TUGAS AKHIR – EE 184801

IDENTIFIKASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR 3 FASA BERBASIS TRANSFORMASI WAVELET

Pristiwanto Adhi Anugraha
NRP 07111640000097

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

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – EE 184801

IDENTIFIKASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR 3 FASA BERBASIS TRANSFORMASI WAVELET

Pristiwanto Adhi Anugraha
NRP 07111640000097

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

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT – EE 184801

IDENTIFICATION OF FERRORESONANCE IN 3 PHASE TRANSFORMER BASED ON WAVELET TRANSFORM

Pristiwanto Adhi Anugraha
NRP 07111640000097

Supervisor(s)
Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

PERNYATAAN KEASLIAN
TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Identifikasi Feroresonansi pada Transformator 3 Fasa Berbasis Transformasi Wavelet**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

Surabaya, Juli 2020

Pristiwanto Adhi Anugraha
NRP. 07111640000097

IDENTIFIKASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR 3 FASA BERBASIS TRANSFORMASI WAVELET

TUGAS AKHIR

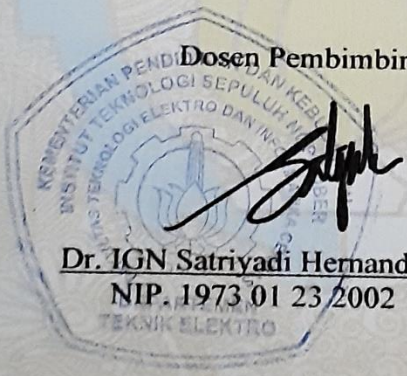
Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
NIP. 1973 01 23 2002 12 1001

SURABAYA
JULI 2020

IDENTIFIKASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR 3 FASA BERBASIS TRANSFORMASI WAVELET

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
NIP. 1970 07 12 1998 02 1001

SURABAYA
JULI 2020

IDENTIFIKASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR 3 FASA BERBASIS TRANSFORMASI WAVELET

ABSTRAK

Fenomena feroresonansi adalah suatu fenomena non-linier yang bersifat kompleks. Karakteristik non-linier berasal dari induktansi pada material feromagnetik. Fenomena ini dapat membahayakan suatu peralatan listrik terutama pada transformator. Tugas akhir ini dilakukan simulasi feroresonansi pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye dan delta - wye menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Simulasi dilakukan dengan tujuan untuk mengidentifikasi feroresonansi dengan variasi nilai *grading capacitance* (*Cg*) dan *shunt capacitance* (*Cs*) sebesar 0,001 µF – 10 µF. Hasil simulasi ATPDraw diolah menggunakan transformasi wavelet diskrit (DWT). Pada studi ini, analisis transformasi wavelet dilakukan dengan dua metode. Metode pertama dilakukan analisis transformasi wavelet secara visual. Sedangkan, metode kedua dilakukan perhitungan konsentrasi energi. Berdasarkan studi yang dilakukan, metode pertama transformasi wavelet dapat membedakan kondisi normal dan kondisi feroresonansi tiap level dekomposisi wavelet secara visual. Metode kedua menghasilkan nilai konsentrasi energi tertinggi nilai *Cg* 1 µF di level sepuluh dengan fasa A yaitu 29,7688%, fasa B yaitu 42,8531% dan fasa C yaitu 42,1106% pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye. Sedangkan, transformator 3 fasa hubugan delta – wye memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi pada nilai *Cg* 10 µF di level sepuluh dengan fasa A yaitu 31,5230%, fasa B yaitu 41,5953% dan fasa C yaitu 47,2755%.

Kata kunci : **Feroresonansi, Transformator, Transformasi Wavelet**

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

IDENTIFICATION OF FERORESONANCE IN 3 PHASE TRANSFORMER BASED ON WAVELET TRANSFORM

Name : **Pristiwanto Adhi Anugraha**
NRP : **07111640000097**
Supervisor I : **Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.**
Supervisor II : **Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.**

ABSTRACT

Feroresonance phenomenon is a non-linear phenomenon that is complex. Non-linear characteristics are derived from inductance in ferromagnetic material. This phenomenon can endanger an electrical equipment, especially on the transformer. This final project is carried out a simulation of feroresonance on a 3 phase transformer of wye - wye and delta - wye connections using ATPDraw software. The simulation was conducted with the aim of identifying feroresonance with variations in grading capacitance (Cg) and shunt capacitance (Cs) values of 0.001 µF - 10 µF. ATPDraw simulation results are processed using discrete wavelet transforms (DWT). In this study, the analysis of wavelet transforms is done by two methods. The first method is to analyze wavelet transform visually. Meanwhile, the second method is to calculate the energy concentration. Based on the study conducted, the first method of wavelet transformation can visually distinguish normal conditions and feroresonance conditions at each wavelet decomposition level. The second method produces the highest energy concentration value of Cg 1 µF at level ten with phase A which is 29.7688%, phase B is 42.8531% and phase C is 42.1106% in the 3 phase transformer wye - wye phase. Whereas, the 3 phase delta - wye linkage transformer has the highest energy concentration value at the Cg value of 10 µF at level ten with phase A which is 31.5230%, phase B is 41.5953% and phase C is 47.2755%.

Keywords : Ferroresonance, Transformer, Wavelet Transform

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadirat Allah SWT. dengan segala rahmat, karunia, petunjuk, serta kekuatan yang berlimpah tak terkira yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

IDENTIFIKASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR 3 FASA BERBASIS TRANSFORMASI WAVELET

Tugas Akhir ini ditujukan untuk memenuhi salah satu sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tentunya juga tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu dengan segala hormat, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT. atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Dosen pembimbing, Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T., M.T. dan Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc. atas segala ilmu dan kesabaran dalam membimbing penulis hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Kedua orang tua saya tercinta yang sudah memberikan kasih sayang yang luar biasa kepada penulis.
4. Teman–teman Elektro ITS Angkatan 2016 (e56) yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari dan memohon maaf atas segala kekurangan pada Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di kemudian hari.

Surabaya, Juni 2020

Penulis

--Halaman ini sengaja dikosongkan—

DAFTAR ISI

ABSTRAK ..... **i**
ABSTRACT ..... **iii**
KATA PENGANTAR ..... **v**
DAFTAR ISI ..... **vii**
DAFTAR GAMBAR ..... **ix**
DAFTAR TABEL ..... **xv**
BAB 1 PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Sistematika Penulisan 2
BAB 2 SISTEM TRANSMISI TENAGA LISTRIK, FERORESONANSI DAN TRANSFORMASI WAVELET **3**
2.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik 3
2.2 Transformator 3
2.2.1 Definisi Transformator 3
2.2.2 Prinsip Kerja Transformator 4
2.2.3 Hubungan Transformator Tiga Fasa 4
2.2.4 Kurva Magnetisasi Transformator 6
2.3 Feroresonansi 6
2.3.1 Mode Feroresonansi 7
2.4 Transformasi Wavelet 7
2.4.1 Continous Wavelet Transform (CWT) 10
2.4.2 Discrete Wavelet Transform (DWT) 11
BAB 3 SKEMA SIMULASI FERORESONANSI DAN METODE TRANSFORMASI WAVELET **13**
3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi 13
3.2 Simulasi Data Feroresonansi 16
3.3 Metode Transformasi Wavelet 17
BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI **19**
4.1 Hasil Simulasi Saat Kondisi Normal 19
4.2 Feroresonansi Akibat *Switching* 20
4.2.1 Feroresonansi Akibat Variasi *Grading Capacitance* (*Cg*) pada Transformator 3 Fasa Wye – Wye 20
4.2.2 Feroresonansi Akibat Variasi *Shunt Capacitance* (*Cs*) pada Transformator 3 Fasa Wye – Wye 28
4.2.3 Feroresonansi Akibat Variasi *Grading Capacitance* (*Cg*) pada Transformator 3 Fasa Hubungan Delta – Wye 37

4.2.4 Feroresonansi Akibat Variasi *Shunt Capacitance* (*Cs*) pada Transformator 3 Fasa Hubungan Delta – Wye 44
4.3 Analisis Transformasi Wavelet 52
4.3.1 Analisis Transformasi Wavelet pada Transformator 3 Fasa Hubungan Wye – Wye Secara Visual 53
4.3.2 Analisis Transformasi Wavelet pada Transformator 3 Fasa Hubungan Delta – Wye Secara Visual 59
4.3.3 Perbandingan Nilai Konsentrasi Energi pada Transformator 3 Fasa Hubungan Wye – Wye dan Delta – Wye 64
BAB 5 PENUTUP 83
5.1 Kesimpulan 83
5.2 Saran 84
DAFTAR PUSTAKA 85
LAMPIRAN 87
RIWAYAT HIDUP 89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik 3
Gambar 2.2 Hubungan Wye pada Transformaator 3 Fasa..... 5
Gambar 2.3 Hubungan Delta pada Transformator 3 Fasa 5
Gambar 2.4 Hubungan Zigzag pada Transformator 3 Fasa..... 6
Gambar 2.5 Kurva histerisis 6
Gambar 2.6 Mode Fundamental 8
Gambar 2.7 Mode Subharmonik 8
Gambar 2.8 Mode Quasi-Periodik..... 8
Gambar 2.9 Mode Chaotic 9
Gambar 2.10 Implementasi Dekomposisi Wavelet 9
Gambar 2.11 Diagram Aplikasi Penggunaan Transformasi Wavelet 10
Gambar 3.1 Single Line Diagram Rangkaian Simulasi Feroresonansi..... 13
Gambar 3.2 Rangkaian Feroresonansi Transformator 3 Fasa Hubungan Delta - Wye menggunakan ATPDraw..... 14
Gambar 3.3 Rangkaian Feroresonansi Transformator 3 Fasa Hubungan Delta - Wye menggunakan ATPDraw..... 14
Gambar 3.4 Kurva magnetisasi induktansi nonlinier..... 16
Gambar 3.5 Indikator Resiko Level Bahaya Feroresonansi 17
Gambar 4.1 Respon tegangan pada kondisi normal pada Transformator 3 Fasa Hubungan Wye – Wye 20
Gambar 4.2 Respon tegangan pada kondisi normal pada Transformator 3 Fasa Hubungan Delta – Wye 20
Gambar 4.3 Rangkaian feroresonansi pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye dengan mengubah parameter *Cg* 21
Gambar 4.4 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,001 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C..... 22
Gambar 4.5 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,01 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C..... 23
Gambar 4.6 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C..... 24
Gambar 4.7 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,6 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B,

dan (d) fasa C 25
Gambar 4.8 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 26
Gambar 4.9 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 10 μF..... 27
Gambar 4.10 Grafik persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance* 28
Gambar 4.11 Rangkaian feroresonansi pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye dengan mengubah parameter Cs..... 29
Gambar 4.12 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,001 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 30
Gambar 4.13 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,05 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 31
Gambar 4.14 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,2 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 32
Gambar 4.15 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,5 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C..... 33
Gambar 4.16 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 34
Gambar 4.17 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 10 μF..... 35
Gambar 4.18 Grafik persentase perubahan nilai puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance* 36
Gambar 4.19 Rangkaian feroresonansi pada transformator 3 fasa hubungan delta – wye dengan mengubah parameter Cg 37
Gambar 4.20 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,001 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 38
Gambar 4.21 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,01 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 39

Gambar 4.22 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C. 40
Gambar 4.23 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,6 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 41
Gambar 4.24 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 42
Gambar 4.25 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 10 μF 43
Gambar 4.26 Grafik persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance* 44
Gambar 4.27 Rangkaian pemodelan feroresonansi pada transformator 3 fasa hubungan delta - wye dengan mengubah parameter *Cs* 45
Gambar 4.28 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,001 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 46
Gambar 4.29 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,05 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 47
Gambar 4.30 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,2 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 48
Gambar 4.31 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,5 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 49
Gambar 4.32 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C 50
Gambar 4.33 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 10 μF 51
Gambar 4.34 Grafik persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance* 52
Gambar 4.35 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A saat kondisi normal 54
Gambar 4.36 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa B saat kondisi normal 55

Gambar 4.37 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa C saat kondisi normal..... 55
Gambar 4.38 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A saat kondisi feroresonansi 56
Gambar 4.39 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa C saat kondisi feroresonansi 56
Gambar 4.40 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa C saat kondisi feroresonansi 57
Gambar 4.41 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A saat kondisi normal..... 60
Gambar 4.42 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa B saat kondisi normal..... 64
Gambar 4.43 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa C saat kondisi normal..... 65
Gambar 4.44 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A saat kondisi feroresonansi 66
Gambar 4.45 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa B saat kondisi feroresonansi 67
Gambar 4.46 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa C saat kondisi feroresonansi 68
Gambar 4.47 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A variasi nilai *grading capacitance* 65
Gambar 4.48 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa B variasi nilai *grading capacitance* 65
Gambar 4.49 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa C variasi nilai *grading capacitance* 66
Gambar 4.50 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A variasi nilai *shunt capacitance* 69
Gambar 4.51 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa B variasi nilai *shunt capacitance* 69
Gambar 4.52 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa C variasi nilai *shunt capacitance* 70

Gambar 4.53 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A variasi nilai *grading capacitance* 73
Gambar 4.54 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa B variasi nilai *grading capacitance* 73
Gambar 4.55 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa C variasi nilai *grading capacitance* 74
Gambar 4.56 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A variasi nilai *shunt capacitance* 77
Gambar 4.57 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa B variasi nilai *shunt capacitance* 77
Gambar 4.58 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa C variasi nilai *shunt capacitance* 78

-Halaman ini sengaja dikosongkan—

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter rangkaian pemodelan feroresonansi..... 15
Tabel 3.2 Parameter kurva magnetisasi..... 15
Tabel 4.1 Efek perubahan nilai *Grading Capacitance* (*Cg*)..... 27
Tabel 4.2 Persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance*..... 28
Tabel 4.3 Efek perubahan nilai *Shunt Capacitance* (*Cs*)..... 35
Tabel 4.4 Persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance*..... 36
Tabel 4.5 Efek perubahan nilai *Grading Capacitance* (*Cg*)..... 43
Tabel 4.6 Persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance*..... 44
Tabel 4.7 Efek perubahan nilai *shunt Capacitance* (*Cs*)..... 51
Tabel 4.8 Persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance*..... 52
Tabel 4.9 Perbandingan sinyal dekomposisi wavelet db 5 level 8 variasi *grading capacitance*..... 57
Tabel 4.10 Perbandingan sinyal dekomposisi wavelet db 5 level 8 variasi *shunt capacitance*..... 58
Tabel 4.11 Perbandingan sinyal dekomposisi wavelet db 5 level 8 variasi *grading capacitance*..... 63
Tabel 4.12 Perbandingan sinyal dekomposisi wavelet db 5 level 8 variasi *shunt capacitance*..... 63
Tabel 4.13 Konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal..... 67
Tabel 4.14 `Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg* yaitu 0,001 µF dan 0,01 µF..... 68
Tabel 4.15 `Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg* yaitu 0,1 µF dan 0,6 µF..... 68
Tabel 4.16 `Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg* yaitu 1 µF dan 10 µF..... 69
Tabel 4.17 Konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal..... 72
Tabel 4.18 `Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs*

yaitu 0,001 µF dan 0,05 µF 72
Tabel 4.19 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 0,2 µF dan 0,5 µF 73
Tabel 4.20 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 1 µF dan 10 µF 73
Tabel 4.21 Konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal 76
Tabel 4.22 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg* yaitu 0,001 µF dan 0,01 µF 77
Tabel 4.23 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg* yaitu 0,1 µF dan 0,6 µF 77
Tabel 4.24 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg* yaitu 1 µF dan 10 µF 78
Tabel 4.25 Konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal 81
Tabel 4.26 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 0,001 µF dan 0,05 µF 81
Tabel 4.27 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 0,2 µF dan 0,5 µF 82
Tabel 4.28 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 1 µF dan 10 µF 82

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkitan tenaga listrik menuju saluran distribusi tenaga listrik hingga dapat disalurkan menuju ke konsumen atau beban. Sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik memiliki komponen dan peralatan tenaga listrik yang penting untuk proses penyaluran tenaga listrik. Transformator merupakan salah satu peralatan yang penting pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik.

Transformator adalah peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari tegangan tinggi ke tegangan rendah maupun sebaliknya. Transformator haruslah tetap dijaga kestabilan dan keefektifannya dari berbagai jenis gangguan, karena transformator sendiri merupakan komponen penting dari sistem jaringan listrik.

Salah satu gangguan yang sulit diprediksi yaitu gangguan feroresonansi. Feroresonansi terdapat adanya perpaduan antara sifat induktansi non-linear dari inti transformator dengan sifat kapasitif pada jaringan sistem tenaga. Untuk mendeteksi adanya feroresonansi, perlu diketahui beberapa gejala-gejalanya [1]. Gejala pada feroresonansi terdapat bentuk gelombang maupun fisik. Gejala-gejala tersebut seperti adanya overvoltage, overcurrent, distorsi atau harmonisa permanen dari gelombang tegangan dan arus dan suara bising. Hal ini dapat merusak transformator, sehingga transformator tidak bekerja secara optimal.

Pada penelitian sebelumnya [2], telah dilakukan penelitian tentang identifikasi feroresonansi pada transformator satu fasa berinti H dan M menggunakan metode transformasi wavelet. Maka masalah yang dibahas dalam studi ini yaitu pengaruh pengubahan kapasitansi pada rangkaian pemodelan dengan fenomena feroresonansi pada transformator tiga fasa menggunakan transformasi wavelet. Transformator 3 fasa yang digunakan yaitu transformator 3 fasa hubungan wye – wye dan delta – wye. Sifat kapasitansi pada peralatan sistem dapat berubah seiring dengan waktu atau kondisi lingkungan yang tidak tentu. Pada studi ini dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Pada proses pengolahan data feroresonansi menggunakan perangkat lunak MATLAB. ATPDraw merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi rangkaian pemodelan dengan fenomena transien. Transformasi

wavelet pada studi ini digunakan untuk membanding feroresonansi setiap variasi nilai kapasitor.

Metode pada studi ini diawali dengan studi literatur seperti mengumpulkan buku serta referensi tentang fenomena feroresonansi. Kemudian pengumpulan data untuk mengetahui parameter-parameter transformator daya tiga fasa. Setelah itu dilakukan pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Tujuan dari pemodelan dan simulasi ini digunakan untuk mendeteksi terjadinya fenomena feroresonansi dengan diberikan trigger berupa switching dengan variasi nilai kapasitor. Langkah selanjutnya, hasil data simulasi menggunakan ATPDraw akan diolah menggunakan transformasi wavelet di MATLAB. Hasil pengolahan data akan dianalisis sebagai dasar penyusunan laporan. Langkah terakhir memberikan kesimpulan berdasarkan data yang telah didapatkan dan saran yang berguna untuk penelitian selanjutnya.

1.2 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan masing-masing bab diuraikan sebagai berikut :

Bab satu menjelaskan mengenai latar belakang dari penelitian ini serta pengenalan singkat terhadap feroresonansi. Selain itu, permasalahan, metodologi, batasan masalah dan sistematika dari penulisan laporan akan dijelaskan dalam bab ini.

Bab dua berisi teori penunjang yang membahas tentang sistem tenaga listrik khususnya sistem transmisi tenaga listrik, transformator, feroresonansi dan transformasi wavelet.

Bab tiga membahas tentang pemodelan rangkaian feroresonansi, metode pengambilan data menggunakan ATPDraw dan metode pengolahan data menggunakan transformasi wavelet pada MATLAB yang akan digunakan dalam studi ini.

Bab empat berisi hasil simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi berdasarkan parameter gangguan berupa switching menggunakan ATPDraw dan transformasi wavelet menggunakan MATLAB.

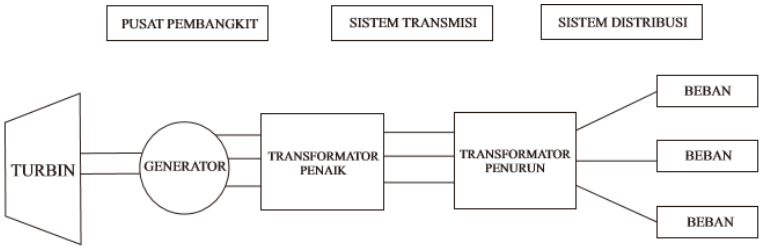
Bab lima berisi kesimpulan yang dapat diambil dan saran untuk penelitian selanjutnya yang sesuai dengan Tugas Akhir tersebut.

BAB 2
SISTEM TRANSMISI TENAGA LISTRIK, FERORESONANSI DAN TRANSFORMASI WAVELET

2.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Sistem transmisi tenaga listrik adalah suatu sistem penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkitan menuju ke pusat pembebanan atau konsumen. Jarak antara pusat pembangkitan dengan pusat pembebanan sangat jauh, sehingga terdapat saluran jaringan tenaga listrik berupa saluran transmisi. Pada Gambar 2.1 menjelaskan bahwa sistem transmisi merupakan saluran perantara antara sistem pembangkit dengan sistem distribusi. Suatu sistem distribusi menghubungkan semua beban-beban yang terpisah satu dengan yang lain kepada saluran-saluran transmisi [3]

Saluran transmisi dapat dibedakan berdasarkan besar tegangan yaitu : Tegangan Ultra Tinggi (*Ultra High Voltage / UHV*), Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage / EHV*), dan Tegangan Tinggi (*High Voltage / HV)*. Besar tegangan saluran transmisi yang biasanya digunakan di Indonesia yaitu 70 kV, 150 kV dan 500 kV.



Gambar 2.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

2.2 Transformator

2.2.1 Definisi Transformator

Transformator atau disebut juga trafo adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama. Transformator bekerja sesuai dengan prinsip hukum faraday. Jenis transformator yang akan dibahas tugas akhir ini yaitu transformator tiga fasa. Transformator tiga fasa umumnya memiliki tegangan yang tinggi yang berguna untuk

menurunkan tegangan transmisi (tegangan tinggi) menjadi tegangan distribusi (menengah), maka transformator jenis ini disebut dengan transformator step down, sedangkan transformator tiga fasa yang berguna untuk menaikan tegangan disebut dengan transformator step up.

2.2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua kumparan yaitu kumparan primer dan sekunder yang bersifat induktif. Penghubung dari kedua kumparan yaitu fluks medan magnet. Adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi *self induction*. Induksi yang terjadi pada kumparan sekunder terjadi karena pengaruh induksi dari kumparan primer. Efek ini dinamakan induktansi timbal-balik atau disebut juga *mutual inductance* yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder di bebani, sehingga energi listrik dapat dikirim keseluruhan secara magnetisasi. Hal ini sesuai dengan Hukum Faraday. Pada hukum Faraday menyatakan magnitudo dari *electromotive force* (emf) proporsional terhadap perubahan fluks terhubung. Sedangkan pada hukum Lenz menyatakan arah dari emf berlawanan dengan arah fluks sebagai reaksi perlawanan dari perubahan fluks. Besar GGL induksi dapat dijelaskan dengan persamaan berikut :

$$e = -N\frac{d\emptyset}{dt} \tag{2.1}$$

Dimana :

e = Gaya Gerak Listrik (GGL)
N = Jumlah Lilitan
$\frac{d\emptyset}{dt}$ = Perubahan fluks magnet

Perubahan fluks dapat menghasilkan Gaya Gerak Listrik (GGL). Perubahan fluks tersebut terjadi akibat adanya perubahan fungsi waktu akibat arus bolak-balik yang berbentuk sinusoidal.

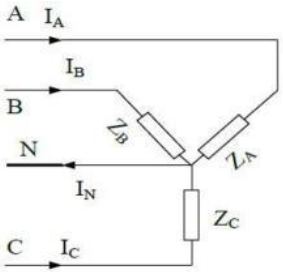
2.2.3 Hubungan Transformator Tiga Fasa

Transformator 3 fasa yaitu terdiri dari 3 buah transformator 1 fasa yang disusun menjadi sebuah transformator yang terdapat 2 belitan. Belitan transformator terdiri dari belitan primer dan belitan sekunder. Terdapat 2 metode untuk menghubungkan belitan primer yaitu hubungan

wye dan delta, sedangkan pada belitan sekundernya dapat dihubungkan secara delta, wye dan zig-zag [4].

a. Hubungan Wye (Y)

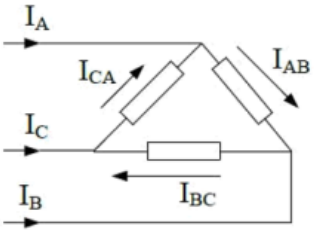
Hubungan wye bisa disebut juga hubungan bintang. Hubungan wye adalah transformator tiga fasa yang menghubungkan ujung-ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik netral berada di tempat penyatuan dari ujungujung lilitan. Arus pada transformator tiga fasa yang dihubungkan wye memiliki masing-masing beda 120° [4]. Transformator distribusi biasanya selalu dihubungkan wye, dengan syarat ketiga fasanya pada transformator harus diusahakan seimbang.



Gambar 2.2 Hubungan Wye pada Transformaator 3 Fasa

b. Hubungan Delta (Δ)

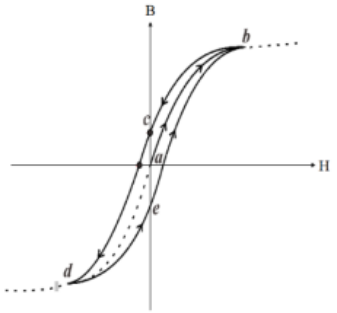
Hubungan delta bisa disebut juga hubungan segitiga. Hubungan delta adalah transformator tiga fasa yang menghubungkan ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama. Tegangan pada transformator tiga fasayang dihubungkan delta memiliki masing-masing beda 120° [4].



Gambar 2.3 Hubungan Delta pada Transformator 3 Fasa

2.2.4 Kurva Magnetisasi Transformator

Kurva magnetisasi atau disebut juga kurva histerisis merupakan kurva antara hubungan kerapatan fluks magnet (B) terhadap kuat medan magnet (H) akibat bahan feromagnetik pada inti transformator. Histerisis sendiri terjadi akibat adanya ketidaklinearan pada inti transformator.



Gambar 2.4 Kurva Histerisis

Pada Gambar 2.5 jalur a-b menyatakan kondisi awal saat dialirkan arus. Kerapatan fluks akan meningkat hingga mencapai titik saturasi. Ketika nilai arus menurun, nilai fluks juga akan menurun melalui jalur b-c-d. Hal ini dikarenakan adanya faktor fluks sisa.

Ketika medan magnet sudah mencapai titik nol, kerapatan fluks tidak mencapai titik nol. Hal ini terjadi karena adanya fluks sisa. Fluks sisa sendiri terjadi karena adanya permeabilitas pada inti transformator.

2.3 Feroresonansi

Feroresonansi adalah situasi resonansi dengan induktani yang non-linier, dimana reaktansi induktif tidak hanya bergantung pada frekuensi tetapi juga pada kerapatan fluks magnetik dari inti besi transformator [5] [6].

Menurut standar ANSI/IEEE Std 100-1984, feroresonansi sebagai sebuah fenomena yang dicirikan dengan adanya overvoltage dan ketidaksesuaian bentuk gelombang akibat adanya hubungan induktor yang bisa tersaturasi dengan kapasitor dalam hubungan seri [7]. Induktansi dan kapasitansi adalah dua komponen utama yang berkontribusi untuk meninisiasi fenomena feroresonannsi [8].

Induktansi mungkin berasal dari kekuatan transformer, instrumen transformer, atau shunt reaktor, sedangkan kapasitansi dapat bersumber

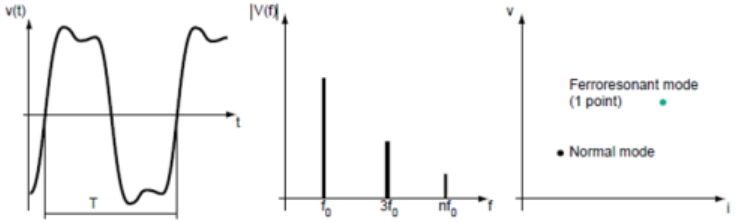
dari pengisian baris dari jalur transmisi, transformator tegangan kapasitif, kapasitor bank, dan tegangan grading kapasitor dari pemutus sirkuit, [9]. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan dan kegagalan dalam sistem koordinasi proteksi. Ketika keadaan abnormal tersebut terjadi pada suatu peralatan, maka peralatan tersebut akan rusak apabila feroresonansi tidak segera diatasi [10 - 11].

2.3.1 Mode Feroresonansi

Feroresonansi dapat diklasifikasikan menjadi empat mode feroresonansi yang berbeda [12]. Empat mode feroresonansi ini diklasifikasikan berdasarkan kondisi steady state. Empat mode feroresonansi yaitu mode fundamental, mode subharmonik, mode *quasi periodic*, dan mode *chaotic* [13].

a. Mode Fundamental

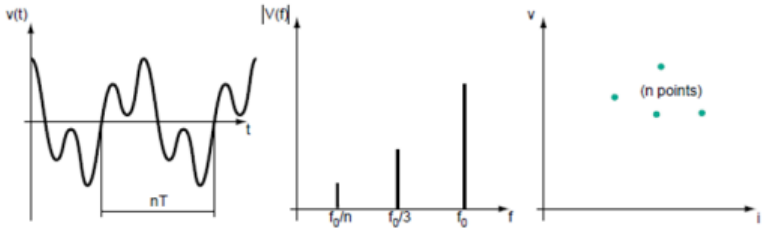
Mode fundamental merupakan mode paling dasar feroresonansi. Mode fundamental dicirikan nilai tegangan dan arus masih memiliki nilai periode yang sama dengan periode sistem (T) [13]. Mode fundamental adalah periodik.



Gambar 2.5 Mode Fundamental

b. Mode Subharmonik

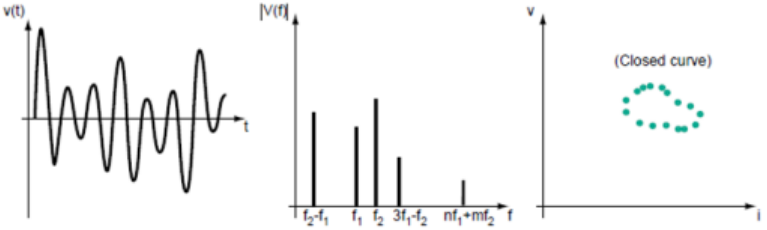
Mode subharmonik memiliki periode sinyal akan menjadi periode. Periode tersebut berbentuk suatu kelipatan dari periode sistem. Pada mode subharmonic dicirikan adanya sinyal output yang memiliki periode nT yang merupakan kelipatan periode sumber. Nilai kelipatan biasanya digunakan yaitu kelipatan ganjil.



Gambar 2.6 Mode Subharmonik

c. Mode Quasi-Periodik

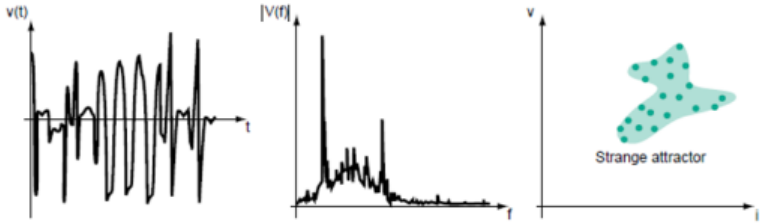
Sinyal feroresonansi jenis ini tidak periodik. Spektrum sinyalnya merupakan diskontinu, dapat didefinisikan sebagai $nf_1 + mf_2$ (n dan m adalah integer dan f_1/f_2 merupakan nilai real irasional)



Gambar 2.7 Mode Quasi-Periodik

d. Mode *Chaotic*

Mode *chaotic* memiliki karakteristik pada magnitudo tegangan yang berubah-ubah dan tidak teratur. Spektrum sinyal bersifat kontinu dan bentuk gelombang pada mode chaotic adalah non-periodik [14].

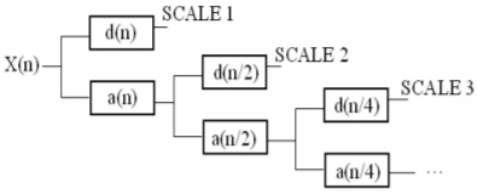


Gambar 2.8 Mode *Chaotic*

2.4 Transformasi Wavelet

Transformasi wavelet adalah teknik matematis yang digunakan untuk banyak aplikasi pemrosesan sinyal [15]. Transformasi wavelet berasal dari transformasi fourier [16]. Transformasi wavelet mengacu pada proses transformasi sinyal dari waktu domain menjadi representasi lain yang lebih berguna, disebut domain wavelet. Wavelet domain ini juga dikenal sebagai domain frekuensi waktu, domain skala waktu, ranah skala ruang dan domain frekuensi ruang [13].

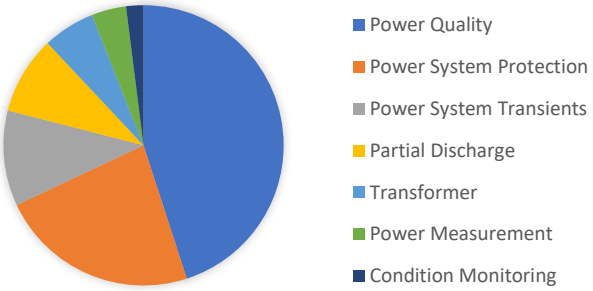
Prinsip metode transformasi wavelet yaitu untuk menyaring sinyal dengan filter seri. Sinyal dapat diurai ke daerah frekuensi yang berbeda dari berbagai skala wavelet. Pada Gambar 2.10 menunjukkan penerapan sinyal dekomposisi wavelet dimana X(n) adalah sinyal, d(n) adalah komponen frekuensi tinggi dan (n) adalah komponen frekuensi rendah dari setiap skala frekuensi. Bandwidth frekuensi sinyal dibagi dengan koefisien $\frac{1}{2}$N dimana (n = 1, 2, 3...). Terbentuknya mode feroresonansi ditentukan oleh amplitudo energi maksimal dari frekuensi yang berbeda.



Gambar 2.10 Implementasi Dekomposisi Wavelet

Dalam aplikasi sistem daya, transformasi wavelet banyak digunakan di sistem daya. Pada Gambar 2.10 menunjukkan secara rinci persentase daerah aplikasi dari wavelet berubah dalam sistem daya.

Kualitas daya mendominasi area aplikasi dengan hampir 45 persen diikuti dengan protesi sistem daya. Sistem daya transien dan partial discharge hampir sama, yaitu sekitar 10 persen. *Condition monitoring* memiliki persentase paling sedikit yaitu sebesar dua persen.



Gambar 2.11 Diagram Aplikasi Penggunaan Transformasi Wavelet

Transformasi wavelet terdiri dari Transformasi Wavelet Kontinu (CWT), Transformasi Wavelet Diskrit (DWT), dan Transformasi Paket Wavelet (WPT). Pada tugas akhir ini hanya menjelaskan CWT dan DWT. CWT merupakan konsep fundamental dari transformasi wavelet, sedangkan DWT adalah versi cepat dari CWT

2.4.1 Continous Wavelet Transform (CWT)

Transformasi Wavelet Kontinu (CWT) merupakan konsep dasar transformasi wavelet. Konsep dasar pada transformasi wavelet biasanya disebut juga dengan mother wavelet [8]. Jenis mother wavelet ini digunakan dalam menganalisis gelombang dengan frekuensi sampling yang tinggi [14].

Transformasi wavelet kontinu (CWT) menghasilkan banyak koefisien transformasi wavelet yang dapat mengakibatkan data yang dihasilkan menjadi berlebihan atau redudansi [9].

Transformasi wavelet kontinu didefinisikan oleh persamaan berikut :

$$WT(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\Psi(t)dt \qquad (2.2)$$

Dimana $x(t)$ adalah sinyal untuk ditransformasikan dan $\Psi(t)$ adalah *mother wavelet.*

Persamaan (2.1) merupakan bentuk sederhana dari persamaan transformasi wavelet.

$$WT\{x(a,b)\} = (x, \Psi a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t).\Psi a, b(t)dt \qquad (2.3)$$

Persamaan (2.2) membuktikan transformasi wavelet mengkorelasikan antara sinyal input $x(t)$ dan $\Psi a, b(t)$

2.4.2 Discrete Wavelet Transform (DWT)

Pemakaian transformasi wavelet diskrit dapat menyelesaikan permasalahan redudansi data. Hal ini karena pada DWT hanya memiliki beberapa sampel koefisien saja yang diambil. Sehingga Transformasi wavelet diskrit dapat mengurangi kelebihan koefisien dari CWT.

Transformasi wavelet diskrit didefinisikan oleh persamaan berikut :

$$WTa, b(n) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{0}^{N-1} x(n) \Psi \left(\frac{n-b}{a}\right) \qquad (2.4)$$

Dimana $x(n)$ merupakan sinyal yang ditransformasikan, dan Ψ adalah mother wavelet. Nilai a dan b dipilih oleh persamaan berikut :

$$a = a_0^m \qquad (2.5)$$
$$b = nb_0 a_0^m \qquad (2.6)$$

Dimana $a_0 > 1$ adalah factor dilatasi dan b_0 adalah factor terjemahan yang tergantung pada a_0. m, n adalah bilangan bulat positif.

Parameter tersebut merupakan hasil modifikasi dari *mother* wavelet pada persamaan tersebut :

$$\Psi m, n(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi \left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \qquad (2.7)$$

Transformasi wavelet diskrit dapat digunakan untuk memproses sinyal dengan cara membagi sinyal tersebut menjadi dua sub-sinyal dengan bagian frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Setelah itu pada masing-masing sub-sinyal akan dipecah menjadi dua bagian sub-sinyal lagi, sesuai dengan dengan jumlah tingkat tranformasi wavelet yang digunakan

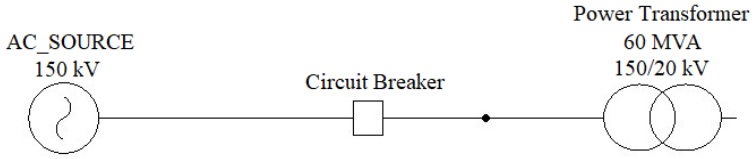
--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 3
SKEMA SIMULASI FERORESONANSI DAN METODE TRANSFORMASI WAVELET

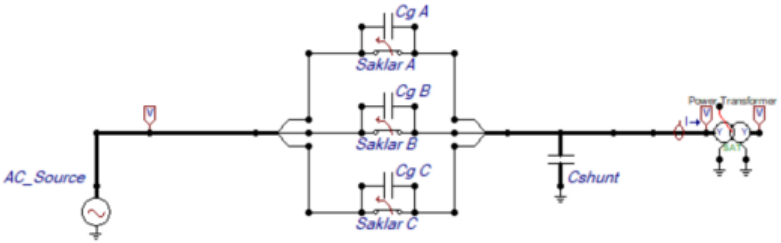
3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

Pemodelan rangkaian ini bertujuan untuk menunjukkan fenomena feroresonansi yang dapat terjadi pada transformator tiga fasa. Pemodelan rangkaian feroresonansi ini terdiri dari komponen-komponen utama seperti sumber tegangan 150 kV, kapasitor, switch, dan transformator 3 fasa. Transformator 3 fasa yang digunakan yaitu transformator 3 fasa hubungan wye – wye dan hubungan delta – wye. Pemodelan rangkaian dilakukan pada *software Alternative Transient Program* atau ATPDraw.

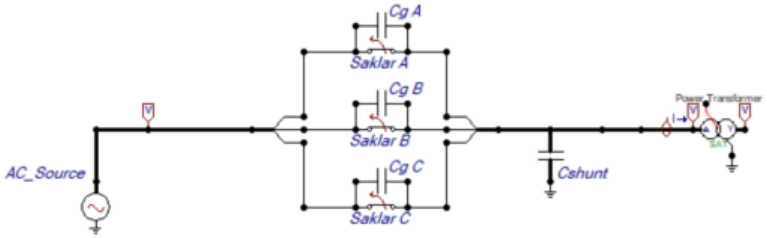
Pemodelan rangkaian feroresonansi 3 fasa menggunakan 150 kV sebagai sumber tegangan. Pada rangkaian ini juga menggunakan *capacitor grading* dengan interval nilai 0,001 – 10 µF dan *capacitor shunt* dengan interval nilai 0,001 – 10 µF [17]. Hal ini *grading capacitance* merepresentasikan adanya kapasitansi yang diakibatkan pengoperasian switching pada CB dan *shunt capacitance* merepresentasikan kapasitansi saluran terhadap tanah. Pada Gambar 3.1 menjelaskan single line diagram dari rangkaian simulasi feroresonansi.



Gambar 3.1 Single Line Diagram Rangkaian Simulasi Feroresonansi



Gambar 3.2 Rangkaian Feroresonansi Transformator 3 Fasa Hubungan Wye - Wye Menggunakan ATPDraw



Gambar 3.3 Rangkaian Feroresonansi Transformator 3 Fasa Hubungan Delta - Wye Menggunakan ATPDraw

Pada rangkaian pemodelan pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 terdapat *capacitor grading* yang dipasang pada masing-masing *switch* dan sebuah *capacitor shunt*. *Shunt capacitance* memiliki hubungan parallel dengan induktansi nonlinier. *Grading capacitance* ini memiliki hubungan seri dengan induktansi nonlinier. Transformator pada rangkaian tersebut menggunakan model ideal 3 fasa. Parameter pada rangkaian dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter rangkaian pemodelan feroresonansi [18]

Parameter	Nilai	Satuan
Sumber Tegangan	150	kV
Frekuensi	50	Hz
Grading Capacitance	0.6	µF
Shunt Capacitance	0.2	µF
Resistansi Primer	220	Ω
Induktansi Primer	1.745	mH

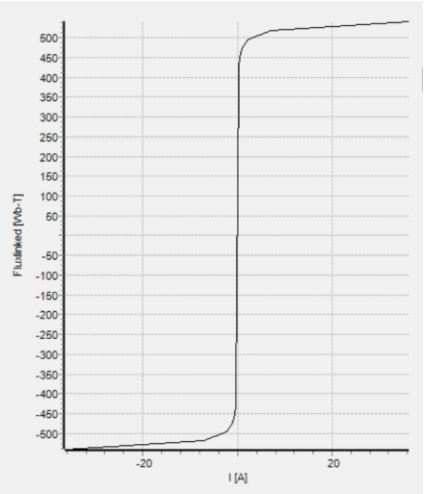
Resistansi Sekunder	5	Ω
Induktansi Sekunder	0.039	mH
Resistansi Magnetisasi	6.5	MΩ
Switching	0.1	s

Parameter transformator daya yang dimodelkan pada simulasi untuk membangkitkan feroresonansi dalam perangkat lunak ATPDraw yaitu resistansi dan induktansi pada kumparan primer dan sekunder. Parameter transformator daya pada kumparan inti yang digunakan juga untuk pemodelan rangkaian feroresonansi yaitu resistansi magnetisasi dan induktansi non linier. Parameter induktansi non linier sendiri dapat dijelaskan pada Tabel 3.2 berikut. Tabel 3.2 merupakan hasil pengukuran berdasarkan penelitian sebelumnya [13].

Tabel 3.2 Parameter kurva magnetisasi [13]

I (A)	Flux Linkage (Wb-T)
0.246719	405.9129
0.365463	428.4634
0.563812	451.0142
1.009124	473.5647
2.251662	496.1156
7.034815	518.6664
36.42476	541.2169

Kurva magnetisasi induktansi non-linier terdapat pada pemodelan rangkaian feroresoanansi pada perangkat lunak ATPDraw. Pada Gambar 3.3 menunjukan pada sumbu x yaitu arus magnetisasi, sedangkan sumbu y yaitu fluks linkage.



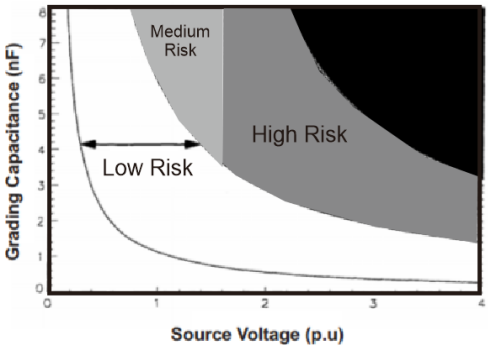
Gambar 3.4 Kurva Magnetisasi Induktansi Nonlinier

3.2 Simulasi Data Feroresonansi

Pengambilan data feroresonansi dilakukan menggunakan *software Alternative Transient Program* atau ATPDraw. ATPDraw yaitu perangkat lunak yang digunakan untuk membuat dan mengubah model secara digital dari rangkaian atau jaringan listrik dengan sistem simulasi, agar mengetahui keadaan transien pada suatu rangkaian atau jaringan listrik tersebut.

Pada proses pengambilan data terdapat pada 2 kondisi yaitu saat kondisi normal dan kondisi akibat *switching*. Pada simulasi pada rangkaian pemodelan feroresonansi ini, diberikan variasi nilai pada kapasitansi. Data yang didapat dari hasil simulasi yaitu berupa respon tegangan tiap fasa pada sisi primer transformator 3 fasa hubungan wye – wye dan hubungan delta – wye dengan interval nilai kapasitansi 0,001 - 10 µF.

Pada penelitian sebelumnya [19], telah dilakukan penelitian untuk mengindikasi level bahaya feroresonansi akibat variasi nilai kapasitansi. Sehingga nilai kapasitansi sangat mempengaruhi resiko bahaya fenomena feroresonansi.



Gambar 3.5 Indikator Resiko Level Bahaya Feroresonansi

3.3 Metode Transformasi Wavelet

Pada proses pengolahan data dilakukan menggunakan *software* MATLAB. Data yang diperoleh dari *software* ATPDraw akan diolah menggunakan metode transformasi wavelet diskrit. Pendeteksian gangguan feroresonansi pada sistem tenaga ini dilakukan menggunakan tranformasi wavelet *debauchies* frekuensi tinggi. *Mother wavelet* yang digunakan yaitu *mother wavelet debauchies* (db) orde 5.

Prinsip aplikasi analisis wavelet adalah untuk menyaring sinyal dengan filter seri. Sinyal dapat diurai ke daerah frekuensi yang berbeda dari berbagai skala oleh transformasi wavelet [12]. Dalam penerapan *mother wavelet*, DWT menganalisa detail menggunakan frekuensi tinggi, sedangkan frekuensi rendah digunakan untuk menganalisa pendekatan [20].

Pemilihan mother wavelet ini sangat krusial dalam pendeteksian karakteristik feroresonansi. Pemilihan orde dan level dari jenis mother wavelet bisa ditentukan berdasarkan kriteria dengan melakukan analisis terhadap ekstraksi sinyal tegangan dan jenis mother wavelet itu sendiri [21]. Pengolahan data dilakukan menggunakan *toolbox wavelet analyzer* dari perangkat lunsk MATLAB. Hasil pengolahan data dari *toolbox wavelet analyzer* yaitu dalam bentuk sinyal dekomposisi wavelet.

Setiap level dekomposisi wavelet memiliki nilai konsentrasi energi. Nilai konsentrasi energi dapat dijelaskan dengan persamaan berikut.

$$Energy(D_j) = \frac{\sum_{k=-\infty}^{\infty}|d_j(k)|^2}{\sum_{k=-\infty}^{\infty}|x(k)|^2} \times 100\ \% \qquad (3.1)$$

Dimana *j* menunjukkan level dekomposisi wavelet, sedangkan *x(k)* adalah penjumlahan dari nilai dekomposisi wavelet

$$\int |f(t)|^2 dt = \sum_{k=-\infty}|c(k)|^2 + \sum_{j=0}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty}\left|d_j(k)\right|^2 \qquad (3.2)$$

Dimana $c(k)$ adalah *approximation coefficient* dan $d_j(k)$ adalah koefisien detail pada level *j.*

BAB 4
ANALISIS HASIL SIMULASI

4.1 Hasil Simulasi Saat Kondisi Normal

Pada rangkaian simulasi pemodelan feroresonansi pada kondisi normal memiliki sumber tegangan senilai 150 kV. Simulasi respon tegangan berlangsung selama 0,5 sekon. Pada saat kondisi normal, tidak ada proses switching pada rangkaian. Maka hasil simulasi tidak terjadi gangguan feroresonansi. Hasil respon tegangan terlihat keadaan steady state. Pada kondisi normal, rangkaian pemodelan mengabaikan variasi nilai dari *grading capacitance* dan *shunt capacitance*. Hal ini karena tidak terjadi proses switching.

Sumber tegangan yang digunakan pada rangkaian simulasi adalah tegangan bolak-balik (AC) rms *line to line* ($V_{L\text{-}L\ rms}$) sebesar 150 kV dengan frekuensi 50 Hz. Oleh karena itu, besaran nilai tegangan rms *line to neutral* ($V_{L\text{-}N\ rms}$) adalah sebesar:

$$V_{L\text{-}N\ rms} = \frac{VL-L\ rms}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

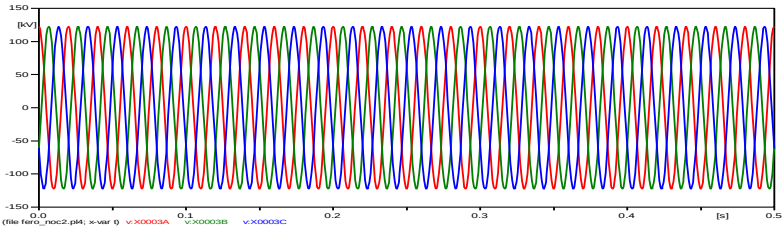
$$V_{L\text{-}N\ rms} = \frac{150000\ V}{\sqrt{3}} = 86602{,}54038\ \text{Volt}$$

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

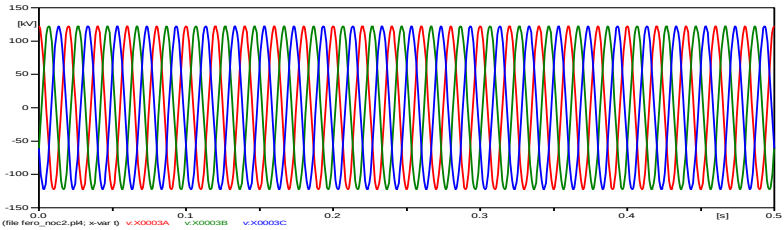
$$V_{L\text{-}N\ peak} = V_{L\text{-}N\ rms} \times \sqrt{2} \quad (4.2)$$

$$V_{L\text{-}N\ peak} = 86602,\ 54038 \times \sqrt{2}\ \text{Volt} = 122474{,}4871\ \text{Volt}$$

Pada Gambar 4.1 menunjukan hasil respon tegangan saat kondisi normal pada transformator 3 fasa hubungan wye - wye. Sedangkan pada Gambar 4.2 menunjukkan hasil respon tegangan saat kondisi normal pada transformator 3 fasa hubungan delta –wye. Nilai puncak gelombang saat kondisi normal yaitu 122,48 kV. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil perhitungan sebelumnya. Terlihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 respon tegangan saat kondisi normal masih berbentuk sinusoidal dan tidak terdapat kecacatan dalam bentuk gelombangnya. Hal ini disebabkan karena tidak adanya salah satu pemicu dari feroresonansi yaitu switching.



Gambar 4.1 Respon tegangan pada kondisi normal pada Transformator 3 Fasa Hubungan Wye – Wye



Gambar 4.2 Respon tegangan pada kondisi normal pada Transformator 3 Fasa Hubungan Delta – Wye

4.2 Feroresonansi Akibat *Switching*

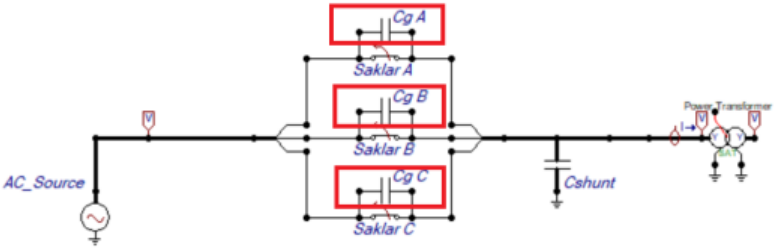
Pada studi ini akan dilakukan simulasi rangkaian pemodelan feroresonansi dengan trigger berupa *switching* untuk memicu munculnya feroresonansi. Pada simulasi ini, diberikan *switching* yang akan terbuka pada waktu ke 0,1 sekon dengan waktu simulasi selama 0,5 sekon. Pengoperasian *switching* ini dilakukan secara serentak pada ketiga fasa dengan waktu yang sama. Sehingga dapat terlihat keadaan feroresonansi.

Pada simulasi ini, terdapat dua kapasitansi yang akan divariasikan nilainya. Kapasitansi pertama yang berubah adalah *grading capacitance* dan kapasitansi kedua yang berubah adalah *shunt capacitance*. Nilai dari kapasitansi ada pada interval 0,001 – 10 µF. Alasan nilai kapasitansi divariasikan yaitu dapat mempengaruhi bentuk mode feroresonansi yang akan ditampilkan pada hasil simulasi.

4.2.1 Feroresonansi Akibat Variasi *Grading Capacitance* (*Cg*) pada Transformator 3 Fasa Wye – Wye

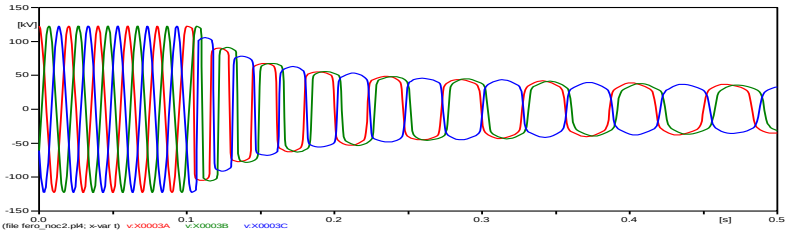
Simulasi dilakukan dengan mengubah nilai *grading capacitance* pada rangkaian pemodelan feroresonansi menggunakan transformator 3 fasa wye-wye. Nilai *grading capacitance* diubah-ubah dengan rentang

nilai 0,001 – 10 µF. Dengan nilai *shunt capacitance* dibuat tetap yaitu sebesar 0,2 µF. Hasil yang didapat dari simulasi yaitu respon tegangan sisi primer transformator.

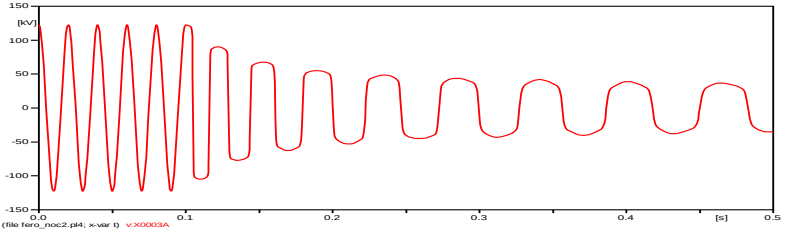


Gambar 4.3 Rangkaian feroresonansi pada transformator 3 fasa hubungan wye - wye dengan mengubah parameter *Cg*

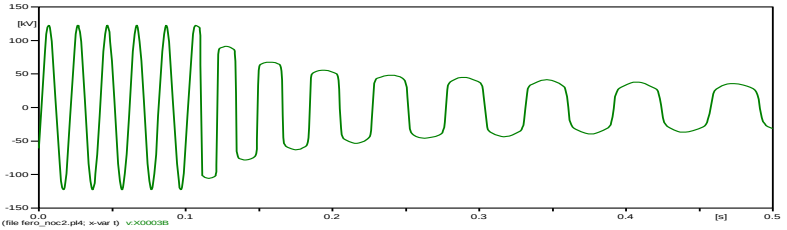
Pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.9 menunjukan bahwa respon tegangan setiap fasa pada sisi primer transformator dengan rentang nilai *grading capacitance* berbeda-beda. Pada Gambar 4.4 dan 4.5 menunjukan tidak terjadi feroresonansi. Pada Gambar 4.6, 4.7, dan 4.8 terlihat bentuk feroresonansi mode fundamental. Pada Gambar 4.9 tampak terlihat seperti respon tegangan saat kondisi normal dengan berbentuk sinusoidal. Pada Tabel 4.1 menunjukkan nilai tegangan puncak akibat variasi nilai *Grading Capacitance* (*Cg*). Pada Tabel 4.1 menunjukkan kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance.* Pada Tabel 4.2 menunjukkan persentase kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance.*Pada Gambar 4.10 menunjukkan grafik persentase kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance.*



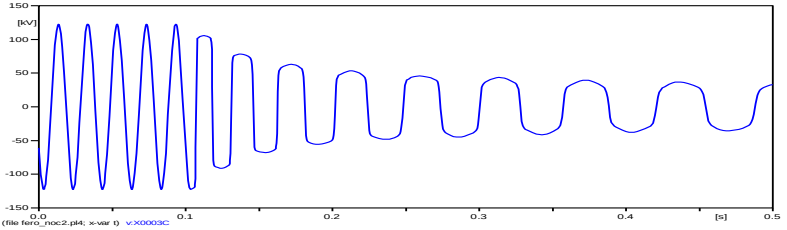
(a)



(b)

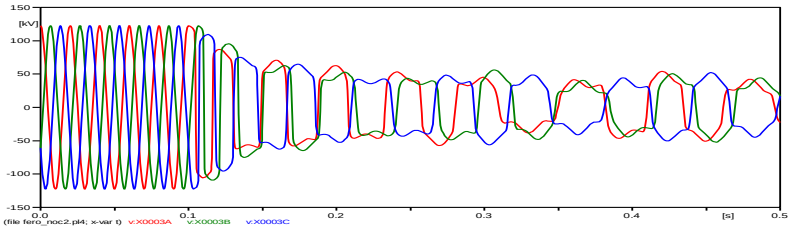


(c)

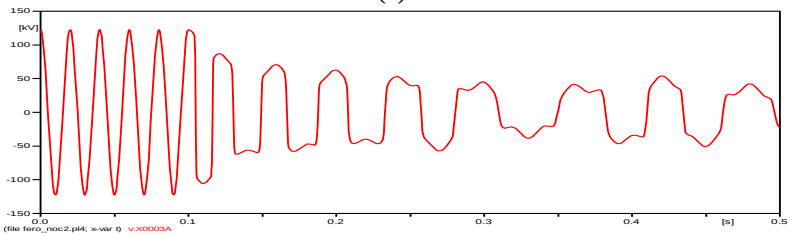


(d)

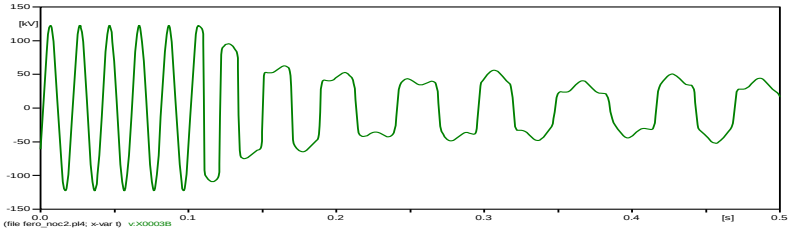
Gambar 4.4 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,001 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



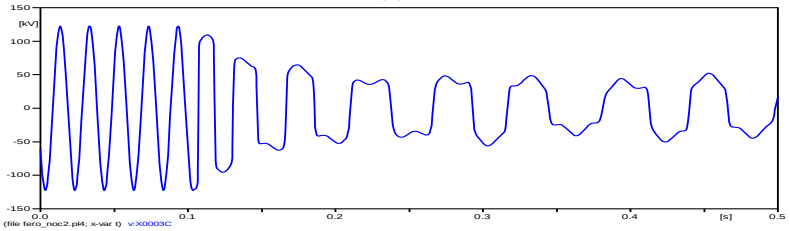
(a)



(b)

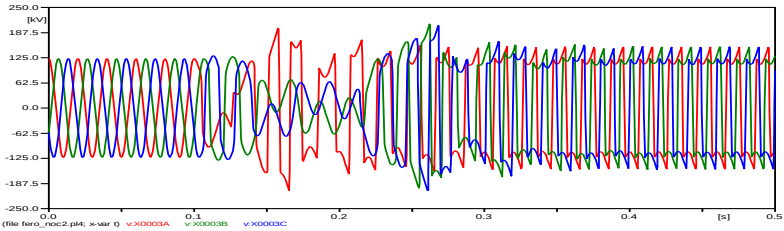


(c)

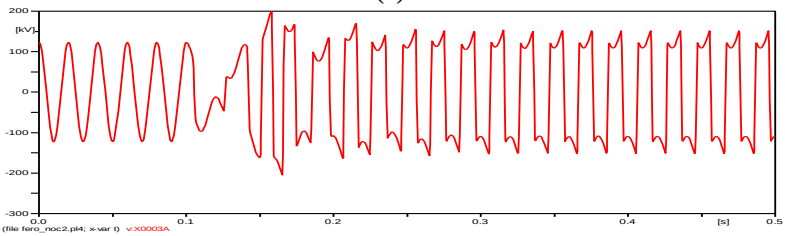


(d)

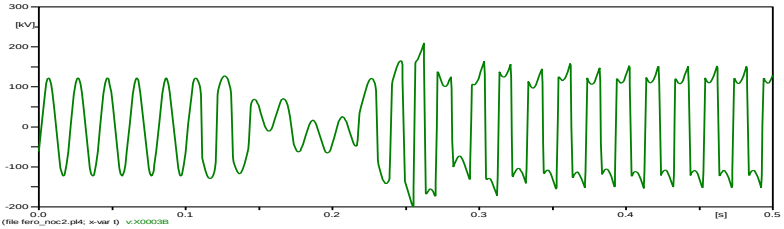
Gambar 4.5 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,01 µF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



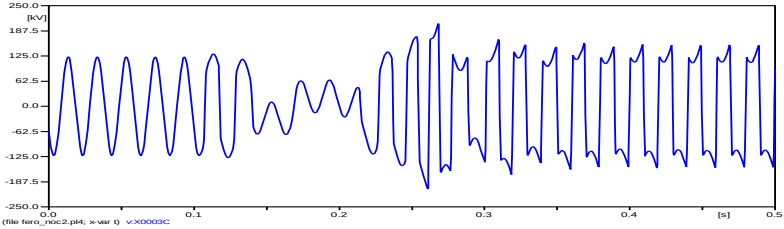
(a)



(b)

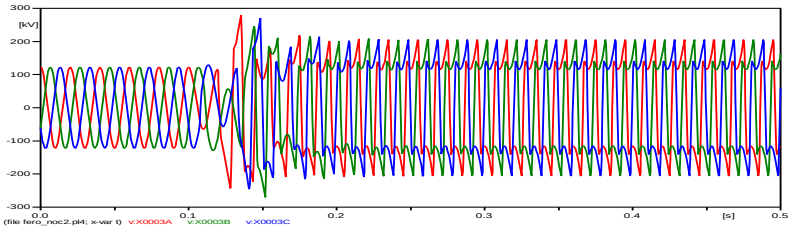


(c)

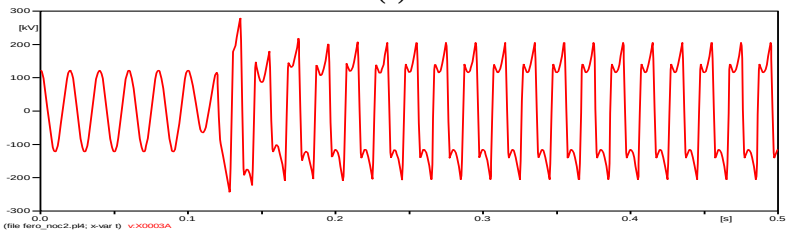


(d)

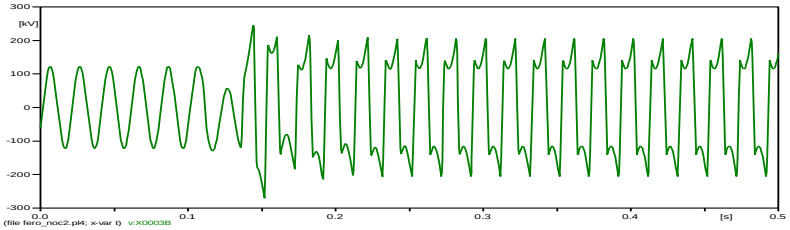
Gambar 4.6 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



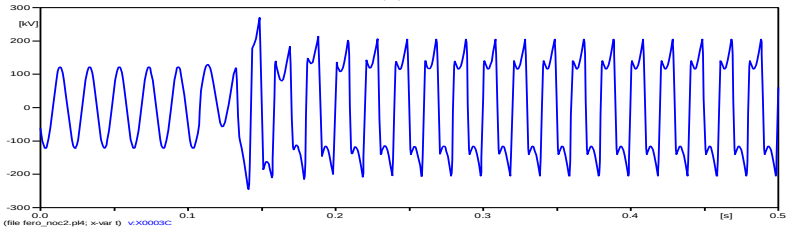
(a)



(b)

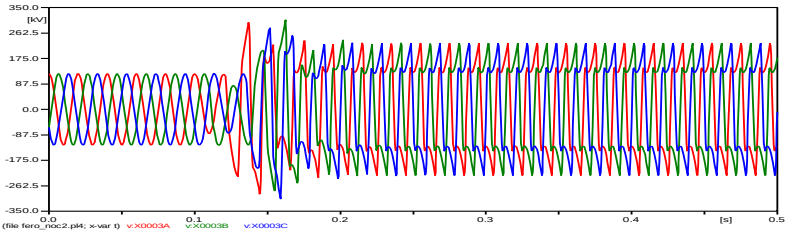


(c)

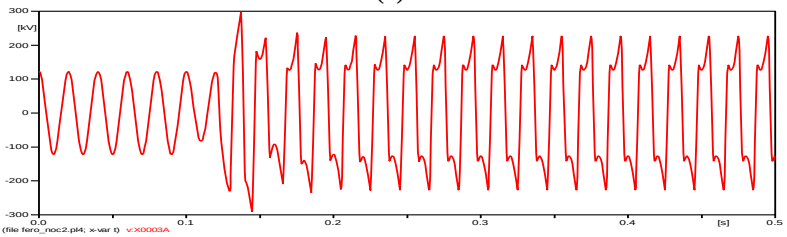


(d)

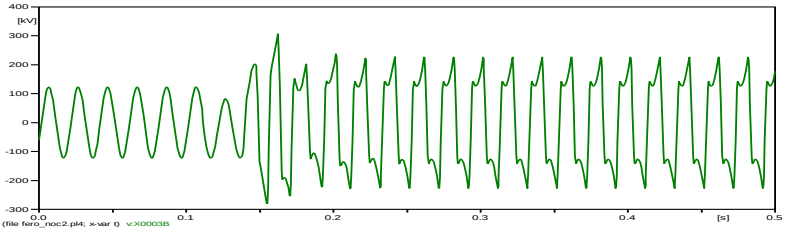
Gambar 4.7 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,6 µF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



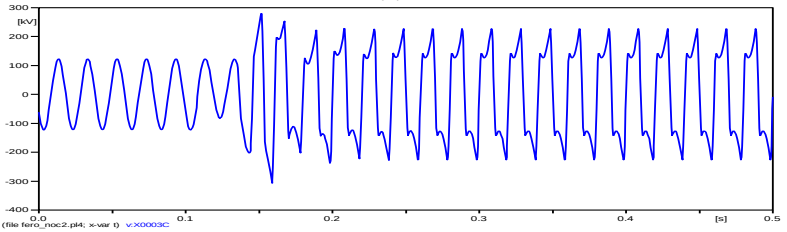
(a)



(b)

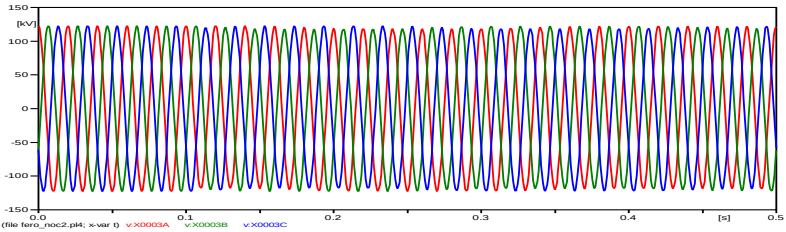


(c)



(d)

Gambar 4.8 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



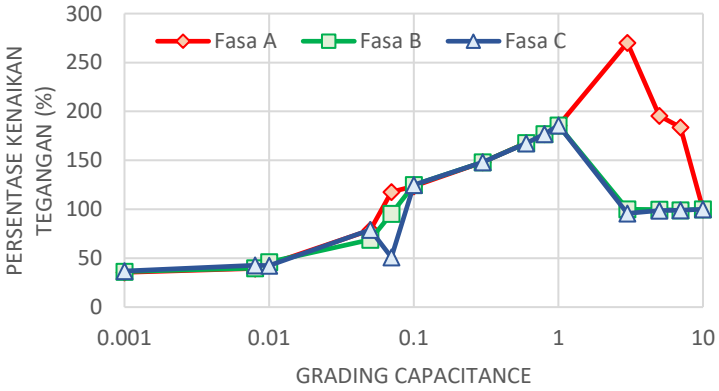
Gambar 4.9 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 10 μF

Tabel 4.1 Efek perubahan nilai *Grading Capacitance* (*Cg*)

Cg (μF)	Tegangan Maksimum (kV)					
	Sebelum			Sesudah		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0,001	122,48	122,48	122,48	43,5	44,5	45,2
0,008	122,48	122,48	122,48	48,5	48,75	52,5
0,01	122,48	122,48	122,48	53,5	56,25	52
0,05	122,48	122,48	122,48	96,3	84,6	96,75
0,07	122,48	122,48	122,48	144,2	117	62,5
0,1	122,48	122,48	122,48	151,2	152,8	153,05
0,3	122,48	122,48	122,48	181,5	181,5	181,5
0,6	122,48	122,48	122,48	205,3	205,3	205,2
0,8	122,48	122,48	122,48	216,5	216,5	216,5
1	122,48	122,48	122,48	227,5	227,5	227,5
3	122,48	122,48	122,48	331	122,48	117,5
5	122,48	122,48	122,48	239,5	122,2	120,98
7	122,48	122,48	122,48	225,2	121,25	121,3
10	122,48	122,48	122,48	122,48	122,48	122,48

Tabel 4.2 Persentase perubahan1 tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance*

Cg (µF)	Persentase Perubahan Tegangan (%)		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0,001	35,516	36,33246	36,9039843
0,008	39,5983	39,80242	42,8641411
0,01	43,6806	45,92587	42,4559112
0,05	78,6251	69,0725	78,9924886
0,07	117,734	95,5258	51,0287394
0,1	123,449	124,7551	124,959177
0,3	148,187	148,1875	148,187459
0,6	167,619	167,6192	167,537557
0,8	176,764	176,7636	176,763553
1	185,745	185,7446	185,744611
3	270,248	100	95,93403
5	195,542	99,77139	98,7753103
7	183,867	98,99575	99,0365774
10	100	100	100

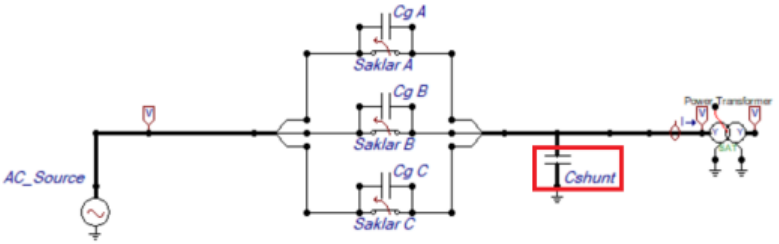


Gambar 4.10 Grafik persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance*

4.2.2 wFeroresonansi Akibat Variasi *Shunt Capacitance* (*Cs*) pada Transformator 3 Fasa Wye – Wye

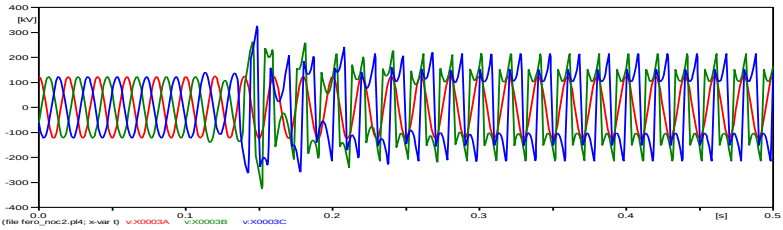
Simulasi dilakukan dengan mengubah nilai *shunt capacitance* pada rangkaian pemodelan feroresonansi menggunakan transformator 3 fasa

hubungan wye -wye. Nilai *shunt capacitance* diubah-ubah dengan rentang nilai 0,001 – 10 µF. Dengan nilai *grading capacitance* dibuat tetap yaitu sebesar 0,6 µF. Hasil yang didapat dari simulasi yaitu respon tegangan sisi primer transformator.

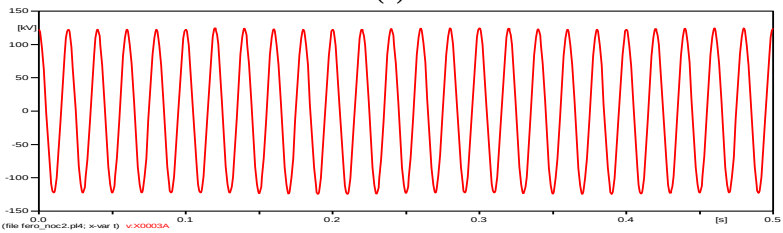


Gambar 4.11 Rangkaian feroresonansi pada transformator 3 fasa hubungan wye –wye dengan mengubah parameter *Cs*

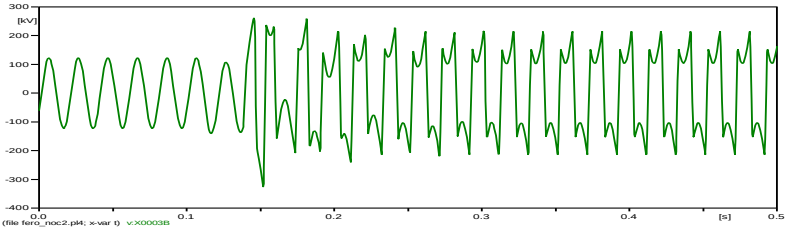
Pada Gambar 4.12 hingga Gambar 4.17 menunjukan bahwa respon tegangan setiap fasa pada sisi primer transformator dengan rentang nilai *Shunt Capacitance* (*Cs*) berbeda-beda. Pada Gambar 4.12 sampai 4.16 menunjukan terdapat lonjakan tegangan saat saklar fasa A, fasa B dan fasa C. Pada Gambar 4.12 sampai 4.15 terlihat bentuk feroresonansi mode fundamental. Pada Gambar 4.12 terlihat fasa A berbentuk sinusoidal, sedangkan fasa B dan fasa C terlihat bentuk gelombang feroresonansi mode fundamental. Pada Gambar 4.16 terlihat bentuk feroresonansi mode chaotic. Pada Gambar 4.17 menunjukkan tidak terjadi feroresonansi. Pada Tabel 4.3 menunjukkan kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance.* Pada Tabel 4.4 menunjukkan persentase kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance.*Pada Gambar 4.18 menunjukkan grafik persentase kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance.*



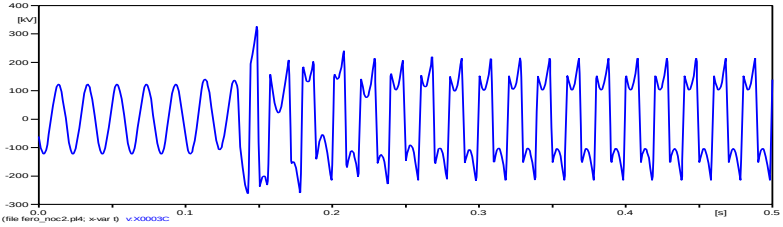
(a)



(b)

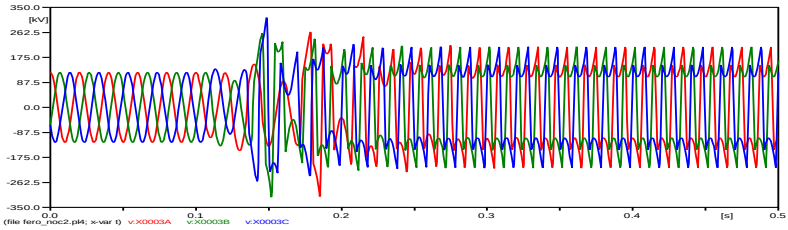


(c)

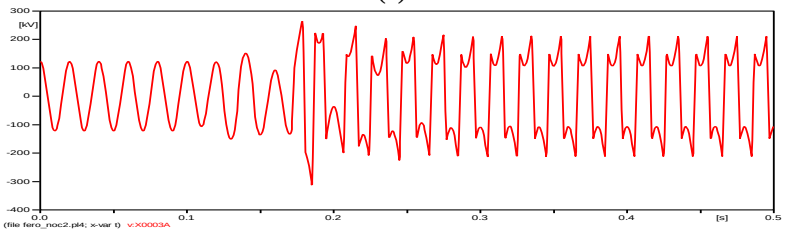


(d)

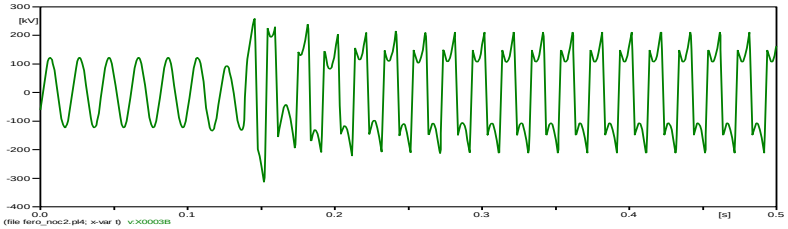
Gambar 4.12 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,001 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



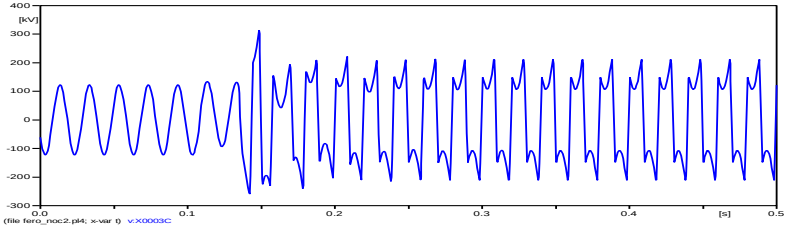
(a)



(b)

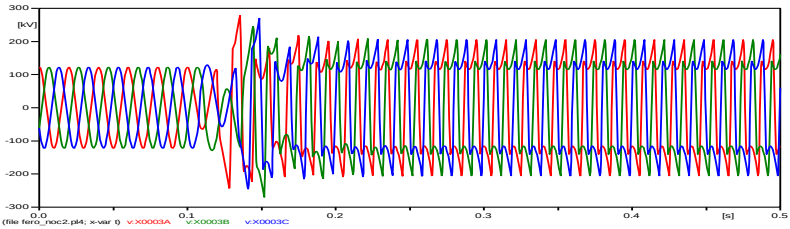


(c)

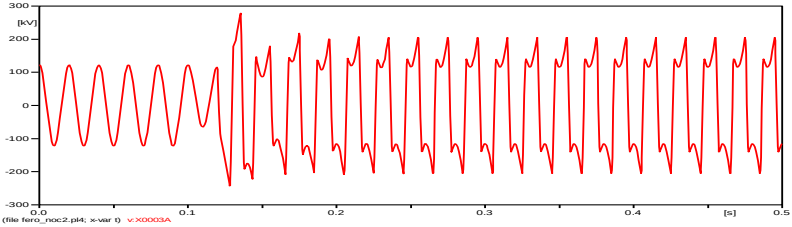


(d)

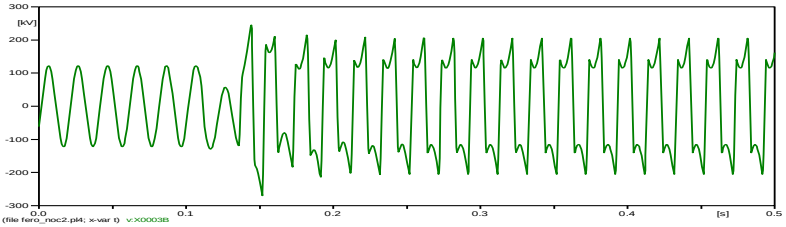
Gambar 4.13 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,05 µF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



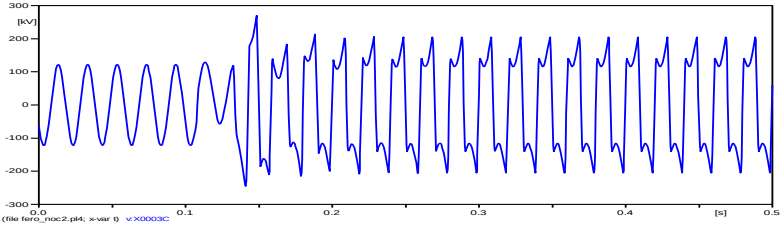
(a)



(b)

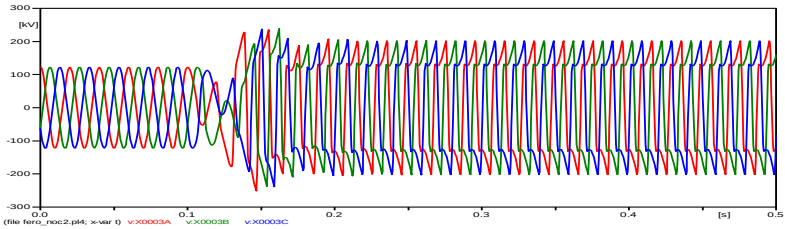


(c)

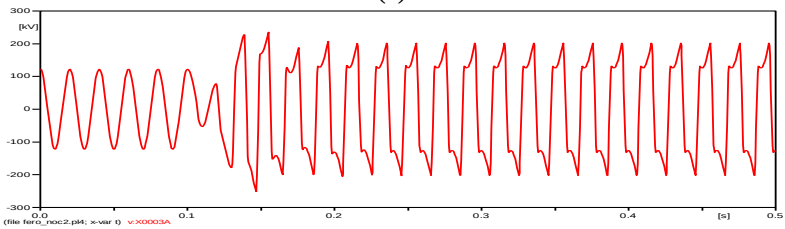


(d)

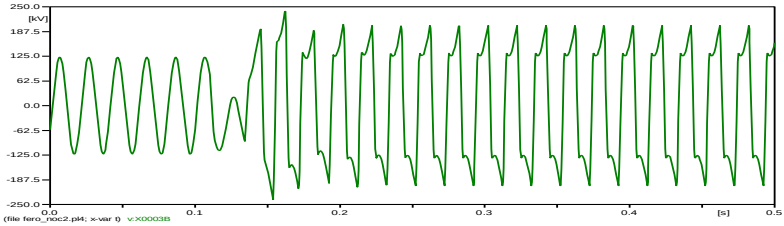
Gambar 4.14 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,2 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



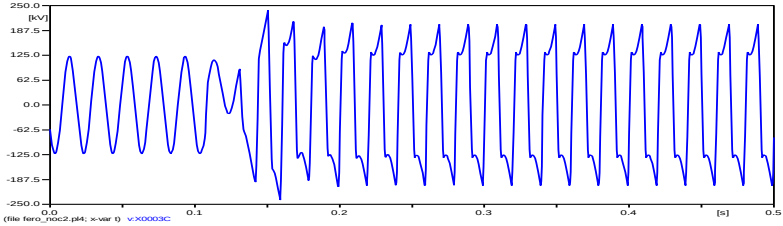
(a)



(b)

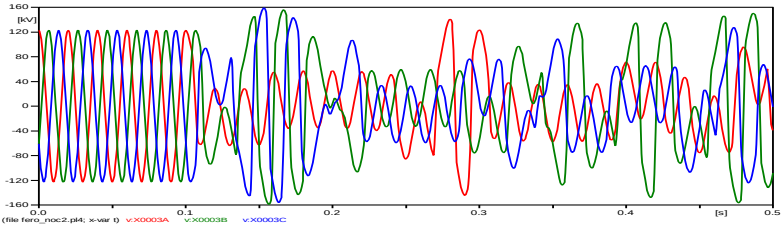


(c)

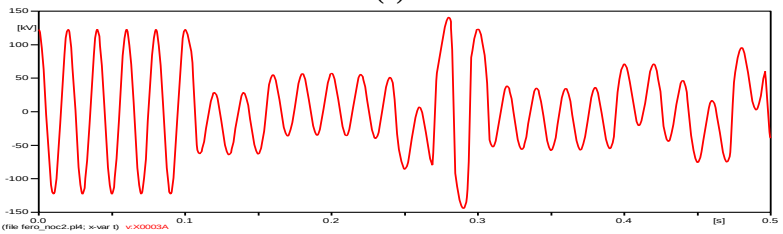


(d)

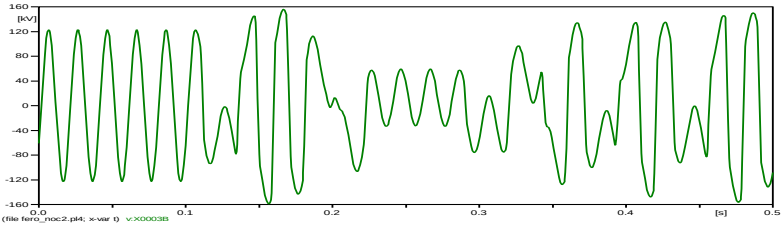
Gambar 4.15 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,5 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



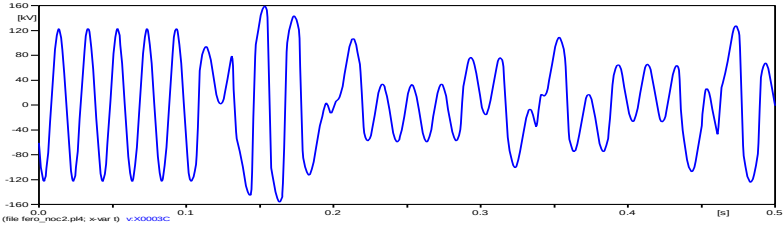
(a)



(b)

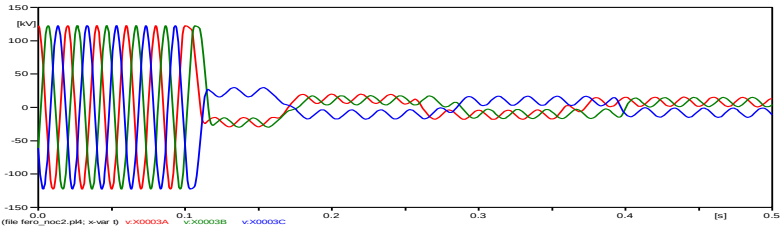


(c)



(d)

Gambar 4.16 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



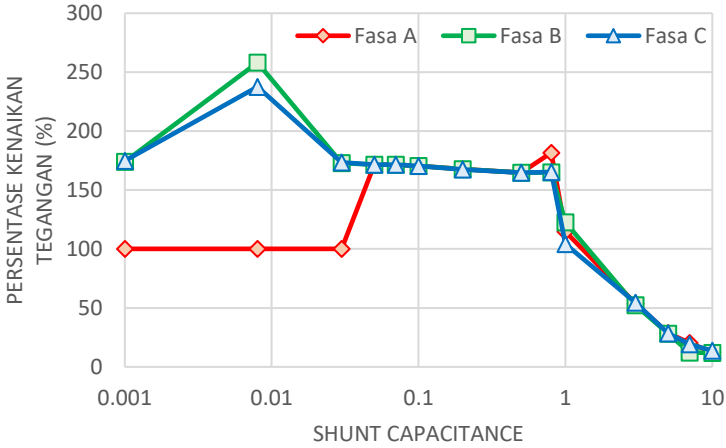
Gambar 4.17 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 10 µF

Tabel 4.3 Efek perubahan nilai *Shunt Capacitance* (*Cs*)

Cs (µF)	Tegangan Maksimum (kV)					
	Sebelum			Sesudah		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0,001	122,48	122,48	122,48	122,48	213,25	214,15
0,008	122,48	122,48	122,48	122,48	316,15	291
0,03	122,48	122,48	122,48	122,48	211,75	212,5
0,05	122,48	122,48	122,48	210,2	210,2	210,2
0,07	122,48	122,48	122,48	210	210	210
0,1	122,48	122,48	122,48	208,75	208,75	208,75
0,2	122,48	122,48	122,48	205,3	205,3	205,2
0,5	122,48	122,48	122,48	201,8	201,8	201,8
0,8	122,48	122,48	122,48	222,5	202,2	202,5
1	122,48	122,48	122,48	140,5	150,25	127,5
3	122,48	122,48	122,48	65,8	64,15	66,75
5	122,48	122,48	122,48	35,2	34,6	35
7	122,48	122,48	122,48	24,91	14,95	23,45
10	122,48	122,48	122,48	15,1	14,6	16,75

Tabel 4.4 Persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance*

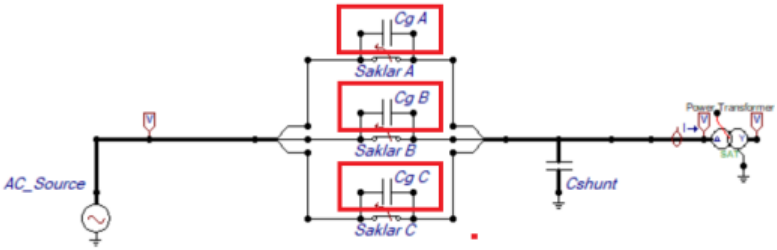
Cs (µF)	Persentase Perubahan Tegangan (%)		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0,001	100	174,1101	174,844873
0,008	100	258,1238	237,589811
0,03	100	172,8854	173,497714
0,05	171,62	171,6199	171,619856
0,07	171,457	171,4566	171,456564
0,1	170,436	170,436	170,43599
0,2	167,619	167,6192	167,537557
0,5	164,762	164,7616	164,761594
0,8	181,662	165,0882	165,333116
1	114,713	122,6731	104,098628
3	53,7231	52,3759	54,4986937
5	28,7394	28,24951	28,5760941
7	20,338	12,20607	19,145983
10	12,3285	11,92031	13,6757022



Gambar 4.18 Grafik persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance*

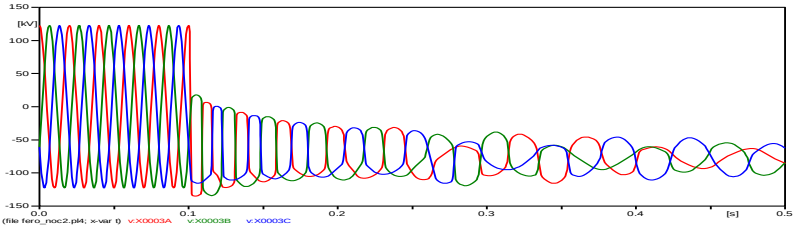
4.2.3 Feroresonansi Akibat Variasi *Grading Capacitance* (*Cg*) pada Transformator 3 Fasa Hubungan Delta – Wye

Simulasi dilakukan dengan mengubah nilai *grading capacitance* pada rangkaian pemodelan feroresonansi menggunakan transformator 3 fasa hubungan delta - wye. Nilai *grading capacitance* diubah-ubah dengan rentang nilai 0,001 – 10 µF. Dengan nilai *shunt capacitance* dibuat tetap yaitu sebesar 0,2 µF. Hasil yang didapat dari simulasi yaitu respon tegangan sisi primer transformator.

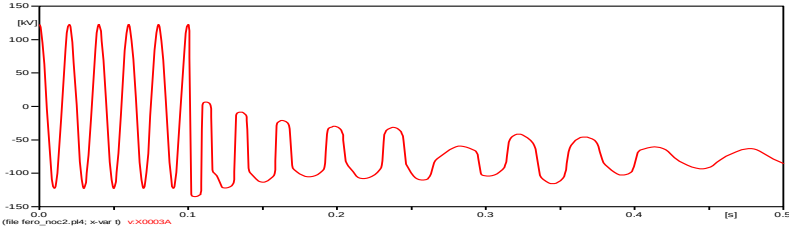


Gambar 4.19 Rangkaian feroresonansi pada transformator 3 fasa hubungan delta - wye dengan mengubah parameter *Cg*.

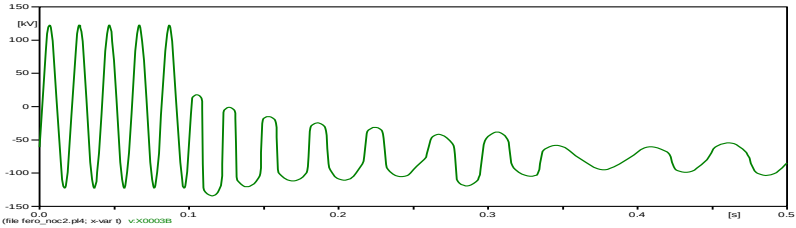
Pada Gambar 4.20 hingga Gambar 4.25 menunjukan bahwa respon tegangan setiap fasa pada sisi primer transformator dengan rentang nilai *grading capacitance* berbeda-beda. Pada Gambar 4.20 dan 4.21 menunjukan tidak terdapat lonjakan tegangan saat saklar fasa A, fasa B dan fasa C, sehingga tidak terjadi feroresonansi. Pada Gambar 4.22 sampai 4.25 terlihat terdapat lonjakan tegangan. Pada Gambar 4.22 sampai 4.24 menunjukkan terjadi feroresonansi. Pada Gambar 4.22 dan 4.23 menunjukkan bentuk gelombang feroresonansi mode fundamental. Pada Gambar 4.24 menunjukkan bentuk gelombang feroresonansi mode chaotic. Pada Gambar 4.25 terlihat lonjakan tegangan namun tidak terdapat kecacatan pada bentuk gelombang. Pada Tabel 4.5 menunjukkan kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance.* Pada Tabel 4.6 menunjukkan persentase kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance.*Pada Gambar 4.26 menunjukkan grafik persentase kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance.*



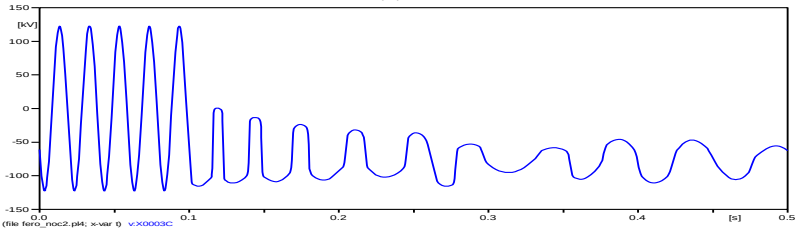
(a)



(b)

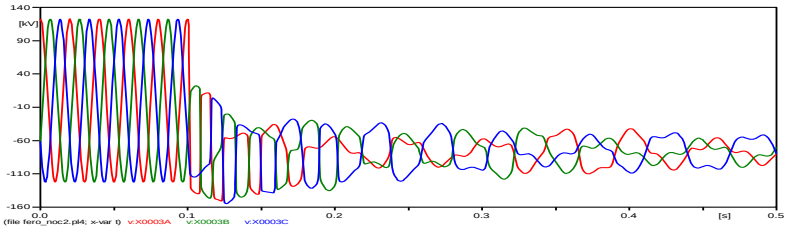


(c)

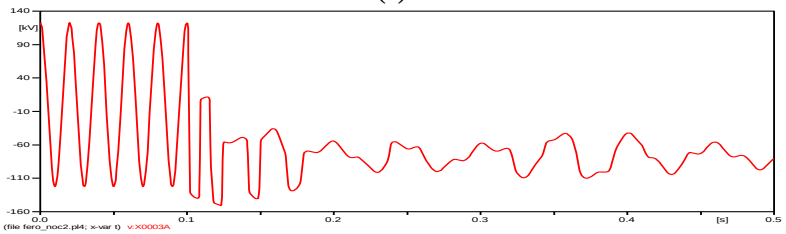


(d)

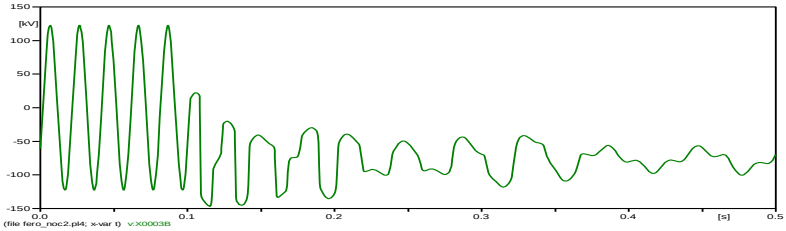
Gambar 4.20 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,001 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



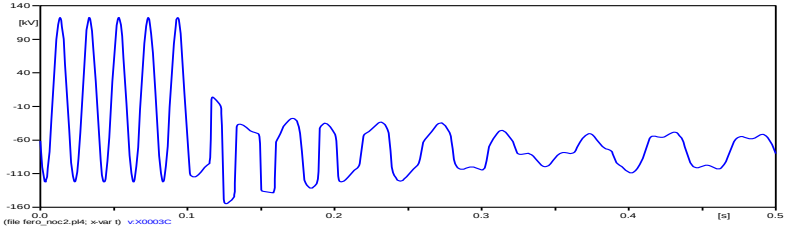
(a)



(b)

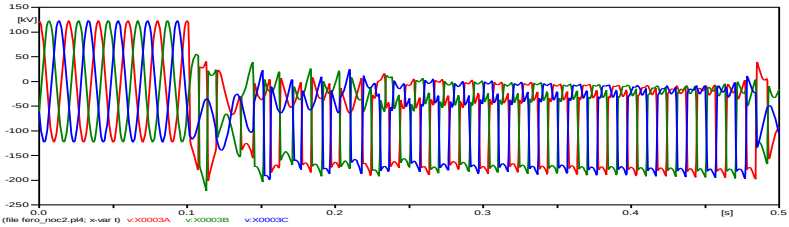


(c)

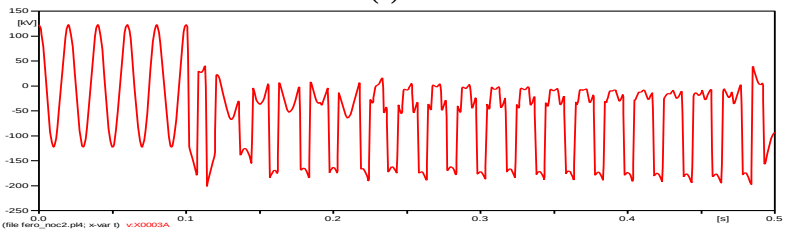


(d)

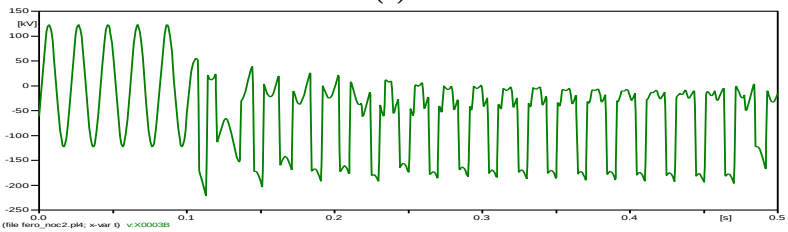
Gambar 4.21 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,01 µF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



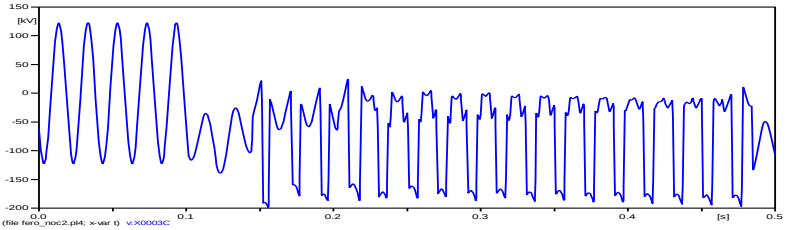
(a)



(b)

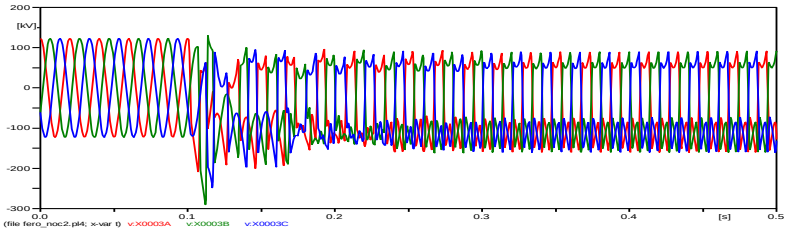


(c)

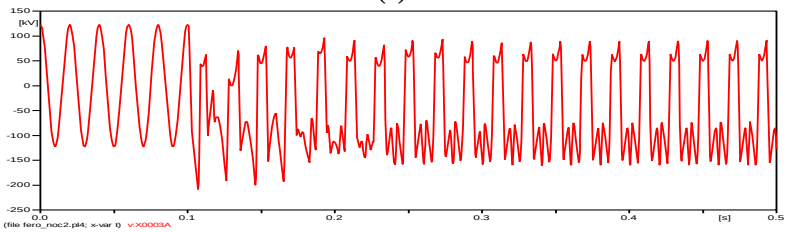


(d)

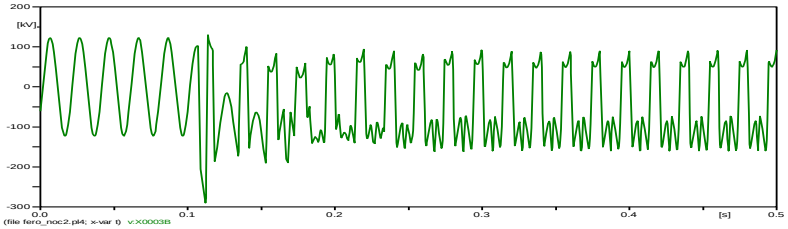
Gambar 4.22 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,1 µF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



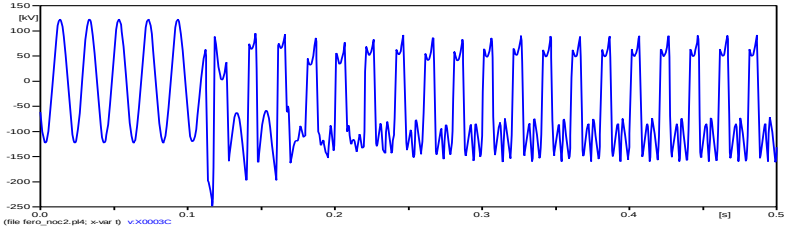
(a)



(b)

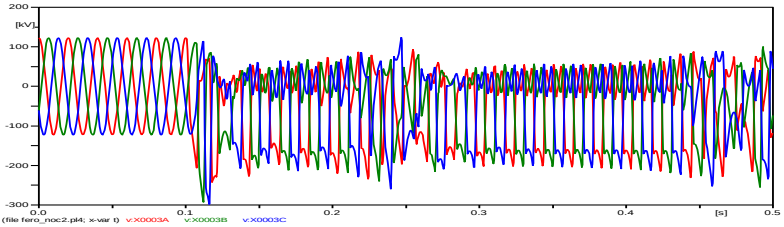


(c)

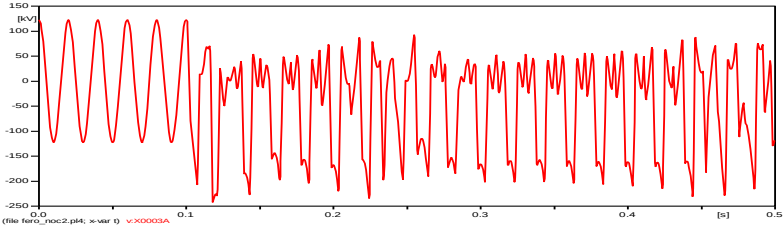


(d)

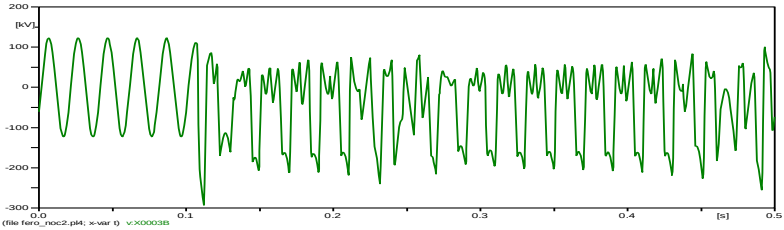
Gambar 4.23 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 0,6 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



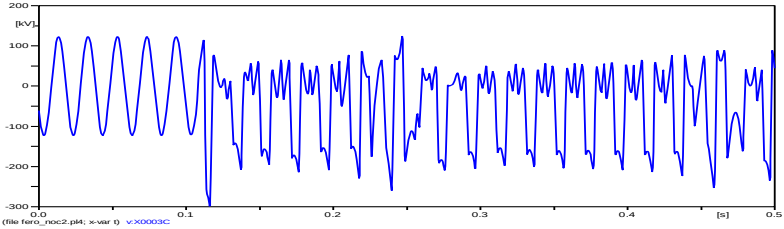
(a)



(b)

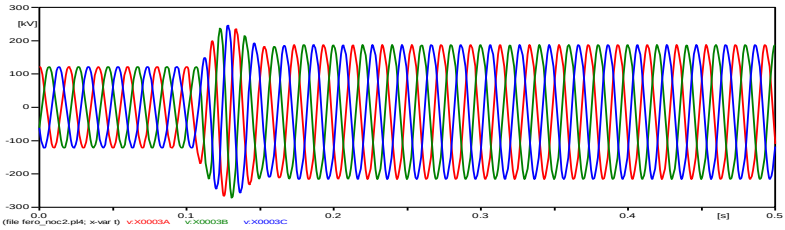


(c)



(d)

Gambar 4.24 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



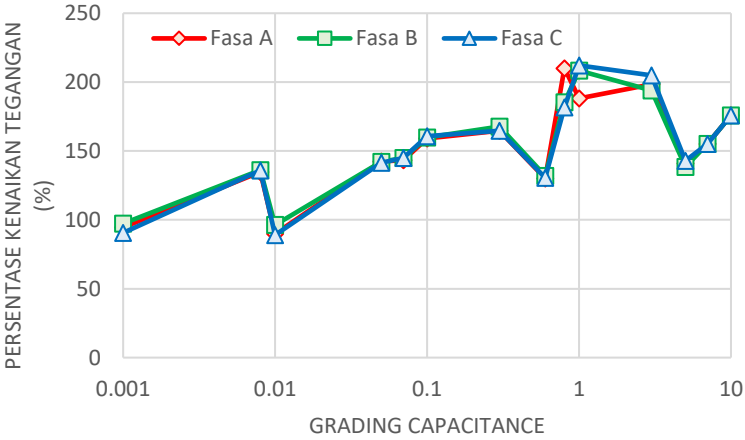
Gambar 4.25 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cg* = 10 μF

Tabel 4.5 Efek perubahan nilai *Grading Capacitance* (*Cg*)

Cg (μF)	Tegangan Maksimum (kV)					
	Sebelum			Sesudah		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0,001	122,48	122,48	122,48	115,66	119,1	110,83
0,008	122,48	122,48	122,48	164,97	166,72	166,32
0,01	122,48	122,48	122,48	110,07	117,92	108,97
0,05	122,48	122,48	122,48	174,3	174,03	173,2
0,07	122,48	122,48	122,48	175,58	177,52	177,63
0,1	122,48	122,48	122,48	194,8	195,7	196,8
0,3	122,48	122,48	122,48	201,7	205,5	201,68
0,6	122,48	122,48	122,48	159,2	161,7	159,9
0,8	122,48	122,48	122,48	257,34	227,1	222,52
1	122,48	122,48	122,48	230,5	255,2	260
3	122,48	122,48	122,48	243	237,5	251,1
5	122,48	122,48	122,48	172,6	169,49	175
7	122,48	122,48	122,48	190,17	190,17	190,17
10	122,48	122,48	122,48	215,39	215,39	215,39

Tabel 4.6 Persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance*

Cg (µF)	Persentase Perubahan Tegangan (%)		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0,001	94,43174	97,24037	90,48824
0,008	134,6914	136,1202	135,7936
0,01	89,86773	96,27694	88,96963
0,05	142,3089	142,0885	141,4108
0,07	143,354	144,9379	145,0278
0,1	159,0464	159,7812	160,6793
0,3	164,6799	167,7825	164,6636
0,6	129,9804	132,0216	130,5519
0,8	210,1078	185,418	181,6786
1	188,194	208,3605	212,1163
3	198,3997	193,9092	205,0131
5	140,921	138,3818	142,8805
7	155,2662	155,2662	155,2662
10	175,8573	175,8573	175,8573

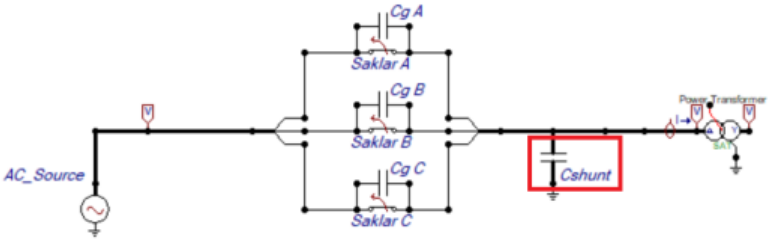


Gambar 4.26 Grafik persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *grading capacitance*

4.2.4 Feroresonansi Akibat Variasi *Shunt Capacitance* (*Cs*) pada Transformator 3 Fasa Hubungan Delta – Wye

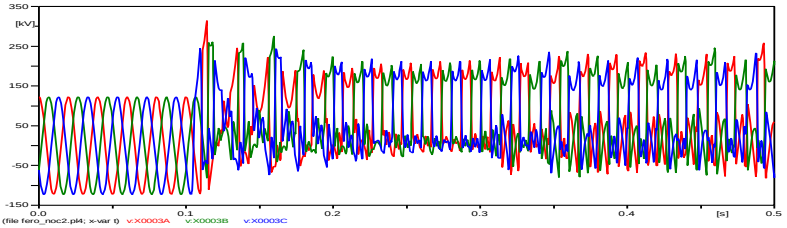
Simulasi dilakukan dengan mengubah nilai *shunt capacitance* pada rangkaian pemodelan feroresonansi menggunakan transformator 3 fasa

hubungan delta - wye. Nilai *shunt capacitance* diubah-ubah dengan rentang nilai 0,001 – 10 µF. Dengan nilai *grading capacitance* dibuat tetap yaitu sebesar 0,6 µF. Hasil yang didapat dari simulasi yaitu respon tegangan sisi primer transformator.

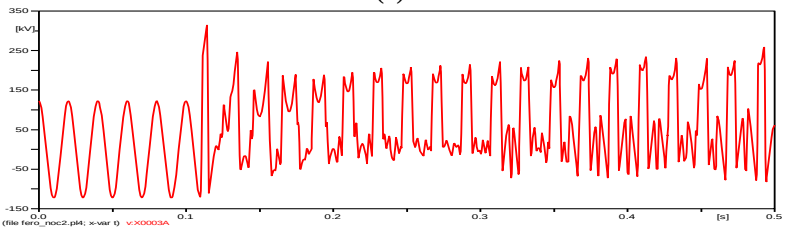


Gambar 4.27 Rangkaian pemodelan feroresonansi pada transformator 3 fasa hubungan delta - wye dengan mengubah parameter *Cs*

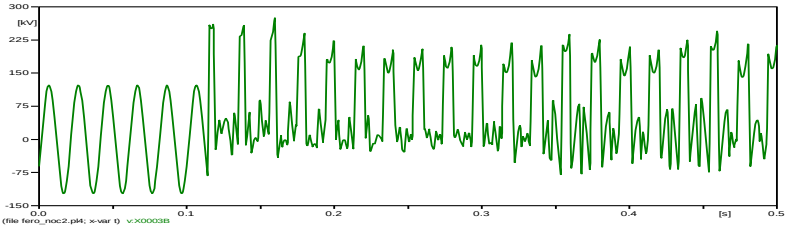
Pada Gambar 4.28 hingga Gambar 4.33 menunjukan bahwa respon tegangan setiap fasa pada sisi primer transformator dengan rentang nilai *Shunt Capacitance* (*Cs*) berbeda-beda. Pada Gambar 4.28 sampai 4.32 menunjukan terdapat lonjakan tegangan saat saklar fasa A, fasa B dan fasa C. Pada Gambar 4.28 sampai 4.30 menunjukkan bentuk gelombang feroresonansi mode fundamental. Pada Gambar 4.31 dan 4.32 tersebut tampak terlihat bentuk feroresonansi mode chaotic. Pada Gambar 4.33 menunjukkan tidak terjadi feroresonansi. Pada Tabel 4.7 menunjukkan kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance*. Pada Tabel 4.8 menunjukkan persentase kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance*.Pada Gambar 4.34 menunjukkan grafik persentase kenaikan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance.*



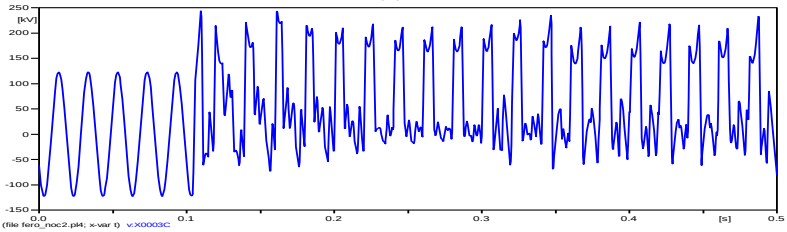
(a)



(b)

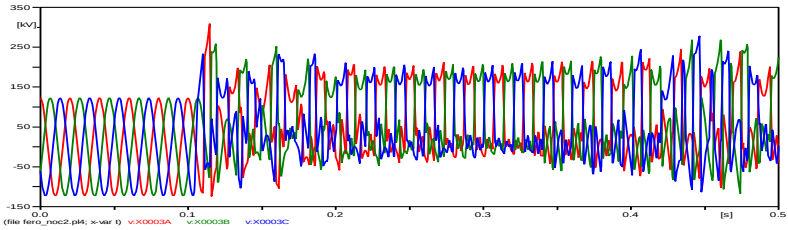


(c)

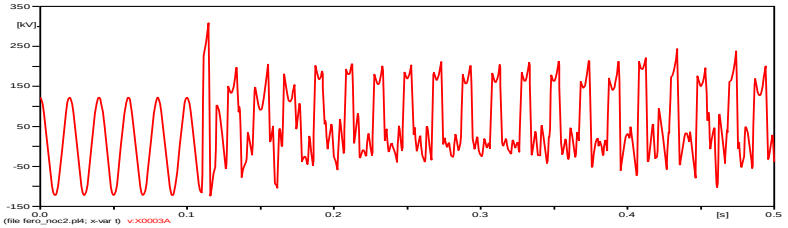


(d)

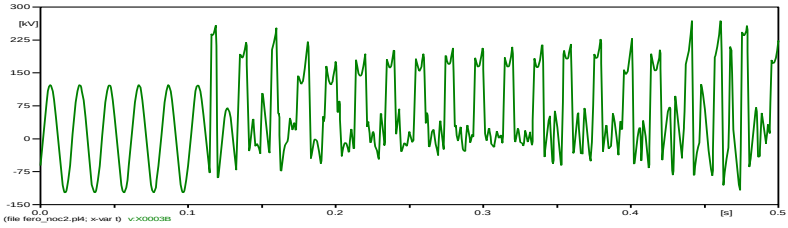
Gambar 4.28 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,001 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



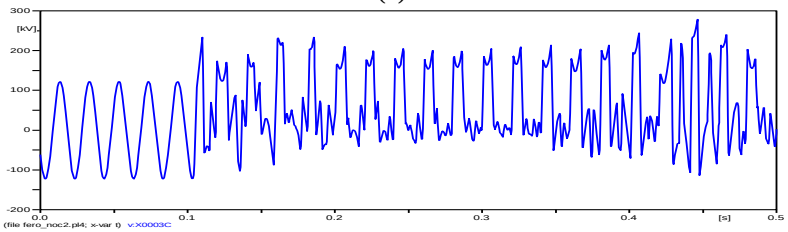
(a)



(b)

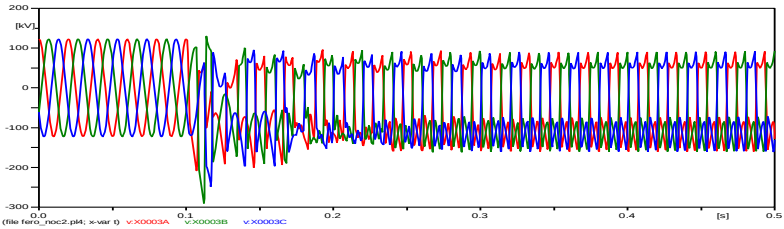


(c)

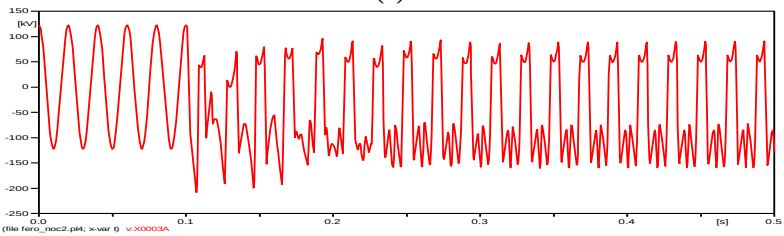


(d)

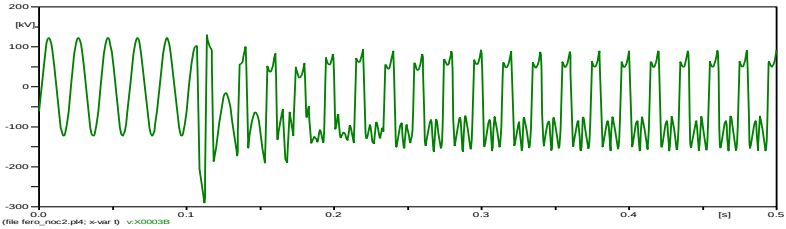
Gambar 4.29 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,05 µF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



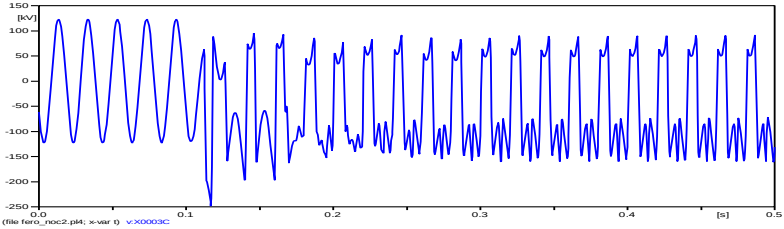
(a)



(b)

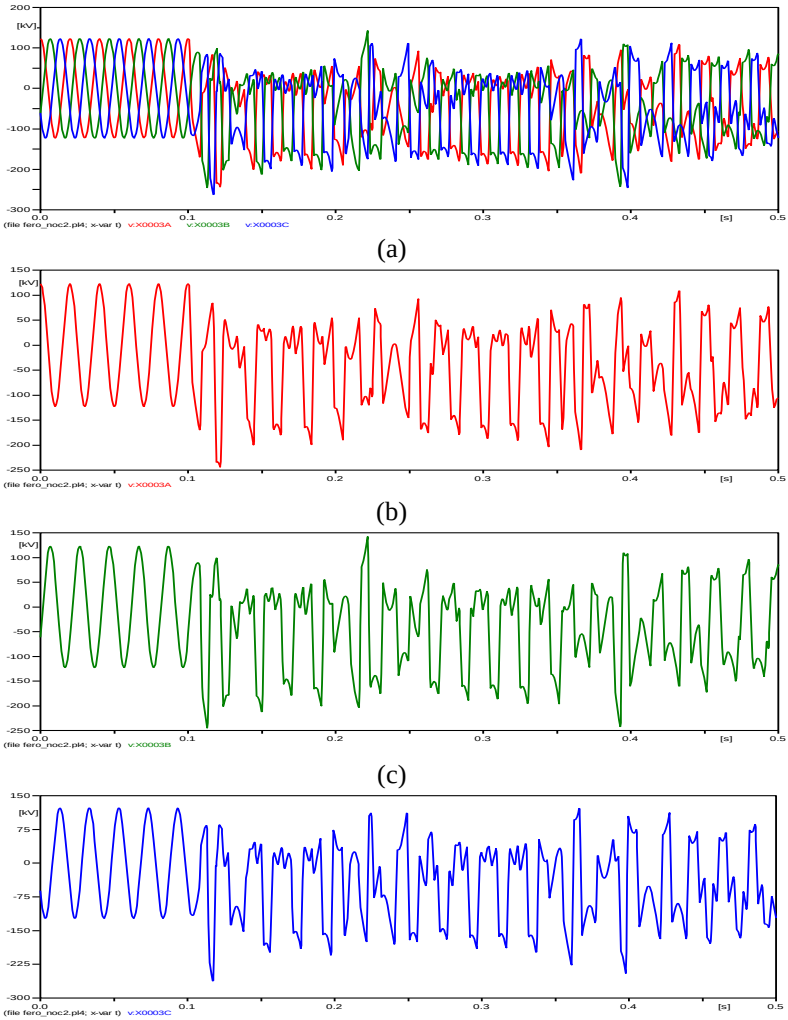


(c)

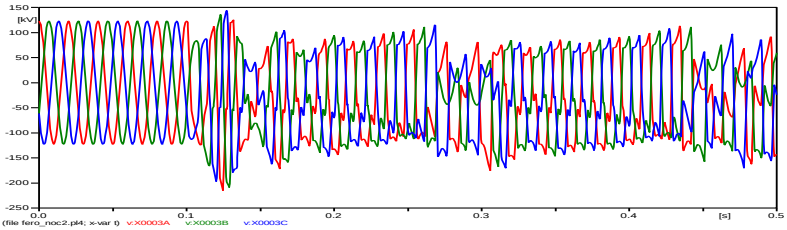


(d)

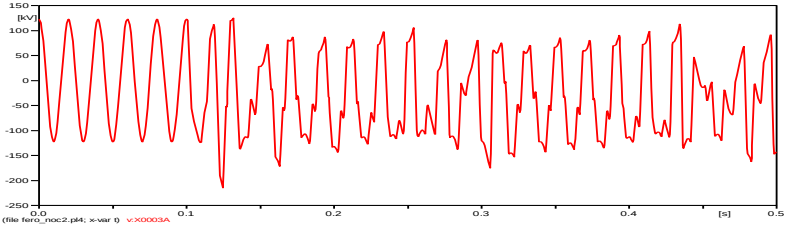
Gambar 4.30 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,2 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



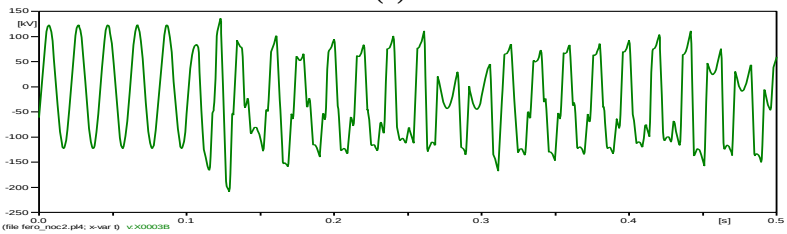
Gambar 4.31 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 0,5 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



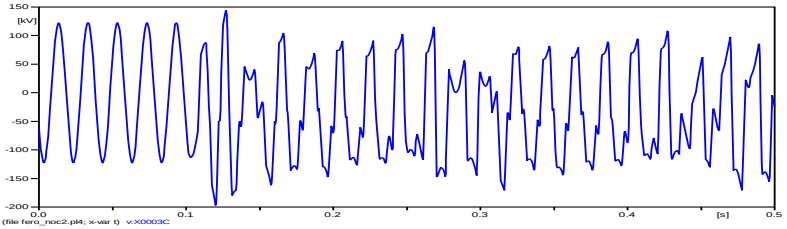
(a)



(b)

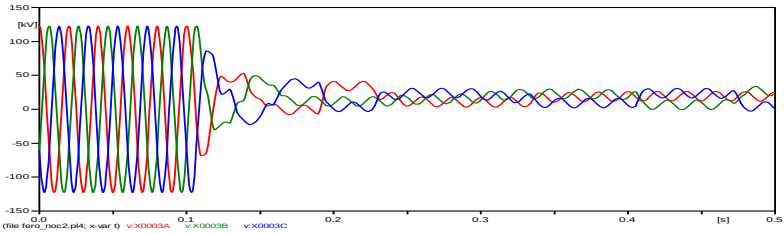


(c)



(d)

Gambar 4.32 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 1 μF pada (a) 3 fasa, (b) fasa A, (c) fasa B, dan (d) fasa C.



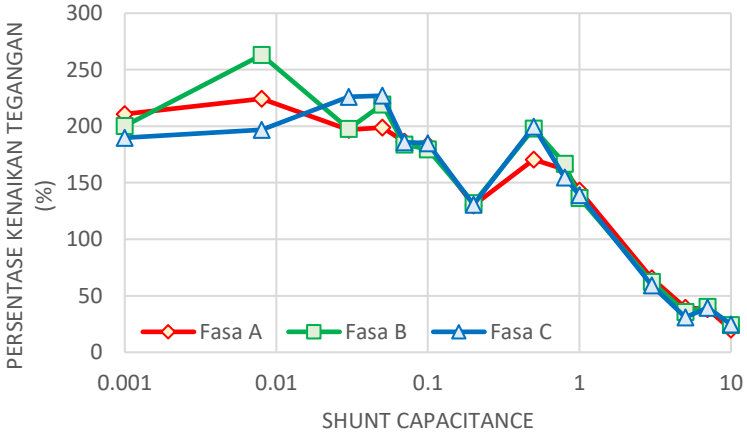
Gambar 4.33 Respon tegangan pada sisi primer dengan *Cs* = 10 µF pada

Tabel 4.7 Efek perubahan nilai *Shunt Capacitance* (*Cs*)

Cs (*µF*)	Tegangan Puncak (kV)					
	Sebelum			Sesudah		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0,001	122,48	122,48	122,48	258	245,2	232,5
0,008	122,48	122,48	122,48	274,8	322,2	241,3
0,03	122,48	122,48	122,48	241,15	242,3	276,8
0,05	122,48	122,48	122,48	243,6	268,4	278,1
0,07	122,48	122,48	122,48	228,2	225,3	227,7
0,1	122,48	122,48	122,48	224,7	220	226,5
0,3	122,48	122,48	122,48	159,2	161,7	159,9
0,6	122,48	122,48	122,48	209	242,4	244,7
0,8	122,48	122,48	122,48	198,2	204,3	189,5
1	122,48	122,48	122,48	175,3	167,3	170,4
3	122,48	122,48	122,48	80	76,3	72,65
5	122,48	122,48	122,48	48,3	43,9	37,9
7	122,48	122,48	122,48	46,8	49,4	48,3
10	122,48	122,48	122,48	24,7	29,4	30,3

Tabel 4.8 Persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance*

Cs (µF)	Persentase Perubahan Tegangan (%)		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0,001	210,6466	200,196	189,8269
0,008	224,3632	263,0634	197,0118
0,03	196,8893	197,8282	225,9961
0,05	198,8896	219,1378	227,0575
0,07	186,3161	183,9484	185,9079
0,1	183,4585	179,6212	184,9282
0,2	129,9804	132,0216	130,5519
0,5	170,6401	197,9099	199,7877
0,8	161,8223	166,8027	154,7191
1	143,1254	136,5937	139,1248
3	65,31679	62,29589	59,31581
5	39,43501	35,84259	30,94383
7	38,21032	40,33312	39,43501
10	20,16656	24,00392	24,73873



Gambar 4.34 Grafik persentase perubahan tegangan puncak akibat variasi nilai *shunt capacitance*

4.3 Analisis Transformasi Wavelet

Pada sub bab ini akan dibahas analisis gelombang tegangan pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye dan delta – wye diolah menggunakan transformasi wavelet.

Hasil pengolahan data akan menunjukkan sinyal dekomposisi wavelet menggunakan *wavelet analyzer* pada *toolbox wavelet*. Sinyal dekomposisi sinyal yang diolah menggunakan mother wavelet *debauchies* orde 5 dengan tingkatan level dekomposisi sampai level 12. Pemilihan mother wavelet *debauchies* orde 5, dikarenakan orde tersebut dapat menganalisis gelombang dengan frekuensi sampling yang tinggi [11].

Pada metode transformasi wavelet ini dilakukan analisis secara dua metode. Metode pertama merupakan pemilihan basis level pada sinyal dekomposisi wavelet secara kualitatif yang mana dilakukan perbandingan bentuk gelombang tiap level dekomposisi wavelet secara visual. Metode kedua yaitu dilakuakannya perhitungan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet.

4.3.1 Analisis Transformasi Wavelet pada Transformator 3 Fasa Hubungan Wye – Wye Secara Visual

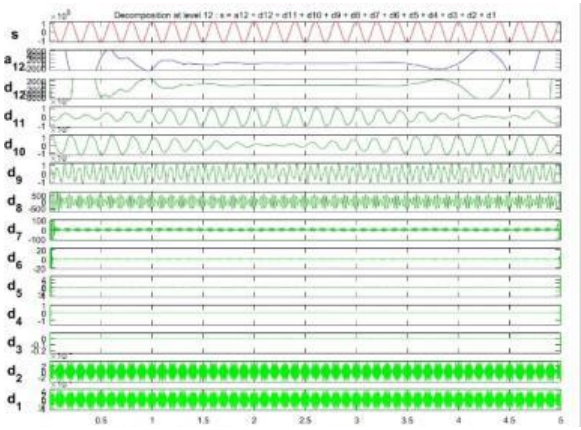
Pada Gambar 4.35 sampai 4.37 menunjukkan sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A, fasa B dan fasa C saat kondisi normal. Pada sinyal dekomposisi wavelet saat kondisi normal terlihat perbedaan secara signifikan pada fasa A dengan fasa B dan fasa C di level dua dan delapan. Pada Gambar 4.38 sampai 4.40 menunjukkan sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A, fasa B dan fasa C saat kondisi feroresonansi. Sinyal dekomposisi wavelet saat kondisi feroresonansi yang dipilih yaitu nilai *grading capacitance* yaitu 0,6 µF dan *shunt capacitance* yaitu 0,2 µF. Pada sinyal dekomposisi wavelet saat kondisi feroresonansi terlihat perbedaan kondisi normal, kondisi transien dan kondisi feroresonansi tiap level dekomposisinya.

Analisis sinyal dekomposisi wavelet dapat dibandingkan secara kasar dari bentuk gelombang, periode gelombang dan amplitudonya dari tiap level dekomposisinya. Sehingga, sinyal dekomposisi wavelet saat kondisi feroresonansi dapat dianalisis terlihat jelas secara visual di level tujuh dan delapan. Pemilihan level dekomposisi wavelet yang tepat saat kondisi normal dan feroresonansi untuk dianalisis berada di level delapan [2]. Pada Tabel 4.9 menunjukkan sinyal dekomposisi wavelet db5 level 8 variasi *grading capacitance*, sedangkan Tabel 4.10 menunjukkan sinyal dekomposisi wavelet db5 level 8 variasi *shunt capacitance*. Pada Tabel 4.9 dan 4.10 memperlihatkan perbedaan secara signifikan sinyal dekomposisi wavelet dari bentuk, periode dan amplitudo gelombang.

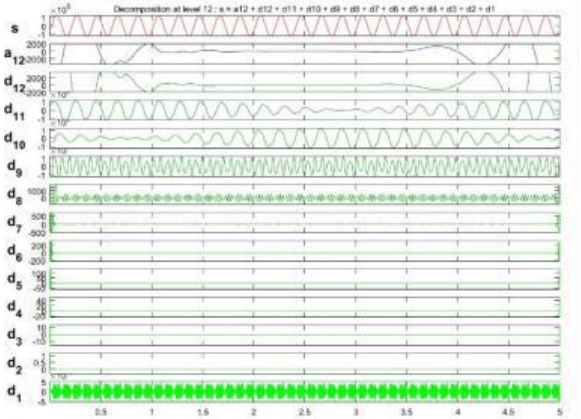
Menurut Tabel 4.9, pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *grading capacitance* yaitu 0,001 µF dan 0,01 µF terlihat tidak terjadi feroresonansi, namun terdapat lonjakan tegangan akibat adanya kondisi transien. Pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *grading capacitance* yaitu 0,1 µF; 0,6 µF dan 1 µF yang berbentuk mode fundamental, terlihat perbedaan signifikan dari bentuk gelombang pada fasa A, fasa B dan fasa C. Walaupun pada sinyal dekomposisi wavelet tersebut memiliki mode yang sama. Pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *grading capacitance* yaitu 10 µF yang berbentuk sinusoidal, terlihat bentuk gelombangnya sedikit sama seperti sinyal dekomposisi wavelet saat kondisi normal.

Menurut Tabel 4.10, pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *shunt capacitance* yaitu 0,001 µF; 0,05 µF; 0,2 µF dan 0,5 µF yang berbentuk mode fundamental, terlihat memiliki memiliki ciri – ciri kesamaan dari bentuk gelombang. Pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *shunt capacitance* yaitu 0,001 µF, terlihat perbedaan pada fasa A yang sama seperti sinyal dekomposisi wavelet saat kondisi normal. Pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *shunt capacitance* yaitu 1 µF yang berbentuk mode chaotic terlihat terdapat beberapa lonjakan tegangan setiap periodenya. Pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *shunt capacitance* yaitu 10 µF terlihat tidak terjadi feroresonansi, namun terdapat lonjakan tegangan akibat adanya kondisi transien.

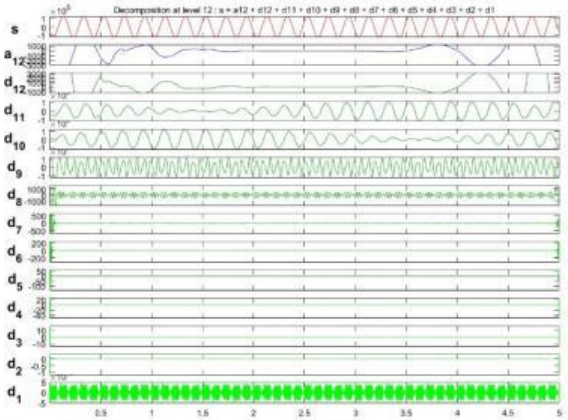
a. Kondisi Normal



Gambar 4.35 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A saat kondisi normal



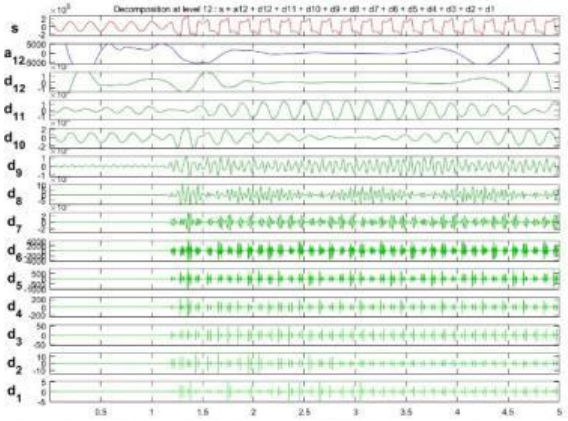
Gambar 4.36 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa B saat kondisi normal



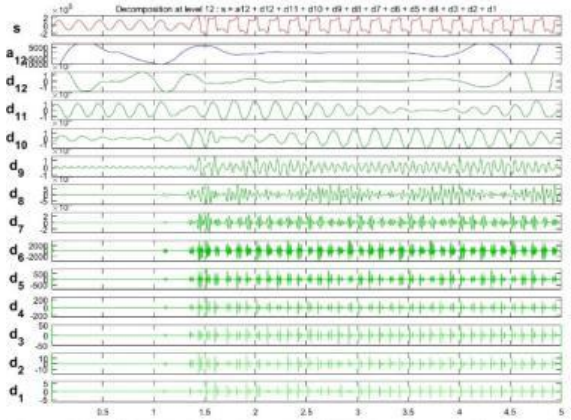
Gambar 4.37 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa C saat kondisi normal

b. Kondisi Feroresonansi

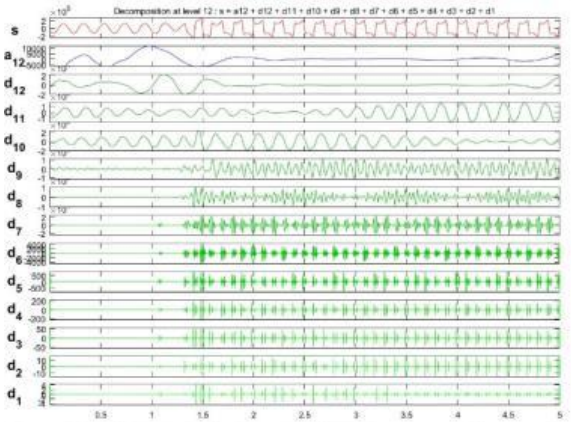
Pada pengolahan sinyal dekomposisi wavelet ini menggunakan sampel sinyal tegangan mode fundamental dengan dipilih nilai *grading capacitance* yaitu 0,6 µF dan nilai *shunt capacitance* yaitu 0,2 µF.



Gambar 4.38 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A saat kondisi feroresonansi

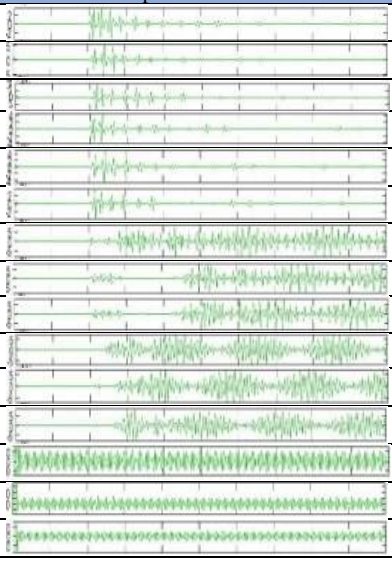


Gambar 4.39 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa B saat kondisi feroresonansi

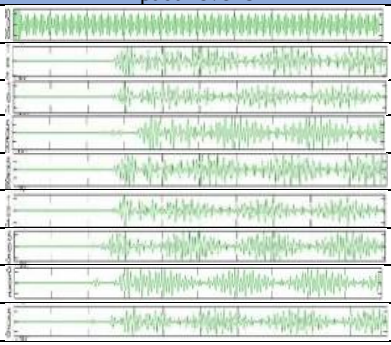


Gambar 4.40 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa C saat kondisi feroresonansi

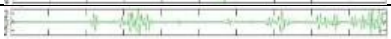
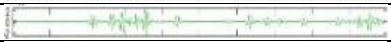
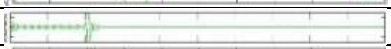
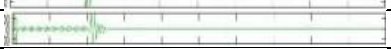
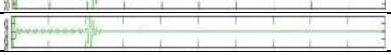
Tabel 4.9 Perbandingan sinyal dekomposisi wavelet db 5 level 8 variasi *grading capacitance*

Fasa	Kapasitansi Grading	Kapasitansi Shunt	Sinyal Dekomposisi Wavelet db5 pada level 8
A	0,001	0,2	
B	0,001	0,2	
C	0,001	0,2	
A	0,01	0,2	
B	0,01	0,2	
C	0,01	0,2	
A	0,1	0,2	
B	0,1	0,2	
C	0,1	0,2	
A	1	0,2	
B	1	0,2	
C	1	0,2	
A	10	0,2	
B	10	0,2	
C	10	0,2	

Tabel 4.10 Perbandingan sinyal dekomposisi wavelet db 5 level 8 variasi *Shunt capacitance*

Fasa	Kapasitansi Grading	Kapasitansi Shunt	Sinyal Dekomposisi Wavelet db5 pada level 8
A	0,6	0,001	
B	0,6	0,001	
C	0,6	0,001	
A	0,6	0,05	
B	0,6	0,05	
C	0,6	0,05	
A	0,6	0,5	
B	0,6	0,5	
C	0,6	0,5	

Tabel 4.10 (Lanjutan)

Fasa	Kapasitansi Grading	Kapasitansi Shunt	Sinyal Dekomposisi Wavelet db5 pada level 8
A	0,6	1	
B	0,6	1	
C	0,6	1	
A	0,6	10	
B	0,6	10	
C	0,6	10	

4.3.2 Analisis Transformasi Wavelet pada Transformator 3 Fasa Hubungan Delta – Wye Secara Visual

Pada Gambar 4.41 sampai 4.43 menunjukkan sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A, fasa B dan fasa C saat kondisi normal. Pada sinyal dekomposisi wavelet saat kondisi normal terlihat sama seperti dengan hubungan wye – wye terdapat perbedaan secara signifikan pada fasa A dengan fasa B dan fasa C di level dua dan delapan. Pada Gambar 4.44 sampai 4.46 menunjukkan sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A, fasa B dan fasa C saat kondisi feroresonansi. Sinyal dekomposisi wavelet saat kondisi feroresonansi yang dipilih yaitu nilai *grading capacitance* yaitu 0,6 µF dan *shunt capacitance* yaitu 0,2 µF.

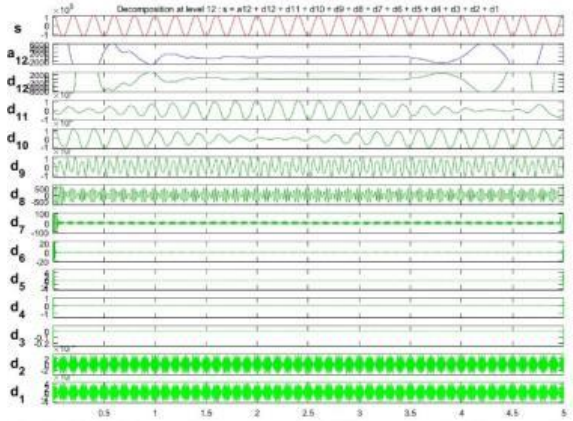
Analisis sinyal dekomposisi wavelet dapat dibandingkan secara kasar dari bentuk gelombang, periode gelombang dan amplitudonya dari tiap level dekomposisinya. Sehingga, sinyal dekomposisi wavelet saat kondisi feroresonansi dapat dianalisis terlihat jelas secara visual di level tujuh dan delapan. Pemilihan level dekomposisi wavelet yang tepat saat kondisi normal dan feroresonansi untuk dianalisis berada di level delapan [2]. Pada Tabel 4.11 menunjukkan sinyal dekomposisi wavelet db5 level 8 variasi *grading capacitance*, sedangkan Tabel 4.12 menunjukkan sinyal dekomposisi wavelet db5 level 8 variasi *shunt capacitance*. Pada Tabel 4.11 dan 4.12 memperlihatkan perbedaan secara signifikan sinyal dekomposisi wavelet dari bentuk, periode dan amplitudo gelombang.

Menurut Tabel 4.11, pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *grading capacitance* yaitu 0,001 µF dan 0,01 µF terlihat tidak terjadi feroresonansi, namun terdapat lonjakan tegangan akibat adanya kondisi transien. Pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *grading capacitance* yaitu 0,1 µF dan 0,6 µF yang berbentuk mode fundamental, terlihat lonjakan tegangan akibat feroresonansi. Pada sinyal dekomposisi

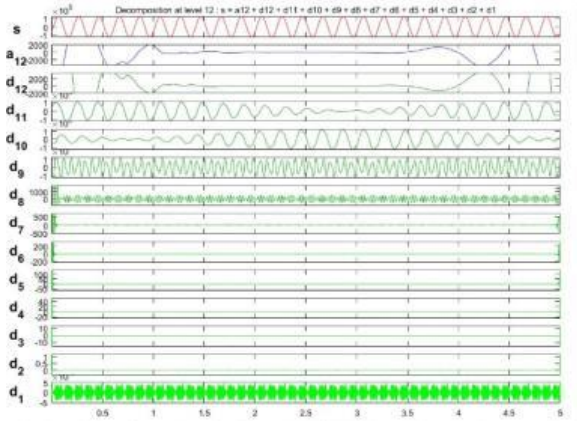
wavelet dengan nilai *grading capacitance* yaitu 1 µF yang berbentuk mode chaotic, terlihat tidak terdapat perbedaan signifikan terhadap sinyal dekomposisi wavelet yang berbentuk mode fundamental. Pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *grading capacitance* yaitu 10 µF yang terjadi overvoltage, terlihat bentuk sinyal dekomposisi wavelet sama seperti kondisi feroresonansi. Namun lonjakan tegangannya lebih tinggi daripada saat kondisi feroresonansi.

Menurut Tabel 4.12, pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *shunt capacitance* yaitu 0,001 µF; 0,05 µF dan 0,2 µF yang berbentuk mode fundamental, terlihat memiliki memiliki ciri – ciri kesamaan dari bentuk gelombang. Pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *grading capacitance* yaitu 0,5 µF dan 1 µF yang berbentuk mode chaotic, terlihat tidak terdapat perbedaan signifikan terhadap sinyal dekomposisi wavelet yang berbentuk mode fundamental. Pada sinyal dekomposisi wavelet dengan nilai *shunt capacitance* yaitu 10 µF terlihat tidak terjadi feroresonansi, namun terdapat lonjakan tegangan akibat adanya kondisi transien.

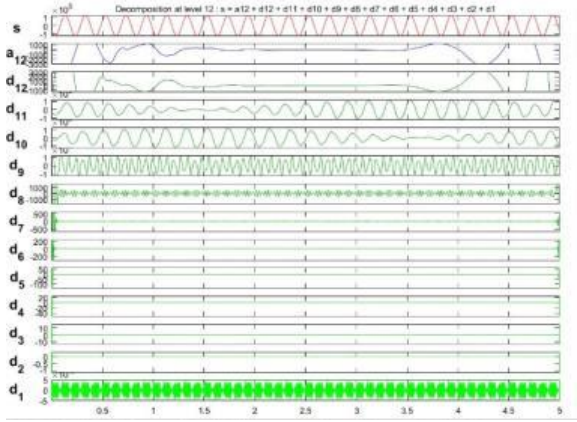
a. Kondisi Normal



Gambar 4.41 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A saat kondisi normal



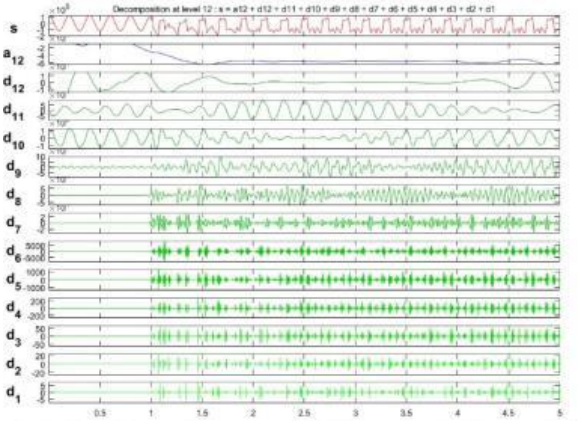
Gambar 4.42 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa B saat kondisi normal



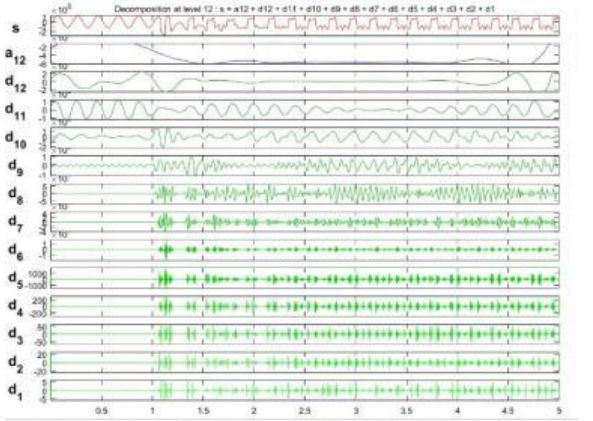
Gambar 4.43 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa C saat kondisi normal

b. Kondisi Feroresonansi

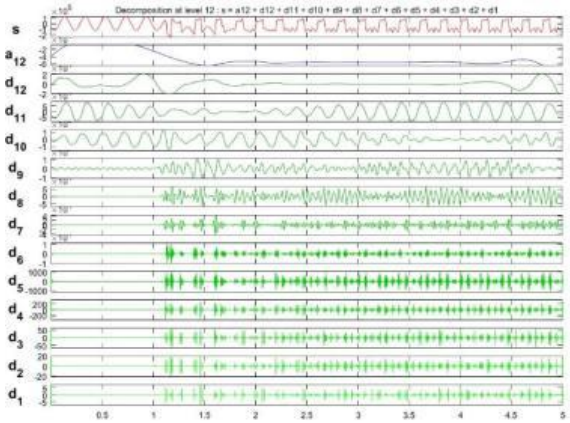
Pada pengolahan sinyal dekomposisi wavelet ini menggunakan sampel sinyal tegangan dengan dipilih nilai *grading capacitance* yaitu 0,6 µF dan nilai *shunt capacitance* yaitu 0,2 µF.



Gambar 4.44 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa A saat kondisi feroresonansi



Gambar 4.45 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa B saat kondisi feroresonansi

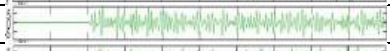
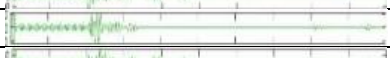


Gambar 4.46 Sinyal dekomposisi wavelet pada fasa C saat kondisi feroresonansi

Tabel 4.11 Perbandingan sinyal dekomposisi wavelet db 5 level 8 variasi *grading capacitance*

Fasa	Kapasitansi Grading	Kapasitansi Shunt	Sinyal Dekomposisi Wavelet db5 pada level 8
A	0,001	0,2	
B	0,001	0,2	
C	0,001	0,2	
A	0,01	0,2	
B	0,01	0,2	
C	0,01	0,2	
A	0,1	0,2	
B	0,1	0,2	
C	0,1	0,2	
A	1	0,2	
B	1	0,2	
C	1	0,2	
A	10	0,2	
B	10	0,2	
C	10	0,2	

Tabel 4.12 Perbandingan sinyal dekomposisi wavelet db 5 level 8 variasi *shunt capacitance*

Fasa	Kapasitansi Grading	Kapasitansi Shunt	Sinyal Dekomposisi Wavelet db5 pada level 8
A	0,6	0,001	
B	0,6	0,001	
C	0,6	0,001	
A	0,6	0,05	
B	0,6	0,05	
C	0,6	0,05	
A	0,6	0,5	
B	0,6	0,5	
C	0,6	0,5	
A	0,6	1	
B	0,6	1	
C	0,6	1	
A	0,6	10	
B	0,6	10	
C	0,6	10	

4.3.3 Perbandingan Nilai Konsentrasi Energi pada Transformator 3 Fasa Hubungan Wye – Wye dan Delta – Wye

Pada pembahasan ini akan dilakukan analisis transformasi wavelet menggunakan perhitungan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada transformator 3 fasa wye – wye dan delta – wye.

a. Hubungan Wye – Wye Variasi Nilai *Grading Capacitance* (*Cg*)

Pada Gambar 4.47 sampai 4.49 menunjukkan grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A, fasa B dan fasa C variasi nilai *grading capacitance*. Pada Gambar 4.47 sampai 4.49 terlihat pada fasa A, fasa B dan fasa C memiliki perbedaan tiap level dekomposisi waveletnya.

Pada Gambar 4.47 terlihat di level sepuluh dan sebelas, pada nilai *Cg* yaitu 1 µF tertinggi, sedangkan yang terendah pada nilai *Cg* 0,01 µF

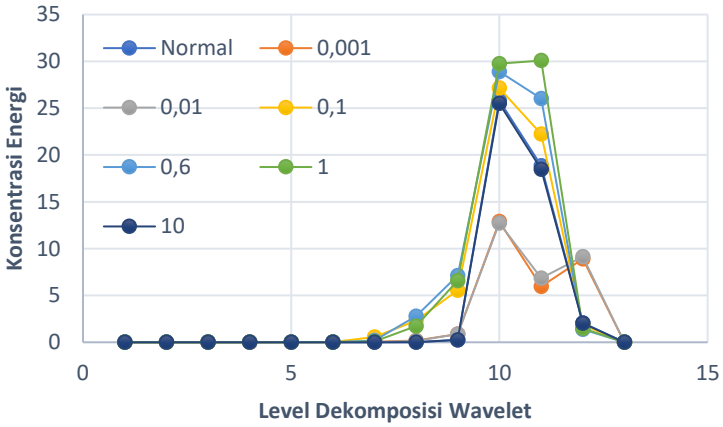
dan 0,001 µF. Namun ketika pada level 12 terlihat nilai *Cg* 0,001 dan 0,01.

Pada Gambar 4.48 terlihat *Cg* sebesar 1 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sepuluh, sedangkan *Cg* sebesar 10 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sebelas. Pada *Cg* bernilai 1 µF terjadi penurunan dari level sepuluh ke sebelas sebesar 32,74%. Nilai konsentrasi energi pada *Cg* sebesar 0,01 µF dan 0,001 µF memiliki nilai terendah di level sepuluh, sedangkan nilai konsentrasi energy pada Cg sebesar 0,1 µF memiliki nilai terendah.

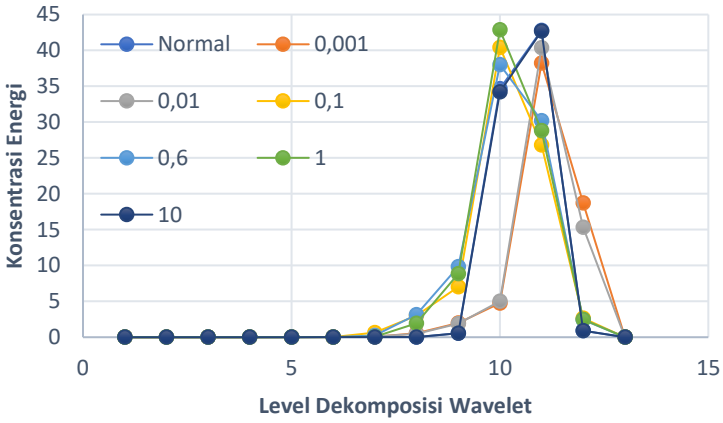
Pada Gambar 4.49 terlihat *Cg* sebesar 1 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sepuluh. Pada *Cg* bernilai 1 µF terjadi penurunan 13,7% dari level sepuluh ke sebelas. Pada nilai konsentrasi energztampak pada nilai *Cg* 1 µF tertinggi.Pada level 0,01 µF dan 0,001 µF terendah. Pada level duabelas, nilai *Cg* 0,1 µF terendah.

Maka dapat disimpullkan pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye dengan variasi nilai *Cg*, ketika gelombang feroresonansi dengan *Cg* sebesar 0,1 µF; 0,6 µF dan 1 µF bermode fundamental memiliki nilai lebih tinggi daripada gelombang feroresonansi dengan *Cg* sebesar 0,001 µF dan 0,01 µF bermode fundamental. Sedangkan, nilai konsentrasi energi gelombang *Cg* sebesar 0,001 µF dan 0,01 µF yang tidak memunculkan feroresonansi memiliki nilai terendah daripada gelombang lainnya. Nilai konsentrasi energi saat kondisi normal memiliki kesamaan dengan gelombang feroresonansi *Cg* bernilai 10 µF. Karena kedua gelombang tersebut berbentuk sinusoidal.

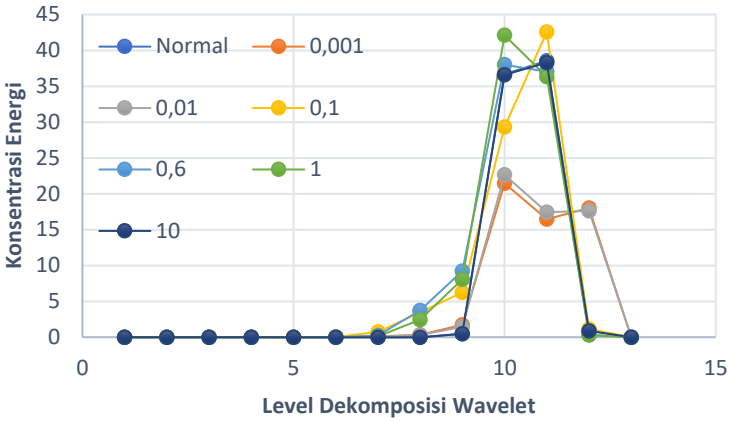
Pada Tabel 4.13 menunjukkan konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal. Pada Tabel 4.14 menunjukkan konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg.*



Gambar 4.47 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A variasi nilai *grading capacitance*



Gambar 4.48 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa B variasi nilai *grading capacitance*



Gambar 4.49 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa C variasi nilai *grading capacitance*

Tabel 4.13 Konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal

Level	Kondisi Normal		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0001	0,0001
7	0,0000	0,0005	0,0004
8	0,0000	0,0052	0,0053
9	0,2713	0,5420	0,4750
10	25,8215	34,656	36,6731
11	18,8649	42,7962	38,5697
12	2,0628	0,9026	0,9016

Tabel 4.14 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan nilai *Cg* yaitu 0,001µF dan 0,01 µF

Level	Feroresonansi dengan *Grading Capacitance* (*Cg*)					
	0,001 µF			0,01 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0001	0,0001	0,0002	0,0000	0,0001	0,0001
6	0,0041	0,0098	0,0101	0,0031	0,0105	0,0072
7	0,0584	0,0824	0,1381	0,0310	0,1025	0,0906
8	0,1769	0,5484	0,3450	0,1547	0,4542	0,2788
9	0,8559	1,9824	1,7375	0,8640	1,8836	1,4670
10	12,8892	4,7525	21,4648	12,7389	5,0351	22,6465
11	5,9755	38,2268	16,4744	6,8583	40,3679	17,4587
12	8,8899	18,7388	18,0390	9,1341	15,3325	17,6118

Tabel 4.15 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan nilai *Cg* yaitu 0,1µF dan 0,6 µF

Level	Feroresonansi dengan *Grading Capacitance* (*Cg*)					
	0,1 µF			0,6 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0004	0,0004	0,0007	0,0001	0,0001	0,0003
6	0,0245	0,0286	0,0335	0,0030	0,0036	0,0049
7	0,5638	0,6452	0,7308	0,1847	0,2316	0,2447
8	2,2938	3,0126	3,4471	2,7806	3,1613	3,7558
9	5,5643	7,0099	6,2182	7,1119	9,8557	9,2087
10	27,1423	40,4244	29,3063	28,9047	38,0073	37,9953
11	22,2301	26,8064	42,5867	26,0376	30,2033	37,0150
12	1,8496	2,6344	1,1525	1,3673	2,4431	0,3496

Tabel 4.16 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan nilai *Cg* yaitu 1µF dan 10 µF

Level	Feroresonansi dengan *Grading Capacitance* (*Cg*)					
	1 µF			10 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0012	0,0013	0,0022	0,0000	0,0001	0,0001
7	0,0739	0,0844	0,0971	0,0000	0,0005	0,0004
8	1,7332	1,9497	2,4228	0,0010	0,0053	0,0053
9	6,5732	8,8467	8,0645	0,2669	0,5384	0,4734
10	29,7688	42,8531	42,1106	25,5057	34,1931	36,5701
11	30,0831	28,8217	36,3009	18,4875	42,6906	38,2824
12	1,4749	2,4783	0,2849	2,0246	0,8981	0,8918

b. Hubungan Wye – Wye Variasi Nilai *Shunt Capacitance* (*Cs*)

Pada Gambar 4.50 sampai 4.52 menunjukkan grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A, fasa B dan fasa C variasi nilai *shunt capacitance.*

Pada Gambar 4.50 terlihat *Cs* sebesar 0,2 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sepuluh, sedangkan Cs sebesar 0,5 µF memiliki nilai tertinggi di level sebelas. Pada *Cs* bernilai 10 µF terlihat di level sepuluh dan sebelas.

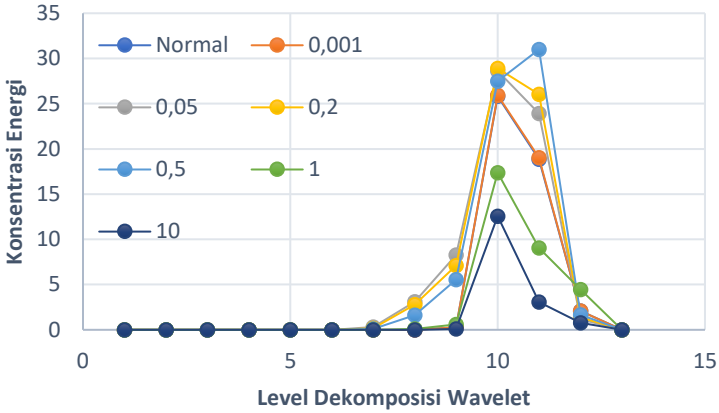
Pada Gambar 4.51 terlihat *Cs* bernilai 0,5 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sepuluh, sedangkan *Cs* bernilai 1 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sebelas. Pada *Cs* bernilai 10 µF memiliki nilai konsentrasi energi terendah di level sepuluh, sedangkan *Cs* bernilai 0,001 µF memiliki nilai konsentrasi energi terendah di level sebelas.

Pada Gambar 4.52 terlihat *Cs* bernilai 0,5 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sepuluh, sedangkan saat kondisi normal memiliki nilai konsentrasi energi di level sebelas. Pada *Cs* bernilai 10 µF memiliki nilai konsentrasi energi terendah di level sepuluh dan sebelas.

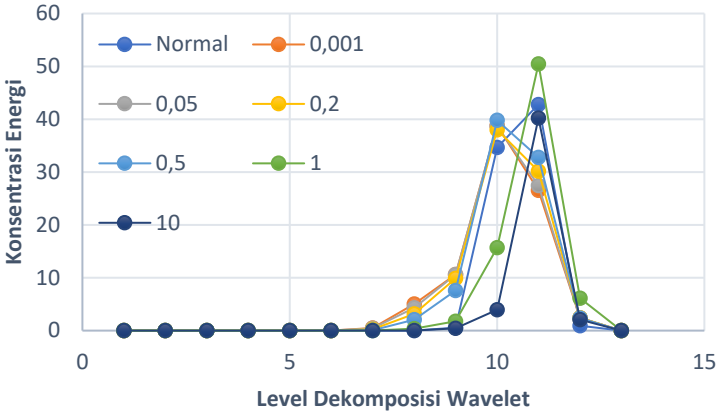
Maka dapat disimpullkan pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye dengan variasi nilai *Cs*, ketika gelombang feroresonansi dengan *Cs* sebesar 0,001 µF; 0,05 µF; 0,2 µF dan 0,5 µF bermode fundamental memiliki nilai konsentrasi energi lebih rendah daripada gelombang feroreosonansi dengan *Cs* sebesar 1 µF bermode chaotic. Sedangkan, nilai

konsentrasi energi gelombang saat kondisi normal tidak jauh berbeda dengan gelombang feroresonansi bermode fundamental dan chaotic. Nilai konsentrasi energi gelombang feroresonansi dengan *Cs* sebesar 10 µF yang tidak memunculkan feroresonansi memiliki nilai terendah daripada gelombang lainnya.

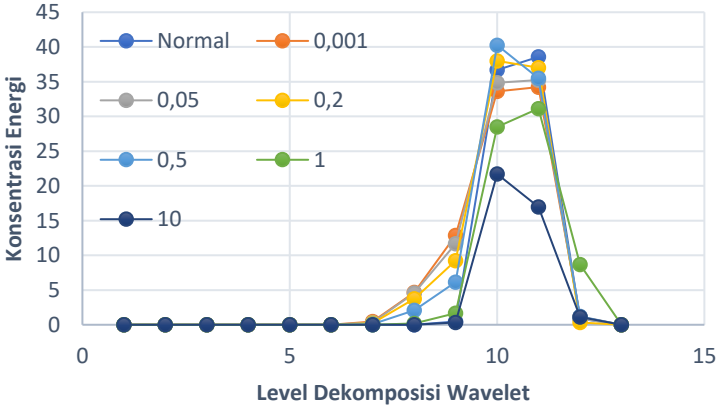
Pada Tabel 4.15 menunjukkan konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal. Pada Tabel 4.16 menunjukkan konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs.*



Gambar 4.50 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A variasi nilai *shunt capacitance*



Gambar 4.51 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa B variasi nilai *shunt capacitance*



Gambar 4.52 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa C variasi nilai *shunt capacitance*

Tabel 4.17 Konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal

Level	Kondisi Normal		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0001	0,0001
7	0,0000	0,0005	0,0004
8	0,0000	0,0052	0,0053
9	0,2713	0,5420	0,4750
10	25,8215	34,656	36,6731
11	18,8649	42,7962	38,5697
12	2,0628	0,9026	0,9016

Tabel 4.18 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 0,001 µF dan 0,05 µF

Level	Feroresonansi dengan *Shunt Capacitance* (*Cs*)					
	0,001 µF			0,05 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0005	0,0006	0,0007	0,0004	0,0004	0,0006
6	0,032	0,0362	0,0358	0,0224	0,0325	0,0431
7	0,6904	0,8107	0,8879	0,5724	0,8418	0,9767
8	3,4836	4,1181	4,6192	3,1158	3,3789	5,3102
9	9,3994	8,3425	7,9795	7,2516	10,2998	13,0777
10	16,6029	16,1912	24,3532	17,6395	17,7679	24,0388
11	9,1957	17,3936	18,2603	11,1031	14,8929	15,603
12	0,3985	2,4235	2,6873	1,2425	3,0627	0,982

Tabel 4.19 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 0,2 µF dan 0,5 µF

Level	Feroresonansi dengan *Shunt Capacitance* (*Cs*)					
	0,2 µF			0,5 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0002	0,0003	0,0003	0,0001	0,0002	0,0002
6	0,0076	0,0162	0,0125	0,0054	0,0093	0,0101
7	0,2804	0,4632	0,3837	0,2312	0,373	0,4523
8	2,8938	3,7594	3,6742	1,8128	2,9082	3,2236
9	5,2934	8,0941	7,4021	4,5046	8,5112	7,7328
10	18,9012	27,2016	22,986	22,2223	28,2702	30,3392
11	9,8341	22,1605	17,4891	9,2832	24,0864	15,6139
12	0,8081	3,2219	1,0745	1,0286	3,0807	0,9145

Tabel 4.20 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 1 µF dan 10 µF

Level	Feroresonansi dengan *Shunt Capacitance* (*Cs*)					
	1 µF			10 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0014	0,0024	0,0026	0,0000	0,0001	0,0001
7	0,0787	0,1281	0,1460	0,0000	0,0009	0,0008
8	0,8972	1,5428	1,8855	0,0008	0,0102	0,0081
9	2,4082	5,1304	4,166	0,113	0,4048	0,3446
10	19,3354	31,4584	35,9663	12,7771	4,1113	22,9932
11	14,8844	29,3000	24,5056	2,6595	37,6806	15,3222
12	2,3856	2,5933	0,5712	1,1549	2,0097	1,7813

c. Hubungan Delta – Wye Variasi Nilai *Grading Capacitance* (*Cg*)

Pada Gambar 4.53 sampai 4.55 menunjukkan grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A, fasa B dan fasa C variasi nilai *grading capacitance*.

Pada Gambar 4.53 terlihat *Cg* sebesar 10 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sepuluh dan sebelas. Nilai konsentrasi energi pada *Cg* sebesar 0,001 µF dan 0,01 µF terendah di level sepuluh,

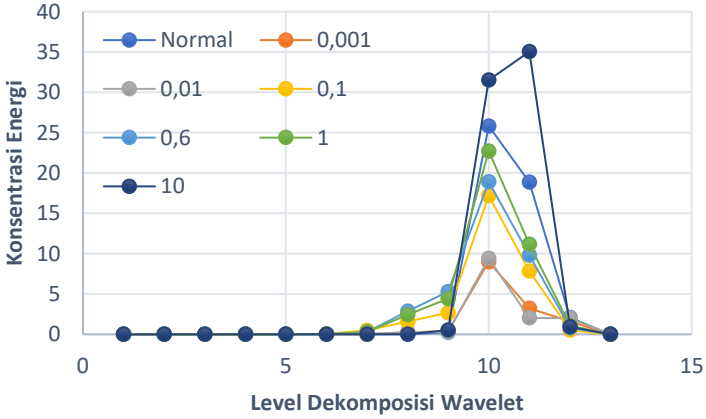
sedangkan *Cg* sebesar 0,01 µF memiliki nilai konsentrasi energi terendah di level sebelas.

Pada Gambar 4.54 terlihat *Cg* sebesar 10 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sepuluh, sedangkan *Cg* sebesar 0,6 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sebelas.

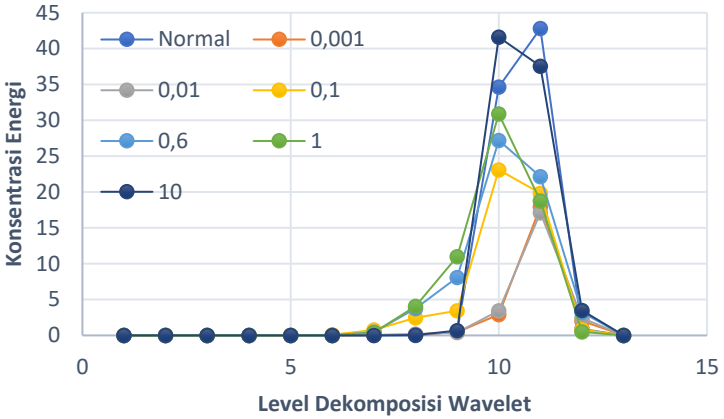
Pada Gambar 4.55 terlihat *Cg* sebesar 10 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sepuluh, sedangkan *Cg* sebesar 0,6 µF memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi di level sebelas. Nilai konsentrasi energi pada *Cg* sebesar 0,001 µF dan 0,01 µF terendah di level sepuluh dan sebelas.

Maka dapat disimpullkan pada transformator 3 fasa hubungan delta – wye dengan variasi nilai *Cg*, ketika gelombang feroresonansi dengan *Cg* sebesar 0,1 µF dan 0,6 µF bermode fundamental lebih rendah daripada *Cg* sebesar 1 µF bermode chaotic. Sedangkan, nilai konsentrasi energi gelombang feroresonansi *Cg* sebesar 0,001 µF dan 0,01 µF yang tidak memunculkan feroresonansi memiliki nilai terendah daripada gelombang lainnya. Nilai konsentrasi energi gelombang feroresonansi *Cg* bernilai 10 µF yang terjadi *overvoltage* memiliki nilai tertinggi dari gelombang lainnya.

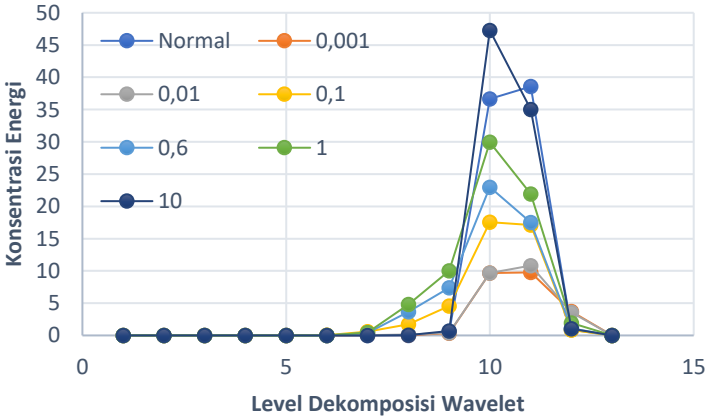
Pada Tabel 4.17 menunjukkan konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal. Pada Tabel 4.18 menunjukkan konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg*.



Gambar 4.53 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A variasi nilai *grading capacitance*



Gambar 4.54 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa B variasi nilai *grading capacitance*



Gambar 4.55 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa C variasi nilai *grading capacitance*

Tabel 4.21 Konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal

Level	Kondisi Normal		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0001	0,0001
7	0,0000	0,0005	0,0004
8	0,001	0,0052	0,0053
9	0,2713	0,5420	0,4750
10	25,8215	34,656	36,6731
11	18,8649	42,7962	38,5697
12	2,0628	0,9026	0,9016

Tabel 4.22 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg* yaitu 0,001 µF dan 0,01 µF

Level	Feroresonansi dengan *Grading Capacitance* (*Cg*)					
	0,001 µF			0,01 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001
6	0,0036	0,0056	0,0035	0,0021	0,0022	0,0037
7	0,0254	0,0366	0,0267	0,0224	0,0354	0,0424
8	0,2535	0,1377	0,0701	0,2904	0,1761	0,1342
9	0,4051	0,4314	0,0000	0,2975	0,4176	0,3692
10	8,9892	2,9191	9,6616	9,4165	3,4508	9,6628
11	3,2209	17,9389	9,7662	2,0393	17,1191	10,8271
12	1,6193	1,9984	3,6955	2,0111	2,3989	3,5888

Tabel 4.23 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg* yaitu 0,1 µF dan 0,6 µF

Level	Feroresonansi dengan *Grading Capacitance* (*Cg*)					
	0,1 µF			0,6 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0010	0,0016	0,0013	0,0002	0,0003	0,0003
6	0,0463	0,0810	0,0552	0,0076	0,0162	0,0125
7	0,5035	0,7862	0,6043	0,2804	0,4632	0,3837
8	1,6167	2,4416	1,7175	2,8938	3,7594	3,6742
9	2,6606	3,4246	4,5456	5,2934	8,0941	7,4021
10	17,1935	23,1002	17,5554	18,9012	27,2016	22,9860
11	7,8485	19,8097	17,1028	9,8341	22,1605	17,4891
12	0,5326	0,7958	0,8589	0,8081	3,2219	1,0745

Tabel 4.24 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cg* yaitu 1 µF dan 10 µF

Level	Feroresonansi dengan *Grading Capacitance* (*Cg*)					
	1 µF			10 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0001	0,0002	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0063	0,0096	0,0089	0,0001	0,0001	0,0001
7	0,2976	0,4185	0,4332	0,0022	0,0027	0,0030
8	2,4460	4,0856	4,7949	0,0309	0,0378	0,0375
9	4,4156	11,0011	10,0142	0,5168	0,6733	0,7124
10	22,7287	30,8816	29,9356	31,5230	41,5953	47,2755
11	11,1694	18,7686	21,9158	35,0418	37,5456	35,0139
12	1,0748	0,4950	1,9526	0,9164	3,4962	1,0226

d. Hubungan Delta – Wye Variasi Nilai *Shunt Capacitance* (*Cs*)

Pada Gambar 4.56 sampai 4.58 menunjukkan grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A, fasa B dan fasa C variasi nilai *shunt capacitance.*

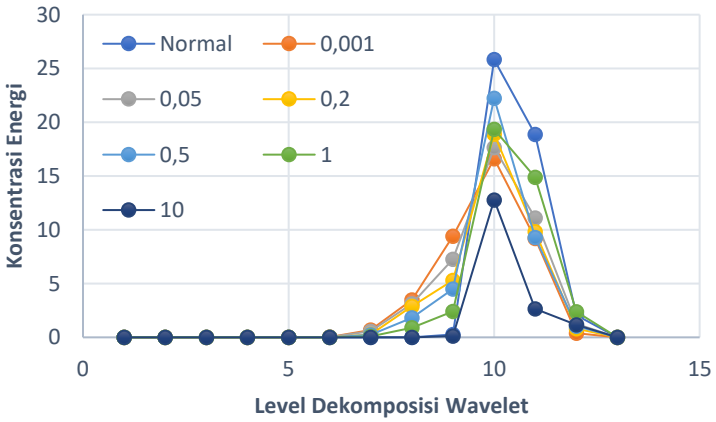
Pada Gambar 4.56 terlihat saat kondisi normal tertinggi di level sepuluh dan sebelas, sedangkan nilai *Cs* 10 µF terendah di level sepuluh dan sebelas.

Pada Gambar 4.57 terlihat nilai konsentrasi energi saat kondisi normal tertinggi di level sepuluh dan sebelas. Pada grafik tersebut tertinggi 42,7962%, saat kondisi normal di level sebelas. Pada Gambar tersebut, terendah di level sebelas.

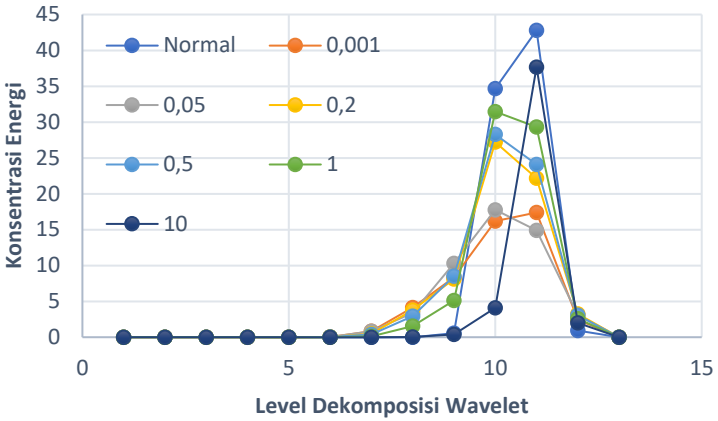
Pada Gambar 4.58 terlihat nilai konsentrasi energi saat kondisi normal tertinggi pada level sepuluh dan sebelas. Pada nilai *Cs* 10 µF terendah di level sepuluh dan sebelas.

Maka dapat disimpullkan pada transformator 3 fasa hubungan delta – wye dengan variasi nilai *Cs*, ketika gelombang feroresonansi dengan *Cs* sebesar 0,001 µF; 0,05 µF dan 0,2 µF yang bermode fundamental lebih rendah. Gelombang saat kondisi normal memiliki nilai konsentrasi lebih tinggi daripada gelombang feroresonansi dalam mode fundamental dan chaotic. Gelombang feroresonansi dengan Cs sebesar 10 µF yang tidak memunculkan feroreonansi memiliki nilai konsentrasi enegi terendah daripada gelombang lainnya.

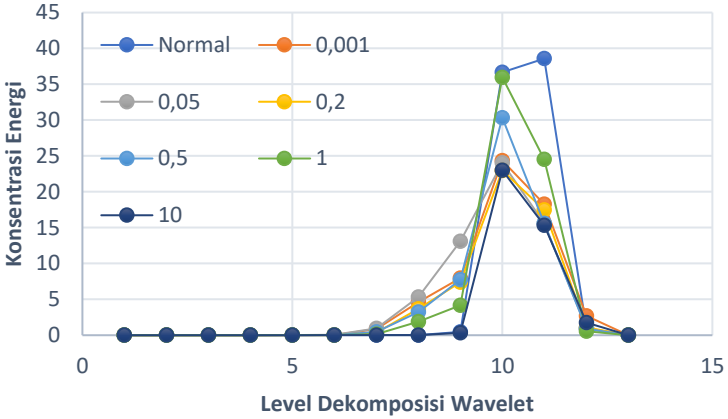
Pada Tabel 4.19 menunjukkan konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal. Pada Tabel 4.20 menunjukkan konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs.*



Gambar 4.56 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa A variasi nilai *shunt capacitance*



Gambar 4.57 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa B variasi nilai *shunt capacitance*



Gambar 4.58 Grafik perbandingan nilai konsentrasi energi dari tiap level dekomposisi wavelet pada fasa C variasi nilai *shunt capacitance*

Tabel 4.25 Konsentrasi energi dari setiap level dekomposisi wavelet saat kondisi normal

Level	Kondisi Normal		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0001	0,0001
7	0,0000	0,0005	0,0004
8	0,001	0,0052	0,0053
9	0,2713	0,5420	0,4750
10	25,8215	34,656	36,6731
11	18,8649	42,7962	38,5967
12	2,0628	0,9026	0,9016

Tabel 4.26 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 0,001 µF dan 0,05 µF

Level	Feroresonansi dengan *Shunt Capacitance* (*Cs*)					
	0,001 µF			0,05 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0005	0,0006	0,0007	0,0004	0,0004	0,0006
6	0,0320	0,0362	0,0358	0,0224	0,0325	0,0431
7	0,6904	0,8107	0,8879	0,5724	0,8418	0,9767
8	3,4836	4,1181	4,6192	3,1158	3,3789	5,3102
9	9,3994	8,3425	7,9795	7,2516	10,2998	13,0777
10	16,6029	16,1912	24,3532	17,6395	17,7679	24,0388
11	9,1957	17,3936	18,2603	11,1031	14,8929	15,6030
12	0,3985	2,4235	2,6873	1,2425	3,0627	0,9820

Tabel 4.27 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 0,2 µF dan 0,5 µF

Level	Feroresonansi dengan *Shunt Capacitance* (*Cs*)					
	0,2 µF			0,5 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0002	0,0003	0,0003	0,0001	0,0002	0,0002
6	0,0076	0,0162	0,0125	0,0054	0,0093	0,0101
7	0,2804	0,4632	0,3837	0,2312	0,3730	0,4523
8	2,8938	3,7594	3,6742	1,8128	2,9082	3,2236
9	5,2934	8,0941	7,4021	4,5046	8,5112	7,7328
10	18,9012	27,2016	22,9860	22,2223	28,2702	30,3392
11	9,8341	22,1605	17,4891	9,2832	24,0864	15,6139
12	0,8081	3,2219	1,0745	1,0286	3,0807	0,9145

Tabel 4.28 Nilai Konsentrasi energi setiap level dekomposisi wavelet pada gelombang feroresonansi dengan variasi nilai *Cs* yaitu 1 µF dan 10 µF

Level	Feroresonansi dengan *Shunt Capacitance* (*Cs*)					
	1 µF			10 µF		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0014	0,0024	0,0026	0,0000	0,0001	0,0001
7	0,0787	0,1281	0,1460	0,0000	0,0009	0,0008
8	0,8972	1,5428	1,8855	0,0008	0,0102	0,0081
9	2,4082	5,1304	4,1660	0,1130	0,4048	0,3446
10	19,3354	31,4584	35,9663	12,7771	4,1113	22,9932
11	14,8844	29,3000	24,5056	2,6595	37,6806	15,3222
12	2,3856	2,5933	0,5712	1,1549	2,0097	1,7813

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 5
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berikut adalah kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai "Identifikasi Feroresonansi pada Transformator 3 Fasa Berbasis Transformasi Wavelet" :

1. Pengaruh variasi nilai *grading capacitance* dengan nilai *shunt capacitance* tetap pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye dan hubungan delta – wye yaitu semakin tinggi nilai *grading capacitance* maka semakin tinggi juga tegangan maksimum
2. Pengaruh variasi nilai *shunt capacitance* dengan nilai *grading capacitance* tetap pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye dan hubungan delta – wye yaitu semakin tinggi nilai *grading capacitance* maka semakin rendah juga tegangan maksimum
3. Pada respon tegangan transformator 3 fasa hubungan wye -wye pada nilai *Cg* yaitu 0,1 µF; 0,6 µF dan 1 µF dengan nilai *Cs* tetap memunculkan bentuk gelombang feroresonansi fundamental, sedangan pada nilai *Cs* yaitu 0,001 µF; 0,05 µF; 0,2 µF; 0,5 µF dan 1 µF kecenderungan bentuk gelombang feroresonansi fundamendal dan chaotic.
4. Pada respon tegangan transformator 3 fasa hubungan delta -wye pada nilai *Cg* yaitu 0,1 µF; 0,6 µF dan 1 µF dengan nilai *Cs* tetap memunculkan bentuk gelombang feroresonansi quasi-periodik dan chaotic, sedangan pada nilai *Cs* yaitu 0,001 µF; 0,05 µF; 0,2 µF; 0,5 µF dan 1 µF kecenderungan bentuk gelombang feroresonansi chaotic.
5. Metode analisis transformasi wavelet dapat mendeteksi adanya ketidaknormalan pada suatu sinyal. Ketidaknormalan suatu sinyal ditunjukan dengan perubahan yang signifikan pada nilai koefisien detail hasil transformasi wavelet. Hasil transformasi wavelet juga dapat digunakan untuk membedakan kondisi transien dan steady state pada suatu sinyal feroresonansi.
6. Berdasarkan hasil sinyal dekomposisi wavelet, perbedaan signifikan antara gelombang feroresonansi dengan gelombang normal sudah terlihat dengan jelas secara visual terutama di level 8 maupun dengan nilai konsentrasi energi tiap level dekomposisi waveletnya
7. Nilai konsentrasi energi pada transformator 3 fasa hubungan wye - wye dan delta – wye saat kondisi normal tidak terdapat perbedaan

dengan nilai konsentrasi energi tertinggi pada fasa B berada di level 11 yaitu 42,7962%.

8. Nilai konsentrasi energi pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye dan delta – wye saat kondisi feroresonansi terdapat kecenderungan kenaikan nilai konsentrasi energi pada level 10 dan 11 dengan variasi nilai *Cg* maupun *Cs*.
9. Nilai konsentrasi energi tertinggi nilai Cg 1 µF di level sepuluh dengan fasa A yaitu 29,7688%, fasa B yaitu 42,8531% dan fasa C yaitu 42,1106% pada transformator 3 fasa hubungan wye – wye. Sedangkan, transformator 3 fasa hubugan delta – wye memiliki nilai konsentrasi energi tertinggi pada nilai Cg 10 µF di level sepuluh dengan fasa A yaitu 31,5230%, fasa B yaitu 41,5953% dan fasa C yaitu 47,2755%.

5.2 Saran

Saran dari penulis yaitu dapat dikembangkan lagi eksperimen dengan sistem simulasi pada transformator 3 fasa dengan tegangan sumber yang berbeda dengan kondisi berbeban.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Javier Arturo Corea Araujo, “Modeling And Analysis Of Power Transformers Under Ferroresonance Phenomenon”, Universitat Rovira, Virgili, 2015.

[2] I Made Yulistya Negara, Daniar Fahmi, Luthfi Lukman Hakim , “Studi Eksperimen Menggunakan Transformasi Wavelet dalam Mengidentifikasi Feroresonansi pada Transformator”, Tugas Akhir, 2018.

[3] Tobing, Bonggas L, “Peralatan Tegangan Tinggi”, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta 2013.

[4] Stephen J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals 4th edition", Mc- Graw Hill,USA, 2005.

[5] IMY Negara, IGNS Hernanda, DA Asfani, D Fahmi, Y Afif, M Wahyudi “Ferroresonance characteristics in unsymmetrical flux distribution of 150 KV three phase transformer” IEEE TENCON Region 10 Conference, p. 78-81, 2017.

[6] D.A.N. Jacobson " Examples of ferroresonance in a high voltage power system," IEEE Power Engineering Society General Meeting Vol. 2, 2003.

[7] D. McDermit, D. D. Shipp, T. J. Dionise, and V. Lorch, "Medium voltage switching transient induced potential transformer failures; prediction, measurement and practical solutions," in Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 2012 IEEE/IAS 48th, 2012, pp. 1-11.

[8] Application of Wavelet Cumulative Energy and Artificial Neural Network for Classification of Ferroresonance Signal During Symmetrical and Unsymmetrical Switching of Three-Phases Distribution Transformer

[9] Z. Emin, B.A.T. Al Zahawi, D.W. Auckland, and Y.K. Tong, “Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformer: a Study Based on Nonlinear Dynamics”, IEEE Proc-Gener. Transm. Distrib., 1997

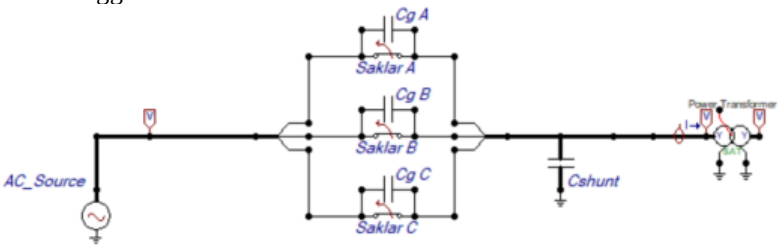
[10] S. S. Simamora, I Made Yulistya Negara, dan Daniar Fahmi, “Studi Pemasangan Damping Reaktor untuk Mengatasi Feroresonansi pada Incoming 20 Kv GIS Tandes,” Jurnal Teknik Pomits, Vol. 1, No. 1, 2015.

[11] P. S. Moses and M. A. S. Masoum, “Modelling Ferroresonance in Asymmetric Three-Phase Power Transformer,” in IEEE, 2009.

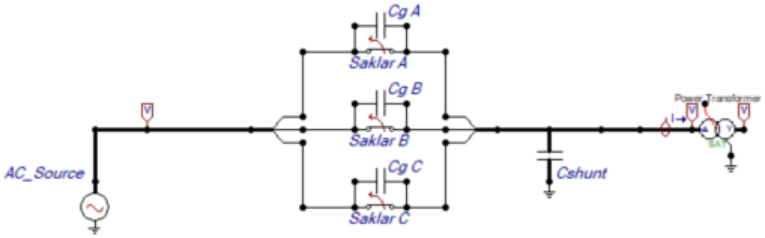
[12] Ferraci, P., (1998), Ferroresonance, Group Schneider: Cahier no 190.
[13] IGN Satriyadi, IMY Negara, D Fahmi, DA Asfani, R Hidayat "Comparison of Ferroresonance Response on Three Phases Transformer with Different Core Material: M5 and ZDKH" International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2018.
[14] Z. Ali, "Development Of Numerical Algorithms For Ferroresonance Monitoring" The University of Manchester. 2015.
[15] Ogden, R. T. (1997). Essential Wavelets for Statistical. Boston.
[16] Chun-Wei Huang, Jyh-Cherng Gu, Ming-Ta Yang "Applying Wavelet Transform to Ferroresonance Detection and Protection" International Scholarly and Scientific Research & Innovation 8(7) 2014.
[17] Swee Peng Ang "Ferroresonance Simulation Studies of Transmission Systems" The University of Manchester. 2010.
[18] IGN Satriyadi, IMY Negara, D Fahmi, DA Asfani, KS Anugrah "Study of Petersen Coil Grounding System Inductance Variation on Ferroresonance in 150 kV Transformer" International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2018
[19] Zhang Bo, LU Tiecheng "On the Use of Wavelet Decomposition for Ferroresonance Detection in Power System" 978-1-4244-2487-0/09/$25.00 ©2009 IEEE.
[20] IGN Satriyadi, IMY Negara, D Fahmi, DA Asfani, Surya Dwi K "Analisis Deteksi Feroresonansi menggunakan Transformasi Wavelet pada Sistem Transmisi 500 kV," JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 1, No. 1, (2015) 1-5.
[21] Zhang Bo, LU Tiecheng "On the Use of Wavelet Decomposition for Ferroresonance Detection in Power System" 978-1-4244-2487-0/09/$25.00 ©2009 IEEE.

LAMPIRAN

- Rangkaian feroresonansi transformator 3 fasa hubungan wye -wye menggunakan ATPDraw



- Rangkaian feroresonansi transformator 3 fasa hubungan delta - wye menggunakan ATPDraw



- List program menghitung nilai konsentrasi energi tiap level dekomposisi wavelet menggunakan perangkat lunak MATLAB

```
load('filename')
s = variable(1:50000)
[C,L] = wavedec (s,12,'db5')
[Ea,Ed] = wenergy (C,L)
```

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

RIWAYAT HIDUP

Penulis memiliki nama lengkap Pristiwanto Adhi Anugraha. Lahir sebagai anak tiga dari tiga bersaudara di Palangkaraya pada tanggal 3 Oktober 1998. Penulis mengawali pendidikan di SDN Menanggal 601 Surabaya pada tahun 2004-2010, kemudian melanjutkan pendidikan ke SMP Negeri 12 Surabaya hingga tahun 2013. Setelah lulus dari SMA Negeri 2 Semarang pada tahun 2016, Penulis melanjutkan pendidikan sarjana di Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis mengambil bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga Listrik. Selama kuliah Penulis pernah mengikuti kepanitiaan EVOLTY pada tahun 2018 dan 2019 sebagai KAMZIN. Penulis dapat dihubungi melalui email: adhi.anugraha@gmail.com