



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE184801

**STUDI DETEKSI SINYAL FERORESONANSI
MENGUNAKAN METODE ANALISIS KORELASI
PADA TRANSFORMATOR DAYA 150 KV**

I Gede Arka Prawira Putra
NRP 0711154000023

Dosen Pembimbing
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Danar Fahmi, ST., MT.

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE184801

***STUDY OF THE DETECTION OF
FERRORESONANCE SIGNALS USING
CORRELATION ANALYSIS METHOD ON
150 KV POWER TRANSFORMER***

I Gede Arka Prawira Putra
NRP 0711154000023

Advisor

I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Danar Fahmi, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
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 Deteksi Sinyal Feroresonansi Menggunakan Metode Analisis Korelasi Pada Transformator Daya 150 KV**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

Surabaya, 13 Juni 2019

I Gede Arka Prawira Putra
NRP. 0711154000023

**STUDI DETEKSI SINYAL FERORESONANSI
MENGUNAKAN METODE ANALISIS KORELASI
PADA TRANSFORMATOR DAYA 150 KV**

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
NIP. 19730123 200212 1001



Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP. 19890925 201404 1002



STUDI DETEKSI SINYAL FERORESONANSI MENGUNAKAN METODE ANALISIS KORELASI PADA TRANSFORMATOR DAYA 150 KV

Nama : I Gede Arka Prawira Putra
NRP : 0711154000023
Pembimbing I : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

Studi ini memodelkan rangkaian feroresonansi dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak ATPDraw dengan menggunakan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, petir, *switching* dan variasi jenis pengetanahan yaitu *floating – floating*, *floating – solid*, *solid – resistance*, *solid – reactor*, *solid – floating*, *solid – solid*. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk membedakan sinyal feroresonansi dengan sinyal transien dan membedakan sinyal-sinyal tersebut menggunakan metode analisis korelasi serta dapat mengklasifikasikan jenis – jenis feroresonansi yang timbul. Hasil dari tugas akhir ini adalah nilai korelasi akibat hubung singkat satu fasa dan petir memiliki nilai lebih dari 0,9 dan tidak timbul feroresonansi sedangkan nilai korelasi akibat *switching* dan variasi jenis pengetanahan memiliki nilai kurang dari 0,9 dan menimbulkan feroresonansi. Jenis feroresonansi yang muncul pada variasi jenis pengetanahan didominasi oleh jenis *chaotic*. Feroresonansi tidak terjadi pada pengetanahan *solid – resistance* dan *solid – reactance*.

Kata kunci: ATPDraw, Analisis Korelasi, Feroresonansi, Transformator Daya

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDY OF THE DETECTION OF FERRORESONANCE SIGNALS USING CORRELATION ANALYSIS METHOD ON 150 KV POWER TRANSFORMER

Name : I Gede Arka Prawira Putra
NRP : 0711154000023
Advisor I : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Advisor II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRACT

This study models the ferroresonance circuit and simulates using ATPDraw software by using one-phase fault to ground, lightning, switching and variations in types of grounding, those are floating - floating, floating - solid, solid - resistance, solid - reactor, solid - floating, solid - solid. The purposes of this final project is to distinguish ferroresonance signals from transient signals and differentiate those signals using correlation analysis methods and can classify the types of ferroresonances that occurred. The results of this final project are the correlation value due to short circuit of one phase and lightning stroke has a value of more than 0.9 and ferroresonance did not occurred while the correlation value due to switching and variation in type of grounding systems has a value of less than 0.9 and causes ferroresonance. The type of ferroresonance that appears in variations in type of grounding systems is dominated by chaotic types. Ferroresonance did not occurred in solid - resistance and solid - reactance grounding system.

Keywords: ATPDraw, Correlation Analysis, Ferroresonance, Power Transformer

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan tepat waktu. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang berjudul:

STUDI DETEKSI SINYAL FERORESONANSI MENGUNAKAN METODE ANALISIS KORELASI PADA TRANSFORMATOR DAYA 150 KV

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Bapak Ardika, Ibu Keneng, dan Dwi atas doa dan dukungannya dalam mendampingi saya hingga menjadi seorang sarjana.
3. Bapak I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT. dan Daniar Fahmi, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dan berbagi ilmu selama penelitian tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. selaku Ketua Departemen serta seluruh dosen dan karyawan yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuannya selama proses perkuliahan di Teknik Elektro ITS.
5. Bagas Kuntala Aji, Fachrudin Ari, dan Mas Arief Budi Ksatria yang senantiasa membantu memberikan masukan dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Teman-teman asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
7. Made Pradnyana, Gde Bayu, Soma Sanubari dan Bagus Dharma selaku teman - teman *J2 Youngsters* yang telah banyak membantu menghibur dikala sedang pusing TA.
8. Putri Prabhawanti yang tiada henti mengingatkan saya agar menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Seluruh keluarga besar e-55 atas semangat dan motivasi selama 4 tahun di jurusan teknik elektro.

10. Seluruh keluarga besar e-56 atas semangat dan motivasi selama 4 tahun di jurusan teknik elektro.
11. Pihak-pihak lain yang belum bisa penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, 13 Juni 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan.....	2
BAB II SISTEM TRANSMISI, TRANSFORMATOR, FERORESONANSI DAN KORELASI	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik	5
2.2 Sistem Transmisi [9].....	6
2.3 Resonansi.....	6
2.4 Feroresonansi.....	8
2.4.1 Pengertian Feroresonansi	8
2.4.2 Klasifikasi Feroresonansi	9
2.5 Teori Dasar Transformator	11
2.5.1 Prinsip Kerja Transformator.....	12
2.5.2 Kurva Magnetisasi Transformator.....	13
2.5.3 Fluks <i>Linkage</i>	14
2.5.4 Pengujian Transformator.....	15
2.6 Analisis Korelasi.....	17
2.7 Sistem Pengetanahan	18
2.8 Tegangan Impuls Petir [19]	21
BAB III SKEMA PEMODELAN FERORESONANSI DAN METODE KORELASI, BIFURKASI, <i>FAST FOURIER TRANSFORM</i>	23
3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi	23
3.1.1 Rangkaian Normal	24
3.1.2 Rangkaian Pemodelan akibat Petir	25
3.1.4 Rangkaian Pemodelan akibat Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	26
3.1.5 Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan <i>Floating – Floating</i>	27
3.1.6 Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan <i>Floating – Solid</i>	27

3.1.7	Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan <i>Solid – Resistance</i>	27
3.1.8	Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan <i>Solid – Floating</i>	28
3.1.9	Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan <i>Solid – Reactor</i>	28
3.1.10	Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan <i>Solid – Solid</i>	29
3.2	Skenario Simulasi	29
3.2.1	Pengambilan Data.....	29
3.2.2	Pengolahan Data.....	29
BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR DAYA DENGAN KORELASI, BIFURKASI DAN FAST FOURIER TRANSFORM.....		31
4.1	Kondisi Normal.....	31
4.2	Kondisi Gangguan akibat <i>Fault</i>	32
4.3	Kondisi Gangguan akibat Petir	37
4.4	Kondisi Gangguan akibat <i>Switching</i>	41
4.5	Kondisi akibat Pengaruh Pengetanahan	47
4.5.1	Kondisi Pengetanahan <i>Floating – Floating</i>	47
4.5.2	Kondisi Pengetanahan <i>Floating – Solid</i>	48
4.5.3	Kondisi Pengetanahan <i>Solid – Resistance</i>	49
4.5.4	Kondisi Pengetanahan <i>Solid – Floating</i>	51
4.5.5	Kondisi Pengetanahan <i>Solid – Reactor</i>	52
4.5.6	Kondisi Pengetanahan <i>Solid – Solid</i>	53
4.5.7	Bifurkasi Variasi Pengetanahan.....	55
4.5.8	Korelasi Variasi Pengetanahan	56
4.5.9	<i>Fast Fourier Transform</i> (FFT) Variasi Pengetanahan	57
4.6	Analisis Tegangan Puncak Transformator Daya	59
4.7	Analisis Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya	59
BAB V PENUTUP.....		65
5.1	Kesimpulan	65
5.2	Saran	65
DAFTAR PUSTAKA		67
LAMPIRAN.....		69
RIWAYAT HIDUP		75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penyaluran Tenaga Listrik Sederhana [8].....	6
Gambar 2.2	Resonansi Seri [10]	7
Gambar 2.3	Rangkaian Feroresonansi Sederhana Menggunakan ATPDraw	9
Gambar 2.4	Model Fundamental (a) Sinyal Periodik (b) Spektrum Sinyal [10].....	10
Gambar 2.5	Model Sub Harmonik (a) Sinyal Periodik (b) Spektrum Sinyal [10].....	10
Gambar 2.6	Model Quasi-Periodic (a) Sinyal Periodik (b) Spektrum Sinyal [10].....	11
Gambar 2.7	Model Chaotic (a) Sinyal Periodik (b) Spektrum Sinyal [10].....	11
Gambar 2.8	Model Transformator Sederhana	12
Gambar 2.9	Kurva Magnetisasi Transformator	13
Gambar 2.10	Sebuah Belitan Kawat yang Dialiri Arus dan Menghasilkan Garis Medan.....	14
Gambar 2.11	Rangkaian Pengujian Hubung Singkat	16
Gambar 2.12	Rangkaian Pengujian Hubung Terbuka	17
Gambar 2.13	Rangkaian Ekuivalen Transformator	17
Gambar 2.14	Rangkaian Ekuivalen Transformator (a) Sisi Primer (b) Sisi Sekunder	17
Gambar 2.15	Sistem Pengetanahan Netral Langsung [18]	19
Gambar 2.16	Sistem Pengetanahan dengan Tahanan [18]	20
Gambar 2.17	Sistem Pengetanahan dengan Kumparan [18]	20
Gambar 2.18	Sistem Pengetanahan Tidak Ditanahkan [18]	21
Gambar 2.19	Standar Tegangan Impuls Petir.....	22
Gambar 3.1	Rangkaian Simulasi Feroresonansi.....	23
Gambar 3.2	Kurva Magnetisasi Transformator Daya [20].....	24
Gambar 3.3	Pemodelan Rangkaian Normal pada ATPDraw	25
Gambar 3.4	Pemodelan Rangkaian akibat Petir pada ATPDraw	25
Gambar 3.5	Pemodelan Rangkaian akibat Switching pada ATPDraw ...	26
Gambar 3.6	Pemodelan Rangkaian akibat Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah pada ATPDraw	26
Gambar 3.7	Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan <i>Floating – Floating</i>	27
Gambar 3.8	Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan <i>Floating – Solid</i>	27
Gambar 3.9	Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan <i>Solid – Resistance</i>	28
Gambar 3.10	Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan <i>Solid – Floating</i>	28

Gambar 3.11	Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan <i>Solid – Reactor</i>	28
Gambar 3.12	Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan <i>Solid – Solid</i>	29
Gambar 3.13	Flowchart Pengambilan dan Pengolahan Data.....	30
Gambar 4.1	Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi Normal.....	32
Gambar 4.2	Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi <i>Fault</i> dengan Tahanan Fault 1 Ω	32
Gambar 4.3	Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi <i>Fault</i> dengan Tahanan Fault 10 Ω	33
Gambar 4.4	Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi <i>Fault</i> dengan Tahanan Fault 20 Ω	33
Gambar 4.5	Diagram Bifurkasi Variasi Resistansi pada Fasa A	34
Gambar 4.6	Diagram Bifurkasi Variasi Resistansi pada Fasa B.....	34
Gambar 4.7	Diagram Bifurkasi Variasi Resistansi pada Fasa C.....	34
Gambar 4.8	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan pada Tahanan <i>Fault</i> 1 Ω	36
Gambar 4.9	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan pada Tahanan <i>Fault</i> 10 Ω	36
Gambar 4.10	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan pada Tahanan <i>Fault</i> 20 Ω	36
Gambar 4.11	Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi Gangguan Petir dengan Arus 4 kA	37
Gambar 4.12	Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi Gangguan Petir dengan Arus 20 kA	37
Gambar 4.13	Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi Gangguan Petir dengan Arus 40 kA	38
Gambar 4.14	Diagram Bifurkasi Variasi Arus Petir pada Fasa A	38
Gambar 4.15	Diagram Bifurkasi Variasi Arus Petir pada Fasa B.....	39
Gambar 4.16	Diagram Bifurkasi Variasi Arus Petir pada Fasa C.....	39
Gambar 4.17	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan dengan Arus Petir Sebesar 4 kA.....	40
Gambar 4.18	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan dengan Arus Petir Sebesar 20 kA.....	41
Gambar 4.19	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan dengan Arus Petir Sebesar 40 kA.....	41
Gambar 4.20	Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa A dan B saat 0,1 Detik.....	42
Gambar 4.21	Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa C saat 0,1 Detik	42
Gambar 4.22	Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa A dan B saat 0,3 Detik.....	42

Gambar 4.23	Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa C saat 0,3 Detik	43
Gambar 4.24	Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa A dan B saat 0,5 Detik	43
Gambar 4.25	Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa C saat 0,5 Detik	43
Gambar 4.26	Diagram Bifurkasi Variasi Waktu <i>Switching</i> Fasa A.....	44
Gambar 4.27	Diagram Bifurkasi Variasi Waktu <i>Switching</i> Fasa B.....	44
Gambar 4.28	Diagram Bifurkasi Variasi Waktu <i>Switching</i> Fasa C.....	45
Gambar 4.29	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan pada 0,1 detik.....	46
Gambar 4.30	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan pada 0,3 detik.....	46
Gambar 4.31	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan pada 0,5 detik.....	46
Gambar 4.32	Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Floating – Floating</i>	47
Gambar 4.33	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Floating – Floating</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa A dan B.....	47
Gambar 4.34	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Floating – Floating</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa C	48
Gambar 4.35	Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Floating – Solid</i>	48
Gambar 4.36	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Floating – Solid</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa A dan B.....	49
Gambar 4.37	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Floating – Solid</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa C	49
Gambar 4.38	Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Resistance</i>	50
Gambar 4.39	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Resistance</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa A dan B.....	50
Gambar 4.40	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Resistance</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa C	50
Gambar 4.41	Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Floating</i>	51

Gambar 4.42	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Floating</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa A dan B	51
Gambar 4.43	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Floating</i> saat Kondisi <i>Switching</i> (a) Fasa A dan B (b) Fasa C.....	52
Gambar 4.44	Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Reactor</i>	52
Gambar 4.45	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Reactor</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa A dan B	53
Gambar 4.46	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Reactor</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa C.....	53
Gambar 4.47	Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Solid</i>	54
Gambar 4.48	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Solid</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa A dan B	54
Gambar 4.49	Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan <i>Solid – Solid</i> saat Kondisi <i>Switching</i> pada Fasa C.....	54
Gambar 4.50	Diagram Bifurkasi Variasi Pengetanahan Fasa A; 1 = <i>Floating – Floating</i> ; 2 = <i>Floating – Solid</i> ; 3 = <i>Solid – Resistance</i> ; 4 = <i>Solid – Floating</i> ; 5 = <i>Solid – Reactor</i> ; 6 = <i>Solid – Solid</i>	55
Gambar 4.51	Diagram Bifurkasi Variasi Pengetanahan Fasa B; 1 = <i>Floating – Floating</i> ; 2 = <i>Floating – Solid</i> ; 3 = <i>Solid – Resistance</i> ; 4 = <i>Solid – Floating</i> ; 5 = <i>Solid – Reactor</i> ; 6 = <i>Solid – Solid</i>	55
Gambar 4.52	Diagram Bifurkasi Variasi Pengetanahan Fasa C; 1 = <i>Floating – Floating</i> ; 2 = <i>Floating – Solid</i> ; 3 = <i>Solid – Resistance</i> ; 4 = <i>Solid – Floating</i> ; 5 = <i>Solid – Reactor</i> ; 6 = <i>Solid – Solid</i>	56
Gambar 4.53	Grafik Hasil Korelasi Variasi Pengetanahan.....	57
Gambar 4.54	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan pada Pengetanahan Jenis <i>Solid – Resistance</i>	58
Gambar 4.55	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan pada Pengetanahan Jenis <i>Solid – Reactor</i>	58
Gambar 4.56	Hasil <i>Fast Fourier Transform</i> Respon Tegangan pada Pengetanahan Jenis <i>Solid – Floating</i>	58
Gambar 4.57	Grafik Tegangan Puncak Transformator Daya pada Sisi Primer akibat <i>Fault</i>	60

Gambar 4.58	Grafik Tegangan Puncak Transformator Daya pada Sisi Primer akibat Petir	61
Gambar 4.59	Grafik Tegangan Puncak Transformator Daya pada Sisi Primer akibat <i>Switching</i> dan Jenis Pengetanahan	62
Gambar 4.60	Persebaran Jenis Feroresonansi	63

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter Rangkaian Pemodelan Feroresonansi [20].....	23
Tabel 3.2	Parameter Kurva Magnetisasi	24
Tabel 4.1	Hasil Korelasi akibat Fault	35
Tabel 4.2	Hasil Korelasi akibat Petir	40
Tabel 4.3	Hasil Korelasi akibat Switching	45
Tabel 4.4	Hasil Korelasi akibat Switching Variasi Pengetanahan	56

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tidak dapat dipungkiri lagi, listrik merupakan kebutuhan primer di zaman sekarang ini. Hampir semua peralatan yang digunakan menggunakan listrik sebagai energi utamanya. Listrik yang dipakai berawal dari pembangkit kemudian disalurkan ke setiap gardu induk dan didistribusikan ke konsumen. Dalam proses penyaluran listrik tersebut, terdapat sebuah peralatan penting yaitu transformator. Transformator berfungsi menaikkan dan menurunkan tegangan sesuai dengan kebutuhan.

Beberapa permasalahan dapat terjadi dalam proses penyaluran listrik. Salah satu dari permasalahan tersebut adalah fenomena feroresonansi. Feroresonansi adalah sebuah gangguan transien pada suatu sistem yang mengakibatkan adanya tegangan lebih yang dapat merusak peralatan [1]. Kejadian feroresonansi sudah pernah terjadi pada sistem tenaga listrik yang biasanya menyerang peralatan yang memiliki induktansi non-linier seperti inti besi pada transformator [2]. Feroresonansi juga terjadi pada beberapa kasus lainnya seperti pada jaringan distribusi [3] juga pada sistem tegangan tinggi [4]. Penelitian mengenai deteksi feroresonansi dengan metode *wavelet* sudah pernah dilakukan [5]. Namun metode tersebut masih kurang efektif saat feroresonansi terjadi pada mode frekuensi fundamental karena sifatnya sama seperti gangguan satu fasa ke tanah [6].

Pada studi ini akan membahas pengklasifikasian fenomena feroresonansi menggunakan analisis korelasi dengan melakukan simulasi terhadap transformator daya pada gardu induk transmisi. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisis kemunculan feroresonansi akibat dari gangguan petir, hubung singkat satu fasa ke tanah, *switching*, dan jenis pengetanahan. Batasan masalah lainnya adalah gangguan yang diakibatkan *switching*, terbuka tiga fasa secara serampak dan analisa karakteristik feroresonansi pada tegangan sisi primer transformator dari hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw serta analisis korelasi dan diagram bifurkasi menggunakan perangkat lunak MATLAB. Transformator yang digunakan adalah transformator *step-down* 150 kV – 20 kV.

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengetahui perbedaan sinyal feroresonansi dengan sinyal transien dan membedakan sinyal-

sinyal tersebut menggunakan metode analisis korelasi. Tujuan lainnya yaitu dapat mengklasifikasikan jenis – jenis feroresonansi yang timbul saat simulasi. Data tegangan dan waktu dari hasil simulasi akan diolah untuk dilakukan proses pendeteksian feroresonansi. Hasil dari penelitian ini nantinya dapat digunakan sebagai bahan referensi dalam pengerjaan tugas akhir ke depannya dengan topik yang serupa.

Metode dalam pengerjaan tugas akhir ini dibagi menjadi 6 tahapan yaitu studi literatur, pengumpulan data dan pembuatan model di ATPDraw, simulasi model di ATPDraw, pengolahan hasil simulasi di MATLAB, analisis hasil simulasi, dan pembuatan buku. Pembuatan tugas akhir ini diawali mempelajari literatur-literatur yang berkaitan dengan feroresonansi baik dari *paper*, jurnal ilmiah, buku, dan publikasi ilmiah. Pembuatan model feroresonansi diawali dengan pengumpulan data berupa spesifikasi peralatan yang diperlukan dalam membuat pemodelan feroresonansi. Data-data yang diperlukan adalah spesifikasi dari *utility*, kabel, transformator, *circuit breaker*, beban, dll. Setelah mendapatkan semua spesifikasi peralatan, dilanjutkan dengan membuat pemodelan sistem pada perangkat lunak ATPDraw. Kemudian simulasi feroresonansi dan simulasi beberapa tipe gangguan dilakukan untuk mendapatkan hasil simulasi. Hasil simulasi yang telah didapat, diolah dengan metode analisis korelasi dan bifurkasi di MATLAB. Hasil dari pengolahan data tersebut kemudian dianalisis dan dilanjutkan dengan pembuatan buku berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan.

1.2 Sistematika Penulisan

Bab satu berisi pendahuluan yang melingkupi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, relevansi dan manfaat.

Bab dua berisi teori – teori pendukung tentang sistem tenaga listrik khususnya sistem transmisi tenaga listrik, transformator, feroresonansi, bifurkasi dan korelasi.

Bab tiga pemodelan simulasi rangkaian feroresonansi dengan beberapa jenis gangguan dan pengetanahan, metode pengambilan data menggunakan ATPDraw dan metode pengolahan data menggunakan diagram bifurkasi dan analisis korelasi pada MATLAB yang akan digunakan dalam studi ini.

Bab empat berisi hasil simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi berdasarkan parameter gangguan berupa hubung singkat satu fasa ke tanah, petir, *switching* dan jenis pengetanahan menggunakan

ATPDraw dan diagram bifurkasi serta analisis korelasi menggunakan MATLAB.

Bab lima berisi kesimpulan dari simulasi dan analisis yang dilakukan melalui sebuah rangkaian pemodelan feroresonansi dan saran untuk penelitian atau studi selanjutnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

SISTEM TRANSMISI, TRANSFORMATOR, FERORESONANSI DAN KORELASI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik yang dikenal sekarang ini ada 2 yaitu sistem arus bolak-balik (AC) dan sistem arus searah (DC). Pengaturan nilai tegangan, dan medan magnet putar mudah dilakukan pada sistem AC. Berdasarkan kemudahan tersebut, sebagian besar negara di dunia menerapkan sistem tenaga listrik AC. Pembangkit listrik AC harus dioperasikan sesuai dengan permintaan konsumen yang berubah-ubah karena listrik AC masih belum dapat disimpan.

Pembangkit listrik yang tersebar menciptakan tenaga listrik dan dikirim ke konsumen melalui jaringan saluran tenaga listrik. Setiap pembangkit memiliki kapasitas dan bahan bakar yang berbeda. Dikarenakan hal tersebut, pengoperasian pembangkit harus dirancang semaksimal mungkin supaya bahan yang digunakan dapat sehemat mungkin, namun keandalan dan mutu tetap terjamin. Meningkatnya penggunaan listrik per kapita di seluruh negara berbanding lurus dengan peningkatan standar kehidupan manusia. Pembangunan pembangkit-pembangkit baru harus direncanakan melihat peningkatan permintaan tenaga listrik.

Proses tenaga listrik agar sampai pada konsumen diawali dengan pembangkitan. Tenaga listrik dibangkitkan pada berbagai jenis pembangkit listrik di antaranya PLTU, PLTA, PLTD, PLTG, PLTGU. Listrik yang sudah terbangkit dinaikkan tegangannya dengan transformator penaik tegangan di Gardu Induk Pembangkit kemudian disalurkan melewati saluran transmisi. Saluran tegangan tinggi di Indonesia ada 2 jenis yaitu tegangan 150 kV atau Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan tegangan 500 kV atau Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET). Tenaga listrik yang sudah disalurkan melewati saluran transmisi kemudian diturunkan tegangannya di Gardu Induk Transmisi oleh transformator penurun tegangan menjadi tegangan menengah atau disebut juga tegangan distribusi primer. Besar tegangan distribusi primer yang digunakan adalah 20 kV. Tenaga listrik yang telah disalurkan pada distribusi primer diturunkan tegangannya menjadi 220/380 V di Gardu Distribusi. Tenaga listrik tersebut kemudian disalurkan melewati Jaringan Tegangan Rendah yang disalurkan ke konsumen melalui sambungan

rumah [7]. Skema penyaluran tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Penyaluran Tenaga Listrik Sederhana [8]

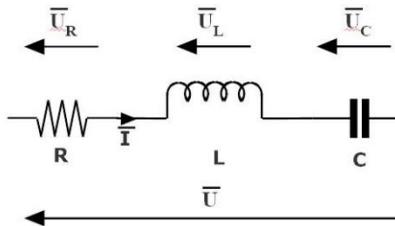
2.2 Sistem Transmisi [9]

Sistem transmisi adalah sebuah sistem penyaluran energi listrik dari satu titik ke titik lainnya. Penggunaan sistem transmisi didasari oleh besarnya daya yang dikirimkan dari pembangkit ke beban dan jarak pengiriman yang cukup jauh antara pembangkit dengan pusat beban. Sistem transmisi mengirimkan daya dengan tegangan yang tinggi untuk meminimalkan timbulnya rugi-rugi karena *drop* tegangan.

Penggunaan nilai tegangan nominal pada saluran transmisi tegangan tinggi dan ekstra tinggi berbeda-beda di setiap negara. Besar tegangan tinggi yang digunakan di Indonesia adalah 150 kV dan besar tegangan ekstra tingginya adalah 500 kV. Sistem transmisi 500 kV digunakan untuk sistem interkoneksi Jawa dan Bali. Sistem interkoneksi ini adalah sistem terpenting dari pengiriman daya di Indonesia sehingga keandalan dan kelangsungannya harus dijaga. Saluran transmisi adalah sebuah sistem yang memiliki karakteristik yang selalu berubah secara cepat. Akibat perubahan karakteristik tersebut, sistem pengamanan sistem transmisi harus diperhatikan dengan serius melihat bahwa saluran transmisi memiliki andil yang besar dalam proses pengiriman daya.

2.3 Resonansi

Resonansi adalah kejadian yang dapat terjadi di sistem tenaga listrik pada semua level tegangan. Salah satu contohnya terjadi pada sistem penyetanahan yang diaplikasikan untuk mengurangi besar arus gangguan satu fasa ke tanah pada tegangan menengah dan resonansi menjadi penyebab atas rusaknya bahan dielektrik dan penuaan dini pada peralatan akibat tegangan lebih atau arus lebih [10].



Gambar 2.2 Resonansi Seri [10]

Gambar 2.2 merupakan rangkaian resonansi seri sederhana dan persamaan vektor tegangannya adalah sebagai berikut:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C \quad (2.1)$$

Keterangan:

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

Pada beberapa kejadian resonansi, nilai dari tegangan terminal kapasitor dan induktansi telah terkompensasi dan rangkaian dapat dikatakan dalam keadaan feroresonansi. Sinyal berbentuk pulsa ω_n yang dapat memunculkan resonansi dijabarkan dengan persamaan berikut:

$$LC\omega_n^2 = 1 \quad (2.2)$$

Keterangan:

- L = Induktor (Henry)
- C = Kapasitor (Farad)
- ω_n = Kecepatan sudut (Rad/s)

Nilai dari arus (I) adalah:

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.3)$$

Keterangan:

- I = Arus (Ampere)
- U = Tegangan (Volt)
- R = Resistor (Ohm)

Nilai dari arus tersebut dapat bernilai sangat besar. Amplitudo tegangan dari kapasitor dan induktor terminal sama dengan k.E, di mana k adalah faktor kualitas yang dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$k = \frac{L\omega_n}{R} = \frac{1}{RC\omega_n} \quad (2.4)$$

Resonansi harmonisa terjadi saat ω_n sama dengan ω_0 (frekuensi dari sistem) yang terbentuk dari beberapa tipe mesin. Resonansi harmonisa dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik.

2.4 Feroresonansi

2.4.1 Pengertian Feroresonansi

Feroresonansi adalah keadaan resonansi non-linear yang dapat memberi dampak pada sistem tenaga listrik. Keadaan tersebut dapat menyebabkan arus lebih, tegangan lebih, dan harmonisa pada sistem tenaga listrik sehingga membahayakan sistem transmisi, sistem proteksi, peralatan listrik maupun operator [11].

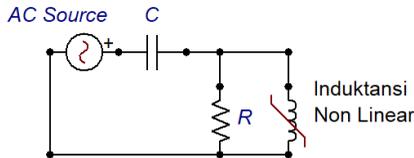
Feroresonansi terjadi di sebuah sistem yang memiliki nilai kapasitansi sistem yang tetap dan nilai induktansi yang non-linear pada inti transformator. Saat keadaan normal induktansi pada transformator akan bekerja secara linear sesuai kurva magnetisasinya, tetapi saat terjadi gangguan di sistem seperti *switching*, *starting* motor dapat menjadikan transformator bekerja hingga nilai induktansinya di ujung kurva magnetisasinya sehingga tidak linear. Perubahan gelombang tegangan akan terjadi saat nilai induktansi transformator sama dengan nilai kapasitansi sistem. Hal tersebut dapat mengakibatkan osilasi yang cukup lama untuk frekuensi tertentu yang dapat menyebabkan tegangan lebih sehingga merusak peralatan [10] [13].

Resonansi linear terjadi pada rangkaian seri yang terdiri beberapa komponen yaitu kapasitor, resistor dan induktor. Keadaan resonansi akan terjadi pada satu frekuensi, di mana frekuensi tersebut bernilai sama dengan frekuensi sumber. Hasil dari keadaan resonansi tersebut adalah arus lebih dan tegangan lebih yang terjadi pada satu keadaan *steady-state* [11]. Nilai frekuensi resonansi dapat dicari dengan persamaan:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.5)$$

Gambar 2.3 merupakan feroresonansi sederhana yang terdiri dari beberapa komponen yaitu kapasitor, resistor dan induktansi non linear.

Komponen-komponen tersebut adalah penggambaran dari sifat induktif dan kapasitif yang didapat dari pemakaian peralatan listrik pada sistem tenaga listrik. Keadaan feroresonansi terjadi pada frekuensi bervariasi, ketika nilai induktansi non-linear sama dengan nilai kapasitansi sistem. Arus lebih dan tegangan lebih terjadi pada beberapa keadaan *steady-state* [11].



Gambar 2.3 Rangkaian Feroresonansi Sederhana Menggunakan ATPDraw

2.4.2 Klasifikasi Feroresonansi

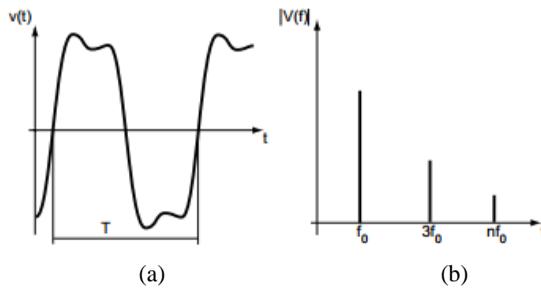
Pengklasifikasian feroresonansi terbagi menjadi empat jenis yang berbeda berdasarkan bentuk gelombang yang muncul pada sistem tenaga listrik, penelitian yang telah dilakukan pada pemodelan sistem yang direduksi, dan simulasi numerik [1] [8]. Keempat jenis feroresonansi tersebut adalah:

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

Keempat jenis feroresonansi tersebut adalah :

1. Mode Fundamental

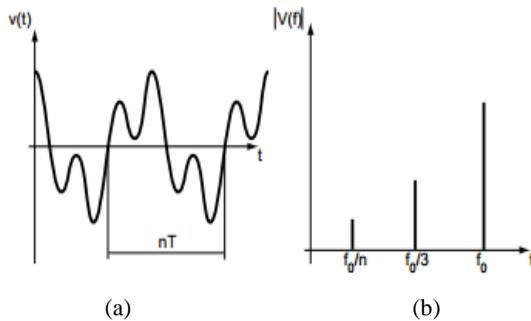
Mode fundamental adalah mode feroresonansi yang paling dasar di mana tegangan dan arus periodik dengan periode T sama dengan periode sistem, dan dapat mengandung berbagai level dari harmonisa. Gambar 2.4 merupakan Model Fundamental dari feroresonansi.



Gambar 2.4 Model Fundamental (a) Sinyal Periodik (b) Spektrum Sinyal [10]

2. Mode Sub Harmonik

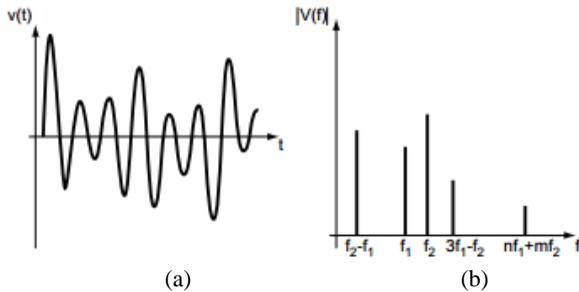
Fereresonansi mode ini memiliki periodik dengan periode nT dari periode sumbernya. Kondisi ini dikenal sebagai sub harmonik atau harmonik $1/n$. Kondisi sub harmonik ini biasanya terdapat pada orde ganjil. Model ini ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Model Sub Harmonik (a) Sinyal Periodik (b) Spektrum Sinyal [10]

3. Mode *Quasi-Periodic*

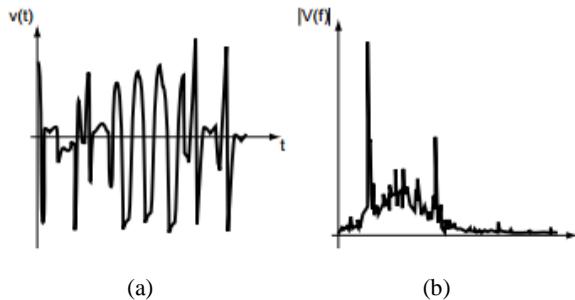
Sinyal fereresonansi pada mode ini tidak periodik. Spektrum sinyal yang diperoleh adalah spektrum diskontinu yang frekuensinya didefinisikan $nf_1 + mf_2$ di mana n dan m adalah integer, dan f_1/f_2 adalah bilangan real tidak rasional). Model ini terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Model *Quasi-Periodic* (a) Sinyal Periodik
(b) Spektrum Sinyal [10]

4. Mode *Chaotic*

Feroresonansi mode ini memiliki spektrum sinyal non-periodik dan kontinu. Sinyal ini tidak dapat diinterupsi oleh frekuensi apa pun dan berbentuk tidak teratur (*chaos*). Mode ini dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Model *Chaotic* (a) Sinyal Periodik (b)
Spektrum Sinyal [10]

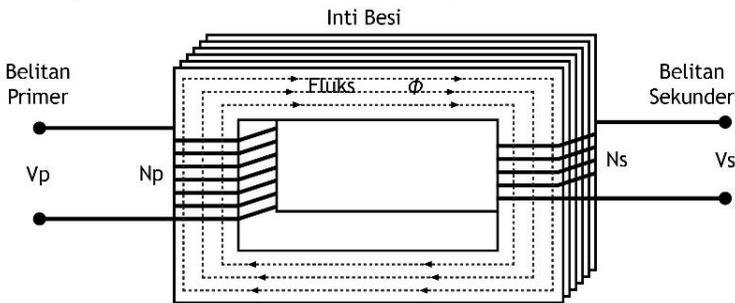
2.5 Teori Dasar Transformator

Transformator merupakan sebuah peralatan yang memiliki peranan penting dalam sistem tenaga listrik. Transformator berfungsi sebagai menyalurkan daya listrik dari generator tegangan menengah ke saluran transmisi tegangan tinggi dan untuk mengirimkan daya dari transmisi tegangan tinggi ke jaringan distribusi. Hal tersebut memiliki tujuan supaya rugi-rugi daya yang timbul pada sistem transmisi tidak melebihi rugi-rugi yang diinginkan [8]. Penggunaan transformator ini

digunakan dalam bidang sistem tenaga dan juga elektronika. Penggunaannya dalam sistem tenaga biasanya digunakan untuk mengatur tegangan yang sesuai untuk kebutuhan akan tegangan tinggi saat pengiriman daya listrik jarak.

2.5.1 Prinsip Kerja Transformator

Hukum Faraday merupakan hukum utama yang digunakan pada transformator. Hukum Faraday mengatakan bahwa gaya gerak listrik terinduksi pada rangkaian tertutup sama dengan negatif *rate* perubahan fluks magnetik terhadap waktu di dalam rangkaian.



Gambar 2.8 Model Transformator Sederhana

Transformator terbentuk dari dua buah atau lebih belitan (N) induksi yang terpisah namun dihubungkan oleh magnet pada suatu jalur seperti Gambar 2.8. Pada belitan primer dan belitan sekunder terbentuk *mutual induction* yang besar. Apabila salah satu belitan dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka akan timbul fluks bolak-balik (Φ) di inti besi yang terhubung ke belitan lain. Fluks yang berubah-ubah pada inti besi akan menimbulkan gaya gerak listrik (e) [14] sebesar:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.6)$$

Keterangan:

e = GGL induksi (V)

N = Jumlah lilitan

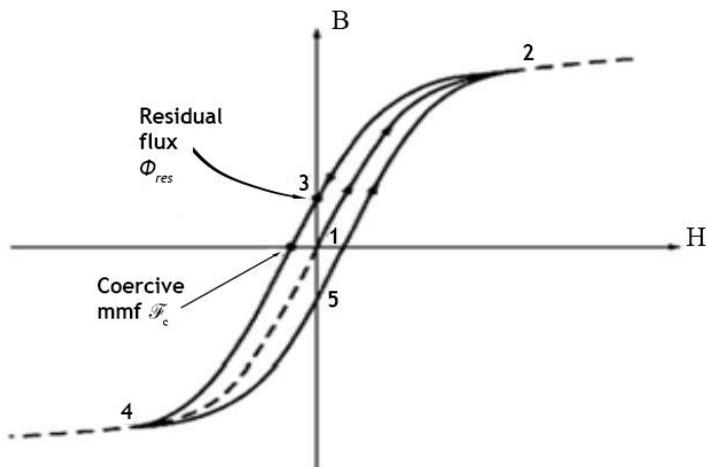
$d\Phi$ = Perubahan garis-garis gaya magnet (Wb)

dt = Perubahan waktu (s)

Arus listrik yang berputar pada sebuah inti besi maka inti besi tersebut akan berubah menjadi sebuah magnet. Jika magnet tersebut dihubungkan pada sebuah belitan makan pada ujung-ujung belitan tersebut akan timbul beda tegangan.

2.5.2 Kurva Magnetisasi Transformator

Kurva magnetisasi adalah sebuah kurva yang menunjukkan karakteristik dari sebuah transformator yang menunjukkan hubungan antara intensitas medan magnetik dengan simbol H dengan kerapatan magnetik dengan simbol B . Kurva magnetisasi mewakili inti dari sebuah transformator. Berdasarkan Gambar 2.9, jalur 1-2 adalah kondisi mula-mula transformator pada saat dialiri arus listrik. Kerapatan fluks akan meningkat hingga mencapai titik saturasinya. Nilai fluks akan turun melalui jalur 2-3-4 saat nilai arus menurun karena adanya faktor fluks sisa. Sejumlah *magnetomotive force* diperlukan atau dikenal dengan *coercive magnetomotive force* agar memaksa fluks mencapai nilai nol. Nilai fluks akan naik melalui jalur 4-5-2 saat nilai arus meningkat karena adanya faktor fluks sisa.



Gambar 2.9 Kurva Magnetisasi Transformator

Saat intensitas medan magnet berada di titik nol, kerapatan fluks tidak bisa berada di titik nol dikarenakan adanya fluks sisa. Fluks sisa tersebut dipengaruhi oleh permeabilitas inti transformator di mana

permeabilitas ini berdasarkan pemilihan material inti transformator. Kurva histerisis akan semakin sempit saat jenis material inti transformator semakin baik. Begitu juga sebaliknya, kurva histerisis akan semakin lebar saat jenis material inti transformator semakin buruk [12].

2.5.3 Fluks *Linkage*

Fluks *linkage* adalah hasil kali antara jumlah fluks yang lewat dengan jumlah belitan. Gambar 2.10 adalah pemodelan sederhana dari satu belitan kawat yang dialiri arus. Arus yang mengalir pada sebuah kawat akan menghasilkan medan magnet yang dapat digambarkan dengan garis medan magnet. Arah putaran medan magnet akan mengikuti aturan tangan kanan. Garis – garis medan magnet menutup arus listrik yang mengalir dan membentuk fluks magnet (Φ) yang menghubungkan belitan tersebut. Besar dari nilai fluks yaitu:

$$\Phi = B \cdot A \quad (2.7)$$

Keterangan:

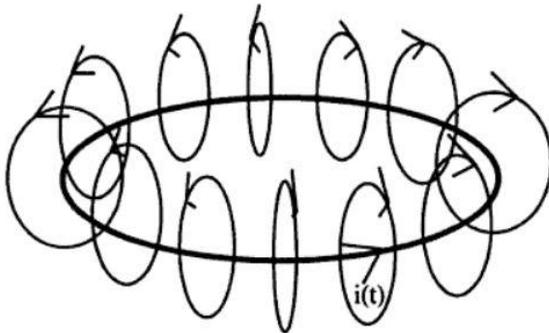
- Φ = Fluks magnetik (Wb)
- B = Kerapatan fluks magnet (T)
- A = Luas permukaan (m^2)

Saat belitan kawat pada inti transformator memiliki jarak yang berdekatan, besar dari fluks *linkage* yaitu:

$$\lambda = \Phi \cdot N \quad (2.8)$$

Keterangan:

- λ = Fluks *linkage* (Wb-t)
- Φ = Fluks magnetik (Wb)
- N = Jumlah belitan



Gambar 2.10 Sebuah Belitan Kawat yang Dialiri Arus dan Menghasilkan Garis Medan

2.5.4 Pengujian Transformator

Pengujian hubung singkat dan hubung terbuka dapat dilakukan untuk mendapatkan nilai induktansi dan resistansi sebuah transformator [15]. Gambar 2.11 merupakan rangkaian pengujian hubung singkat dimana belitan sekunder dihubungkan singkatkan dan belitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan. Nilai tegangan sumber diatur hingga nilai arus pada belitan sekunder mencapai nilai ratingnya. Nilai yang diukur pada saat pengujian ini adalah tegangan sumber, arus dan daya. Arus eksitasi transformator dapat diabaikan karena tegangan sumber relatif kecil saat pengujian. Tegangan jatuh timbul saat pengujian akibat elemen seri pada transformator karena nilai arus eksitasi diabaikan. Tujuan dari pengujian hubung singkat pada transformator adalah untuk mendapatkan nilai R_{eq} dan X_{eq} .

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (2.9)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \quad (2.10)$$

$$Z_{SE} = \frac{V_{SC} \angle 0^\circ}{I_{SC} \angle -\theta} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle -\theta = R_{eq} + jX_{eq} \quad (2.11)$$

$$R_{eq} = R_P + a^2 R_S \quad (2.12)$$

$$X_{eq} = X_P + a^2 X_S \quad (2.13)$$

Keterangan:

Z_{SE} = Impedansi (Ω)

V_{SC} = Tegangan hubung singkat (Volt)

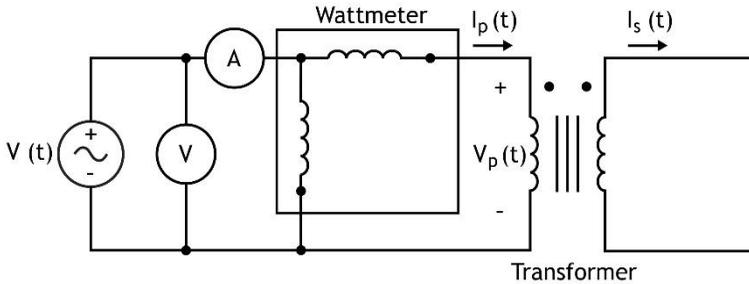
I_{SC} = Arus hubung singkat (Ampere)

θ = Sudut ($^\circ$)

P_{SC} = Daya hubung singkat (Watt)

R_{eq} = Resistansi ekuivalen (Ω)

X_{eq} = Reaktansi ekuivalen (Ω)



Gambar 2.11 Rangkaian Pengujian Hubung Singkat

Gambar 2.12 merupakan rangkaian pengujian hubung terbuka dimana belitan sekunder tidak dihubungkan dan belitan primer tidak dihubungkan ke sumber tegangan. Nilai yang diukur pada pengujian ini adalah tegangan sumber, arus, dan daya. Semua arus dari sumber akan mengalir ke bagian eksitasi transformator saat pengujian dilakukan. Nilai R_p dan X_p terlalu kecil jika dibandingkan dengan R_c dan X_c sehingga drop tegangannya tidak terlalu signifikan. Tujuan dari pengujian hubung terbuka pada transformator adalah untuk mendapatkan nilai R_c dan X_m .

$$|Y_E| = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \quad (2.14)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}} \quad (2.15)$$

$$Y_E = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\theta = \frac{1}{R_C} - j \frac{1}{X_M} \quad (2.16)$$

Keterangan:

Y_E = Admitansi (Siemens)

I_{OC} = Arus hubung terbuka (Ampere)

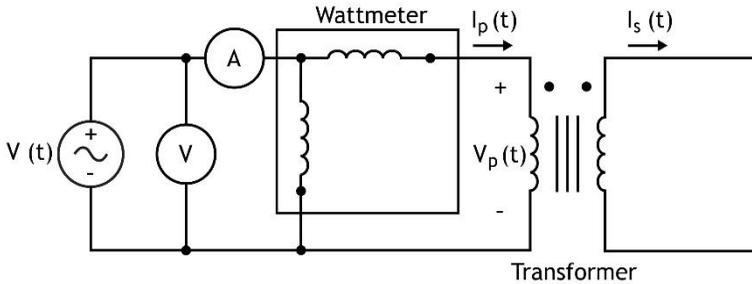
V_{OC} = Tegangan hubung terbuka (Volt)

θ = Sudut ($^\circ$)

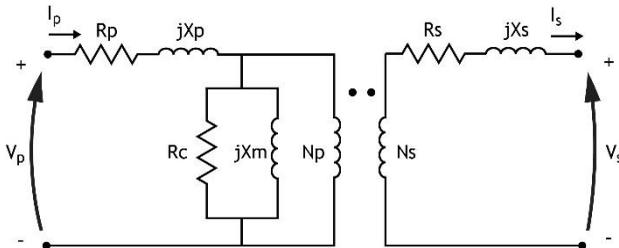
P_{OC} = Daya hubung singkat (Watt)

R_C = Resistansi inti (Ω)

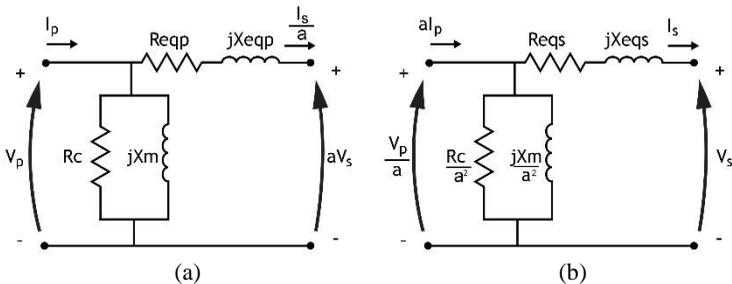
X_M = Reaktansi magnetisasi (Ω)



Gambar 2.12 Rangkaian Pengujian Hubung Terbuka



Gambar 2.13 Rangkaian Ekuivalen Transformator



Gambar 2.14 Rangkaian Ekuivalen Transformator (a) Sisi Primer (b) Sisi Sekunder

2.6 Analisis Korelasi

Analisis korelasi adalah sebuah cara yang dalam proses pengolahan sinyal dimana cara tersebut sangat efektif untuk melihat kesamaan antara dua buah sinyal. Pada sinyal digital rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$R_{xy}(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) + y(n+i) \quad (2.17)$$

Dimana N adalah total titik sampel dari sinyal. Beda waktu dari sinyal x dan y adalah $i \cdot T_s$, dimana T_s adalah interval sampel. Pada korelasi silang perbandingan amplitudo akan mempengaruhi hasil dari perhitungan dimana hal itu akan mengakibatkan kesulitan dalam membandingkan fungsi korelasi silang dari sinyal dengan amplitudo yang berbeda. Proses normalisasi harus dilakukan dalam menghilangkan dampak amplitudo tersebut.

$$A_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n)} \quad (2.18)$$

$$A_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y^2(n)} \quad (2.19)$$

$$r_{xy}(i) = \frac{R_{xy}(i)}{A_x A_y}, r_{xy}(i) \in [-1,1] \quad (2.20)$$

$$P_{xy} = \{\max|r_{xy}(i)|\}, P_{xy} \in [0,1] \quad (2.21)$$

Persamaan 2.18 dan 2.19 merupakan persamaan untuk mencari nilai rms dari amplitudo sinyal x dan y. Persamaan 2.20 adalah persamaan untuk mendapatkan nilai korelasi silang dari sinyal x dan y yang memiliki jangkauan -1 hingga 1. Pada korelasi silang, semakin besar nilai yang didapat maka kedua sinyal tersebut semakin sama, maka untuk melihat hal tersebut persamaan 2.21 mengambil nilai absolut maksimal dari data yang didapat [6]. Penggunaan korelasi silang digunakan dalam mendeteksi lokasi *fault* dalam saluran kabel HVDC [16] [17]. Selain itu, penggunaan korelasi silang digunakan dalam mendeteksi ferresonansi dan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah [6].

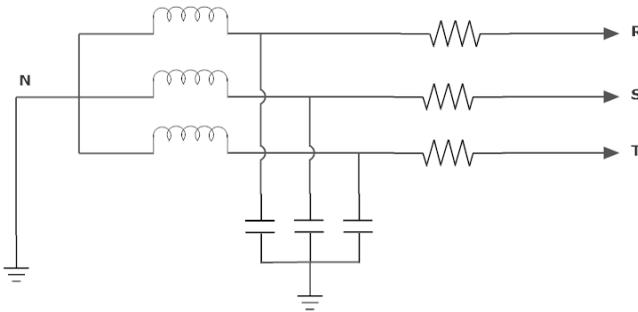
2.7 Sistem Pengetanahan

Pengetanahan suatu sistem bertujuan mengurangi efek dari gangguan fasa ke tanah berupa *arcing ground* dan membatasi tegangan pada fasa yang tidak terganggu [18]. Setiap jenis pengetanahan memiliki kekurangan dan kelebihan. Faktor yang menentukan penggunaan metode pengetanahan yaitu pembatasan besarnya arus gangguan tanah, sensitivitas rele gangguan tanah, tingkat pengamanan tegangan surja

dengan *arrester* dan pembatasan tegangan lebih transien [18]. Beberapa jenis sistem pengetanahan yaitu:

- Pengetanahan Netral Langsung

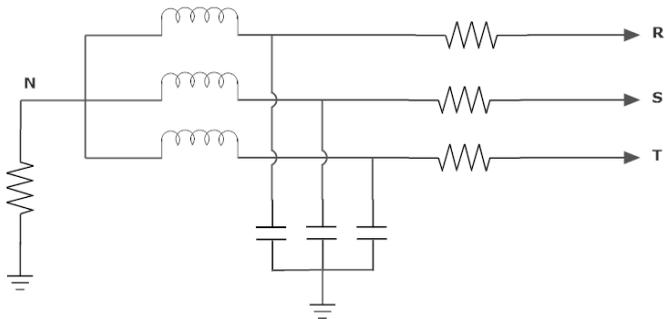
Pada sistem pengetanahan netral langsung, titik netral dari sistem langsung ditanahkan (*solid grounding*) seperti Gambar 2.15. Pada pengetanahan jenis ini besaran tegangan lebih antar fasa relatif lebih kecil dan lebih cepat mengetahui letak gangguan. Keuntungan dari pengetanahan jenis ini yaitu instalasinya sangat sederhana dan murah dan juga memiliki kekurangan yaitu setiap adanya gangguan ke tanah maka *circuit breaker* akan langsung terbuka dan arus gangguan ke tanah nilainya cukup besar [18].



Gambar 2.15 Sistem Pengetanahan Netral Langsung [18]

- Pengetanahan Netral dengan Tahanan

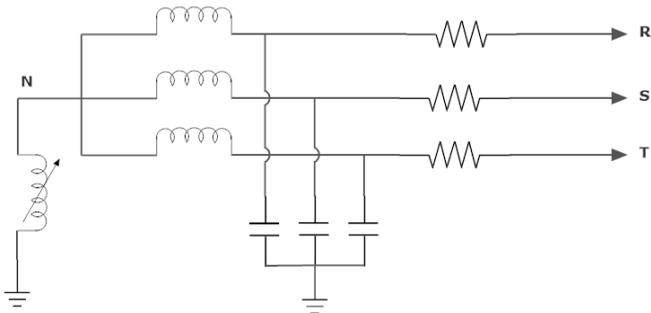
Pada sistem pengetanahan netral dengan tahanan, titik netral dihubungkan ke resistor terlebih dahulu sebelum masuk ke tanah seperti Gambar 2.16. Besarnya arus gangguan ke tanah menjadi lebih kecil akibat resistansi yang menghalanginya. Arus gangguan ke tanah dari sistem dibatasi antara 10 – 25 % dari arus gangguan tiga fasa, jika nilai arus lebih besar biasanya digunakan reaktor [18]. Pengetanahan jenis ini memiliki kekurangan yaitu timbulnya rugi – rugi daya pada resistor pengetanahan selama arus gangguan terjadi serta sensitivitas rele pengaman menjadi berkurang akibat arus gangguan ke tanah yang kecil.



Gambar 2.16 Sistem Pengetanahan dengan Tahanan [18]

- Pengetanahan Netral dengan Kumparan / *Petersen coil*

Pada sistem pengetanahan netral dengan kumparan, titik netral dihubungkan ke reaktor terlebih dahulu sebelum masuk ke tanah seperti Gambar 2.17. Pengaturan nilai reaktansi pada kumparan yang terpasang diatur melalui tap [18]. Keunggulan dari jenis pengetanahan ini adalah peralatan induktor lebih kecil dibandingkan resistor dan energi yang disisipkan reaktor lebih kecil. Kekurangannya yaitu prosedur yang lebih rumit dan memerlukan biaya yang mahal.

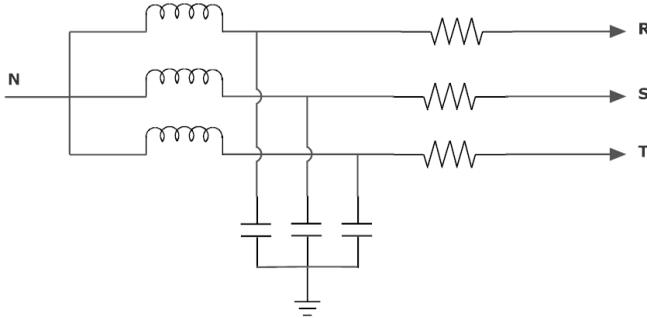


Gambar 2.17 Sistem Pengetanahan dengan Kumparan [18]

- Pengetanahan Netral Tidak Ditanahkan

Pada sistem pengetanahan ini, titik netral tidak ditanahkan ke tanah biasanya disebut juga pengetanahan *floating* seperti Gambar 2.18. Saat terjadi gangguan fasa ke tanah akan selalu mengakibatkan terganggunya saluran sehingga gangguan harus diisolir dengan membuka pemutus daya

dan adanya busur tanah masih bisa terjadi [18]. Tujuan dari pengetanahan ini adalah membatasi tegangan dari fasa – fasa yang tidak terganggu bila terjadi gangguan fasa ke tanah.



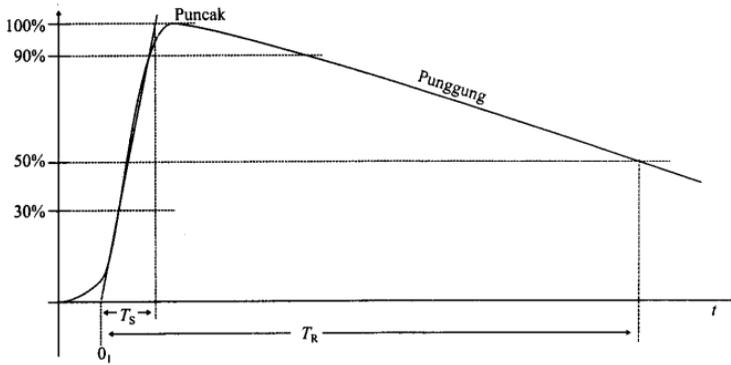
Gambar 2.18 Sistem Pengetanahan Tidak Ditanahkan [18]

2.8 Tegangan Impuls Petir [19]

Badai petir dapat terbentuk karena adanya massa udara panas dengan kelembapan cukup tinggi yang terbawa ke ketinggian tertentu. Penyebab dari kejadian tersebut antara lain:

- Cahaya matahari memanasi permukaan bumi secara intensif khususnya saat terjadi badai panas dimana hal tersebut membuat lapisan udara dekat permukaan bumi terhangatkan, menjadi ringan dan bergerak ke atas.
- Udara dekat permukaan bumi akan bergerak ke atas saat terbentur permukaan bumi vertikal seperti bukit atau gunung saat terjadi badai orografis.
- dll

Petir sendiri memiliki bentuk standar tegangan seperti Gambar 2.19. Waktu untuk mencapai puncak tegangan impuls petir atau T_s memiliki nilai sebesar $1,2 \mu s \pm 30\%$. Waktu punggug atau T_R adalah waktu antara mulainya impuls dan 50% nilai tegangan pada punggug gelombang dimana nilainya sebesar $50 \mu s \pm 20\%$.



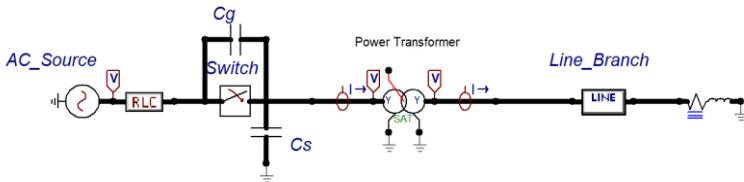
Gambar 2.19 Standar Tegangan Impuls Petir

BAB III

SKEMA PEMODELAN FERORESONANSI DAN METODE KORELASI, BIFURKASI, *FAST* *FOURIER TRANSFORM*

3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

Pemodelan rangkaian ini memiliki tujuan untuk menyimulasikan bagaimana fenomena feroresonansi dapat terjadi pada suatu keadaan tertentu. Gambar 3.1 adalah rangkaian dasar dari simulasi feroresonansi yang digunakan dalam tugas akhir ini. Pemodelan rangkaian feroresonansi ini meliputi pemodelan rangkaian dengan *trigger* berupa petir, switching, dan *fault* satu fasa ke tanah serta rangkaian normal sebagai pembanding. Pemodelan rangkaian feroresonansi ini meliputi komponen-komponen utama seperti: sumber tegangan AC 150 kV, resistor, *grading capacitance*, *shunt capacitance*, *switch*, petir dan induktor non linier. *Grading capacitance* merupakan kapasitor untuk meratakan tegangan di kontak *circuit breaker*. *Shunt capacitance* adalah nilai kapasitansi pada saluran transmisi. Pemodelan rangkaian ini dilakukan pada *Alternative Transient Program* atau ATPDraw. Parameter dari rangkaian simulasi feroresonansi menggunakan tugas akhir sebelumnya dan dapat dilihat pada Tabel 3.1.



Gambar 3.1 Rangkaian Simulasi Feroresonansi

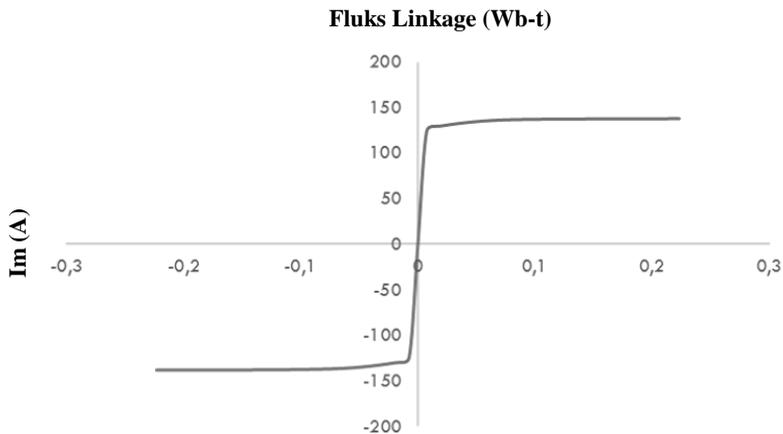
Tabel 3.1 Parameter Rangkaian Pemodelan Feroresonansi [20]

Parameter	Nilai	Satuan
Sumber Tegangan	150	kV
Frekuensi	50	Hz
Kapasitas Daya	30	MVA
<i>Grading Capacitance</i> (C_g)	0,05	μF
<i>Shunt Capacitance</i> (C_s)	0,2	μF

Parameter	Nilai	Satuan
Resistansi Primer	0,913	Ω
Induktansi Primer	130,85	mH
Resistansi Sekunder	0,02078	Ω
Induktansi Sekunder	2,978	mH
Resistansi Magnetisasi	6,5	M Ω

Tabel 3.2 Parameter Kurva Magnetisasi

I (A)	Fluks (Wb-t)
0,00745	123,79
0,018562	129,59
0,0745246	136,45
0,222739	137,82



Gambar 3.2 Kurva Magnetisasi Transformator Daya [20]

3.1.1 Rangkaian Normal

Sumber tegangan yang digunakan pada simulasi ini merupakan sumber tegangan AC dengan tegangan rms *line-line* sebesar 150 kV dengan frekuensi 50 Hz. Rangkaian simulasi dengan keadaan normal dapat dilihat pada Gambar 3.3. Pada keadaan normal ini, *switch* dalam keadaan *normally close*. Nilai tegangan yang dibangkitkan oleh sumber adalah nilai tegangan rms *line-neutral*. Besar tegangan *line-neutral* yang digunakan:

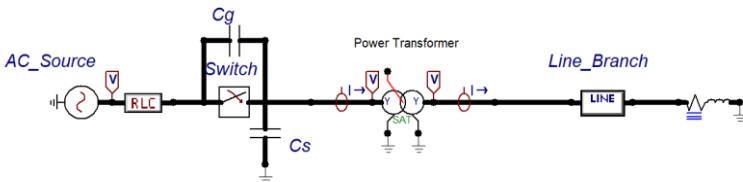
$$V_{L-N_{rms}} = \frac{V_{L-L_{rms}}}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

$$V_{L-N_{rms}} = \frac{150000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 86602,54 \text{ V} \quad (3.2)$$

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

$$V_{L-N_{peak}} = V_{L-N_{rms}} \times \sqrt{2} \quad (3.3)$$

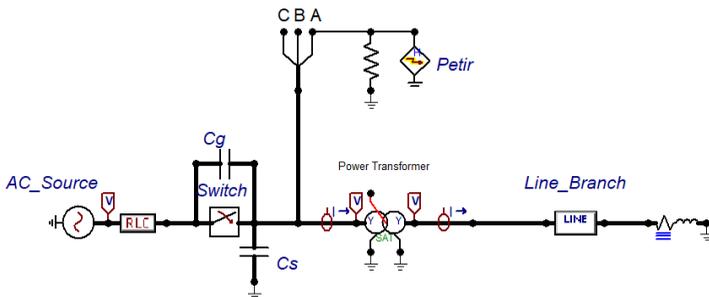
$$V_{L-N_{peak}} = 86602,54 \times \sqrt{2} = 122474,48 \text{ V} \quad (3.4)$$



Gambar 3.3 Pemodelan Rangkaian Normal pada ATPDraw

3.1.2 Rangkaian Pemodelan akibat Petir

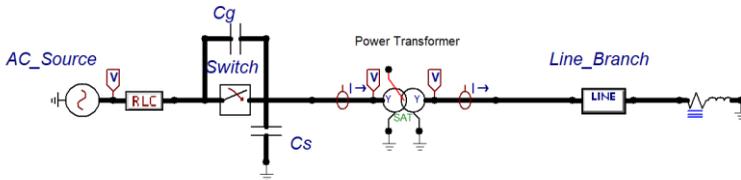
Gambar 3.4 merupakan rangkaian simulasi dengan jenis gangguan sambaran petir pada saluran menuju transformator daya dan petir hanya menyambar di fasa A saja. Model petir yang digunakan adalah model petir Heidler yang disediakan pada perangkat lunak ATPDraw yang dipasang secara paralel dengan resistor sebesar 400Ω dengan besaran waktu tegangan impuls petir $1,2/50 \mu s$. Besaran arus petir divariasikan mulai dari 4 kA hingga 40 kA. Sambaran petir diasumsikan terjadi di fasa A pada waktu 0,1 detik.



Gambar 3.4 Pemodelan Rangkaian akibat Petir pada ATPDraw

3.1.3 Rangkaian Pemodelan akibat *Switching*

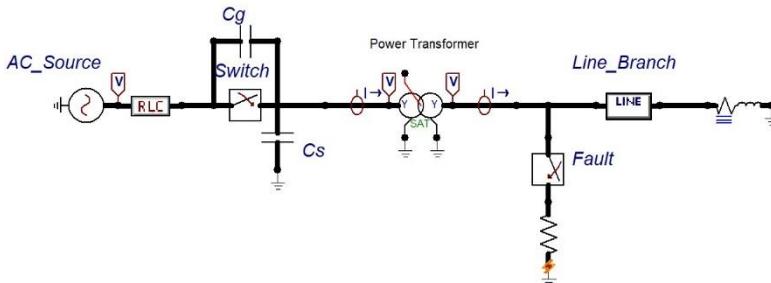
Gambar 3.5 merupakan rangkaian simulasi dengan jenis gangguan *switching* yang muncul akibat pemutusan daya oleh *Circuit Breaker* (CB) dengan kondisi awal *switch* tertutup. Pada simulasi ini, nilai yang divariasikan adalah waktu saat *switch* terbuka, yaitu mulai dari 0,05 – 0,5 detik.



Gambar 3.5 Pemodelan Rangkaian akibat *Switching* pada ATPDraw

3.1.4 Rangkaian Pemodelan akibat Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

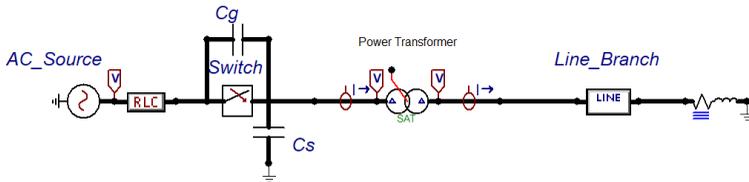
Gambar 3.6 merupakan rangkaian simulasi dengan jenis gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah yang dimodelkan oleh *switch* yang awalnya terbuka, kemudian pada detik ke 0,1 tertutup sebagai representasi bahwa terjadinya gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah. Pada simulasi ini, nilai yang divariasikan adalah besaran tahanan yang terhubung ke *ground* mulai dari 1 - 20 Ω .



Gambar 3.6 Pemodelan Rangkaian akibat Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah pada ATPDraw

3.1.5 Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan *Floating – Floating*

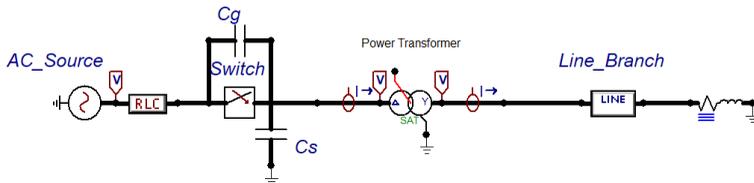
Gambar 3.7 adalah rangkaian simulasi dimana transformator daya memiliki sistem pengetanahan *floating* pada sisi primer dan sekunder. Gangguan yang diberikan berupa *switching* tiga fasa secara serempak pada detik ke 0,1.



Gambar 3.7 Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan *Floating – Floating*

3.1.6 Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan *Floating – Solid*

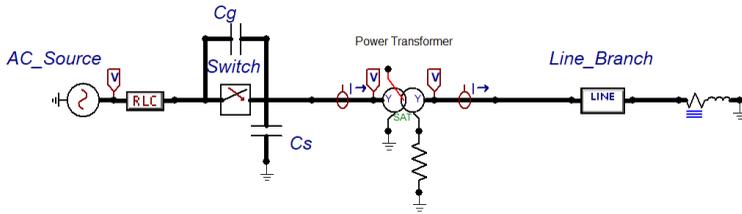
Gambar 3.8 adalah rangkaian simulasi dimana transformator daya memiliki sistem pengetanahan *floating* pada sisi primer dan *solid* pada sisi sekunder. Gangguan yang diberikan berupa *switching* tiga fasa secara serempak pada detik ke 0,1.



Gambar 3.8 Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan *Floating – Solid*

3.1.7 Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan *Solid – Resistance*

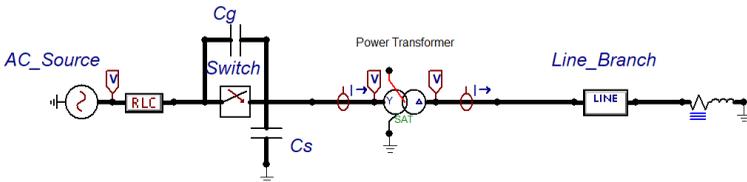
Gambar 3.9 adalah rangkaian simulasi dimana transformator daya memiliki sistem pengetanahan *solid* pada sisi primer dan *resistance* 500 Ω pada sisi sekunder. Gangguan yang diberikan berupa *switching* tiga fasa secara serempak pada detik ke 0,1.



Gambar 3.9 Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan *Solid – Resistance*

3.1.8 Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan *Solid – Floating*

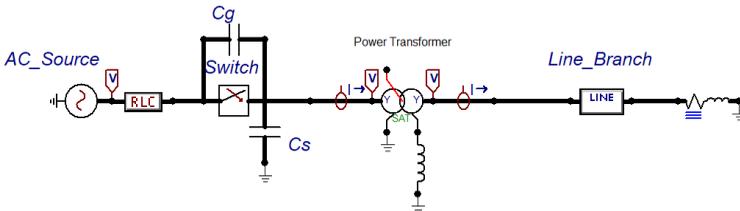
Gambar 3.10 adalah rangkaian simulasi dimana transformator daya memiliki sistem pengetanahan *solid* pada sisi primer dan *floating* pada sisi sekunder. Gangguan yang diberikan berupa *switching* tiga fasa secara serempak pada detik ke 0,1.



Gambar 3.10 Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan *Solid – Floating*

3.1.9 Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan *Solid – Reactor*

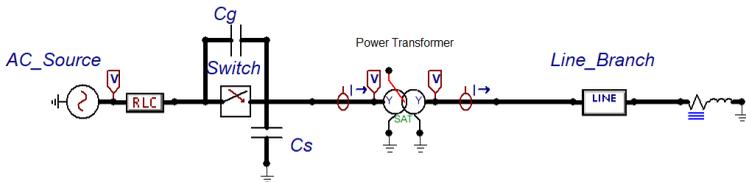
Gambar 3.11 adalah rangkaian simulasi dimana transformator daya memiliki sistem pengetanahan *solid* pada sisi primer dan *reactor* 95 mH pada sisi sekunder. Gangguan yang diberikan berupa *switching* tiga fasa secara serempak pada detik ke 0,1.



Gambar 3.11 Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan *Solid – Reactor*

3.1.10 Rangkaian Pemodelan dengan Pengetanahan *Solid – Solid*

Gambar 3.12 adalah rangkaian simulasi dimana transformator daya memiliki sistem pengetanahan *solid* pada sisi primer dan pada sisi sekunder. Gangguan yang diberikan berupa *switching* tiga fasa secara serempak pada detik ke 0,1.



Gambar 3.12 Pemodelan Rangkaian dengan Transformator Daya Pengetanahan *Solid – Solid*

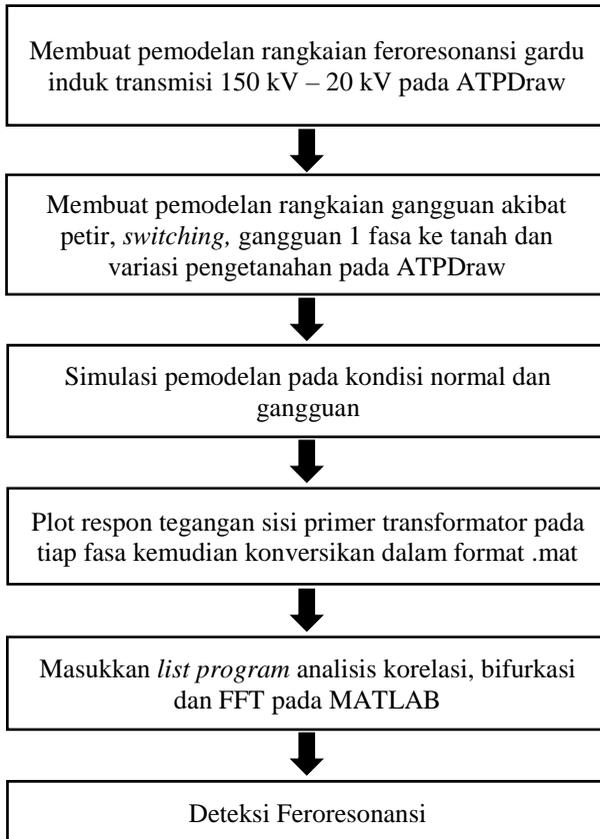
3.2 Skenario Simulasi

3.2.1 Pengambilan Data

Proses pengambilan data pada Tugas Akhir ini dilakukan menggunakan perangkat lunak berupa ATPDraw, menggunakan beberapa kondisi yaitu saat kondisi normal, kondisi gangguan akibat petir, *switching*, hubung singkat 1 fasa ke tanah dan variasi jenis pengetanahan. Rangkaian simulasi dijalankan dalam waktu 1 detik dengan waktu variabel step 10 μ detik. Dengan pemberian variasi pada masing-masing kondisi pemodelan, didapatkan data setelah menjalankan simulasi untuk setiap rangkaian. Data yang diambil adalah data berupa nilai serta bentuk gelombang dari tegangan pada sisi primer transformator untuk setiap kondisi.

3.2.2 Pengolahan Data

Proses pengolahan data pada Tugas Akhir ini dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB. Dari data yang telah diperoleh akan dilakukan analisis korelasi dengan *threshold* 0,9 [6], plot diagram bifurkasi dan *Fast Fourier Transform* (FFT). Analisis korelasi, diagram bifurkasi dan FFT dilakukan dengan menggunakan koding yang dibuat pada MATLAB untuk melakukan proses perbandingan nilai antara sinyal normal dengan sinyal gangguan.



Gambar 3.13 Flowchart Pengambilan dan Pengolahan Data

BAB IV

ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR DAYA DENGAN KORELASI, BIFURKASI DAN *FAST FOURIER TRANSFORM*

4.1 Kondisi Normal

Sumber tegangan simulasi rangkaian pemodelan feroresonansi pada saat kondisi normal bernilai 150 kV. Durasi simulasi berlangsung 1 detik. Pada kondisi normal, tidak ada proses gangguan pada rangkaian sehingga tidak menimbulkan efek apapun. Hasil respon tegangan bagian primer transformator pada simulasi ATPDraw merupakan keadaan *steady state*. Berdasarkan hasil respon tegangan tersebut, perbedaan sudut setiap fasa sebesar 120°. Hasil dari simulasi kondisi normal dijadikan sebagai respon pembanding antara simulasi menggunakan gangguan *fault*, petir, *switching*, dan variasi pengetanahan.

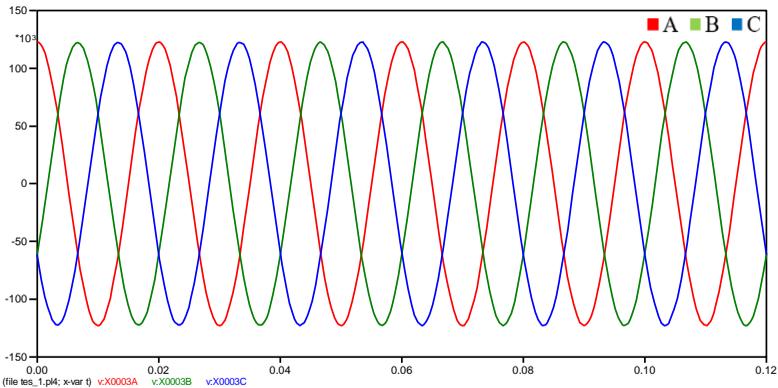
Sumber tegangan yang terpasang adalah tegangan AC rms *line-line* ($V_{L-L \text{ rms}}$) 150 kV, 50 Hz. Nilai tegangan *line-neutral* ($V_{L-N \text{ rms}}$) pada setiap fasa adalah:

$$V_{L-N\text{rms}} = \frac{V_{L-L\text{rms}}}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$
$$V_{L-N\text{rms}} = \frac{150000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 86602,5 \text{ V}$$

Tegangan puncak *line-neutral* ($V_{\text{peak}_{L-\text{neutral}}}$) pada tiap fasa adalah:

$$V_{L-N\text{peak}} = V_{L-N\text{rms}} \times \sqrt{2} \quad (4.2)$$
$$V_{L-N\text{peak}} = 86602,5 \times \sqrt{2} = 122474,5 \text{ V}$$

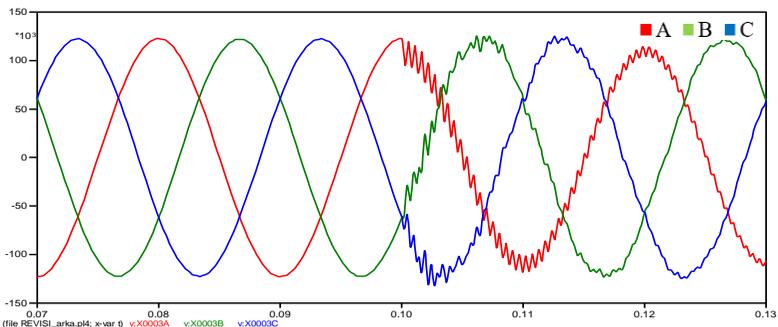
Respon tegangan primer pada saat kondisi normal setiap fasanya dapat dilihat pada Gambar 4.1. Tegangan puncak pada hasil simulasi sesuai dengan hasil perhitungan.



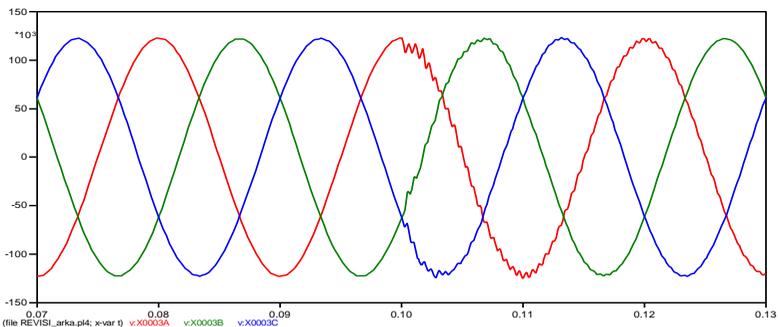
Gambar 4.1 Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi Normal

4.2 Kondisi Gangguan akibat *Fault*

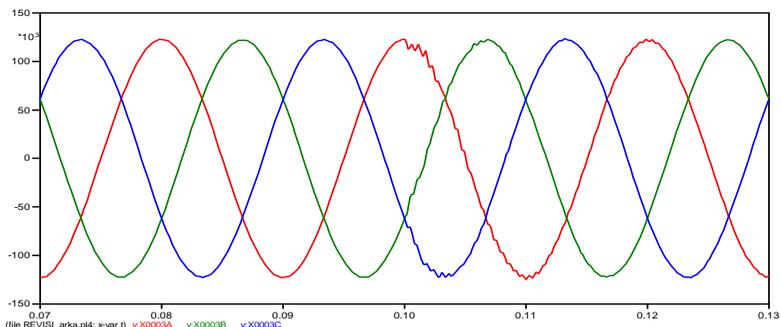
Pada kondisi ini disimulasikan sistem mengalami gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada sisi sekunder fasa A dengan tertutupnya *switch* yang telah terhubung dengan sebuah tahanan ke *ground*. Gangguan *fault* terjadi pada detik ke 0,1 dengan lama simulasi selama 1 detik. Nilai tahanan yang terhubung ke *ground* divariasikan antara 1 – 20 Ω . Dari Gambar 4.2 hingga Gambar 4.4 terlihat bahwa setelah *switch* tertutup pada detik ke 0,1 terjadi distorsi pada respon tegangan pada masing-masing fasa. Semakin besar nilai tahanannya, distorsi yang ditimbulkan semakin sedikit.



Gambar 4.2 Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi *Fault* dengan Tahanan *Fault* 1 Ω



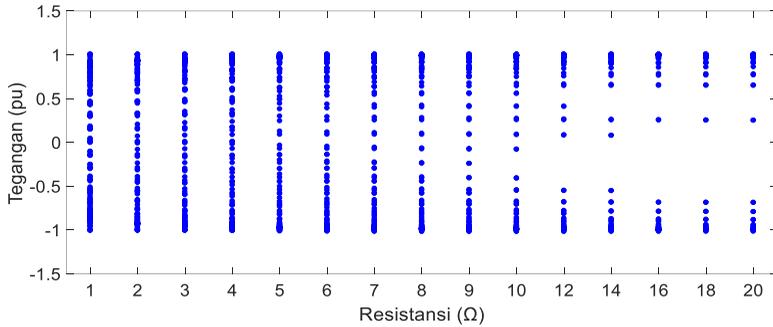
Gambar 4.3 Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi *Fault* dengan Tahanan *Fault* 10 Ω



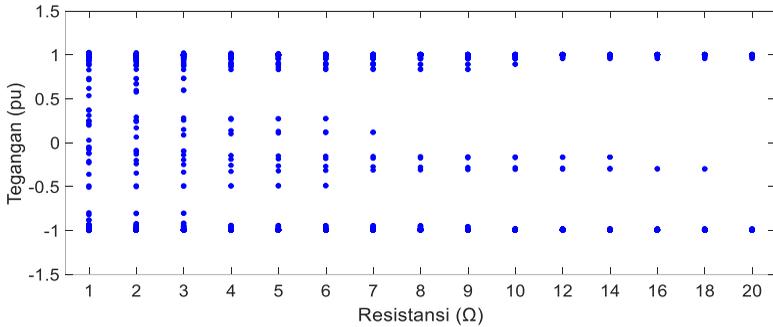
(b)

Gambar 4.4 Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi *Fault* dengan Tahanan *Fault* 20 Ω

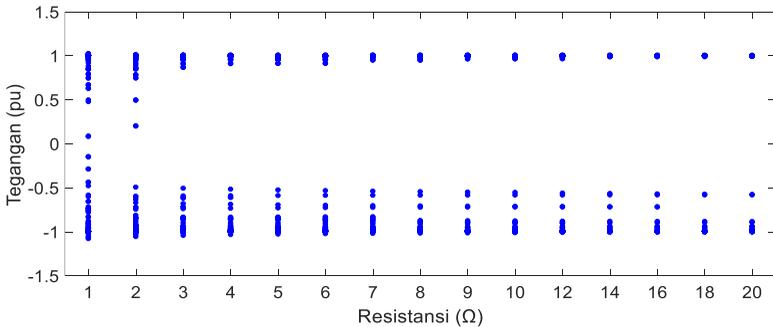
Hasil dari diagram bifurkasi gangguan akibat *fault* dapat dilihat pada Gambar 4.5 hingga Gambar 4.7. Terlihat bahwa persebaran nilai tegangan puncak pada setiap fasa berbeda-beda. Pada fasa A, persebaran nilai tegangan puncak merata pada setiap nilai tegangan. Pada fasa B, persebaran nilai tegangan puncak cenderung merata yaitu berkisar di daerah $-0,5 - 1$ pu. Pada fasa C, persebaran nilai tegangan puncak cenderung berada di bawah yaitu berkisar di daerah $-0,5 - -1$ pu.



Gambar 4.5 Diagram Bifurkasi Variasi Resistansi pada Fasa A



Gambar 4.6 Diagram Bifurkasi Variasi Resistansi pada Fasa B



Gambar 4.7 Diagram Bifurkasi Variasi Resistansi pada Fasa C

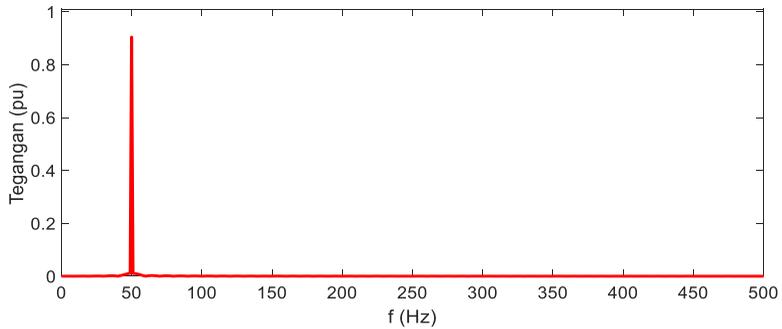
Tabel 4.1 menunjukkan korelasi antara kondisi saat terjadi *fault* dengan kondisi saat normal. Hasil yang didapat menunjukkan respon tegangan akibat terjadinya *fault* hanya menimbulkan distorsi sesaat

sehingga respon tegangannya mendekati respon tegangan sinus murni yang mengakibatkan nilai korelasinya mendekati 1.

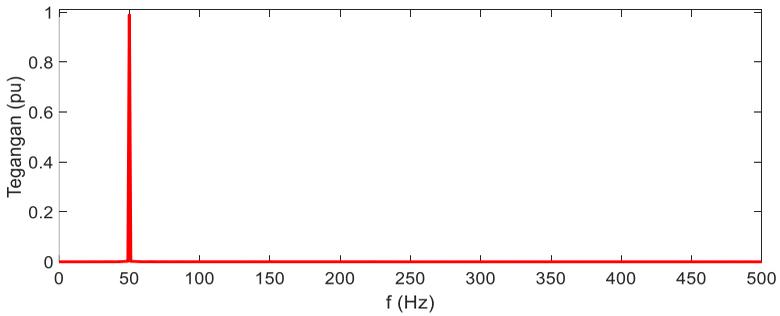
Tabel 4.1 Hasil Korelasi akibat *Fault*

Resistansi (Ω)	A	B	C
1	0.9989	0.9997	0.9997
2	0.9986	0.9998	0.9997
3	0.9988	0.9998	0.9998
4	0.9991	0.9998	0.9998
5	0.9993	0.9998	0.9998
6	0.9995	0.9998	0.9998
7	0.9996	0.9988	0.9998
8	0.9996	0.9988	0.9998
9	0.9997	0.9988	0.9998
10	0.9997	0.9998	0.9998
12	0.9998	0.9998	0.9998
14	0.9999	0.9998	0.9998
16	0.9999	0.9998	0.9998
18	0.9999	0.9998	0.9998
20	0.9999	0.9998	0.9998

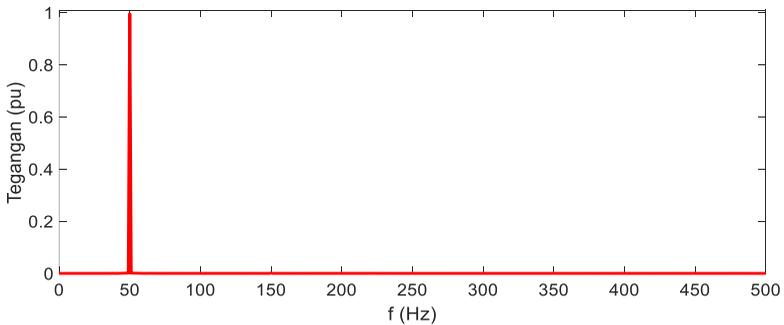
Gambar 4.8 hingga Gambar 4.10 adalah hasil pengolahan data menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) saat terjadi *fault*. Hasil yang didapat menunjukkan nilai tegangan yang dominan muncul adalah nilai tegangan di frekuensi 50 Hz dengan nilai masing – masing sebesar 0,9042 pu pada 0,1 Ω , 0,9899 pu pada 10 Ω , dan 0,9955 pada 20 Ω . Hasil tersebut juga memperlihatkan gangguan akibat *fault* tidak menimbulkan feroresonansi karena nilai tegangan dominan muncul pada frekuensi 50 Hz.



Gambar 4.8 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan pada Tahanan *Fault* 1Ω



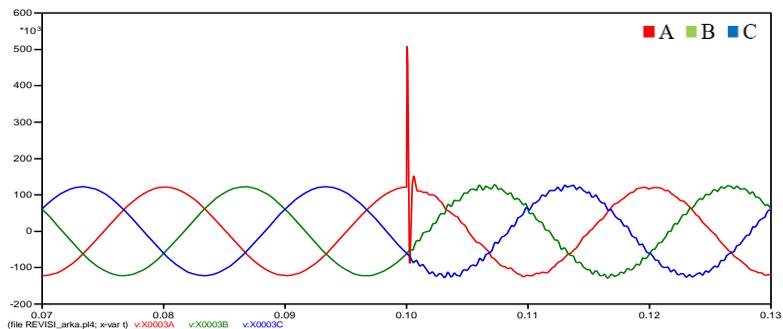
Gambar 4.9 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan pada Tahanan *Fault* 10Ω



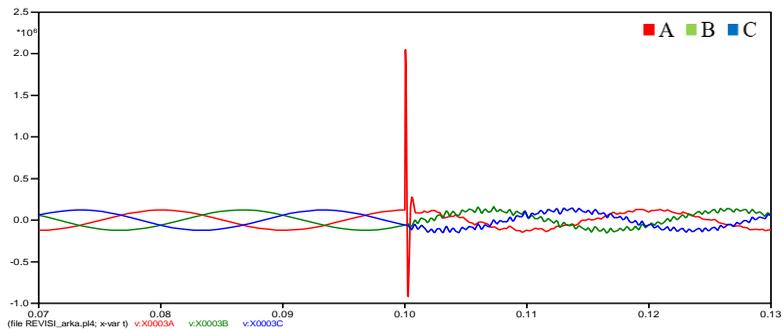
Gambar 4.10 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan pada Tahanan *Fault* 20Ω

4.3 Kondisi Gangguan akibat Petir

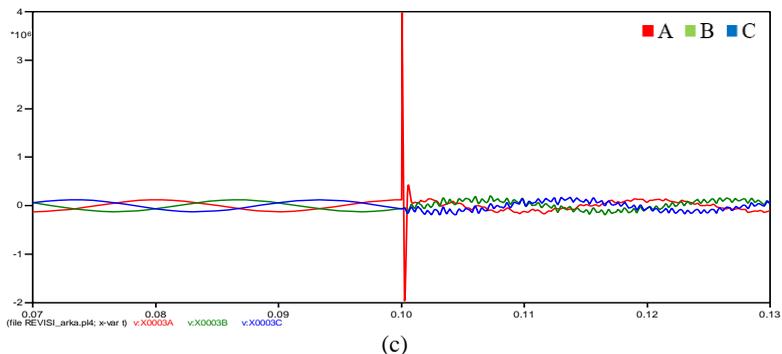
Pada kondisi ini disimulasikan sistem mengalami gangguan akibat petir yang menyambar saluran pada fasa A. Gangguan akibat petir terjadi pada detik ke 0,1 dengan lama simulasi selama 1 detik. Nilai arus petir yang menyambar divariasikan antara 4 – 40 kA. Dari Gambar 4.11 hingga Gambar 4.13 terlihat bahwa sesaat setelah petir menyambar pada detik ke 0,1 terjadi lonjakan nilai tegangan yang drastis pada fasa A. Pada fasa B dan C juga mengalami lonjakan nilai tegangan namun tidak separah fasa A. Lonjakan nilai tegangan tersebut hanya terjadi sesaat. Semakin besar nilai arus petir yang menyambar maka lonjakan nilai tegangannya juga semakin besar.



Gambar 4.11 Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi Gangguan Petir dengan Arus 4 kA

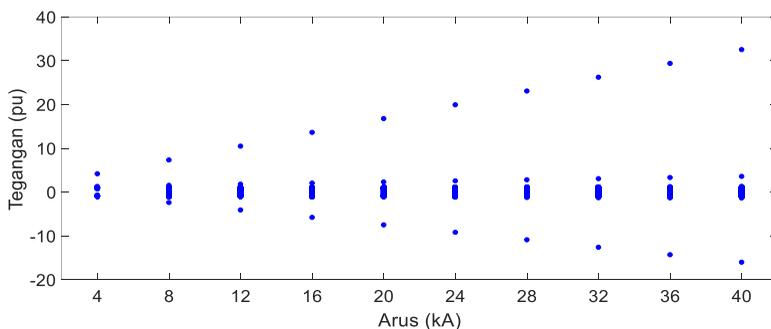


Gambar 4.12 Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi Gangguan Petir dengan Arus 20 kA

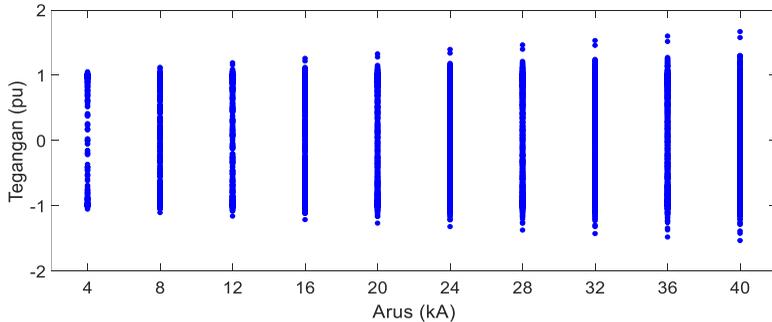


Gambar 4.13 Respon Tegangan Transformator Daya Saat Kondisi Gangguan Petir dengan Arus 40 kA

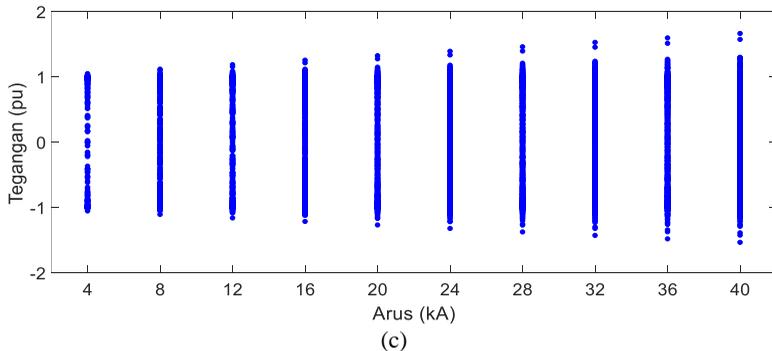
Hasil dari diagram bifurkasi gangguan akibat petir dapat dilihat pada Gambar 4.14 hingga Gambar 4.16. Terlihat bahwa persebaran nilai tegangan puncak pada setiap fasanya berbeda-beda. Pada fasa A, kenaikan nilai tegangan puncak berbanding lurus dengan kenaikan nilai arus. Keadaan terparah terjadi saat arus bernilai 40 kA di mana nilai tegangannya sebesar 32,48 pu. Kenaikan nilai tegangan puncak pada fasa B dan C sama seperti pada fasa yaitu berbanding lurus dengan kenaikan nilai arus namun tidak separah fasa A. Pada fasa B, nilai tegangan terparah terjadi pada 40 kA yaitu sebesar 1,66 pu dan pada fasa C sebesar 1,52 pu.



Gambar 4.14 Diagram Bifurkasi Variasi Arus Petir pada Fasa A



Gambar 4.15 Diagram Bifurkasi Variasi Arus Petir pada Fasa B



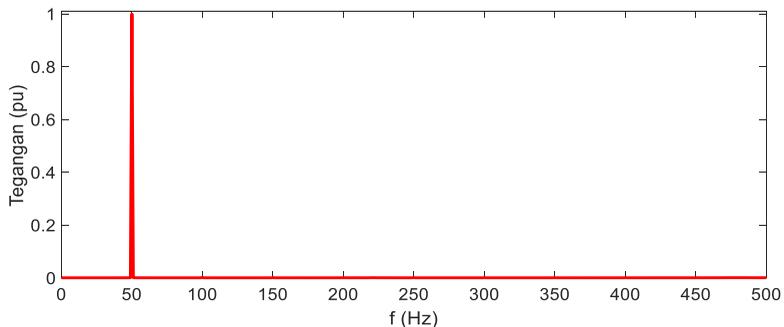
Gambar 4.16 Diagram Bifurkasi Variasi Arus Petir pada Fasa C

Tabel 4.2 menunjukkan korelasi antara kondisi saat terjadi gangguan petir dengan kondisi saat normal. Hasil yang didapat menunjukkan respon tegangan akibat terjadinya gangguan petir menimbulkan lonjakan tegangan secara drastis dalam waktu yang singkat namun menghasilkan distorsi yang berlanjut pada setiap peningkatan nilai arus petir yang menyambar pada fasa A. Pada fasa A khususnya pada arus petir 40 kA, nilai korelasi lebih kecil dari 0,9 namun respon tegangan yang dihasilkan tidak menunjukkan keadaan feroresonansi. Sesuai dengan data yang didapat, semakin besar nilai arusnya, besar korelasi semakin kecil.

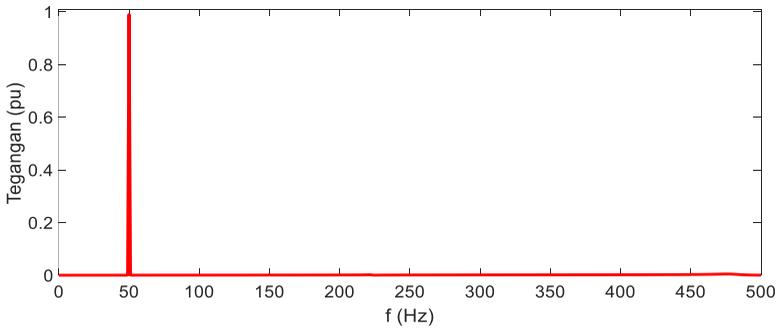
Tabel 4.2 Hasil Korelasi akibat Petir

Arus (kA)	A	B	C
4	0.9983	0.9997	0.9997
8	0.9947	0.9996	0.9996
12	0.9889	0.9994	0.9994
16	0.9809	0.9991	0.9991
20	0.971	0.9988	0.9988
24	0.9592	0.9984	0.9984
28	0.9458	0.9979	0.9979
32	0.931	0.9973	0.9973
36	0.9151	0.9967	0.9967
40	0.8982	0.9959	0.9959

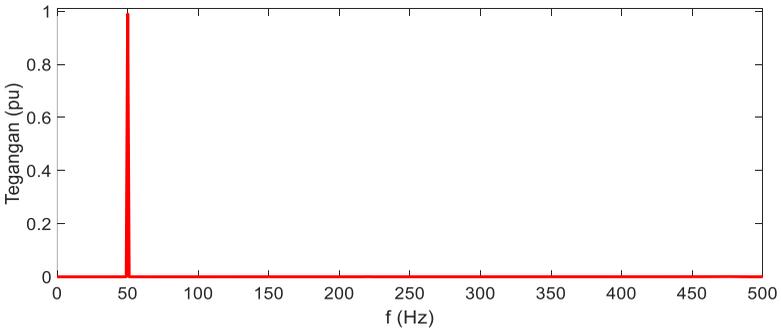
Gambar 4.17 hingga Gambar 4.19 adalah hasil pengolahan data menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) saat terjadi petir. Hasil yang didapat menunjukkan nilai tegangan yang dominan muncul adalah nilai tegangan di frekuensi 50 Hz dengan nilai masing – masing sebesar 0,9895 pu pada 4 kA, 0,9896 pu pada 20 kA, dan 0,9897 pada 40 kA. Hasil tersebut juga memperlihatkan gangguan akibat petir tidak menimbulkan feroresonansi karena nilai tegangan dominan muncul pada frekuensi 50 Hz.



Gambar 4.17 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan dengan Arus Petir Sebesar 4 kA



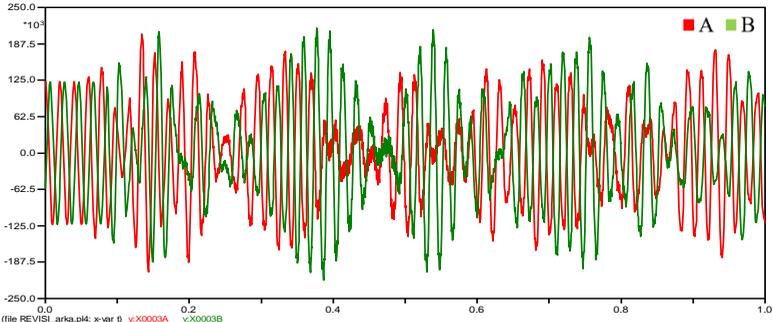
Gambar 4.18 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan dengan Arus Petir Sebesar 20 kA



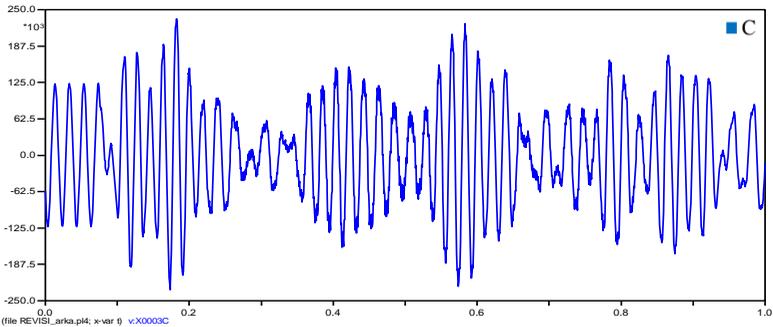
Gambar 4.19 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan dengan Arus Petir Sebesar 40 kA

4.4 Kondisi Gangguan akibat *Switching*

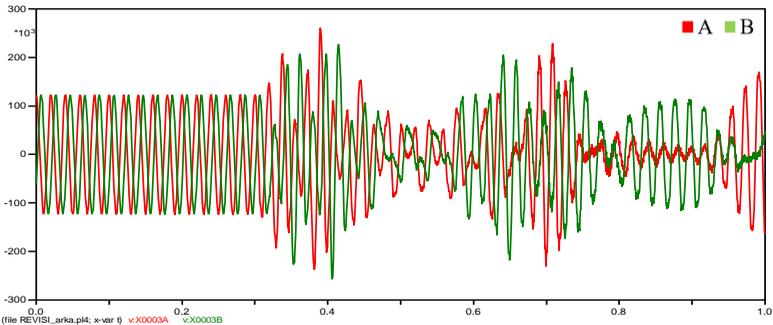
Pada kondisi ini disimulasikan sistem mengalami gangguan akibat *switching* 3 fasa secara serempak. Simulasi ini dilakukan selama 1 detik. Waktu *switching* divariasikan antara 0,05 – 0,5 detik. Dari Gambar 4.20 hingga Gambar 4.25 terlihat bahwa ketika semua fasa terbuka, terjadi keadaan feroresonansi yang mengakibatkan tegangan lebih pada sistem. Fenomena feroresonansi yang terjadi adalah mode *chaotic*.



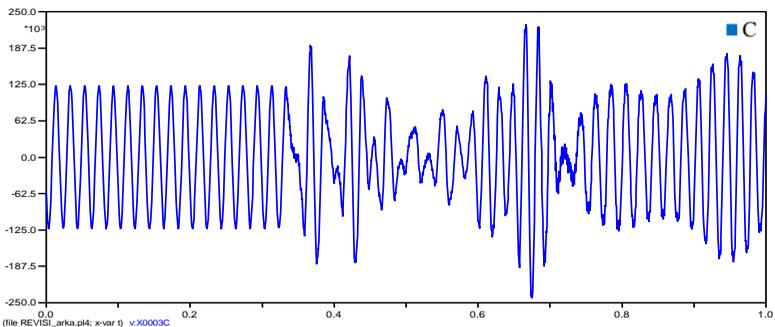
Gambar 4.20 Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi *Switching* pada Fasa A dan B saat 0,1 Detik



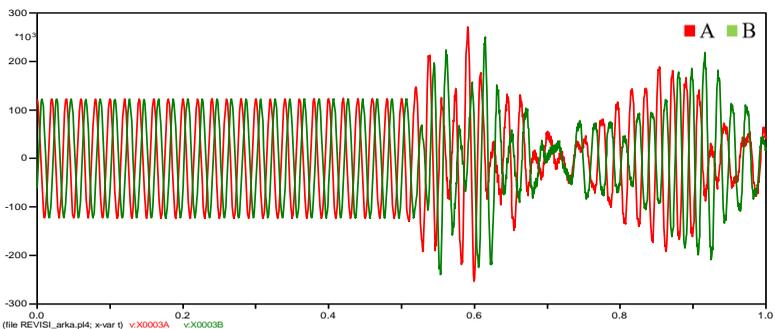
Gambar 4.21 Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi *Switching* pada Fasa C saat 0,1 Detik



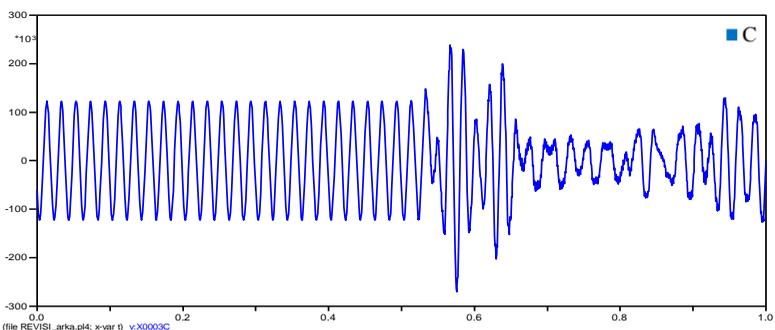
Gambar 4.22 Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi *Switching* pada Fasa A dan B saat 0,3 Detik



Gambar 4.23 Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi *Switching* pada Fasa C saat 0,3 Detik



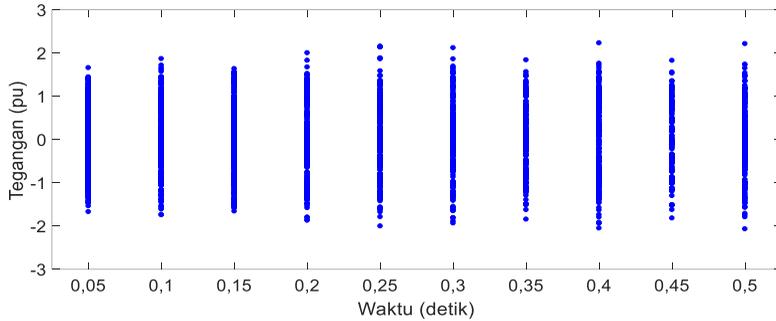
Gambar 4.24 Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi *Switching* pada Fasa A dan B saat 0,5 Detik



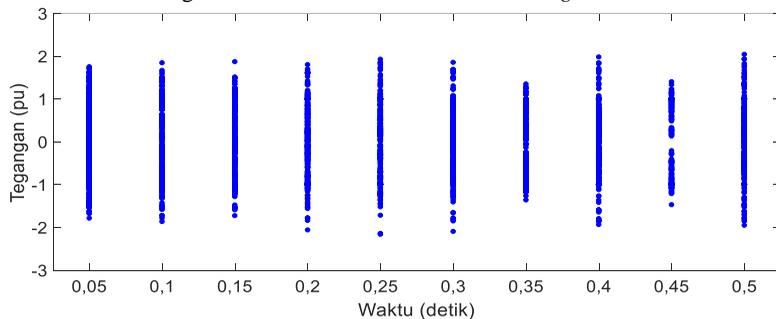
(f)

Gambar 4.25 Respon Tegangan Transformator Daya saat Kondisi *Switching* pada Fasa C saat 0,5 Detik

Hasil dari diagram bifurkasi akibat *switching* dapat dilihat pada Gambar 4.26 hingga Gambar 4.28. Terlihat bahwa persebaran nilai tegangan puncak pada setiap fasanya merata. Tegangan lebih pada terbesar pada fasa A bernilai 2,23 pu pada waktu 0,4 detik. Tegangan lebih pada terbesar pada fasa B bernilai 2,16 pu pada waktu 0,25 detik. Sedangkan, Tegangan lebih pada terbesar pada fasa C bernilai 2,2 pu pada waktu 0,5 detik.

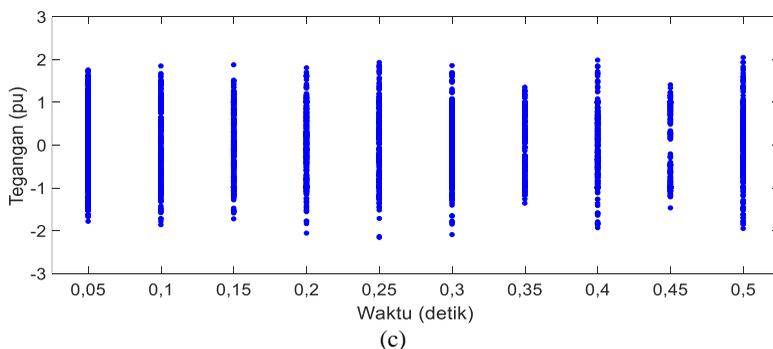


Gambar 4.26 Diagram Bifurkasi Variasi Waktu *Switching* Fasa A



Gambar 4.27 Diagram Bifurkasi Variasi Waktu *Switching* Fasa B

Tabel 4.3 menunjukkan korelasi antara kondisi saat *switching* dengan kondisi saat normal. Hasil yang didapat menunjukkan respon tegangan akibat terjadinya *switching* menimbulkan osilasi dengan perubahan nilai tegangan setiap osilasinya. Akibat dari kejadian tersebut, respon tegangan yang dihasilkan kurang sesuai dengan respon tegangan sinus murni sehingga nilai korelasinya kurang dari 0,9.

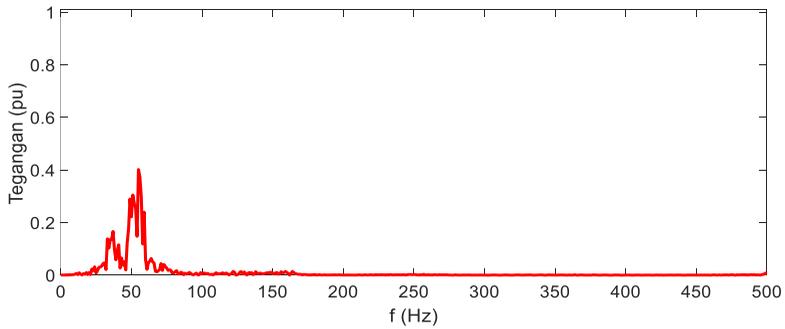


Gambar 4.28 Diagram Bifurkasi Variasi Waktu *Switching* Fasa C

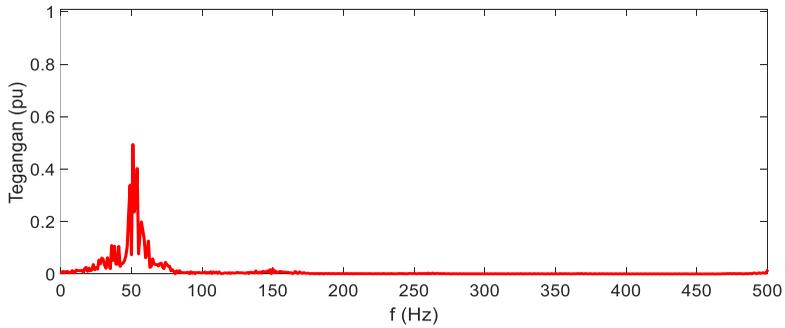
Tabel 4.3 Hasil Korelasi akibat *Switching*

Waktu (detik)	A	B	C
0,05	0,5007	0,3505	0,4595
0,1	0,262	0,3631	0,3951
0,15	0,3315	0,3962	0,2597
0,2	0,2434	0,2694	0,2422
0,25	0,3096	0,2851	0,3159
0,3	0,3844	0,3577	0,3676
0,35	0,432	0,4689	0,4042
0,4	0,4179	0,4505	0,4652
0,45	0,5302	0,5447	0,5138
0,5	0,547	0,5372	0,5793

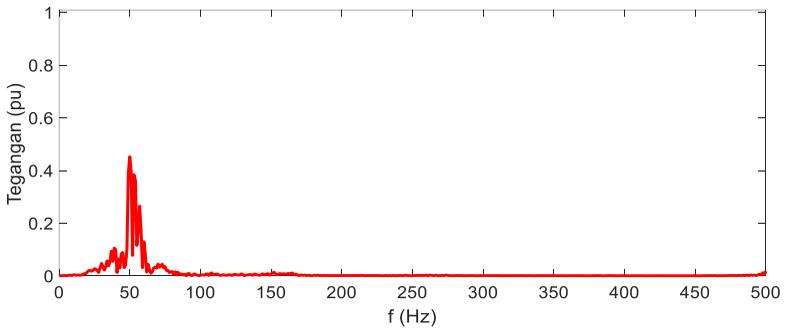
Gambar 4.29 hingga Gambar 4.31 adalah hasil pengolahan data menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) saat terjadi *switching*. Hasil yang didapat menunjukkan nilai tegangan yang muncul bervariasi pada setiap frekuensinya. Nilai tegangan saat detik ke 0,1 sebesar 0,4023 pu pada frekuensi 55 Hz. Nilai tegangan saat detik ke 0,3 sebesar 0,4943 pada frekuensi 51 Hz dan nilai tegangan saat detik ke 0,5 sebesar 0,4522 pada frekuensi 50 Hz. Hasil tersebut memperlihatkan gangguan akibat *switching* menimbulkan feresonansi dengan mode *chaotic*.



Gambar 4.29 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan pada 0,1 detik



Gambar 4.30 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan pada 0,3 detik

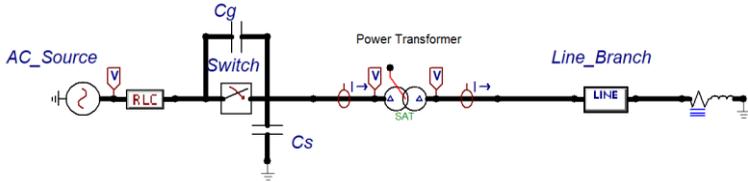


Gambar 4.31 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan pada 0,5 detik

4.5 Kondisi akibat Pengaruh Pengetanahan

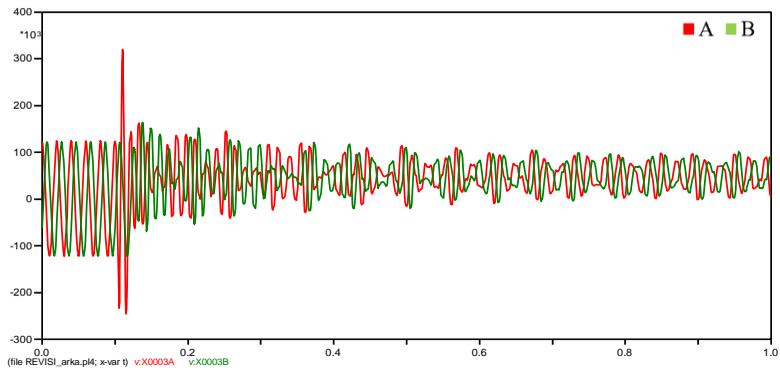
4.5.1 Kondisi Pengetanahan *Floating – Floating*

Pada kondisi ini simulasi menggunakan transformator daya dengan pengetanahan *floating* pada sisi primer dan *floating* pada sisi sekunder seperti Gambar 4.32. Simulasi dilakukan dengan kondisi ketiga fasa terbuka secara serempak pada detik ke 0,1 dan lama simulasi selama 1 detik.

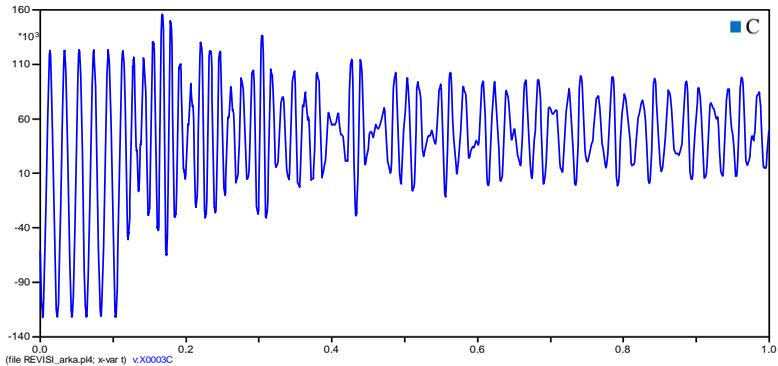


Gambar 4.32 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan *Floating – Floating*

Dari Gambar 4.33 dan Gambar 4.34 terlihat bahwa saat semua fasa terbuka, terjadi keadaan feroresonansi yang mengakibatkan tegangan lebih pada sistem. Pada fasa A, B, dan C terjadi feroresonansi dengan mode *chaotic*.



Gambar 4.33 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Floating – Floating* saat Kondisi *Switching* pada Fasa A dan B

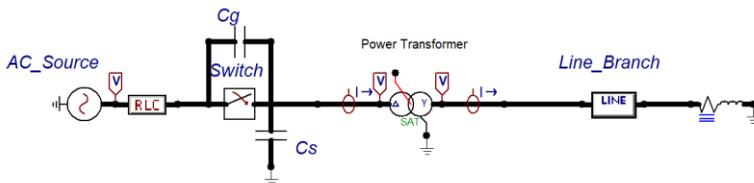


(b)

Gambar 4.34 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Floating – Floating* saat Kondisi *Switching* pada Fasa C

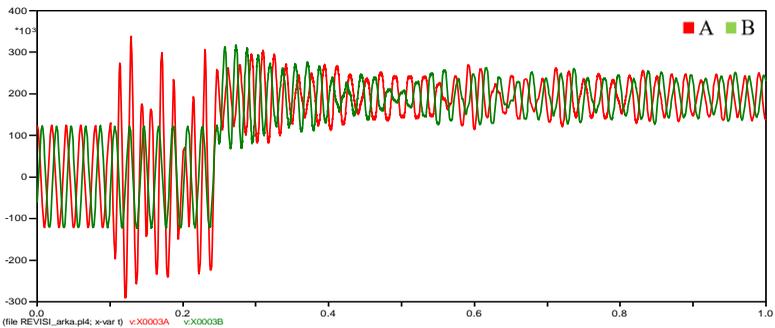
4.5.2 Kondisi Pengetanahan *Floating – Solid*

Pada kondisi ini simulasi menggunakan transformator daya dengan pengetanahan *floating* pada sisi primer dan *solid* pada sisi sekunder seperti Gambar 4.35. Simulasi dilakukan dengan kondisi ketiga fasa terbuka secara serempak pada detik ke 0,1 dan lama simulasi selama 1 detik.

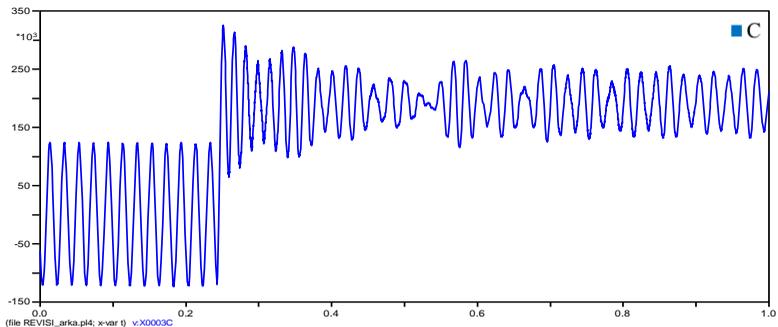


Gambar 4.35 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan *Floating – Solid*

Dari Gambar 4.36 dan Gambar 4.37 terlihat bahwa saat semua fasa terbuka, terjadi keadaan feroresonansi yang mengakibatkan tegangan lebih pada sistem. Pada fasa A, B, dan C terjadi feroresonansi dengan mode *chaotic*.



Gambar 4.36 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Floating – Solid* saat Kondisi *Switching* pada Fasa A dan B

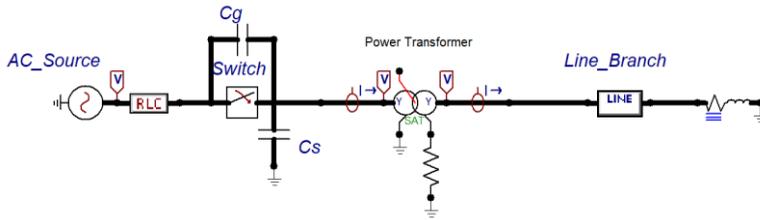


(b)

Gambar 4.37 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Floating – Solid* saat Kondisi *Switching* pada Fasa C

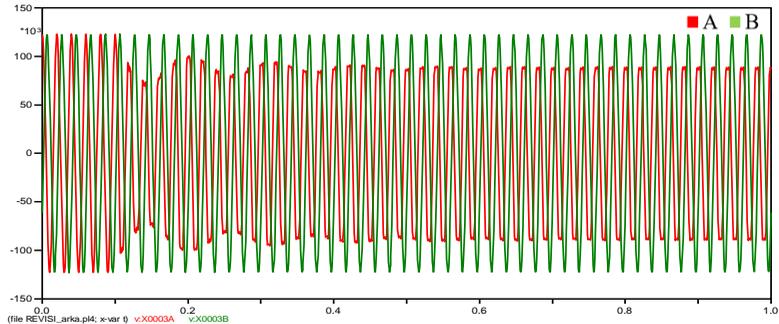
4.5.3 Kondisi Pengetanahan *Solid – Resistance*

Pada kondisi ini simulasi menggunakan transformator daya dengan pengetanahan *solid* pada sisi primer dan *resistance* dengan nilai sebesar 500Ω pada sisi sekunder seperti Gambar 4.38. Simulasi dilakukan dengan kondisi ketiga fasa terbuka secara serempak pada detik ke 0,1 dan lama simulasi selama 1 detik.

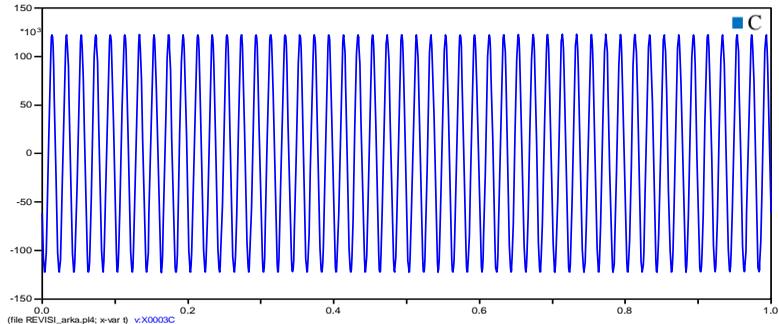


Gambar 4.38 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan *Solid – Resistance*

Dari Gambar 4.39 dan Gambar 4.40 terlihat bahwa saat semua fasa terbuka, tegangan pada fasa A mengalami penurunan nilai tegangan sedangkan pada fasa B dan C tidak terjadi pengaruh apapun. Pada fasa A, B, dan C tidak terjadi feroresonansi.



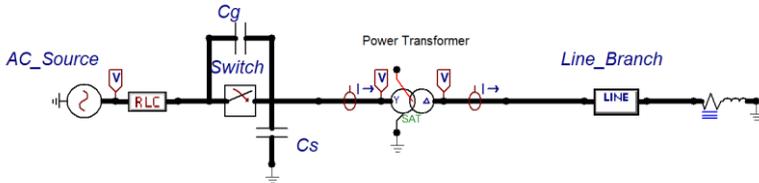
Gambar 4.39 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Solid – Resistance* saat Kondisi *Switching* pada Fasa A dan B



Gambar 4.40 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Solid – Resistance* saat Kondisi *Switching* pada Fasa C

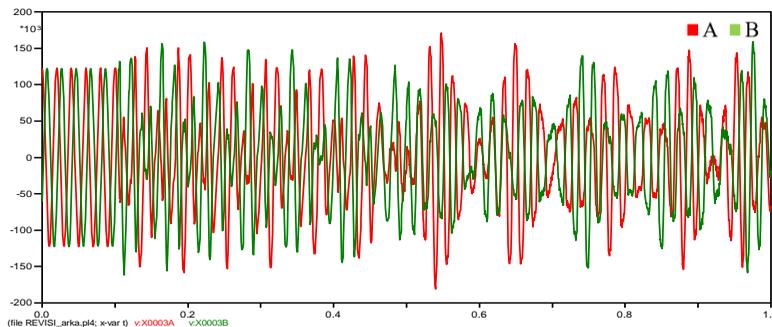
4.5.4 Kondisi Pengetananan *Solid – Floating*

Pada kondisi ini simulasi menggunakan transformator daya dengan pengetananan *solid* pada sisi primer dan *floating* pada sisi sekunder seperti Gambar 4.41. Simulasi dilakukan dengan kondisi ketiga fasa terbuka secara serempak pada detik ke 0,1 dan lama simulasi selama 1 detik.

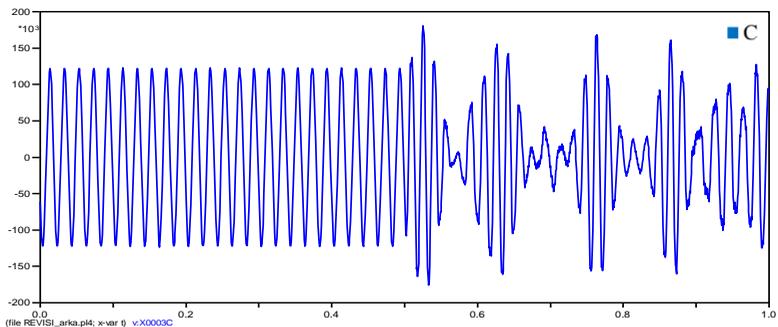


Gambar 4.41 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetananan *Solid – Floating*

Dari Gambar 4.42 dan Gambar 4.43 terlihat bahwa saat semua fasa terbuka, terjadi keadaan feroresonansi yang mengakibatkan tegangan lebih pada sistem. Pada fasa A, B, dan C terjadi feroresonansi dengan mode *chaotic*.



Gambar 4.42 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetananan *Solid – Floating* saat Kondisi *Switching* pada Fasa A dan B

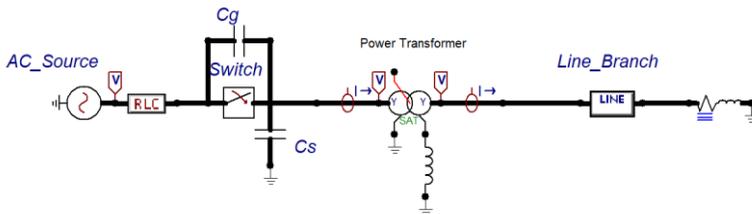


(b)

Gambar 4.43 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Solid – Floating* saat Kondisi *Switching* (a) Fasa A dan B (b) Fasa C

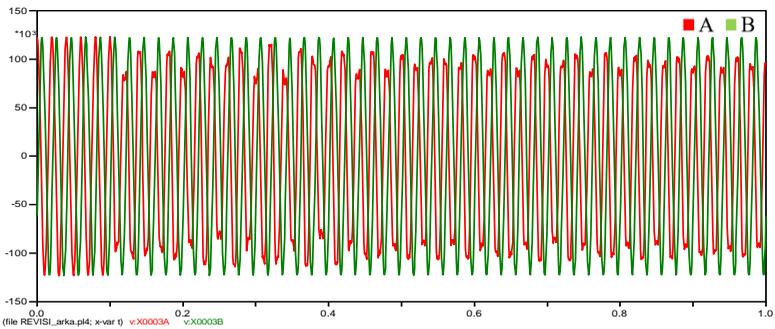
4.5.5 Kondisi Pengetanahan *Solid – Reactor*

Pada kondisi ini simulasi menggunakan transformator daya dengan pengetanahan *solid* pada sisi primer dan *reactor* dengan nilai sebesar 95 mH pada sisi sekunder seperti Gambar 4.44. Simulasi dilakukan dengan kondisi ketiga fasa terbuka secara serempak pada detik ke 0,1 dan lama simulasi selama 1 detik.

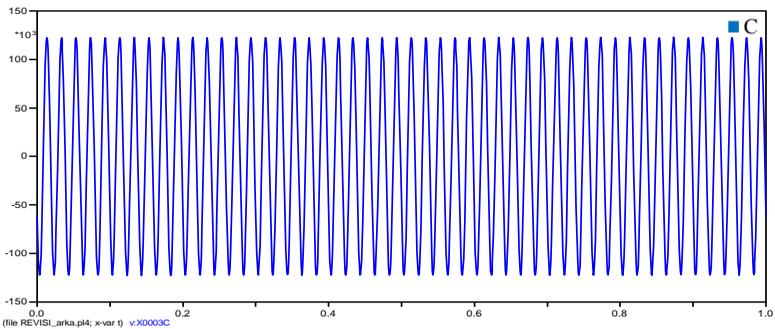


Gambar 4.44 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan *Solid – Reactor*

Dari Gambar 4.45 dan Gambar 4.46 terlihat bahwa saat semua fasa terbuka, tegangan pada fasa A mengalami penurunan nilai tegangan sedangkan pada fasa B dan C tidak terjadi pengaruh apapun. Pada fasa A, B, dan C tidak terjadi feroresonansi.



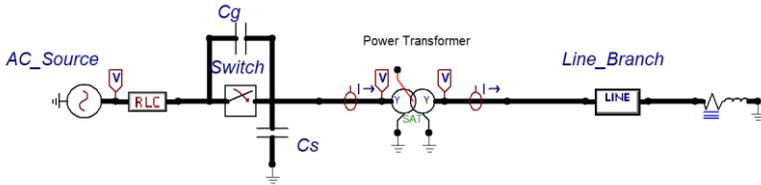
Gambar 4.45 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Solid* – Reactor saat Kondisi *Switching* pada Fasa A dan B



Gambar 4.46 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Solid* – Reactor saat Kondisi *Switching* pada Fasa C

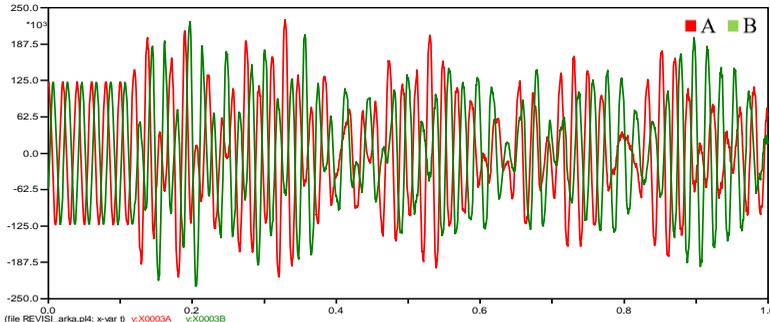
4.5.6 Kondisi Pengetanahan *Solid* – *Solid*

Pada kondisi ini simulasi menggunakan transformator daya dengan pengetanahan *solid* pada sisi primer dan *solid* pada sisi sekunder seperti Gambar 4.47. Simulasi dilakukan dengan kondisi ketiga fasa terbuka secara serempak pada detik ke 0,1 dan lama simulasi selama 1 detik.

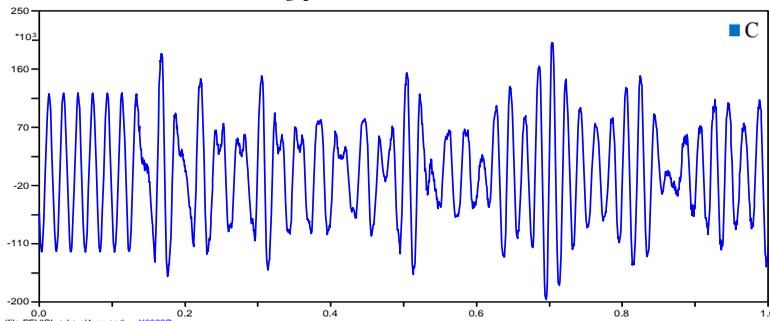


Gambar 4.47 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Pengetanahan *Solid – Solid*

Dari Gambar 4.48 dan Gambar 4.49 terlihat bahwa semua fasa terbuka, terjadi keadaan feroresonansi yang mengakibatkan tegangan lebih pada sistem. Pada fasa A, B, dan C terjadi feroresonansi dengan mode *chaotic*.



Gambar 4.48 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Solid – Solid* saat Kondisi *Switching* pada Fasa A dan B

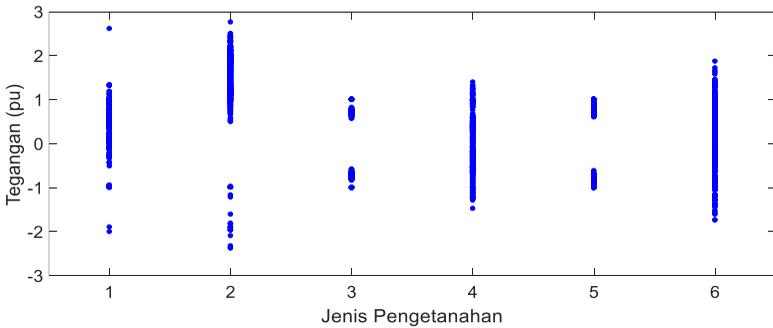


(b)

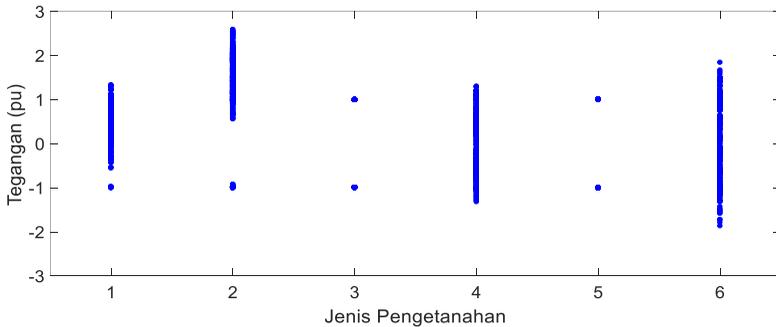
Gambar 4.49 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Pengetanahan *Solid – Solid* saat Kondisi *Switching* pada Fasa C

4.5.7 Bifurkasi Variasi Pengetanahan

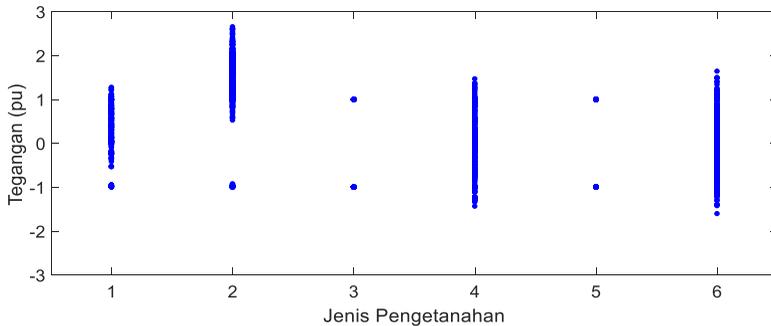
Hasil dari diagram bifurkasi akibat *switching* pada variasi pengetanahan dapat dilihat pada Gambar 4.50 hingga Gambar 4.52. Terlihat bahwa persebaran nilai tegangan puncak pada setiap fasanya bervariasi. Kejadian tegangan lebih terjadi pada semua fasa. Pada fasa A terjadi keadaan tegangan lebih terbesar terjadi pada tipe pengetanahan *floating – solid* sebesar 2,76 pu. Pada fasa B, tegangan lebih terbesar terjadi pada tipe pengetanahan *floating – solid* sebesar 2,59 pu. Pada fasa C, tegangan lebih terbesar terjadi pada tipe pengetanahan *floating – solid* sebesar 2,65 pu.



Gambar 4.50 Diagram Bifurkasi Variasi Pengetanahan Fasa A; 1 = *Floating – Floating*; 2 = *Floating – Solid*; 3 = *Solid – Resistance*; 4 = *Solid – Floating*; 5 = *Solid – Reactor*; 6 = *Solid – Solid*



Gambar 4.51 Diagram Bifurkasi Variasi Pengetanahan Fasa B; 1 = *Floating – Floating*; 2 = *Floating – Solid*; 3 = *Solid – Resistance*; 4 = *Solid – Floating*; 5 = *Solid – Reactor*; 6 = *Solid – Solid*



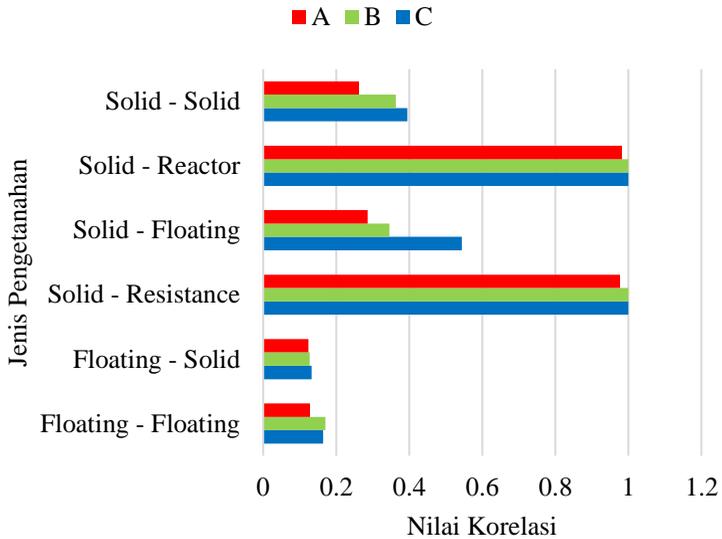
Gambar 4.52 Diagram Bifurkasi Variasi Pengetanahan Fasa C; 1 = *Floating – Floating*; 2 = *Floating – Solid*; 3 = *Solid – Resistance*; 4 = *Solid – Floating*; 5 = *Solid – Reactor*; 6 = *Solid – Solid*

4.5.8 Korelasi Variasi Pengetanahan

Tabel 4.4 menunjukkan korelasi antara kondisi saat *switching* dengan variasi pengetanahan dengan kondisi saat normal. Hasil yang didapat menunjukkan respon tegangan akibat terjadinya *switching* menimbulkan osilasi dengan perubahan nilai tegangan di setiap osilasinya. Hasil korelasi terkecil terjadi pada pengetanahan jenis *floating – solid* dengan nilai sebesar 0,1235 pada fasa A dan hasil korelasi terbesar terjadi pada pengetanahan jenis *solid – resistance* dan *solid – reactor* dengan nilai sebesar 0,9998. Berdasarkan Gambar 4.53 dapat dilihat bahwa hasil korelasi dengan nilai di atas 0,9 tidak terjadi feroresonansi seperti pada pengetanahan *solid – resistance* dan *solid – reactor*. Sedangkan, korelasi yang bernilai di bawah 0,9 terjadi feroresonansi seperti pada pengetanahan lainnya selain *solid – resistance* dan *solid – reactor*.

Tabel 4.4 Hasil Korelasi akibat *Switching* Variasi Pengetanahan

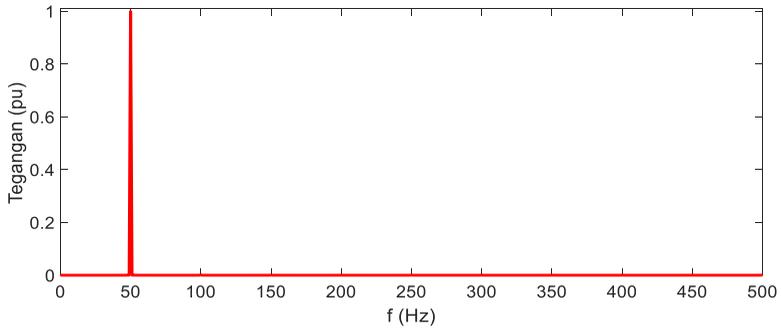
Jenis Pengetanahan	A	B	C
<i>Floating - Floating</i>	0,1279	0,1701	0,1646
<i>Floating - Solid</i>	0,1235	0,1272	0,1322
<i>Solid - Resistance</i>	0,9769	0,9998	0,9998
<i>Solid - Floating</i>	0,2859	0,3455	0,5443
<i>Solid - Reactor</i>	0,9823	0,9998	0,9998
<i>Solid - Solid</i>	0,262	0,3631	0,3951



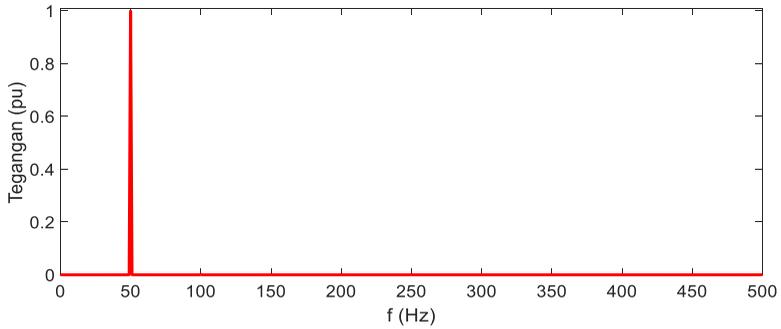
Gambar 4.53 Grafik Hasil Korelasi Variasi Pengetanahan

4.5.9 *Fast Fourier Transform (FFT) Variasi Pengetanahan*

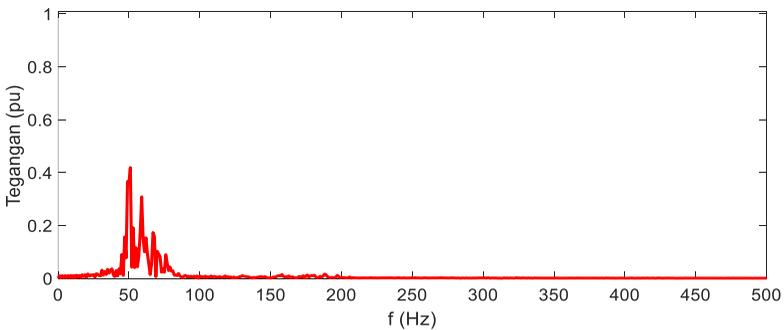
Gambar 4.54 hingga Gambar 4.56 adalah hasil pengolahan data menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)* saat terjadi *switching* pada variasi jenis pengetanahan. Hasil yang didapat menunjukkan nilai tegangan yang muncul bervariasi pada setiap frekuensinya. Nilai tegangan yang muncul di frekuensi 50 Hz sebesar 0,9988 pu pada jenis pengetanahan *solid – resistance*. Nilai tegangan yang muncul pada pengetanahan *solid – reactor* muncul pada frekuensi 50 Hz dengan besar tegangannya adalah 0,9988 pu. Nilai tegangan yang muncul pada pengetanahan *solid – floating* pada frekuensi 51 Hz sebesar 0,4192 pu. Hasil dari FFT ini juga menunjukkan feroresonansi tidak terjadi pada pengetanahan *solid – resistance* dan *solid – reactor*. Sedangkan pada jenis pengetanahan *solid – floating* jenis feroresonansi yang muncul adalah feroresonansi berjenis *chaotic*.



Gambar 4.54 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan pada Pengetanahan Jenis *Solid – Resistance*



Gambar 4.55 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan pada Pengetanahan Jenis *Solid – Reactor*



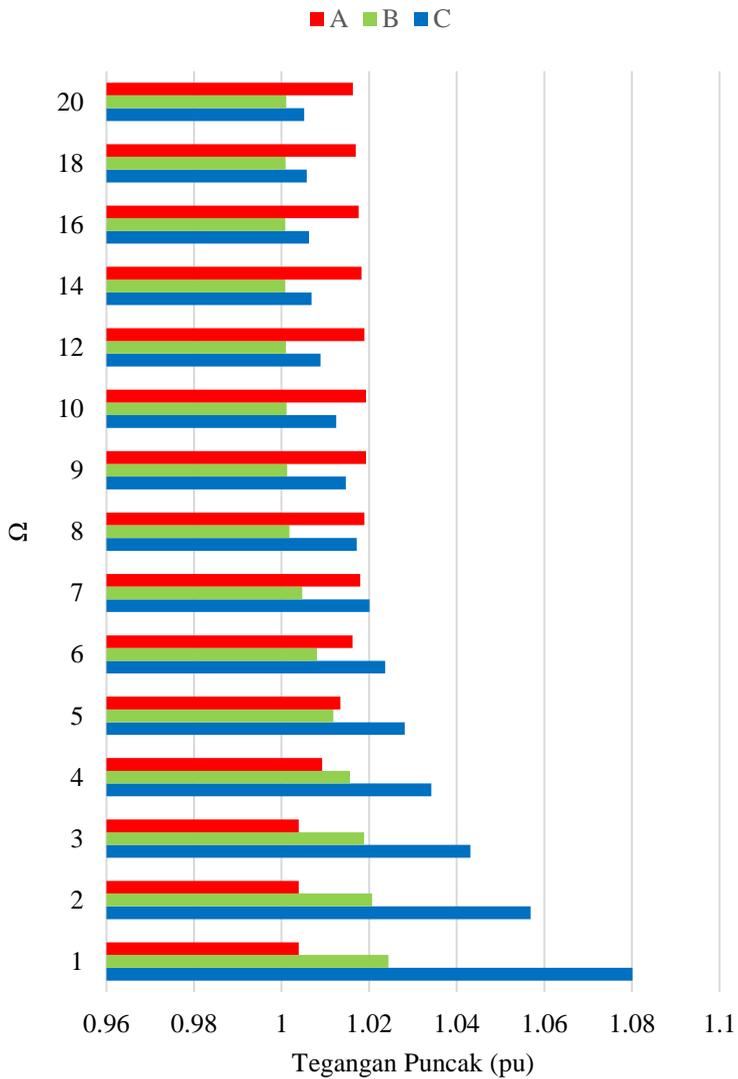
Gambar 4.56 Hasil *Fast Fourier Transform* Respon Tegangan pada Pengetanahan Jenis *Solid – Floating*

4.6 Analisis Tegangan Puncak Transformator Daya

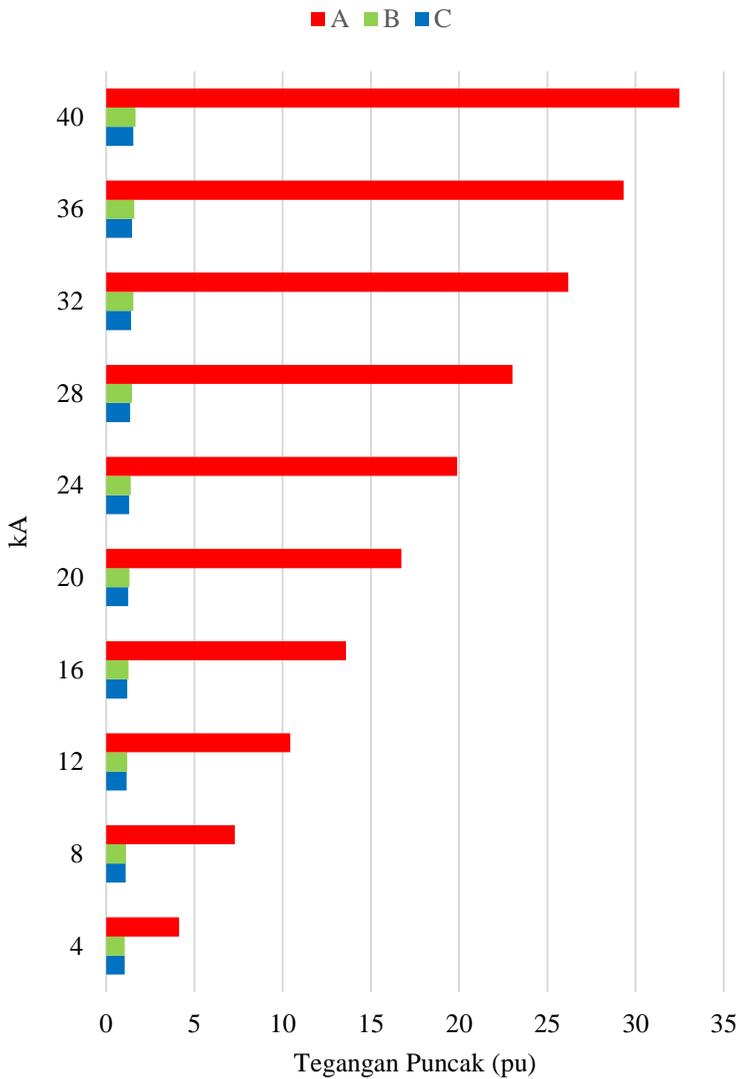
Hasil pengukuran tegangan pada simulasi yang telah dilakukan didapatkan nilai tegangan puncak yang berbeda - beda pada setiap jenis gangguan dan jenis pengetanahan. Gambar 4.57 hingga Gambar 4.59 merupakan grafik yang menunjukkan nilai tegangan puncak dari setiap keadaan yang diberikan pada sisi primer. Tegangan puncak yang diperlihatkan dalam satuan per unit di mana per unit adalah perbandingan nilai tegangan yang didapat saat pengukuran dengan nilai tegangan normal. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa rangkaian yang terkena tegangan lebih dari yang terbesar adalah gangguan akibat petir kemudian rangkaian dengan variasi pengetanahan lalu gangguan akibat *switching* dan yang terakhir adalah gangguan akibat *fault*. Rangkaian dengan gangguan akibat petir memiliki nilai tegangan lebih yang tertinggi dibandingkan dengan gangguan lainnya namun kejadian tegangan lebih tersebut hanya terjadi kurang dari 0,1 sekon sedangkan rangkaian dengan gangguan akibat *switching* dan variasi pengetanahan mengalami keadaan tegangan lebih secara terus menerus hingga simulasi berakhir.

4.7 Analisis Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya

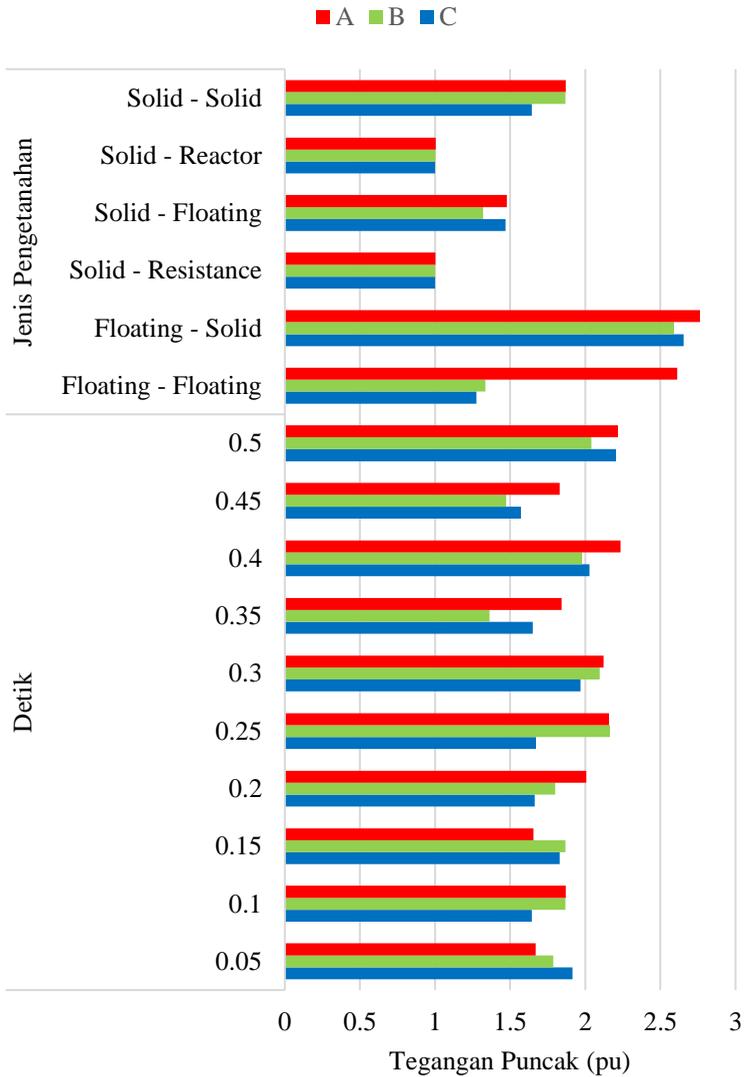
Hasil karakteristik feroresonansi yang timbul pada simulasi yang telah dilakukan, didapatkan beberapa jenis feroresonansi yang muncul pada gangguan akibat *switching* dan variasi jenis pengetanahan dengan gangguan tiga fasa terbuka secara serempak. Gambar 4.60 adalah grafik yang memperlihatkan persebaran jenis feroresonansi yang terjadi saat simulasi yang dilakukan. Pada gangguan akibat petir dan hubung singkat satu fasa ke tanah, tidak terjadi fenomena feroresonansi. Gangguan yang diakibatkan oleh variasi waktu *switching* didominasi oleh keadaan feroresonansi jenis *chaotic*. Pada variasi jenis pengetanahan jenis feroresonansi yang paling sering terjadi adalah *chaotic*.



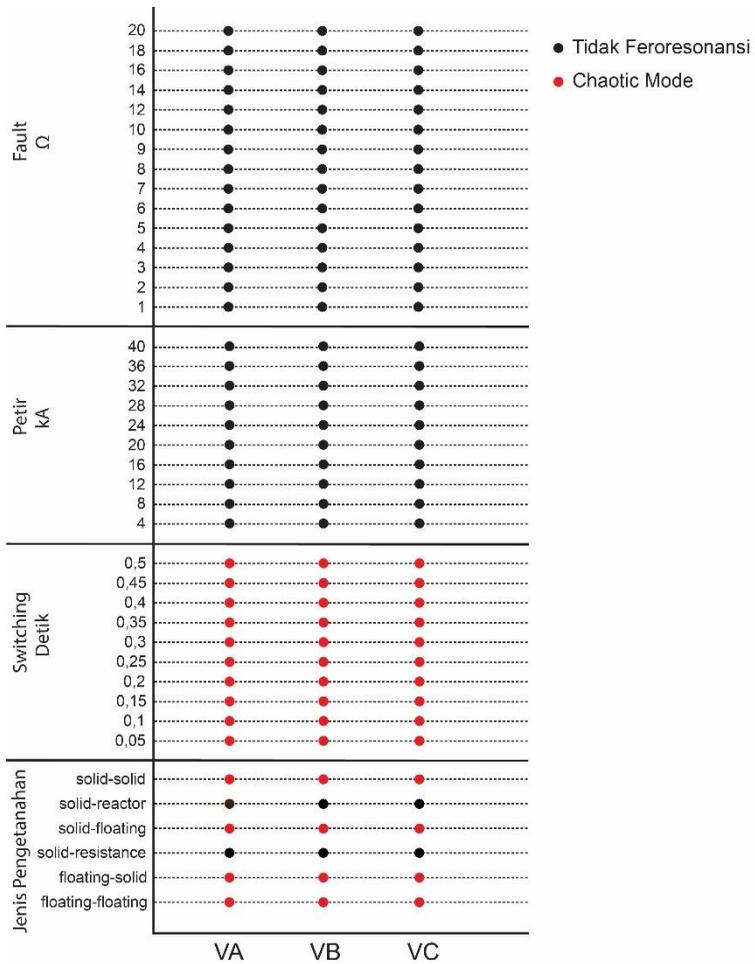
Gambar 4.57 Grafik Tegangan Puncak Transformator Daya pada Sisi Primer akibat *Fault*



Gambar 4.58 Grafik Tegangan Puncak Transformator Daya pada Sisi Primer akibat Petir



Gambar 4.59 Grafik Tegangan Puncak Transformator Daya pada Sisi Primer akibat *Switching* dan Jenis Pengetanahan



Gambar 4.60 Persebaran Jenis Ferroresonansi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai berbagai macam gangguan dan variasi jenis pengetanahan pada transformator daya terhadap gangguan feroresonansi, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Respon tegangan akibat hubung singkat satu fasa ke tanah menimbulkan tegangan lebih terbesar yakni 1,024 pu pada resistansi 1 Ω .
2. Respon tegangan akibat petir menimbulkan tegangan lebih terbesar yakni 32,48 pu pada arus petir 40 kA.
3. Respon tegangan akibat *switching* menimbulkan tegangan lebih terbesar yakni 2,23 pu pada waktu 0,4 detik.
4. Respon tegangan pada variasi jenis pengetanahan menimbulkan tegangan lebih terbesar yakni 2,76 pu pada pengetanahan *floating – solid*.
5. Nilai korelasi akibat hubung singkat satu fasa dan petir memiliki nilai lebih dari 0,9 sehingga termasuk tidak feroresonansi.
6. Nilai korelasi akibat *switching* dan variasi jenis pengetanahan memiliki nilai kurang dari 0,9 sehingga termasuk feroresonansi.
7. Jenis feroresonansi yang muncul akibat *switching* adalah *chaotic*.
8. Jenis feroresonansi yang muncul pada variasi jenis pengetanahan didominasi oleh jenis *chaotic*. Feroresonansi tidak terjadi pada pengetanahan *solid – resistance* dan *solid – reactor*.
9. Feroresonansi dengan nilai korelasi $< 0,54$ merupakan feroresonansi jenis *chaotic*.
10. Korelasi dapat dimanfaatkan untuk identifikasi feroresonansi bersama dengan metode lainnya

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari tugas studi ini untuk di masa yang akan datang adalah melakukan studi terkait dengan penggolongan jenis feroresonansi dengan metode analisis korelasi yang terjadi pada transformator daya. Hal tersebut dapat memudahkan dalam menilai jenis feroresonansi yang terjadi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Price, "A tutorial on ferroresonance," in *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, TX, USA, 2014, pp. 676–704.
- [2] S. I. Kim, B. C. Sung, S. N. Kim, Y. C. Choi, and H. J. Kim, "A Study on Ferroresonance Mitigation Techniques for Power Transformer," p. 7.
- [3] R. C. Dugan, "Examples of ferroresonance in distribution," in *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)*, Toronto, Ont., Canada, 2003, pp. 1213–1215.
- [4] D. A. N. Jacobson, "Examples of ferroresonance in a high voltage power system," in *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)*, Toronto, Ont., Canada, 2003, pp. 1206–1212.
- [5] Pei-Ying Guo, Cheng-Zhe Li, Shuai Yan, Jun Liangcheng, and Jing-Yi Zhang, "Application of wavelet transform in ferroresonance detection," in *2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, Deng Feng, China, 2011, pp. 3800–3803.
- [6] Kong Hanjie and Zhang Baohui, "A novel ferroresonance and single-phase earth fault recognition method based on correlation analysis," in *2014 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Krakow, 2014, pp. 426–430.
- [7] A. Nugroho, "Metode Pengaturan Penggunaan Tenaga Listrik dalam Upaya Penghematan Bahan Bakar Pembangkit dan Energi," vol. 11, Jun. 2006.
- [8] B. L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama, 2013.
- [9] R. T. A. Pratama, *Analisis Tegangan Lebih dan Arus Lebih Ferroresonance pada Transformator 150kV/20kV Konfigurasi Wye-Wye Menggunakan Matlab*. ITS, Surabaya: Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, 2011.
- [10] P. Ferracci, "Ferroresonance," *Cah. Tech.*, p. 30, 1998.
- [11] P. Sakarung, T. Bunyagul, and S. Chatratana, "Investigation and Mitigation of Overvoltage Due to Ferroresonance in the

- Distribution Network,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 300–305, Sep. 2007.
- [12] S. S. Satria, I. M. Y. Negara, and D. Fahmi, *Studi Pemasangan Damping Reaktor Untuk Mengatasi Feroresonansi Pada Incoming 20 KV GIS Tandes*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [13] P. S. Moses and M. A. S. Masoum, “Modeling ferroresonance in asymmetric three-phase power transformers,” p. 6.
- [14] 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 Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 2, pp. 581–592, Jun. 2011.
- [15] S. J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 4th ed., internat. ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2005.
- [16] Du Lin, P. Jun, S. wenxia, T. Jun, and Z. jun, “Fault location for transmission line based on traveling waves using correlation analysis method,” in *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, 2008, pp. 681–684.
- [17] Young-Jin Kwon, Sang-Hee Kang, Dong-Gyu Lee, and Hyung-Kyu Kim, “Fault location algorithm based on cross correlation method for HVDC cable lines,” in *IET 9th International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2008)*, Glasgow, UK, 2008, vol. 2008, pp. 360–364.
- [18] T. S. Hutauruk, *Pengentanahan Netral Sistem Tenaga & Pengentanahan Peralatan*. Jakarta: Erlangga, 1999.
- [19] I. M. Y. Negara, *Teknik Tegangan Tinggi; Prinsip dan Aplikasi Praktis*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.
- [20] K. S. Anugrah, I. G. N. S. Hernanda, and I. M. Y. Negara, *Studi Pengaruh Sistem Pentanahan Terhadap Feroresonansi Di Gardu Induk Tegangan Tinggi*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.

LAMPIRAN

Tabel respon tegangan

		pu		
		A	B	C
Ω	1	1.00395	1.0244	1.0801
	2	1.00395	1.0207	1.0569
	3	1.00395	1.0188	1.04311
	4	1.00922	1.0156	1.03417
	5	1.01345	1.0118	1.02812
	6	1.01621	1.0081	1.02364
	7	1.01798	1.0047	1.02011
	8	1.01888	1.0018	1.01717
	9	1.01926	1.0013	1.01469
	10	1.01931	1.0012	1.01249
	12	1.01891	1.001	1.00885
	14	1.01828	1.0009	1.00685
	16	1.01759	1.0009	1.00628
	18	1.01692	1.001	1.00572
20	1.01629	1.0011	1.00517	
kA	4	4.14026	1.0524	1.04329
	8	7.28917	1.1183	1.09407
	12	10.4381	1.1869	1.14525
	16	13.587	1.2556	1.19662
	20	16.7359	1.3242	1.24807
	24	19.8848	1.3926	1.29938
	28	23.0337	1.4608	1.35351
	32	26.1827	1.5289	1.4118
	36	29.3316	1.597	1.47009
	40	32.4805	1.6651	1.52851

		pu		
		A	B	C
Detik	0.05	1.66883	1.7874	1.91427
	0.1	1.87043	1.867	1.64321
	0.15	1.6551	1.8686	1.83069
	0.2	2.00616	1.8007	1.66299
	0.25	2.15835	2.1638	1.67105
	0.3	2.12218	2.097	1.96856
	0.35	1.84285	1.3626	1.65076
	0.4	2.23459	1.9785	2.02691
	0.45	1.82894	1.4733	1.57167
	0.5	2.21676	2.0412	2.20462
Jenis Pengetanahan	<i>Floating - Floating</i>	2.61175	1.3345	1.27586
	<i>Floating - Solid</i>	2.76278	2.5898	2.65483
	<i>Solid - Reactance</i>	1.00332	1.0011	1.00036
	<i>Solid - Floating</i>	1.47703	1.3202	1.46982
	<i>Solid - Reactor</i>	1.00381	1.0026	1.00123
	<i>Solid - Solid</i>	1.87043	1.867	1.64321

List program korelasi pada perangkat lunak MATLAB

```
N=size(x,1);
Rxy=zeros(1,90000);
for i=1:90000
    for j=1:N-i
        Rxy(i)=Rxy(i)+(1/N)*x(j)*y(j+i-1);
    end
end
Ax=sqrt((1/N)*sum(x.*x));
Ay=sqrt((1/N)*sum(y.*y));
for i=1:90000
    rxy(i)=Rxy(i)/(Ax*Ay);
end
Pxy=max(abs(rxy));
Pxy
```

List program diagram bifurkasi pada perangkat lunak MATLAB

```
clc;
clear;
hit = 0;
hasilx = [];
hasily = [];
for nn = 1 : 15, %jumlah data yang ada
    puncak = [];
    puncakn = [];
    namafile = [sprintf('%02d',nn),'.mat'];%jumlah
digit pada data yang ada
    load(namafile);
    puncak = findpeaks(vX0003c);
    puncakn = findpeaks(-vX0003c);%masukkan nama
respon tegangan berdasarkan ATPDraw
    for ii = 1 : size(puncak,1)
        hit = hit +1;
        hasilx(hit) = nn;
        hasily(hit) = puncak(ii);
        hasilz(hit) = puncakn(ii);
    end
end
end
Y=hasily/122474.5;
Z=hasilz/122474.5;
plot(hasilx,Y,'b.');
```

```

hold on
plot(hasilx,-Z,'b. ');
hold off
xlabel('Resistansi ( $\Omega$ )');
ylabel('Tegangan (pu)');

```

List program *Fast Fourier Transform* pada perangkat lunak MATLAB

```

clc;
clear;
load ('3 FASA.mat')
Fs=100000; %Sampling frequency
Ts=1/Fs; %Sampling Period
L=100001; %Length of Signal
t=(0:L-1)*Ts; %Time Vector
x1=vX0003a;
Y1=fft(x1);
P2a = abs(Y1/L);
P1a = P2a(1:L/2+1);
P1a = P1a/122474,487;
P1a(2:end-1) = 2*P1a(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(f,P1a,'r');
xlabel('f (Hz)');
ylabel('Tegangan (pu)');
axis([0 500 0 1.02]);

```

List program ATP

BEGIN NEW DATA CASE

C -----
C Generated by ATPDRAW May, Thursday 23, 2019
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. H^oidalen at SefAS/NTNU - NORWAY 1994-2015
C -----

POWER FREQUENCY 50.
C dT << Tmax << Xopt << Copt << Epsiln>

1.E-5 1.
500 1 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8

C
3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456
78901234567890

```

C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
TRANSFORMER X0005A 6.5E6 0
    0.00745 123.79
    0.018562 129.59
    0.0745246 136.45
    0.222739 137.82
    9999
1X0003A 220. 1.745 1.5E5
2X0004A 5. .039 2.E4
TRANSFORMER X0005A X0005B 0
1X0003B
2X0004B
TRANSFORMER X0005A X0005C 0
1X0003C
2X0004C
X0011A 3.E3 9.E3 0
X0011B 3.E3 9.E3 0
X0011C 3.E3 9.E3 0
X0009AX0001A .05 0
X0009BX0001B .05 0
X0009CX0001C .05 0
X0001A .2 0
X0001B .2 0
X0001C .2 0
-1X0010AX0011A .033864.793340.255 1.5 0 0 0
-2X0010BX0011B .01277.0079312.275 1.5 0 0 0
-3X0010CX0011C 0
X0002AX0009A 3.86441.264 0
X0002BX0009B 3.86441.264 0
X0002CX0009C 3.86441.264 0
XX0012 400. 0
X0007A 1. 0
X0007B 1. 0
X0007C 1. 0
XX0008 95. 0
BLANK BRANCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
X0001AX0003A MEASURING 1
X0001BX0003B MEASURING 1
X0001CX0003C MEASURING 1
X0009AX0001A -1. 2. 0
X0009BX0001B -1. 2. 0

```

X0009CX0001C	-1.	2.			0	
X0004AX0010A				MEASURING		1
X0004BX0010B				MEASURING		1
X0004CX0010C				MEASURING		1
X0006AX0007A	.1	2.			0	
X0006BX0007B	2.	3.			0	
X0006CX0007C	2.	3.			0	

BLANK SWITCH

C < n 1><< Ampl. << Freq. <<Phase/T0>< A1 << T1 <<TSTART <<
TSTOP >

14X0002A	122474.487	50.			-1.	100.
14X0002B	122474.487	50.	-120.		-1.	100.
14X0002C	122474.487	50.	-240.		-1.	100.
15XX0012-1	4.E4	1.2E-6	5.E-5	2.	.1	1.E3

RIWAYAT HIDUP



I Gede Arka Prawira Putra, lahir di Denpasar pada tanggal 30 November 1996. Anak pertama dari dua bersaudara. Selama kuliah penulis pernah aktif dalam kegiatan TPKH. Selain itu, penulis juga pernah aktif pada kegiatan organisasi di Departemen Teknik Elektro yaitu sebagai staff keprofesian HIMATEKTRO. Saat ini penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro ITS. Pendidikan formal yang

telah ditempuh yaitu:

1. SD Saraswati 4 Denpasar
2. SMPN 7 Denpasar
3. SMAN 4 Denpasar

Penulis dapat dihubungi pada email: gede.arka88@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)