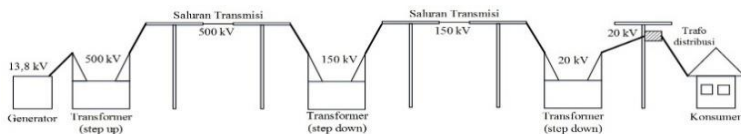
## BAB II

# SISTEM TRANSMISI DAN TRANSFORMATOR TEGANGAN KAPASITIF

### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Tenaga listrik adalah suatu bentuk energi sekunder yang dibangkitkan, ditransmisikan, dan didistribusikan untuk segala keperluan, tetapi tidak meliputi listrik yang dipakai untuk komunikasi, elektronika, atau isyarat[3]. Suatu sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa unsur yang bertujuan untuk menyalurkan daya listrik dari pembangkit tenaga listrik hingga sampai ke pelanggan. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari empat bagian umum yaitu pembangkit, transmisi, distribusi, dan konsumen.

Skema sistem tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 2.1 dimana listrik yang dihasilkan dari pembangkit tenaga listrik akan dinaikkan tegangannya melalui sebuah transformator dan dialirkan melalui saluran transmisi. Saluran transmisi menghubungkan pusat-pusat pembangkit listrik yang umumnya dibangun pada lokasi yang jauh dari beban. Melalui saluran transmisi, listrik akan menuju gardu induk sebagai tempat untuk menurunkan *level* tegangan listrik dan dialirkan melalui saluran distribusi. Dari saluran distribusi listrik akan mengalir ke rumah-rumah konsumen maupun industri dengan *level* tegangan yang lebih rendah. Pada umumnya di Indonesia *level* tegangan yang digunakan untuk saluran transmisi adalah tegangan 500 kV dan 150 kV. Dan untuk tegangan distribusi menggunakan tegangan menengah yakni 20 kV. Sedangkan untuk saluran ke rumah tangga menggunakan tegangan 380/220 V.



**Gambar 2.1** Sistem Tenaga Listrik

## 2.2 Sistem Transmisi

Sistem transmisi adalah sebuah sistem untuk menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit hingga pusat beban melalui saluran. Penyaluran tenaga listrik pada saluran transmisi akan mengalami rugi-rugi karena akibat adanya *drop voltage*. Untuk menanggulangi hal tersebut, maka saluran transmisi menggunakan tegangan *level* tinggi maupun ekstra tinggi (SUTT dan SUTET). Persamaan 2.1 dan 2.2 akan menjelaskan mengenai hubungan tegangan dan arus yang dimanfaatkan dalam sistem transmisi untuk tujuan menekan rugi-rugi daya yang timbul akibat *drop voltage*.

$$V = I.R \quad (2.1)$$

Dimana :

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

R = Hambatan (Ohm)

Apabila nilai tegangan dinaikkan dengan nilai hambatan yang tetap maka diperoleh nilai arus yang semakin kecil. Nilai arus (I) yang diperoleh semakin kecil maka akan mempengaruhi nilai rugi rugi daya pada sistem transmisi. Rugi-rugi daya dapat dilihat pada persamaan 2.2 berikut.

$$P = I^2 .R \quad (2.2)$$

Dimana :

$P_{\text{loss}}$  = Rugi-rugi daya (Watt)

I = Arus (Ampere)

R = Hambatan (Ohm)

Nilai arus yang kecil diakibatkan karena adanya penggunaan tegangan dengan *level* tinggi yang berdampak besar terhadap daya yang hilang pada saluran transmisi. Daya yang hilang akan semakin kecil dikarenakan arus yang timbul menjadi lebih kecil ketika digunakan dalam tegangan *level* tinggi.

Suatu saluran transmisi tenaga listrik memiliki empat parameter yang dapat mempengaruhi sistem kerja saluran transmisi tersebut. Keempat parameter tersebut adalah resistansi, induktansi, kapasitansi, dan konduktansi.

Besarnya tegangan nominal saluran transmisi tegangan tinggi ataupun ekstra tinggi berbeda-beda untuk setiap negara atau perusahaan listrik di negara tersebut, tergantung kepada kemajuan tekniknya masing-masing. Secara umum klasifikasi tegangan tinggi adalah sebagai berikut[4]:

1. Tegangan Tinggi (*High Voltage*), yaitu tegangan sistem : 110 kV, 132 kV, 156 kV, dan 220 kV di Eropa; 115 kV, 138 kV, 161 kV, dan 230 kV di Amerika; 150 kV di Indonesia.
2. Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*), yaitu tegangan sistem : 275 kV, 380 kV, 400 kV, dan 800 kV di Eropa; 287 kV, 345 kV, 500 kV, dan 765 kV di Amerika; 500 kV di Indonesia.
3. Tegangan Ultra Tinggi (*Ultra High Voltage*), yaitu tegangan sistem diatas 1000 kV.

### **2.2.1 Permasalahan Dalam Sistem Transmisi**

Dalam sistem transmisi terdapat permasalahan yang sering dijumpai. Beberapa permasalahan tersebut adalah :

#### **1. Perubahan Frekuensi Sistem**

Frekuensi yang digunakan di Indonesia adalah 50 Hz. Frekuensi ini suatu sistem dapat berubah ketika terjadi gangguan pada sisi pembangkitannya. Ketika terjadi gangguan dan terjadi perubahan frekuensi maka dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik ataupun pada sistem sendiri. Pengaruh yang ditimbulkan akibat perubahan frekuensi adalah nilai reaktansi pada saluran transmisi akan berubah juga. Reaktansi ini akan mempengaruhi pengukuran nilai impedansi sehingga nilai impedansi yang terukur akan berbeda dengan impedansi saat belum terjadi gangguan.

#### **2. Ayunan Daya pada Sistem**

Ayunan daya terjadi pada sebuah sistem apabila hilangnya sinkronisasi salah satu generator yang mengakibatkan generator menjadi motor dan berbeban dan terjadi bergantian atau berayun. Masalah ini harus segera diatasi dengan melepas generator yang terganggu dari sistem. Pengaruh yang ditimbulkan untuk sistem transmisi adalah adanya arus yang timbul akibat ayunan daya yang mengakibatkan sistem pengamanan akan bekerja dan segera memutus aliran arus pada sistem transmisi.

### 3. Gangguan pada Sistem Transmisi

Saluran transmisi memegang peranan yang sangat penting dalam kontinuitas pelayanan listrik dari perusahaan listrik kepada konsumen. Pada saluran transmisi sangat sering terjadi gangguan seperti gangguan satu fasa ke tanah ataupun antar fasa. Gangguan pada saluran transmisi akan memberikan dampak yang besar bagi industri ataupun bagi konsumen rumah tangga. Oleh karena itu sebuah sistem transmisi harus memiliki sistem proteksi yang handal dan sistem interkoneksi yang baik ketika salah satu saluran harus mati, akan tetapi saluran lain dapat digunakan agar tetap penyaluran listrik terjadi.

## 2.3 Gardu Induk

Tegangan yang dibangkitkan generator terbatas dalam belasan kilovolt, sedangkan transmisi membutuhkan tegangan dari puluhan sampai ratusan kilovolt, sehingga diantara pembangkit dengan transmisi dibutuhkan trafo daya *step up*. Maka semua perlengkapan yang terpasang disini sekunder trafo ini harus mampu memikul tegangan tinggi. Tegangan transmisi dari puluhan sampai ratusan kilovolt, sedangkan konsumen membutuhkan tegangan dari ratusan volt sampai puluhan kilovolt, sehingga diantara transmisi dengan konsumen dibutuhkan trafo daya *step down*. Semua perlengkapan yang terpasang di sisi primer trafo ini juga harus mampu memikul tegangan tinggi. Trafo-trafo daya ini bersama dengan perlengkapan-perengkapannya disebut gardu induk. Adapun peralatan tegangan tinggi yang terdapat pada suatu gardu induk yaitu: pembagi tegangan kapasitor, trafo tegangan, filter frekuensi tinggi, saklar pembumian, saklar pemisah, trafo arus, pemutus daya, pelindung tegangan lebih, trafo daya, konduktor, dan isolator. Salah satu Gardu Induk menurut pemasangannya yakni Gardu Induk Konvensional.

### 2.3.1 Gardu Induk Konvensional

Gardu Induk Konvensional adalah gardu induk yang pemasangan peralatan-peralatannya berada di area terbuka dan membutuhkan area yang luas. Akan tetapi tidak keseluruhan peralatan diletakkan diluar melainkan ada di dalam ruangan seperti sistem proteksi, sistem kendali serta beberapa komponen lainnya. Kebanyakan sistem gardu induk di Indonesia menggunakan gardu induk konvensional seperti pada Gambar



2.2 dan dapat dilihat bahwa peralatan listrik berada diluar atau area terbuka. Di Indonesia kebanyakan gardu induk transmisi dan distribusi merupakan tipe dari gardu induk konvensional

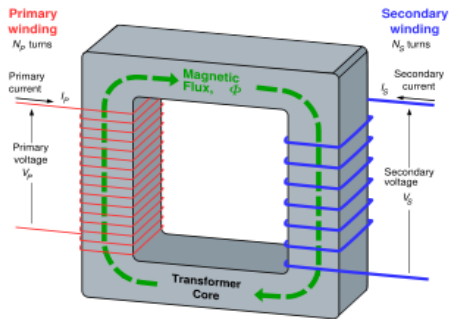


**Gambar 2.2** Gardu Induk Konvensional.

## 2.4 Transformator

Transformator merupakan peralatan yang mengubah daya listrik bolak-balik dari suatu *level* tegangan ke *level* tegangan bolak-balik lain dengan frekuensi yang sama melalui sebuah medan magnet. Sebuah transformator terdiri dari dua atau lebih belitan dan memiliki inti yang terbuat dari bahan yang bersifat feromagnetik. Belitan transformator pada umumnya terdiri dari belitan primer terhubung dengan sumber bolak-balik dan belitan sekunder yang terhubung dengan beban seperti Gambar 2.3. Berdasarkan belitan intinya, transformator terdiri dari dua jenis yakni tipe inti dan tipe cangkang.

Transformator dalam sistem tenaga listrik merupakan komponen yang sangat penting karena digunakan pada setiap sub-sistem tenaga listrik seperti saluran transmisi, saluran distribusi dan pada gardu induk. Hal ini tidak terlepas dari fungsi transformator yang dapat memungkinkan pemilihan tegangan yang sesuai dengan keperluan tertentu. Transformator dapat digunakan pada gardu induk untuk menaikkan tegangan sehingga dapat ditransmisikan untuk jarak yang cukup jauh. Selain penggunaan dalam sistem tenaga transformator juga digunakan dalam dunia elektronika untuk peralatan listrik rumah tangga.



**Gambar 2.3** Konstruksi Transformator[5]

Penggunaan trafo pengukuran seperti *voltage transformer* pada suatu gardu induk sangat memungkinkan sistem mengalami feroresonansi yang ditimbulkan dari ketidaklinieran yang diperoleh dari inti trafo tegangan.

#### 2.4.1 Prinsip Induksi Pada Transformator

Prinsip kerja pada trafo menggunakan Hukum Faraday. Apabila medan magnet berubah-ubah terhadap waktu akibat arus bolak balik yang berbentuk sinusoidal, suatu medan listrik akan dibangkitkan atau diinduksikan. Besar GGL induksi yang dibangkitkan sebesar

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

Dimana :

e = GGL induksi (Volt)

N = Jumlah lilitan

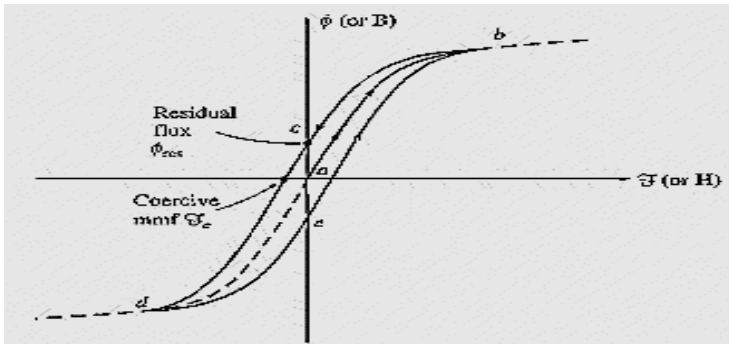
dΦ = Perubahan garis-garis gaya magnet (Watt)

dt = Perubahan waktu (s)

Inti besi yang dikelilingi oleh belitan yang dialiri arus listrik akan menimbulkan sebuah medan magnet. Ketika magnet tersebut dikelilingi belitan maka akan timbul beda tegangan pada kedua ujung belitan tersebut.

## 2.4.2 Ketidaklinieran Pada Inti Transformator

Fenomena histerisis pada trafo menunjukkan adanya ketidaklinieran pada inti transformator. Histerisis pada trafo biasanya digambarkan dalam bentuk kurva magnetisasi seperti pada Gambar 2.4 berikut.



**Gambar 2.4** Kurva Histerisis[5]

Pada Gambar 2.4 jalur a-b merupakan kondisi awal dari trafo saat diberikan arus. Kerapatan fluks akan naik terus hingga mencapai titik  $B_s$  yang merupakan titik saturasinya. Penurunan nilai arus berdampak pada penurunan fluks, tetapi tidak kembali mengikuti jalur awal melainkan melalui jalur  $bcd$  dikarenakan adanya fluks sisa. Untuk memaksa fluks mencapai nilai nol maka sejumlah *magnetomotive force (mmf)* dibutuhkan dan dikenal dengan istilah *coercive mmf*. Saat arus naik, fluks juga naik tetapi melalui jalur  $deb$ . Perbedaan jalur tersebut juga diakibatkan oleh adanya fluks sisa. Ketika intensitas medan ( $H$ ) sudah mencapai titik nol, kerapatan fluks ( $B$ ) tidak mencapai titik nol melainkan masih terdapat fluks sisa. Fluks sisa tersebut dipengaruhi oleh permeabilitas inti trafo. Sedangkan permeabilitas trafo dipengaruhi dari pemilihan bahan material inti trafo.

Semakin baik jenis material inti trafo yang digunakan maka kurva histerisis akan semakin kurus atau semakin cenderung linier. Dan begitu juga sebaliknya apabila material inti trafo yang digunakan kurang baik maka kurva histeris akan cenderung semakin lebar.

## **2.5 Trafo Tegangan[6]**

Trafo tegangan adalah peralatan yang mentransformasi tegangan sistem yang lebih tinggi ke suatu tegangan sistem yang lebih rendah untuk kebutuhan peralatan indikator, alat ukur atau meter dan relai. Fungsi dari trafo tegangan yaitu:

- Mentransformasikan besaran tegangan sistem dari yang tinggi ke besaran tegangan listrik yang lebih rendah sehingga dapat digunakan untuk peralatan proteksi dan pengukuran yang lebih aman, akurat dan teliti.
- Mengisolasi bagian primer yang tegangannya sangat tinggi dengan bagian sekunder yang tegangannya rendah untuk digunakan sebagai sistem proteksi dan pengukuran peralatan dibagian primer.
- Sebagai standarisasi besaran tegangan sekunder untuk keperluan peralatan sisi sekunder.
- Memiliki 2 kelas, yaitu kelas proteksi (3P, 6P) dan kelas pengukuran (0,1; 0,2; 0,5;1;3).

Ada dua jenis trafo tegangan, yaitu : trafo tegangan magnetik dan trafo tegangan kapasitif.

### **2.5.1 Trafo Tegangan Magnetik[1]**

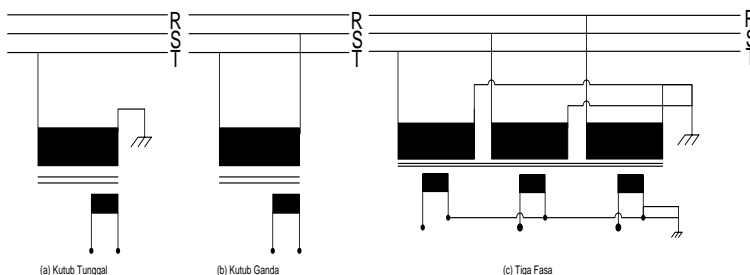
Komponen utama suatu trafo tegangan magnetik adalah: kumparan primer, kumparan sekunder, dan inti baja silikon. Ketiga komponen tersebut dicetak dalam isolasi padat atau dimasukkan dalam suatu bejana berisi isolasi cair atau gas. Dalam praktiknya, badan trafo tegangan selalu terhubung ke tanah.

Prinsip kerja trafo tegangan sama dengan trafo daya. Kumparan primer dihubungkan ke jaringan tegangan tinggi yang akan diukur, sehingga arus mengalir pada kumparan primer. Arus pada kumparan primer menimbulkan fluks magnetik pada inti trafo tegangan. Fluks tersebut akan menginduksikan gaya gerak listrik yang rendah pada kumparan sekunder, sehingga pada terminal kumparan sekunder terdapat beda tegangan yang sebanding dengan tegangan yang diukur.

Karakteristik yang membedakan trafo tegangan dengan trafo daya adalah:

- Kapasitasnya kecil (10 – 150 VA), karena bebannya hanya peralatan yang mengkonsumsi daya rendah, seperti voltmeter, kWh-meter, wattmeter, relai jarak, sinkronoskop dan lampu indikator.
- Karena digunakan kontinyu dan menjadi beban bagi sistem yang menggunakannya, maka trafo tegangan dirancang mengkonsumsi energi yang sekecil mungkin.
- Untuk mengurangi kesalahan pengukuran, trafo tegangan dirancang sedemikian agar tegangan sekunder sebanding dan sefasa dengan tegangan primer.
- Tegangan pengenal sekunder trafo tegangan umumnya ditetapkan 100-230 V atau  $(100-230) \sqrt{3}$  V.

Ada tiga jenis trafo tegangan magnetik, yaitu: trafo tegangan kutub tunggal, trafo tegangan kutub ganda dan trafo tegangan tiga fasa. Pada trafo tegangan kutub tunggal, salah satu terminal dibumikan seperti pada Gambar 2.5. Disamping untuk pengukuran sistem tiga fasa, trafo tegangan kutub tunggal dan trafo tegangan tiga fasa dapat sekaligus digunakan untuk mencatu tegangan kepada relai proteksi arus tanah. Dalam hal ini, trafo tegangan dilengkapi dengan kumparan tambahan yang digunakan untuk mendeteksi adanya arus gangguan tanah. Kumparan tambahan ini disebut kumparan proteksi.



**Gambar 2.5** Rangkaian trafo tegangan magnetik

Bentuk badan trafo tegangan kutub tunggal dan kutub ganda seperti pada Gambar 2.6. Trafo tegangan kutub ganda digunakan untuk pengukuran daya dan energi sistem tiga fasa. Kedua terminal pada trafo

tegangan kutub ganda ini diisolir terhadap bumi (Gambar 2.6c). Dilihat dari terminal belitan primernya, trafo tegangan kutub tunggal terdiri atas trafo tegangan tanpa bushing (Gambar 2.6a) dan trafo tegangan dengan bushing (Gambar 2.6b). Trafo tegangan dengan bushing digunakan untuk tegangan di atas 11 kV.

Konstruksi pada trafo tegangan kutub tunggal lebih sederhana dibanding dengan trafo tegangan kutub ganda, hal ini dikarenakan tebal isolasi pada trafo tegangan kutub tunggal dapat dibuat bertingkat sesuai dengan tekanan elektrik yang dibebankan, sedangkan pada trafo tegangan kutub ganda, seluruh kumparan tegangan tinggi harus diisolasi terhadap bagian-bagian yang dibumikan dengan tebal isolasi yang sama, supaya trafo tegangan dapat memikul tegangan pengujian penuh. Oleh karena itu trafo tegangan kutub ganda hanya digunakan untuk tegangan pengenal sampai 30 kV, sedangkan trafo tegangan kutub tunggal digunakan untuk tegangan pengenal yang lebih tinggi.

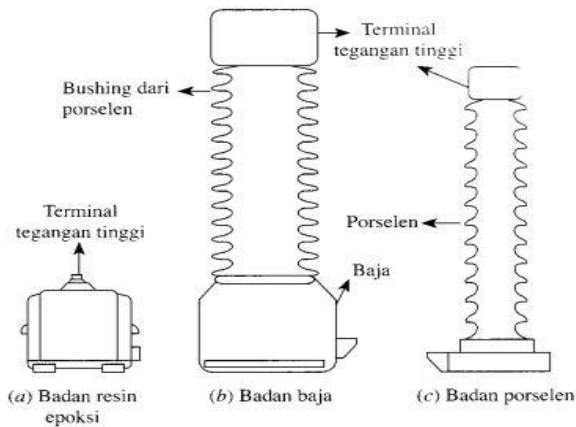


(a). Kutub tunggal tanpa bushing (b). Kutub tunggal dengan busing (c). Kutub ganda

**Gambar 2.6** Kontruksi trafo tegangan kutub tunggal dan kutub ganda

Beberapa macam konstruksi trafo tegangan magnetik dapat dilihat pada Gambar 2.7. Pemilihan jenis konstruksi trafo tegangan magnetik bergantung terhadap nilai tegangan operasi dan tempat instalasi. Untuk pemakaian pasangan dalam, trafo ukur tegangan diisolasi dengan resin epoksi, dimana semua kumparan dan kadang-kadang termasuk inti besi dicetak dalam bahan isolasi resin padat (Gambar 2.7a). Untuk operasi pasangan luar, trafo resin epoksi masih dapat dipakai untuk tegangan pengenal yang tidak terlalu tinggi. Untuk tegangan yang lebih tinggi

dipakai trafo kutub tunggal dengan isolasi minyak-kertas. Rancangan trafo kutub tunggal isolasi minyak-kertas terdiri dari dua jenis, yaitu : jenis tangki logam dan jenis tabung isolasi. Pada jenis pertama, badan aktif trafo tegangan dimasukkan ke dalam bejana baja dan dipasang bushing untuk melewati tegangan tinggi ke terminalnya (Gambar 2.7b). Pada jenis kedua, badan aktif trafo semua dibungkus dengan tabung porselen (Gambar 2.7c) dan digunakan pada tegangan yang lebih besar dari 66 kV.



**Gambar 2.7** Kontruksi Badan Trafo Tegangan Magnetik

## 2.5.2 Trafo Tegangan Kapasitif (CVT)

Untuk pengukuran tegangan diatas 110 kV, adalah lebih ekonomis menggunakan trafo tegangan kapasitif daripada menggunakan trafo tegangan magnetik, karena konstruksi isolasi trafo tegangan lebih sederhana daripada trafo tegangan magnetik. Trafo tegangan kapasitif akan lebih ekonomis lagi jika digunakan sekaligus untuk pengiriman sinyal melalui konduktor transmisi (*power line carrier*), yaitu sinyal komunikasi data, sinyal audio dan sinyal kendali jarak jauh (*telecontrol*). Trafo tegangan kapasitif digunakan juga untuk pengukuran energi pada konsumen industri. Sangat handal digunakan untuk mencatu tegangan ke

relai elektronik yang bekerja sangat cepat, terutama jika trafo tegangan kapasitif menggunakan peredam osilasi elektronik.

Bagian utama trafo tegangan kapasitif adalah pembagi tegangan kapasitif  $C_1 - C_2$ . Secara teknis, dengan merancang nilai kapasitansi nilai  $C_1$  dan  $C_2$ , tegangan pada kapasitor  $C_2$  dapat diperoleh dalam orde ratusan volt (sesuai dengan kebutuhan alat ukur, relai, atau lampu indikator), tetapi cara ini tidak ekonomis. Oleh karena itu, kapasitansi  $C_1$  dan  $C_2$  dirancang sedemikian rupa, sehingga tegangan pada kapasitor  $C_2$  diperoleh dalam orde puluhan kilovolt, umumnya 5, 10, 15 dan 20 kV. Diantara kapasitor  $C_2$  dengan beban diselipkan suatu trafo tegangan magnetik yang disebut trafo penengah (*intermediate transformer*). Terminal kapasitor  $C_2$  dihubungkan ke belitan primer trafo penengah, sehingga tegangan primer trafo penengah sama dengan tegangan pada terminal kapasitor  $C_2$ . Tegangan primer trafo penengah (dalam orde puluhan ribu Volt) diturunkan oleh trafo penengah menjadi ratusan Volt. Ketika hubungan antara terminal kumparan trafo tegangan yang dibumikan dengan inti atau badan trafo tegangan dibuka, kumparan primer dirancang mampu memikul tegangan frekuensi daya sebesar 3 kV<sub>rms</sub> dalam durasi singkat.

Jika rugi-rugi pada trafo penengah diabaikan dan impedansi bebannya tidak terhingga (terminal belitan sekunder terbuka), maka hubungan tegangan  $V_n$ ,  $V_1$ , dan  $V_2$  dinyatakan sebagai :

$$\frac{V_n}{V_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = a_c \quad (2.4)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = a_t \quad (2.5)$$

$$\frac{V_n}{V_2} = a_c \times a_t = a_p \quad (2.6)$$

Dalam hal ini :  $a_c$  = factor pembagi tegangan kapasitor

$a_t$  = factor transformasi trafo penengah

$a_p$  = factor transformasi sistem pengukuran

Jika rugi-rugi pada trafo penengah dan impedansi beban diperhitungkan, maka faktor pembagi tegangan kapasitor ( $a_c$ ) dan factor transformasi sistem pengukuran ( $a_p$ ) akan berubah. Untuk



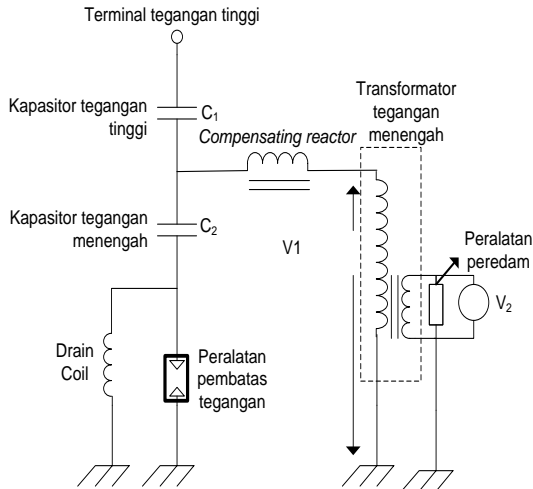
mengkompensasi perubahan tersebut, maka diantara kapasitor  $C_2$  dengan trafo penengah disisipkan suatu induktor kompensasi ( $L$ ) seperti pada Gambar 2.8.

Jika  $Z_b$  adalah impedansi ekuivalen gabungan trafo penengah dengan beban dilihat dari sisi tegangan tinggi, maka hubungan tegangan jaringan dengan tegangan primer trafo penengah menjadi :

$$\frac{V_n}{V_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} + \frac{1 - \omega^2 L(C_1 + C_2)}{j\omega C_1 Z_b} \quad (2.7)$$

Bila nilai  $L$ ,  $C_1$  dan  $C_2$  dipilih sedemikian sehingga memenuhi hubungan dibawah ini :

$$\omega^2 L(C_1 + C_2) = 1 \quad (2.8)$$



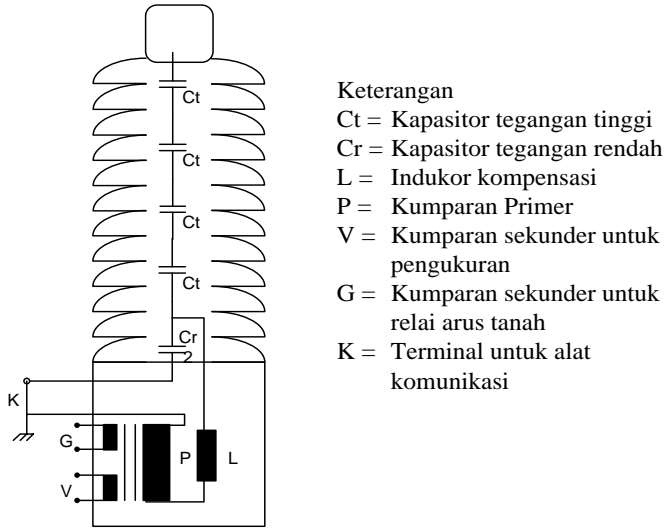
**Gambar 2.8** Rangkaian lengkap trafo tegangan kapasitif

maka perbandingan  $V_n$  dengan  $V_1$  akan tetap seperti dinyatakan pada persamaan 2.4. Artinya, impedansi trafo penengah maupun impedansi beban tidak berpengaruh terhadap faktor  $a_c$ .

Jika terjadi tegangan lebih pada jaringan transmisi, tegangan pada kapasitor  $C_2$  akan naik dan dapat menimbulkan kerusakan pada kapasitor tersebut. Untuk mencegah kerusakan tersebut dipasang sela pelindung ( $SP$ ). Sela pelindung akan terpeccik pada tegangan yang lebih rendah daripada tegangan ketahanan isolasi kapasitor  $C_2$ , sehingga kapasitor  $C_2$  terlindung dari bahaya tegangan lebih yang terjadi pada jaringan. Jika sela pelindung terpeccik, terminal  $C_2$  terhubung singkat ke tanah, sehingga mengalir arus yang besar ke tanah. Untuk membatasi arus yang besar tersebut, sela pelindung ( $SP$ ) dihubungkan seri dengan suatu resistor ( $R$ ).

Trafo penengah merupakan induktor non-linier. Trafo penengah ini membentuk rangkaian tertutup dengan kapasitor  $C_2$ . Artinya, kapasitor  $C_2$  membentuk rangkaian tertutup dengan suatu induktor non-linier. Rangkaian seperti ini berpeluang menimbulkan gejala feroresonansi. Osilasi feroresonansi dapat menyebabkan tegangan lebih yang cukup besar dan menghasilkan panas yang tidak diinginkan pada inti dan kumparan trafo penengah.

Rancangan konstruksi suatu trafo tegangan kapasitif biasanya seperti diperlihatkan pada Gambar 2.9. Elemen-elemen kapasitor dihubungkan secara seri dan disusun di dalam suatu tabung porselen yang ramping. Induktor kompensasi dan trafo penengah ditempatkan didalam bejana logam. Diluar bejana disediakan terminal untuk peralatan komunikasi ( $K$ ). Terminal ini dapat dibumikan jika trafo tegangan kapasitif tidak dimanfaatkan untuk komunikasi. Agar efektif sebagai kopling kapasitor, maka kapasitansi ekuivalen  $C_1$  dan  $C_2$  harus memiliki nilai minimum 4400 pF.



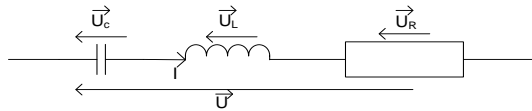
**Gambar 2.9** Konstruksi Trafo Tegangan Kapasitif

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang sangat kompleks, yang terdiri dari 3 komponen yakni elektrik, mekanikal, dan sistem kontrol. Perkembangan teknologi dan informasi, globalisasi industri, serta integrasi jaringan yang terus menerus saat ini berakibat pada sistem tenaga yang semakin rentan terhadap gangguan. Gangguan tersebut bisa terjadi akibat aktivitas *switching* (*ON* dan *OFF*) dari suatu beban maupun komponen, atau energisasi dan re-energisasi komponen sistem untuk tujuan pemeliharaan, atau sambaran petir pada saluran transmisi. Oleh karena itu, sistem tenaga listrik tidak pernah beroperasi dalam kondisi *steady-state* secara terus menerus. Atau dengan kata lain terdapat dua keadaan pada sistem yakni keadaan normal dan transien. Namun durasi keadaan transien tidak terlalu signifikan dibanding dengan keadaan normal[7].

Peristiwa transien dapat dipengaruhi oleh parameter-parameter pada sistem seperti saluran transmisi, transformator, kabel, kapasitansi shunt, dan sebagainya. Berdasarkan rentang frekuensinya, transien dibedakan menjadi transien frekuensi tinggi dan transien frekuensi rendah. Salah satu contoh transien frekuensi rendah adalah feroresonansi

## 2.6 Resonansi[8]

Resonansi merupakan fenomena yang terjadi pada sistem tenaga di semua *level* tegangan. Resonansi ini dapat diketahui dari contoh resonansi sistem pentanahan (*Petersen coil*), yang digunakan untuk meminimalisir tegangan medium satu fasa ke arus gangguan tanah, atau dapat juga menyebabkan kerusakan dielektrik atau pengurangan umur dari peralatan karena tegangan dan arus lebih.



**Gambar 2.10** Resonansi seri [4]

Persamaan vektor tegangan dari rangkaian diatas adalah sebagai berikut:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C \quad (2.9)$$

Dimana  $\vec{U}$  = tegangan total (Volt)  
 $\vec{U}_R$  = tegangan resistor (Volt)  
 $\vec{U}_L$  = tegangan induktor (Volt)  
 $\vec{U}_C$  = tegangan kapasitor (Volt)

Pada kasus tertentu, tegangan dari terminal pada kapasitor dan induktansi dapat terkompensasi sehingga rangkaian dapat dikatakan pada situasi resonansi. Syarat dari  $\omega_n$  yang dapat memunculkan resonansi adalah sebagai berikut :

$$LC \omega_n^2 = 1 \quad (2.10)$$

Dimana  $L$  = induktor ( Henry)

$C$  = kapasitor (Farad)

$\omega_n$  = kecepatan sudut (Rad/s)

Nilai dari arus ( $I$ ) sama dengan :

$$I = \frac{E}{R} \quad (2.11)$$

dimana :  $I$  = arus (Ampere)  
 $E$  = tegangan (Volt)  
 $R$  = resistor (Ohm)

Arus ini dapat bernilai sangat tinggi. Amplitudo tegangan dari terminal kapasitor dan induktor sama dengan  $kE$ , dimana  $k$  adalah faktor kualitas yang dapat dinyatakan :

$$k = \frac{L\omega_n}{R} = \frac{1}{RC\omega_n} \quad (2.12)$$

Resonansi harmonisa terjadi jika  $\omega_n$  sama dengan  $\omega_0$  (frekuensi dari sistem) yang terbentuk dari beberapa tipe mesin (*variable speed drive, statis rectifier*). Resonansi harmonisa dapat menyebabkan kerusakan peralatan listrik.

## 2.7 Ferroresonansi

### 2.7.1 Pengertian Ferroresonansi

Ferroresonansi atau resonansi non-linier merupakan fenomena kelistrikan kompleks non-linier yang dapat mengakibatkan tegangan lebih pada sistem tenaga sehingga membahayakan sistem transmisi, sistem proteksi, peralatan listrik maupun operator[9]. Apabila terdapat gangguan pada sistem dan tidak dapat dijelaskan secara spesifik jenis gangguannya, kemungkinan hal tersebut merupakan gejala dari ferroresonansi.

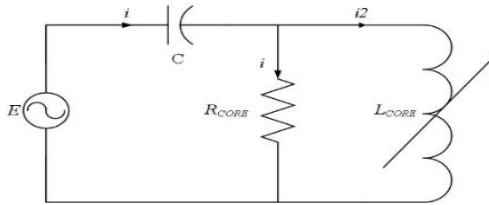
Istilah ferroresonansi mengacu pada fenomena osilasi yang muncul pada sebuah rangkaian listrik yang mengandung elemen induktansi non-linier, kapasitor dan sumber tegangan sinusoidal, dan rugi-rugi yang rendah. Induktansi non-linier diperoleh dari penggunaan trafo daya, trafo induktif pengukur tegangan, reaktor *shunt* pada sistem tenaga listrik. Sedangkan kapasitor diperoleh dari kapasitor bank, kabel, proses *switching* dan trafo tegangan kapasitif.

**Tabel 2.1** Perbandingan antara Resonansi Linier dengan Feroresonansi

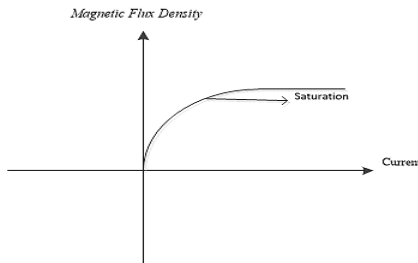
<b>Rangkaian</b>	<b>Parameter Sistem</b>	<b>Resonansi</b>	<b>Respon</b>
Linier	Resistansi, kapasitansi, induktansi	Resonansi terjadi pada satu frekuensi, sesuai dengan frekuensi sumber	Tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada satu keadaan steady-state
Non-linier	Resistansi, kapasitansi, induktansi non-linier (material feromagnetik)	Feroresonansi terjadi pada frekuensi tertentu, ketika induktansi non-linier sesuai dengan kapasitansi sistem	Tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada beberapa keadaan steady-state

### 2.7.2 Penyebab Timbulnya Feroresonansi

Rangkaian resonansi seri sering digunakan sebagai pendekatan terhadap fenomena feroresonansi agar lebih mudah dipahami. Pada rangkaian resonansi penggunaan induktor diganti menjadi induktor non-linier sebagai pemodelan dari inti trafo sehingga rangkaiannya berubah menjadi rangkaian feroresonansi. Sama halnya dengan resonansi pada rangkaian resonansi seri, fenomena yang terjadi pada rangkaian feroresonansi juga menimbulkan kenaikan arus yang sangat besar dikarenakan impedansi rangkaian yang kecil. Arus yang naik menyebabkan rapat fluks juga akan naik mencapai titik saturasi dan tidak lagi menjadi linier. Ketika nilai arus yang naik pada inti trafo yang bersifat feromagnetik melalui titik saturasinya maka induktansi akan berubah sangat cepat (menjadi non-linier). Sehingga ketika terjadi interaksi antara kapasitor dan inti besi induktor akan menghasilkan tegangan dan arus yang tidak biasa. Hal ini akan sangat berbahaya bagi sistem dan peralatan listrik. Gambar rangkaian feroresonansi dengan induktor menggunakan induktor non-linier dapat dilihat pada Gambar 2.11. Kurva saturasi dari induktor non-linier terdapat pada Gambar 2.12.



**Gambar 2.11** Rangkaian Pemodelan Feroresonansi



**Gambar 2.12** Kurva Saturasi Induktor non-linier[10]

Timbulnya feroresonansi pada sebuah sistem tenaga listrik harus memenuhi tiga hal penting yakni induktansi non-linier, elemen kapasitif dan sumber AC. Elemen yang digunakan untuk menimbulkan ketidaklinieran induktansi adalah bahan feromagnetik yang digunakan sebagai material inti trafo. Sehingga untuk fenomena feroresonansi trafo mendapatkan perhatian khusus. Hal tersebut dikarenakan induktansi non-linier dihasilkan dari inti trafo yang dapat menyebabkan feroresonansi dapat terjadi.

### 2.7.3 Gejala-gejala Feroresonansi

Feroresonansi pada sebuah sistem tenaga ditandai dengan munculnya lebih dari satu respon *steady state* pada parameter jaringan yang sama[2]. Respon yang berubah secara tiba-tiba dari suatu respon *steady state* normal, menjadi respon *steady state* feroresonansi (ditandai dengan *level* harmonisa dan tegangan lebih yang tinggi) yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik. Gejala-gejala kelistrikan seperti pengisian daya trafo, *lightning overvoltage*, gejala transien dapat memungkinkan munculnya feroresonansi.

Beberapa gejala yang timbul yang menunjukkan kehadiran feroresonansi pada sistem tenaga listrik antara lain :

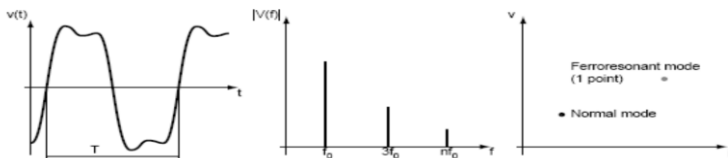
1. Penyimpangan yang besar untuk nilai tegangan lebih dan arus lebih (*High sustained overvoltage and overcurrent*).
2. Pemanasan berlebih dan suara bising pada trasformator (*Transformer overheating and loud noise*).
3. Kerusakan peralatan listrik (*Electrical equipment damage*).

#### 2.7.4 Klasifikasi Feroresonansi

Berdasarkan pengalaman pada terbentuknya gelombang di sistem tenaga, percobaan yang telah dilakukan pada model sistem serta simulasi numerik, feroresonance dapat dibedakan menjadi 4 (empat) jenis yang berbeda. Klasifikasi ini sesuai dengan kondisi steady state. Keempat jenis feroresonance tersebut adalah:

##### 1. *Fundamental Mode*

Tegangan dan arus memiliki periode yang sama dengan periode sistem dan dapat mengandung berbagai *level* harmonisa. Spektrum sinyal yang terbentuk merupakan spektrum diskontinue frekuensi fundamental sistem  $f_0$  dan harmonisanya. Gambar 2.13 merupakan model fundamental dari feroresonance.

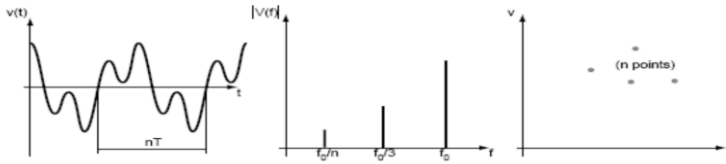


**Gambar 2.13** Model Fundamental[4]

##### 2. *Subharmonic Mode*

Sinyal periodik dengan periode  $nT$  yang merupakan kelipatan dari periode sumber. Kondisi ini dikenal sebagai subharmonik atau harmonik  $1/n$ . Kondisi subhamonik ini biasanya terdapat pada orde ganjil. Spektrum yang menunjukkan fundamental sama dengan  $f_0/n$  (di mana  $f_0$  adalah frekuensi sumber dan  $n$  adalah bilangan bulat) dan harmonisanya. Model ini ditunjukkan pada Gambar 2.14.





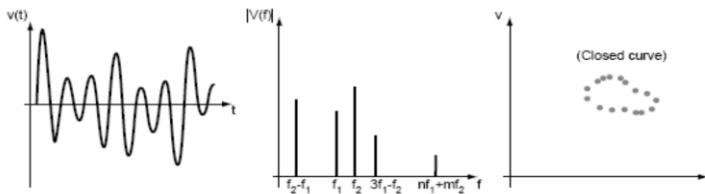
**Gambar 2.14** Model subharmonik[4]

### 3. *Quasi-Periodic Mode*

Model ini (disebut juga *pseudo-periodic*) tidak periodik. Spektrum yang didapat merupakan spektrum diskontinyu yang frekuensinya terlihat pada rumus :

$$nf_1 + mf_2 \quad (2.13)$$

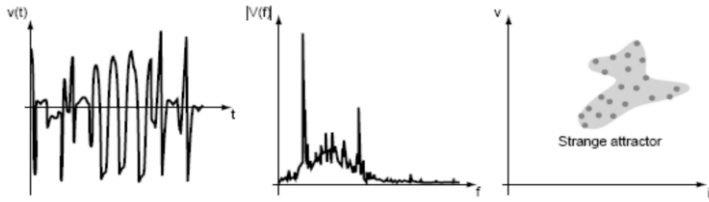
dimana  $n$  dan  $m$  adalah bilangan bulat dan  $f_1/f_2$  adalah bilangan real irasional). Model ini terlihat pada Gambar 2.15.



**Gambar 2.15** Model quasi-periodik[4]

### 4. *Chaotic Mode*

Spektrum dari mode ini merupakan spektrum yang kontinyu karena tidak membatalkan frekuensi apapun. Gambarnya dapat terlihat pada Gambar 2.16.



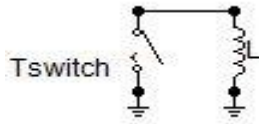
**Gambar 2.16** Model chaotic[4]

# BAB III

## METODE REAKTOR GANDA DAN PEMODELAN FERORESONANSI

### 3.1 Reaktor Ganda

Dalam studi ini digunakan penambahan reaktor ganda pada sisi primer transformator tegangan kapasitif untuk meredam efek dari fenomena feroresonansi. Reaktor ganda ini terdiri dari *switch* yang terhubung paralel dengan induktor. Untuk mendapatkan hasil respon tegangan yang baik, maka nilai induktornya dibuat bervariasi dengan waktu *switch* yang tetap (konstan). Pada Gambar 3.1 menunjukkan rangkaian reaktor ganda.



**Gambar 3.1** Rangkaian Reaktor Ganda

### 3.2 Perangkat Lunak ATP ( *Alternative Transient Program* )

ATP (*Alternative Transient Program*) adalah suatu perangkat lunak yang digunakan secara luas untuk pembuatan simulasi fenomena *transient* elektromagnetik pada teknik sistem tenaga. Suatu sistem jaringan tenaga listrik yang kompleks dapat disimulasikan dengan menggunakan ATP. ATP merupakan salah satu jenis simulasi dari EMTP (*Electromagnetic Transient Program*).

Drs. W. Scott Meyer dan Tsu-huei Liu adalah pengembang dari perangkat lunak ATP. Berbagai macam pemodelan mesin listrik seperti motor, generator, dan transformator terdapat dalam perangkat lunak ATP. Selain itu ATP juga dapat memodelkan sistem transmisi, gardu induk, berbagai macam penghantar, *surge arrester*, dan peralatan-peralatan lain

pada sistem tenaga listrik. Saat ini ATP mempunyai *model-library* sebagai berikut :

- Berbagai macam elemen R,L, dan C.
- Saluran dan penghantar tranmisi dengan parameter berbasis frekuensi dan terdistribusi.
- Resistansi dan induktansi non-linier, induktor histeritik, resistansi dengan parameter waktu, resistor dengan modul kendali TACS/MODELS.
- Komponen non-linier : transformator dengan saturasi dan histerisis, berbagai macam *arrester*, dan pemodelan *arc*.
- Berbagai macam model *switch* seperti *switch* dengan parameter waktu dan tegangan dan *switch* dengan data statistik (metode Monte Carlo).
- Perangkat elektronika daya (dioda, *thyristor*, triac).
- Berbagai pemodelan sumber tenaga.
- Mesin berputar : mesin sinkron tiga fasa, model mesin berputar *universal*.
- Komponen yang dapat dibuat sendiri oleh pengguna ATP.

### 3.2.1 ATPDraw

ATPDraw merupakan perangkat lunak *preprocessor* dari program ATP yang berbasis sistem operasi windows. Perangkat lunak ini dituliskan dengan bahasa pemrograman *CodeGear Delphi 2007* dan dapat dioperasikan pada sistem operasi MS-Windows 9x/NT/2000/XP/Vista/7. ATPDraw dapat digunakan untuk pembuatan pemodelan digital dari berbagai macam model komponen dan rangkaian elektrik dalam suatu lembar kerja. ATPDraw dapat dikatakan sebagai *human interface* dari simulasi ATP. File hasil dari perangkat lunak ATPDraw menjadi file masukan simulasi ATP. Segala macam pemodelan komponen pada ATP tersedia dalam ATPDraw dengan menggunakan operasi *drag and drop*.

ATPDraw mempunyai *layout* standart dari sistem operasi windows dan dokumen-dokumen bantuan windows. Berbagai macam fasilitas *editing* rangkaian (*copy/paste*, *grouping*, *rotate/flip*, *export/import*, *undo/redo*, dan sebagainya) tersedia dalam perangkat

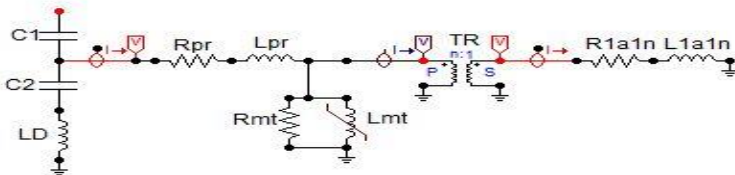
lunak ATPDraw. ATPDraw juga telah menyediakan modul-modul yang tersedia pada simulasi ATP seperti TACS dan MODELS.

Seluruh simulasi yang digunakan pada penelitian ini disimulasikan menggunakan ATPDraw Windows Version 6.1. Simulasi yang dilakukan meliputi pemodelan gardu induk, fenomena feroresonansi, reaktor ganda, dan pemodelan-pemodelan lain yang diperlukan. Grafik keluaran hasil simulasi pada studi ini juga menggunakan fasilitas grafik dari ATPDraw yaitu PlotXwin.

### 3.3 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

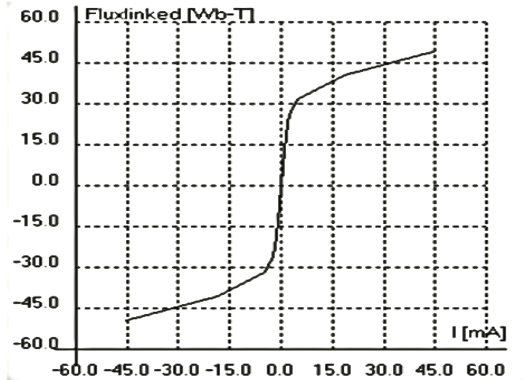
Pemodelan rangkaian ini bertujuan untuk mensimulasikan bagaimana fenomena feroresonansi dapat terjadi pada suatu kasus tertentu. Pemodelan rangkaian feroresonansi ini hanya pada pemodelan rangkaian feroresonansi akibat *switching*, serta pemodelan rangkaian normal. Pemodelan rangkaian feroresonansi ini meliputi komponen-komponen utama seperti: saluran transmisi 150 kV, kapasitor serta induktor non-linier pada *Capacitive Voltage Transformer* (CVT), *switch*. Pemodelan rangkaian dilakukan pada *Alternative Transient Program* (ATPDraw).

#### 3.3.1 Rangkaian Pemodelan *Capacitive Voltage Transformer* (CVT)



**Gambar 3.2** Pemodelan *Capacitive Voltage Transformer* (CVT) pada ATPDraw

Pada pemodelan CVT digunakan nilai kapasitor pembagi C1 sebesar 4840 pF dan C2 sebesar 48400 pF dengan tambahan nilai *load coil* adalah 10 mH. Jenis transformator yang digunakan adalah transformator satu fasa *step down* dengan nilai saturasi sesuai Gambar 3.3, dengan perbandingan tegangan  $20/\sqrt{3}$  kiloVolt pada sisi primer dan  $100/\sqrt{3}$  Volt pada sisi sekunder.



**Gambar 3.3** Kurva Magnetisasi pada CVT

Pada sisi primer transformator *step down* memiliki nilai resistansi  $R_1=220 \Omega$  dan induktansi  $L_1=17,45 \text{ mH}$ . Pada sisi sekundernya memiliki nilai  $R_{1a1n}=800 \Omega$  dan  $L_{1a1n}=10 \text{ mH}$ . Pada sisi magnetisasi memiliki nilai resistansi  $R_{mt}=9600000 \Omega$  yang dipasang parallel dengan induktansi non-linier.

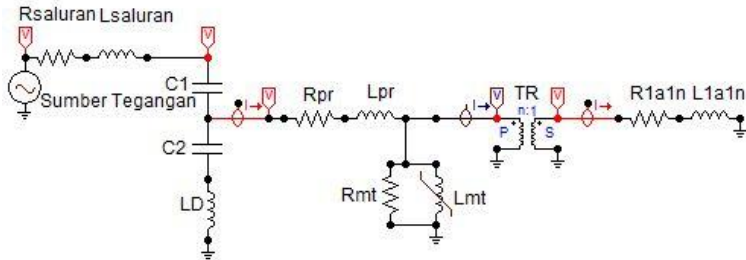
**Tabel 3.1** Data Trafo Tegangan Kapasitif

No	Nama Komenen	Besar
1	C1	4840 pF
2	C2	48400 pF
3	LD	10 mH
4	Rprimer	220 $\Omega$
5	Lprimer	17.45 mH
6	R1a1n	800 $\Omega$
7	L1a1n	10 mH
8	Rmt	9600 k $\Omega$

**Tabel 3.2** Characteristic Induktor Non-Linier (Lmt)

No	I [A]	Flux [Wb-T]
1	0.00745	123.79
2	0.018562	129.59
3	0.0745246	136.45
4	0.222739	137.82

### 3.3.2 Rangkaian Normal



**Gambar 3.4** Pemodelan Rangkaian Normal pada ATPDraw

Sumber tegangan yang digunakan dalam simulasi merupakan sumber tegangan arus bolak-balik (AC) dengan tegangan rms *line-line* sebesar 150 kV dengan frekuensi 50 Hz. Karena objek yang diteliti merupakan tegangan satu fasa, maka besar nilai tegangan yang dibangkitkan oleh sumber adalah nilai tegangan rms *line-netral*. Besar tegangan *line-netral* yang digunakan:

$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

$$V_{L-Nrms} = \frac{150000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 86603 \text{ V}$$

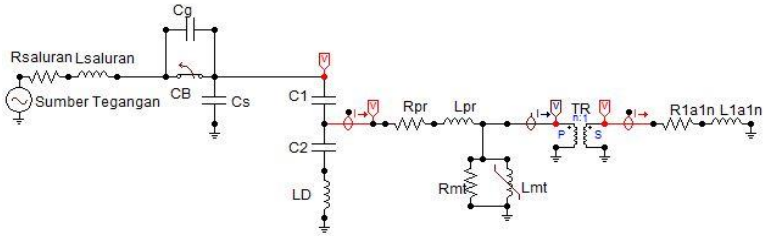
Tegangan puncak *line-netral* ( $V_{peak_{L-N}}$ ) dapat dihitung seperti berikut:

$$V_{L-Npeak} = V_{L-Nrms} \times \sqrt{2} \quad (3.2)$$

$$V_{L-Npeak} = 86603 \times \sqrt{2} = 122475 \text{ V}$$

Saluran transmisi yang digunakan memiliki komponen yaitu komponen resistif dan induktif. Pada simulasi ini, nilai resistansi saluran sebesar 0,01 Ohm/m dan induktansi saluran sebesar 1 mH/m.

### 3.3.3 Rangkaian Feroresonansi Akibat *Switching* CB



**Gambar 3.5** Pemodelan Rangkaian akibat *Switching* pada ATPDraw

Spesifikasi dari sumber tegangan dan saluran transmisi yang digunakan dalam simulasi sama dengan spesifikasi pada rangkaian normal. Jenis gangguan pada simulasi ini adalah *switching* yang muncul akibat terjadi *switch* untuk pemutusan daya oleh *Circuit Breaker* (CB), dengan kondisi awal *switch* dalam keadaan tertutup. Kapasitansi yang digunakan adalah *grading* kapasitansi  $C_g = 0,006 \mu\text{F}$  serta kapasitansi *shunt*  $C_s = 0,0002 \mu\text{F}$ .

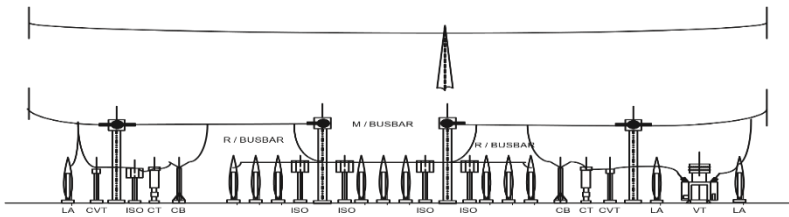


## BAB IV

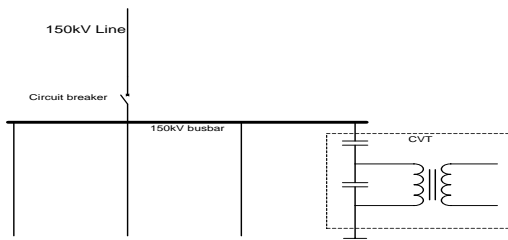
### HASIL DAN ANALISA DATA

Fenomena feroresonansi yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik sangat sulit untuk diprediksi sehingga hal ini perlu dilakukan simulasi-simulasi untuk beberapa parameter gangguan untuk mengetahui apakah gejala-gejala yang terjadi masih berada pada batas aman atau tidak.

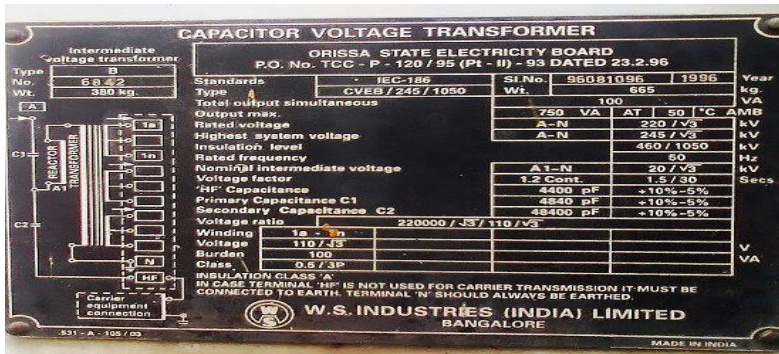
Penelitian ini difokuskan pada CVT yang terletak pada gardu induk 150 kV. Gambar 4.1 menunjukkan layout tipikal gardu induk 150 kV. CVT terletak sebelum transformator daya. Sehingga pada penelitian ini disimulasikan dengan menggunakan sebuah sumber tegangan melewati rangkaian *switching* dari sebuah *circuit breaker* dan berakhir pada CVT seperti pada gambar 4.2. Gambar 4.3 menunjukkan data trafo tegangan kapasitif (CVT) yang dipakai dalam penelitian ini.



**Gambar 4.1** Layout tipikal Gardu Induk 150 kV



**Gambar 4.2** Single Line Diagram



Gambar 4.3 Data Trafo Tegangan Kapasitif (CVT)

## 4.1 Hasil Simulasi Feroresonansi

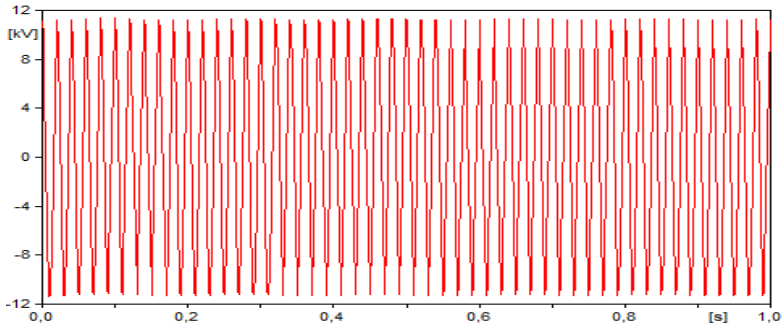
### 4.1.1 Kondisi Pada Saat Normal

Pada kondisi ini, hasil pengukuran tegangan input pada CVT merupakan tegangan pembagi kapsitor dengan nilai tegangan puncak ( $V_{peak}$ ) yaitu : 11.2 kV. Secara perhitungan dapat dicari menggunakan persamaan :

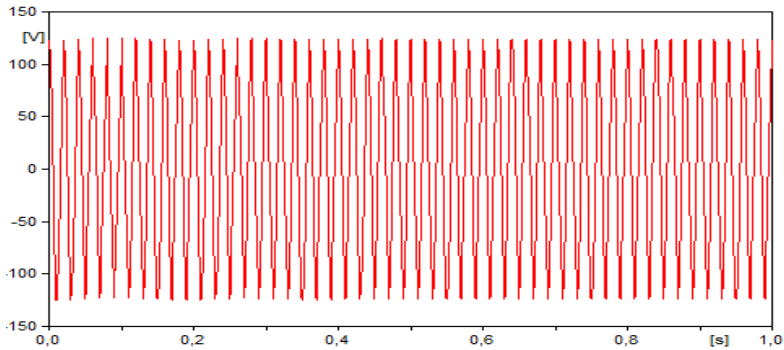
$$V_{cvt} = \frac{C_1}{C_1+C_2} \times V_{system} \quad (4.1)$$

$$V_{cvt}(peak) = \frac{C_1}{C_1+C_2} \times V_{system}(peak) \quad (4.2)$$

$$V_{cvt}(peak) = \frac{4.84}{4.84 + 48.4} \times 122475 = 11.13 \text{ kV}$$



**Gambar 4.4** Respon Tegangan sisi primer pada Kondisi Normal

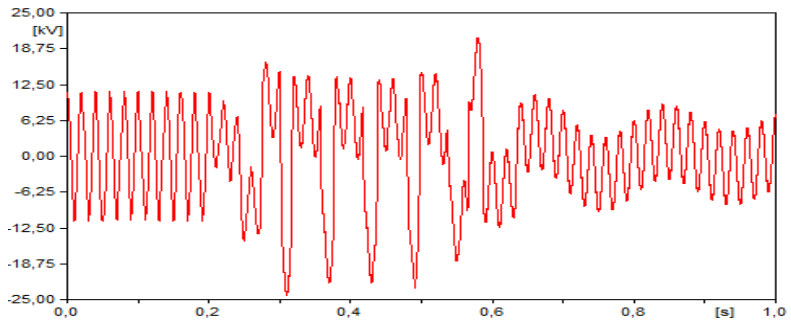


**Gambar 4.5** Respon Tegangan sisi sekunder pada Kondisi Normal

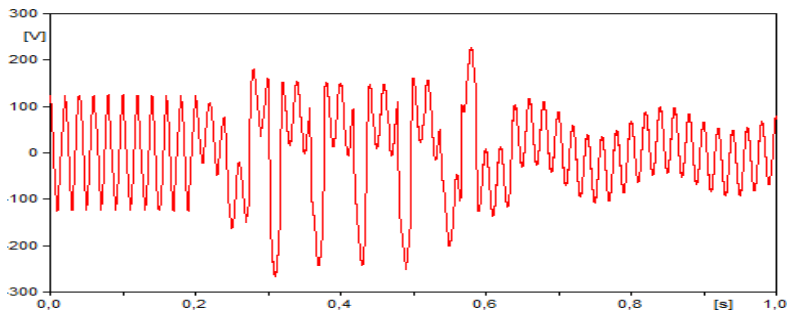
#### 4.1.2 Kondisi Pada Saat Operasi *Switching* CB

Nilai parameter-parameter yang digunakan sesuai dengan yang ada pada pembahasan pemodelan rangkaian. Variabel yang diamati adalah tegangan primer CVT dan tegangan sekunder CVT.

Pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 terlihat bahwa sebelum *switch* CB dibuka pada detik ke 0.2, sinyal tegangan baik pada sisi primer maupun sekunder CVT menunjukkan kondisi normal. Namun setelah melewati 0.2 detik terjadi ketidakstabilan nilai tegangan serta frekuensi yang menunjukkan timbulnya ferresonansi pada kedua sisi CVT. Tegangan lebih yang terjadi pada sistem ini memiliki nilai puncak sebesar 20.7 kV untuk sisi primer dan 227.73 V untuk sisi sekunder



**Gambar 4.6** Respon Tegangan sisi primer pada saat Operasi *Switching*

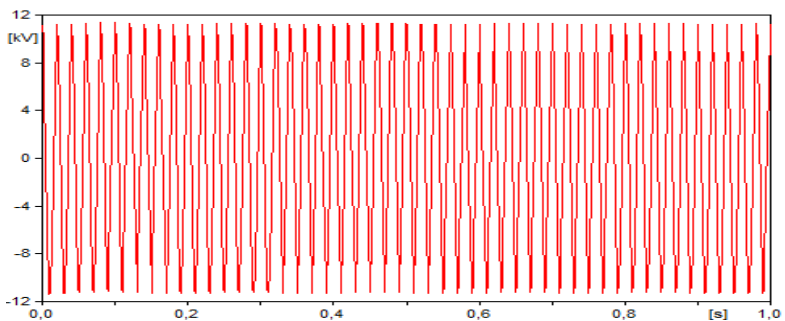


**Gambar 4.7** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat Operasi *Switching*

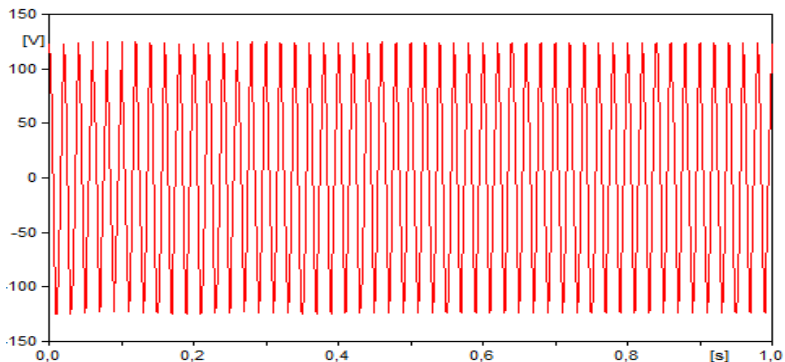
## 4.2 Hasil Analisis Pencegahan Feroresonansi Menggunakan Reaktor Ganda

### 4.2.1 Kondisi Pada Saat Normal

Pada kondisi ini meskipun dipasang reaktor ganda pada sisi primer CVT, akan tetap menghasilkan respon tegangan yang sama seperti pada mulanya baik pada sisi primer maupun sekunder CVT. Hal ini dikarenakan pada kondisi ini tidak ada gangguan yang mengalir.



**Gambar 4.8** Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda

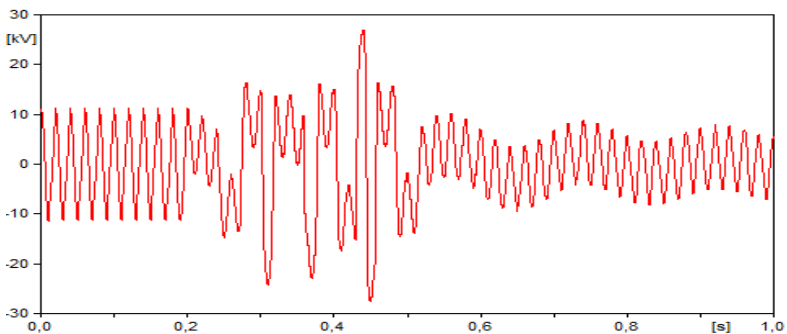


**Gambar 4.9** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda

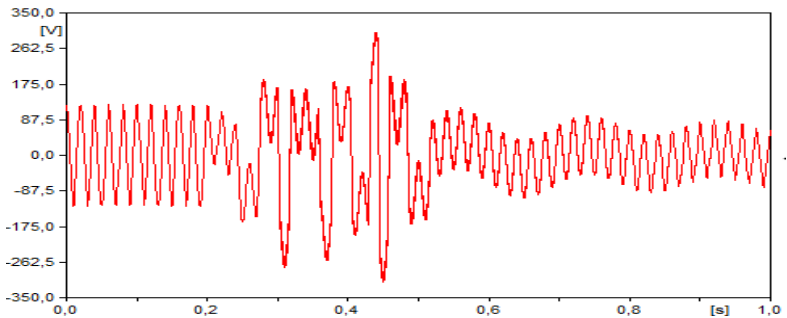
## 4.2.2 Kondisi Pada Saat Operasi Switching CB ( $T_{switch}$ = konstan, $L$ = variable)

### 4.2.2.1 Kondisi Pada Saat Topen $T_{switch}=0.5$ dan $L=140$ mH

Pada kondisi ini meskipun dipasang reaktor ganda dengan  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=140$  mH, akan tetapi masih terdapat juga tegangan lebih yang cukup tinggi dengan nilai 26.99 kV pada sisi primer dan 301,87 pada sisi sekunder.



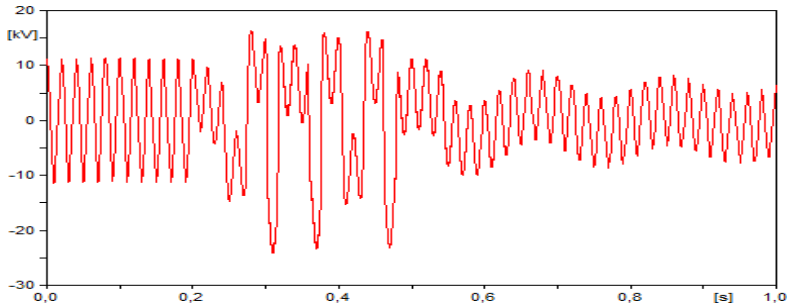
**Gambar 4.10** Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda



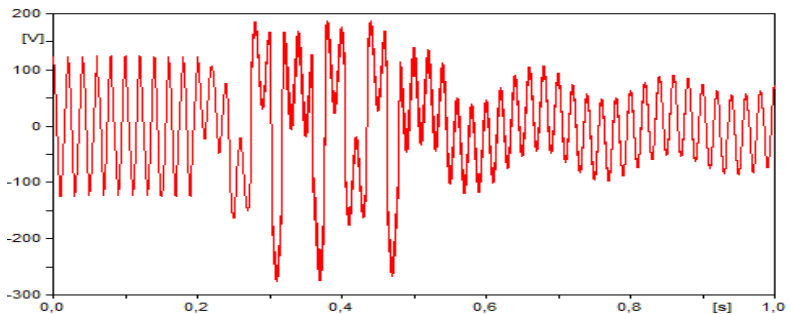
**Gambar 4.11** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda

#### 4.2.2.2 Kondisi Pada Saat Topen $T_{switch}=0.5$ dan $L=140.3$ mH

Pada kondisi ini meskipun dipasang reaktor ganda dengan  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=140.3$  mH, akan tetapi tegangan lebih yang tinggi semakin banyak, baik pada sisi primer maupun sekunder. Tegangan lebih pada kondisi ini masih memiliki nilai puncak 16.22 kV pada sisi primer dan 185 V pada sisi sekunder.



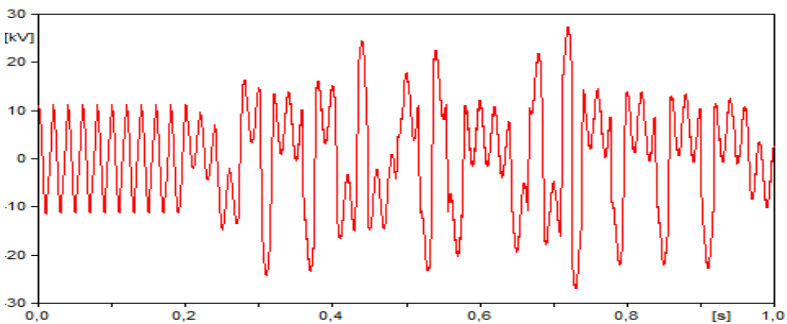
**Gambar 4.12** Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda



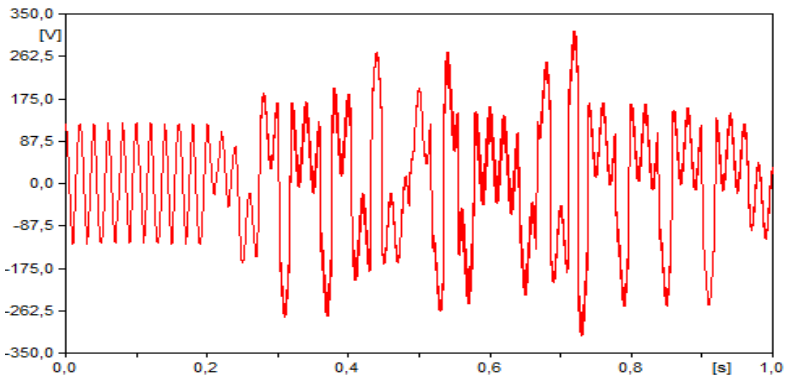
**Gambar 4.13** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda

#### 4.2.2.3 Kondisi Pada Saat Topen $T_{switch}=0.5$ dan $L=140.5$ mH

Pada kondisi ini meskipun dipasang reaktor ganda dengan  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=140.5$  mH, akan tetapi respon tegangan yang muncul semakin jelek, baik pada sisi primer maupun sekunder. Tegangan lebih pada kondisi ini masih memiliki nilai puncak 27.31 kV pada sisi primer dan 314.35 V pada sisi sekunder.



**Gambar 4.14** Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda

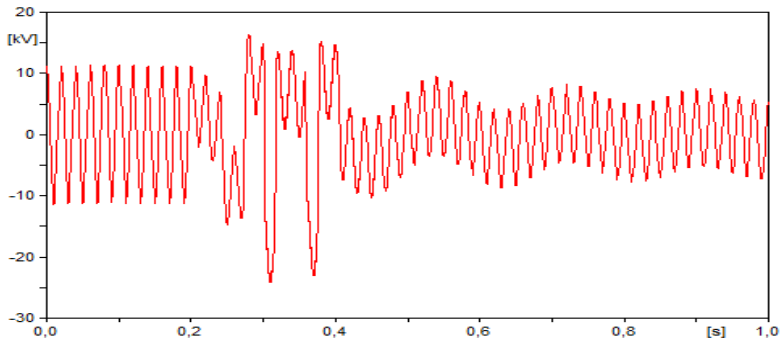


**Gambar 4.15** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda

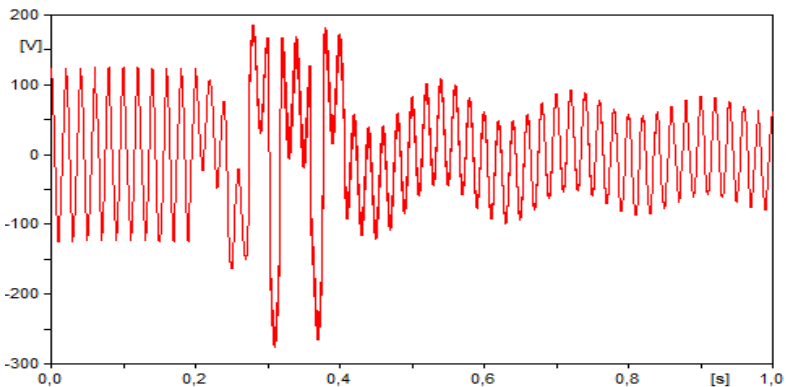


#### 4.2.2.4 Kondisi Pada Saat Topen $T_{switch}=0.5$ dan $L=140.7$ mH

Pada kondisi ini dipasang reaktor ganda dengan  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=140.7$  mH, terlihat bahwa respon tegangan yang muncul pada sisi primer maupun sekunder semakin baik, karena tegangan lebih yang muncul lebih sedikit jumlahnya dibandingkan dengan pembahasan - pembahasan sebelumnya. Tegangan lebih pada kondisi ini memiliki nilai puncak 16.41 kV pada sisi primer dan 186.085 V pada sisi sekunder.



**Gambar 4.16** Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda



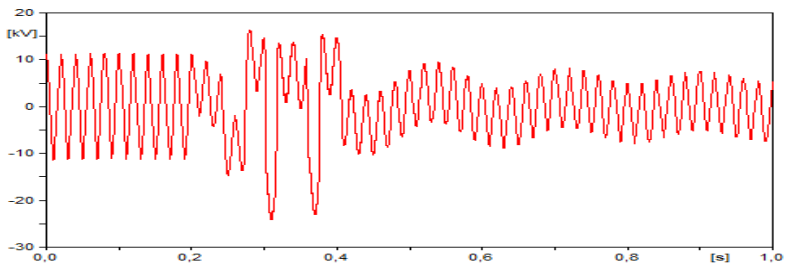
**Gambar 4.17** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda

#### 4.2.2.5 Kondisi Pada Saat Topen $T_{switch}=0.5$ dan $L=141$ mH

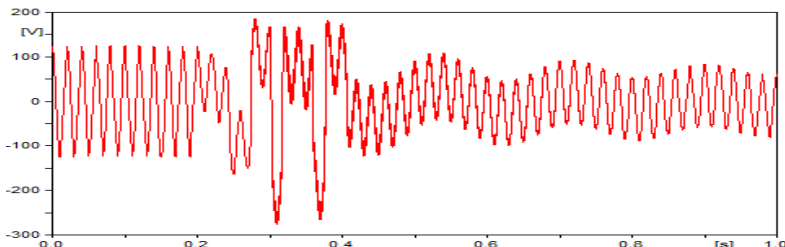
Pada kondisi ini dipasang reaktor ganda dengan  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=141$  mH, terlihat bahwa respon tegangan yang muncul sama seperti pada kondisi saat  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=140.7$  baik di sisi primer maupun sekunder. Karena tegangan lebih pada kondisi ini memiliki nilai puncak 16.41 kV pada sisi primer dan 186.085 V pada sisi sekunder.

#### 4.2.2.6 Kondisi Pada Saat Topen $T_{switch}=0.5$ dan $L=141.3$ mH

Pada kondisi ini dipasang reaktor ganda dengan  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=141.3$  mH, terlihat bahwa respon tegangan yang muncul pada sisi primer maupun sekunder semakin baik. Tegangan lebih pada kondisi ini memiliki nilai puncak 16.408 kV pada sisi primer dan 186.07 V pada sisi sekunder.



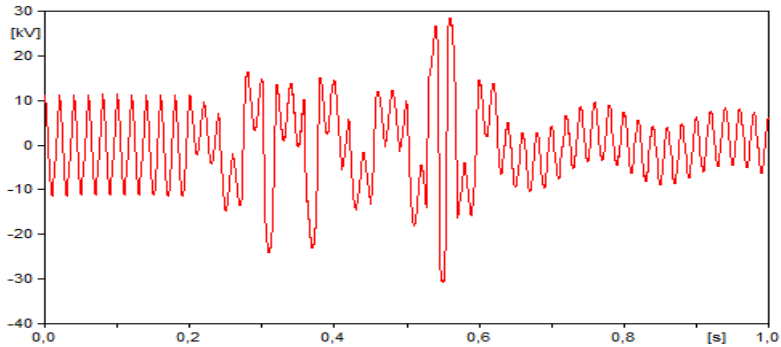
**Gambar 4.18** Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda



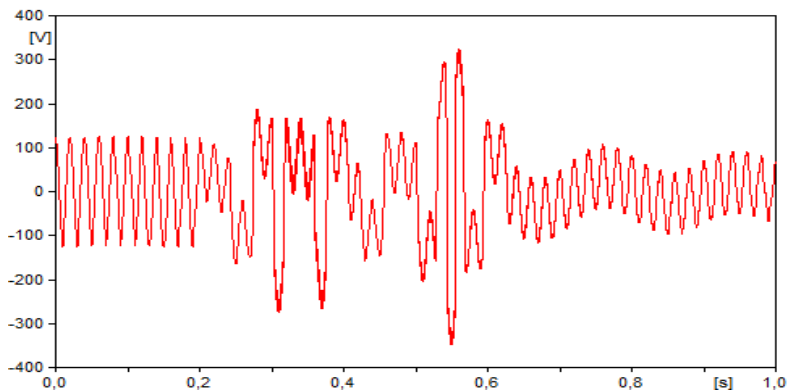
**Gambar 4.19** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda

#### 4.2.2.7 Kondisi Pada Saat Topen $T_{switch}=0.5$ dan $L=141.5$ mH

Pada kondisi ini dipasang reaktor ganda dengan  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=141.5$  mH, terlihat bahwa terdapat tegangan lebih yang cukup tinggi kembali dengan nilai 28.48 kV pada sisi primer dan 324.65 V pada sisi sekunder.



**Gambar 4.20** Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda



**Gambar 4.21** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda

Dari simulasi yang telah dilakukan pada percobaan diatas, dapat ditarik hipotesa (kesimpulan sementara) bahwa suatu fenomena feroresonansi akibat dari operasi *switching* CB yang dimodelkan pada *software* ATPDraw dapat dicegah dengan baik melalui penambahan reaktor ganda, yang dimana nilai *Tswitch* yaitu 0.5 dan L yaitu 141.3 mH.

Setelah mendapatkan nilai L yang pasti pada reaktor ganda tersebut, maka langkah selanjutnya yaitu dengan mengubah-ubah nilai pada *Tswitch* nya dan nilai L nya tetap. Hal ini dilakukan agar memperoleh kesimpulan yang signifikan, sehingga pada nantinya dapat dibandingkan dengan metode yang lain dan menjadi acuan untuk dijadikan rujukan dalam mengambil kesimpulan pada penelitian Tugas Akhir ini.

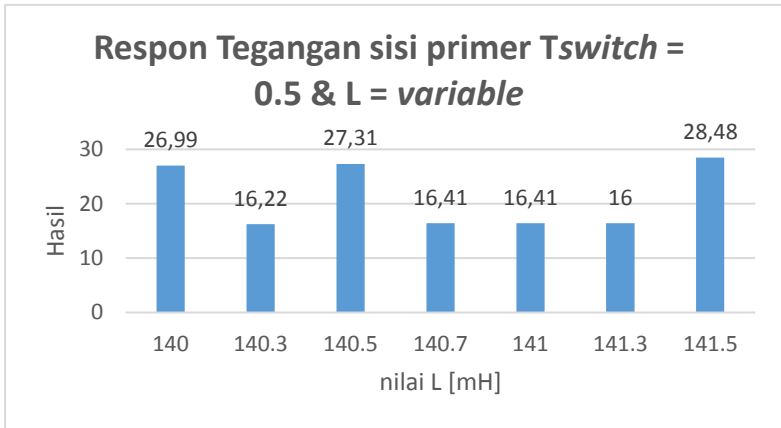
**Tabel 4.1** Hasil Simulasi dengan *Tswitch* = 0.5 dan L = *variable* pada sisi primer

Tswitch = 0.5 s	L [mH]						
	140	140.3	140.5	140.7	141	141.3	141.5
	26.99 kV	16.22 kV	27.31 kV	16.41 kV	16.41 kV	16.408 kV	28.48 kV

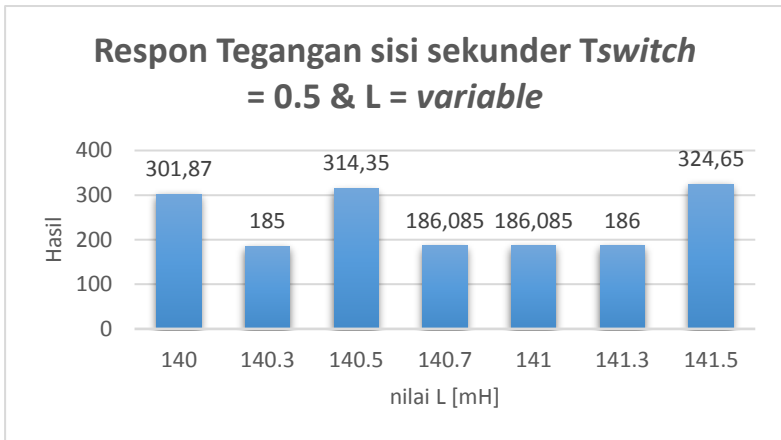
**Tabel 4.2** Hasil Simulasi dengan *Tswitch* = 0.5 dan L = *variable* pada sisi sekunder

Tswitch = 0.5 s	L [mH]						
	140	140.3	140.5	140.7	141	141.3	141.5
	301. 87 V	185 V	314.3 5 V	186.08 5 V	186.08 5 V	186.0 7 V	324.6 5 V

**Tabel 4.3** Respon Tegangan sisi primer  $T_{switch} = 0.5$  &  $L = variable$



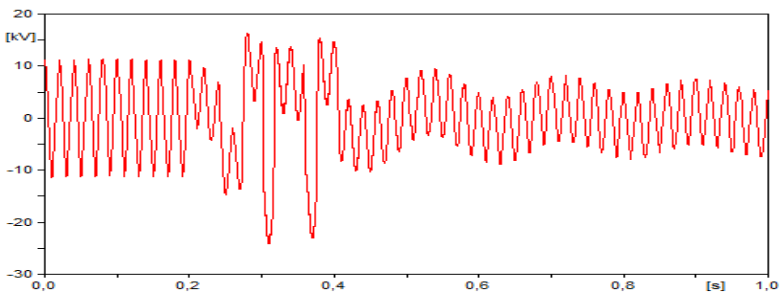
**Tabel 4.4** Respon Tegangan sisi sekunder  $T_{switch} = 0.5$  &  $L = variable$



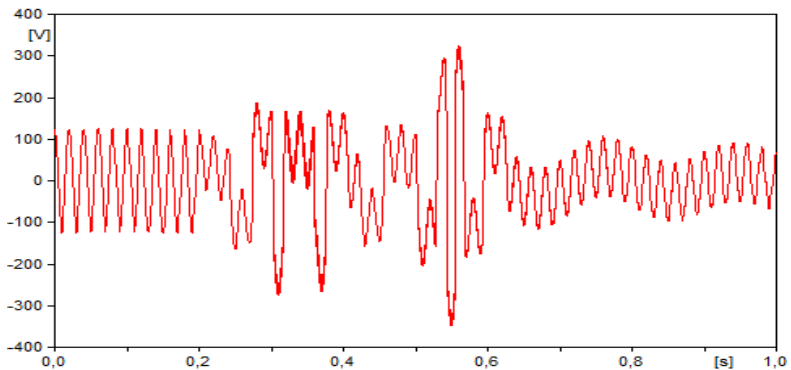
### 4.2.3 Kondisi Pada Saat Operasi Switching CB ( $T_{switch} = \text{variable}$ , $L = \text{konstan}$ )

#### 4.2.3.1 Kondisi Pada Saat Topen $T_{switch}=0$ dan $L=141.3 \text{ mH}$

Pada kondisi ini dipasang reaktor ganda dengan  $T_{switch}=0$  dan  $L=141.3 \text{ mH}$ , terlihat bahwa respon tegangan yang muncul sama seperti pada kondisi saat  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=141.3 \text{ mH}$  baik di sisi primer maupun sekunder. Karena tegangan lebih pada kondisi ini memiliki nilai puncak  $16.408 \text{ kV}$  pada sisi primer dan  $186.07 \text{ V}$  pada sisi sekunder.



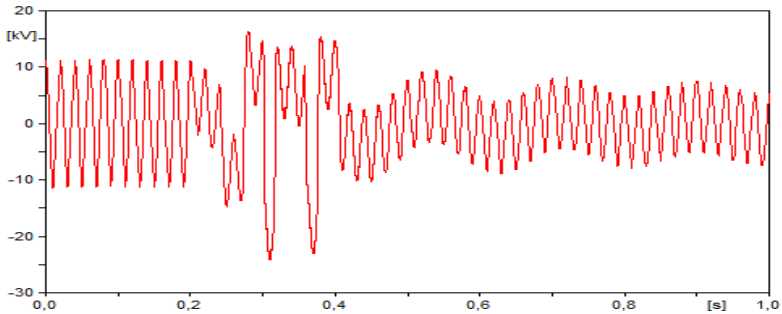
**Gambar 4.22** Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda



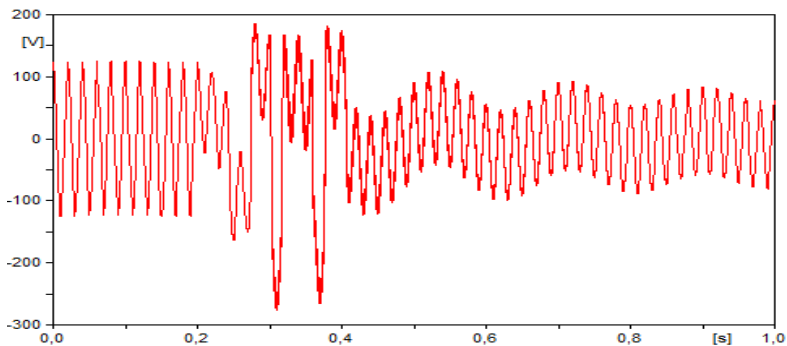
**Gambar 4.23** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda

#### 4.2.3.2 Kondisi Pada Saat Topen $T_{switch}=0.1$ dan $L=141.3$ mH

Pada kondisi ini dipasang reaktor ganda dengan  $T_{switch}=0.1$  dan  $L=141.3$  mH, terlihat bahwa respon tegangan yang muncul sama seperti pada kondisi saat  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=141.3$  mH baik di sisi primer maupun sekunder. Karena tegangan lebih pada kondisi ini memiliki nilai puncak 16.408 kV pada sisi primer dan 186.07 V pada sisi sekunder.



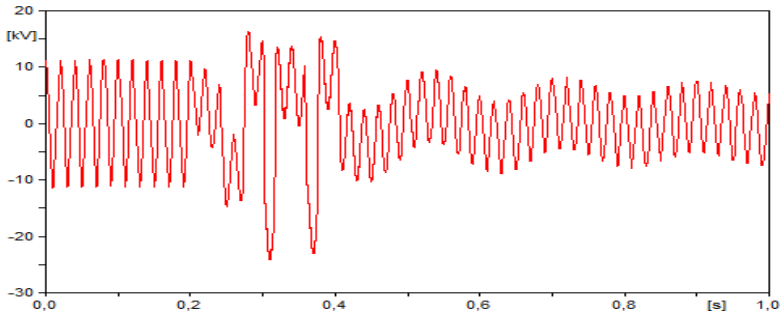
**Gambar 4.24** Respon Tegangan sisi primer saat pemasangan reaktor ganda



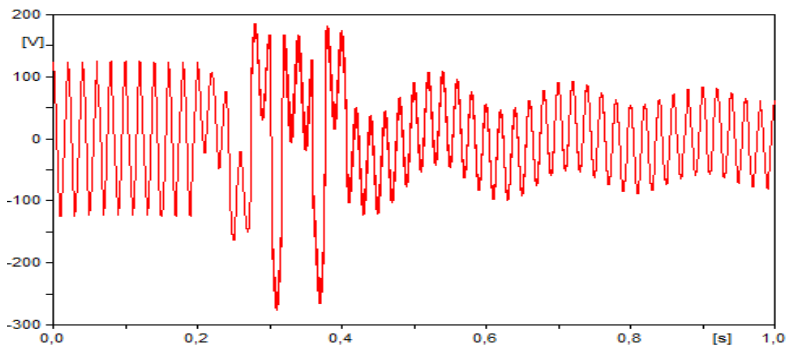
**Gambar 4.25** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda

#### 4.2.3.3 Kondisi Pada Saat Topen $T_{switch}=0.3$ dan $L=141.3$ mH

Pada kondisi ini dipasang reaktor ganda dengan  $T_{switch}=0.3$  dan  $L=141.3$  mH, terlihat bahwa respon tegangan yang muncul sama seperti pada kondisi saat  $T_{switch}=0.5$  dan  $L=141.3$  mH baik di sisi primer maupun sekunder. Karena tegangan lebih pada kondisi ini memiliki nilai puncak 16.408 kV pada sisi primer dan 186.07 V pada sisi sekunder.



**Gambar 4.26** Respon Tegangan sisi primer pada saat pemasangan reaktor ganda



**Gambar 4.27** Respon Tegangan sisi sekunder pada saat pemasangan reaktor ganda



Dari simulasi diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan mengubah-ubah nilai  $T_{switch}$  pada reaktor ganda sedangkan nilai  $L$  nya konstan maka tidak ada pengaruh dalam respon tegangan yang didapat, baik pada sisi primer maupun sekunder. Hal ini menunjukkan bahwa pecegahan feroresonansi dapat dicegah melalui memasang reaktor ganda dengan tidak ada pengaruh  $T_{open}$   $T_{switch}$  nya.

**Tabel 4.5** Hasil Simulasi dengan  $T_{switch} = variable$  dan  $L = 141.3$  pada sisi primer

$T_{switch}$ [s]	$L = 141.3$ mH
0	16.408 kV
0.1	16.408 kV
0.3	16.408 kV
0.5	16.408 kV

**Tabel 4.6** Hasil Simulasi dengan  $T_{switch} = variable$  dan  $L = 141.3$  pada sisi sekunder

$T_{switch}$ [s]	$L = 141.3$ mH
0	186.07 V
0.1	186.07 V
0.3	186.07 V
0.5	186.07 V

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi dan studi yang dilakukan tentang pencegahan feroresonansi menggunakan reaktor ganda pada sisi primer CVT, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Fenomena feroresonansi akibat *switching* dapat menyebabkan tegangan lebih dan arus lebih pada *Capacitive Voltage Transformer* (CVT). Untuk mencegah feroresonansi tersebut maka dipasang reaktor ganda pada sisi primer CVT dengan parameter yang tepat.
2. Pada kondisi normal, tegangan input pada CVT yaitu

$$V_{cvt(peak)} = \frac{4.84}{4.84 + 48.4} \times 122475 = 11.13 \text{ kV}$$

3. Dari kondisi normal sampai kondisi dimana terjadi operasi *switching* CB, kenaikan *overvoltage* yang terjadi mencapai 85 %.
4. Standart tegangan *overvoltage* yang diperbolehkan mencapai 60 hingga 70 % menurut Standart IEC 71-1972.
5. Pencegahan feroresonansi tersebut dapat diatasi secara baik dengan memasang reaktor ganda saat nilai  $T_{switch} = 0.5$  dan  $L = 141.3 \text{ mH}$ .

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah

1. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut tentang parameter yang ada dilapangan karena setiap parameter yang ada belum tentu sama.
2. Diperlukan suatu usaha untuk mencegah fenomena feroresonansi lebih baik lagi, karena metode reaktor ganda ini masih memiliki kekurangan sehingga kedepannya fenomena feroresonansi dapat dicegah lebih baik lagi untuk segala kondisi.

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tobing, Bonggas L., "*Peralatan Tegangan Tinggi*", Erlangga, Jakarta, 2002.
- [2] E. Martinez, G. Antonova and M. Olgun, "*Ferroresonance Phenomenon in CFE, its Origin and Effects*", IPST 2013, Vancouver, 2013.
- [3] Republik Indonesia, "*Undang-Undang Nomor 30 tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan*", Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia, No. 5052, Sekretariat Negara, Jakarta, 2009.
- [4] Wiratha, Putu W., "*Analisis fenomena ferroresonance pada Capacitive Voltage Transformer (CVT) akibat pelepasan beban secara mendadak*", Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, ITS, Surabaya, 2011.
- [5] Satria Seventino Simamora, I Made Yulistya Negara, dan Daniar Fahmi, "*Studi Pemasangan Damping Reaktor Untuk Mengatasi Ferroresonansi Pada Incoming 20 KV GIS Tandes*", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [6] Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo. PDM/PGI/03: PLN, Jakarta, 2014.
- [7] Stephen J. Chapman, "*Electric Machinery Fundamentals 5th edition*", Mc- Graw Hill, USA, 2012.
- [8] Ferraci, P., "*Ferroresonance*", Group Schneider: Cahier no 190, pp. 1-28, Maret, 1998.
- [9] Preecha Sakarung, Teratam Bunyagul, and Somchai Chatratana, "*Investigation and Mitigation of Overvoltage Due to Ferroresonance in the Distribution Network*", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 2, No. 3, 2007.
- [10] Swee Peng Ang, "*Ferroresonance Simulation Studies of Transmission System*", School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Manchester, 2010.

*--Halaman ini sengaja dikosongkan--*

## RIWAYAT HIDUP



**David Fernady**, anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis biasa dipanggil David. Penulis lahir di kota Surabaya, 02 Oktober 1994. Penulis memulai pendidikannya dari TK. Panca Dharma pada tahun 1999-2001, kemudian melanjutkan studi di SDN Tanah Kali Kedinding II-252 Surabaya pada tahun 2001-2007, SMP Negeri 9 Surabaya pada tahun 2007-2010, SMA Negeri 1 Surabaya pada tahun 2010-2013, dan penulis melanjutkan studi di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya hingga saat ini. Konsentrasi penulis adalah pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama kuliah, penulis pernah aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS sebagai tim kaderisasi dibawah naungan Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) selama 2 periode kepengurusan pada tahun 2014-2016. Selain itu, penulis juga aktif dalam kepengurusan kepanitiaan event yang dilaksanakan di jurusan Teknik Elektro maupun di tingkat institut, yaitu sebagai Anggota Sie Keamanan dan Perijinan Electra 2014, Anggota Sie Konsumsi Region Surabaya Electra 2015, Assisten Koordinator Kesma Expo ITS 2014, Anggota Sie Keamanan dan Perijinan LKMM Pra TD XII FTI ITS, Koordinator Sie Perlengkapan Gerigi ITS 2014, dan lain-lain. Penulis dapat dihubungi melalui email [d\\_fernady@yahoo.com](mailto:d_fernady@yahoo.com).

*--Halaman ini sengaja dikosongkan--*