



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI PEMASANGAN DAMPING REAKTOR UNTUK
MENGATASI FERORESONANSI PADA *INCOMING* 20 KV
GIS TANDES**

**Satria Seventino Simamora
NRP 2211100129**

**Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



FINAL PROJECT - TE 14 1599

**Study Case of Damping Reactor Installation to Treat
Ferroresonance in Incoming 20 KV GIS Tandes**

**Satria Seventino Simamora
NRP 2211100129**

**Advisor
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.**

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**

**STUDI PEMASANGAN DAMPING REAKTOR UNTUK
MENGATASI FERORESONANSI PADA
INCOMING 20 KV GIS TANDES**

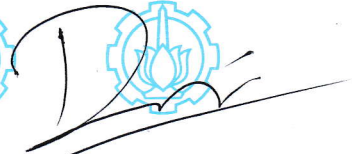
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

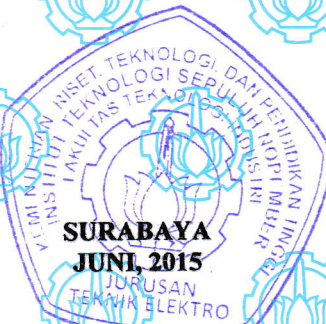
Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,



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

Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP. 198909252014041002



Studi Pemasangan Damping Reaktor untuk Mengatasi Feroresonansi pada *Incoming* 20 kV GIS Tandem

Nama : Satria Seventino Simamora
Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

Pada studi ini, dilakukan simulasi pemasangan damping reaktor sebagai salah satu teknik mitigasi feroresonansi dengan menggunakan ATP Draw. Damping reaktor sebagai teknik mitigasi feroresonansi menggunakan elemen resistor yang dipasang di sisi primer transformer. Hasil dari simulasi pemasangan damping reaktor yang diperoleh berupa respon arus dan respon tegangan yang berubah terhadap waktu yang menunjukkan apakah feroresonansi dapat diredam atau tidak. Dari hasil simulasi pemasangan damping reaktor pada studi ini diperoleh bahwa feroresonansi dapat diredam dengan pemasangan nilai damping yang tepat. Sehingga dalam studi ini akan dibahas mengenai sejauh mana keefektifan dari pemasangan damping untuk meredam feroresonansi.

Kata Kunci: **Feroresonansi, Transformator, Damping reaktor, ATP/EMTP.**

Studi Pemasangan Damping Reaktor untuk Mengatasi Feroresonansi pada *Incoming* 20 kV GIS Tandem

Nama : Satria Seventino Simamora
Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

Pada studi ini, dilakukan simulasi pemasangan damping reaktor sebagai salah satu teknik mitigasi ferroresonansi dengan menggunakan ATP Draw. Damping reaktor sebagai teknik mitigasi ferroresonansi menggunakan elemen resistor yang dipasang di sisi primer transformer. Hasil dari simulasi pemasangan damping reaktor yang diperoleh berupa respon arus dan respon tegangan yang berubah terhadap waktu yang menunjukkan apakah ferroresonansi dapat diredam atau tidak. Dari hasil simulasi pemasangan damping reaktor pada studi ini diperoleh bahwa ferroresonansi dapat diredam dengan pemasangan nilai damping yang tepat. Sehingga dalam studi ini akan dibahas mengenai sejauh mana keefektifan dari pemasangan damping untuk meredam ferroresonansi.

Kata Kunci: **Feroresonansi, Transformator, Damping reaktor, ATP/EMTP.**



(halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDY CASE OF DAMPING REACTOR INSTALLATION TO TREAT FERRORESONANCE IN 20 KV INCOMING GIS TANDES

Name : Satria Seventino Simamora
1st Advisor : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
2nd Advisor : Daniar Fahmi ST., MT.

ABSTRACT

This study concern about how to treat ferroresonance using a damping reactor installation by used a simulation with ATP Draw. This mitigation techniques using resistor on the primary side of transformer. The simulation results a response of current and voltage changed by time that show ferroresonance could mitigated or not. Thin simulation result that ferroresonance could mitigated with an appropriate value of damping element. So this study discussed how far the effectiveness of using damping installation to treat ferroresonance.

Key Words : *Ferroresonance, Transformer, Damping Reactor, ATP/EMTP*



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan YME untuk berkat dan kasih karunia yang diterima oleh penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir **”Studi Pemasangan Damping Reaktor untuk mengatasi Feroresonansi pada *Incoming* 20 kV GIS Tandem”** ini tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, 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, Bapak Bapak Daniar Fahmi dan Bapak I Gusti Ngurah Satriyadi atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kedua orangtua dan adik penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
4. Teman-teman Angkatan 2011 “ELVN” yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
5. Teman-teman Laboratorium Tegangan Tinggi yang mengingatkan dan mendukung penulis agar penulis bisa wisuda ke-112.
6. Teman-teman WP THOK yang selalu memberikan semangat agar penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan tepat waktu.
7. Fitri Rahayu Silaen, partner yang tidak pernah lelah untuk memberi waktu dan semangat kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai tepat waktu.

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

Surabaya, Juni 2015

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	2
BAB 2 SISTEM TENAGA LISTRIK DAN TRANSFORMATOR	3
2.1 Sistem Tenaga Listrik	3
2.2 Sistem Transmisi	4
2.2.1 Permasalahan dalam Sistem Transmisi	4
2.3 Gardu Induk	5
2.3.1 Gardu Induk Konvensional	6
2.3.2 Gas Insulation Station	6
2.4 Transformator	7
2.4.1 Prinsip Induksi pada Transformator	8
2.4.2 Ketidaklinear pada Inti Transformator	9
BAB 3 FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK	11
3.1 Resonansi	11
3.2 Feroresonansi	12
3.2.1 Pengertian Feroresonansi	12
3.2.2 Timbulnya Feroresonansi	13
3.2.3 Gejala-gejala Feroresonansi	14
3.2.4 Pendekatan Fisik Feroresonansi	14
3.2.5 Klasifikasi Feroresonansi	18

3.2.6	Pemodelan Simulasi Feroresonansi pada <i>Incoming</i> 20 kV GIS TANDES	20
3.2.7	Mitigasi Feroresonansi	21
3.2.7.1	Mitigasi Feroresonansi dengan Pemasangan Damping	21
3.3	ATP/EMTP Draw	22
BAB 4	ANALISIS HASIL SIMULASI MITIGASI FERORESONANSI MENGGUNAKAN DAMPING REAKTOR	25
4.1	Feroresonansi pada Gardu Induk	25
4.1.1	Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cseries	26
4.1.2	Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cshunt	30
4.2	Mitigasi Feroresonansi pada Gardu Induk	33
4.2.1	Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries	33
4.2.1.1	Mitigasi Feroresonansi menggunakan Resistor	33
4.2.1.2	Mitigasi Feroresonansi menggunakan Induktor	36
4.2.2	Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt	39
4.2.2.1	Mitigasi Feroresonansi menggunakan Resistor	39
4.2.2.2	Mitigasi Feroresonansi menggunakan Induktor	42
4.3	Feroresonansi Akibat Saluran Trafo Dibuka	45
4.3.1	Keadaan Normal	45
4.3.2	Feroresonansi Akibat Satu Fasa Terbuka	47
4.3.3	Mitigasi Feroresonansi Akibat Satu Fasa Terbuka	50
4.3.4	Feroresonansi Akibat Dua Fasa Terbuka	54
4.3.5	Mitigasi Feroresonansi Akibat Dua Fasa Terbuka	56
BAB 5	PENUTUP	
5.1	Kesimpulan	61
5.2	Saran	62
	DAFTAR PUSTAKA	63
	RIWAYAT HIDUP	65

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Efek Perubahan Nilai Cseries	28
Tabel 4.2 Efek Perubahan Cshunt	31
Tabel 4.3 Efek Pemasangan Damping Resistor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cseries yang divariasikan	33
Tabel 4.4 Efek pemasangan Damping Induktor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cseries yang divariasikan	36
Tabel 4.5 Efek Pemasangan Damping Resistor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cshunt yang divariasikan	39
Tabel 4.6 Efek Pemasangan Damping Induktor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cshunt yang divariasikan	42
Tabel 4.7 Spesifikasi <i>Voltage Transformer</i>	45
Tabel 4.8a Respon Tegangan Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Satu Saluran.	50
Tabel 4.8b Respon Tegangan Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Satu Saluran.	51
Tabel 4.9a Respon Arus Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Satu Saluran.	51
Tabel 4.9b Respon Arus Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Satu Saluran.	51
Tabel 4.10a Respon Tegangan Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Dua Saluran.	56
Tabel 4.10b Respon Tegangan Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Dua Saluran.	57
Tabel 4.11a Respon Arus Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Dua Saluran.	57
Tabel 4.11b Respon Arus Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Dua Saluran.	57



(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

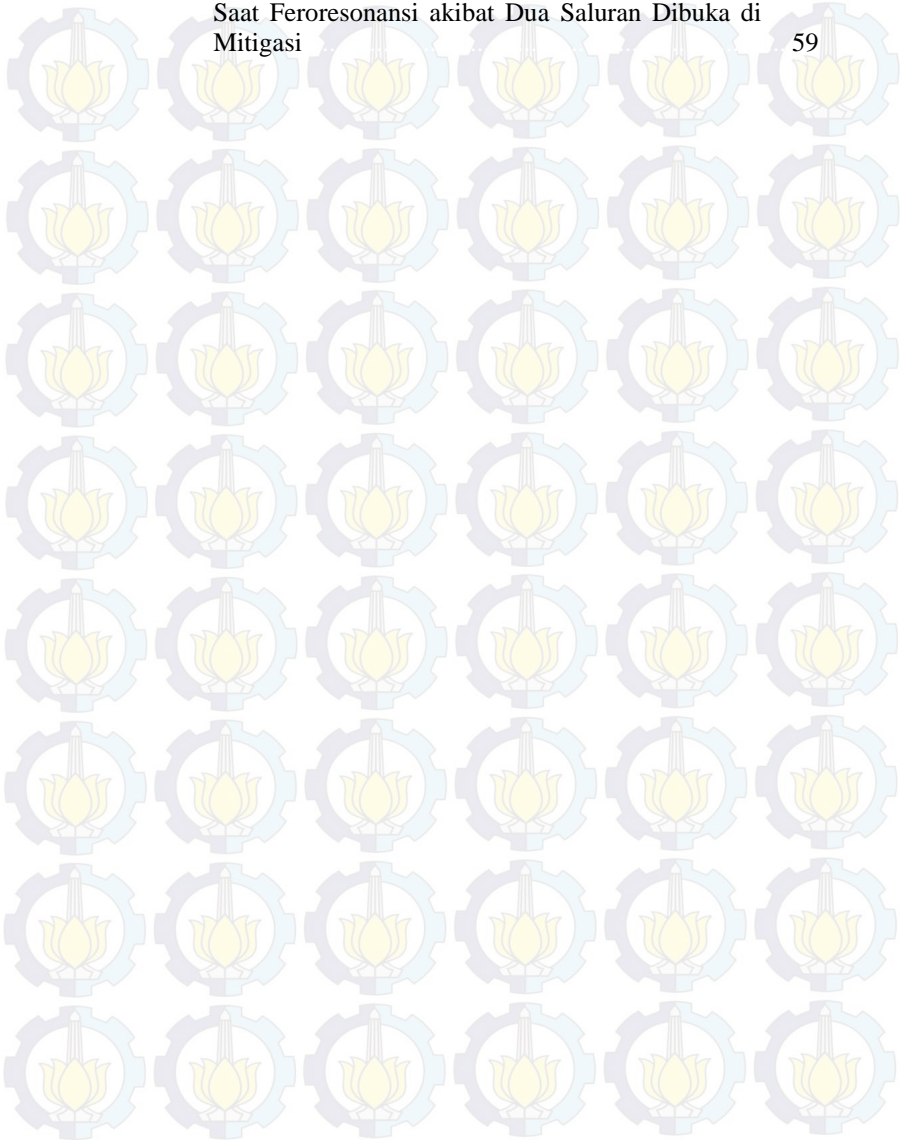
	Halaman
Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik	3
Gambar 2.2 Gardu Induk Konvensional	6
Gambar 2.3 Konstruksi trafo (a), Tipe Inti (b), Tipe cangkang(c)	7
Gambar 2.4 Konstruksi trafo (a), Tipe Inti (b), Tipe cangkang(c)	8
Gambar 2.5 <i>Voltage Transformer</i> Pemasangan Dalam	9
Gambar 2.5 Kurva Histerisis	10
Gambar 3.1 Resonansi Seri (a) Hubungan Arus dan Frekuensi resonansi (b)	12
Gambar 3.2 Rangkaian Pemodelan Feroresonansi	13
Gambar 3.3 Kurva Saturasi Induktor Nonlinear	14
Gambar 3.4 Rangkaian karakteristik Dasar Feroresonansi	15
Gambar 3.5 Diagram Skematik model Feroresonansi	15
Gambar 3.6 Hubungan Fluks dan Arus	15
Gambar 3.7 Osilasi pada Rangkaian Feroresonansi Seri	16
Gambar 3.8 Fundamental Mode	18
Gambar 3.9 Subharmonik mode	19
Gambar 3.10 Quasi-periodik mode	19
Gambar 3.11 Chaotic Mode	19
Gambar 3.12 a. Susunan Peralatan pada Gardu Induk b. Layout sebuah GIS	20
Gambar 3.13 <i>Single Line Diagram Incoming 20 kV GIS Tandem</i>	21
Gambar 3.14 Rangkaian Ekuivalen Feroresonansi Reduksi	21
Gambar 3.15 Simulasi Rangkaian Feroresonansi menggunakan ATP Draw	22
Gambar 3.16 Mitigasi Feroresonansi dengan Memasang Resistor	23
Gambar 3.17 Mitigasi Feroresonansi dengan Memasang Induktor	24
Gambar 4.1 Single Line Diagram Sistem Transmisi 150 kV	26
Gambar 4.2 Rangkaian Ekuivalen Feroresonansi Reduksi	26
Gambar 4.3 Rangkaian Simulasi Feroresonansi	26
Gambar 4.4 Rangkaian Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cseries	27
Gambar 4.5 Kurva Magnetisasi Induktor nonlinear	27
Gambar 4.6 Respon Tegangan saat (a) tidak terjadi feroresonansi (b) terjadi feroresonansi akibat mengubah Cseries	29

Gambar 4.7	Respon Arus saat (a) tidak terjadi feroresonansi (b) saat terjadi feroresonansi akibat mengubah Cseries	29
Gambar 4.8	Rangkaian Feroresonansi dengan mengubah Paramaeter Cshunt	30
Gambar 4.9	Respon Tegangan saat (a) tidak terjadi feroresonansi (b) terjadi feroresonansi akibat mengubah Cshunt.	31
Gambar 4.10	Respon Arus saat (a) tidak terjadi feroresonansi (b) terjadi feroresonansi akibat mengubah Cshunt.	32
Gambar 4.11	Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi Akibat Mengubah Parameter Cseries dengan Pemasangan Damping Resistor	33
Gambar 4.12	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries menggunakan Damping Resistor sebesar 100Ω	34
Gambar 4.13	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries menggunakan Damping Resistor sebesar 1MΩ	35
Gambar 4.14	Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries dengan memasang Damping Resistor	36
Gambar 4.15	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Induktor sebesar 1 mH	37
Gambar 4.16	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Induktor sebesar 1 kH	38
Gambar 4.17	Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt dengan memasang Damping Resistor .	39
Gambar 4.18	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah CShunt menggunakan Damping Resistor sebesar 100Ω.	40
Gambar 4.19	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Resistor sebesar 1 MΩ	41
Gambar 4.20	Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt dengan memasang Damping Induktor	42

Gambar 4.21	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Induktor sebesar 0.1 mH	43
Gambar 4.22	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Induktor sebesar 10 H	44
Gambar 4.23	Simulasi ATP Akibat Pembukaan Saluran	45
Gambar 4.24	Respon Tegangan saat Kondisi Normal	46
Gambar 4.25	Respon Tegangan pada Sisi Primer saat Kondisi Normal	46
Gambar 4.26	Respon Arus pada Sisi Primer saat Kondisi Normal	46
Gambar 4.27	Respon Tegangan pada Sisi Sekunder saat Kondisi Normal	47
Gambar 4.28	Respon Arus pada Sisi Sekunder saat Kondisi Normal	47
Gambar 4.29	Respon Tegangan di sisi Primer (a) dan Sekunder (b) Saat Satu Saluran Dibuka	48
Gambar 4.30	Respon Arus pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Satu Saluran Dibuka	49
Gambar 4.31	Rangkaian Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Resistor akibat membuka Satu Salura	50
Gambar 4.32	Respon Tegangan pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Feroresonansi akibat Satu Saluran Dibuka di Mitigasi	52
Gambar 4.33	Respon Arus pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Feroresonansi akibat Satu Saluran Dibuka di Mitigasi	53
Gambar 4.34	Respon Tegangan di Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Dua Saluran Dibuka	54
Gambar 4.35	Respon Arus pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Satu Saluran Dibuka	55
Gambar 4.36	Rangkaian Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Resistor akibat Membuka Dua Fasa Terbuka	56
Gambar 4.37	Respon Tegangan pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Feroresonansi akibat dua Saluran Dibuka di Mitigasi	58

Gambar 4.38 Respon Arus pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b)
Saat Feroresonansi akibat Dua Saluran Dibuka di
Mitigasi

59



BIOGRAFI



Penulis memiliki nama lengkap Satria Seventino Simamora. Lahir di pematangsiantar pada tanggal 17 September 1993. Penulis mulai menempuh jalur pendidikan formal di TK Santa Lucia Pematangsiantar pada tahun 1997-1999. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan dasar di SD RK Budi Mulia 1 hingga tahun 2005. Setelah lulus dari jenjang pendidikan dasar penulis melanjutkan pendidikan menengah di SLTP RK Bintang Timur Pematangsiantar. Pada tahun 2008, penulis memilih untuk melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 2 Balige. Kemudian penulis menetapkan pilihan untuk melanjutkan jenjang pendidikan perguruan tinggi di Jurusan Teknik Elektro ITS pada tahun 2011. Selama berstatus sebagai mahasiswa, penulis aktif dalam berorganisasi dan berkarya dibidang olahraga maupun akademik. Saat ini penulis aktif sebagai Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi di Jurusan Teknik Elektro FTI ITS.

Email :
Satriasimamora17@gmail.com



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem transmisi tenaga listrik memiliki peranan yang sangat vital bagi kehidupan sehari-hari. Hal tersebut tidak terlepas dari perkembangan teknologi yang sangat pesat dimana sistem transmisi harus memiliki tingkat keandalan dan ketersediaan yang tinggi. Pelayanan sistem transmisi yang maksimal harus didukung peralatan-peralatan yang berfungsi secara optimal. Salah satu peralatan yang harus bekerja dengan baik adalah trafo.

Trafo dalam sistem transmisi merupakan peralatan listrik yang menjadi inti dari penyaluran listrik kepada konsumen. Penggunaan trafo dalam sistem transmisi sangat memungkinkan untuk terjadinya sebuah fenomena kelistrikan yang sangat unik yakni feroresonansi. Feroresonansi sendiri tidak dapat dihindari ataupun diprediksi kapan terjadi. Hal ini dikarenakan adanya ketidaklinearan yang timbul pada sistem yang mengakibatkan feroresonansi susah untuk diperkirakan 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 [1].

Tingkat tegangan lebih atau arus lebih yang terjadi dapat berbahaya bagi peralatan listrik [2]. Contoh kerusakan yang akan dialami trafo adalah terbakar. Selain berbahaya bagi peralatan, arus dan tegangan yang timbul akibat feroresonansi menjadi sangat berbahaya bagi operator. Efek lain ketika feroresonansi terjadi adalah sistem proteksi pada sistem transmisi gagal bekerja. Hal tersebut akan mempengaruhi keandalan dari sistem transmisi tersebut. Permasalahan yang timbul akibat feroresonansi harus segera diatasi atau ditangani. Salah satu cara yang efektif digunakan adalah dengan melakukan pemasangan *damping reaktor*.

Masalah yang dibahas dalam studi ini adalah bagaimana mengetahui fenomena feroresonansi pada sistem tenaga listrik dengan melakukan simulasi pada pemodelan sebuah rangkaian ekuivalen feroresonansi. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisis pemasangan *damping reaktor* sebagai salah satu cara meredam feroresonansi menggunakan perangkat lunak ATP.

Sedangkan tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah mengetahui pengaruh pemasangan *damping reaktor* terhadap sistem tenaga yang mengalami feroresonansi.

Metode yang digunakan dalam studi ini, yang pertama adalah melakukan studi literatur dan pengumpulan data mengenai feroresonansi dan bentuk-bentuk mitigasi feroresonansi. Setelah mengumpulkan data-data yang dibutuhkan maka selanjutnya adalah pemodelan rangkaian maka akan ditentukan parameter-parameter dari rangkaian feroresonansi seperti nilai kapasitor, induktansi nonlinear dan nilai resistansi. Kemudian langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan rangkaian feroresonansi yang akan disimulasikan melalui perangkat lunak ATP Draw. Setelah melakukan pemodelan rangkaian yang akan disimulasikan maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi rangkaian. Hasil dari simulasi berupa grafik fungsi tegangan dan fungsi arus terhadap waktu yang menunjukkan feroresonansi dan grafik hasil mitigasi feroresonansi. Kemudian langkah terakhir yang dilakukan adalah hasil analisis digunakan sebagai rujukan menarik kesimpulan.

1.2 Sistematika Penulisan

Pada bab satu berisi tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, manfaat dan relevansi dari penulisan.

Selanjutnya bab dua berisi teori penunjang yang membahas tentang sistem tenaga listrik dan teori dasar transformator yang digunakan dalam studi ini.

Pada bab tiga dibahas mengenai teori dasar feroresonansi dan teknik-teknik mitigasi feroresonansi.

Kemudian bab empat yang dibahas adalah hasil simulasi mengenai feroresonansi dan analisis hasil simulasi teknik mitigasi feroresonansi dengan menggunakan damping reaktor.

Pada bab lima berisi tentang penarikan kesimpulan dari studi yang dilakukan melalui sebuah simulasi rangkaian feroresonansi dan saran untuk penelitian atau studi kedepannya.

BAB 2

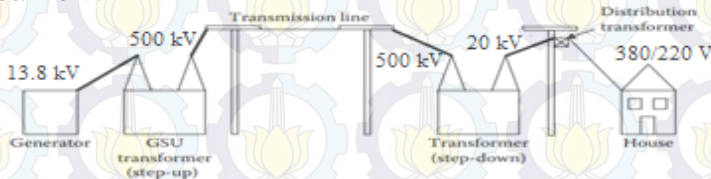
Sistem Transmisi dan Transformator

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik saat ini mengalami kemajuan seiring dengan perkembangan teknologi. Baik dari mesin-mesin listrik yang digunakan ataupun pemanfaatan *artificial intelligence* yang diterapkan dalam sistem tenaga listrik. Akan tetapi secara umum sistem tenaga listrik memiliki 3 komponen utama yakni pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi dan sistem distribusi yang saling terikat dan sangat kompleks. Ada komponen yang tidak kalah penting pada sistem tenaga listrik yakni *substation* yang berguna sebagai tempat untuk menaikkan dan menurunkan level tegangan dari suatu saluran. Mesin listrik yang berfungsi membangkitkan listrik biasanya terpusat dan lokasi antar pusat listrik berjauhan. Oleh karena itu listrik yang dibangkitkan akan disalurkan kepada konsumen melalui saluran transmisi dan saluran distribusi.

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 berbeda lokasi dan berletakan berjauhan. 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 merupakan tulang punggung dari sistem tenaga yang menghubungkan semua pusat-pusat pembangkit [3]. Sistem transmisi berfungsi sebagai wadah penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit sampai sistem distribusi melalui sebuah media hantar yakni konduktor. Konduktor yang digunakan juga berbeda-beda disesuaikan dengan kondisi lingkungan sistem transmisi. Listrik yang dialirkan pada sistem transmisi menggunakan tegangan dengan level tegangan yang tinggi. Hal ini bertujuan mengecilkan rugi-rugi akibat adanya *drop voltage*. Pada persamaan 2.1 dan 2.2 akan dijelaskan 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)

Ketika nilai tegangan dinaikkan dan nilai hambatan yang tetap maka diperoleh nilai arus yang semakin kecil. Nilai arus (I) yang diperoleh menjadi lebih kecil akan mempengaruhi nilai daya rugi rugi pada sistem transmisi. Rugi daya dapat dilihat pada persamaan 2.2

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

Dimana: P_{loss} = Rugi-rugi Daya (Watt)

I = Arus

R = hambatan

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

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 memutuskan 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 terjaga.

2.3 Gardu Induk

Gardu induk merupakan bagian yang sangat penting dalam penyaluran listrik dari pembangkit hingga dapat digunakan oleh konsumen. Gardu Induk yang terdiri dari peralatan-peralatan listrik yang digunakan untuk menjaga ketersediaan listrik tetap ada. Gardu induk dibagi menjadi 4 bagian besar yakni *switchyard* pada gardu pembangkitan, Gardu Induk Pelanggan, *switching station*, Gardu Induk Distribusi [4]. Gardu induk menjadi tempat pengukuran, pengawasan

serta pengaturan pengaman sistem tenaga listrik, Gardu induk menurut pemasangannya dibagi menjadi dua yakni gardu induk konvensional dan GIS (*Gas Insulated Station*).

2.3.1 Gardu Induk Konvensional

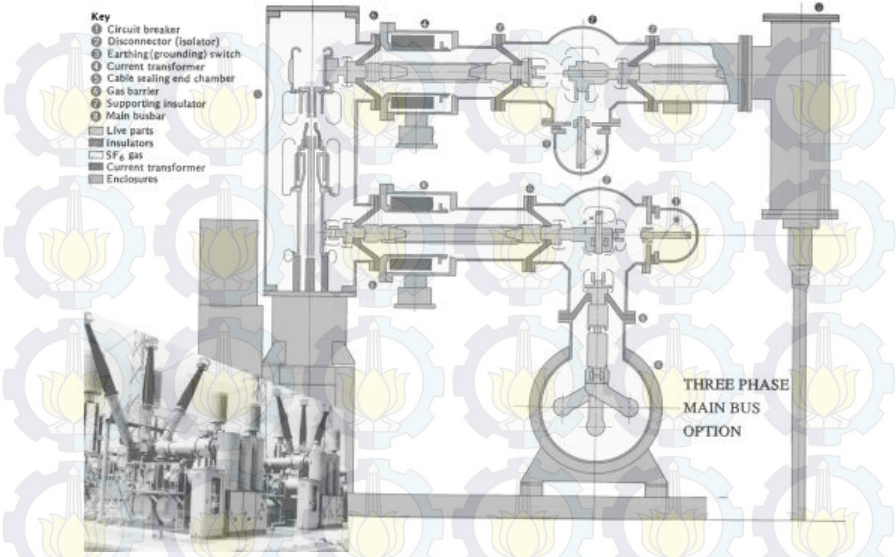
Gardu induk konvensional adalah gardu induk yang pemasangan peralatan-peralatannya berada di area terbuka dan membutuhkan area yang luas. Akan tetapi tidak keseluruhan peralatan diletakkan diluar melainkan ada di dalam ruangan seperti sistem proteksi, sistem kendali serta beberapa komponen lainnya. Kebanyakan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

2.3.2 Gas Insulated Station (GIS)

Gardu induk dengan pemasangan dalam atau GIS merupakan gardu induk yang hampir semua komponennya (*switchgear*, busbar, isolator, komponen pengaman, komponen kontrol, kubikel) berada didalam gedung kecuali untuk transformasi daya yang keseringan dijumpai berada di luar bangunan, GIS seperti gambar 2.3 kebanyakan digunakan pada pemukiman kota yang jumlah penduduknya banyak dan pemukiman padat. Hal tersebut sangat memungkinkan pemasangan dari *Gas Insulated Station* (GIS) yang membutuhkan area yang tidak terlalu luas.



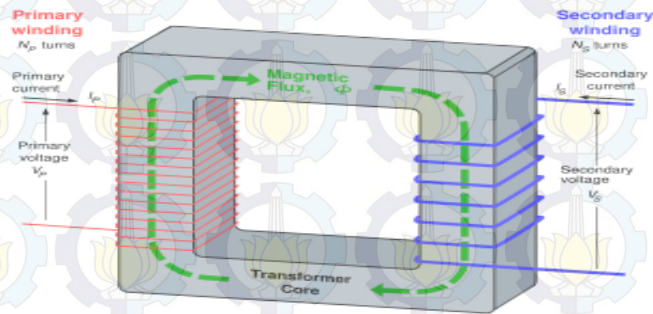
Gambar 2.3 Single Phase Enclosure GIS [4]

GIS Tandem yang berada di Surabaya bagian Utara merupakan salah satu contoh dari Gardu induk pemasangan dalam pada kota padat penduduk. Pada GIS tandem terjadi perubahan level tegangan dari level tegangan transmisi 150 kV menjadi level tegangan distribusi 20 kV. Penggunaan *Voltage Transformer* sebagai *metering* pada GIS Tandem dapat menimbulkan ferresonansi. Pemasangan VT pada GIS Tandem terdapat pada *indoor* yakni dengan rating 20000/100 V.

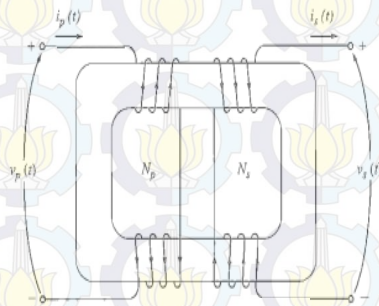
2.4 Transformator [5]

Transformator merupakan peralatan yang mengubah daya listrik ac dari suatu level tegangan ke level tegangan ac lain dengan frekuensi yang sama melalui sebuah medan magnet. Sebuah trafo terdiri dari 2 atau lebih belitan dan memiliki inti yang terbuat dari bahan yang bersifat feromagnetik. Belitan trafo pada umumnya terdiri dari belitan primer terhubung dengan sumber ac dan belitan sekunder yang terhubung dengan beban seperti Gambar 2.4a. Berdasarkan belitan inti trafo terdiri dari dua jenis yakni tipe inti dan tipe cangkang seperti gambar 2.4b dan 2.4c.

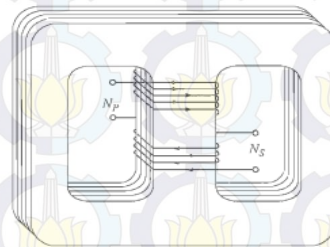
Penggunaan trafo dalam sistem tenaga listrik sangat vital karena digunakan pada setiap subsistem tenaga listrik seperti saluran transmisi, saluran distribusi dan pada gardu induk. Hal ini tidak terlepas dari fungsi trafo yang dapat memungkinkan pemilihan tegangan yang sesuai dengan keperluan tertentu. Contohnya adalah trafo dapat yang digunakan pada gardu induk untuk menaikkan tegangan sehingga dapat ditransmisikan untuk jarak yang cukup jauh. Selain penggunaan dalam sistem tenaga trafo juga digunakan dalam dunia elektronika untuk peralatan listrik rumah tangga.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.4. (a) Konstruksi Trafo (b) tipe inti (c) tipe cangkang

Penggunaan Trafo pengukuran seperti voltage transformer pada GIS Tandem sangat memungkinkan sistem mengalami feroresonansi yang ditimbulkan dari ketidaklinearan yang diperoleh dari inti trafo tegangan.

Jenis trafo yang digunakan pada GIS Tandem adalah buatan *Schneider* dengan tipe VRQ1n/S2 dimana merupakan tipe *voltage transformer* khusus penggunaan dalam.



Gambar 2.5 *Voltage Transformer* Pemasangan Dalam

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

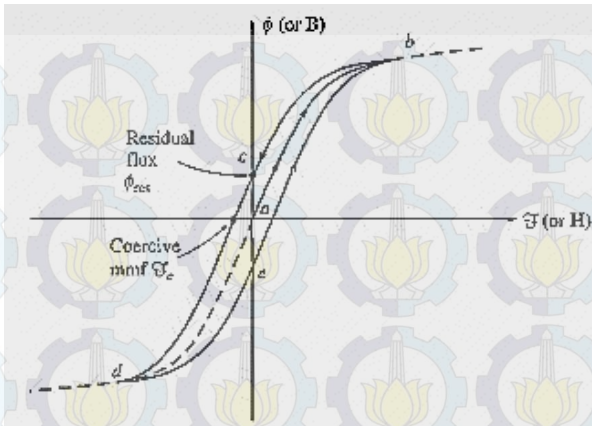
$d\phi$ = Perubahan garis-garis gaya magnet (Watt)

dt = Perubahan waktu (s)

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

2.4.2 Ketidaklinearan pada Inti Transformator

Fenomena histeresis pada trafo menunjukkan adanya ketidaklinearan pada inti transformator. Histeresis pada trafo biasanya digambarkan dalam bentuk kurva magnetisasi seperti pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Kurva Histerisis

Pada Gambar 2.5 jalur a-b merupakan kondisi awal dari trafo saat diberikan arus. Kerapatan fluks akan naik terus hingga mencapai titik saturasinya B_s . Pada saat arus turun nilai fluks akan turun tetapi tidak kembali mengikuti jalur awal melainkan melalui jalur bed 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 linear. Dan begitu juga sebaliknya apabila material inti trafo yang digunakan kurang baik maka kurva histerisis akan cenderung semakin lebar.

BAB 3

FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

3.1 Resonansi

Resonansi listrik merupakan dasar yang digunakan untuk memahami peristiwa feroresonansi. Resonansi listrik adalah gejala kelistrikan yang terjadi pada suatu rangkaian arus bolak-balik yang mengandung elemen induktor (L), dan kapasitor (C) [6]. Resonansi ini dapat dijumpai pada sistem tenaga listrik di semua level tegangan sistem tenaga listrik. Resonansi terbagi menjadi dua tipe yakni resonansi seri dan resonansi paralel. Resonansi seri terjadi dalam rangkaian seri sedangkan resonansi paralel terjadi pada rangkaian paralel.

Resonansi seri merupakan rangkaian listrik dengan komponen induktor dan kapasitor yang tersusun seri ketika frekuensi sumber diubah-ubah, maka akan terjadi resonansi dimana nilai reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif.

$$X_L = X_C \quad (3.1)$$

Dimana: X_L = Reaktansi Induktif
 X_C = Reaktansi Kapasitif

Sehingga syarat untuk terjadinya sebuah resonansi adalah seperti persamaan berikut:

$$LC \omega_n^2 = 1 \quad (3.2)$$

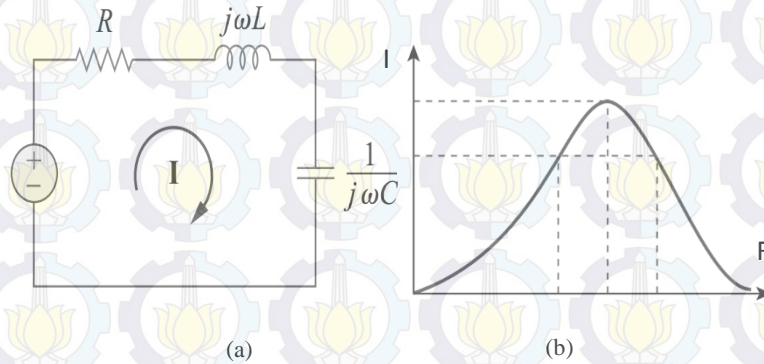
Dimana: L = induktor (Henry)
 C = kapasitor (Farad)
 ω_n = kecepatan sudut (Rad/s)

Sehingga ketika resonansi terjadi maka nilai impedansi rangkaian akan berubah dimana dalam persamaan ditulis:

$$Z = R + jX \quad (3.3)$$

Dimana: Z = Impedansi
 R = Resistansi
 X = Reaktansi

Sehingga ketika resonansi terjadi frekuensi sumber menjadi frekuensi resonansi maka nilai reaktansi akan menjadi nol. Nilai reaktansi sama dengan nol menyebabkan nilai impedansi mencapai nilai yang minimum. Ketika nilai impedansi menjadi minimum maka nilai arus (I) akan mencapai maksimum. Gambar rangkaian rangkaian resonansi seri dan kurva hasil simulasi resonansi dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Resonansi Seri. (a) rangkaian resonansi seri (b) Hubungan Arus dan Frekuensi resonansi [6]

3.2 Feroresonansi

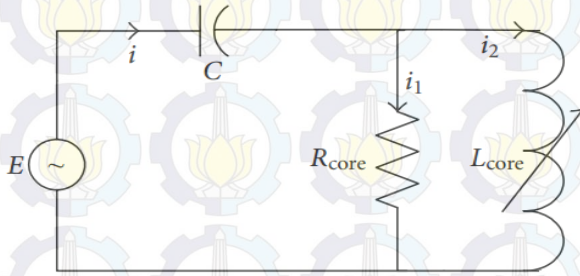
3.2.1 Pengertian Feroresonansi

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

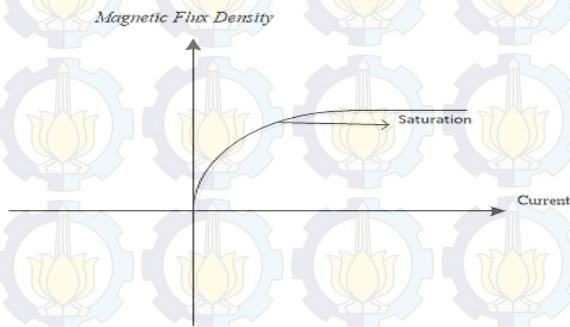
Feroresonansi muncul pertama kali pada tahun 1920. Istilah feroresonansi mengacu pada fenomena osilasi yang muncul pada sebuah rangkaian listrik yang mengandung elemen induktansi nonlinear, kapasitor dan sumber tegangan sinusoidal, dan rugi-rugi yang rendah. Induktansi nonlinear diperoleh dari penggunaan 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.

3.2.2 Timbulnya Feroresonansi

Rangkaian resonansi seri digunakan untuk lebih memudahkan memahami feroresonansi. Pada rangkaian resonansi penggunaan induktor diganti menjadi induktor nonlinear sebagai pemodelan dari inti trafo sehingga rangkaiannya berubah menjadi rangkaian feroresonansi. Sama halnya dengan resonansi yang terjadi pada rangkaian resonansi seri, rangkaian feroresonansi ketika mengalami resonansi, impedansi akan sangat kecil sehingga arus pada rangkaian akan naik. Arus yang naik menyebabkan rapat fluks juga akan naik mencapai titik saturasi dan tidak lagi menjadi linear. Ketika nilai arus yang naik pada inti trafo yang bersifat feromagnetik melalui titik saturasinya maka induktansi akan berubah sangat cepat (menjadi nonlinear). 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 nonlinear dapat dilihat pada Gambar 3.2. Kurva saturasi dari induktor nonlinear terdapat pada Gambar 3.3



Gambar 3.2 Rangkaian Pemodelan Feroresonansi



Gambar 3.3 Kurva Saturasi Induktor Nonlinear

Timbulnya feroresonansi pada sebuah sistem tenaga listrik harus memenuhi 3 hal penting yakni induktansi nonlinear, kapasitif dan sumber AC. Untuk elemen yang dapat menimbulkan induktansi nonlinear adalah bahan feromagnetik yang digunakan sebagai material inti trafo. Sehingga untuk fenomena feroresonansi trafo mendapatkan perhatian khusus. Hal tersebut dikarenakan induktansi nonlinear dihasilkan dari inti trafo yang dapat menyebabkan feroresonansi dapat terjadi.

3.2.3 Gejala-gejala Feroresonansi

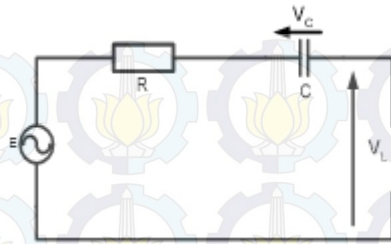
Feroresonansi pada sebuah sistem tenaga ditandai dengan munculnya lebih dari satu respon steady state pada parameter jaringan yang sama [7]. Respon yang berubah secara tiba-tiba dari suatu respon steady state normal, menjadi respon steady state feroresonansi (ditandai dengan level harmonisa dan *overvoltage* 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 :

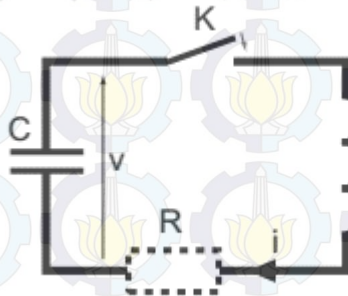
1. Penyimpangan yang besar untuk nilai tegangan lebih dan arus lebih (*High sustained overvoltage and overcurrent*).
2. Pemanasan berlebih dan suara bising pada transformator (*Transformer overheating and loud noise*).
3. Kerusakan peralatan listrik (*Electrical equipment damage*).

3.2.4 Pendekatan Fisik Feroresonansi[7]

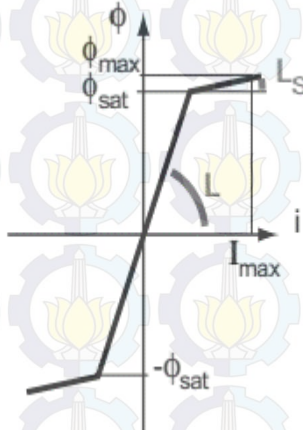
Rangkaian feroresonansi sederhana terdiri dari elemen kapasitor dan induktansi nonlinear. Elemen tersebut merupakan pemodelan dari sifat sifat kapasitif dan induktif yang diperoleh dari penggunaan peralatan listrik dalam sistem tenaga listrik. Nilai resistansi dari resistor dianggap sangat kecil. Seperti pada Gambar 3.4 yang menunjukkan karakteristik dasar feroresonansi



Gambar 3.4 Rangkaian Karakteristik Dasar Feroresonansi

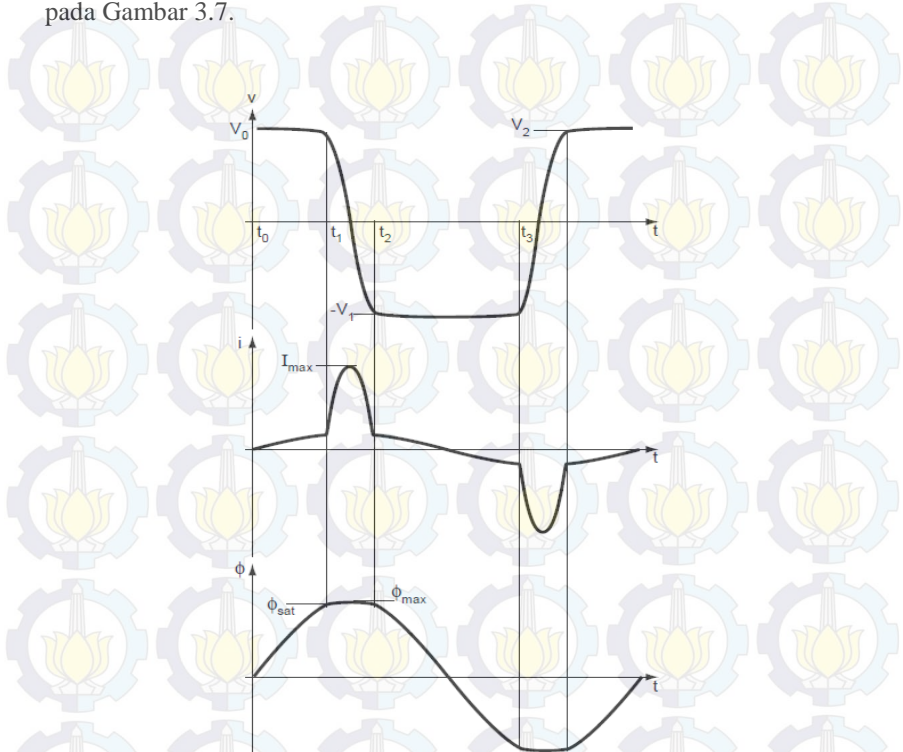


Gambar 3.5 Diagram Skematik Model Feroresonansi



Gambar 3.6 Hubungan fluks dan Arus

Bentuk gelombang yang merupakan tipikal dari feroresonansi terdapat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Osilasi pada Rangkaian Feroresonansi Seri.

Peristiwa osilasi pada rangkaian feroresonansi seri dijelaskan berdasarkan urutan waktu seperti berikut :

- Sesaat t_0 , saklar K ditutup maka arus I terbentuk, dan berosilasi pada bentuk getaran :

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

Fluks pada kumparan dan tegangan V pada terminal kapasitor dapat ditunjukkan dengan rumus :

$$\Phi = (V_0/\omega_1) \sin \omega_1 t ; v = V_0 \cos \omega_1 t \quad (3.5)$$

- Jika $V_0/\omega_1 > \Phi_{\text{sat}}$ pada akhir t_1 , fluks Φ mencapai saturasi menjadi Φ_{sat} dan tegangan V sama dengan V_1 . Nilai induktansi kumparan yang bersaturasi menjadi L_s . Dikarenakan L_s sangat kecil jika dibandingkan dengan L , kapasitor akan discharge secara mendadak melewati kumparan dalam bentuk osilasi getaran :

$$\omega_2 = 1/\sqrt{L_s C} \quad (3.6)$$

Arus dan fluks mencapai puncak ketika energi elektromagnetik tersimpan pada kumparan, ekuivalen dengan energi elektrostatik $\frac{1}{2}CV_1^2$, tersimpan pada kapasitor.

- Saat t_2 , fluks kembali menjadi Φ_{sat} , induktansi diasumsikan dengan nilai L dan, karena rugi-rugi diabaikan, tegangan diasumsikan v , dimana tegangan tersebut terbalik, sehingga bernilai $-V_1$.
- Pada saat t_3 , fluks mencapai $-\Phi_{\text{sat}}$ dan tegangan bernilai $-V_2$.
Pada kenyataanya ω_1 sangat kecil, sehingga dapat diasumsikan bahwa $V_2 \approx V_1 \approx V_0$.

Periode T dari osilasi berpengaruh terhadap $2\pi\sqrt{LC}$ pada kondisi tidak bersaturasi, dan $2\pi\sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2)$ pada kondisi saturasi (dimana $t_3 - t_2 \approx 2\Phi_{\text{sat}}/V_0$).

Persamaan frekuensi yang sesuai dengan kondisi ini adalah:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \quad (3.7)$$

Frekuensi inisial ini bergantung pada Φ_{sat} pada keadaan ketidaklinearan dan kondisi inisial tegangan V_0 . Pada kenyataan, karena rugi-rugi I^2R pada resistor R, amplitude dari tegangan V akan menurun ($V_2 < V_1 < V_0$). Hal tersebut dikarenakan terdapat perbedaan fluks $\Delta\Phi$

selama periode non-saturasi ($t_3 - t_2$) dan $\Delta\Phi = 2\Phi_{\text{sat}} = \int_{t_2}^{t_3} v dt$, penurunan tegangan berakibat pada pengurangan frekuensi.

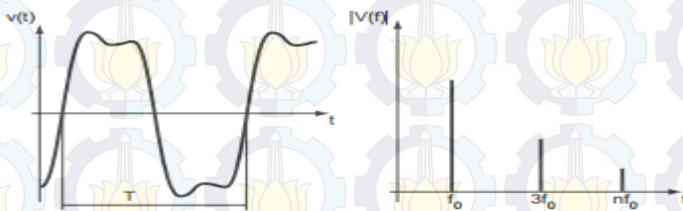
Jika energi dari rugi-rugi disuplai oleh sumber tegangan pada sistem, frekuensi osilasi dapat terkunci pada frekuensi dari sumber (dengan syarat frekuensi awal lebih besar dari frekuensi daya) atau bahkan pada frekuensi sub-multiple dari frekuensi sumber (jika frekuensi awal lebih kecil dari frekuensi daya). Hal ini memperlihatkan bahwa tidak seperti frekuensi linier, dengan nilai induktansi tertentu, resonansi dapat terjadi tidak lagi untuk nilai C tertentu, namun untuk nilai C dengan rentang yang lebar.

3.2.5 Klasifikasi Feroresonansi[7]

Berdasarkan pengalaman dilapangan mengenai feroresonansi dan pola bentuk gelombang yang terjadi di sistem tenaga, percobaan dengan rangkaian yang sudah direduksi serta simulasi numerik maka feroresonansi dapat dibedakan menjadi 4 tipe. Keempat tipe tersebut adalah:

1. Fundamental mode

Fundamental mode adalah tipe dari feroresonansi yang tegangan dan arus memiliki periode yang sama dengan periode sistem dan terdiri dari beberapa macam harmonisa. Sinyal spectrum adalah *discontinuous spectrum* yang terdiri dari frekuensi sistem (f_0) dan frekuensi harmonisa ($2f_0, 3f_0, \dots$).

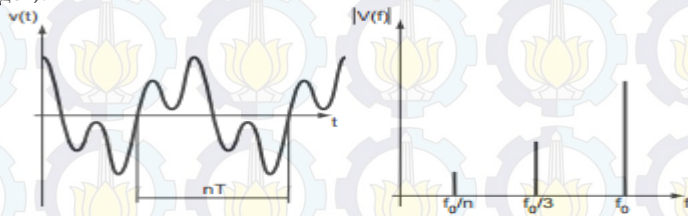


Gambar 3.8 Fundamental Mode [7]

2. Subharmonic mode

Pada subharmonic mode, sinyal output memiliki periode nT yang merupakan kelipatan periode sumber. Untuk nilai kelipatan biasanya adalah kelipatan ganjil. Kondisi ini disebut dengan subharmonic n atau harmonic $1/n$. Dengan kondisi demikian didapatkan persamaan

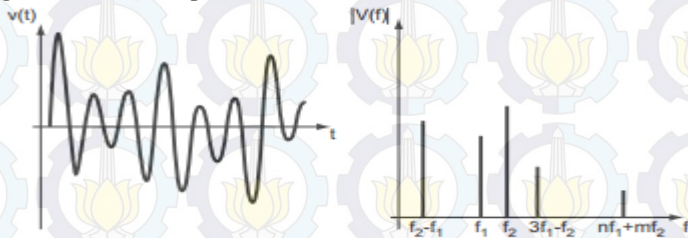
fundamental f_0/n (dimana f_0 merupakan frekuensi sumber dan n adalah integer).



Gambar 3.9 Subharmonik Mode [7]

3. Quasi-periodik mode

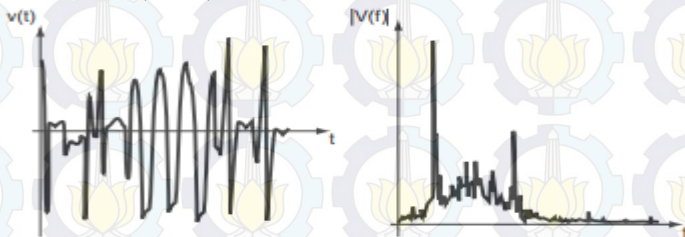
Quasi-periodik juga dikenal dengan istilah pseudo-periodik dimana sinyal keluaranya tidak periodic. Untuk spektrumnya adalah discontinuous dengan frekuensinya $nf_1 + mf_2$. Nilai n dan m merupakan integer dan f_1/f_2 merupakan nilai riil irasional.



Gambar 3.10 Quasi-Periodik Mode [7]

4. Chaotic mode

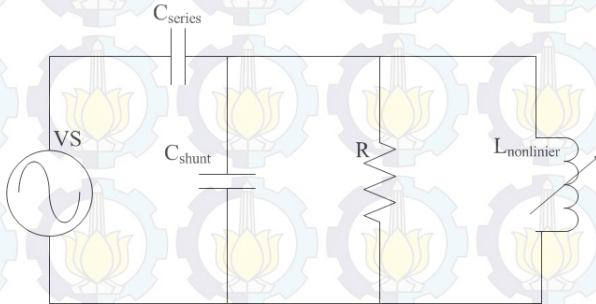
Spectrum pada *chaotic mode* berkelanjutan dan tidak diinterupsi oleh frekuensi apapun sehingga spektrumnya menghasilkan sebuah ketidakteraturan (chaos).



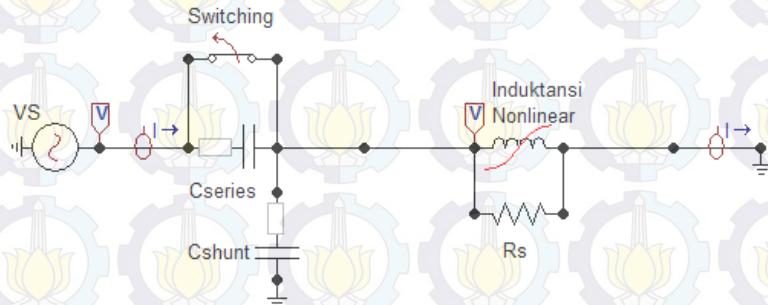
Gambar 3.11 Chaotic Mode [7]

3.2.6 Simulasi Feroresonansi

Feroresonansi pada sistem tenaga dapat dipahami menggunakan sebuah model simulasi. Pada Gambar 3.12 merupakan rangkaian reduksi dari sebuah substation.



Gambar 3.12 Rangkaian Ekivalen Feroresonansi Reduksi [9]



Gambar 3.13 Simulasi Rangkaian Feroresonansi menggunakan ATP Draw [8]

Pemodelan rangkaian feroresonansi menggunakan Software ATP Draw seperti pada Gambar 3.13 terdiri dari elemen yang dapat menimbulkan feroresonansi. Trafo dimodelkan sebagai rangkaian induktansi non-linear yang dipararel dengan resistor sebagai rugi-rugi trafo. Kapasitor pada model rangkaian merupakan pemodelan dari *switching* dan kapasitif yang diperoleh dari saluran kabel transmisi dan distribusi.

3.2.7 Mitigasi Feroresonansi [8]

Feroresonansi dalam sistem tenaga listrik apabila terjadi akan membahayakan bagi sistem, operator ataupun peralatan-peralatan listrik. Oleh karena hal itu maka feroresonansi harus dapat diredam atau diatasi. Beberapa cara untuk meredam feroresonansi adalah sebagai berikut:

1. Memperbaiki kondisi ketidakseimbangan tegangan
2. mengubah desain dari trafo
3. Memasang *damping reactor*
4. *Detuning* rangkaian

1. Memperbaiki Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan dapat diperbaiki dengan mengubah prosedur operasi atau menambahkan rele untuk *sensing* dan menghilangkan kondisi tidak seimbang yang dapat memicu feroresonansi.

2. Mengubah Desain dari Magnetik Trafo

Kemajuan teknologi memungkinkan peningkatan dari desain material inti trafo. Desain inti trafo memungkinkan trafo dapat memiliki level rating fluks yang lebih tinggi, dan dapat menahan arus eksitasi yang tinggi. Kurva magnetisasi dari trafo dengan inti yang lebih baik memungkinkan memiliki titik saturasi yang jauh lebih lama untuk mencapai titik saturasi jika dibandingkan dari trafo yang lain.

3. Memasang *Damping Reactor*

Damping reactor yang dipasang pada trafo dapat berupa elemen resistor atau induktor. Untuk pemasangan *damping* juga dapat diletakkan pada sisi primer maupun sekunder trafo.

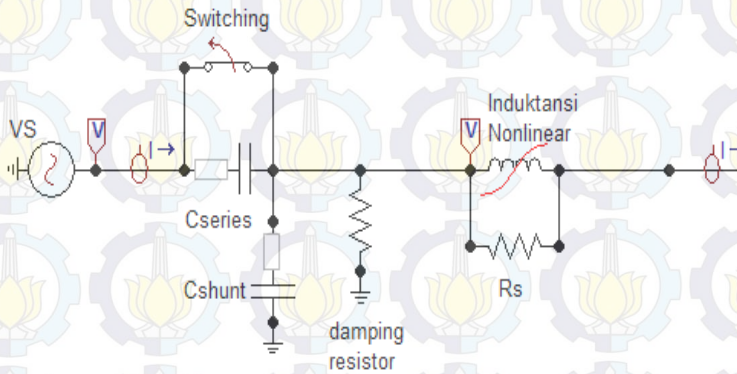
4. *Detuning* Rangkaian Feroresonansi

Rangkaian feroresonansi ada kondisi dimana feroresonansi tidak dapat diredam. Oleh karena itu rangkaian feroresonansi diubah dengan menambahkan beberapa kompones sehingga feroresonansi taid dapat diredam.

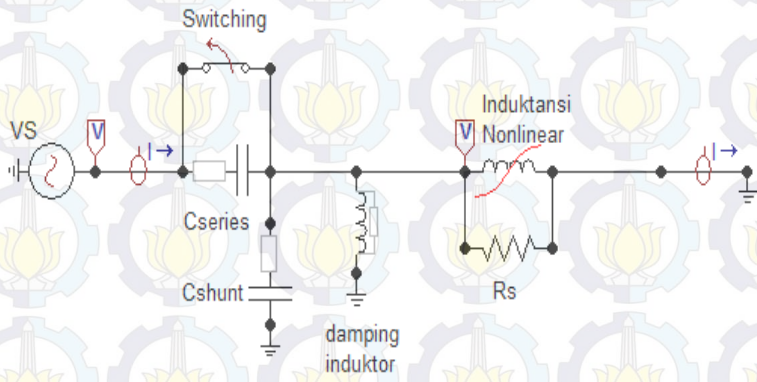
3.2.7.1 Mitigasi Feroresonansi dengan Pemasangan *Damping* [9]

Pada studi ini dari beberapa cara mitigasi feroresonansi, yang digunakan adalah teknik mitigasi dengan pemasangan *damping* reaktor. Penggunaan *damping* reaktor dalam studi ini adalah dengan cara

menyisipkan atau memasang damping berupa resistor ataupun induktor. Seperti pada Gambar 3.14 dan 3.15 merupakan cara untuk mitigasi dari feroresonansi dengan memasang elemen resistor dan induktor.



Gambar 3.14 Mitigasi Feroresonansi dengan Memasang Resistor Shunt

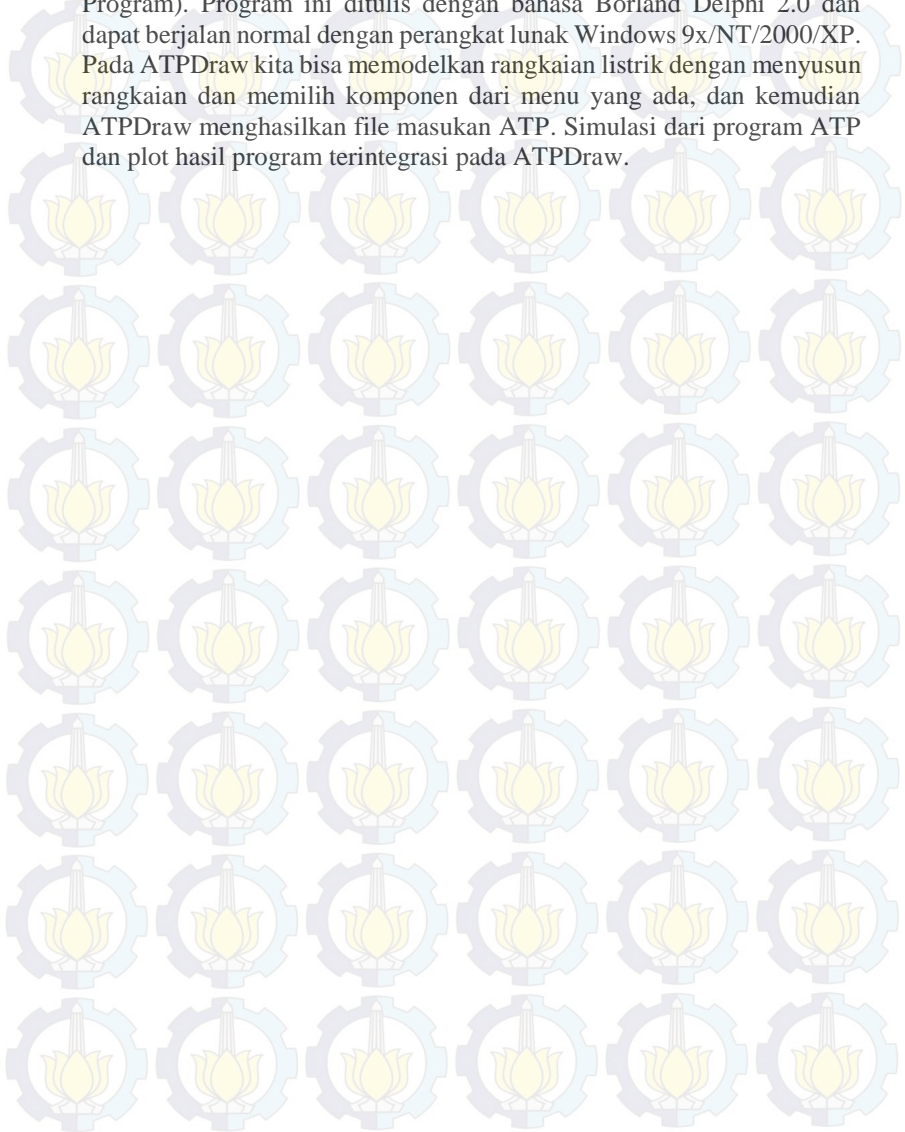


Gambar 3.15 Mitigasi Feroresonansi dengan Memasang Induktor

3.3 ATP/EMTP Draw [10]

Alternative Transient Program (ATP) merupakan program yang paling luas pemakaiannya untuk melakukan simulasi digital mengenai peristiwa transien. Dengan program ini rangkaian kompleks dan sistem kontrol dengan kondisi yang berubah-ubah dapat disimulasikan. ATP

merupakan software alternative dari EMTP (Electromagnetic Transient Program). Program ini ditulis dengan bahasa Borland Delphi 2.0 dan dapat berjalan normal dengan perangkat lunak Windows 9x/NT/2000/XP. Pada ATPDraw kita bisa memodelkan rangkaian listrik dengan menyusun rangkaian dan memilih komponen dari menu yang ada, dan kemudian ATPDraw menghasilkan file masukan ATP. Simulasi dari program ATP dan plot hasil program terintegrasi pada ATPDraw.





(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

ANALISIS HASIL SIMULASI MITIGASI FERORESONANSI MENGGUNAKAN DAMPING REAKTOR

4.1. Feroresonansi pada Gardu Induk

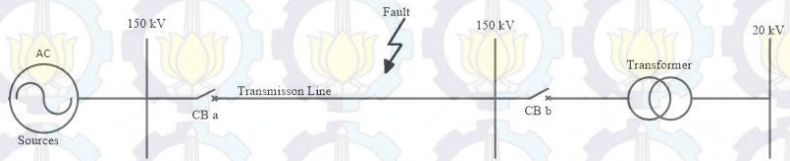
Pada sebuah sistem tenaga, feroresonansi dapat saja terjadi tanpa ada sebab akibat yang jelas mengapa dapat terjadi dan juga tidak dapat diprediksikan. Oleh karena hal tersebut perlu dilakukan simulasi untuk mengetahui apakah gejala-gejala yang menyebabkan feroresonansi pada sistem berada pada ambang aman atau tidak.

Pada studi ini simulasi dilakukan dengan membuat sebuah model rangkaian feroresonansi ketika sebuah *circuit breaker* bekerja saat ada gangguan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pemodelan yang digunakan seperti pada Gambar 4.1, direduksi menjadi sebuah rangkaian ekuivalen feroresonansi seperti pada Gambar 4.2 dimana terdapat elemen Cseries, Cshunt, nilai resistansi (R) dan Induktansi Nonlinear. Cseries merupakan nilai kapasitif yang timbul akibat pemutusan beban oleh *switching* sedangkan Cshunt diperoleh dari nilai kapasitif yang didapatkan dari nilai kapasitif saluran transmisi dan distribusi, penggunaan *capasitor banks* serta penggunaan alat pengukuran seperti *Voltage Transformer*. Pada GIS Tandes VT yang digunakan merupakan VT dengan rating 22000:100 buatan *schneider electric* type VRQ1n/S2 .

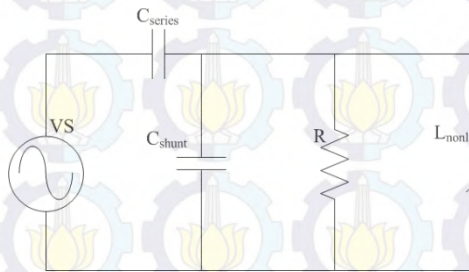
Penggunaan elemen resistor pada rangkaian reduksi merupakan pemodelan terhadap rugi-rugi pada inti trafo dan untuk elemen induktor nonlinear merupakan sebuah pemodelan terhadap induktansi nonlinear yang terdapat pada inti trafo. Berdasarkan keterangan pada rangkaian reduksi pada Gambar 4.2 maka dibuat rangkaian simulasi feroresonansi dengan menggunakan ATP dan rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.3.

Pada studi ini untuk memunculkan feroresonansi pada rangkaian simulasi adalah dengan mengubah nilai dari Cseries dan Cshunt. Tujuan mengubah nilai kapasitif tersebut adalah untuk menyelidiki efek dari nilai-nilai kapasitif dalam substation yang dapat memunculkan feroresonansi. Pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi terdiri dari tegangan sumber arus bolak-balik (AC) dengan tegangan sumber puncak 26.94 KV, 50 Hz. *Switching* dengan waktu yang diatur sebesar 0.25 sekon ketika terjadi gangguan. Untuk pemodelan dari trafo sendiri

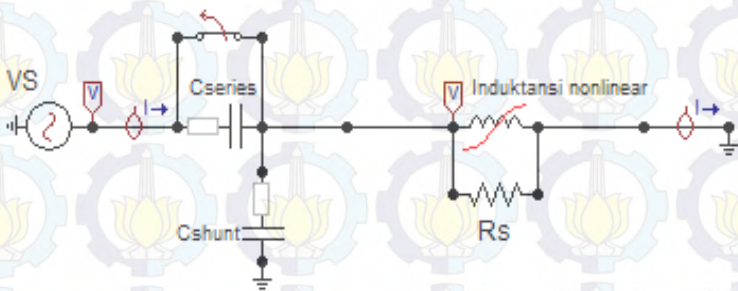
menggunakan induktansi nonlinear tipe 93 sebagai model dari inti trafo dan R_s sebagai rugi-rugi trafo.



Gambar 4.1 Single Line Diagram Sistem Transmisi 150 kV



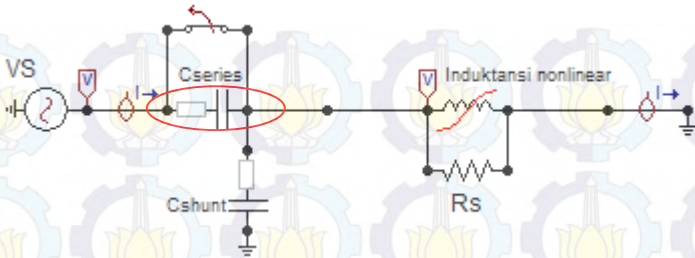
Gambar 4.2 Rangkaian Ekuivalen Feroresonansi Reduksi



Gambar 4.3 Rangkaian Simulasi Feroresonansi

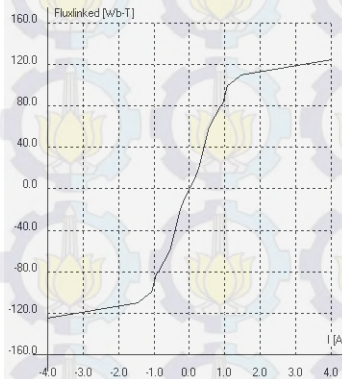
4.1.1 Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cseries

Pada simulasi rangkaian dengan mengubah nilai C_{series} akan didapatkan rentang nilai kapasitif yang dapat menimbulkan feroresonansi. C_{series} pada rangkaian simulasi adalah nilai kapasitif yang timbul akibat adanya pemutusan daya oleh *circuit breaker* dan pada simulasi ini nilai tersebut diperhitungkan. Rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Rangkaian Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cseries

Pada simulasi ini nilai Cseries pada rangkaian simulasi akan diubah dengan rentang 0.001 μF - 100 μF . Switch akan dibuka pada $t = 0.25\text{s}$, rugi-rugi pada trafo sebesar 16,9 $\text{M}\Omega$. Cshunt akan dibuat dengan nilai yang tetap sebesar 97.4 pF. Tegangan puncak yang digunakan adalah 26.94 KV dengan frekuensi sebesar 50 Hz. Untuk parameter induktansi nonlinear dapat dilihat pada Gambar 4.5.



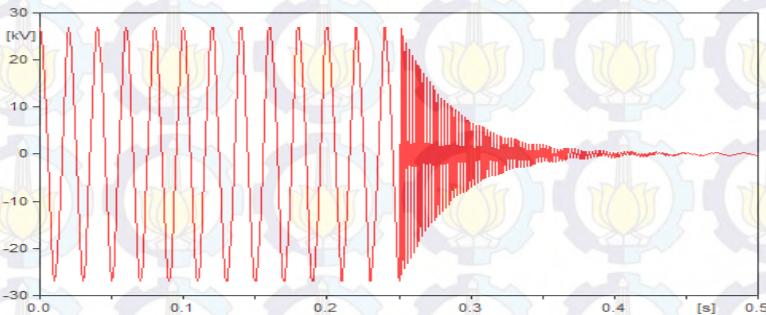
Gambar 4.5 Kurva Magnetisasi Induktansi Nonlinear

Hasil simulasi rangkaian feroresonansi dengan memvariasikan nilai Cseries, dapat dilihat pada Tabel 4.1. Pada Tabel 4.1 nilai dari tegangan dan arus disimpan saat sebelum dan sesudah dilakukan *switching*. Berdasarkan nilai dari arus dan tegangan puncak sebelum dan sesudah *switching* dapat ditentukan apakah sistem mengalami feroresonansi atau tidak dan pada nilai kapasitif feroresonansi terjadi.

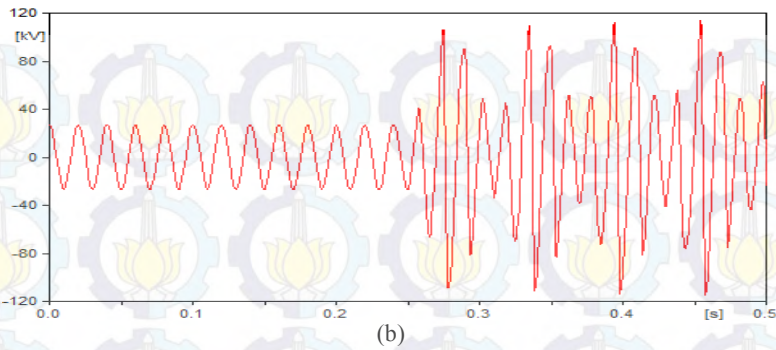
Tabel 4.1 Efek Perubahan Nilai Cseries

Cseries (μF)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak (A)		Frekuensi		Fero resonansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
0.001	26.94	26.6	0.96	0.08	50	50	Tidak
0.01	26.94	30.9	0.96	0.36	50	50	Tidak
0.1	26.94	112.5	0.96	15.4	50	50	Ya
1	26.94	35.7	0.96	3.72	50	50	Ya
10	26.94	27.1	0.96	0.97	50	50	Tidak
100	26.94	26.9	0.96	0.97	50	50	Tidak

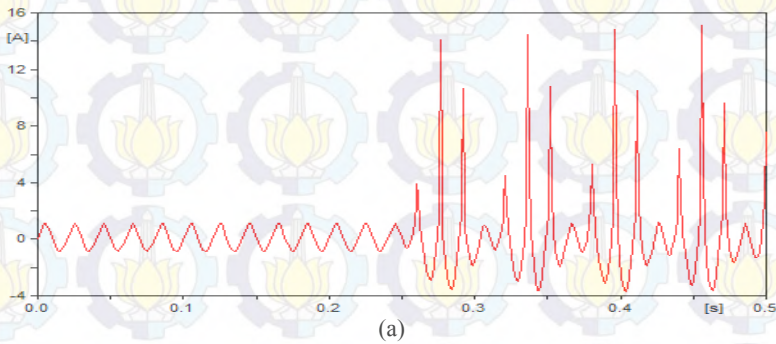
Gambar 4.6a merupakan respon tegangan yang diperoleh dari hasil simulasi pada saat tidak terjadi feroresonansi dengan nilai Cseries sebesar $0.001 \mu\text{F}$. Sedangkan untuk Gambar 4.6b merupakan respon tegangan saat terjadi feroresonansi dengan pemasangan Cseries sebesar $0.1 \mu\text{F}$. Gambar 4.7a dan 4.7b merupakan respon arus hasil dari simulasi. Feroresonansi pada simulasi ini cenderung tergolong dalam tipe *fundamental mode*. *Overcurrent* dan *overvoltage* terjadi diakibatkan arus yang timbul saat adanya interaksi antara reaktansi kapasitif dan reaktansi induktif dari induktor nonlinear telah melampaui titik saturasi inti trafo. Dalam hal ini inti trafo memunculkan induktansi nonlinear.



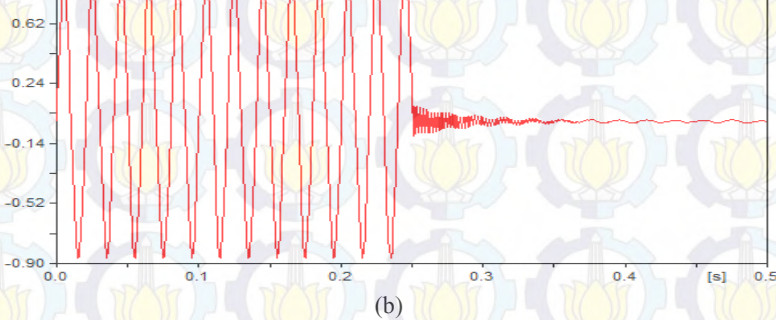
(a)



Gambar 4.6 Respon Tegangan saat (a) Tidak terjadi Feroresonansi (b) Terjadi Feroresonansi dengan Mengubah Cseries



Gambar 4.7 Respon Arus saat (a) Tidak terjadi Feroresonansi (b) Terjadi Feroresonansi dengan Mengubah Cseries

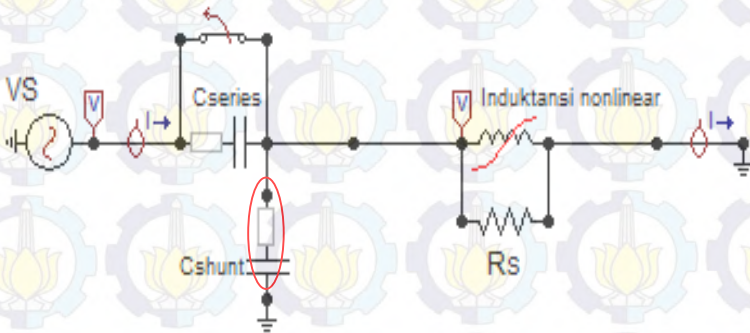


Gambar 4.7 Respon Arus saat (a) Tidak terjadi Feroresonansi (b) Terjadi Feroresonansi dengan Mengubah Cseries

4.1.2 Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cshunt

Simulasi rangkaian dengan memvariasikan nilai Cshunt digunakan untuk mendapatkan rentang nilai cshunt yang dapat menimbulkan feroresonansi. Cshunt dalam rangkaian simulasi ini adalah perwujudan nilai-nilai kapasitif yang diperoleh dari saluran transmisi dan distribusi, penggunaan kapasitor bank pada sistem serta penggunaan alat ukur seperti CVT.

Pada simulasi ini nilai Cseries pada rangkaian simulasi akan dibuat dengan nilai tetap yakni 50 pF. Switch akan dibuka pada $t = 0.25s$, rugi-rugi pada trafo sebesar 16,9 M Ω . Cshunt akan dibuat bervariasi dengan rentang nilai 0.001 μF – 100 μF sebesar 97.4 pF. Tegangan puncak yang digunakan adalah 26.94 KV dengan frekuensi sebesar 50 Hz. Sehingga rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.8.



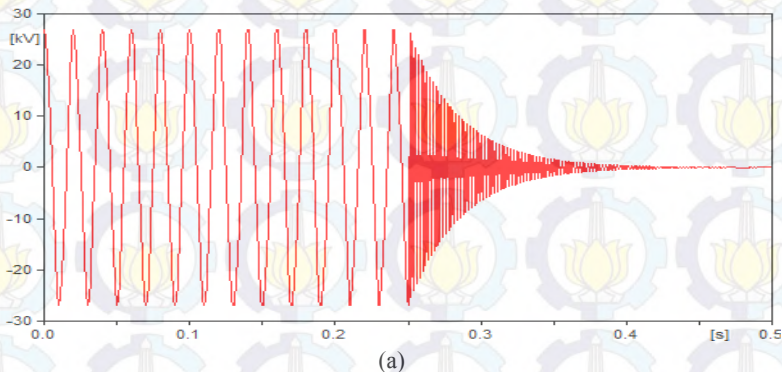
Gambar 4.8 Rangkaian Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cshunt

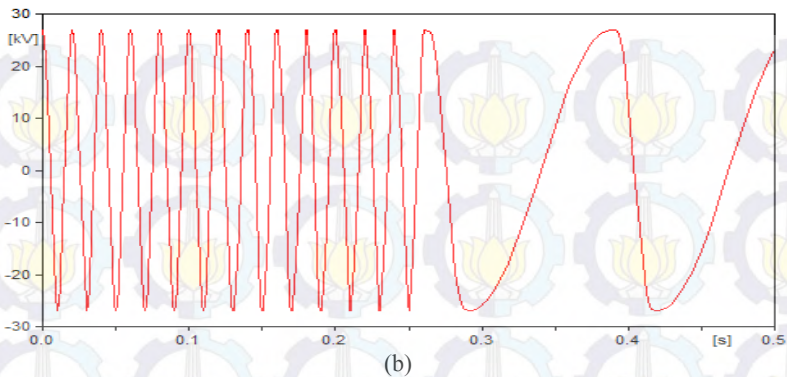
Hasil dari simulasi pada rangkaian dengan memvariasikan nilai Cshunt, maka dapat diperoleh hasil pada Tabel 4.2. Pada Tabel 4.2 nilai dari tegangan dan arus saat sebelum dan sesudah dilakukan *switching*. Berdasarkan nilai dari arus dan tegangan puncak sebelum dan sesudah *switching* dapat ditentukan apakah sistem mengalami feroresonansi atau tidak dan pada nilai kapasitif feroresonansi terjadi.

Tabel 4.2 Efek Perubahan Cshunt

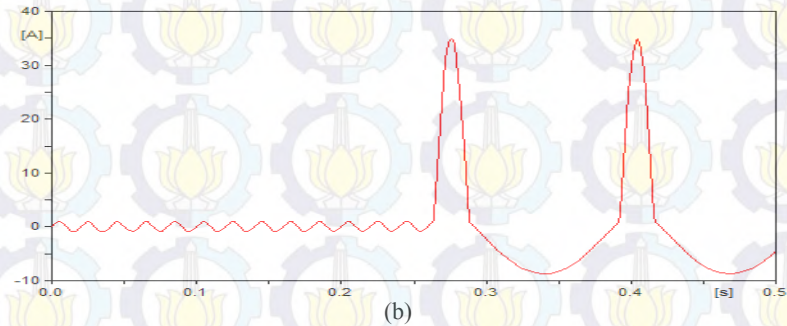
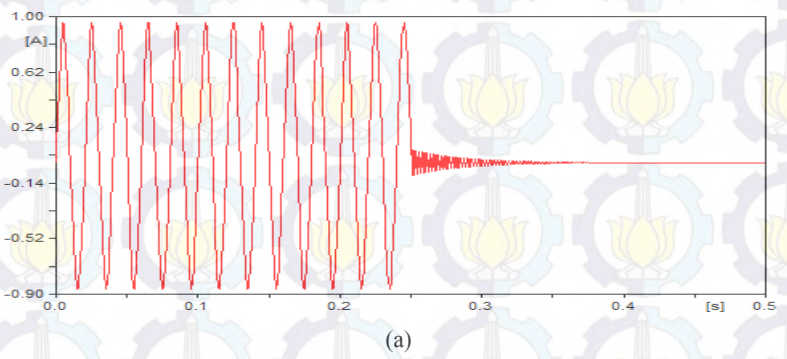
Cshunt (μF)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak (A)		Frekuensi (Hz)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
0.001	26.94	26.18	0.96	0.085	50	50	Tidak
0.01	26.94	26.68	0.96	0.272	50	50	Tidak
0.1	26.94	26.38	0.96	0.893	50	50	Tidak
1	26.94	26.39	0.96	10.15	50	20	Ya
10	26.94	26.96	0.96	34.8	50	10	Ya
100	26.94	26.96	0.96	-27.6	50	5	Ya

Pada Gambar 4.9 dengan nilai Cshunt sebesar $0.001 \mu\text{F}$ tidak terjadi feroresonansi dan pada Gambar 4.10 dengan nilai Cshunt sebesar $10 \mu\text{F}$ terjadi feroresonansi. Pada rangkaian dengan mengubah Cshunt, nilai tegangan tidak berubah jauh melainkan terjadinya perbedaan frekuensi setelah switching dengan frekuensi sumber. Semakin besar nilai kapasitor maka akan semakin besar periode untuk satu gelombang. Dengan demikian frekuensi setelah proses *switching* akan semakin kecil. Untuk nilai arus, terjadi *overcurrent* dengan nilai sebesar 34.8 A. terjadi peningkatan arus yang sangat besar.





Gambar 4.9 Respon Tegangan saat (a) Tidak terjadi Feroresonansi (b) Terjadi Feroresonansi dengan Mengubah Cshunt



Gambar 4.10 Respon Arus saat (a) Tidak terjadi Feroresonansi (b) Terjadi Feroresonansi dengan Mengubah Cshunt

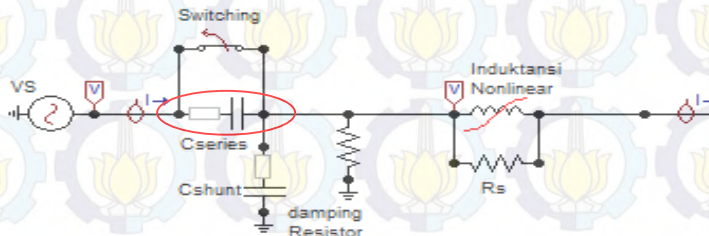
4.2 Mitigasi Feroresonansi pada Gardu Induk

4.2.1 Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries

Salah satu cara yang digunakan untuk dapat meredam feroresonansi adalah dengan pemasangan damping reaktor pada sisi primer dari trafo. Nilai resistor dan nilai induktor sebagai damping dalam simulasi diubah-ubah rentang nilainya sehingga diperoleh hasil berupa respon arus dan respon tegangan yang tidak menunjukkan feroresonansi.

4.2.1.1 Mitigasi Feroresonansi menggunakan Resistor

Rangkaian simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan damping berupa elemen resistor dapat dilihat pada Gambar 4.11.



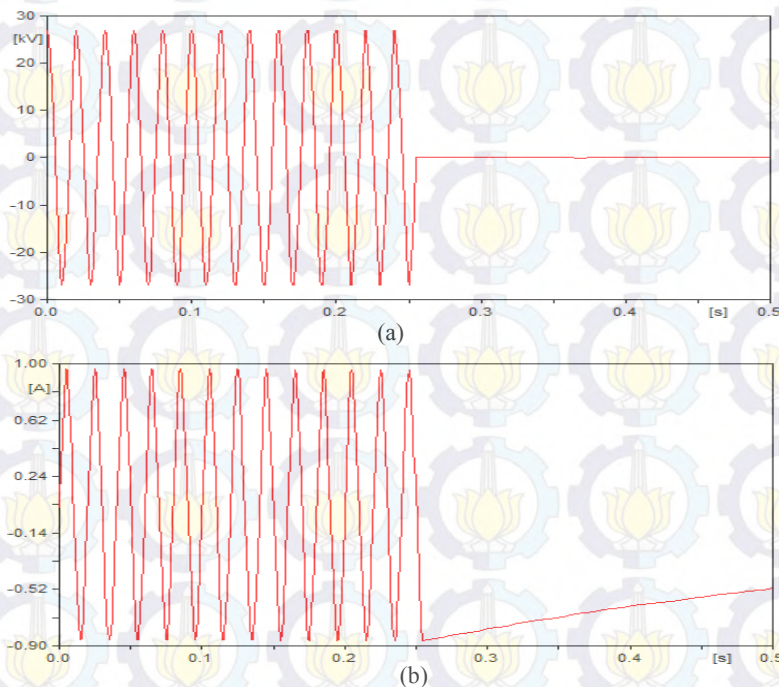
Gambar 4.11 Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries dengan pemasangan Damping Resistor

Pada Gambar 4.11 rangkaian simulasi tersebut merupakan rangkaian yang memunculkan feroresonansi dengan nilai Cseries yang digunakan sebesar $0.1\mu\text{F}$. Untuk meredam feroresonansi tersebut dipasang elemen resistor yang memiliki nilai yang tepat untuk dapat meredam feroresonansi tersebut. Pada Tabel 4.3 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan elemen resistor.

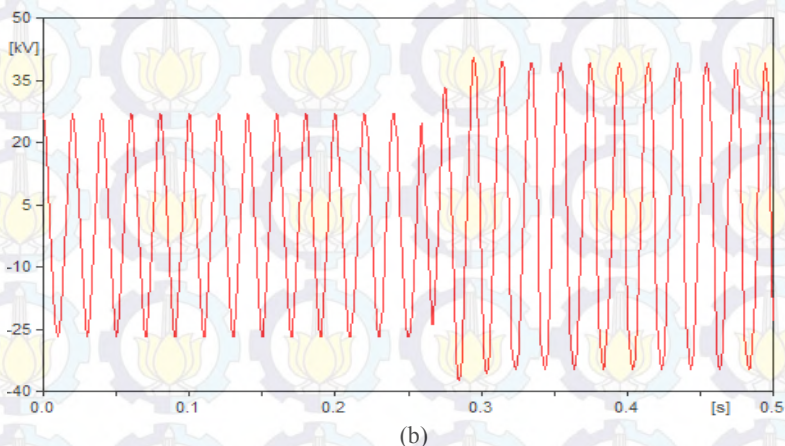
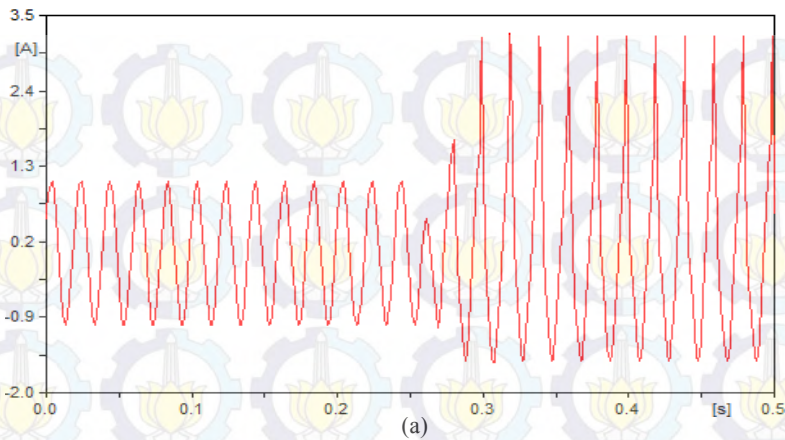
Tabel 4.3 Efek pemasangan Damping Resistor Mengatasi Feroresonansi Akibat Cseries yang divariasikan

Nilai Resistor (Ω)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak Trafo (A)		Ferores onansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
50000	26.94	40	0.96	3.2	Ya
100	26.94	0	0.96	0	Tidak
1	26.94	0	0.96	0	Tidak

Berdasarkan Tabel 4.3 diperoleh bahwa nilai Resistor yang digunakan dengan nilai kecil dapat meredam feroresonansi akan tetapi dengan pemasangan nilai R yang sangat besar maka dapat memunculkan feroresonansi. Pada Gambar 4.12 merupakan simulasi rangkaian mitigasi feroresonansi dengan damping resistor sebesar 100Ω dan dapat meredam feroresonansi. Respon arus dan tegangan yang diperoleh dari Gambar 4.12 menunjukkan bahwa feroresonansi tidak terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa arus yang mengalir menuju trafo ketika *switch* bekerja dapat meredam feroresonansi dengan pemasangan resistor pada rangkaian. Hal tersebut dikarenakan arus akan mengalir menuju titik dengan impedansi yang lebih rendah. Respon arus pada Gambar 4.12 (b) akan naik menjadi 0 A dan membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan respon tegangannya. Hasil simulasi rangkaian feroresonansi berupa grafik yang berisikan respon arus dan respon tegangan yang dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries menggunakan Damping Resistor sebesar 100Ω

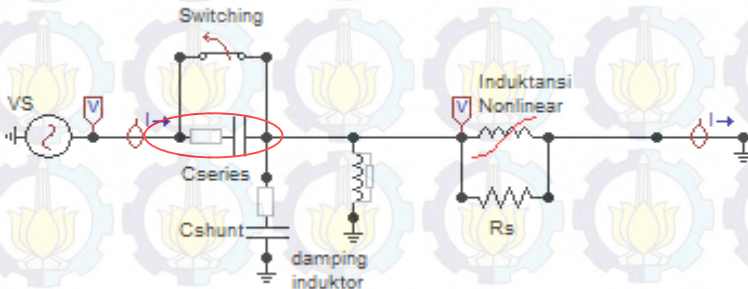


Gambar 4.13 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries menggunakan Damping Resistor sebesar 50 k Ω

Penggunaan damping reaktor dengan nilai R yang besar tidak cocok dan sesuai untuk meredam feroresonansi pada rangkaian simulasi seperti Gambar 4.13 Nilai R sebesar 50 k Ω yang dipasang pada rangkaian sebagai peredam, tidak meredam melainkan menimbulkan feroresonansi.

4.2.1.2 Mitigasi Feroresonansi menggunakan Induktor

Selain penggunaan elemen resistor sebagai damping dapat digunakan juga elemen induktor. Pada Gambar 4.13 menunjukkan rangkaian simulasi yang mengalami feroresonansi dan diredam menggunakan induktor sebagai damping.



Gambar 4.14 Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries dengan memasang Damping Induktor

Pada Gambar 4.14 rangkaian, feroresonansi muncul diakibatkan pemasangan Cseries sebesar $0.1 \mu\text{F}$. Feroresonansi yang timbul dimitigasi dengan memasang elemen induktor pada sisi primer trafo. Hasil simulasi dari rangkaian feroresonansi yang dimitigasi menggunakan elemen induktor dapat dilihat dalam Tabel 4.4.

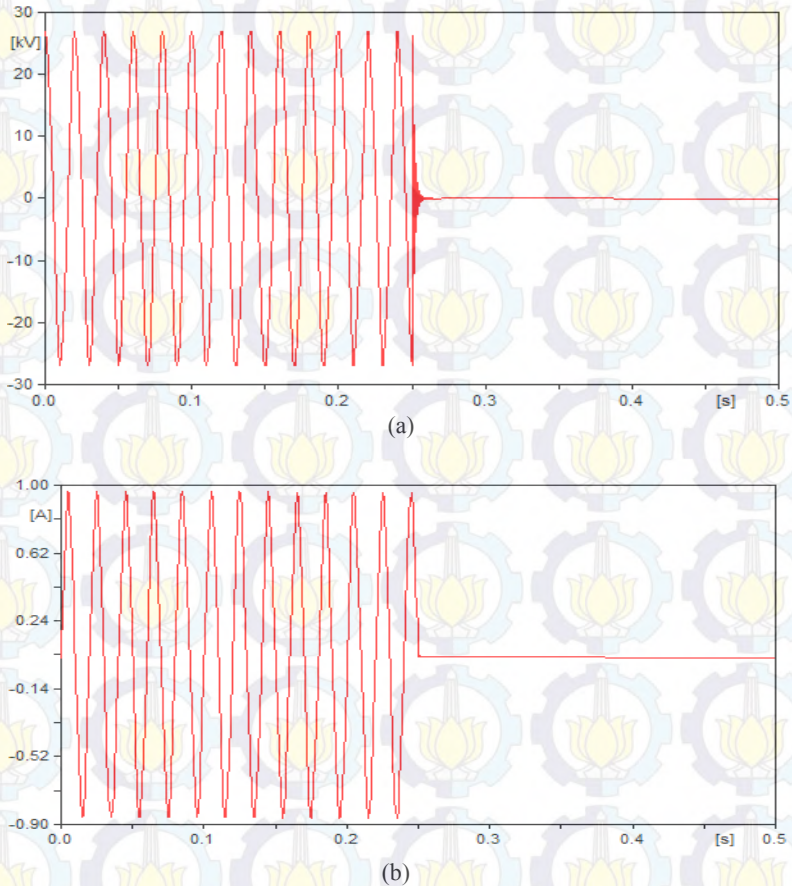
Tabel 4.4 Efek Pemasangan Damping Induktor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cseries yang divariasikan

Nilai Induktor (mH)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak Trafo (A)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
1000000	26.94	101.7	0.96	13.73	Ya
1000	26.94	27.4	0.96	0.14	Tidak
10	26.94	0.04	0.96	0	Tidak
1	26.94	0	0.96	0	Tidak

Pada Tabel 4.4, penggunaan induktor dengan nilai yang sangat tinggi tidak bekerja dengan baik sebagai damping. Tetapi ketika nilai

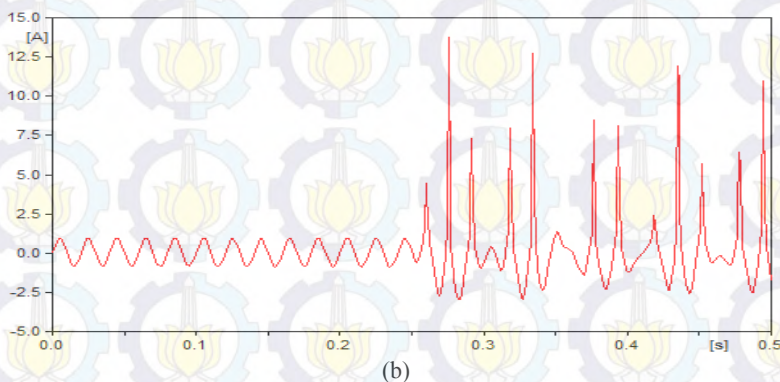
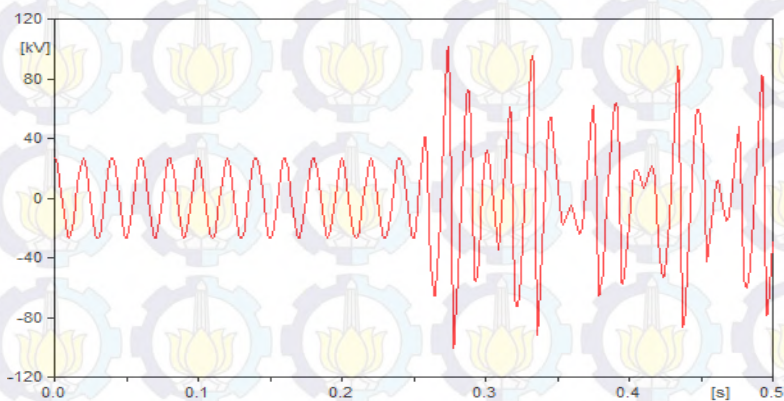
induktor yang dipasang pada rangkaian dibuat kecil maka feroresonansi dapat diredam.

Pemasangan damping reaktor menggunakan elemen induktor sebesar 10 mH dapat meredam feroresonansi yang terjadi pada rangkaian simulasi. Hasil simulasi rangkaian feroresonansi dengan penggunaan induktor sebesar 10 mH dapat dilihat pada Gambar 4.15. Hasil simulasi berupa grafik yang berisikan respon arus dan respon tegangan.



Gambar 4.15 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Induktor sebesar 1 mH

Mitigasi feroresonansi dengan penggunaan induktor yang memiliki nilai yang lebih kecil sebanding dengan nilai impedansinya. Ketika impedansi lebih kecil, maka arus akan menuju titik tersebut. Dengan demikian feroresonansi dapat segera diredam. Pada Gambar 4.16 nilai induktor yang digunakan sebesar 1 kH. Feroresonansi yang timbul tidak dapat diredam. Penggunaan induktor sebagai damping dengan settingan nilai yang lebih tinggi, dalam studi ini tidak berhasil meredam feroresonansi. Feroresonansi yang muncul dengan pemasangan damping induktor sebesar 1kH menghasilkan respon arus dan tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan feroresonansi tanpa dipasang damping induktor.

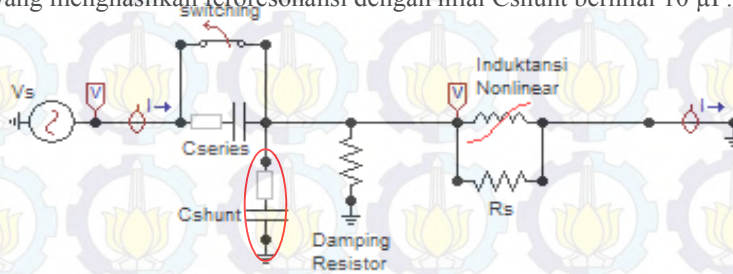


Gambar 4.16 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Induktor sebesar 1 kH

4.2.2 Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt

4.2.2.1 Mitigasi Feroresonansi menggunakan Resistor

Rangkaian simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan damping berupa elemen resistor dapat dilihat pada Gambar 4.17. Pada Gambar 4.16, rangkaian simulasi tersebut merupakan rangkaian simulasi yang menghasilkan feroresonansi dengan nilai Cshunt bernilai 10 μF .



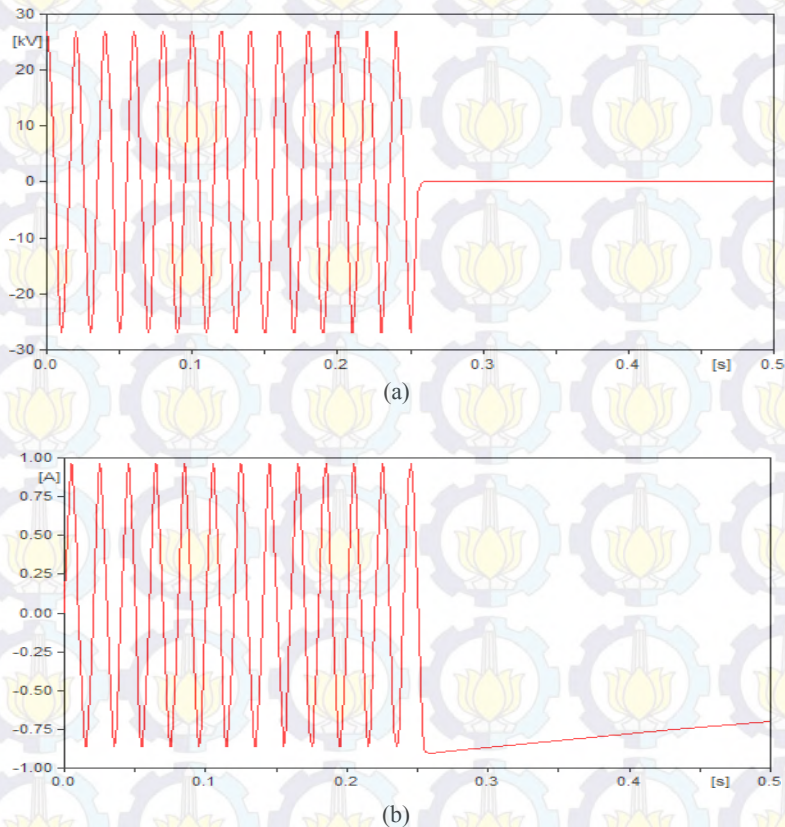
Gambar 4.17 Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt dengan memasang Damping Resistor

Pada Tabel 4.5 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan elemen resistor. Nilai resistor sebagai damping divariasikan hingga mendapatkan nilai yang tepat untuk meredam feroresonansi. Penggunaan resistor dengan nilai yang tinggi berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 4.5 tidak dapat digunakan untuk meredam feroresonansi. Semakin tinggi nilai resistansi yang digunakan untuk mendamping maka semakin besar peluang feroresonansi untuk muncul.

Tabel 4.5 Efek Pemasangan Damping Resistor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cshunt yang divariasikan

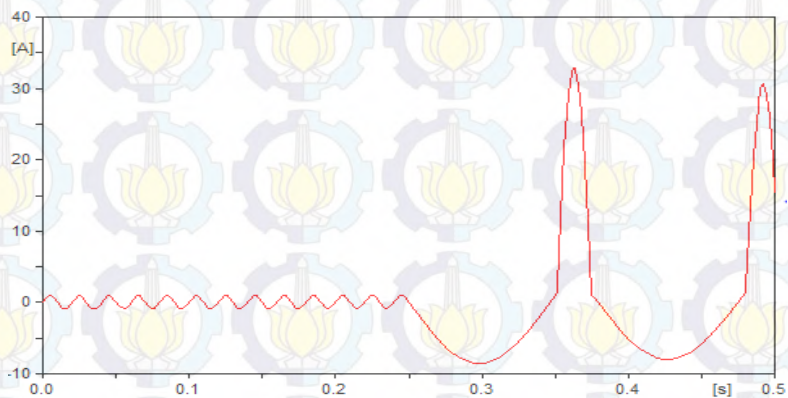
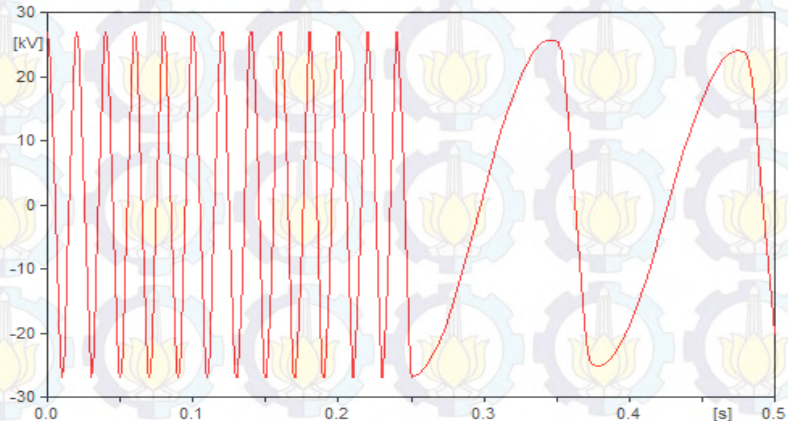
Nilai Resistor (Ω)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak Trafo (A)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
100000	26.94	26.94	0.96	32.8	Ya
1000	26.94	2.03	0.96	-2.45	Ya
100	26.94	0	0.96	0	Tidak
10	26.94	0	0.96	0	Tidak
1	29.64	0	0.96	0	Tidak

Penggunaan resistor dengan nilai yang tepat maka feroresonansi dapat diredam. Pada Gambar 4.18 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi yang berhasil dalam bentuk respon tegangan dan arus. Resistor yang digunakan sebesar 100Ω . Respon arus yang dihasilkan tidak langsung bernilai 0 melainkan menuju 0. Dengan respon arus dan tegangan dengan menunjuk angka 0 maka feroresonansi sudah berhasil diredam. Untuk Gambar 4.18 b respon arus tidak serta merta akan langsung bernilai nol. Akan tetapi dalam rentang waktu sedikit lebih lama arus pada akhirnya juga akan bernilai nol.



Gambar 4.18 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah CShunt menggunakan Damping Resistor sebesar 100Ω

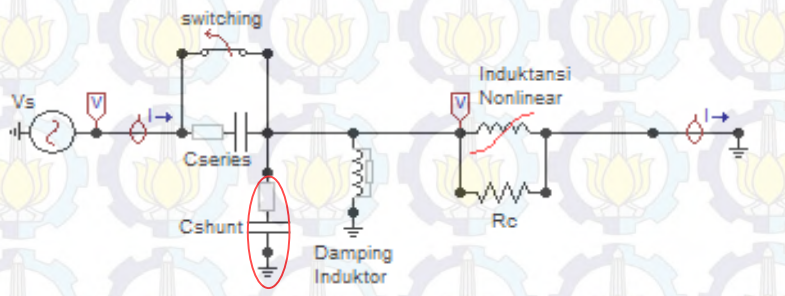
Mitigasi dengan pemasangan resistor dengan nilai yang tinggi tidak dapat meredam feroresonansi, melainkan dapat memperbesar nilai dari *overcurrent* dan frekuensi saat terjadi feroresonansi. Pada Gambar 4.19 dapat dilihat respon arus dan tegangan akibat pemasangan resistor sebagai damping sebesar 100 k Ω . Pemasangan resistor sebesar 100 k Ω mengakibatkan feroresonansi tetap ada dan tidak dihilangkan.



Gambar 4.19 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Resistor sebesar 100 k Ω

4.2.2.2 Mitigasi Feroresonansi menggunakan Induktor

Rangkaian simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan damping berupa elemen induktor dapat dilihat pada Gambar 4.20. Pemasangan damping reaktor berupa elemen induktor digunakan untuk memitigasi feroresonansi. Rentang nilai elemen induktor yang diuji untuk meredam feroresonansi adalah 0.1 mH – 10 H. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut



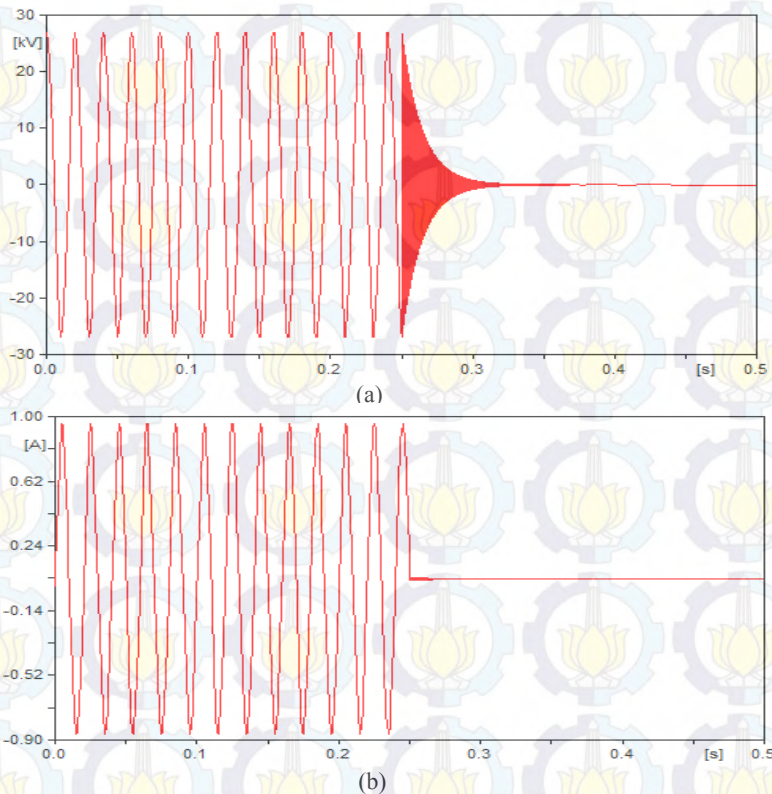
Gambar 4.20 Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt dengan memasang Damping Induktor

Pada Tabel 4.6 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan elemen induktor. Nilai induktor sebagai damping divariasikan hingga mendapatkan nilai yang tepat untuk meredam feroresonansi.

Tabel 4.6 Efek Pemasangan Damping Induktor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cshunt yang divariasikan

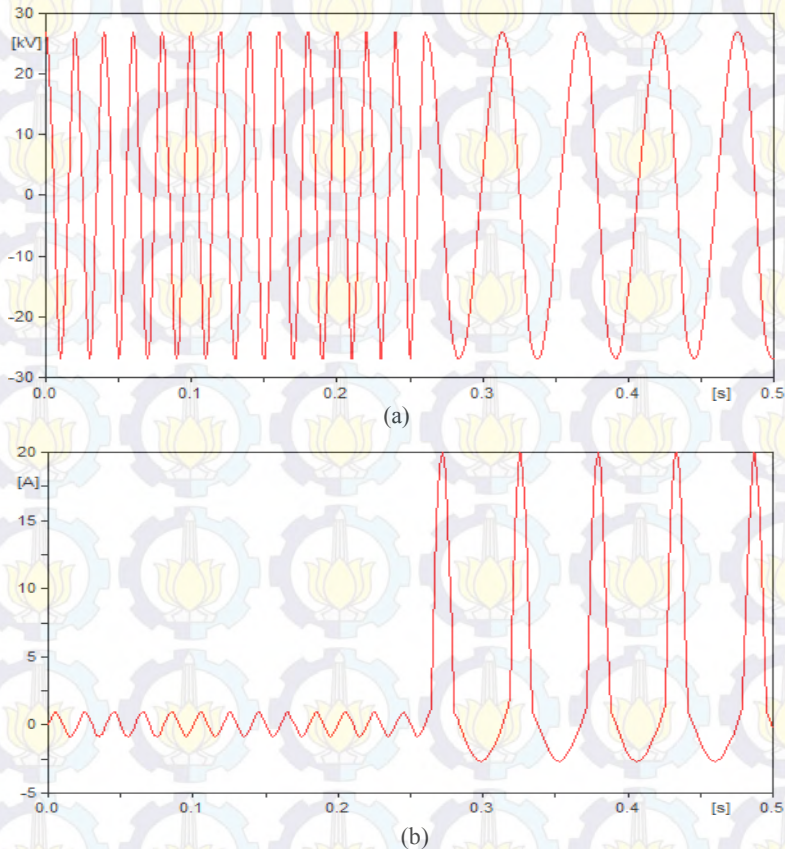
Nilai Induktor (mH)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak Trafo (A)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
10000	26,94	26.94	0.96	20	Ya
1000	26.94	26.94	0.96	0.95	Tidak
100	26.94	26.93	0.96	0.32	Tidak
10	26.94	26.92	0.96	0,137	Tidak
1	26.94	26.9	0.96	0.074	Tidak
0.1	26.94	26.75	0.96	0.05	Tidak

Penggunaan damping yang tepat dapat meredam feroresonansi. Penggunaan sampai 1 H masih dapat meredam feroresonansi sekalipun ada nilai arus yang muncul. Pada Gambar 4.21 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi yang berhasil dalam bentuk respon tegangan dan arus. Induktor yang digunakan sebesar 0.1 mH. Respon arus yang dihasilkan tidak langsung bernilai 0 melainkan menuju 0. Dengan respon arus dan tegangan dengan menunjuk angka 0 maka feroresonansi sudah berhasil diredam. Hasil simulasi berupa respon arus dan tegangan pada Gambar 4.21 tidak serta merta langsung menuju 0 melainkan membutuhkan beberapa waktu untuk menuju 0



Gambar 4.21 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Induktor sebesar 0.1 mH.

Mitigasi feroresonansi dengan settingan damping berupa induktor sebesar 10 H tidak dapat meredam feroresonansi. Respon arus dan tegangan dapat dilihat pada Gambar 4.22. Berdasarkan respon arus dan tegangan yang dihasilkan menunjukkan bahwa feroresonansi tidak diredam dan tetap ada pada sistem. Respon tegangan yang muncul memiliki nilai yang sama saat sebelum dilakukan *switdhing*, akan tetapi frekuensi dari tegangan sudah berbeda dengan frekuensi sumber. Untuk respon arus terlihat bahwa terjadi *overcurrent* pada sistem.



Gambar 4.22 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi menggunakan Damping Induktor sebesar 10 H

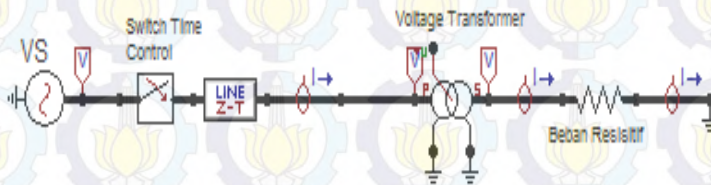
4.3 Feroresonansi Akibat Saluran Trafo Dibuka

Penggunaan trafo pada sebuah sistem mengakibatkan sistem tidak terlepas dari feroresonansi. Hal tersebut dikarenakan inti trafo merupakan sumber induktansi nonlinear karena terbuat dari bahan feromagnetik. Trafo yang digunakan pada pemodelan terbukanya saluran trafo dapat dilihat pada Tabel 4.7

Tabel 4.7 Spesifikasi Voltage Transformer

IEC	60044-2	Indoor	
Type	VRQIn/SI	BIL	125 kV
Frequency	50 Hz	Ratio	22000/110 V
Power and Accuracy Class	100 VA cl. 0.5	Primary Voltage	22000 V
Weight	28 kg	Secondary Voltage	110

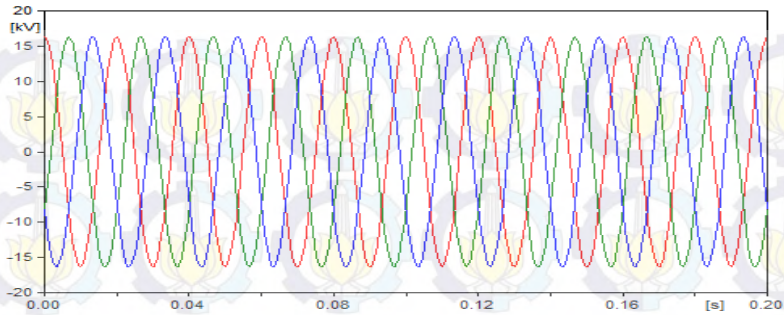
Pada studi ini sebuah pemodelan voltage trafo yang salah satu atau lebih salurannya terbuka akan disimulasikan untuk melihat efek dari pembukaan salurannya. Pemodelan rangkaian terdiri dari *switch time* yang digunakan untuk membuka saluran dengan settingan waktu yang ditetapkan. Model rangkaian simulasi dengan salah satu atau lebih saluran trafo dibuka dapat dilihat pada Gambar 4.23



Gambar 4.23 Simulasi ATP Akibat Pembukaan Saluran

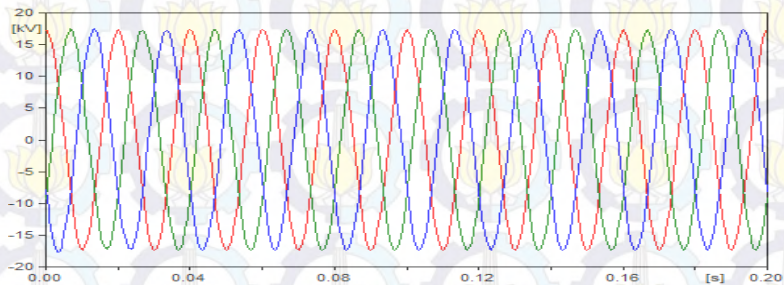
4.3.1 Keadaan Normal

Trafo dalam keadaan normal pada studi ini merupakan kondisi trafo 3 fasa dengan saluran yang dibuka/dilepas secara bersamaan. Rangkaian yang disimulasikan dengan keadaan normal akan menghasilkan grafik yang berisikan respon arus dan respon tegangan. Tegangan sumber yang digunakan adalah tegangan V_{peak} line to ground sebesar 16.3 kV dengan frekuensi sebesar 50 Hz. Respon tegangan sumber hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.24.

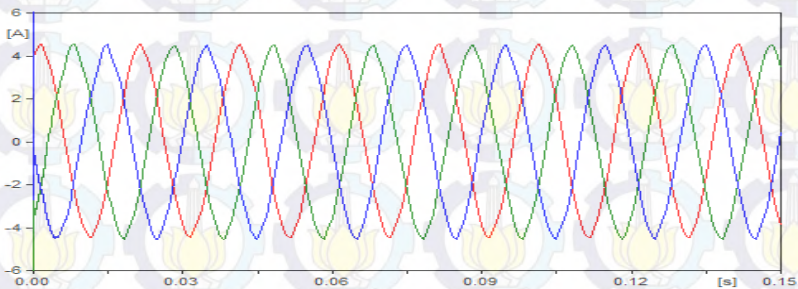


Gambar 4.24 Respon Tegangan saat Kondisi Normal

Untuk tegangan pada sisi primer dari trafo dapat dilihat pada Gambar 4.25 dengan nilai tegangan puncak sebesar 17.2 kV. Untuk nilai arus pada sisi primer trafo dapat dilihat pada Gambar 4.26 dengan nilai sebesar 4.56 A.

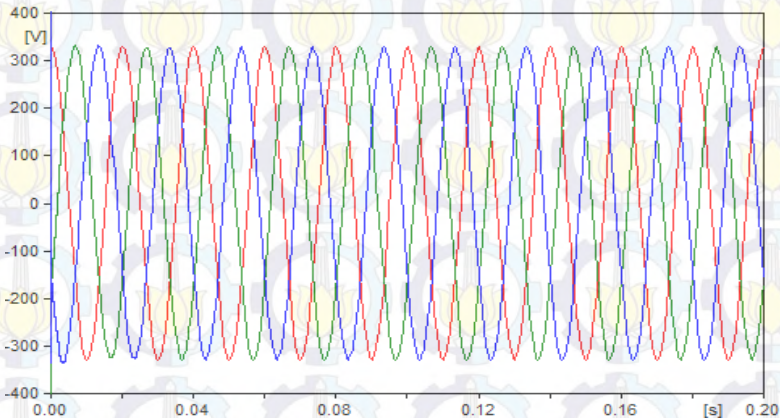


Gambar 4.25 Respon Tegangan pada Sisi Primer saat Kondisi Normal

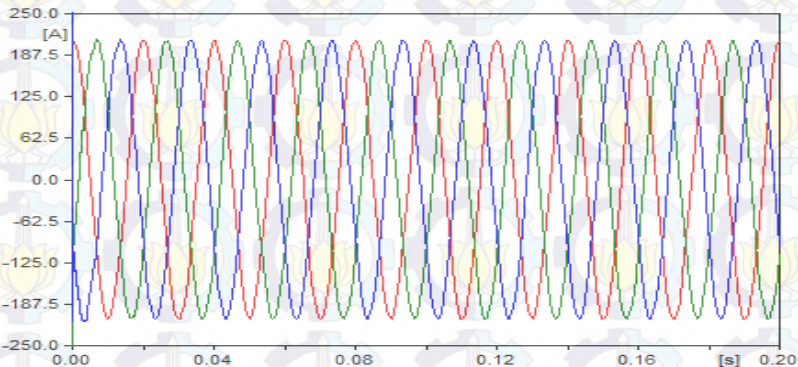


Gambar 4.26 Respon Arus pada Sisi Primer saat Kondisi Normal

Respon arus dan tegangan pada sisi sekunder trafo dapat dilihat pada Gambar 4.27 dan Gambar 4.28. Nilai tegangan yang diperoleh adalah $V_{peak} = 331$ V dan nilai arus adalah $I_{peak} = 212$ A



Gambar 4.27 Respon tegangan pada sisi sekunder saat Kondisi Normal

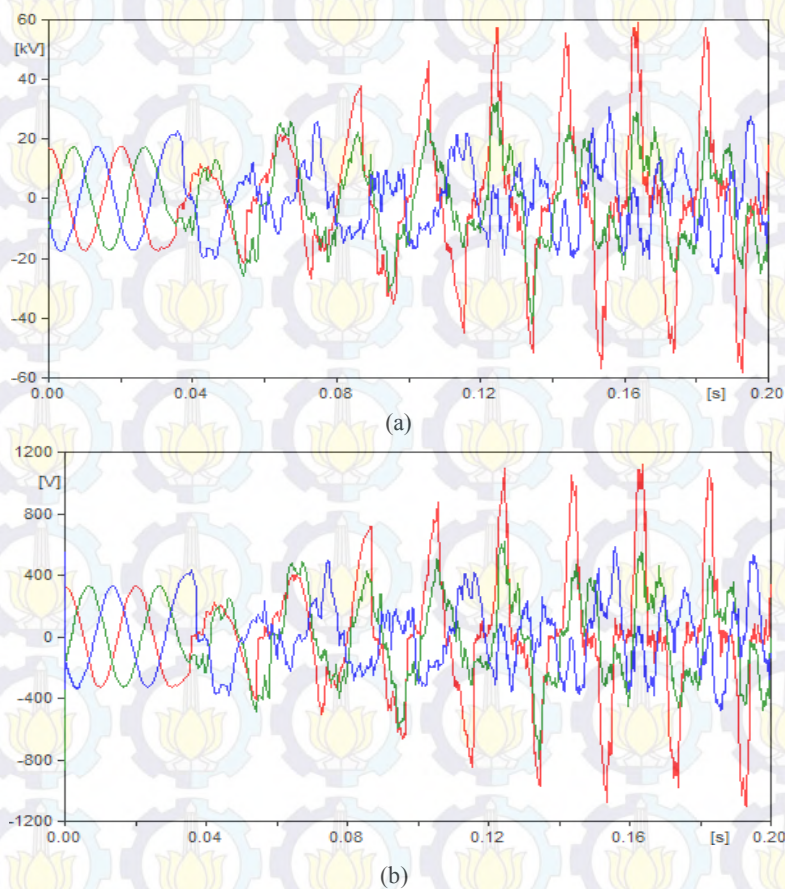


Gambar 4.28 Respon Arus pada Sisi Sekunder saat Kondisi Normal

4.3.2 Ferorensansi Akibat Satu Fasa Terbuka

Untuk memunculkan ferorensansi pada rangkaian dapat dengan membuka salah satu fasa pada trafo. Kondisi awal dari *switch* adalah tertutup untuk $t = 0$ sekon dan akan membuka bersamaan pada saat $t = 5$ sekon. Untuk membangkitkan ferorensansi salah satu saluran fasa trafo dibuka dengan bantuan *switch*.

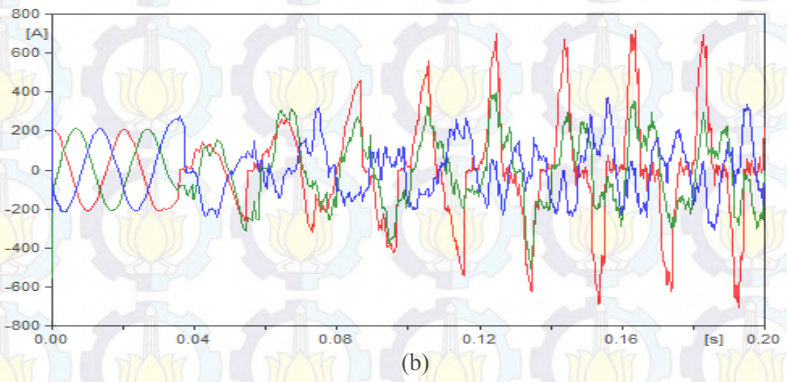
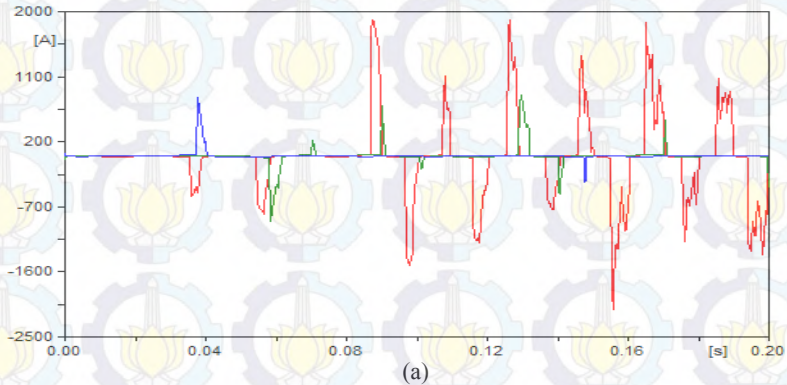
Pada studi ini salah satu fasa trafo dibuka terlebih dahulu dengan *switch* pada waktu 0.03 sekon. Hasil simulasi akan berupa grafik respon arus dan tegangan yang akan dianalisis untuk menemukan tanda-tanda munculnya feroresonansi. Kemunculan feroresonansi dapat ditandai dengan terjadinya *overvoltage* dan *overcurrent*. Hasil simulasi dengan membuka salah satu saluran fasa maka diperoleh respon arus dan tegangan seperti Gambar 4.29.



Gambar 4.29 Respon Tegangan di Sisi (a) Primer (b) Sekuder saat Satu Saluran dibuka

Berdasarkan Gambar 4.29 dapat dilihat bahwa ketiga saluran trafo baik pada sisi sekunder mengalami gangguan dan terjadi *overvoltage*. Untuk sisi primer tegangan mencapai nilai sebesar 59.3 kV dan pada sisi sekunder mencapai tegangan sampai 1.1 kV. Feroresonansi yang terjadi termasuk dalam golongan *quasi-periodic mode*.

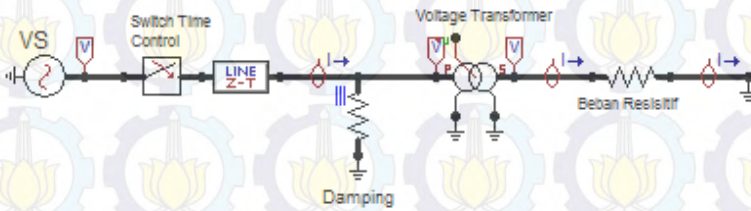
Hasil simulasi berupa respon arus yang mengalir saat salah satu saluran trafo dibuka dapat dilihat pada Gambar 4.30. respon arus pada Gambar 4.30 merupakan kurva arus untuk sisi primer dan sekunder. Berdasarkan Gambar 4.30 respon arus di sisi primer dan sekunder mengalami *overcurrent* pada sisi primer sehingga Ipeak 1878 A dan sekunder adalah 718.42 A.



Gambar 4.30 Respon Arus di sisi (a) Primer (b) Sekuder saat Satu Saluran Dibuka

4.3.3 Mitigasi Feroresonansi Akibat Satu Fasa Terbuka

Feroresonansi yang dimunculkan dengan membuka salah satu saluran fasa tersebut dapat diatasi dengan beberapa cara bentuk teknik mitigasi. Pada studi ini membahas teknik mitigasi yang digunakan untuk meredam feroresonansi dengan menggunakan damping reaktor berupa resistor. Rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.31



Gambar 4.31 Rangkaian Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Resistor akibat Membuka Satu Saluran.

Simulasi rangkaian mitigasi feroresonansi seperti pada Gambar 4.31 akan menghasilkan respon arus dan tegangan yang menunjukkan feroresonansi dapat dimitigasi dengan pemasangan damping reaktor yang sesuai sehingga dapat meredam feroresonansi. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8. Pada Tabel 4.7 akan diperoleh hasil simulasi untuk respon tegangan di sisi primer dan sekunder.

Tabel 4.8a Respon Tegangan Primer Sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Satu Saluran

Nilai Damping (Ω)	Tegangan Primer (KV)						Feroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50				16.8	20	18.4	Tidak
100	59.3	32.6	30	25.3	24.5	17.6	Tidak
110				28	24.15	18.2	Ya

Tabel 4.8b Respon Tegangan Sekunder Sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Satu Saluran

Nilai Damping (Ω)	Tegangan Sekunder (KV)						Ferroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50	1.1	0.617	0.585	0.26	0.38	0.27	Tidak
100				0.48	0.46	0.33	Tidak
110				0.53	0.48	0.34	Ya

Tabel 4.8 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi berupa respon arus pada sisi primer dan sekunder.

Tabel 4.9a Respon Arus Primer Sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Satu Saluran

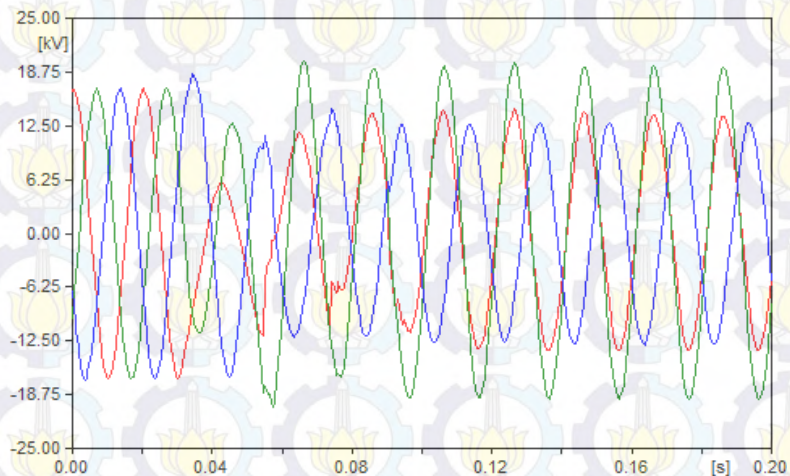
Nilai Damping (Ω)	Arus Primer (A)						Ferroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50	1878	842	800	-840	404	288	Tidak
100				-1000	-480	415	Tidak
110				1025	-520	450	Ya

Tabel 4.9b Respon Arus Sekunder Sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Dua Saluran

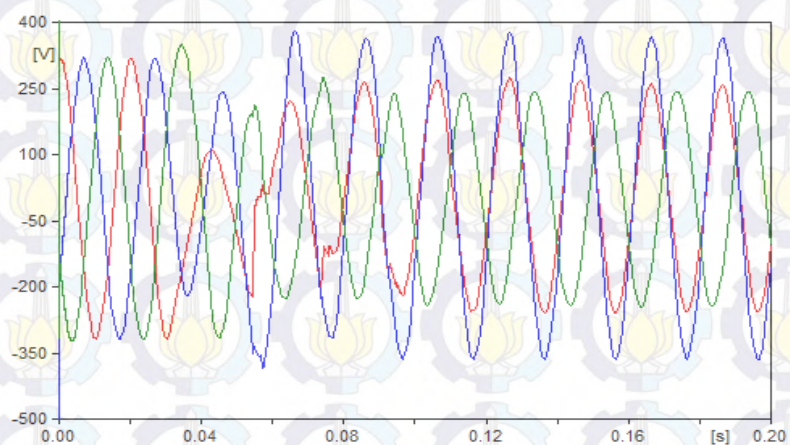
Nilai Damping (Ω)	Arus Sekunder (A)						Ferroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50	718	397	375	168	241	176	Tidak
100				307	295	214	Tidak
110				340	280	220	Ya

Hasil dari simulasi mitigasi feroresonansi berupa tegangan dapat dilihat pada Gambar 4.32. Berdasarkan Gambar 4.32 respon tegangan pada sisi primer dan sekunder tidak menunjukkan *overvoltage* yang tinggi dan tidak adanya harmonisa pada respon tegangan. Meskipun nilai

tegangan memiliki perbedaan dengan tegangan sumber asli akan tetapi feroresonansi sudah dapat diredam dan tidak membahayakan lagi bagi peralatan ataupun operator.

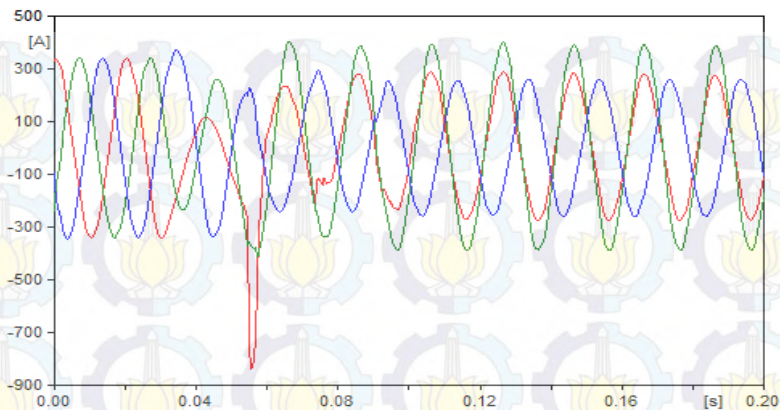


(a)

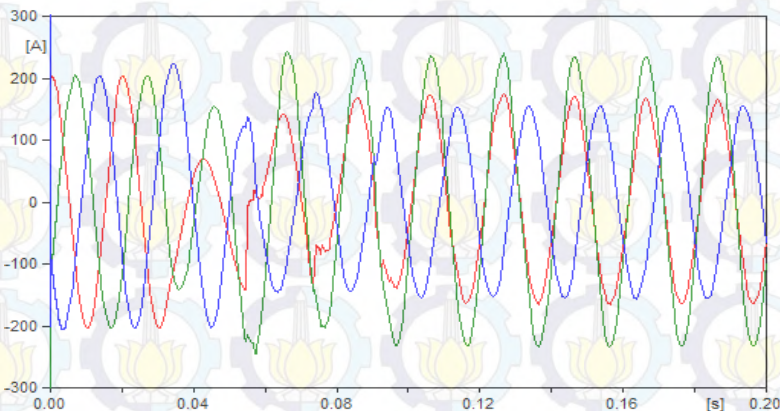


(b)

Gambar 4.32 Respon Tegangan di Sisi (a) Primer (b) Sekuder saat Feroresonansi akibat Satu Saluran Dibuka di Mitigasi



(a)



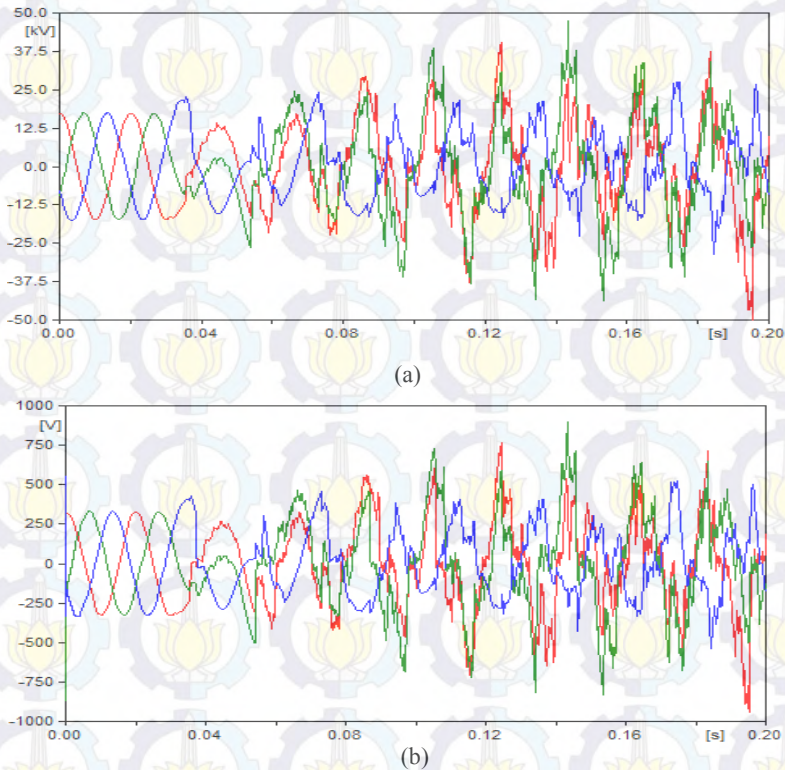
(b)

Gambar 4.33 Respon Arus di Sisi (a) Primer (b) Sekuder saat Ferroresonansi akibat Satu Saluran Dibuka di Mitigasi

Respon arus dari hasil mitigasi ferroresonansi pada rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.33. Respon arus pada sisi primer mengalami lonjakan arus pada sisi saluran yang dibuka untuk beberapa saat. Akan tetapi setelah lonjakan arus yang dihasilkan sudah kembali normal dan tidak membahayakan bagi peralatan dan operator.

4.3.4 Feroresonansi Akibat Dua Fasa Terbuka

Rangkaian simulasi dengan membuka dua saluran dapat menimbulkan feroresonansi. Dua buah saluran fasa trafo dibuka dalam waktu yang bersamaan yakni 0.03 sekon dan hasil simulasi dalam bentuk respon arus dan tegangan. Hasil simulasi rangkaian dengan membuka dua saluran trafo dapat dilihat pada Gambar 4.34.

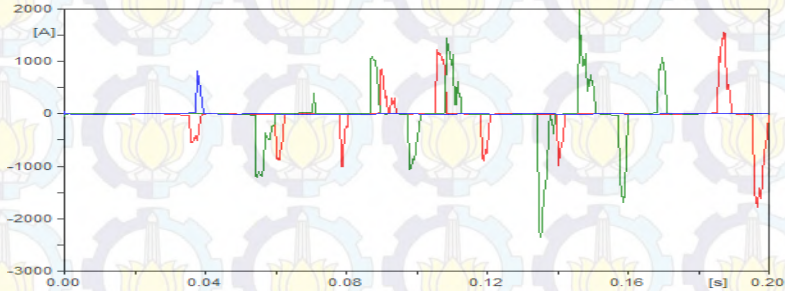


Gambar 4.34 Respon Tegangan di Sisi (a) Primer (b) Sekunder saat Dua Saluran dibuka.

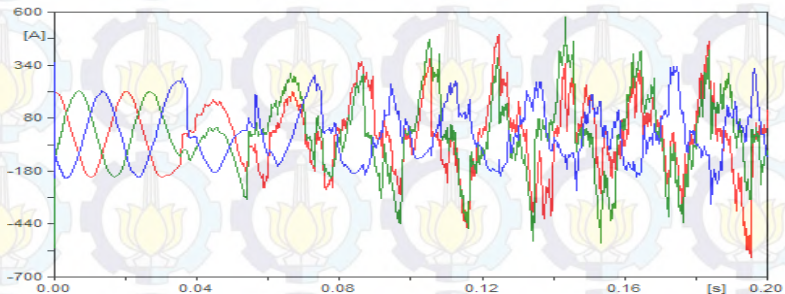
Hasil simulasi pada rangkaian dengan membuka dua saluran menghasilkan respon tegangan seperti pada Gambar 4.34. Gambar 4.34 (a) merupakan respon tegangan pada sisi primer dengan tegangan puncak sebesar . 45 kV untuk tegangan puncak saluran R dan 47 kV untuk saluran S. Untuk respon tegangan pada sisi sekunder dapat dilihat pada Gambar 4.34 (b) dengan tegangan fasa R mencapai tegangan puncak sebesar 900

A dan fasa S 770 A. Feroresonansi yang timbul ketika 2 saluran dibuka bersamaan termasuk dalam tipe *quasi-periodic mode*.

Hasil simulasi selain menghasilkan respon tegangan dihasilkan juga respon arus. Respon arus pada yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.35. Hasil feroresonansi berupa respon arus pada sisi primer dan sekunder menunjukkan fenomena feroresonansi. Untuk arus primer diperoleh arus puncak pada saluran R sebesar 1550 A dan untuk arus puncak pada saluran B sebesar 1970 A. Sedangkan untuk Fasa T diperoleh arus puncak yang muncul hanya sekali sebesar 180 A. Pada sisi sekunder diperoleh nilai arus puncak pada fasa R sebesar 490 A, fasa S sebesar 550 A dan fasa T sebesar 333.5 A. Feroresonansi yang muncul pada rangkaian yang kedua saluran fasa trafo dibuka bersamaan termasuk pada tipe *quasi-periodic mode*.



(a)

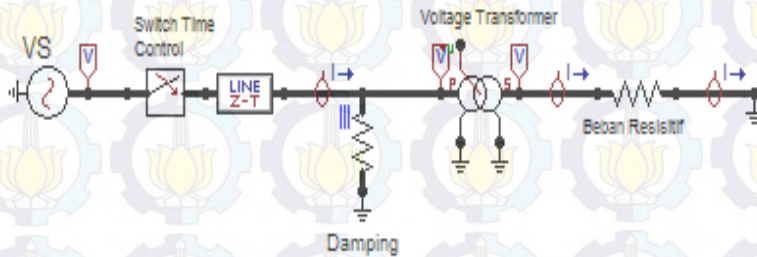


(b)

Gambar 4.35 Respon Arus di Sisi (a) Primer (b) Sekuder saat Feroresonansi akibat Dua Saluran dibuka

4.3.5 Mitigasi Feroresonansi Akibat Dua Fasa Terbuka

Feroresonansi yang timbul akibat membuka dua saluran fasa terbuka bersamaan tersebut dapat diatasi dengan beberapa cara bentuk teknik mitigasi. Pada studi ini membahas teknik mitigasi yang digunakan untuk meredam feroresonansi dengan menggunakan damping reaktor berupa resistor. Rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.35



Gambar 4.36 Rangkaian Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Resistor akibat Membuka Dua Saluran.

Berdasarkan rangkaian pada Gambar 4.35 maka akan diroleh hasil simulasi berupa respon arus dan tegangan yang menunjukkan feroresonansi dapat di mitigasi atau tidak. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.9 untuk hasil respon tegangan dan Tabel 4.10 untuk respon arus baik disisi primer ataupun sekunder

Tabel 4.10a Respon Tegangan Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Dua Saluran

Nilai Damping (Ω)	Tegangan Primer (KV)						Feroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50	43	47.5	29.9	16	16	15	Tidak
80				23	24	19.5	Ya
100				31	29	17.5	Ya

Tabel 4.10b Respon Tegangan Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Dua Saluran

Nilai Damping (Ω)	Tegangan Sekunder (KV)						Feroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50				0.3	0.3	0.28	Tidak
80	0.7	0.9	0.56	0.45	0.42	0.37	Ya
100				0.58	0.56	0.33	Ya

Tabel 4.10 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi berupa respon arus pada sisi primer dan sekunder.

Tabel 4.11a Respon Arus Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Dua Saluran

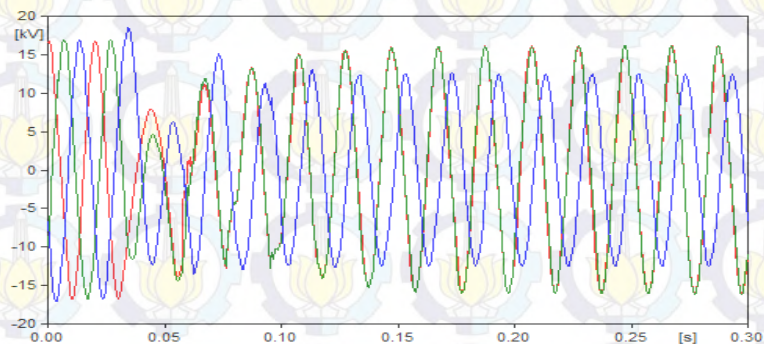
Nilai Damping (Ω)	Arus Primer (A)						Feroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50				-820	-740	305	Tidak
80	1500	2000	820	-995	-1005	306	Ya
100				-1008	-910	410	Ya

Tabel 4.11b Respon Arus Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Dua Saluran

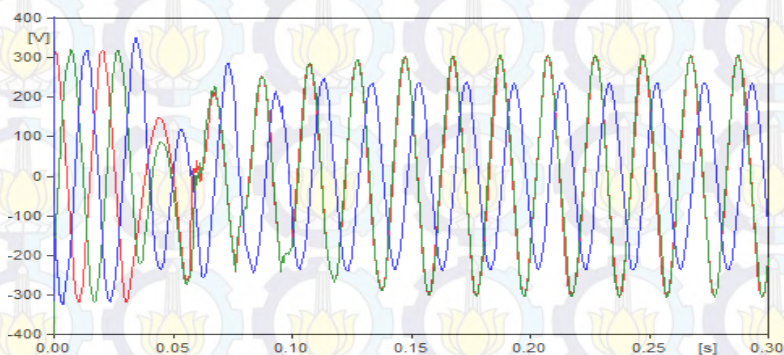
Nilai Damping (Ω)	Arus Sekunder (A)						Feroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50				195	195	180	Tidak
80	491	575	333	275	290	234	Ya
100				368	357	240	Ya

Berdasarkan Tabel 4.9 dan 4.10 dapat terlihat bahwa pemasangan damping dengan nilai yang tepat dapat meredam feroresonansi. Sedangkan dengan nilai elemen resistor yang dipasang sebagai damping tidak sesuai maka feroresonansi tetap terjadi.

Hasil dari simulasi mitigasi feroresonansi dengan melakukan pemasangan damping reaktor berupa elemen resistor dapat dilihat pada Gambar 4.36 dan Gambar 4.37 sebagai hasil simulasi dalam bentuk respon tegangan dan arus.



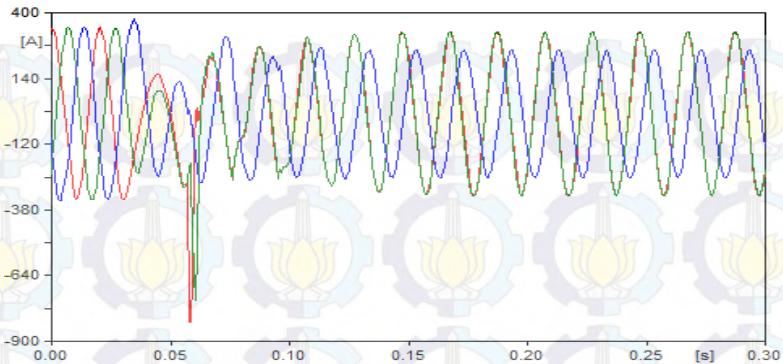
(a)



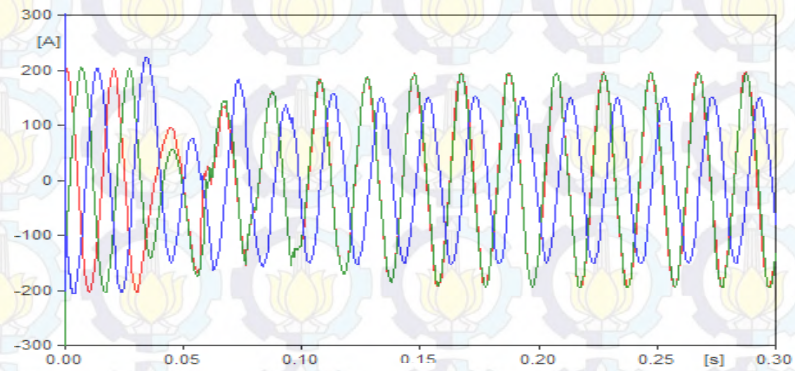
(b)

Gambar 4.37 Respon Tegangan di Sisi (a) Primer (b) Sekunder saat Feroresonansi akibat Dua Saluran Dibuka di Mitigasi

Respon tegangan pada sisi primer seperti pada Gambar 4.37, menunjukkan feroresonansi yang telah dimitigasi. Respon tegangan yang diperoleh tidak menunjukkan *overvoltage*. Dengan demikian tegangan yang dihasilkan tidak menjadi ancaman bagi peralatan dan operator sekalipun tegangan yang dihasilkan tidak sebaik tegangan aslinya dan tidak sesuai dengan tegangan saat kondisi normal. Antar saluran tegangan yang dihasilkan berbeda-beda.



(a)



(b)

Gambar 4.38 Respon Arus di Sisi (a) Primer (b) Sekunder saat Feroresonansi akibat Dua Saluran Dibuka di Mitigasi

Hasil simulasi selain menghasilkan respon tegangan dihasilkan juga respon arus. Respon arus yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.38. Respon arus pada sisi primer dan sekunder seperti pada Gambar 4.38, menunjukkan feroresonansi yang telah dimitigasi. Respon arus yang diperoleh tidak menunjukkan *overcurrent*. Dengan demikian arus yang dihasilkan tidak menjadi ancaman bagi peralatan dan operator sekalipun arus yang dihasilkan tidak sebaik tegangan aslinya.



(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Martinez, G. Antonova and M. Olgun, "*Ferroresonance Phenomenon in CFE, its Origin and Effects*", IPST 2013, Vancouver, 2013.
- [2] Putu Wegadiputra Wiranata, I Made Yulistya Negara dan I Gusti Ngurah Satriyadi, "*Analisis Fenomena Ferroresonance pada Capacitive Voltage Transformer (CVT) Akibat Pelepasan Beban Secara Mendadak*", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.
- [3] Antonio Gomez-Exposito, Antonio J. Conejo and Claudio Canizares, "*Electric Energy System; Analysis and operation*", CRC Press, Boca Raton, 2008.
- [4] John Mc Donald, "*Electrical Power Substation Engineering*", CRC Press, Boca Raton, 2001.
- [5] Stephen J. Chapman, "*Electric Machinery Fundamentals 5th edition*", Mc- Graw Hill, USA, 2012.
- [6] Charles K. Alexander dan Matthew N.O. Sadiku, "*Fundamental of Electric Circuits 4th Edition*", McGraw-Hill, USA , 2007.
- [7] Ferraci, P., "*Ferroresonance*", Group Schneider: Cahier no 190, pp. 1-28, Maret, 1998.
- [8] Elmo Price, "*A Tutorial on Ferroresonance*", ABB Inc.
- [9] Zulkurnain Abdul-Malek, Kamyar Mehranzim, Behnam Salami, Hadi Nabipour Afrouzi dan Saeed Vahabi Mashak, "*Investigation of Ferroresonance Mitigation Techniques in Voltage Transformer Using ATP-EMTP Simulation*",Universiti Teknologi Malaysia, Johar, 2013.
- [10] Hermann W. Dommel, "*EMTP Theory Book in WP 5.1*", BPA, Oregon, 1994.



BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis yang dilakukan pada studi kasus pemasangan damping reaktor untuk mengatasi feroresonansi, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Feroresonansi pada rangkaian pemodelan Gardu Induk dengan mengubah parameter Cseries dan Cshunt cenderung tergolong dalam tipe feroresonansi *fundamental mode*. Pada Feroresonansi dengan mengubah Cseries, *overvoltage* yang terjadi mencapai tegangan puncak sampai 4,176 kali dari tegangan awal dan *overcurrent* mencapai arus puncak mencapai 16,04 kali dari arus awal. Feroresonansi akibat mengubah nilai Cshunt mengakibatkan terjadinya *overcurrent* mencapai nilai 36,25 kali nilai arus awalnya. Sedangkan tegangan mengalami perubahan frekuensi yang akan semakin kecil apabila Cshunt yang digunakan semakin besar.
2. Feroresonansi pada rangkaian pemodelan simulasi dengan membuka satu saluran fasa mengakibatkan *overvoltage dan overcurrent* dengan tipe feroresonansi cenderung ke tipe *quasi-periodic mode*. Tegangan dan arus puncak saat satu saluran fasa dibuka (Fasa R) terdapat pada fasa R sendiri dengan perbesaran sisi mencapai tegangan primer 3,4 kali tegangan awal dan pada tegangan sekunder mencapai tegangan puncak 3,3 kali dari tegangan awalnya. Sedangkan untuk arus puncak pada sisi primer mengalami perbesaran sebesar 417 kali dan 3,4 kali pada sisi sekunder. Feroresonansi ketika membuka 2 saluran fasa (Fasa R dan S) maka tegangan dan arus puncak terdapat pada saluran kedua (S) dengan perbesaran tegangan pada sisi primer mencapai tegangan puncak sebesar 2,76 kali dan sekunder sebesar 2,8 kali tegangan awal. Sedangkan arus puncak mengalami perbesaran mencapai sebesar 444,5 kali arus awal dan sisi sekunder 1,1 kali arus awal. Arus pada sisi primer sangat transien dalam pengertian bahwa arus sangat besar dalam waktu yang sangat singkat.
3. Mitigasi pada rangkaian pemodelan feroresonansi di gardu induk menggunakan elemen resistor dengan rentang 1-100 Ω dan induktor dengan rentang 0,1-1000 mH berhasil meredam feroresonansi. Ketika pemasangan damping reaktor diatas nilai tersebut maka

feroresonansi tetap terjadi dan tidak dapat diatasi Sama halnya dengan mitigasi feroresonansi akibat pelepasan saluran trafo, nilai damping resistor yang digunakan adalah 50Ω dan apabila lebih dari 100Ω maka feroresonansi tidak dapat diredam untuk kejadian membuka satu saluran dan 70Ω untuk kejadian membuka dua saluran .

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah melakukan simulasi feroresonansi pada sebuah sistem untuk melihat apakah komponen pada sistem dapat mengakibatkan feroresonansi. Ketika sebuah sistem positif mengalami feroresonansi maka kebijakan dapat diambil untuk mengganti beberapa komponen yang dapat menyebabkan feroresonansi.



(halaman ini sengaja dikosongkan)

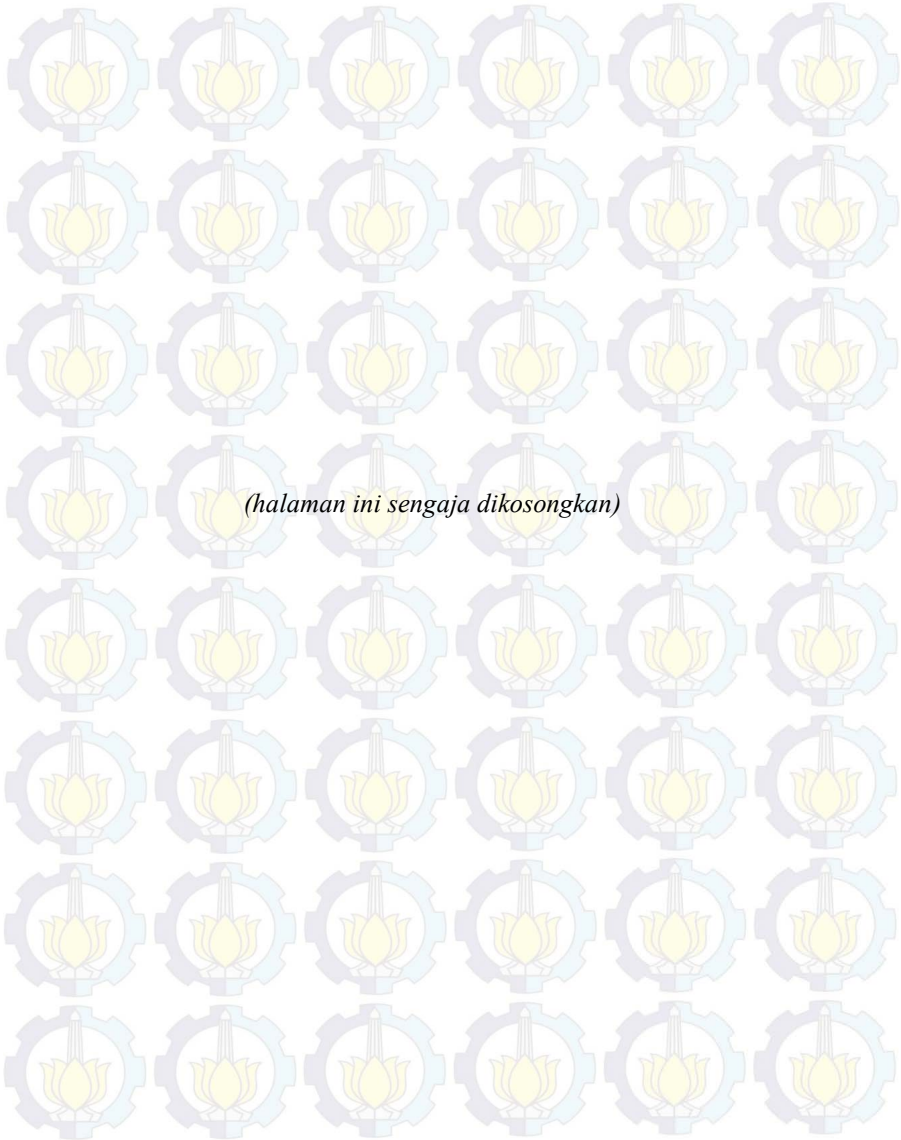
STUDY CASE OF DAMPING REACTOR INSTALLATION TO TREAT FERRORESONANCE IN 20 KV INCOMING GIS TANDES

Name : Satria Seventino Simamora
1st Advisor : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
2nd Advisor : Daniar Fahmi ST., MT.

ABSTRACT

This study concern about how to treat ferroresonance using a damping reactor installation by used a simulation with ATP Draw. This mitigation techniques using resistor on the primary side of transformer. The simulation results a response of current and voltage changed by time that show ferroresonance could mitigated or not. Thin simulation result that ferroresonance could mitigated with an appropriate value of damping element. So this study discussed how far the effectiveness of using damping installation to treat ferroresonance.

Key Words : *Ferroresonance, Transformer, Damping Reactor, ATP/EMTP*



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan YME untuk berkat dan kasih karunia yang diterima oleh penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir **”Studi Pemasangan Damping Reaktor untuk mengatasi Feroresonansi pada *Incoming* 20 kV GIS Tandem”** ini tepat waktu.

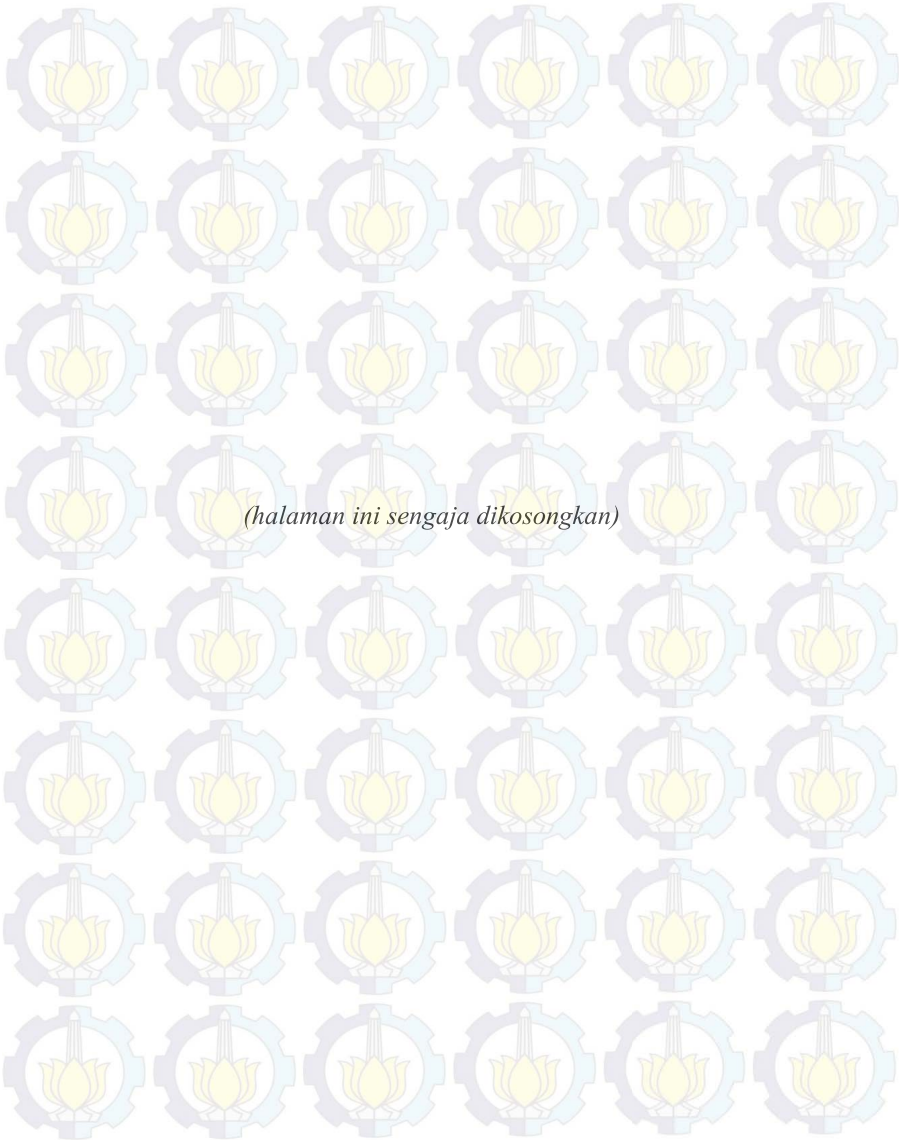
Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara, Bapak Bapak Daniar Fahmi dan Bapak I Gusti Ngurah Satriyadi atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kedua orangtua dan adik penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
4. Teman-teman Angkatan 2011 “ELVN” yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
5. Teman-teman Laboratorium Tegangan Tinggi yang mengingatkan dan mendukung penulis agar penulis bisa wisuda ke-112.
6. Teman-teman WP THOK yang selalu memberikan semangat agar penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan tepat waktu.
7. Fitri Rahayu Silaen, partner yang tidak pernah lelah untuk memberi waktu dan semangat kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai tepat waktu.

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

Surabaya, Juni 2015

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	2
BAB 2 SISTEM TENAGA LISTRIK DAN TRANSFORMATOR	3
2.1 Sistem Tenaga Listrik	3
2.2 Sistem Transmisi	4
2.2.1 Permasalahan dalam Sistem Transmisi	4
2.3 Gardu Induk	5
2.3.1 Gardu Induk Konvensional	6
2.3.2 Gas Insulation Station	6
2.4 Transformator	7
2.4.1 Prinsip Induksi pada Transformator	8
2.4.2 Ketidaklinear pada Inti Transformator	9
BAB 3 FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK	11
3.1 Resonansi	11
3.2 Feroresonansi	12
3.2.1 Pengertian Feroresonansi	12
3.2.2 Timbulnya Feroresonansi	13
3.2.3 Gejala-gejala Feroresonansi	14
3.2.4 Pendekatan Fisik Feroresonansi	14
3.2.5 Klasifikasi Feroresonansi	18

3.2.6	Pemodelan Simulasi Feroresonansi pada <i>Incoming</i> 20 kV GIS TANDES	20
3.2.7	Mitigasi Feroresonansi	21
3.2.7.1	Mitigasi Feroresonansi dengan Pemasangan Damping	21
3.3	ATP/EMTP Draw	22
BAB 4	ANALISIS HASIL SIMULASI MITIGASI FERORESONANSI MENGGUNAKAN DAMPING REAKTOR	25
4.1	Feroresonansi pada Gardu Induk	25
4.1.1	Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cseries	26
4.1.2	Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cshunt	30
4.2	Mitigasi Feroresonansi pada Gardu Induk	33
4.2.1	Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries	33
4.2.1.1	Mitigasi Feroresonansi menggunakan Resistor	33
4.2.1.2	Mitigasi Feroresonansi menggunakan Induktor	36
4.2.2	Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt	39
4.2.2.1	Mitigasi Feroresonansi menggunakan Resistor	39
4.2.2.2	Mitigasi Feroresonansi menggunakan Induktor	42
4.3	Feroresonansi Akibat Saluran Trafo Dibuka	45
4.3.1	Keadaan Normal	45
4.3.2	Feroresonansi Akibat Satu Fasa Terbuka	47
4.3.3	Mitigasi Feroresonansi Akibat Satu Fasa Terbuka	50
4.3.4	Feroresonansi Akibat Dua Fasa Terbuka	54
4.3.5	Mitigasi Feroresonansi Akibat Dua Fasa Terbuka	56
BAB 5	PENUTUP	
5.1	Kesimpulan	61
5.2	Saran	62
DAFTAR PUSTAKA		63
RIWAYAT HIDUP		65

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 4.1	Efek Perubahan Nilai Cseries	28
Tabel 4.2	Efek Perubahan Cshunt	31
Tabel 4.3	Efek Pemasangan Damping Resistor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cseries yang divariasikan	33
Tabel 4.4	Efek pemasangan Damping Induktor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cseries yang divariasikan	36
Tabel 4.5	Efek Pemasangan Damping Resistor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cshunt yang divariasikan	39
Tabel 4.6	Efek Pemasangan Damping Induktor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cshunt yang divariasikan	42
Tabel 4.7	Spesifikasi <i>Voltage Transformer</i>	45
Tabel 4.8a	Respon Tegangan Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Satu Saluran.	50
Tabel 4.8b	Respon Tegangan Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Satu Saluran.	51
Tabel 4.9a	Respon Arus Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Satu Saluran.	51
Tabel 4.9b	Respon Arus Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Satu Saluran.	51
Tabel 4.10a	Respon Tegangan Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Dua Saluran.	56
Tabel 4.10b	Respon Tegangan Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Dua Saluran.	57
Tabel 4.11a	Respon Arus Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Dua Saluran.	57
Tabel 4.11b	Respon Arus Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi Akibat Membuka Dua Saluran.	57



(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

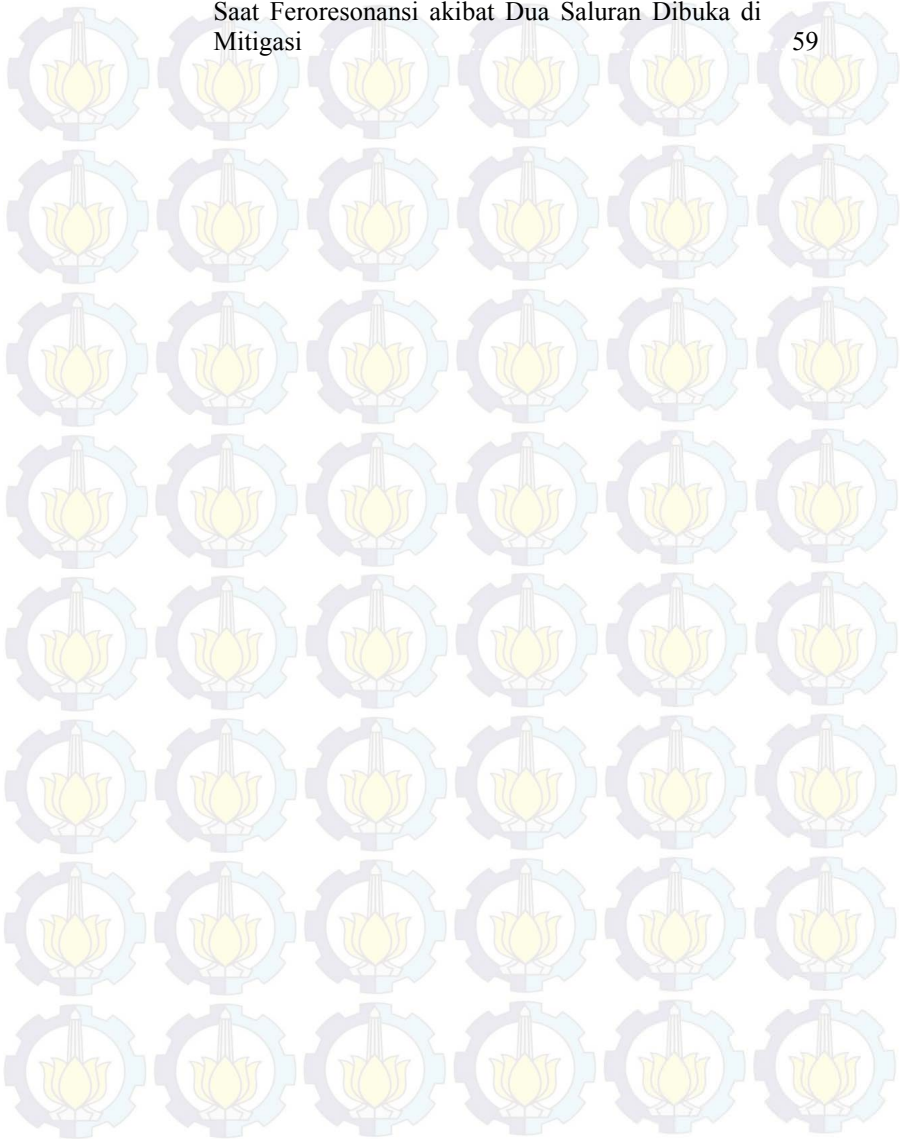
	Halaman
Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik	3
Gambar 2.2 Gardu Induk Konvensional	6
Gambar 2.3 Konstruksi trafo (a), Tipe Inti (b), Tipe cangkang(c)	7
Gambar 2.4 Konstruksi trafo (a), Tipe Inti (b), Tipe cangkang(c)	8
Gambar 2.5 <i>Voltage Transformer</i> Pemasangan Dalam	9
Gambar 2.5 Kurva Histerisis	10
Gambar 3.1 Resonansi Seri (a) Hubungan Arus dan Frekuensi resonansi (b)	12
Gambar 3.2 Rangkaian Pemodelan Feroresonansi	13
Gambar 3.3 Kurva Saturasi Induktor Nonlinear	14
Gambar 3.4 Rangkaian karakteristik Dasar Feroresonansi	15
Gambar 3.5 Diagram Skematik model Feroresonansi	15
Gambar 3.6 Hubungan Fluks dan Arus	15
Gambar 3.7 Osilasi pada Rangkaian Feroresonansi Seri	16
Gambar 3.8 Fundamental Mode	18
Gambar 3.9 Subharmonik mode	19
Gambar 3.10 Quasi-periodik mode	19
Gambar 3.11 Chaotic Mode	19
Gambar 3.12 a. Susunan Peralatan pada Gardu Induk b. Layout sebuah GIS	20
Gambar 3.13 <i>Single Line Diagram Incoming 20 kV GIS Tandes</i>	21
Gambar 3.14 Rangkaian Ekuivalen Feroresonansi Reduksi	21
Gambar 3.15 Simulasi Rangkaian Feroresonansi menggunakan ATP Draw	22
Gambar 3.16 Mitigasi Feroresonansi dengan Memasang Resistor	23
Gambar 3.17 Mitigasi Feroresonansi dengan Memasang Induktor	24
Gambar 4.1 Single Line Diagram Sistem Transmisi 150 kV	26
Gambar 4.2 Rangkaian Ekuivalen Feroresonansi Reduksi	26
Gambar 4.3 Rangkaian Simulasi Feroresonansi	26
Gambar 4.4 Rangkaian Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cseries	27
Gambar 4.5 Kurva Magnetisasi Induktor nonlinear	27
Gambar 4.6 Respon Tegangan saat (a) tidak terjadi feroresonansi (b) terjadi feroresonansi akibat mengubah Cseries	29

Gambar 4.7	Respon Arus saat (a) tidak terjadi feroresonansi (b) saat terjadi feroresonansi akibat mengubah Cseries	29
Gambar 4.8	Rangkaian Feroresonansi dengan mengubah Paramaeter Cshunt	30
Gambar 4.9	Respon Tegangan saat (a) tidak terjadi feroresonansi (b) terjadi feroresonansi akibat mengubah Cshunt.	31
Gambar 4.10	Respon Arus saat (a) tidak terjadi feroresonansi (b) terjadi feroresonansi akibat mengubah Cshunt.	32
Gambar 4.11	Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi Akibat Mengubah Parameter Cseries dengan Pemasangan Damping Resistor	33
Gambar 4.12	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries menggunakan Damping Resistor sebesar 100Ω	34
Gambar 4.13	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries menggunakan Damping Resistor sebesar 1MΩ	35
Gambar 4.14	Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries dengan memasang Damping Resistor	36
Gambar 4.15	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Induktor sebesar 1 mH	37
Gambar 4.16	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Induktor sebesar 1 kH	38
Gambar 4.17	Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt dengan memasang Damping Resistor .	39
Gambar 4.18	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah CShunt menggunakan Damping Resistor sebesar 100Ω.	40
Gambar 4.19	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Resistor sebesar 1 MΩ	41
Gambar 4.20	Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt dengan memasang Damping Induktor	42

Gambar 4.21	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Induktor sebesar 0.1 mH	43
Gambar 4.22	Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Induktor sebesar 10 H	44
Gambar 4.23	Simulasi ATP Akibat Pembukaan Saluran	45
Gambar 4.24	Respon Tegangan saat Kondisi Normal	46
Gambar 4.25	Respon Tegangan pada Sisi Primer saat Kondisi Normal	46
Gambar 4.26	Respon Arus pada Sisi Primer saat Kondisi Normal	46
Gambar 4.27	Respon Tegangan pada Sisi Sekunder saat Kondisi Normal	47
Gambar 4.28	Respon Arus pada Sisi Sekunder saat Kondisi Normal	47
Gambar 4.29	Respon Tegangan di sisi Primer (a) dan Sekunder (b) Saat Satu Saluran Dibuka	48
Gambar 4.30	Respon Arus pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Satu Saluran Dibuka	49
Gambar 4.31	Rangkaian Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Resistor akibat membuka Satu Salura	50
Gambar 4.32	Respon Tegangan pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Feroresonansi akibat Satu Saluran Dibuka di Mitigasi	52
Gambar 4.33	Respon Arus pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Feroresonansi akibat Satu Saluran Dibuka di Mitigasi	53
Gambar 4.34	Respon Tegangan di Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Dua Saluran Dibuka	54
Gambar 4.35	Respon Arus pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Satu Saluran Dibuka	55
Gambar 4.36	Rangkaian Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Resistor akibat Membuka Dua Fasa Terbuka	56
Gambar 4.37	Respon Tegangan pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b) Saat Feroresonansi akibat dua Saluran Dibuka di Mitigasi	58

Gambar 4.38 Respon Arus pada Sisi Primer(a) dan sekunder (b)
Saat Feroresonansi akibat Dua Saluran Dibuka di
Mitigasi

59

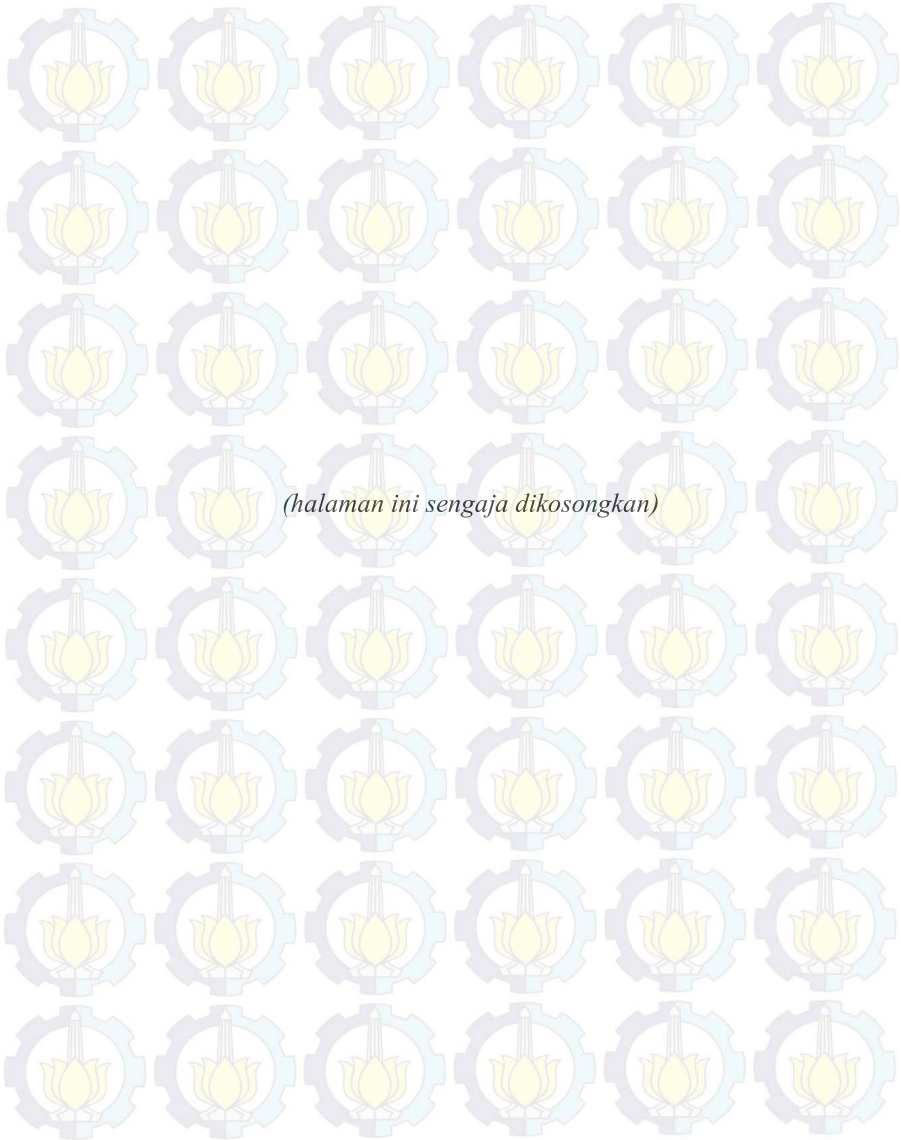


BIOGRAFI



Penulis memiliki nama lengkap Satria Seventino Simamora. Lahir di pematangsiantar pada tanggal 17 September 1993. Penulis mulai menempuh jalur pendidikan formal di TK Santa Lucia Pematangsiantar pada tahun 1997-1999. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan dasar di SD RK Budi Mulia 1 hingga tahun 2005. Setelah lulus dari jenjang pendidikan dasar penulis melanjutkan pendidikan menengah di SLTP RK Bintang Timur Pematangsiantar. Pada tahun 2008, penulis memilih untuk melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 2 Balige. Kemudian penulis menetapkan pilihan untuk melanjutkan jenjang pendidikan perguruan tinggi di Jurusan Teknik Elektro ITS pada tahun 2011. Selama berstatus sebagai mahasiswa, penulis aktif dalam berorganisasi dan berkarya dibidang olahraga maupun akademik. Saat ini penulis aktif sebagai Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi di Jurusan Teknik Elektro FTI ITS.

Email :
Satriasimamora17@gmail.com



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem transmisi tenaga listrik memiliki peranan yang sangat vital bagi kehidupan sehari-hari. Hal tersebut tidak terlepas dari perkembangan teknologi yang sangat pesat dimana sistem transmisi harus memiliki tingkat keandalan dan ketersediaan yang tinggi. Pelayanan sistem transmisi yang maksimal harus didukung peralatan-peralatan yang berfungsi secara optimal. Salah satu peralatan yang harus bekerja dengan baik adalah trafo.

Trafo dalam sistem transmisi merupakan peralatan listrik yang menjadi inti dari penyaluran listrik kepada konsumen. Penggunaan trafo dalam sistem transmisi sangat memungkinkan untuk terjadinya sebuah fenomena kelistrikan yang sangat unik yakni feroresonansi. Feroresonansi sendiri tidak dapat dihindari ataupun diprediksi kapan terjadi. Hal ini dikarenakan adanya ketidaklinearan yang timbul pada sistem yang mengakibatkan feroresonansi susah untuk diperkirakan 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 [1].

Tingkat tegangan lebih atau arus lebih yang terjadi dapat berbahaya bagi peralatan listrik [2]. Contoh kerusakan yang akan dialami trafo adalah terbakar. Selain berbahaya bagi peralatan, arus dan tegangan yang timbul akibat feroresonansi menjadi sangat berbahaya bagi operator. Efek lain ketika feroresonansi terjadi adalah sistem proteksi pada sistem transmisi gagal bekerja. Hal tersebut akan mempengaruhi keandalan dari sistem transmisi tersebut. Permasalahan yang timbul akibat feroresonansi harus segera diatasi atau ditangani. Salah satu cara yang efektif digunakan adalah dengan melakukan pemasangan *damping reaktor*.

Masalah yang dibahas dalam studi ini adalah bagaimana mengetahui fenomena feroresonansi pada sistem tenaga listrik dengan melakukan simulasi pada pemodelan sebuah rangkaian ekuivalen feroresonansi. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisis pemasangan *damping reaktor* sebagai salah satu cara meredam feroresonansi menggunakan perangkat lunak ATP.

Sedangkan tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah mengetahui pengaruh pemasangan *damping reaktor* terhadap sistem tenaga yang mengalami feroresonansi.

Metode yang digunakan dalam studi ini, yang pertama adalah melakukan studi literatur dan pengumpulan data mengenai feroresonansi dan bentuk-bentuk mitigasi feroresonansi. Setelah mengumpulkan data-data yang dibutuhkan maka selanjutnya adalah pemodelan rangkaian maka akan ditentukan parameter-parameter dari rangkaian feroresonansi seperti nilai kapasitor, induktansi nonlinear dan nilai resistansi. Kemudian langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan rangkaian feroresonansi yang akan disimulasikan melalui perangkat lunak ATP Draw. Setelah melakukan pemodelan rangkaian yang akan disimulasikan maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi rangkaian. Hasil dari simulasi berupa grafik fungsi tegangan dan fungsi arus terhadap waktu yang menunjukkan feroresonansi dan grafik hasil mitigasi feroresonansi. Kemudian langkah terakhir yang dilakukan adalah hasil analisis digunakan sebagai rujukan menarik kesimpulan.

1.2 Sistematika Penulisan

Pada bab satu berisi tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, manfaat dan relevansi dari penulisan.

Selanjutnya bab dua berisi teori penunjang yang membahas tentang sistem tenaga listrik dan teori dasar transformator yang digunakan dalam studi ini.

Pada bab tiga dibahas mengenai teori dasar feroresonansi dan teknik-teknik mitigasi feroresonansi.

Kemudian bab empat yang dibahas adalah hasil simulasi mengenai feroresonansi dan analisis hasil simulasi teknik mitigasi feroresonansi dengan menggunakan damping reaktor.

Pada bab lima berisi tentang penarikan kesimpulan dari studi yang dilakukan melalui sebuah simulasi rangkaian feroresonansi dan saran untuk penelitian atau studi kedepannya.

BAB 2

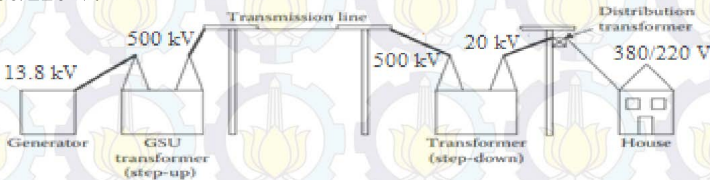
Sistem Transmisi dan Transformator

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik saat ini mengalami kemajuan seiring dengan perkembangan teknologi. Baik dari mesin-mesin listrik yang digunakan ataupun pemanfaatan *artificial intelligence* yang diterapkan dalam sistem tenaga listrik. Akan tetapi secara umum sistem tenaga listrik memiliki 3 komponen utama yakni pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi dan sistem distribusi yang saling terikat dan sangat kompleks. Ada komponen yang tidak kalah penting pada sistem tenaga listrik yakni *substation* yang berguna sebagai tempat untuk menaikkan dan menurunkan level tegangan dari suatu saluran. Mesin listrik yang berfungsi membangkitkan listrik biasanya terpusat dan lokasi antar pusat listrik berjauhan. Oleh karena itu listrik yang dibangkitkan akan disalurkan kepada konsumen melalui saluran transmisi dan saluran distribusi.

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 berbeda lokasi dan berletakan berjauhan. 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 merupakan tulang punggung dari sistem tenaga yang menghubungkan semua pusat-pusat pembangkit [3]. Sistem transmisi berfungsi sebagai wadah penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit sampai sistem distribusi melalui sebuah media hantar yakni konduktor. Konduktor yang digunakan juga berbeda-beda disesuaikan dengan kondisi lingkungan sistem transmisi. Listrik yang dialirkan pada sistem transmisi menggunakan tegangan dengan level tegangan yang tinggi. Hal ini bertujuan mengecilkan rugi-rugi akibat adanya *drop voltage*. Pada persamaan 2.1 dan 2.2 akan dijelaskan 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)

Ketika nilai tegangan dinaikkan dan nilai hambatan yang tetap maka diperoleh nilai arus yang semakin kecil. Nilai arus (I) yang diperoleh menjadi lebih kecil akan mempengaruhi nilai daya rugi rugi pada sistem transmisi. Rugi daya dapat dilihat pada persamaan 2.2

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

Dimana: P_{loss} = Rugi-rugi Daya (Watt)

I = Arus

R = hambatan

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

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 memutuskan 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 terjaga.

2.3 Gardu Induk

Gardu induk merupakan bagian yang sangat penting dalam penyaluran listrik dari pembangkit hingga dapat digunakan oleh konsumen. Gardu Induk yang terdiri dari peralatan-peralatan listrik yang digunakan untuk menjaga ketersediaan listrik tetap ada. Gardu induk dibagi menjadi 4 bagian besar yakni *switchyard* pada gardu pembangkitan, Gardu Induk Pelanggan, *switching station*, Gardu Induk Distribusi [4]. Gardu induk menjadi tempat pengukuran, pengawasan

serta pengaturan pengaman sistem tenaga listrik, Gardu induk menurut pemasangannya dibagi menjadi dua yakni gardu induk konvensional dan GIS (*Gas Insulated Station*).

2.3.1 Gardu Induk Konvensional

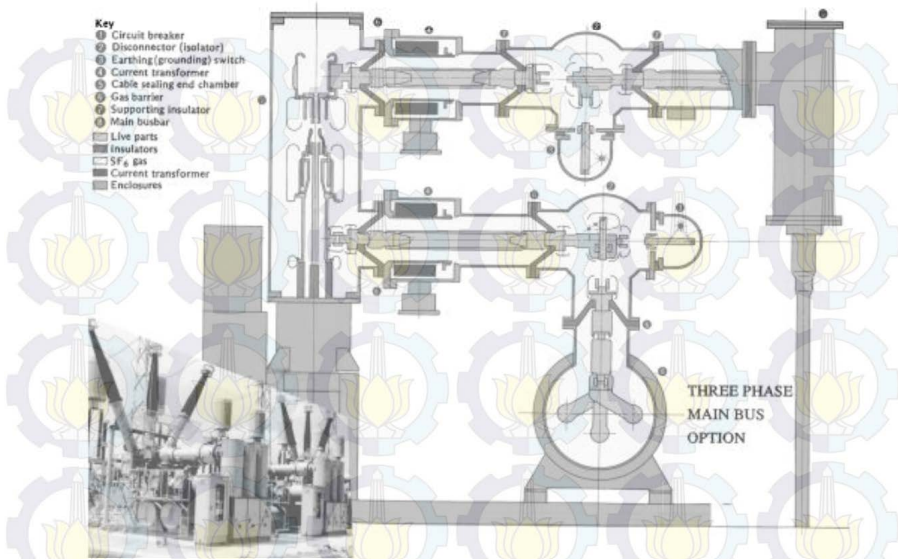
Gardu induk konvensional adalah gardu induk yang pemasangan peralatan-peralatannya berada di area terbuka dan membutuhkan area yang luas. Akan tetapi tidak keseluruhan peralatan diletakkan diluar melainkan ada di dalam ruangan seperti sistem proteksi, sistem kendali serta beberapa komponen lainnya. Kebanyakan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

2.3.2 Gas Insulated Station (GIS)

Gardu induk dengan pemasangan dalam atau GIS merupakan gardu induk yang hampir semua komponennya (*switchgear*, busbar, isolator, komponen pengaman, komponen kontrol, kubikel) berada didalam gedung kecuali untuk transformasi daya yang keseringan dijumpai berada di luar bangunan, GIS seperti gambar 2.3 kebanyakan digunakan pada pemukiman kota yang jumlah penduduknya banyak dan pemukiman padat. Hal tersebut sangat memungkinkan pemasangan dari *Gas Insulated Station* (GIS) yang membutuhkan area yang tidak terlalu luas.



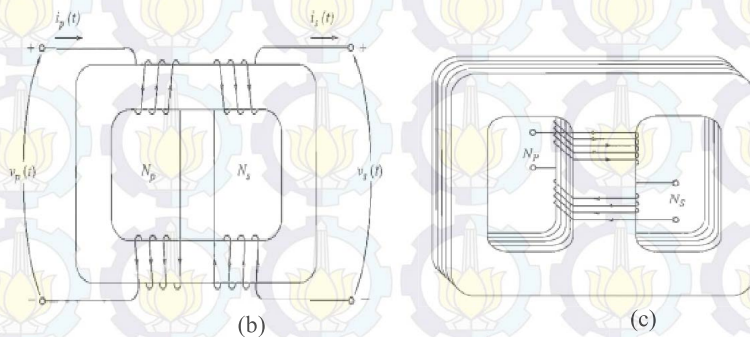
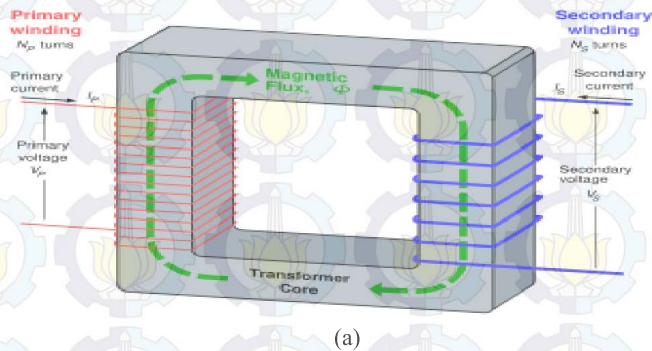
Gambar 2.3 Single Phase Enclosure GIS [4]

GIS Tandem yang berada di Surabaya bagian Utara merupakan salah satu contoh dari Gardu induk pemasangan dalam pada kota padat penduduk. Pada GIS tandem terjadi perubahan level tegangan dari level tegangan transmisi 150 kV menjadi level tegangan distribusi 20 kV. Penggunaan *Voltage Transformer* sebagai *metering* pada GIS Tandem dapat menimbulkan ferresonansi. Pemasangan VT pada GIS Tandem terdapat pada *indoor* yakni dengan rating 20000/100 V.

2.4 Transformator [5]

Transformator merupakan peralatan yang mengubah daya listrik ac dari suatu level tegangan ke level tegangan ac lain dengan frekuensi yang sama melalui sebuah medan magnet. Sebuah trafo terdiri dari 2 atau lebih belitan dan memiliki inti yang terbuat dari bahan yang bersifat feromagnetik. Belitan trafo pada umumnya terdiri dari belitan primer terhubung dengan sumber ac dan belitan sekunder yang terhubung dengan beban seperti Gambar 2.4a. Berdasarkan belitan inti trafo terdiri dari dua jenis yakni tipe inti dan tipe cangkang seperti gambar 2.4b dan 2.4c.

Penggunaan trafo dalam sistem tenaga listrik sangat vital karena digunakan pada setiap subsistem tenaga listrik seperti saluran transmisi, saluran distribusi dan pada gardu induk. Hal ini tidak terlepas dari fungsi trafo yang dapat memungkinkan pemilihan tegangan yang sesuai dengan keperluan tertentu. Contohnya adalah trafo dapat yang digunakan pada gardu induk untuk menaikkan tegangan sehingga dapat ditransmisikan untuk jarak yang cukup jauh. Selain penggunaan dalam sistem tenaga trafo juga digunakan dalam dunia elektronika untuk peralatan listrik rumah tangga.



Gambar 2.4. (a) Konstruksi Trafo (b) tipe inti (c) tipe cangkang

Penggunaan Trafo pengukuran seperti voltage transformer pada GIS Tandem sangat memungkinkan sistem mengalami feroresonansi yang ditimbulkan dari ketidaklinearan yang diperoleh dari inti trafo tegangan.

Jenis trafo yang digunakan pada GIS Tandem adalah buatan *Schneider* dengan tipe VRQ1n/S2 dimana merupakan tipe *voltage transformer* khusus penggunaan dalam.



Gambar 2.5 *Voltage Transformer* Pemasangan Dalam

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

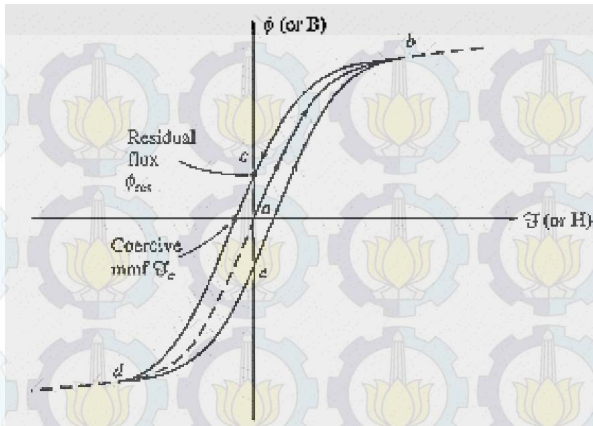
$d\phi$ = Perubahan garis-garis gaya magnet (Watt)

dt = Perubahan waktu (s)

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

2.4.2 Ketidaklinearan pada Inti Transformator

Fenomena histeresis pada trafo menunjukkan adanya ketidaklinearan pada inti transformator. Histeresis pada trafo biasanya digambarkan dalam bentuk kurva magnetisasi seperti pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Kurva Histerisis

Pada Gambar 2.5 jalur a-b merupakan kondisi awal dari trafo saat diberikan arus. Kerapatan fluks akan naik terus hingga mencapai titik saturasinya B_s . Pada saat arus turun nilai fluks akan turun tetapi tidak kembali mengikuti jalur awal melainkan melalui jalur *bed* 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 linear. Dan begitu juga sebaliknya apabila material inti trafo yang digunakan kurang baik maka kurva histeris akan cenderung semakin lebar.

BAB 3

FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

3.1 Resonansi

Resonansi listrik merupakan dasar yang digunakan untuk memahami peristiwa feroresonansi. Resonansi listrik adalah gejala kelistrikan yang terjadi pada suatu rangkaian arus bolak-balik yang mengandung elemen induktor (L), dan kapasitor (C) [6]. Resonansi ini dapat dijumpai pada sistem tenaga listrik di semua level tegangan sistem tenaga listrik. Resonansi terbagi menjadi dua tipe yakni resonansi seri dan resonansi paralel. Resonansi seri terjadi dalam rangkaian seri sedangkan resonansi paralel terjadi pada rangkaian paralel.

Resonansi seri merupakan rangkaian listrik dengan komponen induktor dan kapasitor yang tersusun seri ketika frekuensi sumber diubah-ubah, maka akan terjadi resonansi dimana nilai reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif.

$$X_L = X_C \quad (3.1)$$

Dimana: X_L = Reaktansi Induktif
 X_C = Reaktansi Kapasitif

Sehingga syarat untuk terjadinya sebuah resonansi adalah seperti persamaan berikut:

$$LC\omega_n^2 = 1 \quad (3.2)$$

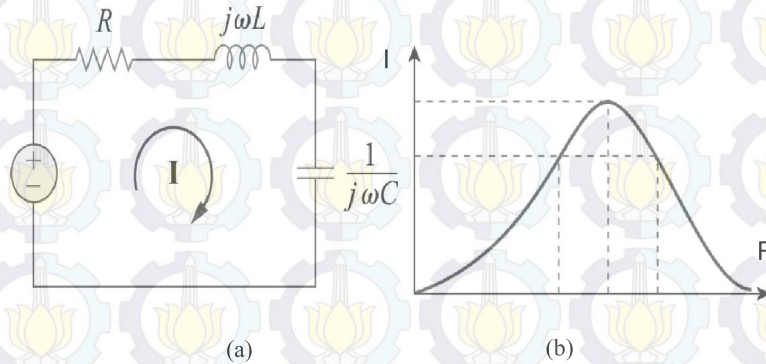
Dimana: L = induktor (Henry)
 C = kapasitor (Farad)
 ω_n = kecepatan sudut (Rad/s)

Sehingga ketika resonansi terjadi maka nilai impedansi rangkaian akan berubah dimana dalam persamaan ditulis:

$$Z = R + jX \quad (3.3)$$

Dimana: Z = Impedansi
 R = Resistansi
 X = Reaktansi

Sehingga ketika resonansi terjadi frekuensi sumber menjadi frekuensi resonansi maka nilai reaktansi akan menjadi nol. Nilai reaktansi sama dengan nol menyebabkan nilai impedansi mencapai nilai yang minimum. Ketika nilai impedansi menjadi minimum maka nilai arus (I) akan mencapai maksimum. Gambar rangkaian rangkaian resonansi seri dan kurva hasil simulasi resonansi dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Resonansi Seri. (a) rangkaian resonansi seri (b) Hubungan Arus dan Frekuensi resonansi [6]

3.2 Feroresonansi

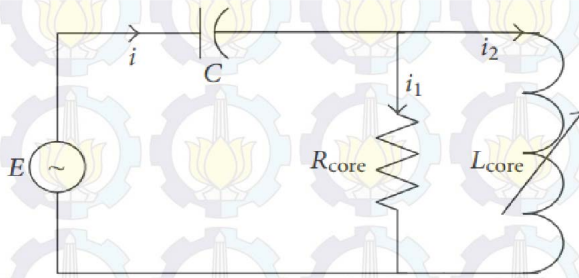
3.2.1 Pengertian Feroresonansi

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

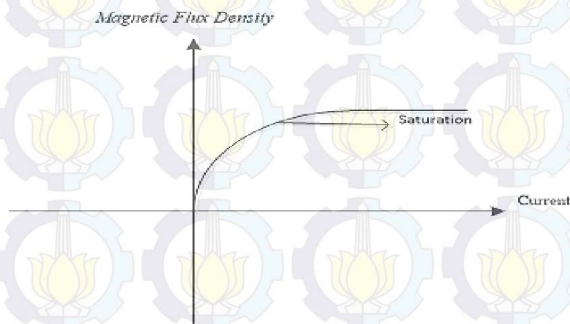
Feroresonansi muncul pertama kali pada tahun 1920. Istilah feroresonansi mengacu pada fenomena osilasi yang muncul pada sebuah rangkaian listrik yang mengandung elemen induktansi nonlinear, kapasitor dan sumber tegangan sinusoidal, dan rugi-rugi yang rendah. Induktansi nonlinear diperoleh dari penggunaan 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.

3.2.2 Timbulnya Feroresonansi

Rangkaian resonansi seri digunakan untuk lebih memudahkan memahami feroresonansi. Pada rangkaian resonansi penggunaan induktor diganti menjadi induktor nonlinear sebagai pemodelan dari inti trafo sehingga rangkaianannya berubah menjadi rangkaian feroresonansi. Sama halnya dengan resonansi yang terjadi pada rangkaian resonansi seri, rangkaian feroresonansi ketika mengalami resonansi, impedansi akan sangat kecil sehingga arus pada rangkaian akan naik. Arus yang naik menyebabkan rapat fluks juga akan naik mencapai titik saturasi dan tidak lagi menjadi linear. Ketika nilai arus yang naik pada inti trafo yang bersifat feromagnetik melalui titik saturasinya maka induktansi akan berubah sangat cepat (menjadi nonlinear). 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 nonlinear dapat dilihat pada Gambar 3.2. Kurva saturasi dari induktor nonlinear terdapat pada Gambar 3.3



Gambar 3.2 Rangkaian Pemodelan Feroresonansi



Gambar 3.3 Kurva Saturasi Induktor Nonlinear

Timbulnya feroresonansi pada sebuah sistem tenaga listrik harus memenuhi 3 hal penting yakni induktansi nonlinear, kapasitif dan sumber AC. Untuk elemen yang dapat menimbulkan induktansi nonlinear adalah bahan feromagnetik yang digunakan sebagai material inti trafo. Sehingga untuk fenomena feroresonansi trafo mendapatkan perhatian khusus. Hal tersebut dikarenakan induktansi nonlinear dihasilkan dari inti trafo yang dapat menyebabkan feroresonansi dapat terjadi.

3.2.3 Gejala-gejala Feroresonansi

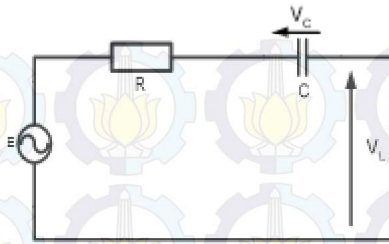
Feroresonansi pada sebuah sistem tenaga ditandai dengan munculnya lebih dari satu respon steady state pada parameter jaringan yang sama [7]. Respon yang berubah secara tiba-tiba dari suatu respon steady state normal, menjadi respon steady state feroresonansi (ditandai dengan level harmonisa dan *overvoltage* 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 :

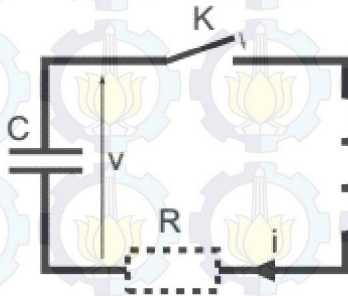
1. Penyimpangan yang besar untuk nilai tegangan lebih dan arus lebih (*High sustained overvoltage and overcurrent*).
2. Pemanasan berlebih dan suara bising pada transformator (*Transformer overheating and loud noise*).
3. Kerusakan peralatan listrik (*Electrical equipment damage*).

3.2.4 Pendekatan Fisik Feroresonansi[7]

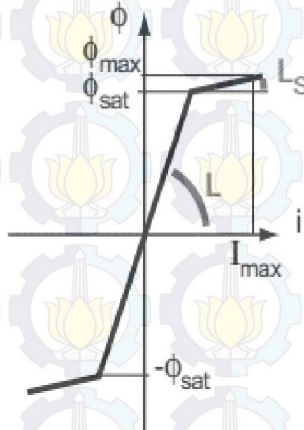
Rangkaian feroresonansi sederhana terdiri dari elemen kapasitor dan induktansi nonlinear. Elemen tersebut merupakan pemodelan dari sifat sifat kapasitif dan induktif yang diperoleh dari penggunaan peralatan listrik dalam sistem tenaga listrik. Nilai resistansi dari resistor dianggap sangat kecil. Seperti pada Gambar 3.4 yang menunjukkan karakteristik dasar feroresonansi



Gambar 3.4 Rangkaian Karakteristik Dasar Feroresonansi

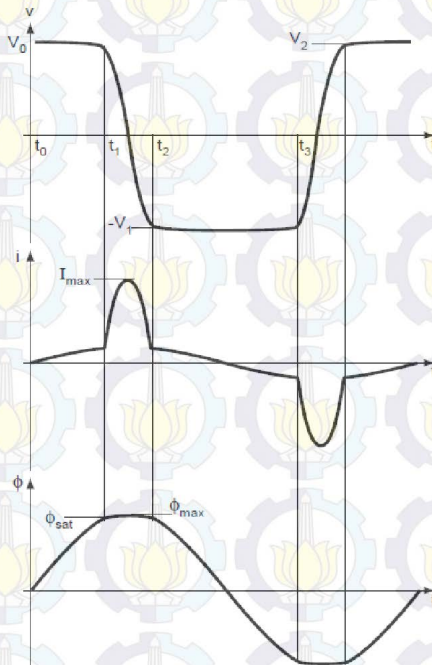


Gambar 3.5 Diagram Skematik Model Feroresonansi



Gambar 3.6 Hubungan fluks dan Arus

Bentuk gelombang yang merupakan tipikal dari feroresonansi terdapat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Osilasi pada Rangkaian Feroresonansi Seri.

Peristiwa osilasi pada rangkaian feroresonansi seri dijelaskan berdasarkan urutan waktu seperti berikut :

- Sesaat t_0 , saklar K ditutup maka arus I terbentuk, dan berosilasi pada bentuk getaran :

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

Fluks pada kumparan dan tegangan V pada terminal kapasitor dapat ditunjukkan dengan rumus :

$$\Phi = (V_0/\omega_1) \sin \omega_1 t ; v = V_0 \cos \omega_1 t \quad (3.5)$$

- Jika $V_0/\omega_1 > \Phi_{\text{sat}}$ pada akhir t_1 , fluks Φ mencapai saturasi menjadi Φ_{sat} dan tegangan V sama dengan V_1 . Nilai induktansi kumparan yang bersaturasi menjadi L_s . Dikarenakan L_s sangat kecil jika dibandingkan dengan L , kapasitor akan discharge secara mendadak melewati kumparan dalam bentuk osilasi getaran :

$$\omega_2 = 1/\sqrt{L_s C} \quad (3.6)$$

Arus dan fluks mencapai puncak ketika energi elektromagnetik tersimpan pada kumparan, ekuivalen dengan energi elektrostatik $\frac{1}{2}CV_1^2$, tersimpan pada kapasitor.

- Saat t_2 , fluks kembali menjadi Φ_{sat} , induktansi diasumsikan dengan nilai L dan, karena rugi-rugi diabaikan, tegangan diasumsikan v , dimana tegangan tersebut terbalik, sehingga bernilai $-V_1$.
- Pada saat t_3 , fluks mencapai $-\Phi_{\text{sat}}$ dan tegangan bernilai $-V_2$. Pada kenyataanya ω_1 sangat kecil, sehingga dapat diasumsikan bahwa $V_2 \approx V_1 \approx V_0$.

Periode T dari osilasi berpengaruh terhadap $2\pi\sqrt{LC}$ pada kondisi tidak bersaturasi, dan $2\pi\sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2)$ pada kondisi saturasi (dimana $t_3 - t_2 \approx 2\Phi_{\text{sat}}/V_0$).

Persamaan frekuensi yang sesuai dengan kondisi ini adalah:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \quad (3.7)$$

Frekuensi inisial ini bergantung pada Φ_{sat} pada keadaan ketidaklinearan dan kondisi inisial tegangan V_0 . Pada kenyataan, karena rugi-rugi I^2R pada resistor R, amplitude dari tegangan V akan menurun ($V_2 < V_1 < V_0$). Hal tersebut dikarenakan terdapat perbedaan fluks $\Delta\Phi$

selama periode non-saturasi ($t_3 - t_2$) dan $\Delta\Phi = 2\Phi_{\text{sat}} = \int_{t_2}^{t_3} v dt$, penurunan tegangan berakibat pada pengurangan frekuensi.

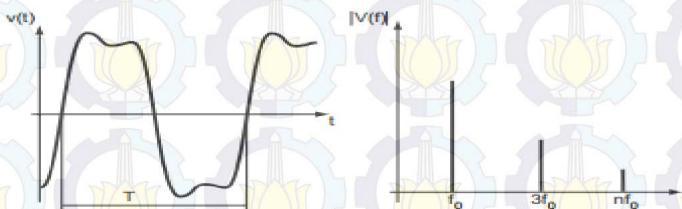
Jika energi dari rugi-rugi disuplai oleh sumber tegangan pada sistem, frekuensi osilasi dapat terkunci pada frekuensi dari sumber (dengan syarat frekuensi awal lebih besar dari frekuensi daya) atau bahkan pada frekuensi sub-multiple dari frekuensi sumber (jika frekuensi awal lebih kecil dari frekuensi daya). Hal ini memperlihatkan bahwa tidak seperti frekuensi linier, dengan nilai induktansi tertentu, resonansi dapat terjadi tidak lagi untuk nilai C tertentu, namun untuk nilai C dengan rentang yang lebar.

3.2.5 Klasifikasi Feroresonansi[7]

Berdasarkan pengalaman dilapangan mengenai feroresonansi dan pola bentuk gelombang yang terjadi di sistem tenaga, percobaan dengan rangkaian yang sudah direduksi serta simulasi numerik maka feroresonansi dapat dibedakan menjadi 4 tipe. Keempat tipe tersebut adalah:

1. Fundamental mode

Fundamental mode adalah tipe dari feroresonansi yang tegangan dan arus memiliki periode yang sama dengan periode sistem dan terdiri dari beberapa macam harmonisa. Sinyal spectrum adalah *discontinuous spectrum* yang terdiri dari frekuensi sistem (f_0) dan frekuensi harmonisa ($2f_0, 3f_0, \dots$).

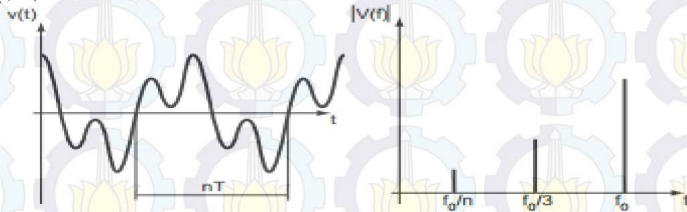


Gambar 3.8 Fundamental Mode [7]

2. Subharmonic mode

Pada subharmonic mode, sinyal output memiliki periode nT yang merupakan kelipatan periode sumber. Untuk nilai kelipatan biasanya adalah kelipatan ganjil. Kondisi ini disebut dengan subharmonic n atau harmonic $1/n$. Dengan kondisi demikian didapatkan persamaan

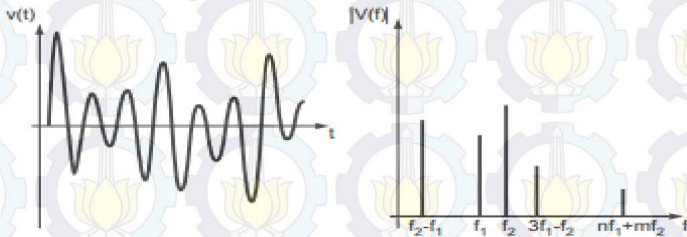
fundamental f_0/n (dimana f_0 merupakan frekuensi sumber dan n adalah integer).



Gambar 3.9 Subharmonik Mode [7]

3. Quasi-periodik mode

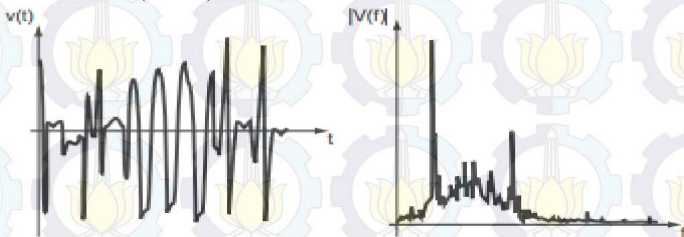
Quasi-periodik juga dikenal dengan istilah pseudo-periodic dimana sinyal keluaranya tidak periodic. Untuk spektrumnya adalah discontinuous dengan frekuensinya $nf_1 + mf_2$. Nilai n dan m merupakan integer dan f_1/f_2 merupakan nilai riil irasional.



Gambar 3.10 Quasi-Periodik Mode [7]

4. Chaotic mode

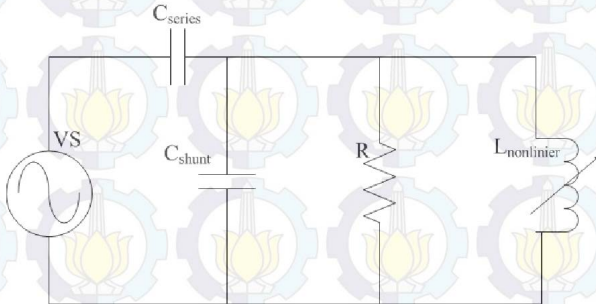
Spectrum pada *chaotic mode* berkelanjutan dan tidak diinterupsi oleh frekuensi apapun sehingga spektrumnya menghasilkan sebuah ketidakteraturan (chaos).



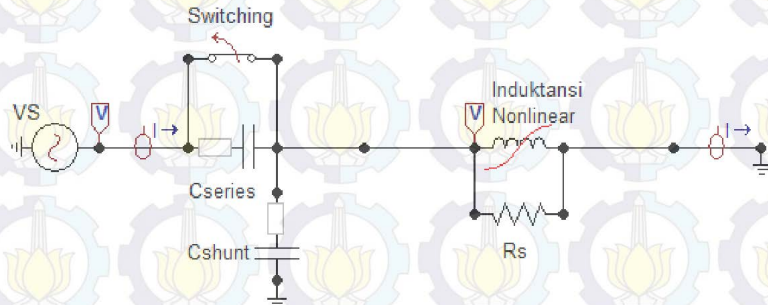
Gambar 3.11 Chaotic Mode [7]

3.2.6 Simulasi Ferroresonansi

Ferroresonansi pada sistem tenaga dapat dipahami menggunakan sebuah model simulasi. Pada Gambar 3.12 merupakan rangkaian reduksi dari sebuah substation.



Gambar 3.12 Rangkaian Ekuivalen Ferroresonansi Reduksi [9]



Gambar 3.13 Simulasi Rangkaian Ferroresonansi menggunakan ATP Draw [8]

Pemodelan rangkaian ferroresonansi menggunakan Software ATP Draw seperti pada Gambar 3.13 terdiri dari elemen yang dapat menimbulkan ferroresonansi. Trafo dimodelkan sebagai rangkaian induktansi nonlinear yang dipararel dengan resistor sebagai rugi-rugi trafo. Kapasitor pada model rangkaian merupakan pemodelan dari *switching* dan kapasitif yang diperoleh dari saluran kabel transmisi dan distribusi.

3.2.7 Mitigasi Feroresonansi [8]

Feroresonansi dalam sistem tenaga listrik apabila terjadi akan membahayakan bagi sistem, operator ataupun peralatan-peralatan listrik. Oleh karena hal itu maka feroresonansi harus dapat diredam atau diatasi. Beberapa cara untuk meredam feroresonansi adalah sebagai berikut:

1. Memperbaiki kondisi ketidakseimbangan tegangan
2. mengubah desain dari trafo
3. Memasang *damping reactor*
4. *Detuning* rangkaian

1. Memperbaiki Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan dapat diperbaiki dengan mengubah prosedur operasi atau menambahkan rele untuk *sensing* dan menghilangkan kondisi tidak seimbang yang dapat memicu feroresonansi.

2. Mengubah Desain dari Magnetik Trafo

Kemajuan teknologi memungkinkan peningkatan dari desain material inti trafo. Desain inti trafo memungkinkan trafo dapat memiliki level rating fluks yang lebih tinggi, dan dapat menahan arus eksitasi yang tinggi. Kurva magnetisasi dari trafo dengan inti yang lebih baik memungkinkan memiliki titik saturasi yang jauh lebih lama untuk mencapai titik saturasi jika dibandingkan dari trafo yang lain.

3. Memasang *Damping Reaktor*

Damping reaktor yang dipasang pada trafo dapat berupa elemen resistor atau induktor. Untuk pemasangan *damping* juga dapat diletakkan pada sisi primer maupun sekunder trafo.

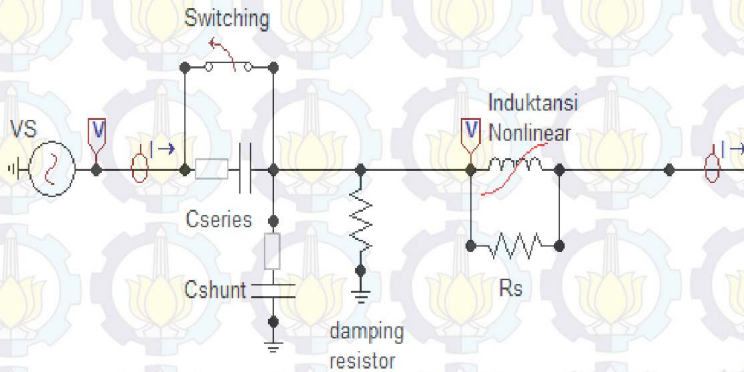
4. *Detuning* Rangkaian Feroresonansi

Rangkaian feroresonansi ada kondisi dimana feroresonansi tidak dapat diredam. Oleh karena itu rangkaian feroresonansi diubah dengan menambahkan beberapa kompones sehingga feroresonansi taid dapat diredam.

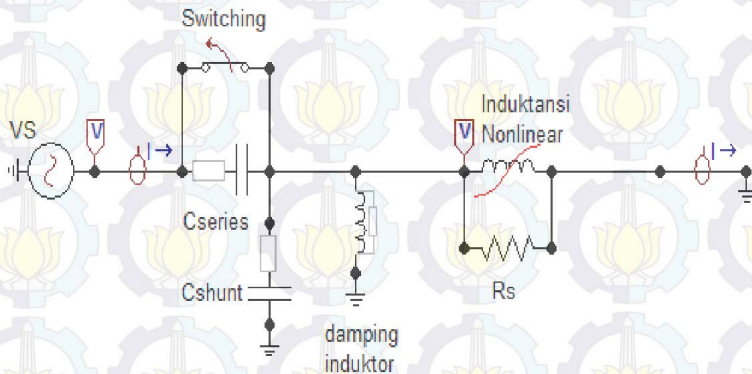
3.2.7.1 Mitigasi Feroresonansi dengan Pemasangan *Damping* [9]

Pada studi ini dari beberapa cara mitigasi feroresonansi, yang digunakan adalah teknik mitigasi dengan pemasangan *damping reaktor*. Penggunaan *damping reaktor* dalam studi ini adalah dengan cara

menyisipkan atau memasang damping berupa resistor ataupun induktor. Seperti pada Gambar 3.14 dan 3.15 merupakan cara untuk mitigasi dari feroresonansi dengan memasang elemen resistor dan induktor.



Gambar 3.14 Mitigasi Feroresonansi dengan Memasang Resistor Shunt

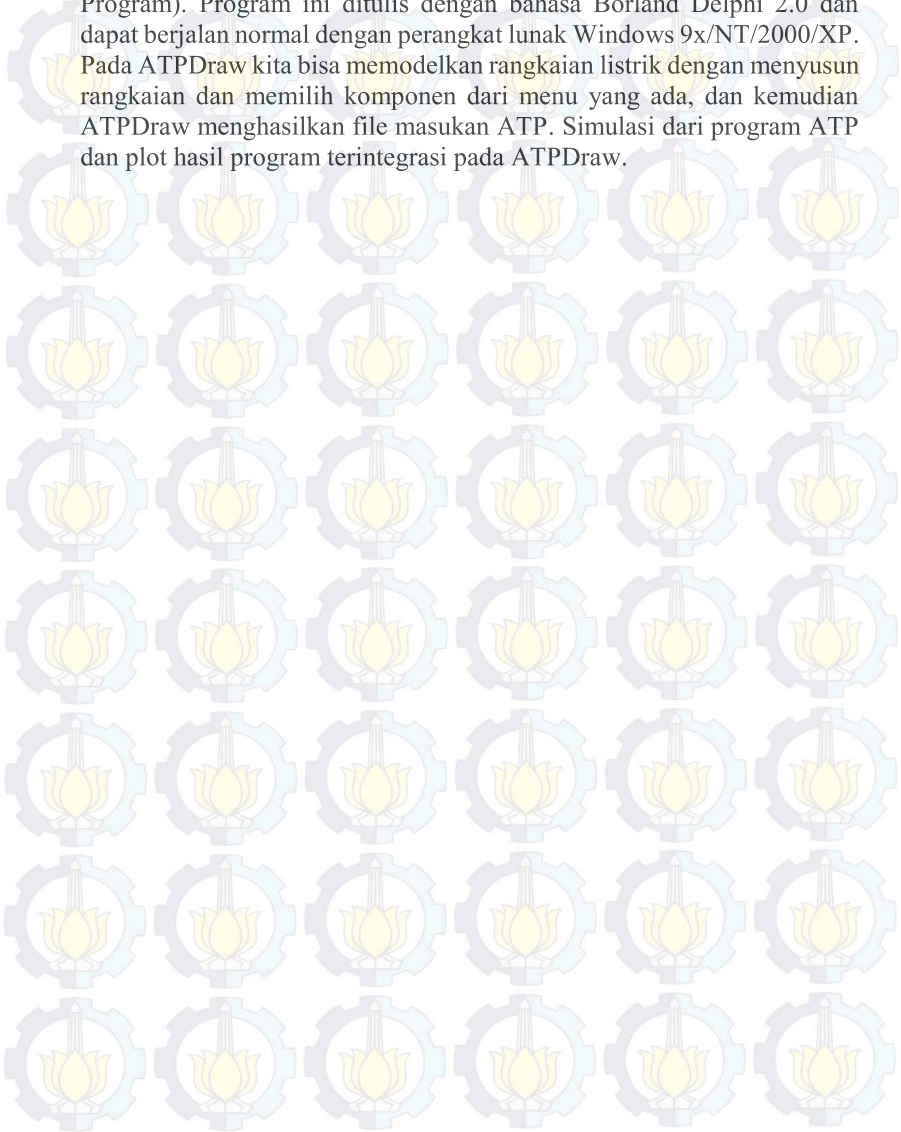


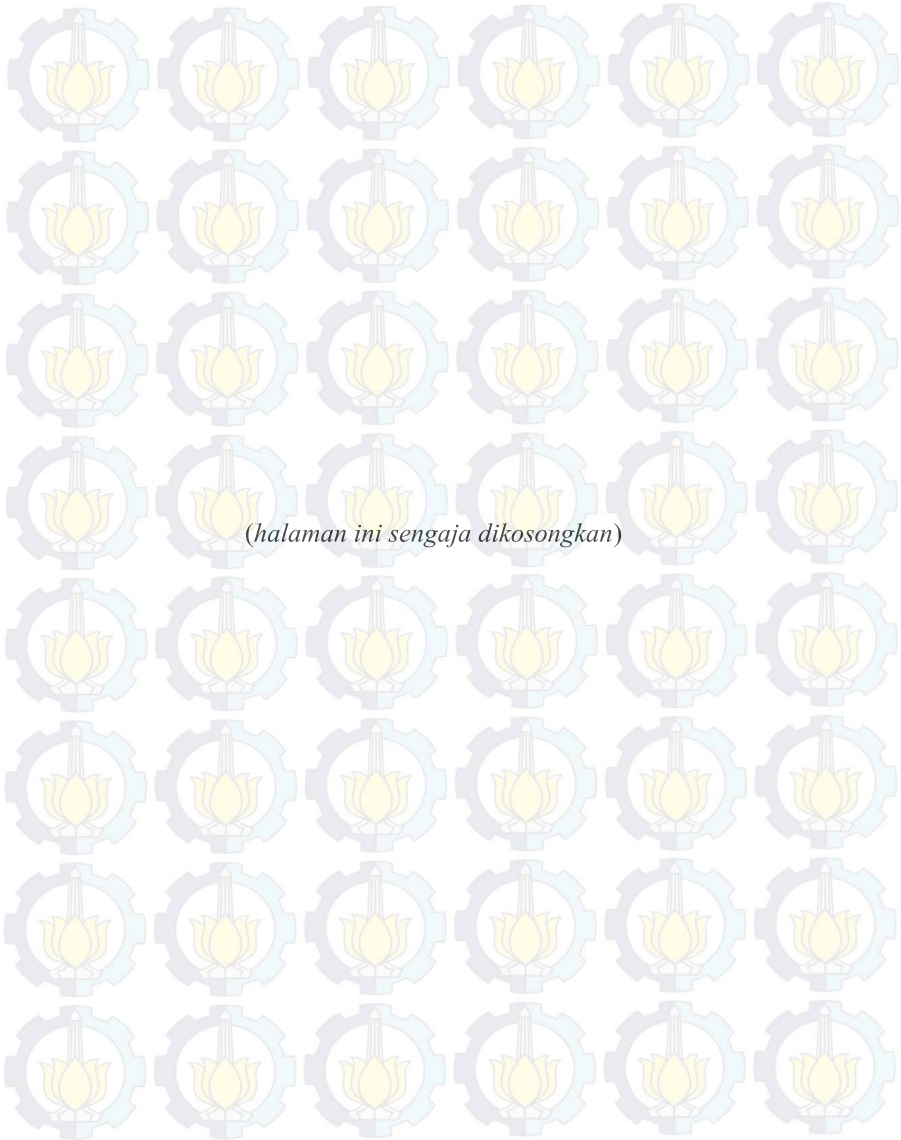
Gambar 3.15 Mitigasi Feroresonansi dengan Memasang Induktor

3.3 ATP/EMTP Draw [10]

Alternative Transient Program (ATP) merupakan program yang paling luas pemakaiannya untuk melakukan simulasi digital mengenai peristiwa transien. Dengan program ini rangkaian kompleks dan sistem kontrol dengan kondisi yang berubah-ubah dapat disimulasikan. ATP

merupakan software alternative dari EMTP (Electromagnetic Transient Program). Program ini ditulis dengan bahasa Borland Delphi 2.0 dan dapat berjalan normal dengan perangkat lunak Windows 9x/NT/2000/XP. Pada ATPDraw kita bisa memodelkan rangkaian listrik dengan menyusun rangkaian dan memilih komponen dari menu yang ada, dan kemudian ATPDraw menghasilkan file masukan ATP. Simulasi dari program ATP dan plot hasil program terintegrasi pada ATPDraw.





BAB 4

ANALISIS HASIL SIMULASI MITIGASI FERORESONANSI MENGGUNAKAN DAMPING REAKTOR

4.1. Feroresonansi pada Gardu Induk

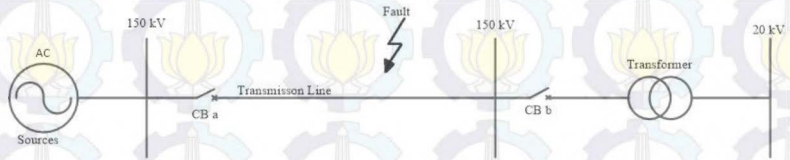
Pada sebuah sistem tenaga, feroresonansi dapat saja terjadi tanpa ada sebab akibat yang jelas mengapa dapat terjadi dan juga tidak dapat diprediksikan. Oleh karena hal tersebut perlu dilakukan simulasi untuk mengetahui apakah gejala-gejala yang menyebabkan feroresonansi pada sistem berada pada ambang aman atau tidak.

Pada studi ini simulasi dilakukan dengan membuat sebuah model rangkaian feroresonansi ketika sebuah *circuit breaker* bekerja saat ada gangguan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pemodelan yang digunakan seperti pada Gambar 4.1, direduksi menjadi sebuah rangkaian ekuivalen feroresonansi seperti pada Gambar 4.2 dimana terdapat elemen Cseries, Cshunt, nilai resistansi (R) dan Induktansi Nonlinear. Cseries merupakan nilai kapasitif yang timbul akibat pemutusan beban oleh *switching* sedangkan Cshunt diperoleh dari nilai kapasitif yang didapatkan dari nilai kapasitif saluran transmisi dan distribusi, penggunaan *capasitor banks* serta penggunaan alat pengukuran seperti *Voltage Transformer*. Pada GIS Tandes VT yang digunakan merupakan VT dengan rating 22000:100 buatan *schneider electric* type VRQ1n/S2 .

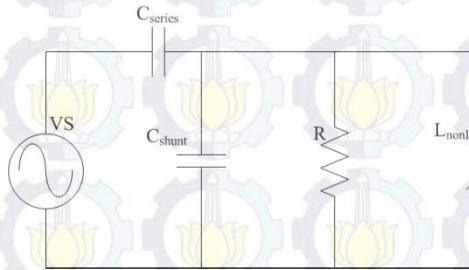
Penggunaan elemen resistor pada rangkaian reduksi merupakan pemodelan terhadap rugi-rugi pada inti trafo dan untuk elemen induktor nonlinear merupakan sebuah pemodelan terhadap induktansi nonlinear yang terdapat pada inti trafo. Berdasarkan keterangan pada rangkaian reduksi pada Gambar 4.2 maka dibuat rangkaian simulasi feroresonansi dengan menggunakan ATP dan rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.3.

Pada studi ini untuk memunculkan feroresonansi pada rangkaian simulasi adalah dengan mengubah nilai dari Cseries dan Cshunt. Tujuan mengubah nilai kapasitif tersebut adalah untuk menyelidiki efek dari nilai-nilai kapasitif dalam substation yang dapat memunculkan feroresonansi. Pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi terdiri dari tegangan sumber arus bolak-balik (AC) dengan tegangan sumber puncak 26.94 KV, 50 Hz. *Switching* dengan waktu yang diatur sebesar 0.25 sekon ketika terjadi gangguan. Untuk pemodelan dari trafo sendiri

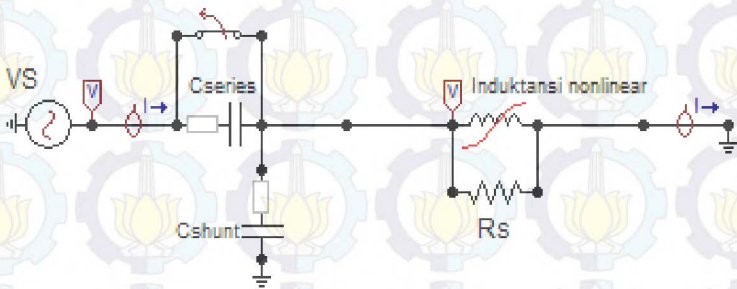
menggunakan induktansi nonlinear tipe 93 sebagai model dari inti trafo dan R_s sebagai rugi-rugi trafo.



Gambar 4.1 Single Line Diagram Sistem Transmisi 150 kV



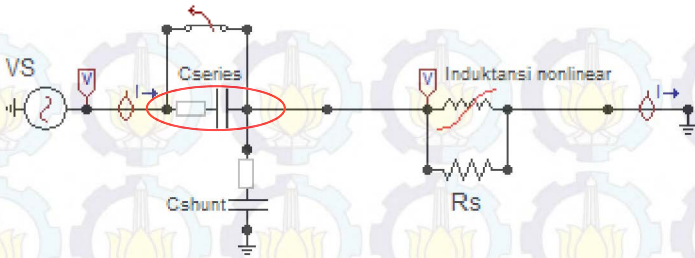
Gambar 4.2 Rangkaian Ekuivalen Feroresonansi Reduksi



Gambar 4.3 Rangkaian Simulasi Feroresonansi

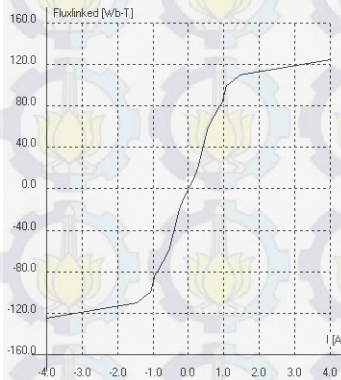
4.1.1 Feroresonansi dengan Mengubah Parameter C_{series}

Pada simulasi rangkaian dengan mengubah nilai C_{series} akan didapatkan rentang nilai kapasitif yang dapat menimbulkan feroresonansi. C_{series} pada rangkaian simulasi adalah nilai kapasitif yang timbul akibat adanya pemutusan daya oleh *circuit breaker* dan pada simulasi ini nilai tersebut diperhitungkan. Rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Rangkaian Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cseries

Pada simulasi ini nilai Cseries pada rangkaian simulasi akan diubah dengan rentang 0.001 μF - 100 μF . *Switch* akan dibuka pada $t = 0.25\text{s}$, rugi-rugi pada trafo sebesar 16,9 $\text{M}\Omega$. Cshunt akan dibuat dengan nilai yang tetap sebesar 97.4 pF. Tegangan puncak yang digunakan adalah 26.94 KV dengan frekuensi sebesar 50 Hz. Untuk parameter induktansi nonlinear dapat dilihat pada Gambar 4.5.



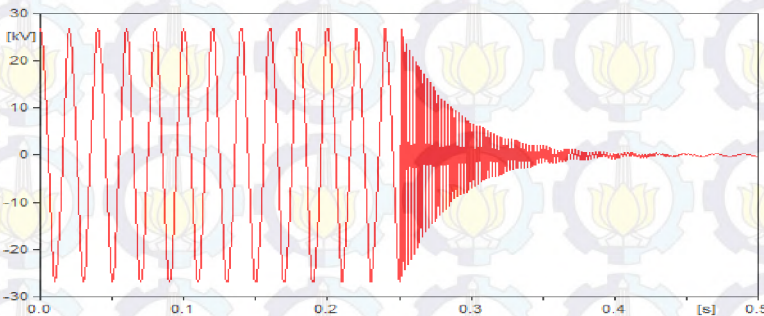
Gambar 4.5 Kurva Magnetisasi Induktansi Nonlinear

Hasil simulasi rangkaian feroresonansi dengan memvariasikan nilai Cseries, dapat dilihat pada Tabel 4.1. Pada Tabel 4.1 nilai dari tegangan dan arus disimpan saat sebelum dan sesudah dilakukan *switching*. Berdasarkan nilai dari arus dan tegangan puncak sebelum dan sesudah *switching* dapat ditentukan apakah sistem mengalami feroresonansi atau tidak dan pada nilai kapasitif feroresonansi terjadi.

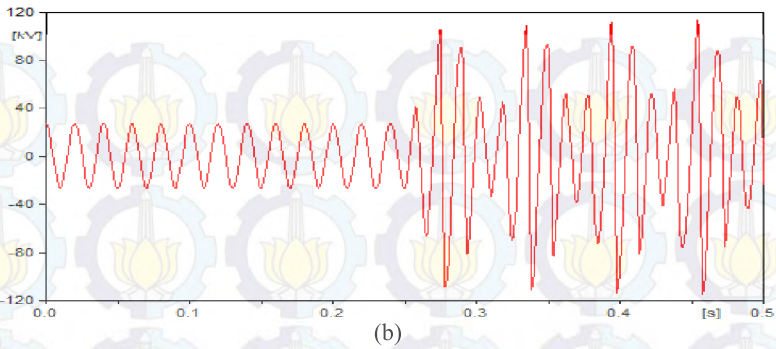
Tabel 4.1 Efek Perubahan Nilai Cseries

Cseries (μF)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak (A)		Frekuensi		Fero resonansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
0.001	26.94	26.6	0.96	0.08	50	50	Tidak
0.01	26.94	30.9	0.96	0.36	50	50	Tidak
0.1	26.94	112.5	0.96	15.4	50	50	Ya
1	26.94	35.7	0.96	3.72	50	50	Ya
10	26.94	27.1	0.96	0.97	50	50	Tidak
100	26.94	26.9	0.96	0.97	50	50	Tidak

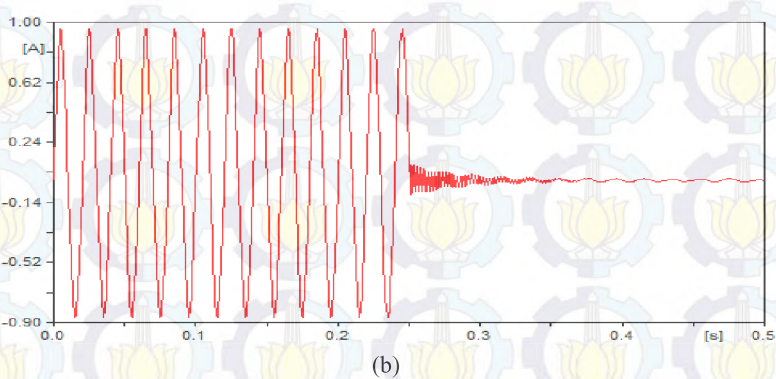
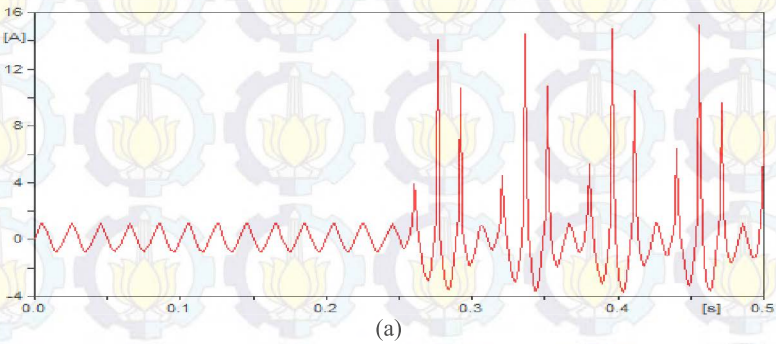
Gambar 4.6a merupakan respon tegangan yang diperoleh dari hasil simulasi pada saat tidak terjadi feroresonansi dengan nilai Cseries sebesar $0.001 \mu\text{F}$. Sedangkan untuk Gambar 4.6b merupakan respon tegangan saat terjadi feroresonansi dengan pemasangan Cseries sebesar $0.1 \mu\text{F}$. Gambar 4.7a dan 4.7b merupakan respon arus hasil dari simulasi. Feroresonansi pada simulasi ini cenderung tergolong dalam tipe *fundamental mode*. *Overcurrent* dan *overvoltage* terjadi diakibatkan arus yang timbul saat adanya interaksi antara reaktansi kapasitif dan reaktansi induktif dari induktor nonlinear telah melampaui titik saturasi inti trafo. Dalam hal ini inti trafo memunculkan induktansi nonlinear.



(a)



Gambar 4.6 Respon Tegangan saat (a) Tidak terjadi Feroresonansi (b) Terjadi Feroresonansi dengan Mengubah Cseries

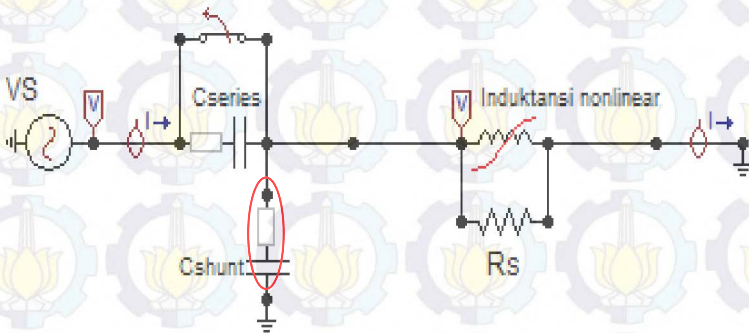


Gambar 4.7 Respon Arus saat (a) Tidak terjadi Feroresonansi (b) Terjadi Feroresonansi dengan Mengubah Cseries

4.1.2 Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cshunt

Simulasi rangkaian dengan memvariasikan nilai Cshunt digunakan untuk mendapatkan rentang nilai cshunt yang dapat menimbulkan feroresonansi. Cshunt dalam rangkaian simulasi ini adalah perwujudan nilai-nilai kapasitif yang diperoleh dari saluran transmisi dan distribusi, penggunaan kapasitor bank pada sistem serta penggunaan alat ukur seperti CVT.

Pada simulasi ini nilai Cseries pada rangkaian simulasi akan dibuat dengan nilai tetap yakni 50 pF. *Switch* akan dibuka pada $t = 0.25s$, rugi-rugi pada trafo sebesar 16,9 M Ω . Cshunt akan dibuat bervariasi dengan rentang nilai 0.001 μF – 100 μF sebesar 97.4 pF. Tegangan puncak yang digunakan adalah 26.94 KV dengan frekuensi sebesar 50 Hz. Sehingga rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.8.



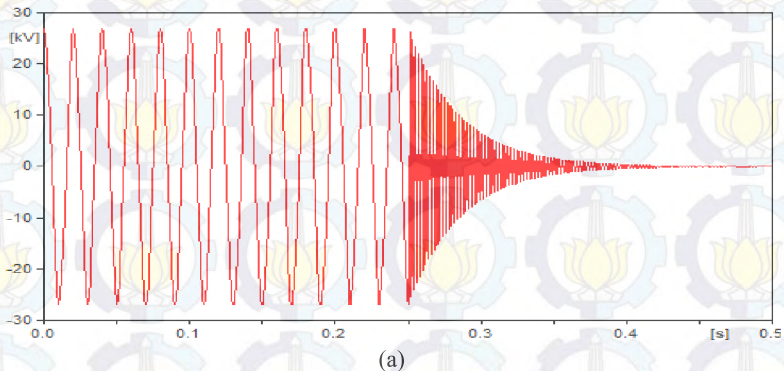
Gambar 4.8 Rangkaian Feroresonansi dengan Mengubah Parameter Cshunt

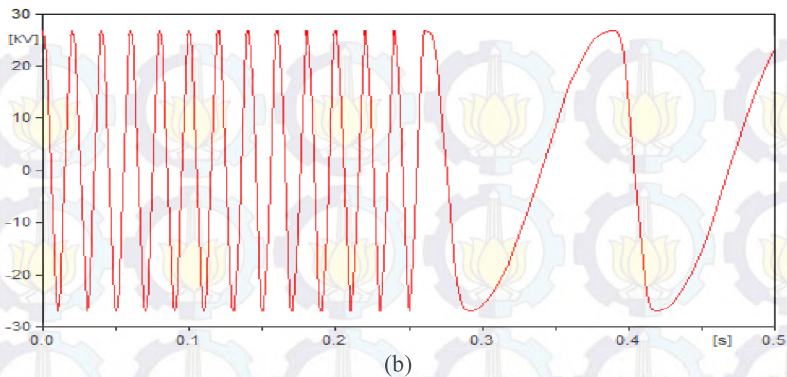
Hasil dari simulasi pada rangkaian dengan memvariasikan nilai Cshunt, maka dapat diperoleh hasil pada Tabel 4.2. Pada Tabel 4.2 nilai dari tegangan dan arus saat sebelum dan sesudah dilakukan *switching*. Berdasarkan nilai dari arus dan tegangan puncak sebelum dan sesudah *switching* dapat ditentukan apakah sistem mengalami feroresonansi atau tidak dan pada nilai kapasitif feroresonansi terjadi.

Tabel 4.2 Efek Perubahan Cshunt

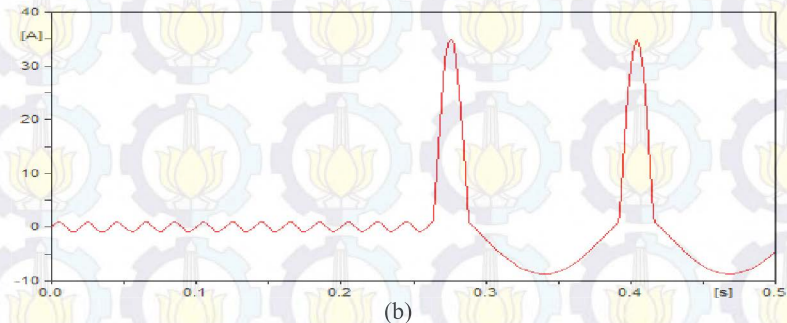
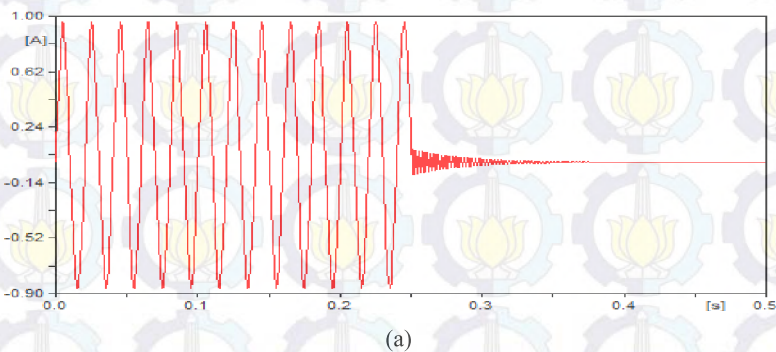
Cshunt (μF)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak (A)		Frekuensi (Hz)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
0.001	26.94	26.18	0.96	0.085	50	50	Tidak
0.01	26.94	26.68	0.96	0.272	50	50	Tidak
0.1	26.94	26.38	0.96	0.893	50	50	Tidak
1	26.94	26.39	0.96	10.15	50	20	Ya
10	26.94	26.96	0.96	34.8	50	10	Ya
100	26.94	26.96	0.96	-27.6	50	5	Ya

Pada Gambar 4.9 dengan nilai Cshunt sebesar $0.001 \mu\text{F}$ tidak terjadi feroresonansi dan pada Gambar 4.10 dengan nilai Cshunt sebesar $10 \mu\text{F}$ terjadi feroresonansi. Pada rangkaian dengan mengubah Cshunt, nilai tegangan tidak berubah jauh melainkan terjadinya perbedaan frekuensi setelah switching dengan frekuensi sumber. Semakin besar nilai kapasitor maka akan semakin besar periode untuk satu gelombang. Dengan demikian frekuensi setelah proses *switching* akan semakin kecil. Untuk nilai arus, terjadi *overcurrent* dengan nilai sebesar 34.8 A. terjadi peningkatan arus yang sangat besar.





Gambar 4.9 Respon Tegangan saat (a) Tidak terjadi Feroresonansi (b) Terjadi Feroresonansi dengan Mengubah Cshunt



Gambar 4.10 Respon Arus saat (a) Tidak terjadi Feroresonansi (b) Terjadi Feroresonansi dengan Mengubah Cshunt

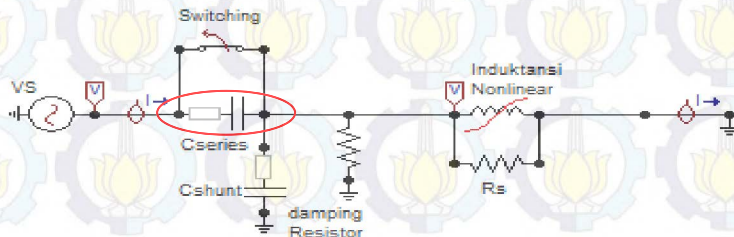
4.2 Mitigasi Feroresonansi pada Gardu Induk

4.2.1 Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries

Salah satu cara yang digunakan untuk dapat meredam feroresonansi adalah dengan pemasangan damping reaktor pada sisi primer dari trafo. Nilai resistor dan nilai induktor sebagai damping dalam simulasi diubah-ubah rentang nilainya sehingga diperoleh hasil berupa respon arus dan respon tegangan yang tidak menunjukkan feroresonansi.

4.2.1.1 Mitigasi Feroresonansi menggunakan Resistor

Rangkaian simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan damping berupa elemen resistor dapat dilihat pada Gambar 4.11.



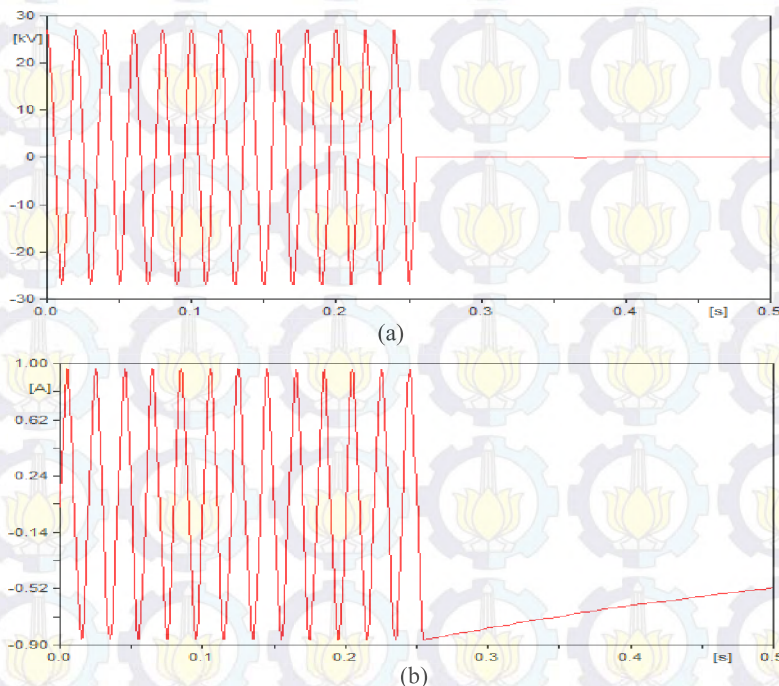
Gambar 4.11 Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries dengan pemasangan Damping Resistor

Pada Gambar 4.11 rangkaian simulasi tersebut merupakan rangkaian yang memunculkan feroresonansi dengan nilai Cseries yang digunakan sebesar $0.1\mu\text{F}$. Untuk meredam feroresonansi tersebut dipasang elemen resistor yang memiliki nilai yang tepat untuk dapat meredam feroresonansi tersebut. Pada Tabel 4.3 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan elemen resistor.

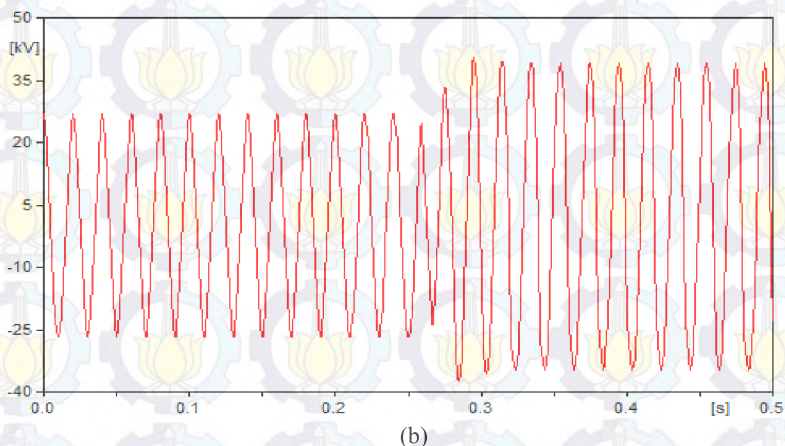
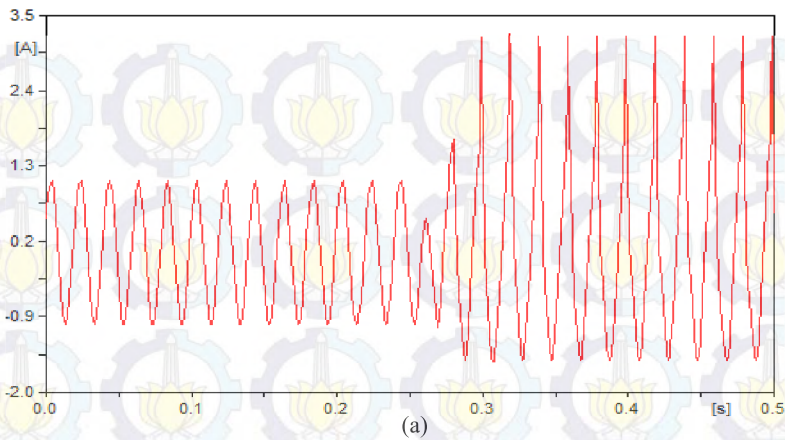
Tabel 4.3 Efek pemasangan Damping Resistor Mengatasi Feroresonansi Akibat Cseries yang divariasikan

Nilai Resistor (Ω)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak Trafo (A)		Ferores onansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
50000	26.94	40	0.96	3.2	Ya
100	26.94	0	0.96	0	Tidak
1	26.94	0	0.96	0	Tidak

Berdasarkan Tabel 4.3 diperoleh bahwa nilai Resistor yang digunakan dengan nilai kecil dapat meredam feroresonansi akan tetapi dengan pemasangan nilai R yang sangat besar maka dapat memunculkan feroresonansi. Pada Gambar 4.12 merupakan simulasi rangkaian mitigasi feroresonansi dengan damping resistor sebesar 100Ω dan dapat meredam feroresonansi. Respon arus dan tegangan yang diperoleh dari Gambar 4.12 menunjukkan bahwa feroresonansi tidak terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa arus yang mengalir menuju trafo ketika *switch* bekerja dapat meredam feroresonansi dengan pemasangan resistor pada rangkaian. Hal tersebut dikarenakan arus akan mengalir menuju titik dengan impedansi yang lebih rendah. Respon arus pada Gambar 4.12 (b) akan naik menjadi 0 A dan membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan respon tegangannya. Hasil simulasi rangkaian feroresonansi berupa grafik yang berisikan respon arus dan respon tegangan yang dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries menggunakan Damping Resistor sebesar 100Ω

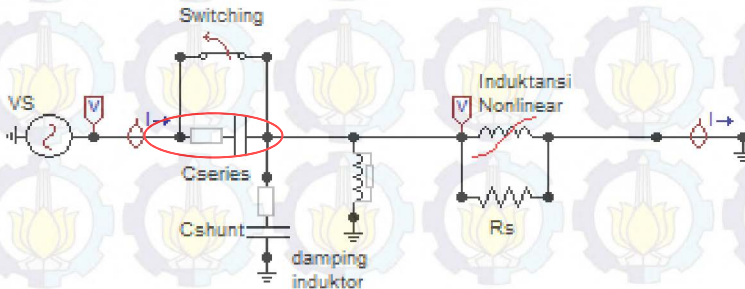


Gambar 4.13 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries menggunakan Damping Resistor sebesar 50 k Ω

Penggunaan damping reaktor dengan nilai R yang besar tidak cocok dan sesuai untuk meredam feroresonansi pada rangkaian simulasi seperti Gambar 4.13 Nilai R sebesar 50 k Ω yang dipasang pada rangkaian sebagai peredam, tidak meredam melainkan menimbulkan feroresonansi.

4.2.1.2 Mitigasi Feroresonansi menggunakan Induktor

Selain penggunaan elemen resistor sebagai damping dapat digunakan juga elemen induktor. Pada Gambar 4.13 menunjukkan rangkaian simulasi yang mengalami feroresonansi dan diredam menggunakan induktor sebagai damping.



Gambar 4.14 Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cseries dengan memasang Damping Induktor

Pada Gambar 4.14 rangkaian, feroresonansi muncul diakibatkan pemasangan Cseries sebesar $0.1 \mu\text{F}$. Feroresonansi yang timbul dimitigasi dengan memasang elemen induktor pada sisi primer trafo. Hasil simulasi dari rangkaian feroresonansi yang dimitigasi menggunakan elemen induktor dapat dilihat dalam Tabel 4.4.

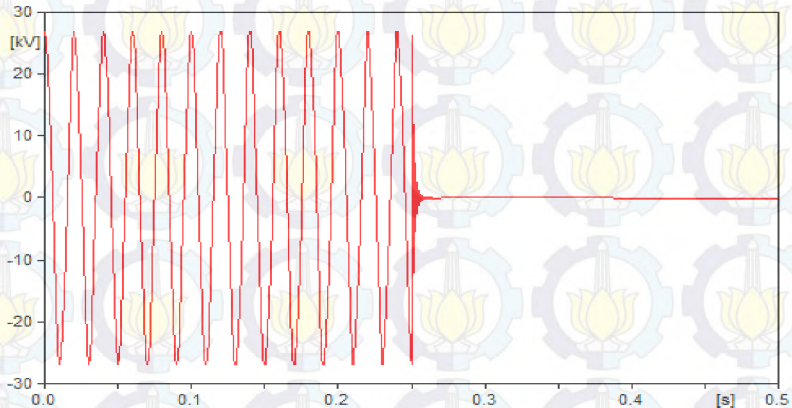
Tabel 4.4 Efek Pemasangan Damping Induktor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cseries yang divariasikan

Nilai Induktor (mH)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak Trafo (A)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
1000000	26.94	101.7	0.96	13.73	Ya
1000	26.94	27.4	0.96	0.14	Tidak
10	26.94	0.04	0.96	0	Tidak
1	26.94	0	0.96	0	Tidak

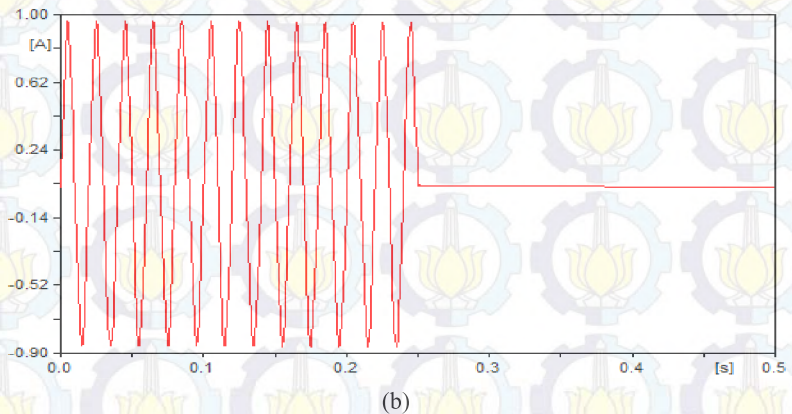
Pada Tabel 4.4, penggunaan induktor dengan nilai yang sangat tinggi tidak bekerja dengan baik sebagai damping. Tetapi ketika nilai

induktor yang dipasang pada rangkaian dibuat kecil maka feroresonansi dapat diredam.

Pemasangan damping reaktor menggunakan elemen induktor sebesar 10 mH dapat meredam feroresonansi yang terjadi pada rangkaian simulasi. Hasil simulasi rangkaian feroresonansi dengan penggunaan induktor sebesar 10 mH dapat dilihat pada Gambar 4.15. Hasil simulasi berupa grafik yang berisikan respon arus dan respon tegangan.



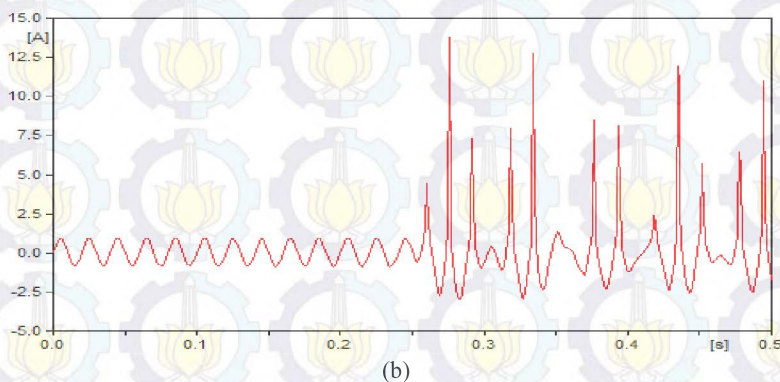
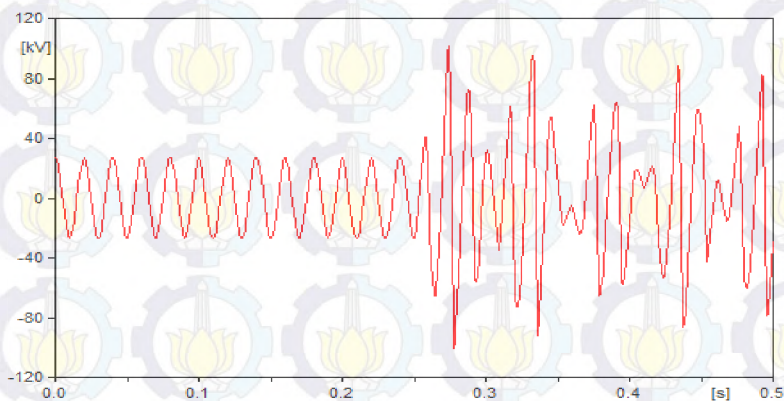
(a)



(b)

Gambar 4.15 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Induktor sebesar 1 mH

Mitigasi feroresonansi dengan penggunaan induktor yang memiliki nilai yang lebih kecil sebanding dengan nilai impedansinya. Ketika impedansi lebih kecil, maka arus akan menuju titik tersebut. Dengan demikian feroresonansi dapat segera diredam. Pada Gambar 4.16 nilai induktor yang digunakan sebesar 1 kH. Feroresonansi yang timbul tidak dapat diredam. Penggunaan induktor sebagai damping dengan settingan nilai yang lebih tinggi, dalam studi ini tidak berhasil meredam feroresonansi. Feroresonansi yang muncul dengan pemasangan damping induktor sebesar 1kH menghasilkan respon arus dan tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan feroresonansi tanpa dipasang damping induktor.

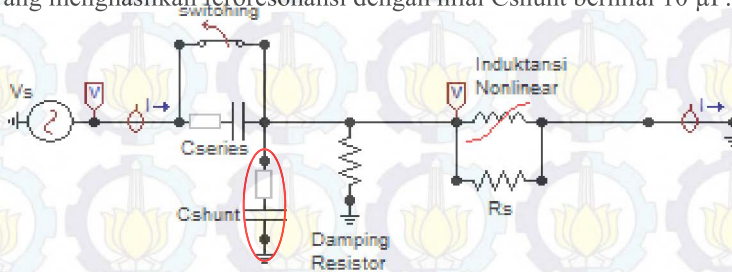


Gambar 4.16 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Induktor sebesar 1 kH

4.2.2 Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt

4.2.2.1 Mitigasi Feroresonansi menggunakan Resistor

Rangkaian simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan damping berupa elemen resistor dapat dilihat pada Gambar 4.17. Pada Gambar 4.16, rangkaian simulasi tersebut merupakan rangkaian simulasi yang menghasilkan feroresonansi dengan nilai Cshunt bernilai 10 μF .



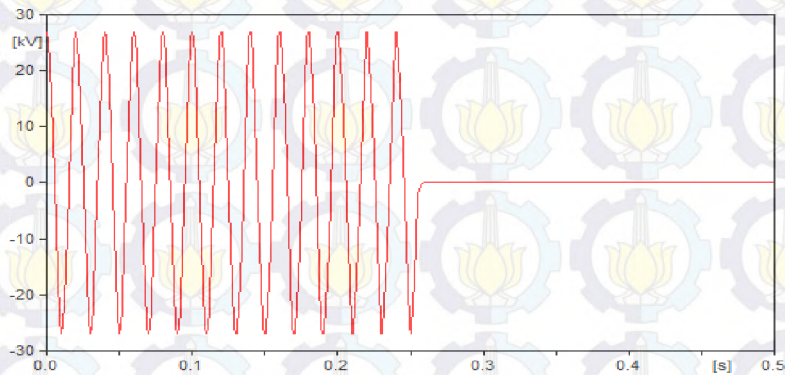
Gambar 4.17 Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt dengan memasang Damping Resistor

Pada Tabel 4.5 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan elemen resistor. Nilai resistor sebagai damping divariasikan hingga mendapatkan nilai yang tepat untuk meredam feroresonansi. Penggunaan resistor dengan nilai yang tinggi berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 4.5 tidak dapat digunakan untuk meredam feroresonansi. Semakin tinggi nilai resistansi yang digunakan untuk mendamping maka semakin besar peluang feroresonansi untuk muncul.

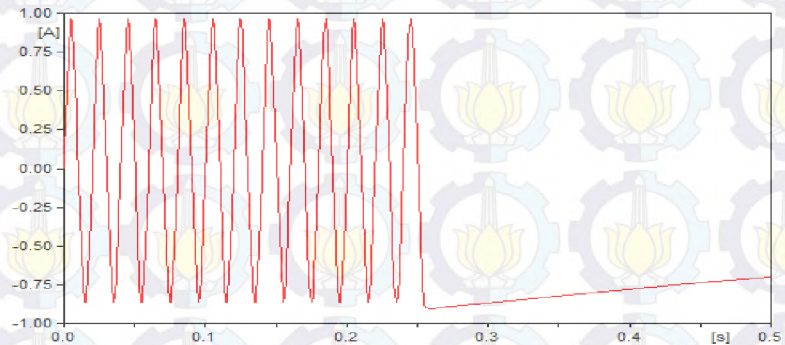
Tabel 4.5 Efek Pemasangan Damping Resistor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cshunt yang divariasikan

Nilai Resistor (Ω)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak Trafo (A)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
100000	26.94	26.94	0.96	32.8	Ya
1000	26.94	2.03	0.96	-2.45	Ya
100	26.94	0	0.96	0	Tidak
10	26.94	0	0.96	0	Tidak
1	29.64	0	0.96	0	Tidak

Penggunaan resistor dengan nilai yang tepat maka feroresonansi dapat diredam. Pada Gambar 4.18 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi yang berhasil dalam bentuk respon tegangan dan arus. Resistor yang digunakan sebesar 100Ω . Respon arus yang dihasilkan tidak langsung bernilai 0 melainkan menuju 0. Dengan respon arus dan tegangan dengan menunjuk angka 0 maka feroresonansi sudah berhasil diredam. Untuk Gambar 4.18 b respon arus tidak serta merta akan langsung bernilai nol. Akan tetapi dalam rentang waktu sedikit lebih lama arus pada akhirnya juga akan bernilai nol.



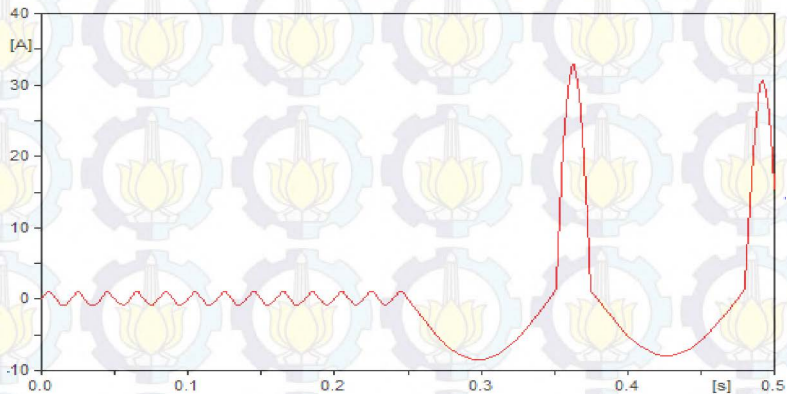
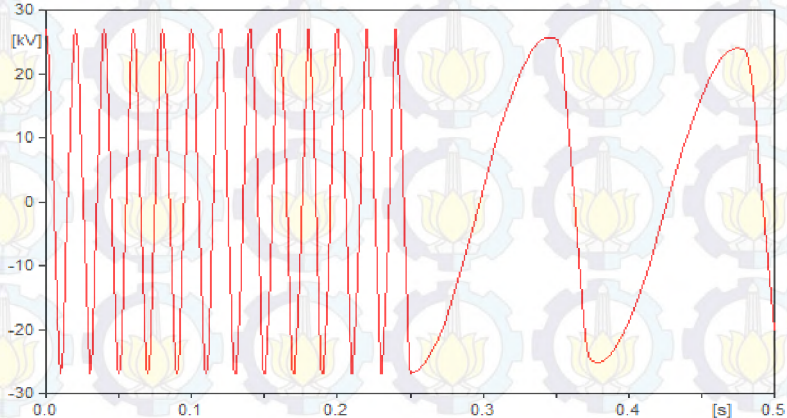
(a)



(b)

Gambar 4.18 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah CShunt menggunakan Damping Resistor sebesar 100Ω

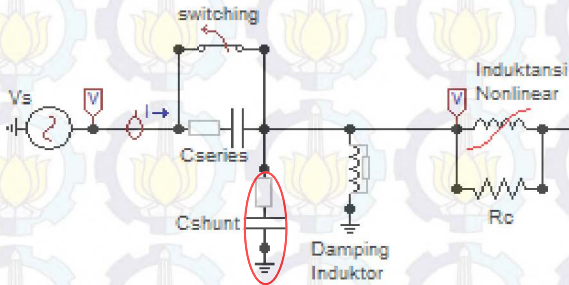
Mitigasi dengan pemasangan resistor dengan nilai yang tinggi tidak dapat meredam feroresonansi, melainkan dapat memperbesar nilai dari *overcurrent* dan frekuensi saat terjadi feroresonansi. Pada Gambar 4.19 dapat dilihat respon arus dan tegangan akibat pemasangan resistor sebagai damping sebesar $100\text{ k}\Omega$. Pemasangan resistor sebesar $100\text{ k}\Omega$ mengakibatkan feroresonansi tetap ada dan tidak dihilangkan.



Gambar 4.19 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Akibat Mengubah C_{shunt} menggunakan Damping Resistor sebesar $100\text{ k}\Omega$

4.2.2.2 Mitigasi Feroresonansi menggunakan Induktor

Rangkaian simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan damping berupa elemen induktor dapat dilihat pada Gambar 4.20. Pemasangan damping reaktor berupa elemen induktor digunakan untuk memitigasi feroresonansi. Rentang nilai elemen induktor yang diuji untuk meredam feroresonansi adalah 0.1 mH – 10 H. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut



Gambar 4.20 Rangkaian Simulasi Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt dengan memasang Damping Induktor

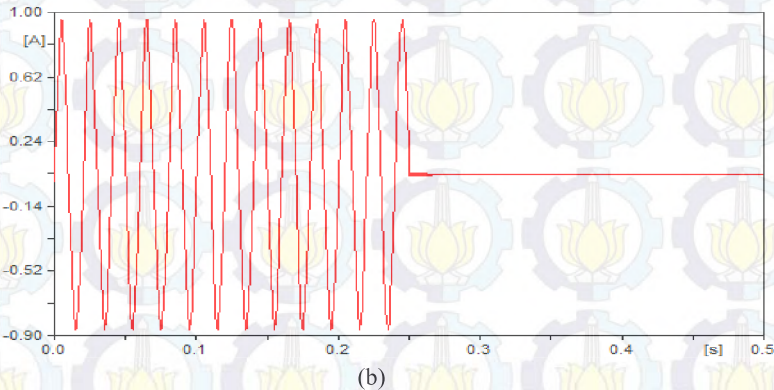
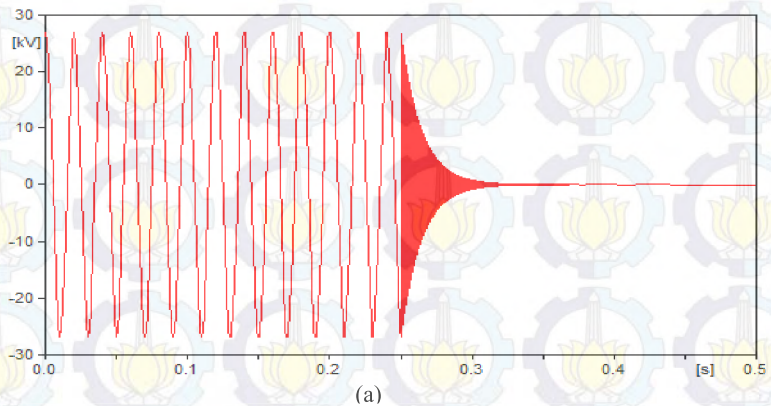
Pada Tabel 4.6 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi dengan menggunakan elemen induktor. Nilai induktor sebagai damping divariasikan hingga mendapatkan nilai yang tepat untuk meredam feroresonansi.

Tabel 4.6 Efek Pemasangan Damping Induktor untuk Mengatasi Feroresonansi akibat Cshunt yang divariasikan

Nilai Induktor (mH)	Tegangan Puncak Trafo (KV)		Arus Puncak Trafo (A)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
10000	26,94	26,94	0,96	20	Ya
1000	26,94	26,94	0,96	0,95	Tidak
100	26,94	26,93	0,96	0,32	Tidak
10	26,94	26,92	0,96	0,137	Tidak
1	26,94	26,9	0,96	0,074	Tidak
0,1	26,94	26,75	0,96	0,05	Tidak

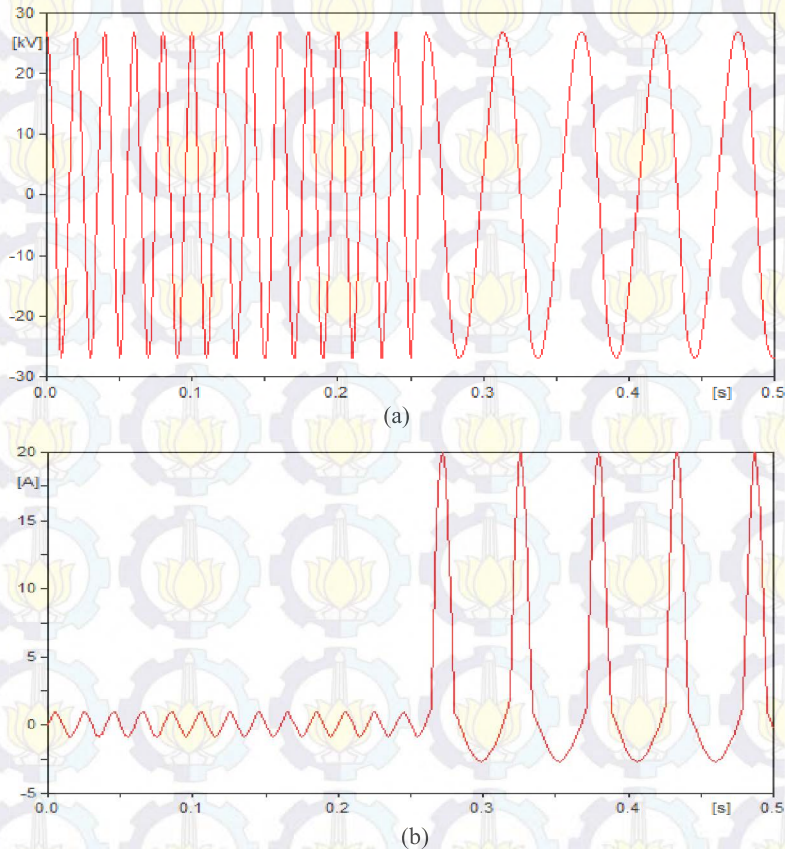
Penggunaan damping yang tepat dapat meredam feroresonansi.

Penggunaan sampai 1 H masih dapat meredam feroresonansi sekalipun ada nilai arus yang muncul. Pada Gambar 4.21 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi yang berhasil dalam bentuk respon tegangan dan arus. Induktor yang digunakan sebesar 0.1 mH. Respon arus yang dihasilkan tidak langsung bernilai 0 melainkan menuju 0. Dengan respon arus dan tegangan dengan menunjuk angka 0 maka feroresonansi sudah berhasil diredam. Hasil simulasi berupa respon arus dan tegangan pada Gambar 4.21 tidak serta merta langsung menuju 0 melainkan membutuhkan beberapa waktu untuk menuju 0



Gambar 4.21 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi Feroresonansi akibat Mengubah Cshunt menggunakan Damping Induktor sebesar 0.1 mH.

Mitigasi feroresonansi dengan settingan damping berupa induktor sebesar 10 H tidak dapat meredam feroresonansi. Respon arus dan tegangan dapat dilihat pada Gambar 4.22. Berdasarkan respon arus dan tegangan yang dihasilkan menunjukkan bahwa feroresonansi tidak diredam dan tetap ada pada sistem. Respon tegangan yang muncul memiliki nilai yang sama saat sebelum dilakukan *switching*, akan tetapi frekuensi dari tegangan sudah berbeda dengan frekuensi sumber. Untuk respon arus terlihat bahwa terjadi *overcurrent* pada sistem.



Gambar 4.22 Respon Tegangan (a) dan Arus (b) untuk Mitigasi menggunakan Damping Induktor sebesar 10 H

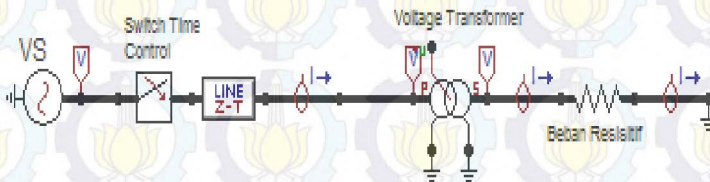
4.3 Feroresonansi Akibat Saluran Trafo Dibuka

Penggunaan trafo pada sebuah sistem mengakibatkan sistem tidak terlepas dari feroresonansi. Hal tersebut dikarenakan inti trafo merupakan sumber induktansi nonlinear karena terbuat dari bahan feromagnetik. Trafo yang digunakan pada pemodelan terbukanya saluran trafo dapat dilihat pada Tabel 4.7

Tabel 4.7 Spesifikasi *Voltage Transformer*

IEC	60044-2	Indoor	
Type	VRQIn/SI	BIL	125 kV
Frequency	50 Hz	Ratio	22000/110 V
Power and Accuracy Class	100 VA cl. 0.5	Primary Voltage	22000 V
Weight	28 kg	Secondary Voltage	110

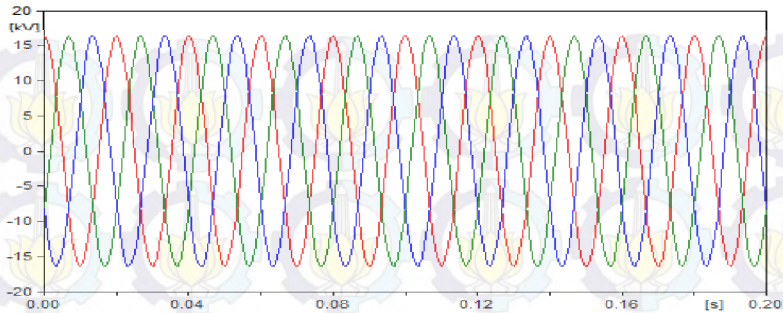
Pada studi ini sebuah pemodelan voltage trafo yang salah satu atau lebih salurannya terbuka akan disimulasikan untuk melihat efek dari pembukaan salurannya. Pemodelan rangkaian terdiri dari *switch time* yang digunakan untuk membuka saluran dengan settingan waktu yang ditetapkan. Model rangkaian simulasi dengan salah satu atau lebih saluran trafo dibuka dapat dilihat pada Gambar 4.23



Gambar 4.23 Simulasi ATP Akibat Pembukaan Saluran

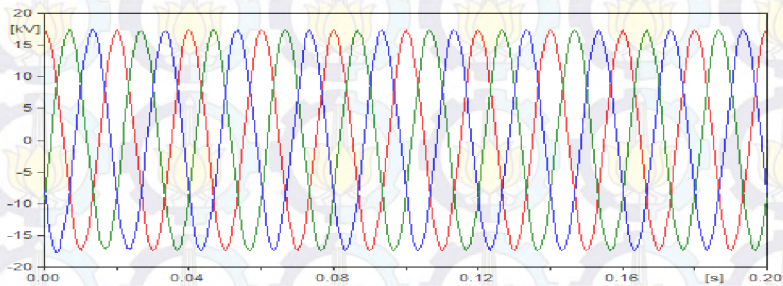
4.3.1 Keadaan Normal

Trafo dalam keadaan normal pada studi ini merupakan kondisi trafo 3 fasa dengan saluran yang dibuka/dilepas secara bersamaan. Rangkaian yang disimulasikan dengan keadaan normal akan menghasilkan grafik yang berisikan respon arus dan respon tegangan. Tegangan sumber yang digunakan adalah tegangan V_{peak} line to ground sebesar 16.3 kV dengan frekuensi sebesar 50 Hz. Respon tegangan sumber hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.24.

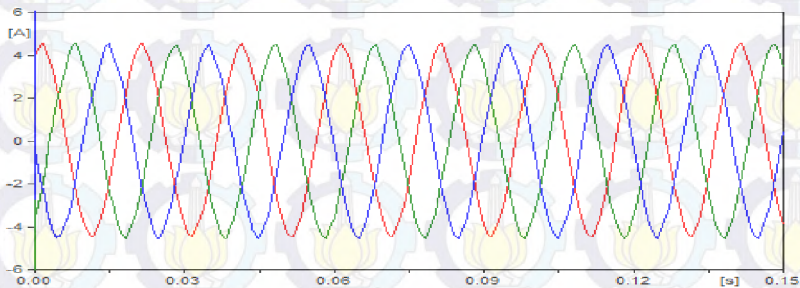


Gambar 4.24 Respon Tegangan saat Kondisi Normal

Untuk tegangan pada sisi primer dari trafo dapat dilihat pada Gambar 4.25 dengan nilai tegangan puncak sebesar 17.2 kV. Untuk nilai arus pada sisi primer trafo dapat dilihat pada Gambar 4.26 dengan nilai sebesar 4.56 A.

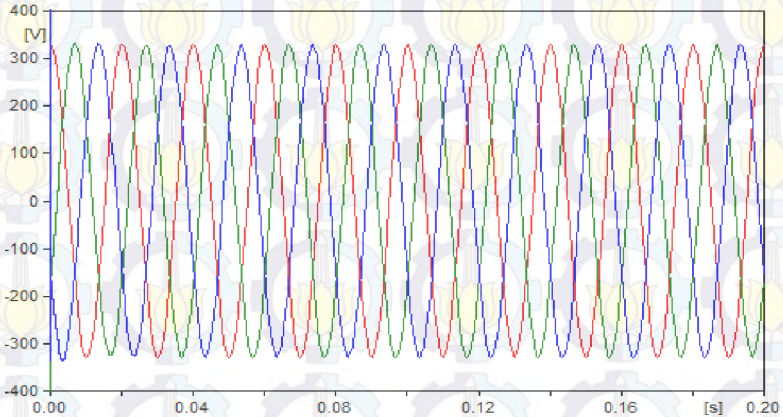


Gambar 4.25 Respon Tegangan pada Sisi Primer saat Kondisi Normal

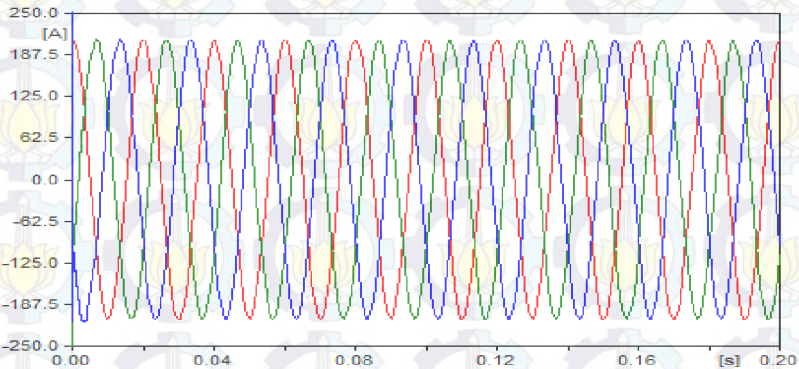


Gambar 4.26 Respon Arus pada Sisi Primer saat Kondisi Normal

Respon arus dan tegangan pada sisi sekunder trafo dapat dilihat pada Gambar 4.27 dan Gambar 4.28. Nilai tegangan yang diperoleh adalah $V_{peak} = 331$ V dan nilai arus adalah $I_{peak} = 212$ A



Gambar 4.27 Respon tegangan pada sisi sekunder saat Kondisi Normal

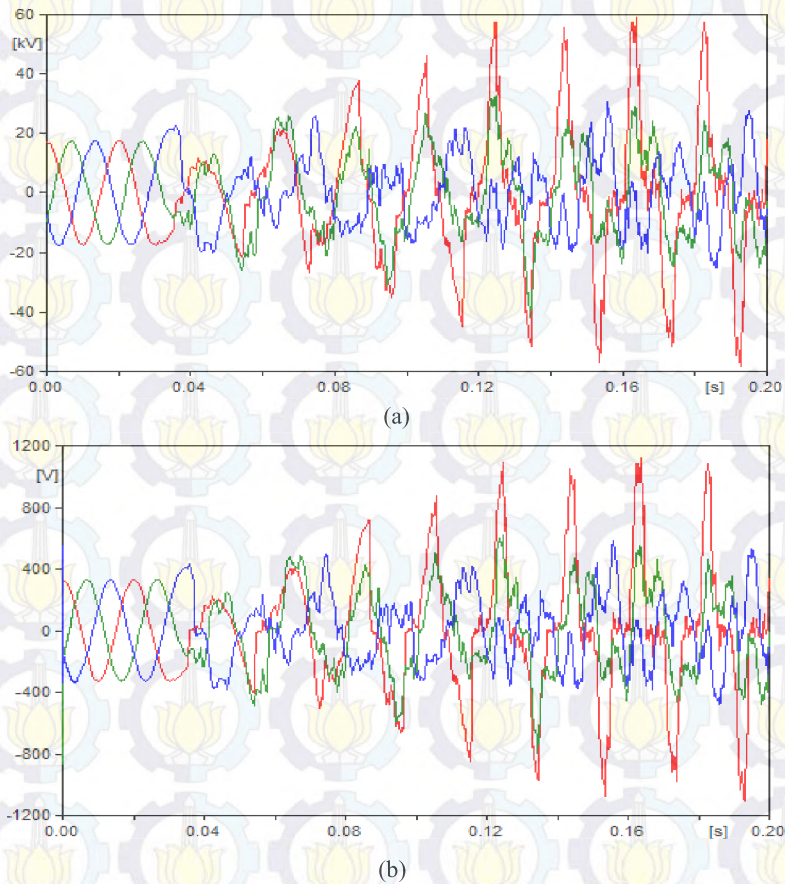


Gambar 4.28 Respon Arus pada Sisi Sekunder saat Kondisi Normal

4.3.2 Ferorensansi Akibat Satu Fasa Terbuka

Untuk memunculkan ferorensansi pada rangkaian dapat dengan membuka salah satu fasa pada trafo. Kondisi awal dari *switch* adalah tertutup untuk $t = 0$ sekon dan akan membuka bersamaan pada saat $t = 5$ sekon. Untuk membangkitkan ferorensansi salah satu saluran fasa trafo dibuka dengan bantuan *switch*.

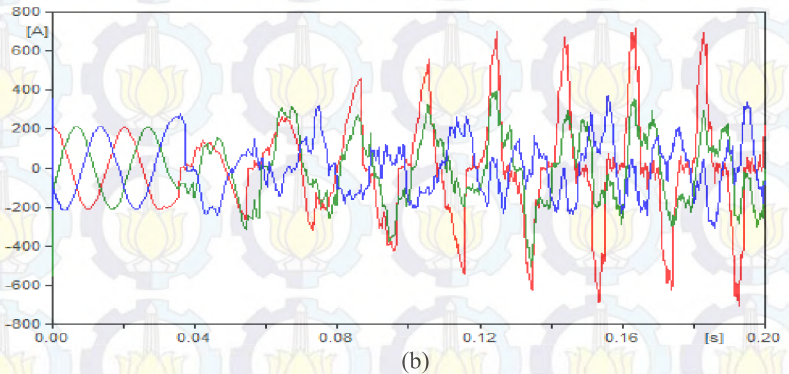
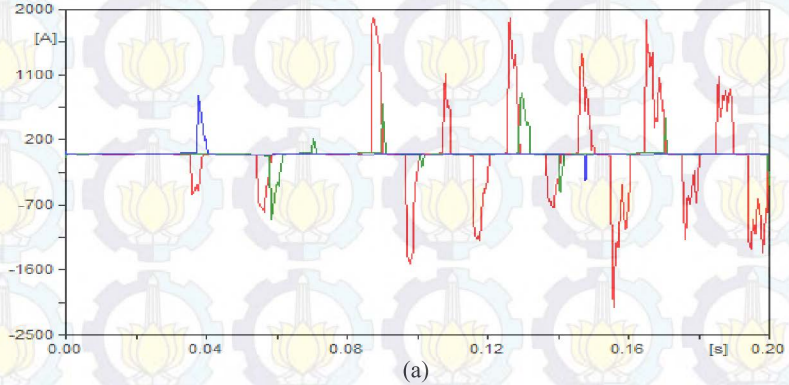
Pada studi ini salah satu fasa trafo dibuka terlebih dahulu dengan *switch* pada waktu 0.03 sekon. Hasil simulasi akan berupa grafik respon arus dan tegangan yang akan dianalisis untuk menemukan tanda-tanda munculnya feroresonansi. Kemunculan feroresonansi dapat ditandai dengan terjadinya *overvoltage* dan *overcurrent*. Hasil simulasi dengan membuka salah satu saluran fasa maka diperoleh respon arus dan tegangan seperti Gambar 4.29.



Gambar 4.29 Respon Tegangan di Sisi (a) Primer (b) Sekuder saat Satu Saluran dibuka

Berdasarkan Gambar 4.29 dapat dilihat bahwa ketiga saluran trafo baik pada sisi sekunder mengalami gangguan dan terjadi *overvoltage*. Untuk sisi primer tegangan mencapai nilai sebesar 59.3 kV dan pada sisi sekunder mencapai tegangan sampai 1.1 kV. Feroresonansi yang terjadi termasuk dalam golongan *quasi-periodic mode*.

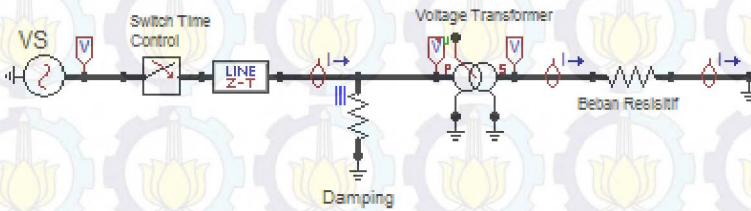
Hasil simulasi berupa respon arus yang mengalir saat salah satu saluran trafo dibuka dapat dilihat pada Gambar 4.30. respon arus pada Gambar 4.30 merupakan kurva arus untuk sisi primer dan sekunder. Berdasarkan Gambar 4.30 respon arus di sisi primer dan sekunder mengalami *overcurrent* pada sisi primer sehingga Ipeak 1878 A dan sekunder adalah 718.42 A.



Gambar 4.30 Respon Arus di sisi (a) Primer (b) Sekuder saat Satu Saluran Dibuka

4.3.3 Mitigasi Feroresonansi Akibat Satu Fasa Terbuka

Feroresonansi yang dimunculkan dengan membuka salah satu saluran fasa tersebut dapat diatasi dengan beberapa cara bentuk teknik mitigasi. Pada studi ini membahas teknik mitigasi yang digunakan untuk meredam feroresonansi dengan menggunakan damping reaktor berupa resistor. Rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.31



Gambar 4.31 Rangkaian Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Resistor akibat Membuka Satu Saluran.

Simulasi rangkaian mitigasi feroresonansi seperti pada Gambar 4.31 akan menghasilkan respon arus dan tegangan yang menunjukkan feroresonansi dapat dimitigasi dengan pemasangan damping reaktor yang sesuai sehingga dapat meredam feroresonansi. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8. Pada Tabel 4.7 akan diperoleh hasil simulasi untuk respon tegangan di sisi primer dan sekunder.

Tabel 4.8a Respon Tegangan Primer Sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Satu Saluran

Nilai Damping (Ω)	Tegangan Primer (KV)						Feroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50				16.8	20	18.4	Tidak
100	59.3	32.6	30	25.3	24.5	17.6	Tidak
110				28	24.15	18.2	Ya

Tabel 4.8b Respon Tegangan Sekunder Sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Satu Saluran

Nilai Damping (Ω)	Tegangan Sekunder (KV)						Ferroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50	1.1	0.617	0.585	0.26	0.38	0.27	Tidak
100				0.48	0.46	0.33	Tidak
110				0.53	0.48	0.34	Ya

Tabel 4.8 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi berupa respon arus pada sisi primer dan sekunder.

Tabel 4.9a Respon Arus Primer Sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Satu Saluran

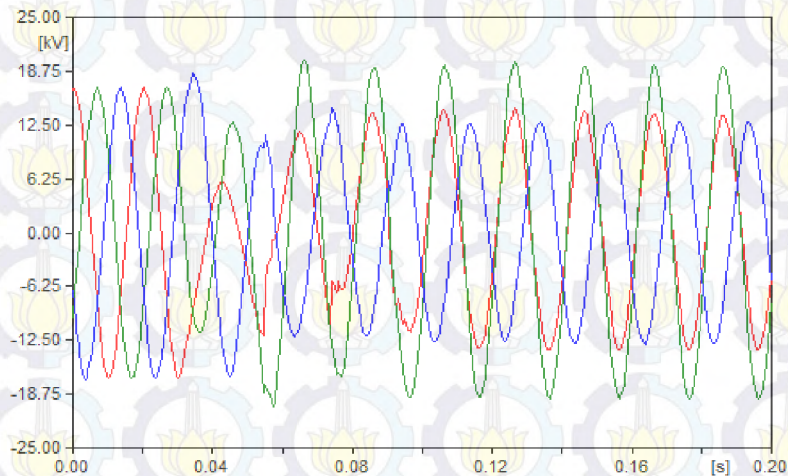
Nilai Damping (Ω)	Arus Primer (A)						Ferroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50	1878	842	800	-840	404	288	Tidak
100				-1000	-480	415	Tidak
110				1025	-520	450	Ya

Tabel 4.9b Respon Arus Sekunder Sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Dua Saluran

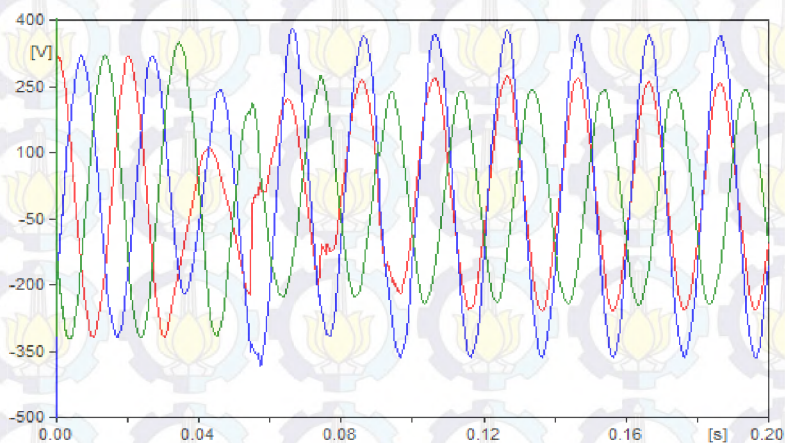
Nilai Damping (Ω)	Arus Sekunder (A)						Ferroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50	718	397	375	168	241	176	Tidak
100				307	295	214	Tidak
110				340	280	220	Ya

Hasil dari simulasi mitigasi feroresonansi berupa tegangan dapat dilihat pada Gambar 4.32. Berdasarkan Gambar 4.32 respon tegangan pada sisi primer dan sekunder tidak menunjukkan *overvoltage* yang tinggi dan tidak adanya harmonisa pada respon tegangan. Meskipun nilai

tegangan memiliki perbedaan dengan tegangan sumber asli akan tetapi feroresonansi sudah dapat diredam dan tidak membahayakan lagi bagi peralatan ataupun operator.

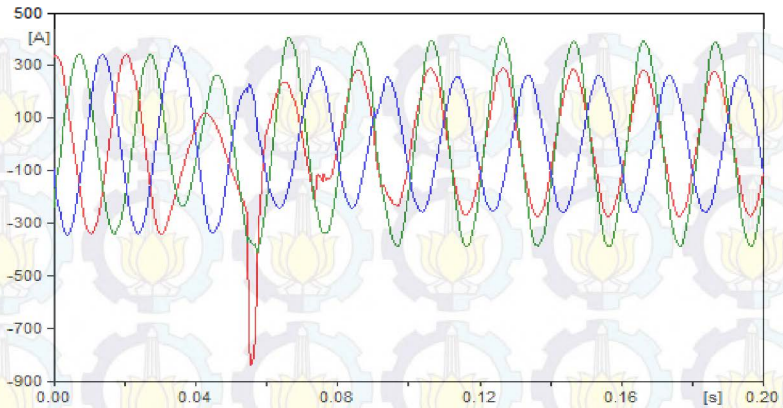


(a)

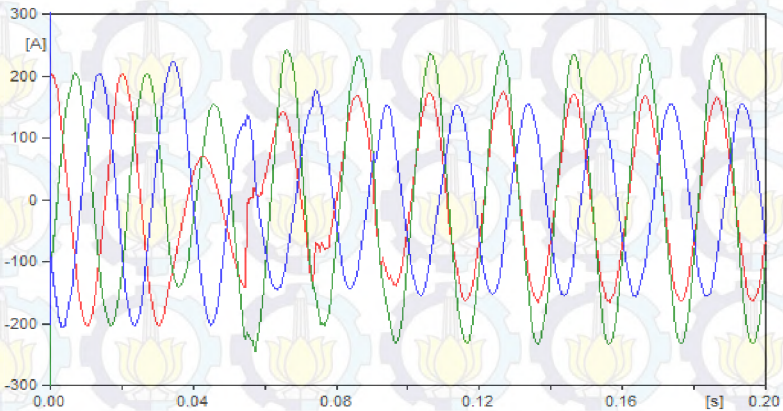


(b)

Gambar 4.32 Respon Tegangan di Sisi (a) Primer (b) Sekuder saat Feroresonansi akibat Satu Saluran Dibuka di Mitigasi



(a)



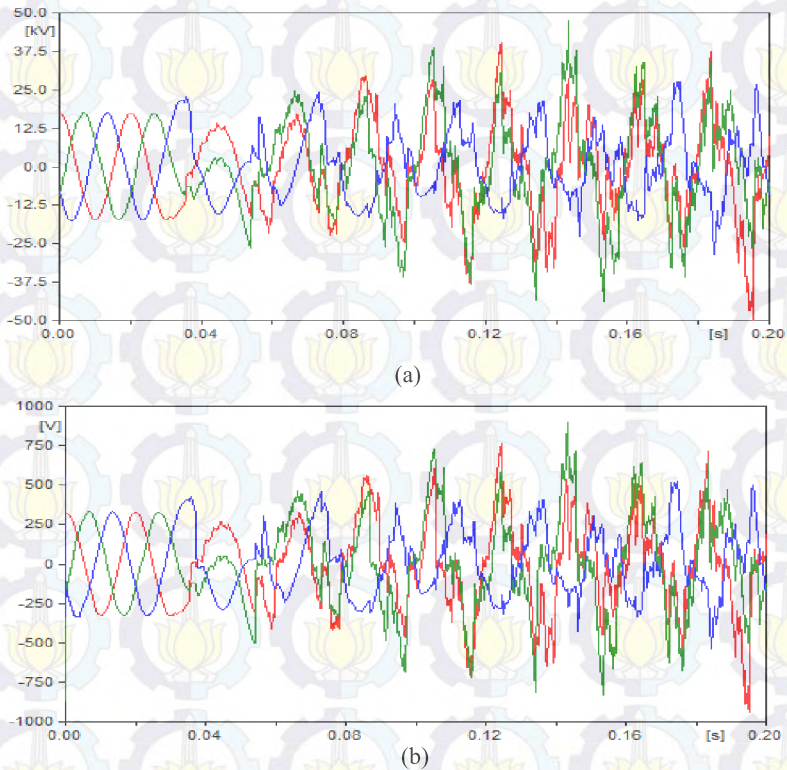
(b)

Gambar 4.33 Respon Arus di Sisi (a) Primer (b) Sekunder saat Feroresonansi akibat Satu Saluran Dibuka di Mitigasi

Respon arus dari hasil mitigasi feroresonansi pada rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.33. Respon arus pada sisi primer mengalami lonjakan arus pada sisi saluran yang dibuka untuk beberapa saat. Akan tetapi setelah lonjakan arus yang dihasilkan sudah kembali normal dan tidak membahayakan bagi peralatan dan operator.

4.3.4 Feroresonansi Akibat Dua Fasa Terbuka

Rangkaian simulasi dengan membuka dua saluran dapat menimbulkan feroresonansi. Dua buah saluran fasa trafo dibuka dalam waktu yang bersamaan yakni 0.03 sekon dan hasil simulasi dalam bentuk respon arus dan tegangan. Hasil simulasi rangkaian dengan membuka dua saluran trafo dapat dilihat pada Gambar 4.34.

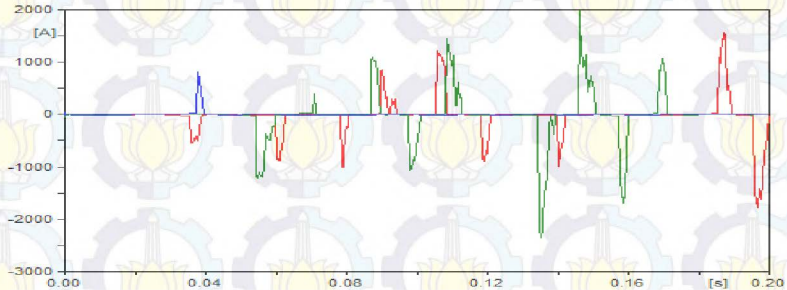


Gambar 4.34 Respon Tegangan di Sisi (a) Primer (b) Sekunder saat Dua Saluran dibuka.

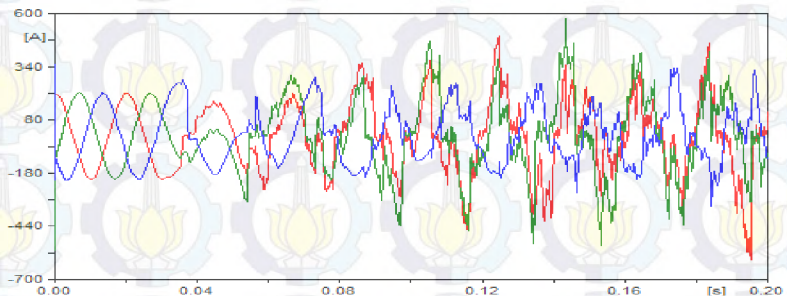
Hasil simulasi pada rangkaian dengan membuka dua saluran menghasilkan respon tegangan seperti pada Gambar 4.34. Gambar 4.34 (a) merupakan respon tegangan pada sisi primer dengan tegangan puncak sebesar . 45 kV untuk tegangan puncak saluran R dan 47 kV untuk saluran S. Untuk respon tegangan pada sisi sekunder dapat dilihat pada Gambar 4.34 (b) dengan tegangan fasa R mencapai tegangan puncak sebesar 900

A dan fasa S 770 A. Feroresonansi yang timbul ketika 2 saluran dibuka bersamaan termasuk dalam tipe *quasi-periodic mode*.

Hasil simulasi selain menghasilkan respon tegangan dihasilkan juga respon arus. Respon arus pada yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.35. Hasil feroresonansi berupa respon arus pada sisi primer dan sekunder menunjukkan fenomena feroresonansi. Untuk arus primer diperoleh arus puncak pada saluran R sebesar 1550 A dan untuk arus puncak pada saluran B sebesar 1970 A. Sedangkan untuk Fasa T diperoleh arus puncak yang muncul hanya sekali sebesar 180 A. Pada sisi sekunder diperoleh nilai arus puncak pada fasa R sebesar 490 A, fasa S sebesar 550 A dan fasa T sebesar 333.5 A. Feroresonansi yang muncul pada rangkaian yang kedua saluran fasa trafo dibuka bersamaan termasuk pada tipe *quasi-periodic mode*.



(a)

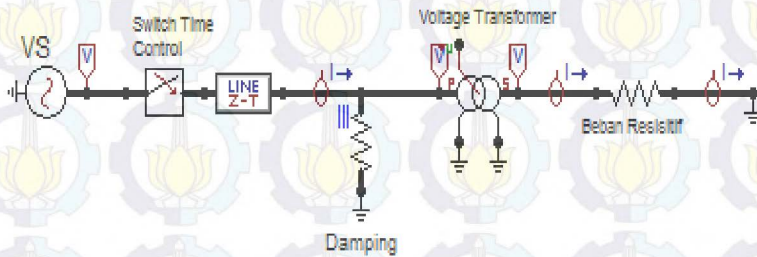


(b)

Gambar 4.35 Respon Arus di Sisi (a) Primer (b) Sekuder saat Feroresonansi akibat Dua Saluran dibuka

4.3.5 Mitigasi Feroresonansi Akibat Dua Fasa Terbuka

Feroresonansi yang timbul akibat membuka dua saluran fasa terbuka bersamaan tersebut dapat diatasi dengan beberapa cara bentuk teknik mitigasi. Pada studi ini membahas teknik mitigasi yang digunakan untuk meredam feroresonansi dengan menggunakan damping reaktor berupa resistor. Rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.35



Gambar 4.36 Rangkaian Mitigasi Feroresonansi menggunakan Damping Resistor akibat Membuka Dua Saluran.

Berdasarkan rangkaian pada Gambar 4.35 maka akan diroleh hasil simulasi berupa respon arus dan tegangan yang menunjukkan feroresonansi dapat di mitigasi atau tidak. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.9 untuk hasil respon tegangan dan Tabel 4.10 untuk respon arus baik disisi primer ataupun sekunder

Tabel 4.10a Respon Tegangan Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Dua Saluran

Nilai Damping (Ω)	Tegangan Primer (KV)						Feroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50	43	47.5	29.9	16	16	15	Tidak
80				23	24	19.5	Ya
100				31	29	17.5	Ya

Tabel 4.10b Respon Tegangan Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Dua Saluran

Nilai Damping (Ω)	Tegangan Sekunder (KV)						Feroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50				0.3	0.3	0.28	Tidak
80	0.7	0.9	0.56	0.45	0.42	0.37	Ya
100				0.58	0.56	0.33	Ya

Tabel 4.10 merupakan hasil simulasi mitigasi feroresonansi berupa respon arus pada sisi primer dan sekunder.

Tabel 4.11a Respon Arus Primer sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Dua Saluran

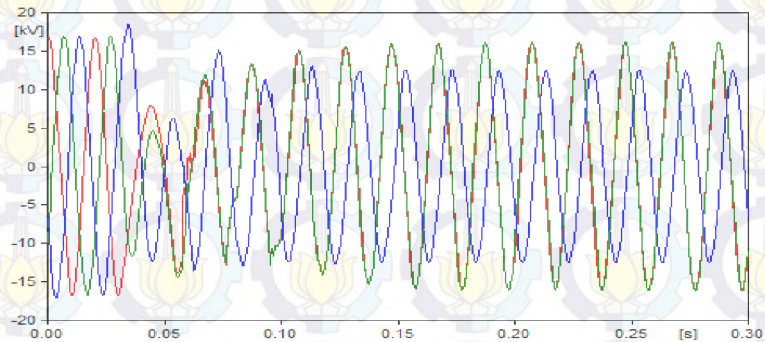
Nilai Damping (Ω)	Arus Primer (A)						Feroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50				-820	-740	305	Tidak
80	1500	2000	820	-995	-1005	306	Ya
100				-1008	-910	410	Ya

Tabel 4.11b Respon Arus Sekunder sebagai Hasil Mitigasi Feroresonansi akibat Membuka Dua Saluran

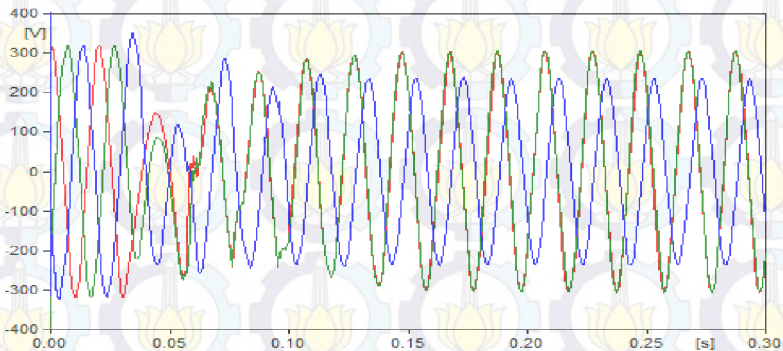
Nilai Damping (Ω)	Arus Sekunder (A)						Feroresonansi
	sebelum			sesudah			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
50				195	195	180	Tidak
80	491	575	333	275	290	234	Ya
100				368	357	240	Ya

Berdasarkan Tabel 4.9 dan 4.10 dapat terlihat bahwa pemasangan damping dengan nilai yang tepat dapat meredam feroresonansi. Sedangkan dengan nilai elemen resistor yang dipasang sebagai damping tidak sesuai maka feroresonansi tetap terjadi.

Hasil dari simulasi mitigasi feroresonansi dengan melakukan pemasangan damping reaktor berupa elemen resistor dapat dilihat pada Gambar 4.36 dan Gambar 4.37 sebagai hasil simulasi dalam bentuk respon tegangan dan arus.



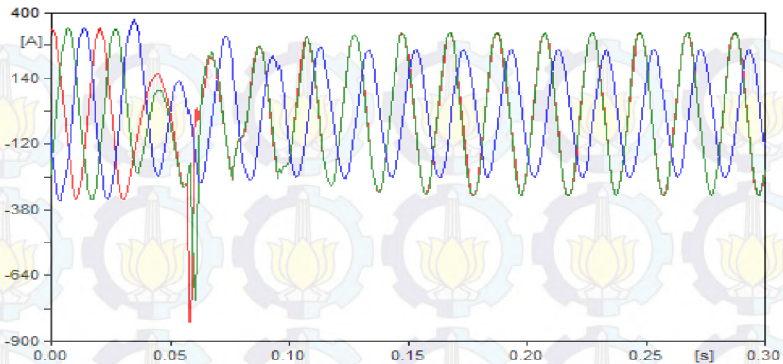
(a)



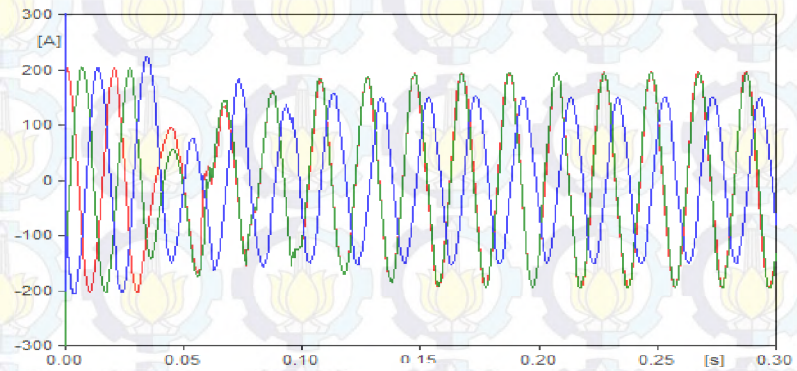
(b)

Gambar 4.37 Respon Tegangan di Sisi (a) Primer (b) Sekuder saat Feroresonansi akibat Dua Saluran Dibuka di Mitigasi

Respon tegangan pada sisi primer seperti pada Gambar 4.37, menunjukkan feroresonansi yang telah dimitigasi. Respon tegangan yang diperoleh tidak menunjukkan *overvoltage*. Dengan demikian tegangan yang dihasilkan tidak menjadi ancaman bagi peralatan dan operator sekalipun tegangan yang dihasilkan tidak sebaik tegangan aslinya dan tidak sesuai dengan tegangan saat kondisi normal. Antar saluran tegangan yang dihasilkan berbeda-beda.



(a)



(b)

Gambar 4.38 Respon Arus di Sisi (a) Primer (b) Sekunder saat Feroresonansi akibat Dua Saluran Dibuka di Mitigasi

Hasil simulasi selain menghasilkan respon tegangan dihasilkan juga respon arus. Respon arus yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.38. Respon arus pada sisi primer dan sekunder seperti pada Gambar 4.38, menunjukkan feroresonansi yang telah dimitigasi. Respon arus yang diperoleh tidak menunjukkan *overcurrent*. Dengan demikian arus yang dihasilkan tidak menjadi ancaman bagi peralatan dan operator sekalipun arus yang dihasilkan tidak sebaik tegangan aslinya.



(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Martinez, G. Antonova and M. Olgun, "*Ferroresonance Phenomenon in CFE, its Origin and Effects*", IPST 2013, Vancouver, 2013.
- [2] Putu Wegadiputra Wiranata, I Made Yulistya Negara dan I Gusti Ngurah Satriyadi, "*Analisis Fenomena Ferroresonance pada Capacitive Voltage Transformer (CVT) Akibat Pelepasan Beban Secara Mendadak*", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.
- [3] Antonio Gomez-Exposito, Antonio J. Conejo and Claudio Canizares, "*Electric Energy System; Analysis and operation*", CRC Press, Boca Raton, 2008.
- [4] John Mc Donald, "*Electrical Power Substation Engineering*", CRC Press, Boca Raton, 2001.
- [5] Stephen J. Chapman, "*Electric Machinery Fundamentals 5th edition*", Mc- Graw Hill, USA, 2012.
- [6] Charles K. Alexander dan Matthew N.O. Sadiku, "*Fundamental of Electric Circuits 4th Edition*", McGraw-Hill, USA , 2007.
- [7] Ferraci, P., "*Ferroresonance*", Group Schneider: Cahier no 190, pp. 1-28, Maret, 1998.
- [8] Elmo Price, "*A Tutorial on Ferroresonance*", ABB Inc.
- [9] Zulkurnain Abdul-Malek, Kamyar Mehranzim, Behnam Salami, Hadi Nabipour Afrouzi dan Saeed Vahabi Mashak, "*Investigation of Ferroresonance Mitigation Techniques in Voltage Transformer Using ATP-EMTP Simulation*",Universiti Teknologi Malaysia, Johar, 2013.
- [10] Hermann W. Dommel, "*EMTP Theory Book in WP 5.1*", BPA, Oregon, 1994.



BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis yang dilakukan pada studi kasus pemasangan damping reaktor untuk mengatasi feroresonansi, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Feroresonansi pada rangkaian pemodelan Gardu Induk dengan mengubah parameter Cseries dan Cshunt cenderung tergolong dalam tipe feroresonansi *fundamental mode*. Pada Feroresonansi dengan mengubah Cseries, *overvoltage* yang terjadi mencapai tegangan puncak sampai 4,176 kali dari tegangan awal dan *overcurrent* mencapai arus puncak mencapai 16,04 kali dari arus awal. Feroresonansi akibat mengubah nilai Cshunt mengakibatkan terjadinya *overcurrent* mencapai nilai 36,25 kali nilai arus awalnya. Sedangkan tegangan mengalami perubahan frekuensi yang akan semakin kecil apabila Cshunt yang digunakan semakin besar.
2. Feroresonansi pada rangkaian pemodelan simulasi dengan membuka satu saluran fasa mengakibatkan *overvoltage dan overcurrent* dengan tipe feroresonansi cenderung ke tipe *quasi-periodic mode*. Tegangan dan arus puncak saat satu saluran fasa dibuka (Fasa R) terdapat pada fasa R sendiri dengan perbesaran sisi mencapai tegangan primer 3,4 kali tegangan awal dan pada tegangan sekunder mencapai tegangan puncak 3,3 kali dari tegangan awalnya. Sedangkan untuk arus puncak pada sisi primer mengalami perbesaran sebesar 417 kali dan 3,4 kali pada sisi sekunder. Feroresonansi ketika membuka 2 saluran fasa (Fasa R dan S) maka tegangan dan arus puncak terdapat pada saluran kedua (S) dengan perbesaran tegangan pada sisi primer mencapai tegangan puncak sebesar 2,76 kali dan sekunder sebesar 2,8 kali tegangan awal. Sedangkan arus puncak mengalami perbesaran mencapai sebesar 444,5 kali arus awal dan sisi sekunder 1,1 kali arus awal. Arus pada sisi primer sangat transien dalam pengertian bahwa arus sangat besar dalam waktu yang sangat singkat.
3. Mitigasi pada rangkaian pemodelan feroresonansi di gardu induk menggunakan elemen resistor dengan rentang 1-100 Ω dan induktor dengan rentang 0,1-1000 mH berhasil meredam feroresonansi. Ketika pemasangan damping reaktor diatas nilai tersebut maka

feroresonansi tetap terjadi dan tidak dapat diatasi Sama halnya dengan mitigasi feroresonansi akibat pelepasan saluran trafo, nilai damping resistor yang digunakan adalah 50Ω dan apabila lebih dari 100Ω maka feroresonansi tidak dapat diredam untuk kejadian membuka satu saluran dan 70Ω untuk kejadian membuka dua saluran .

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah melakukan simulasi feroresonansi pada sebuah sistem untuk melihat apakah komponen pada sistem dapat mengakibatkan feroresonansi. Ketika sebuah sistem positif mengalami feroresonansi maka kebijakan dapat diambil untuk mengganti beberapa komponen yang dapat menyebabkan feroresonansi.