TUGAS AKHIR – EE 184801

STUDI PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSASI SERI TERHADAP FERORESONANSI DALAM SALURAN TRANSMISI 150 KV

Muhamad Setiyawan
NRP 07111440000004

Dosen Pembimbing
IGN Satriyadi Hermana,ST.,MT.
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara,ST.,M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

TUGAS AKHIR – EE 184801

STUDI PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSASI SERI TERHADAP FERORESONANSI DALAM SALURAN TRANSMISI 150 KV

Muhamad Setiyawan
NRP 07111440000004

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

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

FINAL PROJECT – EE 184801

Study of Ferroresonance Effect on Series Compensated 150 KV Transmission Lines

Muhamad Setiyawan
NRP 07111440000004

Supervisors
IGN Satriyadi Hernanda,ST.,MT.
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara,ST.,M.Sc.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN
TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul "**STUDI PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSASI SERI TERHADAP FERORESONANSI DALAM SALURAN TRANSMISI 150 KV**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 17 Desember 2018

Muhamad Setiyawan
07111440000004

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSASI SERI TERHADAP FERORESONANSI DALAM SALURAN TRANSMISI 150 KV

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.	Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 1973 01 23 2002 12 1001	NIP. 1970 07 12 1998 02 1001

KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

SURABAYA
JANUARI, 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSASI SERI TERHADAP FERORESONANSI DALAM SALURAN TRANSMISI 150 KV

Nama mahasiswa : Muhamad Setiyawan
Dosen Pembimbing I : IGN Satriyadi Hernanda,ST.,MT.
Dosen Pembimbing II : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara,ST.,M.Sc.

Abstrak:

Studi ini merupakan simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Rangkaian yang disumulasikan disini terdiri dari dua buah rangkaian pemodelan, yaitu rangkaian feroresonansi tanpa kompensasi seri dan rangkaian feroresonansi dengan kompensasi seri. Simulasi ini dijalankan menggunakan gangguan operasi *switching* satu fasa, *switching* dua fasa, dan *switching* tiga fasa. Nilai kompensasi yang disimulasikan dalam studi ini berkisar dari 0,3 µF sampai 0,9 µF. Transformator yang dipakai merupakan transformator *step-down* 150 kV- 20 kV. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui dampak dari pemasangan kompensasi seri terhadap gejala feroresonansi. Dampak yang dimaksud adalah perubahan karakteristik feroresonansi dan nilai *overvoltage* yang timbul dari rangkaian tanpa kompensasi hingga rangkaian dengan kompensasi. Hasil dari studi ini adalah dengan penambahan kompensasi nilai *overvoltage* yang timbul dari fenomena feroresonansi cenderung mengalami penurunan, namun ada beberapa kasus peningkatan *overvoltage,* hal tersebut disebabkan oleh interaksi yang paling tepat antara kapasitansi sistem dengan induktansi non-linier pada transformator. Pada studi ini juga diketahui bahwa dengan pemasangan kompensasi seri dapat merubah karakteristik dari feroresonansi yang muncul.

Kata kunci: Feroresonansi, Kompensasi Seri , Transformator Daya

Halaman ini sengaja dikosongkan

Study of Ferroresonance Effect on Series Compensated 150 KV Transmission Lines

Student Name : Muhamad Setiyawan
Supervisor I : IGN Satriyadi Hernanda,ST.,MT.
Supervisor II : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara,ST.,M.Sc.

Abstract:

This study is a feroresonance circuit modeling simulation using ATPDraw software. The circuit that is accumulated here consists of two modeling circuits, namely the feroresonance circuit without compensation series and the feroresonance circuit with series compensation. This simulation is run using a single phase switching operation, two phase switching, and three phase switching. The compensation values simulated in this study ranged from 0.3 µF to 0.9 µF. The transformer used is a step-down transformer of 150 kV-20 kV. The purpose of this study was to determine the effect of installing series compensation on symptoms of feroresonance. The intended impact is a change in feroresonance characteristics and overvoltage values arising from the circuit without compensation to the series with compensation. The results of this study are that with the addition of compensation the overvoltage value arising from the feroresonance phenomenon tends to decrease, but there are some cases of increased overvoltage, this is caused by the most appropriate interaction between the system capacitance and non-linear inductance in the transformer. In this study, it was also known that with compensation installations the series can change the characteristics of the feroresonance that appears.

Key Word: *Ferroresonance, Series Compensated, Power Transformer*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul "**STUDI PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSASI SERI TERHADAP FERORESONANSI DALAM SALURAN TRANSMISI 150 KV**".

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Bapak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Didit dan Pak Made selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaaian tugas akhir ini.
4. Mas Fuady, Dicky PA selaku partner topik feroresonansi yang sempat berdiskusi bersama tentang tugas akhir
5. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
6. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.
7. Teman-teman asisten Lab. Tegangan Tinggi yang telah membantu serta memberikan dukungan selama penyusunan tugas akhir
8. Teman-teman warga elektro yang telah membantu serta memberikan dukungan selama penyusunan tugas akhir
9. Ciko, Tegar, Abim, dan Fikri selaku pekerja coffee paste yang selalu memberikan semangat dan hiburan selama pengerjaan tugas akhir
10. Reno Hidayat, Kadek Suparta Anugrah, Deni A.S, dan Hadi Lizikri yang telah memberikan ide-ide terkait tugas akhir
11. Saiful, Deny andika, dan Rusdy Saleh yang terkadang menemani berjuang bersama mengerjakan tugas akhir
12. Refky Tri Saputra yang senantiasa menemani dan berbagi ilmu tentang tugas akhir

13. Cimeng, Billy, Dhanang selaku geng MAGIC yang senantiasa memberikan warna berbeda saat pengerjaan Tugas Akhir
14. Indra, richard, dan irsan selaku penghuni kosan sejahtera blok J yang selalu menemani pengerjaan tugas akhir
15. Iqball dan Tian selaku kabiro andalan yang selalu ada walau jarak memisahkan
16. Gerry prasetyo dan jajaran kabinetnya yang memberikan support setiap saat
17. Staff-staff Dagri tercinta yang selalu menghibur dikala pengerjaan
18. Yudhistira (Pepe) selaku junior yang suka mengganggu namun selalu memberikan dukungan
19. Calon pendamping hidup yang sampai sekarang belum bisa tersebut namanya, yang telah mendukung lewat alam bawah sadar

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, 17 Desember 2018

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN iii
TUGAS AKHIR iii
PENGESAHAN v
ABSTRAK vii
ABSTACT ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xvii
DAFTAR TABEL xxi
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar belakang 1
1.2 Sistematika Penulisan 3
BAB 2 SISTEM TENAGA LISTRIK, FERORESONANSI, DAN KOMPENSASI SERI. 5
2.1 Sistem Tenaga Listrik 5
2.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik 6
2.2.1 Pengertian Sistem Transmisi 6
2.2.2 Klasifikasi Sistem Transmisi 7
2.3 Gardu Induk 8
2.4 Transformator 9
2.4.1 Pengertian Transformator 9
2.4.2 Prinsip Kerja Transformator 10
2.4.3 Transformator Daya 11
2.4.4 Kurva Magnetisasi Transformator 12
2.5 Feroresonansi 13
2.5.1 Resonansi 13
2.5.2 Feroresonansi 16
2.5.3 Karakteristik Feroresonansi 17
2.6 Kompensasi Seri 20

2.6.1 Pengertian Kompensasi Seri 20
2.6.2 Pemodelan Kompensasi Seri..20
BAB 3 PEMODELAN RANGKAIAN FERORESONANSI DAN KOMPENSASI SERI 23
3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi 23
3.2 Pemodelan Transformator Daya 25
3.3 Nilai Tegangan Transformator Daya saat Kondisi Normal ..26
3.4 Nilai Cos Phi Sistem Transmisi tanpa Kompensasi 27
3.5 Nilai Kompensator Sistem Transmisi 28
3.6 Simulasi Pemodelan Feroresonansi 30
3.7 Pengambilan Data dan Pengolahan Data 30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 33
4.1 Simulasi Rangkaian Feroresonansi tanpa Pemasangan Kompensasi Seri 33
4.1.1 Respon Tegangan saat Kondisi Normal................................33
4.1.2 Respon Tegangan Saat Diberikan Trigger *Switching* Satu Fasa 35
4.1.3 Respon Tegangan Saat Diberikan Trigger *Switching* Dua Fasa, Fasa R dan Fasa S 36
4.1.4 Respon Tegangan saat Diberikan Trigger *Switching* Dua Fasa, Fasa R dan Fasa T...38
4.1.5 Respon Tegangan saat Diberikan Trigger *Switching* Dua Fasa, Fasa S dan Fasa T 40
4.1.6 Respon Tegangan saat Diberikan Trigger *Switching* Tiga Fasa 42
4.1.7 Hasil analisa karakteristik feroresonansi transformator daya sistem transmisi tanpa kompensasi seri 44
4.2 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Pemasangan Kompensasi Seri 45
4.2.1 Respon Tegangan saat Kondisi Normal................................45
4.2.2 Respon Tegangan saat diberikan respon switching satu fasa 47

4.2.3 Respon tegangan saat diberikan respon *switching* dua fasa, fasa R dan fasa S 48
4.2.4 Respon tegangan saat diberikan respon *switching* dua fasa, fasa R dan Fasa T 50
4.2.5 Respon tegangan saat diberikan respon *switching* dua fasa, fasa S dan Fasa T 52
4.2.6 Respon tegangan saat diberikan respon *switching* tiga fasa . 54
4.2.7 Hasil pengukuran tegangan transformator daya sistem transmisi dengan kompensasi 56
4.3 Hasil pengukuran tegangan transformator 57
4.3.1 Hasil pengukuran dengan *switching* satu fasa, fasa R 57
4.3.2 Hasil pengukuran dengan *switching* satu fasa, fasa S 59
4.3.3 Hasil pengukuran dengan *switching* satu fasa, fasa T 61
4.3.4 Hasil pengukuran dengan *switching* dua fasa, fasa RS 63
4.3.5 Hasil pengukuran dengan *switching* dua fasa, fasa RT 66
4.3.6 Hasil pengukuran dengan *switching* dua fasa, fasa ST 68
4.3.7 Hasil Pengukuran dengan *Switching* tiga fasa 70
BAB 5 KESIMPULAN 73
5.1 Kesimpulan 73
5.2 Saran 74
DAFTAR PUSTAKA 75
BIODATA PENULIS 77

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Single Line Diagram Sistem Transmisi 150 kV[1] 23
Gambar 3.2 Rangkaian Ekivalen Feroresonansi Reduksi[12]............... 24
Gambar 3.3 Rangkaian Simulasi Feroresonansi tanpa Kompensasi 24
Gambar 3. 4 Pemodelan Simulasi Feroresonansi dengan Kompensasi Seri 25
Gambar 3.5 Kurva Magnetisasi Transformator Daya [13].................... 26
Gambar 3.6 Rangkaian Ekivalen tanpa Kompensasi 27
Gambar 3.7 Rangkaian Ekivalen dengan Kompensasi Seri 29
Gambar 3. 8 Flowchart Pengambilan dan Pengolahan Data 32
Gambar 4.1 Pemodelan feroresonansi tanpa kompensasi seri 33
Gambar 4.2 Respon tegangan sistem transmisi tanpa kompensasi seri pada saat kondisi normal pada sisi primer 34
Gambar 4.3 Respon tegangan sistem transmisi tanpa kompensasi seri pada saat kondisi normal pada sisi sekunder... 34
Gambar 4.4 Respon Tegangan Sistem tanpa Kompensasi dengan *Switching* pada fasa R pada Sisi Primer 35
Gambar 4.5 Respon Tegangan Sistem tanpa Kompensasi dengan *Switching* pada fasa R pada Sisi Sekunder 36
Gambar 4.6 Respon tegangan sistem tanpa kompensasi pada fasa R dan fasa S dengan *switching* dua fasa, sisi primer 37
Gambar 4.7 Respon tegangan sistem tanpa kompensasi pada fasa T dengan *switching* dua fasa, sisi primer.. 37
Gambar 4.8 Respon tegangan sistem tanpa kompensasi seri dengan *switching* dua fasa, sisi sekunder 38
Gambar 4.9 Respon tegangan fasa R dan T, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa RT, sisi primer 39
Gambar 4.10 Respon tegangan fasa S, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa RT, sisi primer... 39
Gambar 4.11 Respon tegangan fasa R, S, dan T, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa RT, sisi sekunder... 40
Gambar 4.12 Respon tegangan fasa R dan S, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa ST, sisi primer.. 41

Gambar 4.13 Respon tegangan fasa T, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa ST, sisi primer 41
Gambar 4.14 Respon tegangan, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa ST, sisi sekunder 42
Gambar 4.15 Respon tegangan fasa R, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi primer..43
Gambar 4.16 Respon tegangan fasa S dan fasa T, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi primer 43
Gambar 4.17 Respon tegangan fasa R, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi sekunder..44
Gambar 4.18 Respon tegangan fasa S dan fasa T, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi sekunder...........................44
Gambar 4.19 Pemodelan feroresonansi dengan kompensasi seri..........45
Gambar 4.20 Respon tegangan sistem transmisi tanpa kompensasi seri pada saat kondisi normal pada sisi primer 46
Gambar 4.21 Respon tegangan sistem transmisi tanpa kompensasi seri pada saat kondisi normal pada sisi sekunder 47
Gambar 4.22 Respon tegangan sistem menggunakan kompensasi seri dengan *Switching* pada fasa R pada sisi primer 48
Gambar 4.23 Respon tegangan sistem menggunakan kompensasi dengan *Switching* pada fasa R pada sisi sekunder..48
Gambar 4.24 Respon tegangan fasa R dan S, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RS, sisi primer 49
Gambar 4.25 Respon tegangan fasa T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RS, sisi primer..49
Gambar 4.26 Respon tegangan fasa R, S, dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RS, sisi sekunder 50
Gambar 4.27 Respon tegangan fasa R dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RT, sisi primer.......................51
Gambar 4.28 Respon tegangan fasa S, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RT, sisi primer..51
Gambar 4.29 Respon tegangan fasa R, S, dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RT, sisi sekunder 52
Gambar 4.30 Respon tegangan fasa S dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa ST, sisi primer 53

Gambar 4.31 Respon tegangan fasa R, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa ST, sisi primer 53
Gambar 4.32 Respon tegangan fasa R,S, dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa ST, sisi sekunder 54
Gambar 4.33 Respon tegangan fasa R, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi primer.. 55
Gambar 4.34 Respon tegangan fasa S dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi primer............................. 55
Gambar 4.35 Respon tegangan fasa R, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi sekunder.. 56
Gambar 4.36 Respon tegangan fasa S dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi sekunder 56
Gambar 4.37 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa R...59
Gambar 4.38 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa S 61
Gambar 4.39 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa T.. 63
Gambar 4.40 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa R dan S 66
Gambar 4.41 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa R dan T 68
Gambar 4.42 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa S dan T.. 70
Gambar 4.43 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* 3 fasa 72

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Rangkaian Pemodelan Feroresonansi 25
Tabel 3.2 Parameter Transformator Daya 26
Tabel 3.3 Parameter sistem tenaga listrik.. 28
Tabel 4.1 Karakteristik feroresonansi sistem tanpa kompensasi pada sisi primer dan sekunder...45
Tabel 4.2 Karakteristik feroresonansi sistem transmisi dengan kompensasi seri, sisi primer dan sekunder 57
Tabel 4.3 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa R, sisi primer 58
Tabel 4.4 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa R, sisi sekunder 58
Tabel 4.5 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa S, sisi primer 60
Tabel 4.6 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa S, sisi sekunder 60
Tabel 4.7 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa S, sisi primer 62
Tabel 4.8 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa S, sisi sekunder 62
Tabel 4.9 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa RS, sisi primer 64
Tabel 4.10 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa RS, sisi sekunder 65
Tabel 4.11 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa RS, sisi primer 67
Tabel 4.12 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa RS, sisi sekunder 67
Tabel 4.13 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa ST, sisi primer 69
Tabel 4.14 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa ST, sisi sekunder 69
Tabel 4.15 Tegangan terukur dengan *switching* 3 fasa, sisi primer 71
Tabel 4.16 Tegangan terukur dengan *switching* 3 fasa, sisi sekunder... 71

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Energi Listrik merupakan salah satu energi yang memiliki peranan penting dalam kehidupan masyarakat. hampir dalam setiap kegiatan sehari-hari manusia menggunakan energi listrik. Listrik sendiri adalah sebuah energi yang dibangkitkan oleh generator untuk selanjutnya disalurkan melalui saluran transmisi dan saluran distribusi untuk dapat digunakan oleh konsumen dalam kehidupan sehari-hari. maka dari itu diperlukan adanya saluran energi listrik yang andal. tidak terkecuali pada sistem transmisi.

Sistem transmisi merupakan salah satu sistem yang penting dalam penyaluran energi listrik. Generator sebagai unit pembangkit biasanya terletak jauh dari pusat pemukiman, yang berarti diperlukan sebuah saluran jarak jauh supaya energi listrik tersebut dapat dinikmati oleh konsumen. Dalam penyaluran energi listrik jarak jauh, sangat mungkin terjadi rugi-rugi atau *losses* dalam bentuk panas. Maka dari itu diperlukan adanya sebuah saluran dengan nilai tegangan yang tinggi, supaya *losses* listrik bisa ditekan. Seperti yang telah diketahui bahwa semakin besar nilai arus berarti semakin kecilnya nilai dari tegangan yang ada maka *losses* juga akan semakin besar. Untuk meningkatkan maupun nantinya diturunkan lagi, ketika akan digunakan oleh konsumen, maka diperlukan sebuah komponen penting yaitu transformator daya[1]. Dalam salah satu kasus di industri, terdapat beban yang membutuhkan pasokan daya listrik semu (VAR). Selain itu dalam sistem transmisi jarak jauh juga sering dijumpai reaktansi induktif yang tinggi. Dengan adanya permasalahan tersebut maka nilai faktor daya dalam sistem akan bersifat *lagging,* oleh karena itu dalam sistem transmisi dipasangan kompensasi untuk menjaga stabilitas dengan memperbaiki faktor daya[2] [3].

Kompensasi merupakan sebuah upaya memanfaatkan komponen kapasitor yang dipasangkan secara seri maupun paralel dengan tujuan untuk menjaga keandalan sistem dengan memperbaiki faktor daya

ketika nilai reaktansi induktif dalam sistem bernilai tinggi, maupun mengurangi drop tegangan yang sering muncul dalam saluran jarak jauh, terutama pada saluran transmisi.

Kompensasi seri merupakan sebuah permodelan pemasangan kapasitor yang disusun secara seri terhadap beban dalam saluran. digunakan untuk mengkompensasi nilai induktansi yang ada dalam saluran transmisi jarak jauh, serta dapat mengurangi drop tegangan.

Adanya gangguan yang mungkin terjadi pada sitem kelistrikan merupakan faktor penyebab penurunan kinerja dari peralatan listrik, tanpa terkecuali transformator daya. Salah satu gangguan yang sering timbul adalah gangguan tegangan lebih (*over volatge)*. Gangguan tegangan lebih merupakan salah satu faktor yang mengakibatkan rusaknya peralatan listrik yang terhubung pada sistem, karena tegangan yang tersalurkan dapat melebihi rating tegangan dari peralatan listrik tersebut. Tegangan lebih ini berupa lonjakan nilai tegangan yang berosilasi atau bergetar secara cepat dengan frekuensi tinggi pada suatu fasa gelombang tegangan. Fenomena inilah yang dikenal sebagai fenomena feroresonansi.

Feroresonansi adalah sebuah fenomena yang terjadi pada saluran sistem kelistrikan yang didalamnya terkandung kapasitansi dan induktansi magnetisasi non-linier dan dimulai dengan adanya kejadian atau *trigger* transien, seperti membuka saklar, adanya hubung singkat, atau fenomena petir[4]. Fenomena feroresonansi ini dapat menyebabkan timbulnya gangguan tegangan lebih yang dapat bersifat berbahaya bagi sistem kelistrikan yang dapat menurunkan keandalan sistem kelistrikan.

Dalam studi ini akan dibahas mengenai fenomena feroresonansi dengan melakukan pemodelan simulasi terhadap transformator daya pada sistem transmisi yang didalamnya terdapat kompensasi seri. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisis kemunculan fenomena feroresonansi yang mungkin terjadi dengan adanya kapasitor yang terpasang secara seri pada kompensasi yang terhubung dengan induktansi magnetisasi non-linier yang terdapat pada transformator daya. Transformator daya yang digunakan yaitu transformator *step – down* 150 kV – 20 kV dan diberlakukan proses *switching* 1 fasa, 2 fasa dan 3 fasa sebagai gangguan. Metode analisis yang dilakukan pada studi ini yaitu dengan membandingkan hasil plot tegangan sisi

primer dan sisi sekunder sebelum dan sesudah dipasang kompensasi seri dari simulasi rangkaian feroresonansi tersebut.

Tujuan yang ingin dicapai studi ini adalah untuk mendapatkan karakteristik feroresonansi dan nilai *overvoltage* yang dihasilkan dari sistem transmisi tanpa adanya kompensasi seri dan perbedaan nilai kompensasi yang dipakai berdasarkan plot hasil tegangan yang diperoleh, sehingga dapat diketahui pengaruh dari pemasangan kompensasi seri dan perbedaan nilai kompensasi yang dapat berpengaruh terhadap munculnya fenomena feroresonansi agar dapat diprediksi tentang gejala yang mungkin terjadi dalam sistem transmisi yang tepat, sehingga dapat digunakan sebagai referensi dalam desain sistem ketenagalistrikan yang paling aman dan efektif.

Metode yang digunakan dalam studi ini, yang pertama adalah melakukan studi literatur serta pengumpulan data mengenai feroresonansi dan metode umum yang biasa digunakan untuk menganalisis. Kemudian adalah menentukan parameter dari komponen yang akan digunakan dalam rangkaian pemodelan, seperti nilai kapasitansi, nilai induktansi nonlinear, serta nilai resistansi dari suatu sistem. Langkah berikutnya adalah melakukan pemodelan rangkaian simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Setelah rangkaian pemodelan disimulasikan, akan dilakukan analisis terhadap hasil keluaran dari simulasi tersebut berupa grafik fungsi tegangan terhadap waktu, serta grafik fungsi tegangan terhadap nilai kompensator sebagai rujukan untuk menarik kesimpulan studi ini.

1.2 Sistematika Penulisan

Bab 1 berisi pendahuluan yang mengandung latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, serta manfaat dan relevansi yang dicapai dalam pelaksanaan studi ini.

Bab 2 berisi teori-teori pendukung mengenai sistem transmisi 150 KV khususnya transformator daya, kompensasi seri dengan permodelan yang ada dan teori-teori feroresonansi pada sistem tenaga listrik.

Bab 3 pemodelan simulasi rangkaian feroresonansi ketika diberlakukan gangguan sesaat berupa *switching*, simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ATPDraw.

Bab 4 berisi hasil dari simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi yang telah dilakukan, kemudian dilakukan analisis terhadap kemunculan feroresonansi pada tiap-tiap rangkaian pemodelan tersebut.

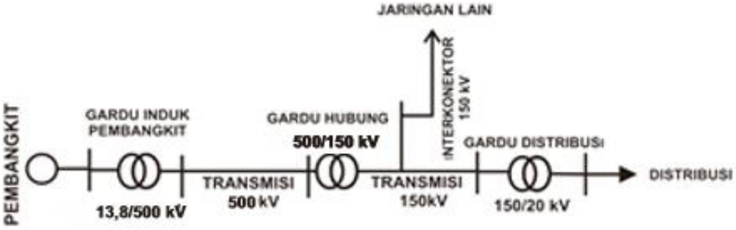
Bab 5 berisi kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil analisis dan saran yang bersangkutan dengan studi ini baik yang telah dilakukan maupun untuk penelitian atau studi kedepannya.

BAB 2
SISTEM TENAGA LISTRIK, FERORESONANSI, DAN KOMPENSASI SERI.

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga listrik merupakan sistem yang tercakup mulai dari pembangkitan listrik hingga dapat dimanfaatkan konsumen dalam kegiatan mereka sehari-hari. Sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian penting yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi (penyaluran), dan sistem distribusi. Pada umumnya peralatan pembangkitan tenaga listrik terletak jauh dari pemukiman penduduk, yang artinya pembangkit tenaga listrik terletak jauh dari pusat beban. Maka dari itu diperlukan sebuah saluran jarak jauh yang menghubungkan antara sistem pembangkit dengan pusat beban atau konsumen. Level tegangan yang terbangkit dalam sistem sistem pembangkit cenderung rendah, yaitu sekitar 6 kV sampai dengan 24 kV. Dalam penyaluran tenaga listrik terutama penyaluran jarak jauh kemungkinan adanya rugi-rugi daya berbanding lurus dengan besarnya arus, artinya semakin besar arus yang tersalur dalam saluran maka rugi-rugi daya juga akan semakin besar. Dengan besarnya rugi-rugi daya tersebut dapat dikatakan bahwa saluran tersebut memiliki kualitas daya listrik yang rendah, yang berarti ketersediaan energi dari pembangkitan yang dapat dinikmati konsumen menurun atau rendah. Sehingga, secara ekonomi penjualan energi listrik akan lebih rendah, sehingga keuntungan penjualan listrik pun akan menurun. Oleh karena itu untuk mempertahankan kualitas daya listrik tetap baik maka dalam saluran transmisi dibutuhkan penaikan tegangan. Tegangan tersebut dinaikkan menggunakan peralatan transformator sebelum memasuki saluran transmisi hingga mencapai tegangan sebesar 150 kV sampai 500 kV. Setelah disalurkan melalui saluran transmisi selanjutnya tenaga listrik disalurkan menuju pusat beban melalui sistem distribusi. Karena penggunaan energi listrik dalam konsumen tidak setinggi tegangan pada sistem transmisi maka sebelum memasuki sistem distribusi tegangan listrik kembali diturunkan sesuai kebutuhan beban, sehingga terwujud penyaluran energi listrik dari dari pembangkit ke

pusat beban dengan efektif. Skematika sistem tenaga listrik dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skematika Sistem Tenaga Listrik[1]

2.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

2.2.1 Pengertian Sistem Transmisi

Sistem transmisi merupakan sebuah bagian penghubung tenaga listrik yang terinterkoneksi antara satu dengan yang lainnya. Sistem transmisi merupakan sistem yang menghubungkan gardu pembangkit dengan gardu distribusi [5].

Pada pembangkitan, gardu induk akan berfungsi sebagai *step up* untuk menyalurkan daya dan tegangan menjadi tegangan untuk transmisi, sedangkan didekat dengan beban gardu induk akan berfungsi *step down* untuk menurunkan tegangangan menjadi distribusi ke konsumen listrik [1]. Hubungan mengenai tegangan dan arus dalam sistem transmisi dijelaskan dalam persamaan berikut:

$$V = IZ \tag{2.1}$$

Keterangan:

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (A)

Z = Impedansi (Ω)

Tegangan saluran transmisi sengaja dinaikkan menjadi tegangan paling maksimal, hal tersebut dilakukan sebagai upaya untuk mengurangi rugi-rugi pada saluran. Hal tersebut dapat dijelaskan pada persamaan 2.2 di bawah ini.

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

Keterangan:

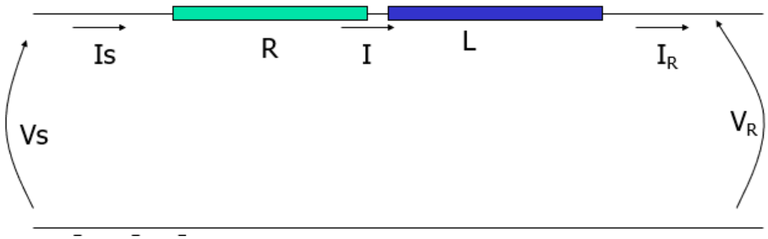
ΔP = Rugi-rugi daya transmisi (Watt)

I^2 = Arus pada kawat transmisi (Ampere)

2.2.2 Klasifikasi Sistem Transmisi

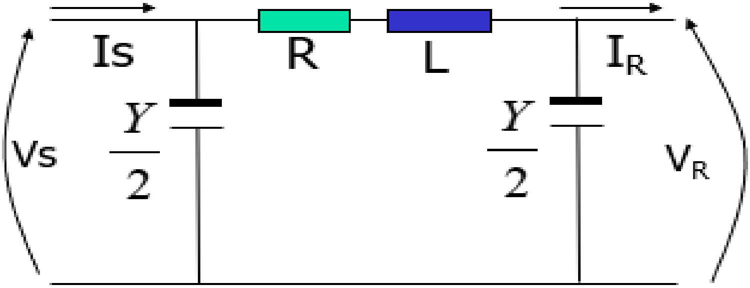
Seperti yang telah dibahas sebelumnya, dalam sistem transmisi telah dikenal adanya rugi-rugi daya, selain disebabkan oleh konduktor listrik rugi-rugi daya juga dipengaruhi oleh panjangnya saluran transmisi. Menurut panjangnya saluran transmisi dibagi menjadi tiga jenis:

1. Saluran Pendek
   Tranmisi jenis ini adalah sistem transmisi yang memiliki panjang saluran kurang dari sama dengan 50 Mil. Pada saluran pendek pemodelan sistem transmisi yang dipakai adalah komponen resistor (R) dan komponen induktor (L)



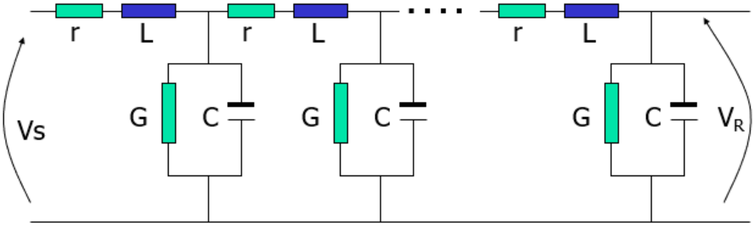
Gambar 2.2 Pemodelan Saluran Pendek

2. Saluran Menengah
   Tranmisi saluran menengah merupakan saluran yang memiliki panjang saluran antara lebih dari 50 Mil hingga kurang dari 150 Mil. Pada saluran menengah terdapat empat jenis pemodelan yaitu saluran menengah phi-1, saluran menengah phi-2, saluran menengah T-1, dan saluran menengah T-2. Pemodelan pada saluran ini menggunakan 3 komponen yaitu resistor (R), induktor (L), dan Kapasitor (C)



Gambar 2.3 Pemodelan Saluran Menengah

3. Saluran Panjang
   Transmisi saluran panjang merupakan saluran yang memiliki panjang saluran lebih dari sama dengan 150 Mil. Pemodelan pada saluran panjang menggunakan 4 komponen yaitu resistor (R), induktor (L), kapasitor (C), dan Reaktansi saluran(G)



Gambar 2. 4 Pemodelan Saluran Panjang

2.3 Gardu Induk

Dalam penyaluran tenaga listrik dibutuhkan tegangan yang bervariasi sesuai kondisi, seperti yang telah dibahas sebelumnya, maka dari itu dibutuhkan sebuah stasiun listrik yang berisi peralatan-peralatan tegangan tinggi, termasuk transformator sebagai pengatur tegangan. Terdapat dua jenis gardu induk dalam saluran tenaga listrik, gardu induk *step up* untuk menyalurkan daya dan tegangan menjadi tegangan untuk transmisi. Setelah melewati sistem transmisi maka akan masuk ke gardu induk kedua, sebagai gardu induk *step down* untuk menurunkan nilai tegangan untuk selanjtnya disalurkan ke jaringan distribusi dan

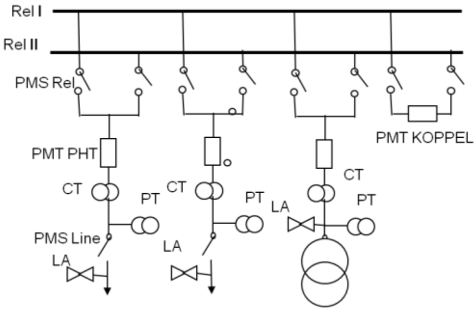
konsumen[1]. Gardu induk berdasarkan dari tegangannya dapat diklasifikasikan menjadi bebarapa jenis, antara lain :

- Gardu Induk Transmisi

Gardu induk transmisi adalah gardu induk yang berfungsi mengubah level tegangan saluran dari tegangan pembangkitan menuju tegangan transmisi untuk selanjutnya disalurkan menuju gardu induk distribusi. Gardu induk transmisi yang ada di PLN adalah tegangan tinggi 150 KV dan tegangan tinggi 30 KV.

- Gardu Induk Distribusi

Gardu induk distribusi yaitu gardu induk yang menerima daya dari gardu induk transmisi yang kemudian menurunkan tegangan melalui transformator daya menjadi tegangan menengah (20 KV, 12 KV atau 6 KV) untuk kemudian tegangan diturunkan kembali menjadi tegangan rendah (127/220 V atau 220/380 V) untuk langsung di salurkan ke konsumen.



Gambar 2.5 Single Line Diagram Gardu Induk

2.4 Transformator

2.4.1 Pengertian Transformator

Transformator adalah peralatan yang berfungsi untuk mengkonversi arus atau tegangan bolak-balik dari nilai tertentu menjadi nilai yang lain. Konstruksi dasar transformator adalah sebuah inti besi yang terdiri dari kepingan besi yang disekat satu dengan lain dan dililiti oleh dua bagian kumparan konduktor. Satu sisi kumparan adalah bagian primer dan sisi yang lain adalah kumparan sekunder. Pada transformator

jumlah belitan kumparan tergantung dari fungsi kumparan tersebut sebagai bagian tegangan tinggi atau rendah. Semakin tinggi tegangan semakin banyak atau semakin tebal lilitan kumparan.

Gambar 2.6 Transformator Daya

2.4.2 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator berdasarkan proses induksi listrik dimana arus listrik dapat menimbulkan medan magnet atau medan magnet dapat menimbulan arus listrik. Jika pada salah satu sisi kumparan pada trafo dialiri arus bolak-balik (AC), maka timbul garis gaya magnet berubah-ubah pada kumparan. Kumparan sekunder yang konstruksinya pada inti yang sama dengan kumparan primer akan menerima garis gaya magnet dari kumparan primer yang besarnya berubah-ubah, sehingga pada belitan sekunder timbul induksi elektromagnetik. Akibatnya antara dua ujung kumparan primer dan sekunder terdapat perbedaan potensial sehingga menimbulkan tegangan. Jumlah garis gaya magnet yang masuk kumparan sekunder adalah sama dengan jumlah garis gaya yang keluar dari kumparan primer. Medan magnet atau fluks yang berubah-ubah pada inti besi akan menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) sebesar [6] :

$$e = -N\frac{d\Phi}{dt} \tag{2.3}$$

Keterangan:

e = GGL induksi (V)

N = jumlah lilitan

dΦ = perubahan garis-garis gaya magnet (Wb)

dt = perubahan waktu (s)

Berdasarkan konstruksi transformator pada Gambar 2.2, hubungan tegangan dan arus antara sisi primer dan sisi sekunder adalah :

$$\frac{Vp(t)}{Vs(t)} = \frac{Np}{Ns} = a \quad (2.4)$$

Keterangan:

Vp = Tegangan primer
Vs = Tegangan sekunder
Np = Belitan primer
Ns = Belitan sekunder

$$\frac{Np}{Ns} = \frac{Is(t)}{Ip(t)} = \frac{1}{a} \quad (2.5)$$

Keterangan:

Ip = Arus primer
Is = Arus sekunder
Np = Belitan primer
Ns = Belitan sekunder

2.4.3 Transformator Daya

Transformator daya merupakan salah satu peralatan listrik yang berfungsi mengubah nilai tegangan dari tegangan tinggi menjadi tegangan rendah maupun sebaliknya. Bagian utama dari transformator daya yaitu inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, dan tangki konservator, peralatan bantu transformator, dan peralatan proteksi.

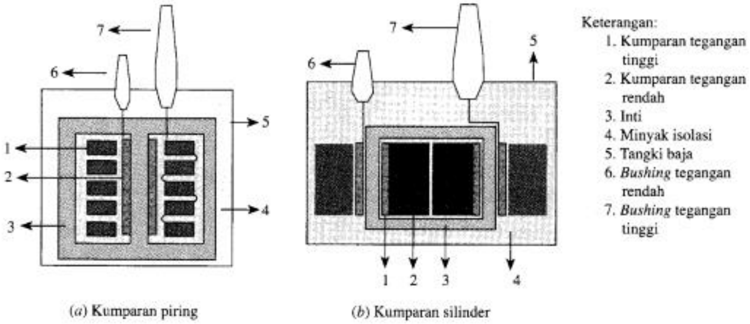
Dalam menghasilkan tegangan, ketika transformator terhubung dengan sumber tegangan bolak – balik maka akan menghasilkan gaya gerak listrik yang besarnya [1]:

$$E_1 = 4{,}44\ f\ N_1 \phi\ (\text{volt}) \quad (2.6)$$

$$E_2 = 4{,}44\ f\ N_2\ \phi\ (\text{volt}) \quad (2.7)$$

Dimana E_1 dan E_2 tegangan yang terbangkit di kumparan primer dan sekunder transformator, nilai f merupakan frekuensi tegangan dari

sumber bolak –balik, N_1 dan N_2 merupakan belitan kumparan pada bagian primer dan sekunder transformator, dan ϕ merupakan besaran fluks magnetik pada inti transformator [1].



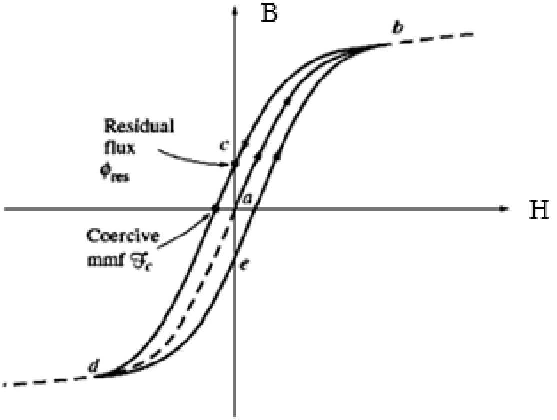
Gambar 2.7 Konstruksi Transformator Daya [1]

2.4.4 Kurva Magnetisasi Transformator

Kurva magnetisasi transformator merupakan sebuah pemodelan kurva yang terdapat didalam inti transformator sebagai akibat dari adanya interaksi antara kerapatan fluks magnet (B) dengan kuat medan magnet (H).[4] Dari pemodelan kurva diatas dapat kita ambil kesimbulan bahwa dalam transformator terdapat karakteristik yang tidak linear didalam intinya.

Dari Gambar 2.4, jalur a-b merupakan kondisi awal transformator pada saat diberikan suplai. Ketika transformator diberi arus maka kerapatan fluks akan meningkat hingga mencapai titik saturasinya. Ketika nilai arus menurun, maka fluks juga akan menurun tidak melewati jalur awalnya melainkan melewati jalur b-c-d, dikarenakan adanya fluks sisa pada inti. Ketika nilai arus kembali meningkat, maka nilai fluks juga akan meningkat melalui jalur d-e-b, yang dikarenakan adanya faktor fluks sisa pada inti transformator.

Fluks sisa pada inti transformator dipengaruhi oleh bahan material dari inti transformator. Semakin baik bahan material inti transformator maka kurva magnetitsasi akan semakin rapat dan linear, sebaliknya apabila material inti transformator yang digunakan kurang baik maka kurva magnetisasi akan cenderung lebar.



Gambar 2.8 Kurva Magnetisasi Transformator

2.5 Feroresonansi

2.5.1 Resonansi

Resonansi adalah sebuah gejala yang dapat terjadi pada saluran energi listrik yang memiliki komponen kapasitor dan induktor sehingga terdapat sebuah interaksi antar kedua komponen didalamnya. Resonansi dibedakan menjadi dua yaitu resonansi dalam rangkaian seri (resonansi seri) dan resonansi dalam rangkaian paralel (resonansi paralel atau antiresonansi)[7]. Resonansi seri terjadi bila reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif, sedangkan resonansi paralel terjadi bila mana perbandingan suseptansi induktif sama dengan suseptansi kapasitif . resonansi bukan merupakan gejala yang bagus, karena resonansi dapat menjadi gangguan pada peralatan listrik. Dibawah ini merupakan persyaratan sebuah rangkaian listrik yang memiliki nilai induktansi dan kapasitansi untuk terjadinya resonansi seri.

$$XL = XC \tag{2.17}$$

Keterangan :
XL = Reaktansi Induktif
XC = Reaktansi Kapasitif

Syarat terjadinya resonansi paralel untuk rangkaian listrik yang memiliki nilai induktansi dan kapasitansi berdasarkan persamaan di bawah ini.

$$\frac{1}{XL} = \frac{1}{XC} \tag{2.18}$$

Keterangan :
XL = Reaktansi Induktif
XC = Reaktansi Kapasitif

Syarat dari frekuensi (ω_n) yang dapat memunculkan resonansi pada sistem adalah sebagai berikut :

$$LC\omega_n^2 = 1 \quad .(2.19)$$

Keterangan :
L = induktor (Henry)
C = kapasitor (Farad)
ω_n = frekuensi sudut (Rad/s)

Nilai dari arus (I) sama dengan :

$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R}} \tag{2.20}$$

Keterangan :
I = arus (Ampere)
E = tegangan (Volt)
R = resistor (Ω)

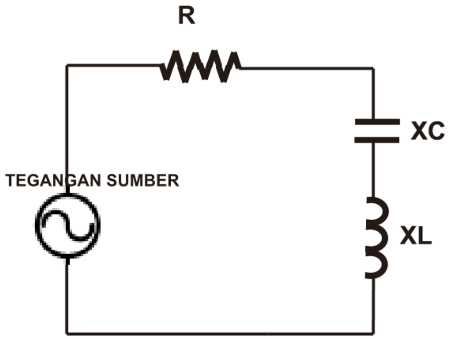
Dengan penurunan rumus akan didapatkan k yang merupakan amplitudo tegangan pada terminal kapasitor dan induktor yang merupakan faktor kualitas yang dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$k = \frac{L\omega_n}{R} = \frac{1}{RC\omega_n} \tag{2.21}$$

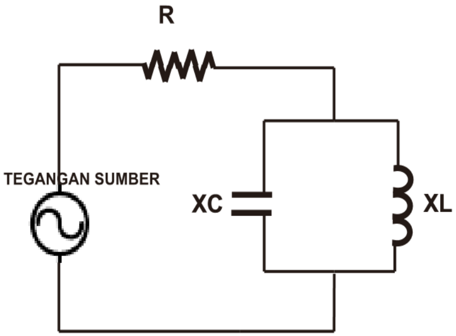
Keterangan :

k = Faktor kualitas
R = resistor (Ω)
C = kapasitor (Farad)
W_n = frekuesi sudut (Rad/s)

Pada kasus lainnya, terdapat resonansi harmonisa yang dapat menyebabkan efek berbahaya yang dapat menggangu peralatan listrik, Resonansi harmonisa akan terjadi jika nilai ω_n sama dengan ω_0 yang merupakan ferukensi dari sistem yang dapat terbentuk dari beberapa tipe mesin.



Gambar 2.9 Rangkaian Resonansi Seri [7]



Gambar 2.10 Rangkaian Resonansi Paralel [7]

2.5.2 Feroresonansi

Feroresonansi merupakan sebuah fenomena listrik yang terjadi pada sistem yang memiliki kapasitansi konstan dan induktansi yang non-linear pada inti transformator. Ketika kondisi normal induktansi pada transformator akan bekerja secara linear pada kurva magnetisasinya, namun ketika terjadi sebuah *trigger* transien seperti petir, gangguan hubung singkat, *switching*, maupun *motor starting* dapat memicu transformator bekerja hingga nilai induktansinya mencapai ujung kurva magnetisasinya sehingga menjadi tidak linear lagi. Ketika nilai induktansi transformator sama dengan nilai kapasitansi sistem maka akan menyebabkan perubahan pada gelombang tegangannya. Perubahan gelombang tegangan ini pada frekensi tertentu menyebabkan osilasi yang cukup lama dan menyebabkan *over-voltage* yang menyebabkan kerusakan pada peralatan[8].

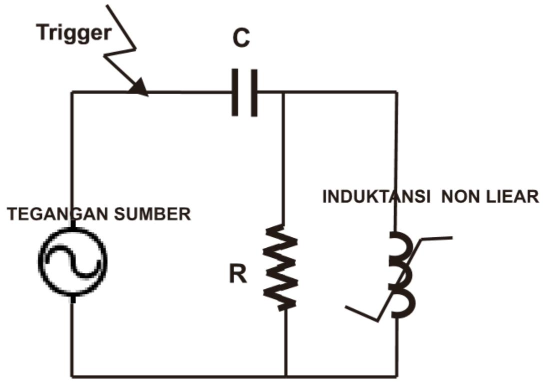
Perbedaan resonansi dan feroresonansi yaitu resonansi linear terjadi pada rangkaian seri yang terdiri dari komponen resistor, induktor, dan kapasitor. Sebuah resonansi baru akan terjadi pada satu frekuensi, sesuai dengan frekuensi sumber. Respon dari resonansi adalah tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada satu keadaan steady-state[7]. Persamaan untuk mencari frekuensi resonansi adalah sebagai berikut:

$$f_R = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{LC}} \qquad (2.22)$$

keterangan :

f_R = Frekuensi resonansi (Hz)
L = Induktansi (Henry)
C = kapasitor (Farad)

Sebuah feroresonansi sederhana terdiri dari resistor, kapasitor, dan induktansi nonlinear. Elemen tersebut merupakan pemodelan dari suatu sifat kapasitif dan induktif yang diperoleh dari penggunaan peralatan listrik dalam sistem tenaga listrik. Feroresonansi dapat terjadi pada apabila terdapat sebuah *trigger* transien seperti *switching*, petir, gangguan hubung singkat, dan *motor starting* frekuensi tertentu, ketika induktansi non-linier sama dengan kapasitansi sistem. Tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada beberapa keadaan steady-state [9].



Gambar 2.11 Rangkaian Feroresonansi Sederhana

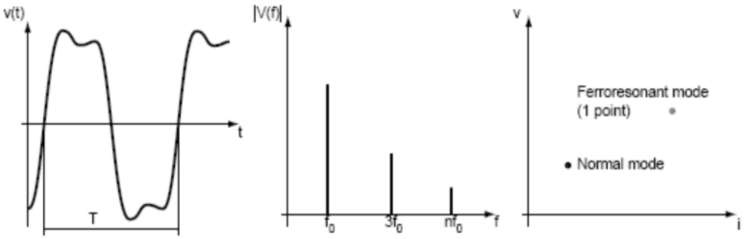
2.5.3 Karakteristik Feroresonansi

Berdasarkan pada bentuk gelombang yang muncul pada sistem tenaga, eksperimen yang telah dilakukan pada model system yang direduksi, serta simulasi numerik, feroresonansi dapat dibedakan menjadi 4 (empat) jenis yang berbeda. Keempat jenis feroresonansi tersebut adalah :

1. *Fundamental* Mode

Karakteristik feroresonansi ini merupakan jenis yang paling mudah untuk dianalisa karena gelombang tegangan feroresonansi (Vm) berisolasi dengan frekuensi yang sama dengan tegangan sistemnya (Vs). Ketika Nilai *peak* tegangan dari Vm lebih besar dari Vs dapat menyebabkan pemanasan pada sistem dan gangguan lainnya. Selain itu jenis feroresonansi ini dapat menyebabkan arus yang cukup besar yang secara termal dapat merusak peralatan[4].

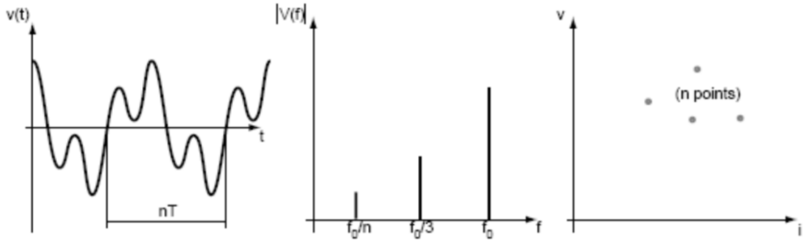
Feroresonansi *fundamenta mode* juga memiliki sebuahciri khas dimana ketika terjadi feroresonansi *fundamental,* maka juga disertai harmonik sebesar kelipatan integer dari f_o. Gambar 2.12 merupakan model *Fundamental* dari feroresonansi.



Gambar 2.12 Model Fundamental[4]

2. *Subharmonic* Mode

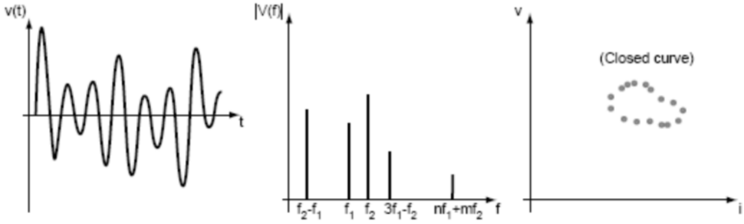
Karakteristik feroresonansi ini memiliki osilasi yang lebih besar dari nilai Vs pada *Fundamental* mode. Setengah Siklus postif dan negatif pada gelombang dapat berbentuk simetris dan asimetris. Pada feroresonansi ini terdapat dua jenis bentuk gelombang dari frekuensi yaitu 20 Hz dan 30 Hz. Subharmmonic 20 Hz merupakan bentuk gelombang feroresonansi yang sering muncul namun *Subharmonic* 30 Hz yang paling sering diobservasi[4]. Untuk mode ini memiliki periode kelipatan integer dari periode fundamental sistem nT_o Kondisi *Subhamonic* ini biasanya terdapat pada orde ganjil. Model ini ditunjukkan pada Gambar 2.13



Gambar 2.13 Model Subharmonik[4]

3. *Quasi-periodic* Mode

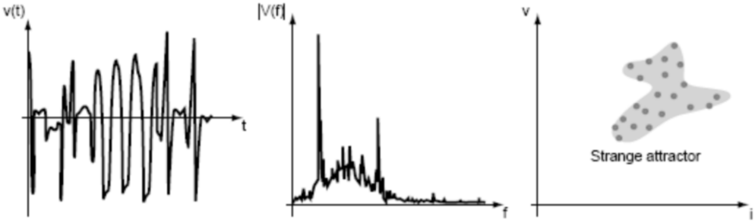
Karakteristik feroresonansi ini memiliki pola yang berulang secara periodik namun memiliki besar *peak* yang berbeda pada setiap pengulangannya. Feroresonansi jenis ini memiliki kesamaan sinyal pada gelombang periodik maka dari itu disebut *Quasi-periodic*[4]. Karakteristik ini juga memiliki frekuensi harmonik yang lebih komplek[10]. Model ini terlihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Model Quasi-periodik[4]

4. *Chaotic* Mode

Karakteristik feroresonansi ini memiliki bentuk gelombang yang tidak periodik, besaran tegangan yang berbeda, dan nilai *peak* yang berantakan. Feroresonansi jenis ini merupakan jenis yang paling mudah didefinisi namun untuk analisa sinyalnya yang paling rumit[4]. Spektrum yang terhubung merupakan spektrum yang kontinu karena tidak membatalkan frekuensi apapun. *Chaotic mode* tergolong sinyal yang tidak periodik dan memiliki frekuensi harmonisa tinggi[10]. Gambarnya dapat terlihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 *Chaotic* Model[4]

2.6 Kompensasi Seri

2.6.1 Pengertian Kompensasi Seri

Kompensasi seri adalah sebuah upaya pemasangan kapasitor secara seri dalam saluran transmisi. Tujuan pemasangan kompensasi ini adalah untuk mengurangi porsi dari reaktansi induktif yang dapat memengaruhi faktor daya menjadi *lagging*, sehingga faktor daya listrik akan kembali meningkat, karena pengaruh dari beban kapasitif akan menjadikan sistem menjadi *leading,* dengan meningkatnya faktor daya pada sistem transmisi, maka kemampuan transmisi daya listrikpun akan meningkat[11].

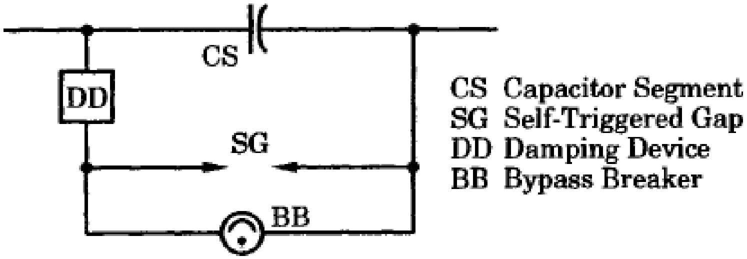
Dalam saluran transmisi tegangan tinggi jarak jauh terdapat beberapa pertimbangan yang mendukung pemasangan kompensasi seri yaitu semakin kecil impedansi pada sebuah saluran, maka stabilitas sistem akan meningkat, semakin kecil impedansi maka pengaturan tegangan juga akan meningkat, dan peningkatan pembebanan pada saluran dapat meningkatkan kegunaan sistem transmisi, sehingga secara ekonomi akan berdampak baik.

2.6.2 Pemodelan Kompensasi Seri

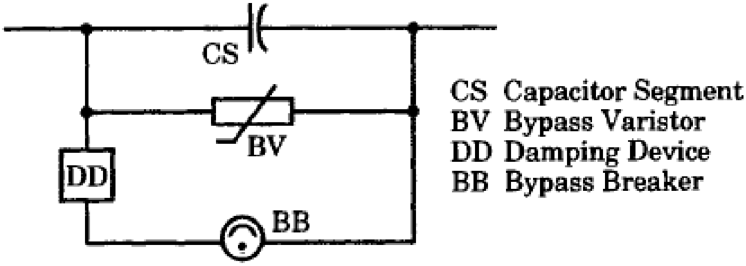
Dalam sistem tenaga listrik terdapat banyak faktor yang perlu dipertimbangkan, karena memengaruhi kinerja maupun keamanan dari sistem tenaga listrik tersebut, salah satunya adalah dari sektor pengaman. Sistem pengaman atau *proteksi* diperlukan agar kondisi peralatan tenaga listrik dapat berumur panjang karena dapat terhindar dari gangguan yang dapat merusak peralatan. Dalam sebuah sistem transmisi yang melibatkan kompensasi seri sistem pengamannya akan lebih komplek dikarenakan perlunya adanya pengaman pada peralatan kapasitor bank yang dipasang

sebagai kompensator, ketika adanya arus gangguan. Sehingga komponen kapasitor bank tidak mengalami kerusakan akibat gangguan yang muncul[11].

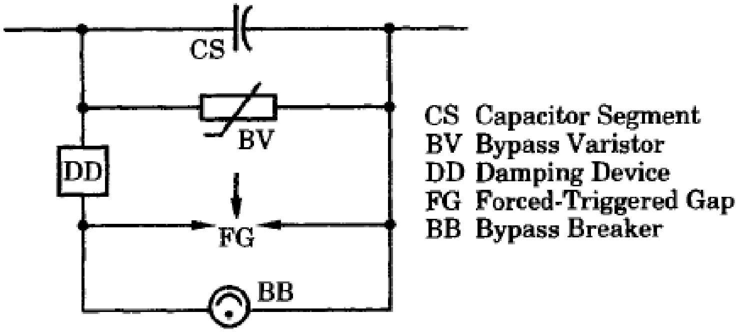
Terdapat tiga pemodelan sistem proteksi pada kompensasi seri yaitu sistem proteksi menggunakan *bypass Gaps,* sistem proteksi menggunakan resistor non-linear, dan sistem proteksi menggunakan *bypass gaps* dilengkapi dengan resistor non-linear. Adapaun pemodelannya ditunjukkan pada gambar



Gambar 2.16 Sistem Proteksi menggunakan celah gap[11]



Gambar 2. 17 Sistem Proteksi Menggunakan Non-linier Resistor[11]

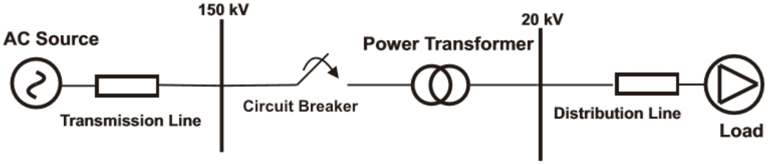


Gambar 2. 18 Sistem Proteksi Menggunakan Celah Gap dan Non-linier Resistor[11]

BAB 3
PEMODELAN RANGKAIAN FERORESONANSI DAN KOMPENSASI SERI

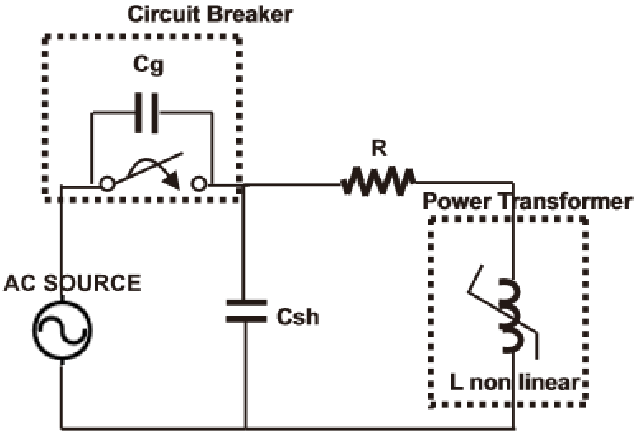
3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

Dalam studi kali ini akan dilakukan penelitian terhadadap fenomena feroresonansi yang terdapat dalam sistem transmisi. Sehingga dilakukan simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi yang dimulai dari pembangkitan sebagai sumber, melewati saluran transmisi yang dilengkapi dengan saklar sebagai *trigger*, melewati gardu distribusi yang didalamnya terdapat transformator, dengan pemodelan pada gambar 3.1



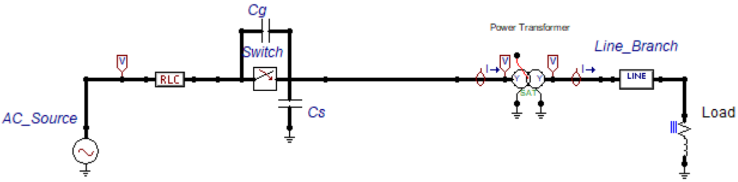
Gambar 3.1 Single Line Diagram Sistem Transmisi 150 kV[1]

Pemodelan diatas selanjutnya dapat direduksi menjadi rangkaian ekivalen feroresonansi seperti pada gambar 3.2. dalam pemodelan feroresonansi reduksi didalamnya terdapat komponen sumber, Cg, Csh, L non linier dan R. Csh merupakan hambatan yang bersifat kapasitif dari saluran transmisi dengan tanah. Cg adalah nilai kapasitif sebagai akibat dari pengoperasian saklar sebuah *cirkuit breaker*. L non linier merupakan sebuah induksi non-linier yang terdapat pada inti transformator. Sementara R merupakan pemodelan terhadap rugi-rugi yang terdapat pada inti transformator. Dari rangkaian reduksi dapat dimodelkan sebuah rangkaian feroresonansi pada perangkat lunak ATP Draw. Pemodelan rangkaian feroresonansi dapat dilihat pada gambar 3.3



Gambar 3.2 Rangkaian Ekivalen Feroresonansi Reduksi[12]

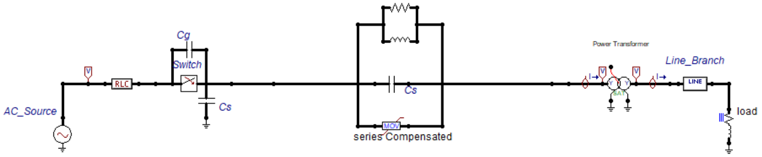
Pemodelan rangkaian feroresonansi meliputi pemodelan rangkaian dengan *trigger transien* berupa operasi *switching*. Gambar 3.3 merupakan pemodelan rangkain pada kondisi normal dan tanpa kompensasi yang nantinya akan digunakan sebagai pembanding dari hasil simulasi rangkaian feroresonansi yang telah diberikan kompensasi seri. Dalam pemodelan rangkaian ini terdapat komponen-komponen utama yaitu sumber 150 kV, resistor, kapasitor, *switch*, dan induktor non-linier. Simulasi pemodelan ini dilakukan pada aplikasi lunak *Alternative Transient Program* atau ATPDraw.



Gambar 3.3 Rangkaian Simulasi Feroresonansi tanpa Kompensasi

Tujuan dari pemodelan rangkaian feroresonansi diatas adalah untuk mengetahui dampak dari sebuah pemasangan kompensasi seri terhadap feroresonansi, dengan cara membandingkan hasil simulasi dari

rangkaian simulasi feroresonansi tanpa Kompensasi seperti pada gambar 3.3, dengan rangkaian feroresonansi setelah dipasang kompensasi seri seperti pada gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Pemodelan Simulasi Feroresonansi dengan Kompensasi Seri

Dalam simulasi ini parameter yang diubah-ubah adalah nilai dari kapasitor yang terpasang didalam kompensasi seri. Parameter pada rangkaian feroresonansi dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter Rangkaian Pemodelan Feroresonansi

Parameter	**Nilai**	**Satuan**
Sumber Tegangan	150	kV
Frekuensi	50	Hz
Grading Capacitance (Cg)	0.05	µF
Shunt Capacitance (Cs)	0.2	µF
Switching (Switch)	0.1	s

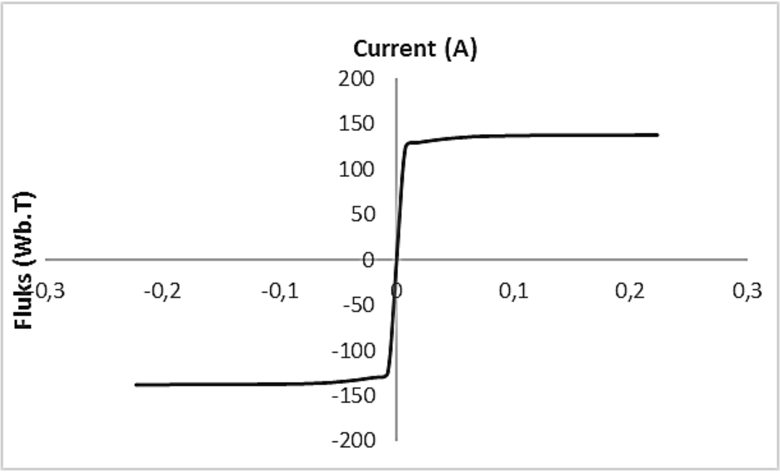
3.2 Pemodelan Transformator Daya

Pada studi kali ini akan diteliti dampak dari pemasangan kompensasi seri pada sistem transmisi 150 kV, maka dari itu transformator yang digunakan adalah transformator *step down* tiga fasa yang mengubah tegangan dari 150 kV menjadi 20 kV, dengan parameter sebagai berikut

Tabel 3.2 Parameter Transformator Daya

Parameter	Nilai	Satuan
Resistansi Primer	220	Ω
Induktansi Primer	1,745	mH
R magnetisasi	6500000	Ω
Resistansi Sekunder	5	Ω
Induktansi Sekunder	0,039	mH

Dalam fenomena feroresonansi dibutuhkan adanya parameter terkait induktansi non-linier yang nantinya akan berinteraksi dengan kapasitansi yang ada. L non-linier sendiri didapat dari kharakteristik inti transformator daya, dalam wujud kurva magnetisasi antara besar fluks dengan arus yang ditunjukkan pada gambar 3.5



Gambar 3.5 Kurva Magnetisasi Transformator Daya [13]

3.3 Nilai Tegangan Transformator Daya saat Kondisi Normal

Pada kondisi normal, fenomena feroresonansi belum dijumpai karena belum adanya proses *switching*. Hasil dari simulasi kondisi normal dapat dijadikan sebagai respon pembanding dengan simulasi rangkaian

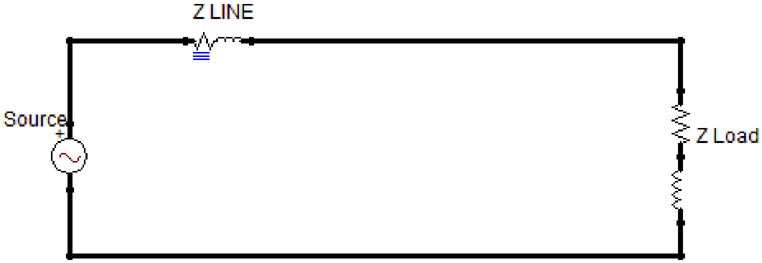
menggunakan gangguan *switching*. Sumber tegangan yang digunakan adalah tegangan bolak-balik (AC) rms *line-line* ($V_{L\text{-}L\text{-}rms}$) 150 kV, 50 Hz. Tegangan pada sisi beban rangkaian adalah tegangan bolak-balik (AC) rms *line-line* ($V_{L\text{-}L\text{-}rms}$) 20 kV, 50 Hz. Tegangan puncak dihitung dengan persamaan berikut :

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

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

3.4 Nilai Cos Phi Sistem Transmisi tanpa Kompensasi

Sistem transmisi dalam studi ini merupakan sistem transmisi jarak jauh dengan tegangan sumber sebesar 150 kV. Sesuai kasus yang diangkat dalam permasalahan studi ini, maka sistem transmisi yang ada merupakan sistem transmisi yang bersifat *lagging,* sehingga dalam rangkaian ekivalen ini dipasang beban yang bersifat induktif. Sehingga, selanjutnya harus diberikan rangkaian kompensasi untuk memperbaiki faktor daya. Rangkaian ekivalen sistem transmisi tanpa kompensasi ini dapat dilihat pada gambar 3.6



Gambar 3.6 Rangkaian Ekivalen tanpa Kompensasi

Dalam rangkaian ekivalen diatas terdapat beberapa komponen penting seperti sumber AC (Source), Impedansi saluran (Z Line), dan Impendansi beban (Z Load). Sehingga dapat diketahui nilai cos phi saluran dengan rumus

$$Z^2 = R^2 + X^2 \tag{3.3}$$

$$Cos\ \emptyset = \frac{R}{Z} \tag{3.4}$$

Dari rumus diatas dapat kita cari nilai faktor daya yang dibutuhkan dalam pemodelan yang kita pakai dengan parameter yang dapat dilihat pada tabel 3.3 pertama dicari nilai impedansi total dari sistem

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

$$Z^2 = 3228^2\Omega + 2798^2\Omega$$

$$Z^2 = 18248788\ \Omega$$

$$Z = 4271{,}8\ \Omega$$

Selanjutnya dari perbandingan tahanan resitif dengan impedansi total sistem, didapatkan nilai faktor daya dari sistem

$$Cos\ \emptyset = \frac{R}{Z}$$

$$Cos\ \emptyset = \frac{3228}{4271{,}8}$$

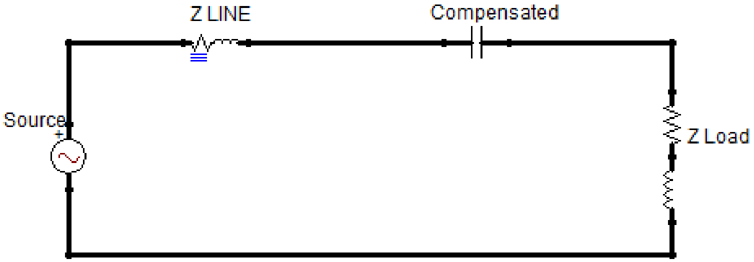
$$Cos\ \emptyset = 0{,}75$$

Tabel 3.3 Parameter sistem tenaga listrik

Parameter	Nilai	Satuan
Sumber AC	150	kV
Impedansi saluran transmisi	28,38	Ω
Impedansi saluran distribusi	5	Ω
Impedansi transformator	220	Ω
Impedansi beban	4121,45	Ω
Tahanan resitif sistem	3228	Ω
Tahanan induktif sistem	2798	Ω

3.5 Nilai Kompensator Sistem Transmisi

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, sistem transmisi dalam kasus ini memerlukan kompensasi seri untuk meningkatkan stabilitas dan memperbaiki faktor daya. Sehingga rangkaian ekivalen sistem transmisi dapat berubah menjadi seperti pada gambar 3.7



Gambar 3.7 Rangkaian Ekivalen dengan Kompensasi Seri

Untuk memperbaiki power faktor maka dipasang kompensasi seri berupa kapasitor bank. untuk mengetahui besaran kapasitor yang dipasang maka perlu ditentukan cos phi baru yang diinginkan, sehingga dapat dipecahkan dengan rumus

$$Q = P\ (Tan\emptyset 1 - Tan\emptyset 2) \quad (3.5)$$

$$Q = \frac{V^2}{Xc} \quad (3.6)$$

$$Xc = \frac{1}{j\omega C} \quad (3.7)$$

Dari rumus diatas dapat kita cari nilai daya reaktif yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya listrik. dalam kasus ini faktor daya hendak diperbaiki menjadi 0,85

$$Q = \sqrt{3}x3{,}95x10^6\ (0{,}88 - 0{,}61)$$

Q = 1,8 MVAR

Selanjutnya, dari nilai daya reaktif yang ada dapat kita temukan nilai impedansi kapasitif saluran

$$1{,}8\ MVAR = \frac{150000^2}{Xc}$$

$$Xc = 12188\Omega$$

$$12188 = \frac{1}{2x3{,}14x50xC}$$

$$C = 0{,}3\ \mu F$$

Dari perhitungan diatas dapat kita ambil nilai bahwa untuk mengkompensasi faktor daya listrik menjadi 0,85 dibutuhkan kompensasi seri sebesar 0,3 μF

3.6 Simulasi Pemodelan Feroresonansi

Pada studi ini dilakukan simulasi pada pemodelan feroresonansi tanpa kompensasi seperti pada gambar 3.3 dengan *switching* 3 fasa serempak. Setelah didapatkan hasilnya maka dilakukan simulasi pada pemodelan feroresonansi dengan kompensasi seperti pada gambar 3.4 dengan *switching* 3 fasa serempak. untuk pemodelan ini digunakan beberapa nilai kapasitor dari yang kecil ke yang lebih besar sesuai perhitungan kompensasi sebagai perbaikan faktor daya. Untuk selanjutnya diamati hasilnya sebagai dampak dari pemasangan kompensasi terhadap feroresonansi.

3.7 Pengambilan Data dan Pengolahan Data

Pada studi ini, pemodelan rangkaian feroresonansi disimulasikan pada perangkat lunak EMTP atau ATPDraw. *Trigger* yang dipake pada simulasi ini berupa *trigger switching* dengan sistem terbuka satu fasa pada tiap fasa, dua fasa (fasa RS, RT, dan ST), dan tiga fasa secara serempak yang terjadi pada detik ke 0,1. Simulasi dalam ATPDraw ini dijalankan selama 1 detik dengan waktu variabel step 1 μ detik.

Pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi yang diteliti yaitu pemodelan sistem transmisi 150 kV tanpa tambahan kompensasi seri dan sebuah pemodelan saluran transmisi yang didalam salurannya terdapat sebuah pemodelan kompensasi yang terpasang secara seri, dengan komponen utama berupa kapasitor bank, damping, dan *metal oxide varistor* (MOV). Dalam simulasi ini nilai kapasitor bank yang diuji bervariasi dimulai dari nilai 0,3 μF, 0,4 μF, 0,5 μF, 0,6 μF, 0,7 μF, dan 0,9 μF. Sesuai dengan nilai faktor daya yang ingin dicapai. Dengan membuat rangkaian pemodelan feroresonansi tersebut, kemudian dilakukan simulasi pada perangkat lunak ATPDraw. Simulasi dilakukan sebanyak masing-masing tiga kali pada setiap kasus, sehingga didapatkan hasil yang valid. Simulasi dilakukan pertama pada kondisi normal tanpa *trigger switching* pada setiap pemodelan. Dilanjutkan ketika diberikan *trigger switching* satu fasa pada setiap fasanya, dua fasa dengan variasi *switching* fasa RS, fasa RT, dan fasa ST, dan yang terakhir adalah presos *switching* tiga fasa serempak.

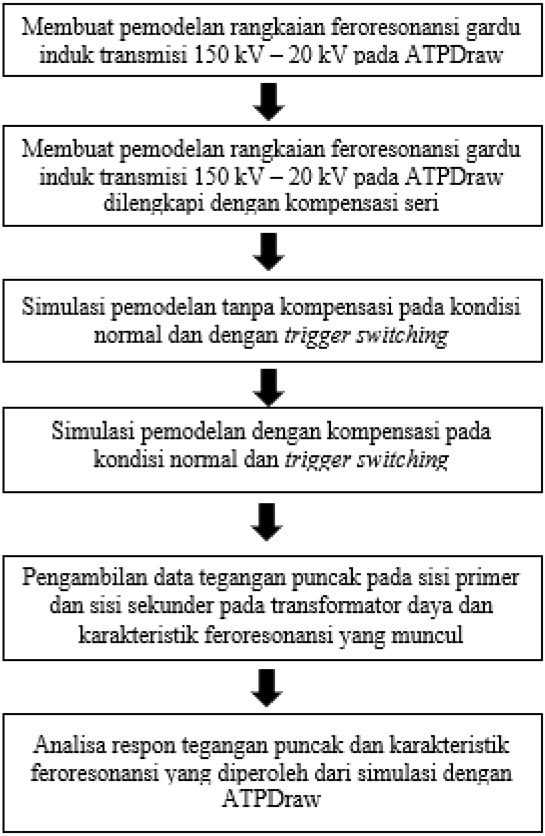
Data yang diambil dalam simulasi ini berupa nilai serta respon gelombang tegangan pada sisi primer dan sisi sekunder transformator

daya untuk setiap kasus yang telah disebutkan sebelumnya. Pengambilan data dilakukan dengan cara melihat plot gelombang yang muncul pada simulasi ATPDraw. Dengan melihat deret *fourier* yang muncul maka dianalisa jenis mode feroresonansi yang tercipta. Selanjutnya dengan pengamatan grafik puncak akan didapatkan nilai *overvoltage* tertinggi yang muncul setelah dilakukan proses simulasi. Selanjutnya dari hasil karakteristik yang muncul dilakukan perbandingan sebelum dan setelah dipasangkan kompensasi seri dan dilihat plot nilai tegangan puncak tertinggi yang muncul dari setiap kasus dengan penambahan nilai kompensasi seri dari 0 µF saat kondisi tanpa kompensasi seri dan dalam rentang 0,3 µF sampai 0,9 µF.

Sehingga proses pengambilan data simulasi melalui perangkat ATPDraw dapat dirangkum sebagai berikut

- Menjalankan simulasi Feroresonansi dua pemodelan didalam perangkat lunak ATPDraw
- Melalukan plot grafik dengan diamati urutan *fourier* sehingga bisa dianalisa mengenai karakteristik feroresonansi
- Mengamati nilai tegangan puncak tertinggi yang muncul didalam grafik tegangan hasil simulasi
- Merangkum data yang sudah terkumpul dari setiap kasus dalam dua pemodelan feroresonansi
- Membandingkan karakteristik dari dua pemodelan rangkaian
- Membandingkan nilai tegangan puncak tertinggi dari kondisi tanpa kompensasi dengan pemasangan kompensasi.

Berikut merupakan flowchart pengambilan dan pengolahan data selama studi ini.

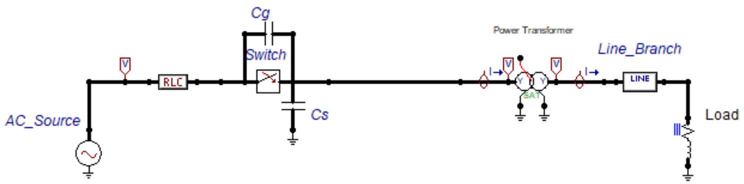


Gambar 3. 8 Flowchart Pengambilan dan Pengolahan Data

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Simulasi Rangkaian Feroresonansi tanpa Pemasangan Kompensasi Seri

Dalam simulasi ini akan disimulasikan sebuah kasus dalam sebuah sistem transmisi tanpa pemasangan kompensasi seri. Jadi hanya melibatkan pemodelan dasar dari feroresonansi pada sistem transmisi yang dapat dilihat dalam gambar 4.1.



Gambar 4.1 Pemodelan feroresonansi tanpa kompensasi seri

4.1.1 Respon Tegangan saat Kondisi Normal

Dalam simulasi yang pertama ini dilihat respon tegangan yang muncul pada setiap fasa. Tegangan yang diteliti adalah tegangan pada sisi primer trafo dan sisi sekunder trafo.

Secara perhitungan didapatkan nilai tegangan *line-netral* ($V_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa sisi primer adalah:

$$V_{L\text{-}Nrms} = \frac{150000\ \text{V}}{\sqrt{3}} = 86602{,}5\ \text{V}$$

Sementara nilai tegangan puncak *line-netral* ($V_{L\text{-}Npeak}$) pada tiap fasa adalah :

$$V_{L\text{-}Npeak} = 86602{,}5 \times \sqrt{2} = 122474{,}5\ \text{V}$$

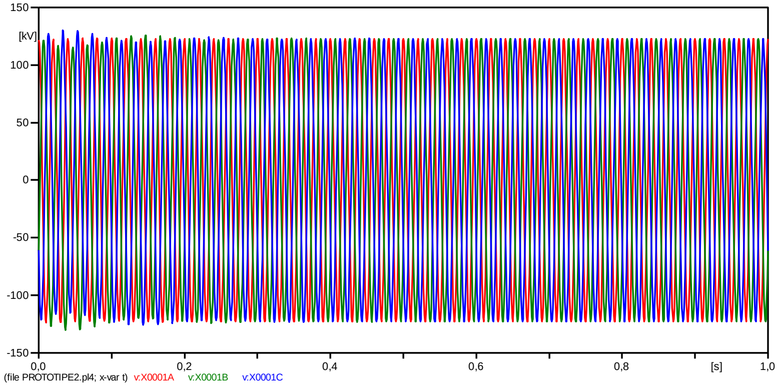
Selanjutnya adalah perhitungan nilai tegangan pada sisi sekunder pada setiap fasa, didapatkan nilai tegangan *line-netral* ($V_{L\text{-}Nrms}$) adalah:

$$V_{L\text{-}Nrms} = \frac{20000\ \text{V}}{\sqrt{3}} = 11547{,}005\ \text{V}$$

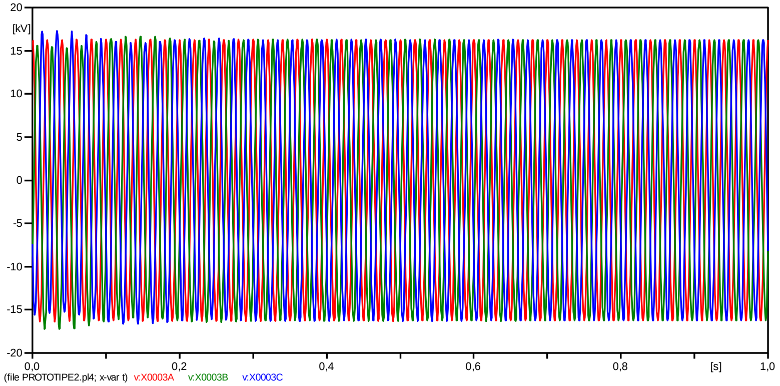
Sementara nilai tegangan puncak *line-netral* ($V_{L\text{-}Npeak}$) pada tiap fasa adalah :

$$V_{L\text{-}Npeak} = 11547{,}005 \times \sqrt{2} = 16329{,}9 \text{ V}$$

Selanjutnya akan dilihat respon plot tegangan hasil simulasi dari ATPDraw. Didapatkan hasil bahwa tegangan hasil plot simulasi sesuai dengan hasil dari perhitungan



Gambar 4.2 Respon tegangan sistem transmisi tanpa kompensasi seri pada saat kondisi normal pada sisi primer

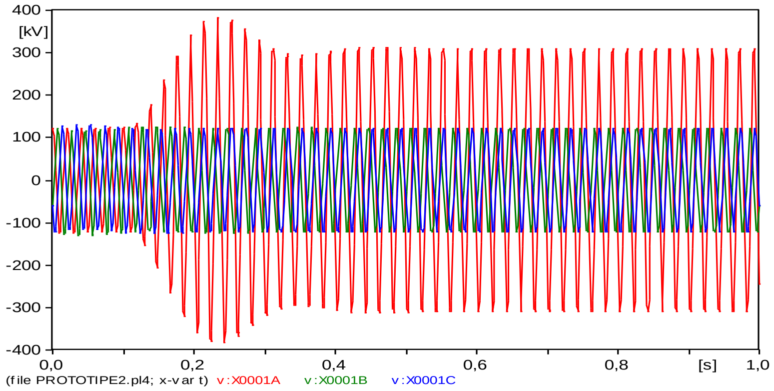


Gambar 4.3 Respon tegangan sistem transmisi tanpa kompensasi seri pada saat kondisi normal pada sisi sekunder

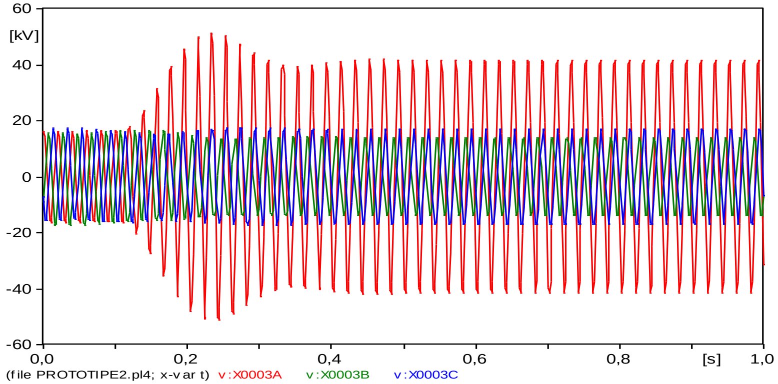
4.1.2 Respon Tegangan Saat Diberikan Trigger *Switching* Satu Fasa

Simulasi pada kasus ini diberikan sebuah *trigger* berupa operasi *switching* terbuka satu fasa pada fasa R dalam rangkaian simulasi feroresonansi tanpa kompensasi. Operasi *switching* tersebut dilakukan pada detik ke 0,1. Dalam simulasi ini diamati nilai dari tegangan primer dan sekunder dari transformator daya.

Dalam simulasi ini dapat dilihat respon tegangan yang muncul dalam gambar 4.3. Dari hasil tersebut dapat kita lihat bahwa simulasi feroresonansi tanpa kompensasi seri dengan *trigger switching* satu fasa, pada fasa R memunculkan fenomena feroresonansi dengan karakteristik cenderung *fundamental mode* pada fasa R dan kondisi tetap normal pada kedua fasa yang lain. Dalam simulasi ini juga disimulasikan gangguan *switching* satu fasa pada fasa S dan Fasa T, didapatkan karakteristik yang sama, namun memiliki nilai puncak yang berbeda dengan *switching* pada fasa R.



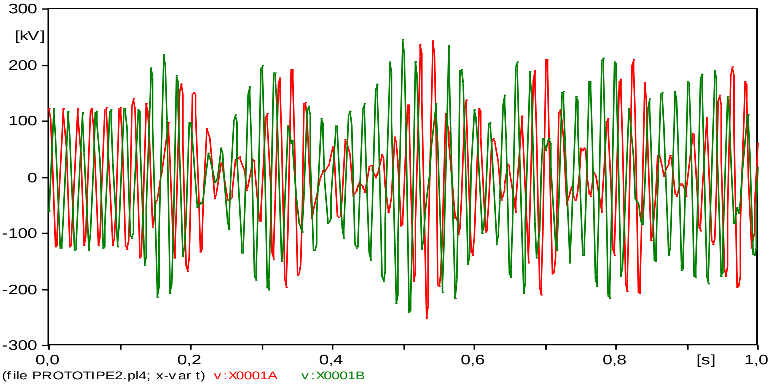
Gambar 4.4 Respon Tegangan Sistem tanpa Kompensasi dengan *Switching* pada fasa R pada Sisi Primer



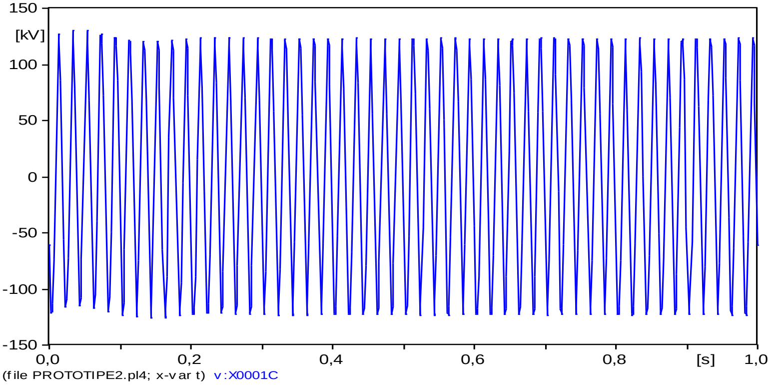
Gambar 4.5 Respon Tegangan Sistem tanpa Kompensasi dengan *Switching* pada fasa R pada Sisi Sekunder

4.1.3 Respon Tegangan Saat Diberikan Trigger *Switching* Dua Fasa, Fasa R dan Fasa S

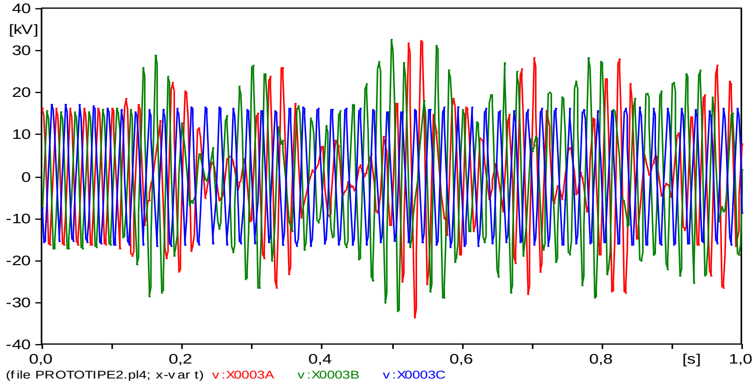
Simulasi pada kasus ini diberikan sebuah *trigger* berupa operasi *switching* terbuka dua fasa pada fasa R dan S dalam rangkaian simulasi feroresonansi tanpa kompensasi. Operasi *switching* tersebut dilakukan pada detik ke 0,1. Dalam simulasi ini diamati nilai dari tegangan primer dan sekunder dari transformator daya. Dapat dilihat pada simulasi ini karakteristik feroresonansi yang muncul di sisi primer transformator pada fasa R cenderung *Quasi Periodic* Mode dan pada fasa S cenderung *subharmonic* mode. Untuk fasa T tidak diberika trigger *switching* didapatkan hasil kondisi normal. Pada sisi sekunder juga didapatkan karakteristik feroresonansi yang sama seperti pada sisi primer, namun memiliki nilai tegangan puncak yang berbeda.



Gambar 4. 6 Respon tegangan sistem tanpa kompensasi pada fasa R dan fasa S dengan *switching* dua fasa, sisi primer



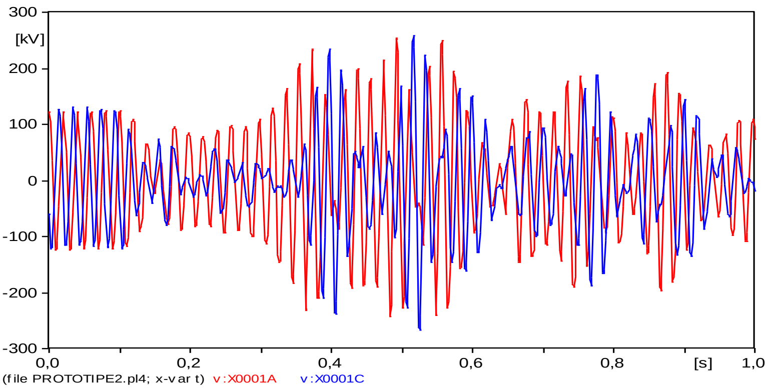
Gambar 4.7 Respon tegangan sistem tanpa kompensasi pada fasa T dengan *switching* dua fasa, sisi primer



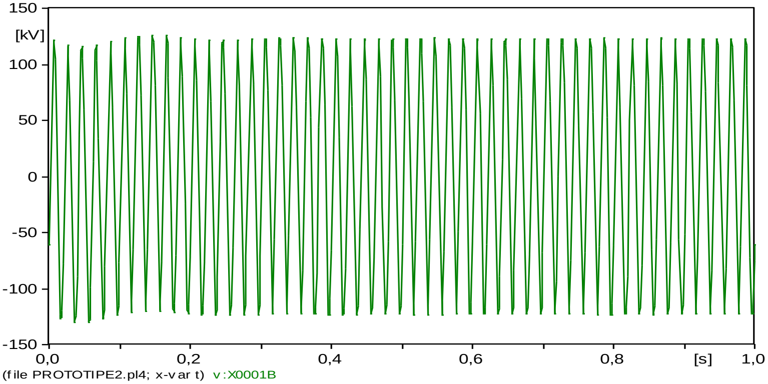
Gambar 4.8 Respon tegangan sistem tanpa kompensasi seri dengan *switching* dua fasa, sisi sekunder

4.1.4 Respon Tegangan saat Diberikan Trigger *Switching* Dua Fasa, Fasa R dan Fasa T

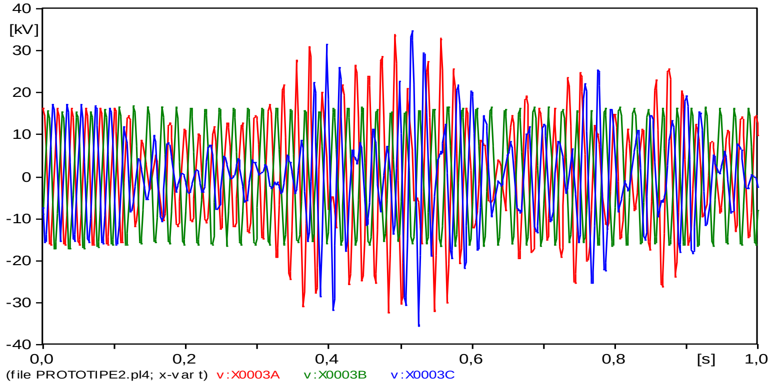
Simulasi pada kasus ini diberikan sebuah *trigger* berupa operasi *switching* terbuka dua fasa pada fasa R dan T dalam rangkaian simulasi feroresonansi tanpa kompensasi. Operasi *switching* tersebut dilakukan pada detik ke 0,1. Dalam simulasi ini diamati nilai dari tegangan primer dan sekunder dari transformator daya. Dapat dilihat pada simulasi ini karakteristik feroresonansi yang muncul di sisi primer transformator pada fasa R cenderung *Quasi Periodic* Mode dan pada fasa T cenderung *subharmonic* mode. Untuk fasa S tidak diberika trigger *switching* didapatkan hasil kondisi normal. Pada sisi sekunder juga didapatkan karakteristik feroresonansi yang sama seperti pada sisi primer, namun memiliki nilai tegangan puncak yang berbeda.



Gambar 4.9 Respon tegangan fasa R dan T, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa RT, sisi primer



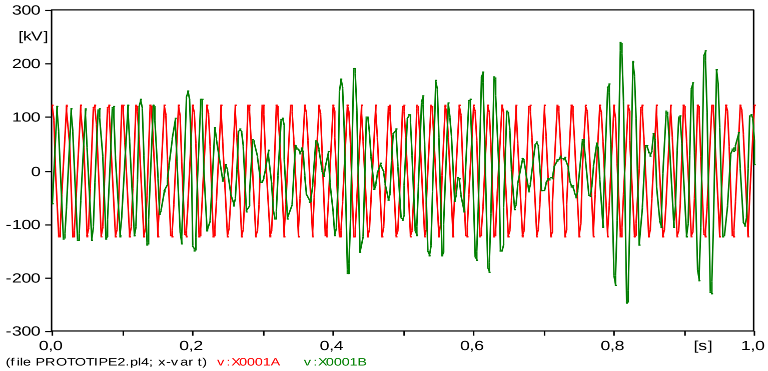
Gambar 4.10 Respon tegangan fasa S, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa RT, sisi primer



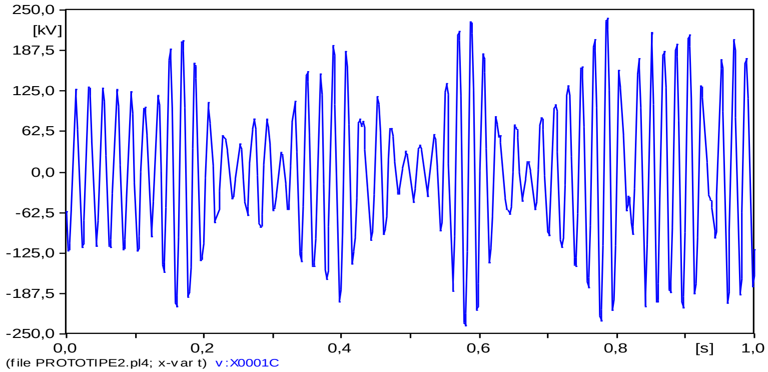
Gambar 4.11 Respon tegangan fasa R, S, dan T, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa RT, sisi sekunder

4.1.5 Respon Tegangan saat Diberikan Trigger *Switching* Dua Fasa, Fasa S dan Fasa T

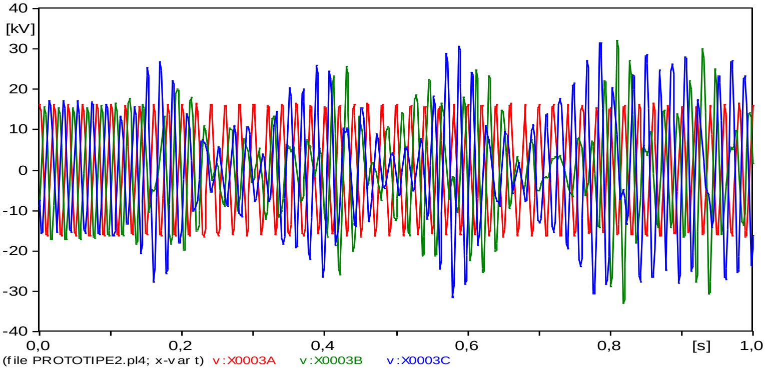
Simulasi pada kasus ini diberikan sebuah *trigger* berupa operasi *switching* terbuka dua fasa pada fasa S dan T dalam rangkaian simulasi feroresonansi tanpa kompensasi. Operasi *switching* tersebut dilakukan pada detik ke 0,1. Dalam simulasi ini diamati nilai dari tegangan primer dan sekunder dari transformator daya. Dapat dilihat pada simulasi ini karakteristik feroresonansi yang muncul di sisi primer transformator pada fasa S dan T cenderung *Subharmonic* Mode. Untuk fasa R tidak diberikan trigger *switching* didapatkan hasil kondisi normal. Pada sisi sekunder juga didapatkan karakteristik feroresonansi yang sama seperti pada sisi primer, namun memiliki nilai tegangan puncak yang berbeda.



Gambar 4.12 Respon tegangan fasa R dan S, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa ST, sisi primer



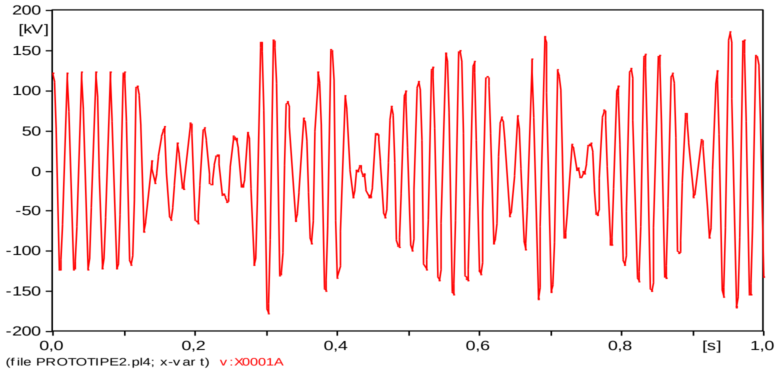
Gambar 4.13 Respon tegangan fasa T, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa ST, sisi primer



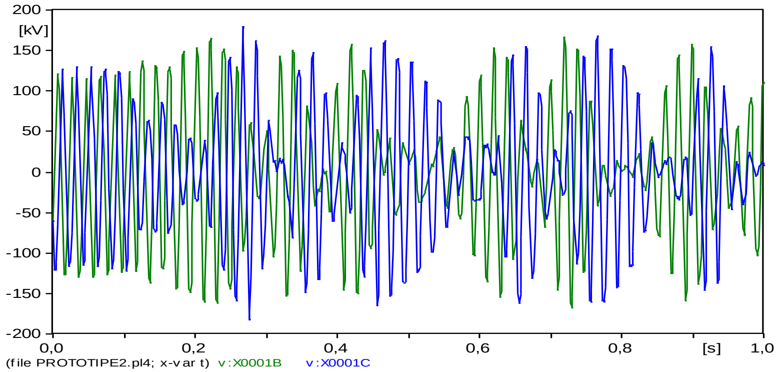
Gambar 4.14 Respon tegangan, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* fasa ST, sisi sekunder

4.1.6 Respon Tegangan saat Diberikan Trigger *Switching* Tiga Fasa

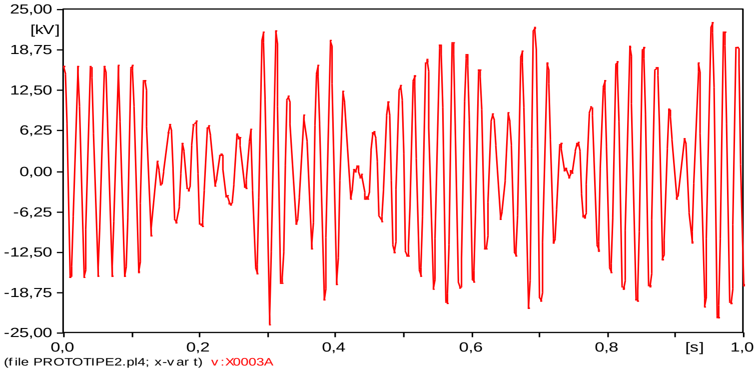
Simulasi pada kasus ini diberikan sebuah *trigger* berupa operasi *switching* terbuka tiga fasa dalam rangkaian simulasi feroresonansi tanpa kompensasi. Operasi *switching* tersebut dilakukan pada detik ke 0,1. Dalam simulasi ini diamati nilai dari tegangan primer dan sekunder dari transformator daya. Dapat dilihat pada simulasi ini karakteristik feroresonansi yang muncul cenderung *subharmonic* mode pada fasa R, *chaotic* mode pada fasa S, dan *quasi periodic* pada fasa T. Karakteristik yang didapatkan pada sisi primer maupun sekunder sama, namun memiliki perbedaan pada nilai tegangan yang terukur.



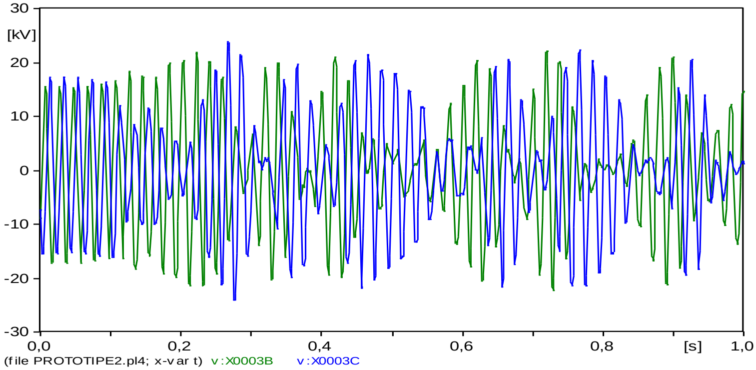
Gambar 4.15 Respon tegangan fasa R, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi primer



Gambar 4.16 Respon tegangan fasa S dan fasa T, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi primer



Gambar 4.17 Respon tegangan fasa R, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi sekunder



Gambar 4.18 Respon tegangan fasa S dan fasa T, sistem tanpa kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi sekunder

4.1.7 Hasil analisa karakteristik feroresonansi transformator daya sistem transmisi tanpa kompensasi seri

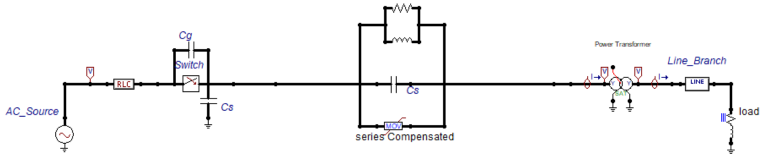
Setelah dilakukan serangkaian simulasi pada rangkaian feroresonansi tanpa kompensasi didapatkan fenomena feroresonansi, yang tampak dengan munculnya nilai *overvoltage* pada fasa yang diberikan perlakuan *switching*. Dalam tabel 4.1 ditampilkan tentang karakteristik feroresonansi yang muncul dalam setiap kasus

Tabel 4.1 Karakteristik feroresonansi sistem tanpa kompensasi pada sisi primer dan sekunder

Kondisi Switching	Karakteristik Feroresonansi		
	R	S	T
Normal	Normal	normal	Normal
Satu Fasa	*Fundamental*	*Fundamental*	*Fundamental*
Dua Fasa (R,S)	*Quasi Periodic*	*Subharmonic*	Normal
Dua Fasa (R,T)	*Quasi Periodic*	Normal	*Subharmonic*
Dua Fasa (S,T)	Normal	*Subharmonic*	*Subharmonic*
Tiga Fasa	*Subharmonic*	*Chaotic*	*Quasi Periodic*

4.2 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Pemasangan Kompensasi Seri

Dalam simulasi ini akan disimulasikan sebuah kasus dalam sebuah sistem transmisi yang didalamnya terdapat pemasangan kompensasi seri. Untuk rangkaian simulasi yang dipakai hampir sama dengan rangkain feroresonansi pada pembahasan sebelumnya, namun ditambahkan komponen kapasitor yang dipasang seri yang berfungsi sebagai kompensator. Nilai kompensator yang dipasang dalam studi ini dimulai dari 0,3 µF sampai 0,9 µF pemodelan rangkaian yang dipakai dapat dilihat pada gambar 4.19



Gambar 4.19 Pemodelan feroresonansi dengan kompensasi seri

4.2.1 Respon Tegangan saat Kondisi Normal

Sama halnya dengan simulasi sebelumnya, dalam simulasi kali ini yang pertama kali dilihat adalah respon tegangan yang muncul pada setiap fasa pada kondisi normal atau tanpa adanya gangguan *switching*. Tegangan yang diteliti adalah tegangan pada sisi primer trafo dan sisi sekunder trafo.

Secara perhitungan didapatkan nilai tegangan *line-netral* ($V_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa sisi primer adalah:

$$V_{L\text{-}Nrms} = \frac{150000\ V}{\sqrt{3}} = 86602{,}5\ V$$

Sementara nilai tegangan puncak *line-netral* ($V_{L\text{-}Npeak}$) pada tiap fasa adalah :

$$V_{L\text{-}Npeak} = 86602{,}5 \times \sqrt{2} = 122474{,}5\ V$$

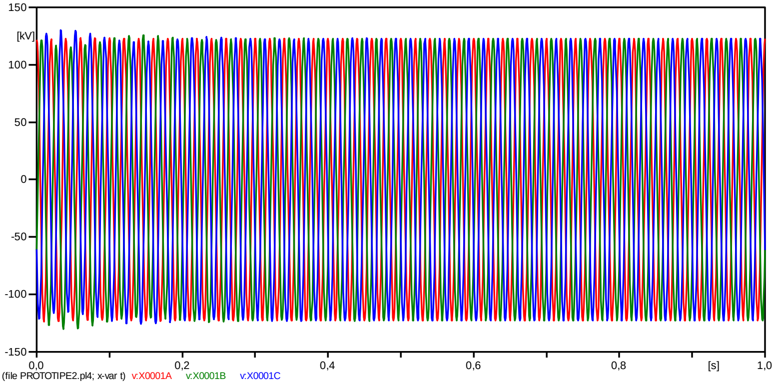
Selanjutnya adalah perhitungan nilai tegangan pada sisi sekunder pada setiap fasa, didapatkan nilai tegangan *line-netral* ($V_{L\text{-}Nrms}$) adalah:

$$V_{L\text{-}Nrms} = \frac{20000\ V}{\sqrt{3}} = 11547{,}005\ V$$

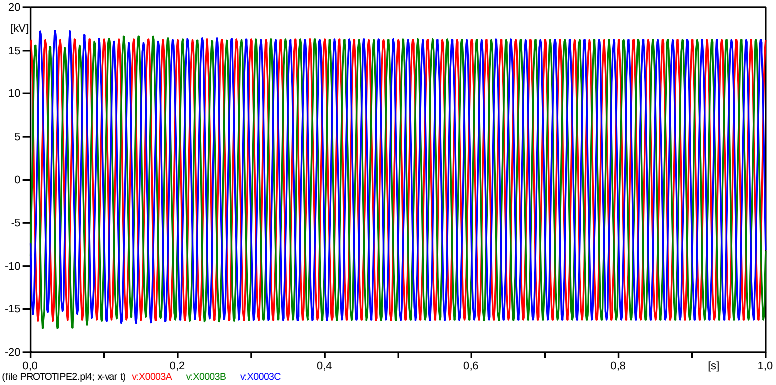
Sementara nilai tegangan puncak *line-netral* ($V_{L\text{-}Npeak}$) pada tiap fasa adalah :

$$V_{L\text{-}Npeak} = 11547{,}005 \times \sqrt{2} = 16329{,}9\ V$$

Selanjutnya akan dilihat respon plot tegangan hasil simulasi dari ATPDraw. Didapatkan hasil bahwa tegangan hasil plot simulasi sesuai dengan hasil dari perhitungan



Gambar 4.20 Respon tegangan sistem transmisi tanpa kompensasi seri pada saat kondisi normal pada sisi primer

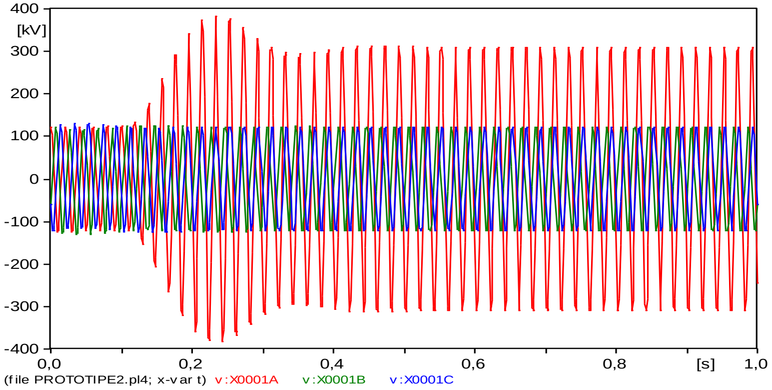


Gambar 4.21 Respon tegangan sistem transmisi tanpa kompensasi seri pada saat kondisi normal pada sisi sekunder

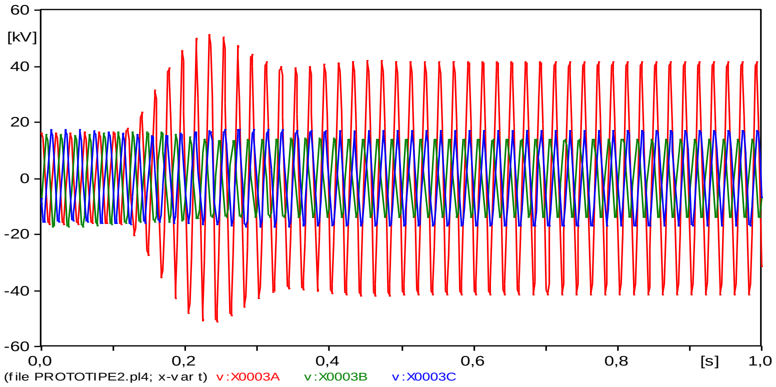
4.2.2 Respon Tegangan saat diberikan respon switching satu fasa

Simulasi pada kasus ini diberikan sebuah *trigger* berupa operasi *switching* terbuka satu fasa pada fasa R dalam rangkaian simulasi feroresonansi dengan kompensasi 0,3 µF. Operasi *switching* tersebut dilakukan pada detik ke 0,1. Dalam simulasi ini diamati nilai dari tegangan primer dan sekunder dari transformator daya.

Dalam simulasi ini dapat dilihat respon tegangan yang muncul dalam gambar 4.22. Dari hasil tersebut dapat kita lihat bahwa simulasi feroresonansi dengan kompensasi seri 0,3 µF, dengan *trigger switching* satu fasa, pada fasa R memunculkan fenomena feroresonansi dengan karakteristik cenderung *fundamental mode* pada fasa R dan kondisi tetap normal pada kedua fasa yang lain. Dalam simulasi ini juga disimulasikan gangguan *switching* satu fasa pada fasa S dan Fasa T, didapatkan karakteristik yang sama, namun memiliki nilai puncak yang berbeda dengan *switching* pada fasa R.



Gambar 4.22 Respon tegangan sistem menggunakan kompensasi seri dengan *Switching* pada fasa R pada sisi primer



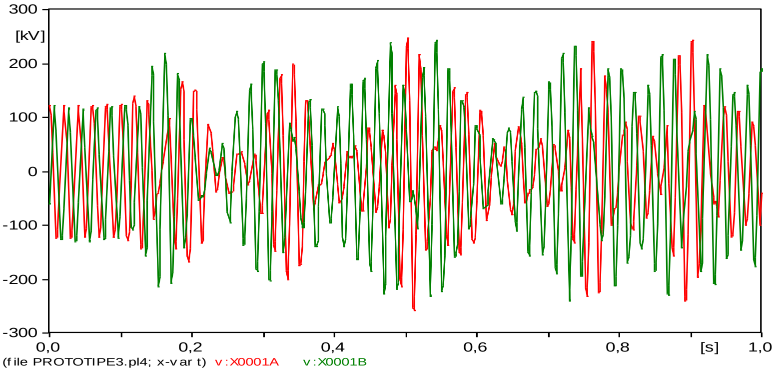
Gambar 4.23 Respon tegangan sistem menggunakan kompensasi dengan *Switching* pada fasa R pada sisi sekunder

4.2.3 Respon tegangan saat diberikan respon *switching* dua fasa, fasa R dan fasa S

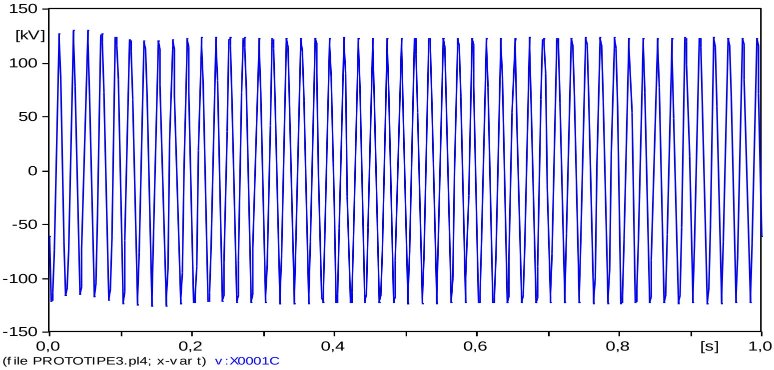
Simulasi pada kasus ini diberikan sebuah *trigger* berupa operasi *switching* terbuka dua fasa pada fasa R dan fasa S dalam rangkaian simulasi feroresonansi dengan kompensasi 0,3 μF. Operasi *switching*

tersebut dilakukan pada detik ke 0,1. Dalam simulasi ini diamati nilai dari tegangan primer dan sekunder dari transformator daya.

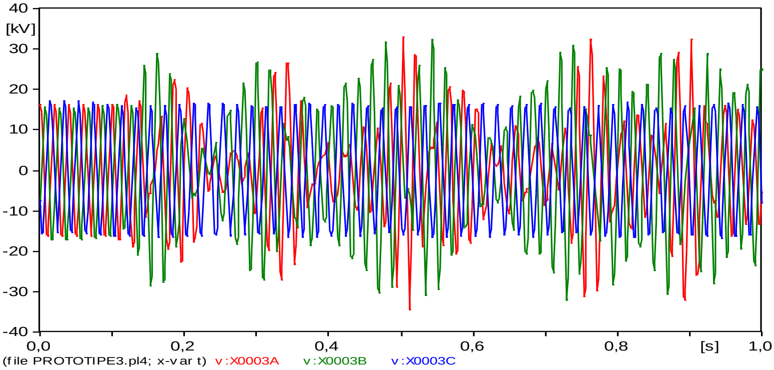
Dalam simulasi ini dapat dilihat respon tegangan yang muncul dalam gambar 4.24. Dari hasil tersebut dapat kita lihat bahwa simulasi feroresonansi dengan kompensasi seri 0,3 µF, dengan *trigger switching* dua fasa, pada fasa R dan fasa S memunculkan fenomena feroresonansi dengan karakteristik cenderung *chaotic mode* pada fasa R, *quasi periodic mode* pada fasa S, dan kondisi tetap normal pada fasa T.



Gambar 4.24 Respon tegangan fasa R dan S, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RS, sisi primer



Gambar 4.25 Respon tegangan fasa T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RS, sisi primer

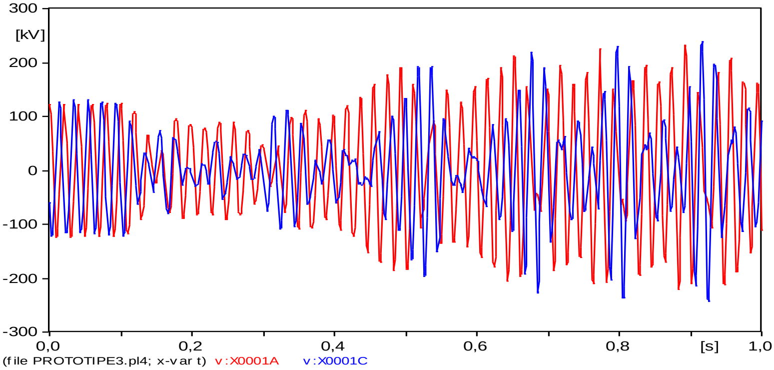


Gambar 4.26 Respon tegangan fasa R, S, dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RS, sisi sekunder

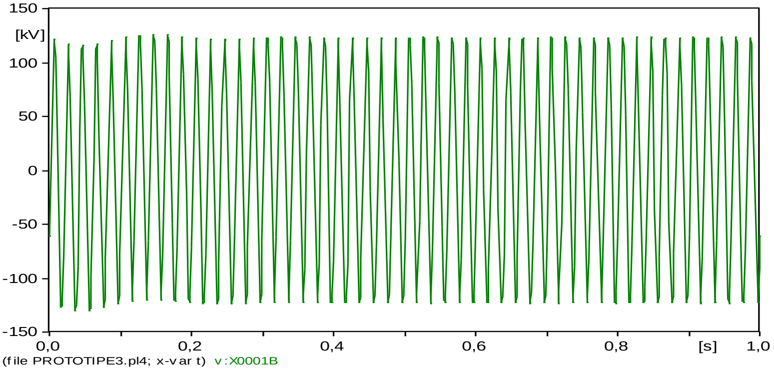
4.2.4 Respon tegangan saat diberikan respon *switching* dua fasa, fasa R dan Fasa T

Simulasi pada kasus ini diberikan sebuah *trigger* berupa operasi *switching* terbuka dua fasa pada fasa R dan fasa T dalam rangkaian simulasi feroresonansi dengan kompensasi 0,3 µF. Operasi *switching* tersebut dilakukan pada detik ke 0,1. Dalam simulasi ini diamati nilai dari tegangan primer dan sekunder dari transformator daya.

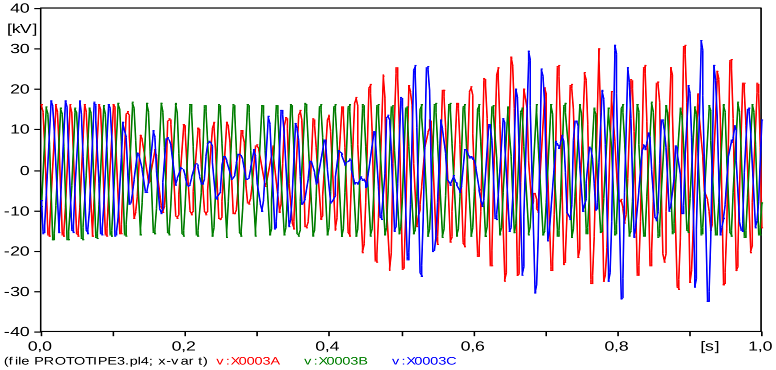
Dalam simulasi ini dapat dilihat respon tegangan yang muncul dalam gambar 4.27. Dari hasil tersebut dapat kita lihat bahwa simulasi feroresonansi dengan kompensasi seri 0,3 µF, dengan *trigger switching* dua fasa, pada fasa R dan fasa T memunculkan fenomena feroresonansi dengan karakteristik cenderung *subharmonic mode* pada fasa R, *Chaotic mode* pada fasa T, dan kondisi tetap normal pada fasa S.



Gambar 4.27 Respon tegangan fasa R dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RT, sisi primer



Gambar 4.28 Respon tegangan fasa S, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RT, sisi primer

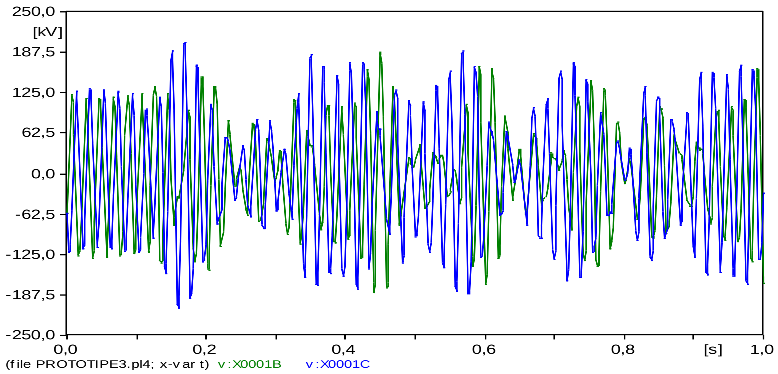


Gambar 4.29 Respon tegangan fasa R, S, dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa RT, sisi sekunder

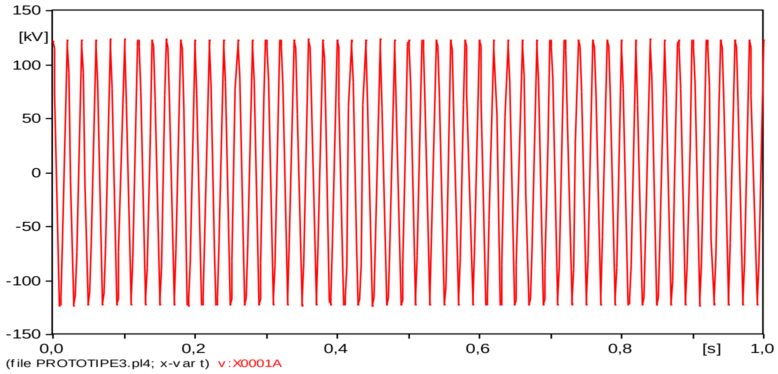
4.2.5 Respon tegangan saat diberikan respon *switching* dua fasa, fasa S dan Fasa T

Simulasi pada kasus ini diberikan sebuah *trigger* berupa operasi *switching* terbuka dua fasa pada fasa S dan fasa T dalam rangkaian simulasi feroresonansi dengan kompensasi 0,3 µF. Operasi *switching* tersebut dilakukan pada detik ke 0,1. Dalam simulasi ini diamati nilai dari tegangan primer dan sekunder dari transformator daya.

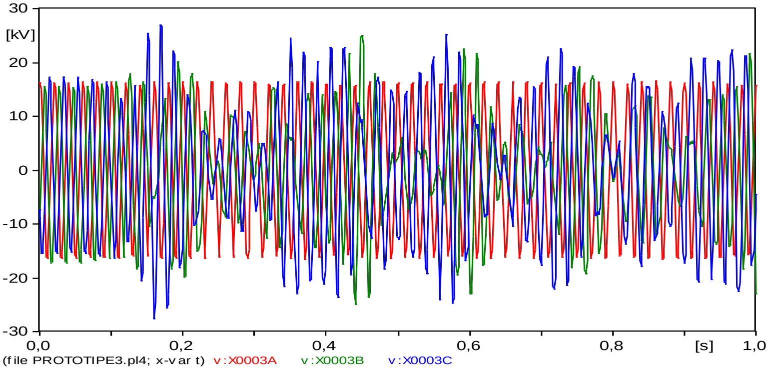
Dalam simulasi ini dapat dilihat respon tegangan yang muncul dalam gambar 4.30. Dari hasil tersebut dapat kita lihat bahwa simulasi feroresonansi dengan kompensasi seri 0,3 µF, dengan *trigger switching* dua fasa, pada fasa S dan fasa T memunculkan fenomena feroresonansi dengan karakteristik cenderung *chaotic mode* pada fasa S, *quasi periodic mode* pada fasa T, dan kondisi tetap normal pada fasa R.



Gambar 4.30 Respon tegangan fasa S dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa ST, sisi primer



Gambar 4.31 Respon tegangan fasa R, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa ST, sisi primer

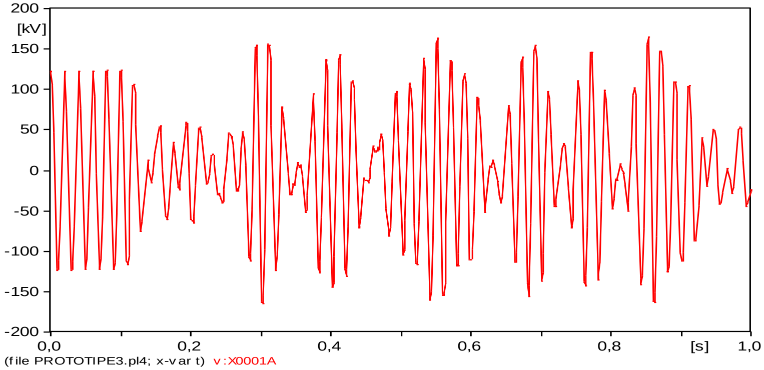


Gambar 4.32 Respon tegangan fasa R,S, dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* pada fasa ST, sisi sekunder

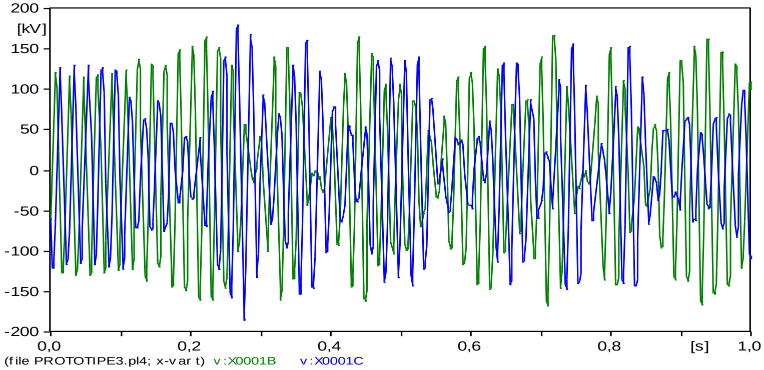
4.2.6 Respon tegangan saat diberikan respon *switching* tiga fasa

Simulasi pada kasus ini diberikan sebuah *trigger* berupa operasi *switching* terbuka tiga fasa pada fasa R, fasa S, dan fasa T dalam rangkaian simulasi feroresonansi dengan kompensasi 0,3 µF. Operasi *switching* tersebut dilakukan pada detik ke 0,1. Dalam simulasi ini diamati nilai dari tegangan primer dan sekunder dari transformator daya.

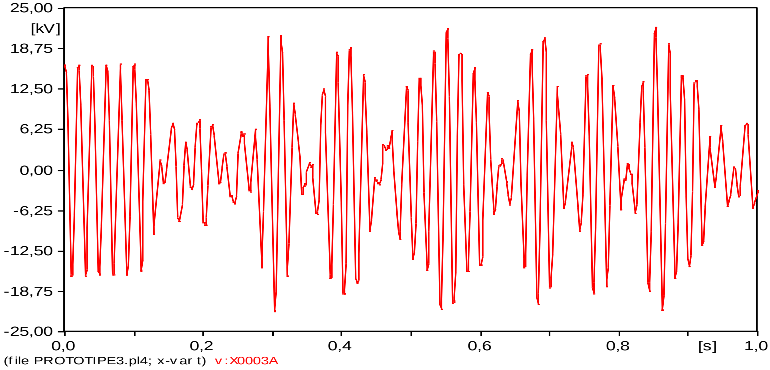
Dalam simulasi ini dapat dilihat respon tegangan yang muncul dalam gambar 4.33. Dari hasil tersebut dapat kita lihat bahwa simulasi feroresonansi dengan kompensasi seri 0,3 µF, dengan *trigger switching* dua fasa, pada fasa S dan fasa T memunculkan fenomena feroresonansi dengan karakteristik cenderung *quasi periodic mode* pada fasa R, *chaotic mode* pada fasa S, dan *chaotic mode* pada fasa T.



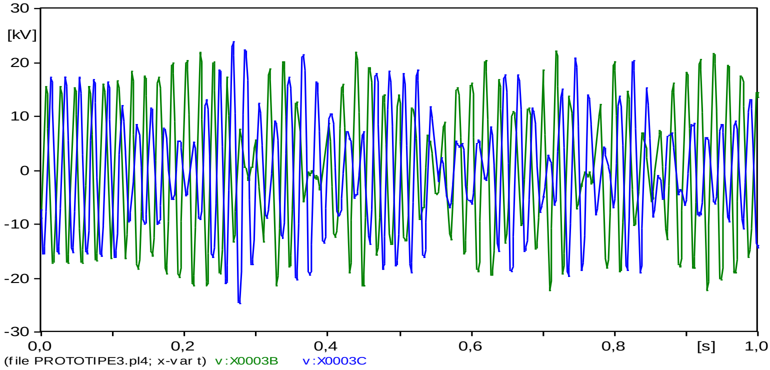
Gambar 4.33 Respon tegangan fasa R, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi primer



Gambar 4.34 Respon tegangan fasa S dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi primer



Gambar 4.35 Respon tegangan fasa R, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi sekunder



Gambar 4.36 Respon tegangan fasa S dan T, sistem menggunakan kompensasi dengan *switching* tiga fasa, sisi sekunder

4.2.7 Hasil pengukuran tegangan transformator daya sistem transmisi dengan kompensasi

Setelah dilakukan serangkaian simulasi pada rangkaian feroresonansi dengan ditambahkan kompensasi seri didapatkan fenomena feroresonansi, yang tampak dengan munculnya nilai *overvoltage* pada fasa yang diberikan perlakuan *switching*. Dalam tabel 4.2 ditampilkan

hasil pengamatan tentang karakteristik feroresonansi yang muncul dalam setiap kasus.

Tabel 4.2 Karakteristik feroresonansi sistem transmisi dengan kompensasi seri, sisi primer dan sekunder

Kondisi Switching	Karakteristik Feroresonansi		
	R	S	T
Normal	normal	Normal	Normal
Satu Fasa	*Fundamental*	*Fundamental*	*Fundamental*
Dua Fasa (R,S)	*Chaotic*	*Quasi periodic*	Normal
Dua Fasa (R,T)	*Subharmonic*	Normal	*Chaotic*
Dua Fasa (S,T)	Normal	*Chaotic*	*Quasi periodic*
Tiga Fasa	*Quasi periodic*	*Chaotic*	*Chaotic*

4.3 Hasil pengukuran tegangan transformator

Setelah kita mengamati karakteristik feroresonansi yang muncul pada saat sistem tanpa penambahan kompensasi dan saat sistem dengan penambahan kompensasi seri, selanjutnya didapatkan hasil dari nilai *overvoltage* yang diukur pada sisi primer transformator maupun sisi sekunder transformator dalam setiap kasus gangguan *switching.*

4.3.1 Hasil pengukuran dengan *switching* satu fasa, fasa R

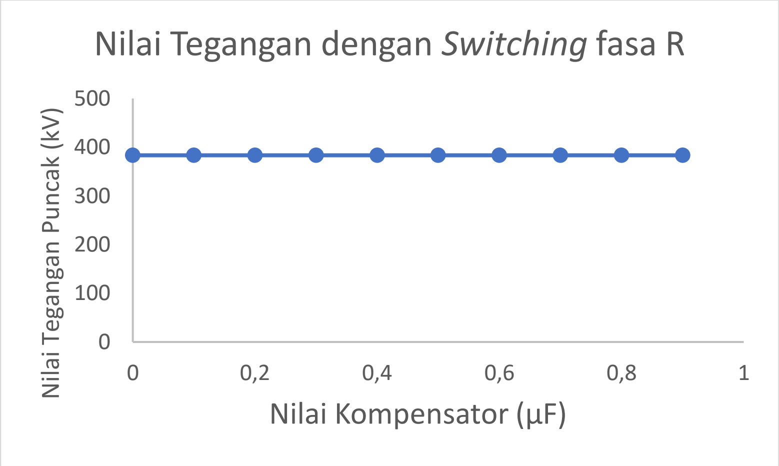
Dalam kasus gangguan satu fasa pada fasa R ini, didapatkan data bahwa ketika sistem transmisi tanpa kompensasi didapatkan hasil sebesar 383,48 kV. Dalam kasus ini kedua fasa yang lain tidak diberikan gangguan *switching,* yang berarti tidak ada *trigger* transien dalam sistem transmisi maka tegangan yang terukur dalam fasa S dan fasa T tidak mengalami fenomena feroresonansi, sehingga tidak mengalami *overvoltage.* Ketika sudah dipasangkan komponen kompensasi seri dengan rentang nilai yang sudah disepakati diatas, didapatkan bahwa nilai tegangan tidak mengalami perubahan. Berikut adalah tabel perbandingan nilai kompensator dengan nilai tegangan terukur

Tabel 4.3 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa R, sisi primer

Nilai Kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	383,48	Normal tanpa *overvoltage*	
0,3	383,48		
0,4	383,48		
0,5	383,48		
0,6	383,48		
0,7	383,48		
0,8	383,48		
0,9	383,48		

Tabel 4.4 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa R, sisi sekunder

Nilai Kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	51,25	Normal tanpa *overvoltage*	
0,3	51,25		
0,4	51,25		
0,5	51,25		
0,6	51,25		
0,7	51,25		
0,8	51,25		
0,9	51,25		



Gambar 4.37 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa R

4.3.2 Hasil pengukuran dengan *switching* satu fasa, fasa S

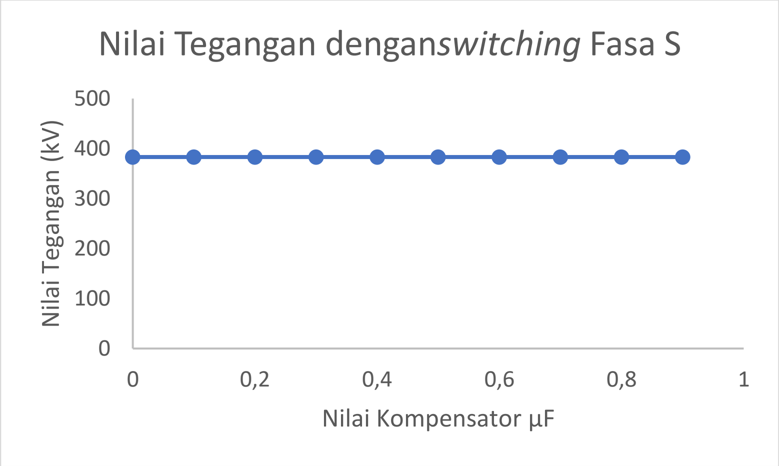
Dalam kasus gangguan satu fasa pada fasa S ini, didapatkan data bahwa ketika sistem transmisi tanpa kompensasi didapatkan hasil sebesar 383,06 kV. Dalam kasus ini kedua fasa yang lain tidak diberikan gangguan *switching*, yang berarti tidak ada *trigger* transien dalam sistem transmisi maka tegangan yang terukur dalam fasa R dan fasa T tidak mengalami fenomena feroresonansi, sehingga tidak mengalami *overvoltage*. Ketika sudah dipasangkan komponen kompensasi seri dengan rentang nilai yang sudah disepakati diatas, didapatkan bahwa nilai tegangan tidak mengalami perubahan. Berikut adalah tabel perbandingan nilai kompensator dengan nilai tegangan terukur

Tabel 4.5 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa S, sisi primer

Nilai Kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	Normal	383,06	Normal
0,3		383,06	
0,4		383,06	
0,5		383,06	
0,6		383,06	
0,7		383,06	
0,8		383,06	
0,9		383,06	

Tabel 4.6 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa S, sisi sekunder

Nilai Kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	Normal	51,19	Normal
0,3		51,19	
0,4		51,19	
0,5		51,19	
0,6		51,19	
0,7		51,19	
0,8		51,19	
0,9		51,19	



Gambar 4.38 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa S

4.3.3 Hasil pengukuran dengan *switching* satu fasa, fasa T

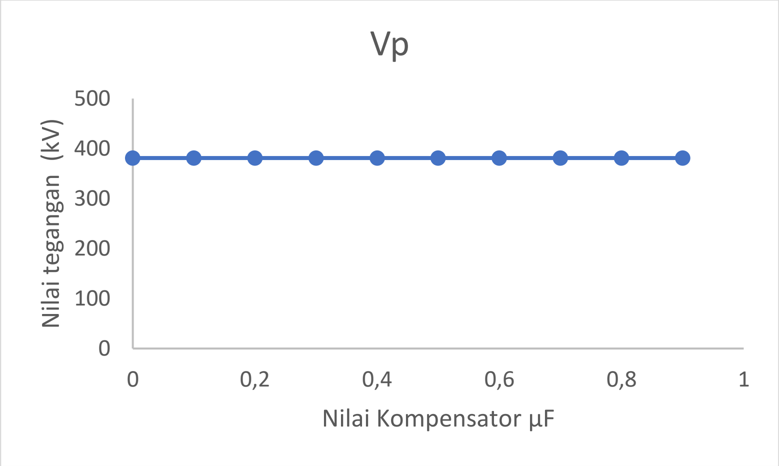
Dalam kasus gangguan satu fasa pada fasa T ini, didapatkan data bahwa ketika sistem transmisi tanpa kompensasi didapatkan hasil sebesar 381,01 kV. Dalam kasus ini kedua fasa yang lain tidak diberikan gangguan *switching*, yang berarti tidak ada *trigger* transien dalam sistem transmisi maka tegangan yang terukur dalam fasa R dan fasa S tidak mengalami fenomena feroresonansi, sehingga tidak mengalami *overvoltage*. Ketika sudah dipasangkan komponen kompensasi seri dengan rentang nilai yang sudah disepakati diatas, didapatkan bahwa nilai tegangan tidak mengalami perubahan. Berikut adalah tabel perbandingan nilai kompensator dengan nilai tegangan terukur

Tabel 4.7 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa T, sisi primer

Nilai Kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	Normal		381,01
0,3			381,01
0,4			381,01
0,5			381,01
0,6			381,01
0,7			381,01
0,8			381,01
0,9			381,01

Tabel 4.8 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa T, sisi sekunder

Nilai Kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	Normal		50,93
0,3			50,93
0,4			50,93
0,5			50,93
0,6			50,93
0,7			50,93
0,8			50,93
0,9			50,93



Gambar 4.39 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa T

4.3.4 Hasil pengukuran dengan *switching* dua fasa, fasa RS

Dalam simulasi kali ini akan diamati nilai tegangan yang muncul dengan variasi nilai kompensator pada fasa R dan fasa S. Dalam simulasi ini didapati bahwa fenomena feroresonansi terjadi pada fasa R dan fasa S yang mengalami gangguan *switching*, sedangkan fasa T tidak mengalami fenomena feroresonansi. Hasil pengukuran tegangan pada sisi primer dan sekunder dapat dilihat pada tabel 4.9

Dalam hasil simulasi tersebut didapatkan bahwa didalam fasa R ketika diberikan tambahan kompensasi nilai *overvoltage* justru mengalami peningkatan, berbeda dengan pada fasa S yang cenderung mengalami penurunan saat diberikan kompensasi seri. Nilai tertinggi didapatkan pada saat nilai kompensator yang dipasang sebesar 0,81 µF yaitu menghasilkan tegangan sebesar 257,95 kV, sedangkan nilai yang lain cenderung tetap. Hal tersebut menurut saya dikarenakan adanya kesesuaian nilai antara kapasitansi dengan induktansi non-linier pada transformator ketika terjadi gangguan 2 fasa pada fasa R, saat dipasang kapasitor dengan nilai 0,81 µF, sehingga resonansi dapat terjadi dengan

maksimal. Sementara itu untuk fasa S nilainya cenderung sama pada setiap penambahan nilai kompensator.

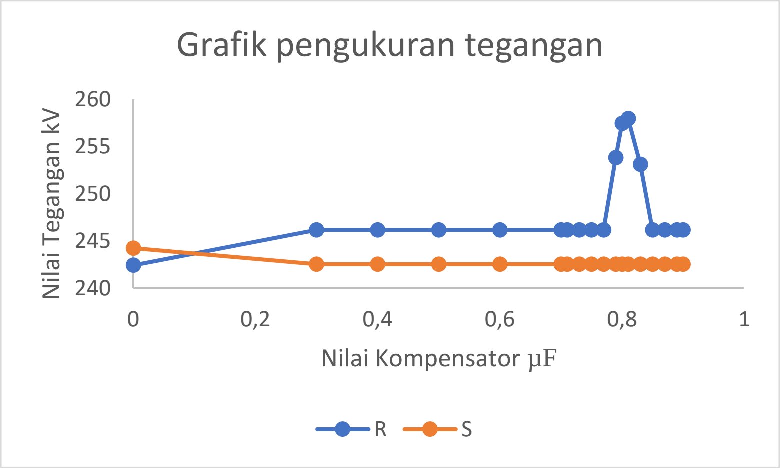
Tabel 4.9 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa RS, sisi primer

Nilai kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	242,43	244,25	normal
0,3	246,18	242,55	
0,4	246,18	242,55	
0,5	246,18	242,55	
0,6	246,18	242,55	
0,7	246,18	242,55	
0,71	246,18	242,55	
0,73	246,18	242,55	
0,75	246,18	242,55	
0,77	246,18	242,55	
0,79	253,83	242,55	
0,8	257,45	242,55	
0,81	257,95	242,55	
0,83	253,11	242,55	
0,85	246,18	242,55	
0,87	246,18	242,55	
0,89	246,18	242,55	
0,9	246,18	242,55	

Tabel 4.10 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa RS, sisi sekunder

<table>
<tr><th rowspan="2">Nilai kompensator</th><th colspan="3">Tegangan Puncak</th></tr>
<tr><th>R</th><th>S</th><th>T</th></tr>
<tr><td>0</td><td>32,41</td><td>32,56</td><td rowspan="18">Normal</td></tr>
<tr><td>0,3</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,4</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,5</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,6</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,7</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,71</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,73</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,75</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,77</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,79</td><td>33,95</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,8</td><td>34,45</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,81</td><td>34,48</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,83</td><td>33,83</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,85</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,87</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,89</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
<tr><td>0,9</td><td>33,1</td><td>32,26</td></tr>
</table>

Selanjutnya, dari data hasil pengukuran tegangan diatas dapat dibentuk sebuah grafik untuk lebih mudah dalam melihat kondisi tegangan pada fasa R dan fasa S pada setiap kenaikan nilai kompensator mulai dari tanpa pemasangan kompensasi seri hingga nilai maksimal kompensasi yang telah disepakati.



Gambar 4.40 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa R dan S

4.3.5 Hasil pengukuran dengan *switching* dua fasa, fasa RT

Dalam simulasi kali ini akan diamati nilai tegangan yang muncul dengan variasi nilai kompensator pada fasa R dan fasa T. Dalam simulasi ini didapati bahwa fenomena feroresonansi terjadi pada fasa R dan fasa T yang mengalami gangguan *switching*, sedangkan fasa S tidak mengalami fenomena feroresonansi. Hasil pengukuran tegangan pada sisi primer dan sekunder dapat dilihat pada tabel 4.11.

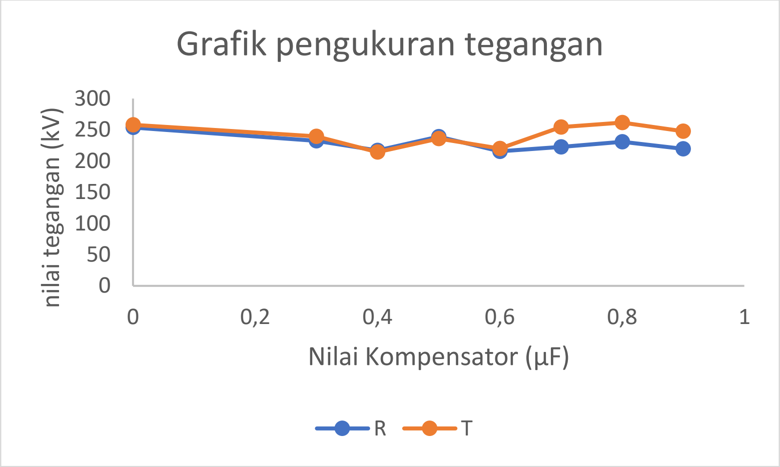
Dalam hasil simulasi tersebut didapatkan bahwa didalam fasa R maupun fasa T, ketika diberikan tambahan kompensasi nilai *overvoltage* mengalami penurunan. Nilai tertinggi didapatkan pada saat nilai kompensator yang dipasang sebesar 0,8 µF yaitu menghasilkan tegangan sebesar 261,65 kV. Selain memiliki nilai *overvoltage* tertiggi pada pengukuran di fasa R dengan kompensasi sebesar 0,8 µF, nilai ini memiliki tren yang berbeda dengan kasus pemberian nilai kompensator yang lain, dikarenakan nilai tegangan fasa meningkat dari kondisi tanpa pemasangan kompensator seri. Sesuai pada grafik pada gambar 4.41 ketika terjadi gangguan dua fasa pada fasa R dan fasa T nilai tegangan pada sistem akan mengalami kondisi yang bervariasi.

Tabel 4.11 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa RT, sisi primer

nilai kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	253,6	Normal	258,11
0,3	232,53		239,44
0,4	216,96		214,21
0,5	239,06		235,74
0,6	215,52		219,94
0,7	222,68		254,39
0,8	230,6		261,5
0,9	219,34		247,87

Tabel 4. 12 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa RT, sisi sekunder

nilai kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	33,76	Normal	34,71
0,3	30,93		32,16
0,4	28,83		28,67
0,5	31,82		31,53
0,6	28,63		29,43
0,7	29,5		34,02
0,8	30,78		34,96
0,9	29,26		33,14



Gambar 4.41 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa R dan T

4.3.6 Hasil pengukuran dengan *switching* dua fasa, fasa ST

Dalam simulasi kali ini akan diamati nilai tegangan yang muncul pada fasa S dan fasa T dengan variasi nilai kompensator. Dalam simulasi ini didapati bahwa fenomena feroresonansi terjadi pada fasa S dan fasa T yang mengalami gangguan *switching*, sedangkan fasa R tidak mengalami fenomena feroresonansi. Hasil pengukuran tegangan pada sisi primer dan sekunder dapat dilihat pada tabel 4.13.

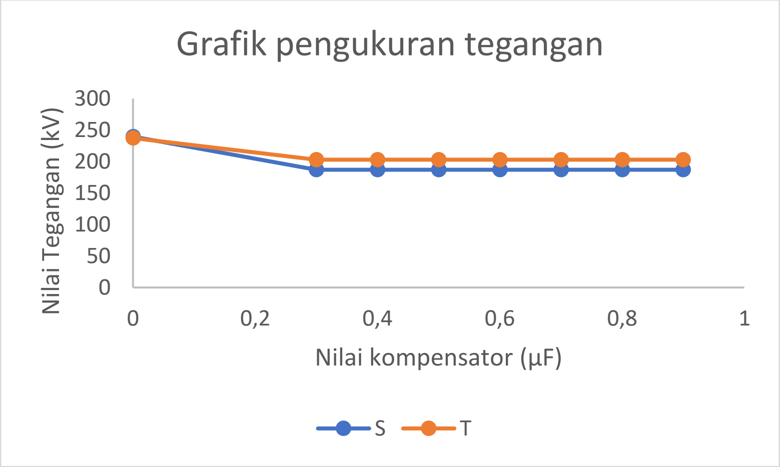
Dalam hasil simulasi tersebut didapatkan bahwa didalam fasa S maupun fasa T, ketika diberikan tambahan kompensasi nilai *overvoltage* mengalami penurunan dibandingkan ketika tidak ada kompensator yang terpasang. Untuk kasus gangguan dua fasa, fasa S dan fasa T, setiap melakukan kenaikan nilai kompensasi hasil pengukuran yang didapat adalah tetap. Hal tersebut menandakan bahwa didalam gangguan *switching* dua fasa, fasa S dan fasa T kurva magnetisasi transformator mengalami perubahan nilai yang sejajar dengan perubahan nilai kapasitansi akibat adanya pemasangan kompensasi seri.

Tabel 4.13 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa ST, sisi primer

nilai kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	normal	239,58	237,23
0,3		186,94	202,94
0,4		186,94	202,94
0,5		186,94	202,94
0,6		186,94	202,94
0,7		186,94	202,94
0,8		186,94	202,94
0,9		186,94	202,94

Tabel 4.14 Tegangan terukur dengan *switching* pada fasa ST, sisi sekunder

nilai kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	normal	32,2	31,54
0,3		25,05	26,95
0,4		25,05	26,95
0,5		25,05	26,95
0,6		25,05	26,95
0,7		25,05	26,95
0,8		25,05	26,95
0,9		25,05	26,95



Gambar 4.42 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* pada fasa S dan T

4.3.7 Hasil Pengukuran dengan *Switching* tiga fasa

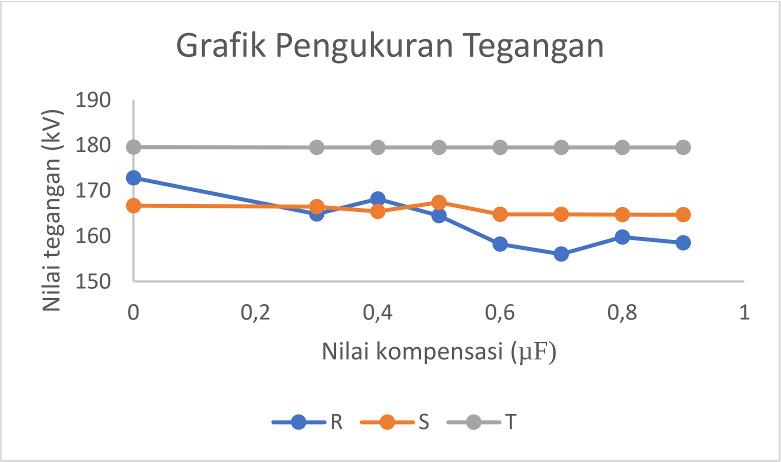
Dalam simulasi ini akan disimulasikan tentang rangkaian pemodelan feroresonansi dengan dilakukan gangguan *switching* tiga fasa. Dalam kasus ini didapatkan bahwa fenomena feroresonansi terjadi di ketiga fasa yang ada. Dengan pemasangan kompensasi seri tegangan yang muncul cenderung mengalami penurunan nilai. Dalam simulasi ini didapatkan hasil bahwa feroresonansi terbesar terdapat pada fasa T dengan nilai mencapai 179,62 kV. Untuk fasa T dengan penambahan nilai kompensasi nilai tegangan yang muncul cenderung stabil, akan tetapi pada fasa R dan S cenderung mengalami fluktuasi nilai tegangan. Dalam tabel 4.15 dan 4.16 diberikan hasil pengukuran tegangan yang muncul dari proses gangguan *switching* tiga fasa.

Tabel 4.15 Tegangan terukur dengan *switching* 3 fasa, sisi primer

nilai kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	172,85	166,72	179,62
0,3	164,83	166,46	179,55
0,4	168,2	165,42	179,55
0,5	164,54	167,43	179,55
0,6	158,22	164,79	179,55
0,7	156,01	164,76	179,55
0,8	159,76	164,73	179,55
0,9	158,5	164,69	179,55

Tabel 4.16 Tegangan terukur dengan *switching* 3 fasa, sisi sekunder

nilai kompensator	Tegangan Puncak		
	R	S	T
0	23,06	22,17	23,86
0,3	22,01	22,14	23,85
0,4	22,43	22	23,85
0,5	21,68	22,29	23,85
0,6	21,11	21,95	23,85
0,7	20,71	21,95	23,85
0,8	21,25	21,94	23,85
0,9	21,1	21,94	23,85



Gambar 4.43 Grafik hasil pengukuran tegangan dengan *switching* 3 fasa

BAB 5
KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dibahas mengenai studi pengaruh pemasangan kompensasi seri terhadap fenomena feroresonansi, didapatkan kesimpulan bahwa:

1. Dengan adanya penambahan kompensasi pada sistem transmisi menyebabkan perubahan terhadap karakteristik feroresonansi.
2. Karakteristik yang sering muncul setelah pemasangan kompensasi seri dalam studi ini adalah *chaotic mode* sebesar 27,7% dan paling jarang muncul adalah *subharmonic mode* dengan prosentase 5%. Sementara karakteristik lain yang muncul adalah *quasi periodic mode* dan *fundamental mode* sebesar 16,6%
3. Dengan penambahan kompensasi seri nilai tegangan yang muncul dalam fenomena feroresonansi cenderung mengalami penurunan.
4. Pada kasus gangguan *switching* 1 fasa, fasa R memiliki nilai *overvoltage* paling tinggi sebesar 3,13 p.u di sisi primer dan 3,14 p.u di sisi sekunder
5. Pada kasus gangguan 2 fasa, fasa RS, RT, dan ST. Nilai *overvoltage* tertinggi terjadi pada fasa R, pada gangguan *switching* fasa R dan S dengan nilai kompensator 0,81 µF. Nilai *overvoltage* yang muncul sebesar 2,1 p.u
6. Pada kasus gangguan 3 fasa, fasa T memiliki nilai *overvoltage* tertinggi dan cenderung stabil dengan penambahan nilai kompensator
7. Nilai *overvoltage* pada fenomena feroresonansi bergantung pada nilai kapasitansi sistem dan nilai induktansi non-linier pada transformator
8. Nilai tegangan lebih tertinggi terdapat pada operasi *switching* satu fasa.

5.2 Saran

Dengan adanya studi ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan dalam perancangan sistem transmisi yang membutuhkan pemasangan kompensasi seri, sehingga fenomena feroresonansi yang dapat berdampak pada kondisi peralatan dapat diantisipasi lebih dini. Saran yang dapat diberikan dari studi ini adalah untuk selanjutnya dapat diteliti tentang pengaruh jenis gangguan dan waktu gangguan terhadap kurva magnetisasi transformator, sehingga dapat diberikan pola yang tepat terhadap nilai *overvoltage* yang muncul pada fenomena feroresonansi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] B. L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi, 2nd. ed.* Medan: Erlangga, 2012.

[2] V. Akarte, *SERIES COMPENSATED TRANSMISSION LINE PROTECTED WITH MOV*. 2014.

[3] N. H. K. Himanshu M. Joshi, "A Review on Series Compensation of Transmission Lines and Its Impact on Performance of Transmission Lines," 2014.

[4] E. Price, "A tutorial on ferroresonance," in *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2014, pp. 676-704.

[5] W. B. Steven, "Transmission Lines," in *Electric Power System Basics for the Nonelectrical Professional*: IEEE, 2016, p. 1.

[6] P. S. Moses, M. A. S. Masoum, and H. A. Toliyat, "Impacts of Hysteresis and Magnetic Couplings on the Stability Domain of Ferroresonance in Asymmetric Three-Phase Three-Leg Transformers," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 2, pp. 581-592, 2011.

[7] K. S. Anugrah, "Studi Pengaruh Sistem Pentanahan terhadap Feroresonansi di Gardu Induk Tegangan Tinggi," Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.

[8] P. S. Moses and M. A. S. Masoum, "Modeling ferroresonance in asymmetric three-phase power transformers," in *2009 Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2009, pp. 1-6.

[9] P. Sakarung, T. Bunyagul, and S. Chatratana, *Investigation and Mitigation of Overvoltage Due to Ferroresonance in the Distribution Network*. 2007.

[10] I. M. Y. N. I Gusti Ngurah Satriyadi hernanda, Adi Soeprajitno, Dimas Anton Asfani, Mochammad Wahyudi, Daniar Fahmi, "Analisis Karakteristik Arus dan Tegangan pada Inisiasi Feroresonansi Transformator Tegangan Rendah," 2018.

[11] P. M. Anderson, *Power System Protection*. McGraw-Hill, 1999.

[12] B. C. S. S. I. Kim, S. N. Kim, Y. C. Choi, H. J. Kim, "A Study on Feroresonansi Mitigation Techniques for Power Transformer," presented at the International Conference on Power System Transients (IPST2015), Cavtat, Croatia, 2015.

[13] D. F. I Made Yulistya Negara, Naufal Arif Kurniawan, "Pengaruh Topologi Pemotongan Inti Transformator 3 Fasa Terhadap Arus Inrush Dan Rating Kerja," Tugas Akhir, Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepulcher November, 2016.

BIODATA PENULIS

Muhamad Setiyawan, akrab dipanggil Iwan. Lahir di magelang, pada 24 November 1995. Merupakan anak tunggal dari pasangan bapak Muh. Rejo Suwito dan ibu Wagiyah. Penulis sekarang sedang aktif sebagai mahasiswa S1 Teknik Elektro ITS. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif di Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri sebagai staff Dalam Negeri selama periode 2015-2016 dan menjadi kepala departemen Dalam Negeri pada periode 2016-2017. Penulis juga aktif sebagai staff dari departemen syiar di Badan Semi Otonom Kajian Keislaman Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro periode 2015-2016. Ditahun keempat penulis juga aktif mengembangkan diri di dunia kewirausahaan dengan mengelola sebuah kedai kopi di sekitar kampus Institut teknologi Sepuluh Nopember. Hobby penulis sendiri adalah bermain futsal.