TUGAS AKHIR – EE184801

ANALISIS FERORESONANSI AKIBAT *SWITCHING* YANG TIDAK SEREMPAK DAN HUBUNGAN BELITAN PADA TRANSFORMATOR 3 FASA

Bagas Kuntala Aji
NRP 07111540000037

Dosen Pembimbing
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.

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

FINAL PROJECT – **EE184801**

FERRORESONANCE ANALYSIS CAUSED BY NON - SIMULTANEOUSLY SWITCHING AND WINDING CONNECTION OF 3 PHASE TRANSFORMER

Bagas Kuntala Aji
NRP 07111540000037

Advisor
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN
TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul "**Analisis Feroresonansi akibat *Switching* yang Tidak Serempak dan Hubungan Belitan pada Transformator 3 Fasa**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

Surabaya, 2 Juli 2019

Bagas Kuntala Aji
NRP. 07111540000037

ANALISIS FERORESONANSI AKIBAT *SWITCHING* YANG TIDAK SEREMPAK DAN HUBUNGAN BELITAN PADA TRANSFORMATOR 3 FASA

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
IGN Satriyadi H., ST., MT.	Dimas Anton Asfani ST., MT., Ph.D.
NIP. 19730123 200212 1001	NIP. 19810905 200501 1002

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

SURABAYA
JULI, 2019

ANALISIS FERORESONANSI AKIBAT *SWITCHING* YANG TIDAK SEREMPAK DAN HUBUNGAN BELITAN PADA TRANFORMATOR 3 FASA

Nama : Bagas Kuntala Aji
NRP : 07111540000037
Pembimbing I : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Pembimbing II : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Transformator daya dapat mengalami fenomena feroresonansi karena memiliki komponen induktansi nonlinear pada inti besinya. Fenomena feroresonansi dapat dipicu oleh beberapa kondisi. Pada studi ini diberikan pemicu dengan gangguan *switching* 1 fasa gagal terbuka serempak dan gangguan *switching* 2 fasa gagal terbuka serempak. Transformator daya yang digunakan adalah transformator jenis *step down* 150 kV – 20 kV dengan konfigurasi belitan jenis Wye – Wye, Wye – Delta, Delta – Wye, Delta – Delta. Tujuan dari studi ini adalah untuk melihat *overvoltage* dan karakteristik feroresonansi yang muncul pada setiap jenis konfigurasi belitan terhadap gangguan operasi *switching* yang diberikan. Pemodelan rangkaian feroresonansi yang digunakan disimulasikan dengan bantuan *software* ATPDraw. Total waktu simulasi pada studi ini adalah 0,7 detik. Hasil dari studi ini adalah transformator dengan konfigurasi belitan jenis Delta – Wye paling rentan terhadap *overvoltage* akibat feroresonansi, sedangkan konfigurasi belitan jenis Wye – Delta paling tahan terhadap overvoltage akibat feroresonansi. Karakteristik feroresonansi yang muncul didominasi oleh mode *Quasi-periodic* pada belitan primer maupun pada sisi sekunder.

Kata kunci: ATPDraw, Transformator daya, S*witching* tidak serempak, Feroresonansi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

FERRORESONANCE ANALYSIS CAUSED BY NON - SIMULTANEOUSLY SWITCHING AND WINDING CONNECTION OF 3 PHASE TRANFORMER

Name : Bagas Kuntala Aji
NRP : 07111540000037
Advisor I : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Advisor II : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

Ferroresonance phenomenon can occur in power transformer because it has a nonlinear inductance component in its iron core. This phenomenon could be triggered by several conditions. In this study, the trigger was given by an interference of the switching operation that has 2 conditions which are 1 phase fail to open simultaneously and 2 phase fails to open simultaneously. The power transformer used is step down type transformer 150 kV - 20 kV with Wye – Wye, Wye – Delta, Delta – Wye, and Delta – Delta winding configurations. The purpose of this study is to observe at overvoltage and ferroresonance characteristics that appear in each type of winding configuration against the interference of the switching operation given. The ferroresonance circuit modeling used is simulated with ATPDraw. The total simulation time in this study is 0,7 seconds. The results of this study are that transformers with Delta - Wye winding configurations are most susceptible to overvoltage due to ferroresonance, while Wye - Delta winding configuration is most resistant to overvoltage due to ferroresonance. The ferroresonance characteristic that appears is dominated by Quasi-periodic mode in the primary and secondary winding.

Keywords: ATPDraw, Power transformer, Non - simultaneously *switching*, Ferroresonance

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan tepat watu. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang berjudul:

ANALISIS FERORESONANSI AKIBAT *SWITCHING* YANG TIDAK SEREMPAK DAN HUBUNGAN BELITAN PADA TRANSFORMATOR 3 FASA

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Ibu, bapak, dan kakak saya atas doa dan dukungannya dalam mendampingi saya hingga menjadi seorang sarjana.
3. Bapak I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT. dan Bapak Dimas Anton Asfani ST., MT., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dan berbagi ilmu selama penelitian tugas akhir ini.
4. Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc. dan Bapak Daniar Fahmi, ST., MT. selaku dosen Lab. Tegangan Tinggi yang senantiasa memberi dukungan dan masukan terkait tugas akhir ini.
5. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T, M.Eng. selaku Ketua Departemen serta seluruh dosen dan karyawan yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuanya selama proses perkuliahan di Teknik Elektro ITS.
6. I Gede Arka Prawira, Agus Prawira Kusuma, Yogi Prianda Ferdani, Mas Reno Hidayat dan Mas Arief Budi Ksatria yang senantiasa membantu memberikan masukan dalam penulisan tugas akhir ini.
7. Addien, Yudha, Naoki, Michael, Yudha, Juan, Alfi, Assa, dan Shafira yang sering membantu dan memberikan masukan terkait pengerjaan tugas akhir ini.

8. Seluruh keluarga besar e-55 atas semangat dan motivasi selama 4 tahun di Jurusan Teknik Elektro.
9. Mas dan Mbak e54 dan e53 yang senantiasa memberi masukan dan referensi.
10. Teman – teman SMAN 61’15 yang sedikit banyak dapat memberikan semangat dalam pengerjaan tugas akhir ini.
11. M. Baihaqi, Yogi Prianda, Nabilah Sarah, Tri Elfira, dan Devi Ariana yang menjadi teman baik penulis semasa maba.
12. Nadya Ansharah Rammon yang banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini baik dalam proses pengerjaan maupun memberikan semangat setiap harinya.

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

Surabaya, 27 Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
PERNYATAAN KEASLIAN
HALAMAN PENGESAHAN
ABSTRAK i
ABSTRACT iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR TABEL xv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Sistematika Penulisan 3
BAB II TRANSFORMATOR DAN FERORESONANSI 5
2.1 Sistem Tenaga Listrik 5
2.1.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik 6
2.1.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik 7
2.2 Transformator 7
2.2.1 Pengertian Transformator 7
2.2.2 Prinsip Kerja Transformator 8
2.2.3 Kurva Magnetisasi Transformator 10
2.2.4 Rangkaian Ekivalen Transformator 11
2.3 Hubungan Transformator 3 Fasa 12
2.3.1 Hubungan Bintang (Y) 12
2.3.2 Hubungan Delta (Δ) 12
2.4 Konfigurasi Belitan Transformator 3 Fasa 13
2.4.1 Hubungan Wye - Wye 13
2.4.2 Hubungan Wye - Delta 14
2.4.3 Hubungan Delta - Wye 14
2.4.4 Hubungan Delta - Delta 15
2.5 Feroresonansi 15
2.5.1 Pengertian Resonansi 15
2.5.2 Pengertian Feroresonansi 16
2.5.3 Perbedaan Resonansi dengan Feroresonansi 17
2.5.4 Klasifikasi Feroresonansi 17
2.6 *Switching* yang Tidak Serempak 19

BAB III PEMODELAN RANGKAIAN FERORESONANSI DAN HUBUNGAN BELITAN PADA TRANSFORMATOR DAYA.....21
3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi 21
3.2 Pemodelan Transformator Daya 23
3.3 Konfigurasi Hubungan Belitan 25
3.3.1 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Hubungan Belitan Wye – Wye.....25
3.3.2 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Hubungan Belitan Wye – Delta.....26
3.3.3 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Hubungan Belitan Delta - Wye 26
3.3.4 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Hubungan Belitan Delta – Delta.....27
3.4 Rangkaian Feroresonansi dengan Operasi *Switching*.....27
3.5 Pengambilan dan Pengolahan Data.....28
BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA DENGAN INTI BERBEDA 29
4.1 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye 29
4.1.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal 29
4.1.2 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 1) 31
4.1.3 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 2).....32
4.1.4 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye 34
4.2 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta 35
4.2.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal 36
4.2.2 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 1) 37
4.2.3 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 2).....39
4.2.4 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta 40
4.3 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye 42

4.3.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal 42
4.3.2 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 1) 43
4.3.3 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 2) 45
4.3.4 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Konfigurasi Belitan Delta Wye 47
4.4 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta.....48
4.4.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal 48
4.4.2 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 1) 50
4.4.3 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 2) 51
4.4.4 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Konfigurasi Belitan Wye Wye 53
4.5 Analisis Tegangan Puncak Transformator Daya 54
4.6 Analisa Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya ...56
BAB V PENUTUP 59
5.1 Kesimpulan 59
5.2 Saran 60
DAFTAR PUSTAKA 61
LAMPIRAN..... 63
RIWAYAT HIDUP 67

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik 5
Gambar 2.2 Model Transformator Sederhana 9
Gambar 2.3 Kurva Magnetisasi Transformator Daya 10
Gambar 2.4 Rangkaian Ekivalen Transformator 11
Gambar 2.5 Belitan Jenis Wye Pada Transformator 12
Gambar 2.6 Belitan Jenis Wye Pada Transformator 13
Gambar 2.7 Konfigurasi Belitan Jenis Wye - Wye 13
Gambar 2.8 Konfigurasi Belitan Jenis Wye – Delta 14
Gambar 2.9 Konfigurasi Belitan Jenis Delta - Wye 14
Gambar 2.10 Konfigurasi Belitan Jenis Delta - Delta 15
Gambar 2.11 Rangkaian Resonansi Seri serta Hubungan Arus Dan Frekuensi Resonansi 16
Gambar 2.12 Rangkaian Feroresonansi Sederhana Menggunakan ATPDraw 17
Gambar 2.13 Karakteristik Feroresonansi Mode Fundamental 18
Gambar 2.14 Karakteristik Feroresonansi Mode Subharmonik 18
Gambar 2.15 Karakteristik Feroresonansi Mode Quasi-Periodik 19
Gambar 2.16 Karakteristik Feroresonansi Mode Chaotik 19
Gambar 2.17 Mekanisme Terbukanya Circuit Breaker 20
Gambar 3.1 Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik 21
Gambar 3.2 Rangkaian Ekivalen Dari Single Line Diagram 22
Gambar 3.3 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi Dengan Software ATPDraw 22
Gambar 3.4 Kurva Magnetisasi Transformator Daya 24
Gambar 3.5 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye 25
Gambar 3.6 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta 26
Gambar 3.7 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye 26
Gambar 3.8 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta 27
Gambar 3.9 Diagram Alir Pengolahan Data 28
Gambar 4.1 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye 29
Gambar 4.2 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye – Wye pada Kondisi Normal 30

Gambar 4.3 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye – Wye Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer.....31
Gambar 4.4 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye – Wye Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder 32
Gambar 4.5 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye – Wye Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer.....33
Gambar 4.6 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye – Wye Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder.....34
Gambar 4.7 Simulasi Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta 35
Gambar 4.8 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye – Delta pada Kondisi Normal 37
Gambar 4.9 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye – Delta Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer.....38
Gambar 4.10 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye – Delta Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder 38
Gambar 4.11 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye – Delta Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer.....39
Gambar 4.12 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye – Delta Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder.....40
Gambar 4.13 Simulasi Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye.....42
Gambar 4.14 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta – Wye pada Kondisi Normal 43
Gambar 4.15 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer.....44
Gambar 4.16 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder 45

Gambar 4.17 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer 46
Gambar 4.18 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder 46
Gambar 4.19 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta 48
Gambar 4.20 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta – Delta pada Kondisi Normal..... 49
Gambar 4.21 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer 50
Gambar 4.22 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder..... 51
Gambar 4.23 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer 52
Gambar 4.24 Respon Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder 53
Gambar 4.25 Grafik Tegangan Puncak Transformator Daya Pada Sisi Primer 55
Gambar 4.26 Grafik Tegangan Puncak Transformator Daya Pada Sisi Sekunder 56
Gambar 4.27 Karakteristik Feroresonansi di Sisi Primer 57
Gambar 4.28 Karakteristik Feroresonansi di Sisi Sekunder 57

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Rangkaian Pemodelan Feroresonansi 23
Tabel 3.2 Parameter Transformator Daya 23
Tabel 3.3 Parameter Kurva Magnetisasi..... 23
Tabel 3.4 Operasi *Switching* Transformator 3 fasa..... 27
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye di Sisi Primer 34
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye di Sisi Sekunder 35
Tabel 4.3 Karakteristik Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye di Sisi Primer 35
Tabel 4.4 Karakteristik Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye di Sisi Sekunder 35
Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta di Sisi Primer 41
Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta di Sisi Sekunder 41
Tabel 4.7 Karakteristik Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta di Sisi Primer 41
Tabel 4.8 Karakteristik Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta di Sisi Sekunder 41
Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye di Sisi Primer 47
Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye di Sisi Sekunder 47
Tabel 4.11 Karakteristik Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye di Sisi Primer 47
Tabel 4.12 Karakteristik Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye di Sisi Sekunder 48
Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta di Sisi Primer 54
Tabel 4.14 Hasil Pengukuran Tegangan dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta di Sisi Sekunder 54
Tabel 4.15 Karakteristik Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta di Sisi Primer 54
Tabel 4.16 Karakteristik Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta di Sisi Sekunder 54

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tenaga listrik merupakan kebutuhan utama pada masa kini. Listrik hadir dalam setiap kegiatan yang dilakukan oleh masyarakat. Pada umumnya tenaga listrik dihasilkan oleh sebuah pembangkit listrik yang kemudian akan disalurkan kepada para konsumen melalui sistem tenaga listik. Sistem ini dibagi menjadi dua bagian yaitu sistem transmisi dan sistem distribusi. Sistem transmisi berfungsi menyalurkan tenaga listrik yang jaraknya sangat jauh dengan tegangan yang sangat tinggi untuk mengurangi rugi yang muncul akibat adanya impedansi pada saluran. Sedangkan pada sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan daya yang akan terhubung langsung dengan beban.

Agar terjadi penyaluran listrik yang handal, kedua sistem ini menuntut peralatan yang terdapat pada sistemnya untuk bekerja secara optimal. Salah satu peralatan yang harus bekerja secara optimal adalah transformator daya. Transformator daya berfungsi untuk menaikan dan menurunkan tegangan untuk menstabilkan penyaluran tenaga listrik. Jika terdapat masalah pada transformator, maka penyaluran daya akan terhambat pula. Transformator daya mendapatkan perhatian khusus karena merupakan peralatan penting dalam sistem penyaluran tenaga listrik agar dapat terus bekerja secara optimal [1].

Transformator umumnya memiliki 2 atau lebih kumparan. Kumparan yang terhubung dengan sumber tegangan merupakan kumparan primer, sedangkan yang terhubung dengan beban merupakan kumparan sekunder. Sambungan tiap fasa dari transformator dapat menentukan jenis konfigurasi belitan pada transformator itu sendiri. Pada umumnya belitan tranformator adalah belitan jenis Wye (Y) dan Delta (Δ). Dari kedua belitan ini dapat dikombinasikan menjadi berbagai konfigurasi belitan sehingga memiliki perbedaan karakteristik pada transformator tersebut. Hal ini dapat terjadi karena adanya perbedaan tegangan yang tersalurkan akibat perbedaan konfigurasi belitan pada transformator [2].

Salah satu bagian penting dari transformator adalah inti besi yang berfungsi untuk menyalurkan flux dari belitan primer ke belitan sekunder dan terbuat dari bahan ferromagnetik. Inti besi ini merupakan komponen induktansi nonlinear yang dapat juga merepresentasikan kurva histerisis. Terdapat dua area pada kurva histerisis, yaitu daerah kerja

transformator dan daerah saturasi. Pada saat terjadi gangguan transient maka transformator akan bekerja pada daerah saturasinya [2].

Istilah resonansi pada transformator pertama kali dibahas dalam sebuah literatur tahun 1907 oleh J. Bethenod. Selanjutnya konsep feroresonansi mulai digunakan pada tahun 1920 [3] oleh Paul Boucherot dan dianggap sebagai fenomena karena ketidakpastian dan kurangnya pemahaman. Hal ini dikarenakan sinyal gangguan feroresonansi sulit dibedakan dengan sinyal gangguan lainnya. Feroresonansi dapat muncul dalam sistem tenaga listrik yang memiliki komponen induktansi nonlinear, kapasitansi, sumber tegangan AC dan dipicu oleh beberapa kondisi seperti *switching* pada *circuit breaker*, gangguan petir, dan gangguan *short circuit*. Fenomena ini yang dapat mengakibatkan adanya lonjakan nilai tegangan yang tersalurkan sehingga bersifat berbahaya bagi peralatan listrik dan berujung pada menurunnya tingkat keandalan dari sistem tenaga listrik tersebut [4].

Dalam studi ini akan dibahas mengenai fenomena feroresonansi dengan melakukan pemodelan simulasi terhadap transformator daya pada sistem tenaga listrik. Masalah pada studi ini dibatasi pada analisis kemunculan fenomena feroresonansi yang mungkin terjadi pada konfigurasi belitan jenis Wye – Wye (Y-Y), Wye – Delta (Y-Δ), Delta – Wye (Δ-Y), dan Delta - Delta (Δ-Δ) [2]. Transformator daya yang digunakan adalah transformator *step down* 150 kV – 20 kV dan diberlakukan *switching* yang tidak serempak sebagai pemicu gangguannya. *Switching* yang tidak serempak diakibatkan oleh kerusakan pada *circuit breaker*.

Tujuan yang ingin dicapai dari studi ini adalah untuk mendapatkan karakteristik feroresonansi dan *overvoltage* yang dihasilkan dari perbedaan konfigurasi belitan transformator terhadap pemicu *switching* yang tidak serempak pada gardu induk berdasarkan plot hasil tegangan yang diperoleh. Sehingga dapat diketahui konfigurasi belitan yang tahan maupun rentan terhadap pengaruh feroresonansi agar dapat melakukan pemilihan penggunaan konfigurasi belitan yang tepat, efektif, dan efisien bagi penyaluran tenaga listrik.

Metode yang digunakan dalam studi ini adalah melakukan studi literatur serta pengumpulan data mengenai feroresonansi dan metode umum yang biasa digunakan untuk menganalisis. Kemudian menentukan parameter dari komponen yang akan digunakan dalam rangkaian pemodelan, seperti nilai kapasitansi, nilai induktansi nonlinear, nilai resistansi dari suatu sistem, serta *setting* waktu pada tiap *switching* saat

terbuka. Langkah berikutnya adalah melakukan pemodelan rangkaian simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Setelah rangkaian pemodelan disimulasikan, akan dilakukan analisis terhadap hasil keluaran dari simulasi tersebut berupa grafik fungsi tegangan terhadap waktu sebagai rujukan untuk menarik kesimpulan studi ini.

1.2 Sistematika Penulisan

Bab satu berisi tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, manfaat, relevansi dari penulisan pada studi ini.

Bab dua berisi teori penunjang yang membahas mengenai sistem tenaga listrik khususnya sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik, feroresonansi, transformator, serta konfigurasi belitannya.

Bab tiga berisi teori-teori feroresonansi pada sistem tenaga listrik serta pemodelan simulasi rangkaian feroresonansi dengan meninjau pada empat macam konfigurasi belitan transformator distribusi ketika diberlakukan operasi *switching* yang tidak serempak, simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ATPDraw.

Bab empat berisi hasil dari simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi yang telah dilakukan berdasarkan parameter yang telah ditentukan sebelumnya yang kemudian akan dilakukan analisis terhadap kemunculan feroresonansi pada tiap rangkaian pemodelan tersebut.

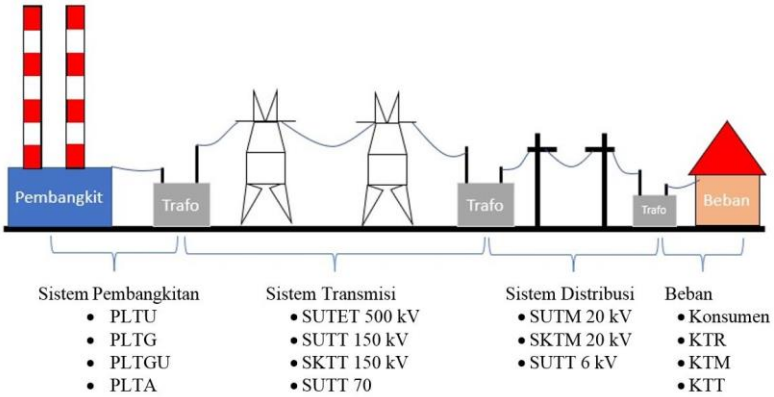
Bab lima berisi kesimpulan dari simulasi dan analisis yang dilakukan melalui sebuah rangkaian pemodelan feroresonansi dan saran untuk penelitan atau studi selanjutnya.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB II
TRANSFORMATOR DAN FERORESONANSI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan sebuah sistem yang terdiri dari sebuah pembangkit listrik, gardu induk, serta beban listrik yang saling terhubung. Sistem ini membuat sebuah interkoneksi untuk menyalurkan daya listrik. Sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi 3 bagian, yaitu pembangkit, sistem transmisi, dan sistem distribusi [5]. Sistem tenaga listrik dapat digambarkan seperti gambar di bawah.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik dibangkitkan oleh pembangkit akan disalurkan oleh sistem transmisi ke gardu induk yang nantinya akan disalurkan kembali ke pembebanan melalui sistem distribusi. Setiap melewati sistem transmisi maupun distribusi, energi listrik akan melewati sebuah transformator untuk merubah lebel tegangannya. Energi listrik yang disalurkan pastinya terdapat rugi yang dapat mengurangi daya yang disalurkan. Jarak yang jauh dari sebuah pembangkit ke beban menyebabkan penurunan tegangan. Hal ini dikarenakan sebuah konduktor atau kabel yang digunakan memiliki resistansi sehingga menjadi salah satu penyebab turunnya tegangan.

2.1.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Sistem transmisi tenaga listrik merupakan saluran penghubung antara sistem pembangkit listrik dengan sistem distribusi. Saluran ini dapat mempertemukan antara pembangkit satu dengan pembangkit lainnya. Gambar 2.1 menunjukkan sebuah sistem tenaga listrik sederhana.

Ketika sistem tenaga listrik beroperasi, akan terdapat rugi daya [6]. Rugi daya pada sistem transmisi AC tiga fasa dapat dihitung mengguanakan rumus berikut:

$$\Delta P = 3\, I^2 R \qquad (2.1)$$

Dimana:

ΔP = Rugi daya pada transmisi AC tiga fasa (Watt)
I^2 = Arus pada kawat transmisi (Ampere)
R = Resistansi kawat transmisi tiap fasa (Ω)

Sistem transmisi dapat diklasifikasikan berdasarkan pemasangannya dan nilai tegangannya. Berdasarkan tempat pemasangannya, sistem transmisi terbagi menjadi tiga, yaitu saluran udara, saluran SF_6, dan saluran bawah tanah. Sedangkan berdasarkan level tegangannya, sistem transmisi dapat dibedakan menjadi menjadi:

a. Saluran Udara Tegangan Esktra Tinggi (SUTET)
   Saluran ini memiliki interval tegangan 200-500 kV. Saluran ini digunakan untuk penyaluran daya dengan kapasitas di atas 500 MW. Saluran ini memiliki tegangan yang sangat tinggi dengan tujuan meminimalisir drop tegangan. Saluran transmisi ini digunakan untuk jarak 100 km sampai dengan 500 km.
b. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT)
   Saluran ini memiliki interval tegangan 30-150 kV. Saluran ini memiliki konfigurasi *single* atau *double circuit*. Pada saluran ini biasanya memiliki dua hingga empat konduktor tiap fasanya yang dihubungkan dengan bundle konduktor. Hal ini dapat membuat saluran menyalurkan daya listrik yang cukup besar. Saluran transmisi ini digunakan untuk jarak kurang dari 100 km.

2.1.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem Distribusi tenaga listrik berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik ke konsumen melalui sistem tegangan menengah hingga tegangan rendah. Berdasarkan nilai tegangannya sistem distribusi tenaga listrik dapat dibagi menjadi 2, yaitu; jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder.

2.1.2.1 Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit ke pusat pusat beban atau bahkan langsung disalurkan ke pengguna seperti industri. Level tegangan yang digunakan pada jaringan distribusi primer adalah 20 kV, 12 kV, dan 6kV. Namun level tegangan yang dikembangkan dan digunakan PLN adalah sebesar 20 kV. Level tegangan diatas 20 kV tidak cocok digunakan pada daerah perkotaan karena berpotensi menimbulkan gejala gejala seperti korona yang dapat mengganggu frekuensi radio, TV, maupun telekomunikasi lainnya [7].

2.1.2.2 Jaringan Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder merupakan jaringan distribusi primer yang tegangannya sudah diturunkan oleh gardu pembagi. Gardu pembagi adalah sebuah transformator daya jenis *step down* yang menurunkan tegangan pada jaringan distribusi primer menjadi tegangan dengan level 380/220 V. Tegangan 380 merupakan nilai tegangan antar fasa dengan fasa, sedangkan 220 merupakan nilai tegangan antar fasa dengan netral [7].

2.2 Transformator

2.2.1 Pengertian Transformator

Transformator adalah sebuah peralatan listrik statis yang mengubah tegangan AC dari sebuah *level* ke *level* lainnya dalam satu frekuensi dengan memanfaatkan medan magnet [2]. Transformator terdiri dari dua atau lebih kumparan kawat yang melilit sebuah inti besi dengan bahan ferromagnetik. Kumparan ini tidak langsung terhubung. Satu-satunya hubungan diantara kumparan ini adalah flux magnetik yang disalurkan melalui inti besi. Salah satu belitan transformator terhubung dengan sumber tegangan AC dan belitan yang kedua memasok daya listrik ke beban. Belitan transformator yang terhubung dengan sumber

biasa disebut dengan belitan primer atau belitan *input*, sedangkan belitan yang terhubung ke beban merupakan belitan sekunder atau belitan *output*.

Pada sistem tenaga listrik, transformator menjadi sangat penting karena pada saat energi listrik dibangkitkan nilai tegangannya rendah. Hal ini mengakibatkan keterbatasan arus yang dapat disalurkan karena semakin besar nilai arusnya maka penurunan tegangan akan semakin besar. Selain itu, rugi karena arus juga akan semakin besar apabila jarak yang ditempuh dari sumber listrik hingga ke pusat pembebanan semakin jauh [6]. Berdasarkan keterbatasan inilah menunjukan pentingnya transformator pada sebuah sistem tenaga listrik. Transformator dapat menurunkan kerugian akibat jarak karena nilai tegangan dari sistem pembangkitan dinaikan dan kembali diturunkan saat akan memasuki pembebanan.

Transformator diklasifikasikan berdasarkan daya keluaran yang mampu dihantarkan pada rating tegangan dan frekuensi tertentu dibawah kondisi operasi normal tanpa melewati batasan temperatur transformator yang telah ditentukan. Temperatur yang diijinkan isolator saat kondisi operasi sangat penting untuk menentukan *output* rating dari transformator (rating kVA). Transformator didisain untuk membatasi temperatur berdasarkan besar beban, termasuk rata-rata kenaikan temperatur dari belitan, dan kenaikan temperatur minyak [8].

Menurut kapasitasnya, transformator dapat diklasifikasikan sebagai berikut (*U.S. rating*) :

1. Transformator daya kecil; 500 – 7500 kVA
2. Transformator daya menengah; 7500 kVA – 100 MVA
3. Transformator daya besar; diatas 100 MVA

2.2.2 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja dari transformator melibatkan bagian-bagian utama seperti kumparan dan intri besi. Apabila kmparan pada sisi primer dihubungkan dengan sumber tegangan AC, maka akan mengalir arus AC pada kumparan tersebut. Arus ini akan menimbulkan fluks magnetik di sekeliling kumparan. Inti besi pada transformator berfungsi untuk menyalurkan fluks magnetik yang dihasilkan dari kumparan sehingga mengurangi rugi akibat fluks bocor. Fluks yang mengalir di inti besi nantinya akan membangkitkan tegangan induksi pada sisi sekunder transformator [2].

Tegangan induksi yang terbangkitkan pada kumparan transformator berbanding lurus dengan jumlah lilitan kumparan pada inti

transformator. Selain itu, tegangan induksi dapat terbangkit apabila terdapat perubahan fluks terhadap waktu, jika fluks yang mengalir konstan maka tegangan induksi tidak dapat dibangkitkan. Sehingga transformator tidak dapat bekerja apabila diberi sumber tegangan DC.

Kekuatan medan magnet dipengaruhi oleh besarnya arus listrik. Semakin besar arus listrik maka semakin besar juga medan magnetnya. Fluktuasi medan magnet ini yang nantinya akan menginduksi GGL (Gerak Gaya Listrik) dalam kumparan sekunder. Prinsip kerja transformator ini sesuai dengan Hukum Faraday. Hukum Faraday menyatakan bahwa pada rangkaian tertutup, nilai gaya gerak listrik induksi sama dengan *negative rate* perubahan fluks terhadap waktu [2]. Berdasarkan hukum faraday tersebut didapatkan persamaan sebagai berikut:

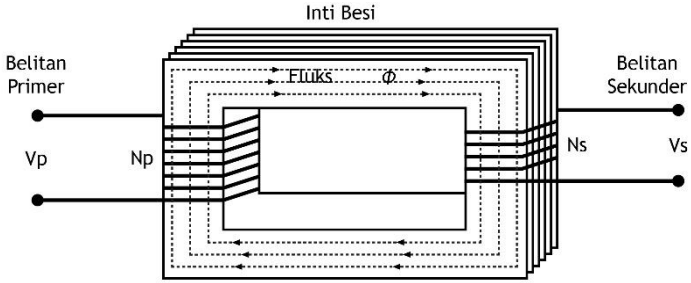
$$\lambda = \sum_{i=1}^{N} \phi_I \tag{2.2}$$

$$\phi = \frac{\lambda}{N} \tag{2.3}$$

$$e = -N\frac{d\phi}{dt} \tag{2.4}$$

dimana:

λ = Total fluks linkage
ϕ = Fluks
$d\phi$ = Perubahan garis-garis gaya magnet (Webber)
dt = Perubahan waktu (s)
N = Jumlah belitan
e = GGL induksi (Volt)



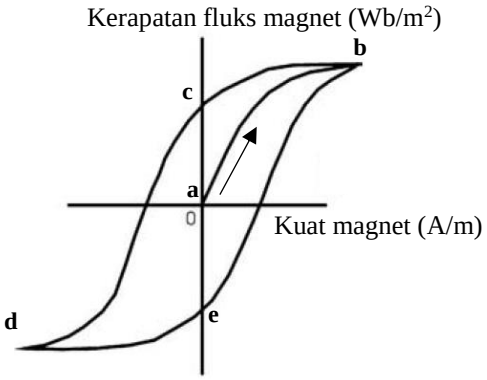
Gambar 2.2 Model Transformator Sederhana

2.2.3 Kurva Magnetisasi Transformator

Kurva histerisis merupakan kurva yang menunjukkan bahwa terdapat ketidaklinieran pada inti transformator karena adanya proses magnetisasi dan demagnetisasi. Saat kumparan primer diberi sumber AC, maka akan muncul arus walaupun kumparan sekunder sedang tidak dibebani. Arus ini terbagi menjadi dua, yaitu:

1. Arus magnetisasi i_M, merupakan arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks di inti trafo
2. Arus akibat rugi inti besi, merupakan arus yang ditimbulkan akibat histerisis dan *eddy current* pada inti trafo

Kurva di bawah merupakan representasi dari karakteristik magnetisasi inti transformator yang ditunjukan oleh perbandingan antara kerapatan fluks magnet (B) dan kuat magnet (H). Pada kurva di bawah, rentang a sampai b merupakan kondisi awal sebuah transformator ketika diberi sumber tegangan AC. Nilai kerapatan fluks akan naik hingga mencapai nilai saturasinya. Saat nilai arus menurun maka nilai kerapatan juga ikut menurun namun tidak mengikuti jalur awal, melainkan melewati titik b-c-d yang diakibatkan oleh adanya fluks sisa pada inti transformator. Saat nilai arus dinaikan kembali maka nilai kerapatan fluks akan naik namun melalui jalur d-e-b, hal tersebut juga merupakan akibat dari adanya fluks sisa pada inti transformator. Fluks sisa ini dipengaruhi oleh permeabilitas inti transformator. Sedangkan permeabilitas inti dipengaruhi oleh bahan material dari inti transformator itu sendiri. Semakin baik bahan material inti transformator maka kurva histerisis akan semakin rapat atau cenderung linear [2].



Gambar 2.3 Kurva Magnetisasi Transformator Daya

2.2.4 Rangkaian Ekivalen Transformator

Pada transformator terdapat beberapa rugi yang harus diperhitungkan pada pemodelan transformator [2]. Rugi tersebut adalah:

a. Rugi belitan

Rugi belitan adalah rugi yang diakibatkan oleh panas akibat arus yang mengalir pada belitan itu sendiri. Nilainya adalah kuadrat arus dikali dengan nilai resistansi dari belitan itu sendiri.

b. Rugi arus eddy

Rugi arus eddy merupakan rugi panas resistif pada inti transformator.

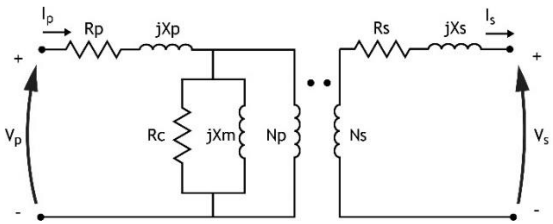
c. Rugi histerisis

Rugi histerisis berhubungan dengan kurva magnetisasi dari inti.

d. Rugi fluks bocor

Fluks bocor merupakan ϕ_{LP} dan ϕ_{LS} yang keluar dari inti dan hanya melewati satu belitan transformator. Hal ini dapat mengakibatkan induktansi mutual pada belitan primer dan sekunder.

Seperti yang dijelaskan pada rugi transformator, pemodelan rangkaian ekivalen bermula dari pemodelan rugi transformator. Rugi belitan dimodelkan sebagai resistansi pada sisi primer R_P dan resistansi pada sisi sekunder R_S. Fluks bocor pada belitan primer ϕ_{LP} dan belitan sekunder ϕ_{LS} dimodelkan dengan induktor pada sisi primer dan sekunder. Efek eksitasi dimodelkan sebagai X_M dan R_C. Pemodelan efek eksitasi diletakkan antara resistansi primer R_P dan induktansi primer L_P. Hal ini dikarenakan tegangan pada inti transformator merupakan tegangan yang disupplai ke transformator. Gambar 2.4 menunjukkan pemodelan akurat dari transformator.



Gambar 2.4 Rangkaian Ekivalen Transformator

2.3 Hubungan Transformator 3 Fasa

2.3.1 Hubungan Bintang (Y)

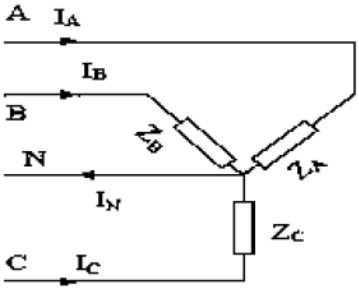
Hubungan bintang atau Wye pada transformator memiliki ujung belitan pada tiap fasa transformator yang saling terhubung [2]. Titik penyatuan ini merupakan titik netral dari transformator itu sendiri. Arus dan tegangan yang diperoleh dari hubungan Wye adalah sebagai berikut.

$I_A = I_B = I_C = I_L$ (2.5)

$I_L = I_{ph}$ (2.6)

$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L}$ (2.7)

$V_{L-L} = \sqrt{3} V_{ph}$ (2.8)



Gambar 2.5 Belitan Jenis Wye Pada Transformator

2.3.2 Hubungan Delta (Δ)

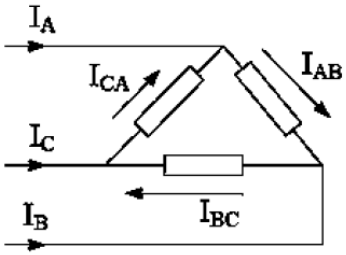
Hubungan segitiga atau Delta memiliki penyambungan dengan ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung awal lilitan fasa kedua, ujung akhir lilitan fasa kedua disambung dengan ujung awal lilitan fasa ketiga, dan ujung akhir lilitan ketiga disambung dengan ujung awal dari lilitan fasa pertama [2]. Penyambungan in akan memiliki bentuk segitiga. Arus dan tegangan yang diperoleh dari hubungan *delta* adalah sebagai berikut.

$I_A = I_B = I_C = I_L$ (2.9)

$I_L = \sqrt{3} I_{ph}$ (2.10)

$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L}$ (2.11)

$V_{L-L} = V_{ph}$ (2.12)



Gambar 2.6 Belitan Jenis Wye Pada Transformator

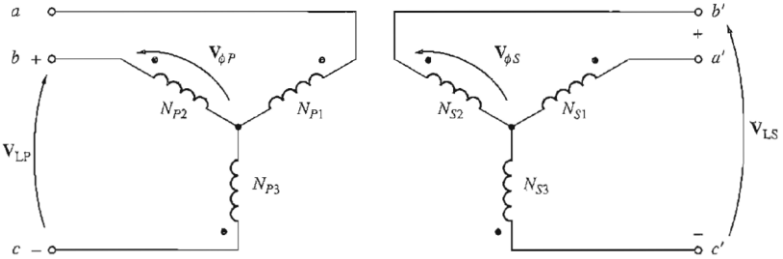
2.4 Konfigurasi Belitan Transformator 3 Fasa

Pada transformator tiga fasa, tiga buah lilitan fasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubung dalam bermacam-macam jenis hubungan, hal ini yang dinamakan konfigurasi belitan transformator tiga fasa. Kombinasi dari kedua sisi kumparan ini dapat bermacam-macam, seperti Wye – Wye, Wye – Delta, Delta – Wye, Delta – Delta [2].

2.4.1 Hubungan Wye - Wye

Transformator hubungan ini memiliki rasio tegangan fasa-fasa (LL) pada primer dan sekunder adalah sama dengan rasio setiap transformator dengan pergeseran fasa sebesar 30° antara fasa-netral (LN) dan tegangan fasa-fasa (L-L) pada sisi primer dan sekundernya. Adapun perbandingan tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan ini yaitu:

$$\frac{V\mathrm{Lp}}{\mathrm{VLs}} = \frac{\sqrt{3}\mathrm{Vphp}}{\sqrt{3}\ \mathrm{Vphs}} \tag{2.13}$$

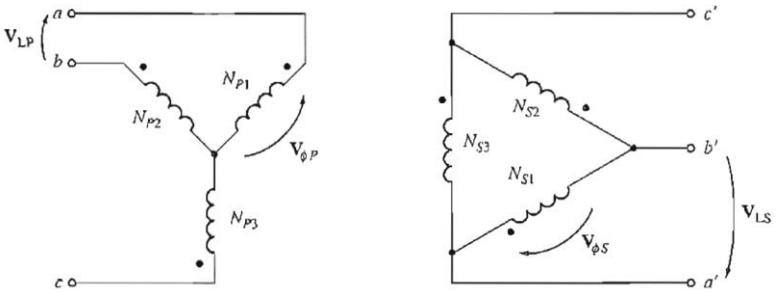


Gambar 2.7 Konfigurasi Belitan Jenis Wye - Wye

2.4.2 Hubungan Wye - Delta

Transformator hubungan ini memiliki rasio tegangan fasa-fasa antara sekunder dan primer sebesar 1/√3 kali rasio setiap transformator dengan sudut antara tegangan fasa-fasa antara primer dan sekunder sebesar 30°. Adapun perbandingan tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan ini yaitu:

$$\frac{\mathrm{VLp}}{\mathrm{VLs}} = \frac{\sqrt{3}\mathrm{Vphp}}{\mathrm{Vphs}} \tag{2.14}$$

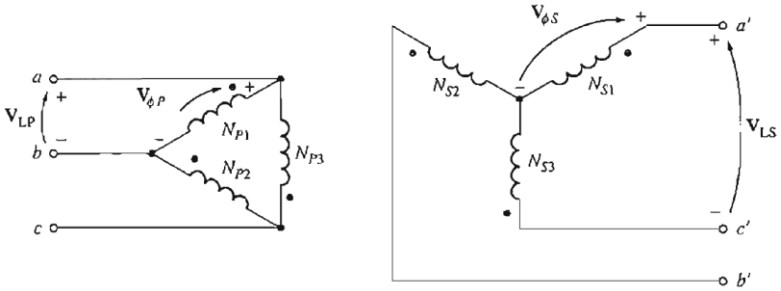


Gambar 2.8 Konfigurasi Belitan Jenis Wye – Delta

2.4.3 Hubungan Delta - Wye

Transformator hubungan ini biasa digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan transmisi ke tegangan rendah. Adapun perbandingan tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan ini yaitu:

$$\frac{\mathrm{VLp}}{\mathrm{VLs}} = \frac{\mathrm{Vphp}}{\sqrt{3}\mathrm{Vphs}} \tag{2.15}$$

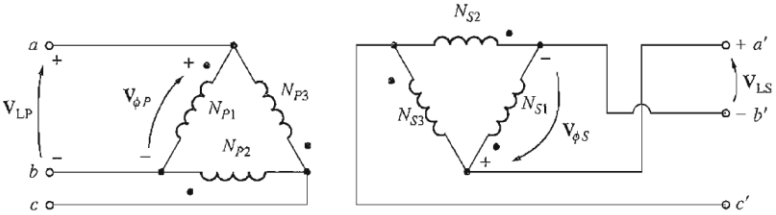


Gambar 2.9 Konfigurasi Belitan Jenis Delta - Wye

2.4.4 Hubungan Delta - Delta

Transformator hubungan ini memiliki tegangan fasa-fasa yang sama untuk sisi primer dan sekundernya. Adapun perbandingan tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan ini yaitu:

$$\frac{\text{VLp}}{\text{VLs}} = \frac{\text{Vphp}}{\text{Vphs}} \tag{2.16}$$



Gambar 2.10 Konfigurasi Belitan Jenis Delta - Delta

2.5 Feroresonansi

2.5.1 Pengertian Resonansi

Resonansi merupakan sebuah gejala yang dapat ditemui pada sistem tenaga listrik dengan sumber tegangan AC. Resonansi terjadi pada sistem yang mengandung elemen Resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C). Resonansi terjadi saat frekuensi sistem sama dengan frekuensi resonansi sehingga nilai $X_C = X_L$.

Maka nilai frekuensi resonansi akan menjadi seperti persamaan berikut:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.16}$$

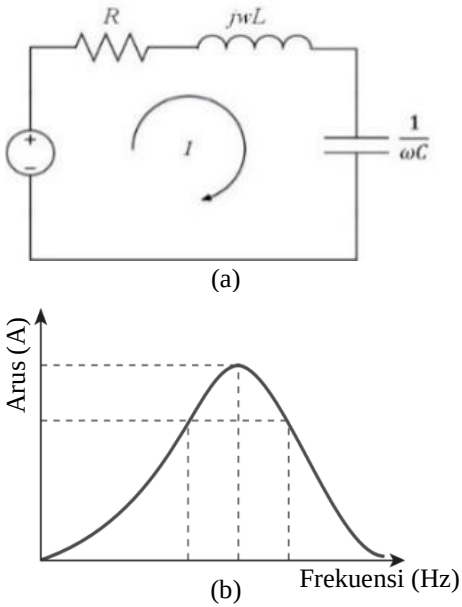
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{2.17}$$

Dimana:

X_C = Reaktansi Kapasitif (Ω)
X_L = Reaktansi Induktif (Ω)
L = Induktor (Henry)
C = Kapasitor (Farad)
Z = Impedansi (Ω)
R = Resistansi (Ω)
X = Reaktansi (Ω)

Nilai Z akan mencapai nilai minimum karena nilai reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif akan saling menghilangkan dan akan

menyisakan nilai resistor saja. Kondisi ini dapat menyebabkan sistem teraliri dengan arus berlebih karena sistem bersifat resistif.

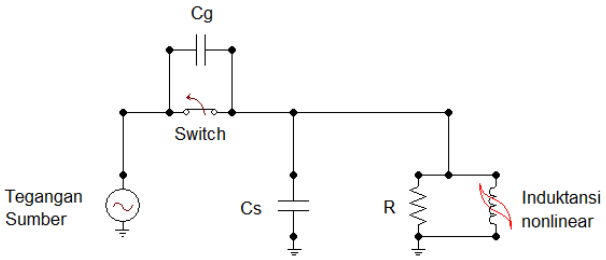


Gambar 2.11 Resonansi Seri (a) Rangkaian Resonansi Seri (b) Hubungan Arus Dan Frekuensi Resonansi

2.5.2 Pengertian Feroresonansi

Ferroresonansi merupakan fenomena transien yang terjadi pada sitem tenaga listrik serta memiliki elemen kapasitor, sumber tegangan AC sinusoidal, induktansi nonlinier, dan nilai rugi sistem yang rendah. Ferroresonansi dapat terjadi ketika dipicu oleh kondisi tertentu seperti hubung singkat, petir, dan *switching* [4]. Ferroresonansi dapat terjadi di sistem tenaga listrik karena memiliki komponen induktansi nonlinier yang diperoleh dari penggunaan trafo daya, trafo pengukuran, dan reaktor shunt. Sedangkan elemen kapasitor didapat dari kabel, *capacitor bank* dan operasi *switching* pada *circuit breaker*.

Perpaduan dari kondisi tersebut menyebabkan terjadinya osilasi pada tegangan sumber. Osilasi ini menyebabkan sistem mengalami kondisi berupa tegangan lebih yang berpotensi merusak peralatan listrik.



Gambar 2.12 Rangkaian Feroresonansi Sederhana Menggunakan ATPDraw

2.5.3 Perbedaan Resonansi dengan Feroresonansi

Perbedaan utama dari feroresonansi dan resonansi adalah pada nilai ω. Kemungkinan resonansi terjadi pada *range* nilai kapasitansi yang luas sedangkan pada feroresonansi terjadi pada nilai tertentu. Resonansi membutuhkan elemen indukatansi dan kapasitansi, sedangkan feroresonansi membutuhkan elemen induktansi nonlinier dan kapasitansi. Pada resonansi frekuensi sinyal tegangan dan arusnya sama dengan sumber, sedangkan feroresonansi frekuensi sinyal tegangan dan arusnya dapat berbeda dengan frekuensi sumber. Respon frekuensi arus dan tegangan pada resonansi terjadi pada hanya satu kondisi *steady state*, sedangkan pada feroresonansi dapat terjadi pada berbagai kondisi *steady state* [9].

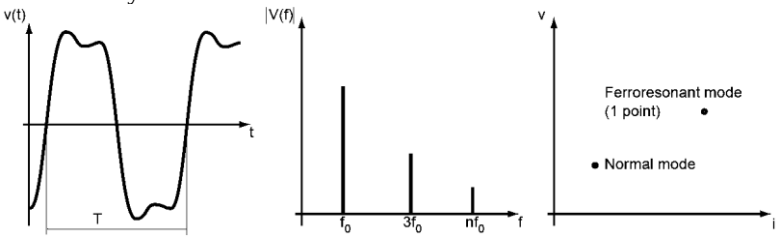
2.5.4 Klasifikasi Feroresonansi

Berdasarkan ketidakliniearan dari sirkuit feroresonansi, maka terdapat beberapa macam respon *steady state* yang diinduksi secara acak pada sistem [4]. Secara umum terdapat empat macam mode *steady state*, yaitu:

a. Mode Fundamental

Sinyal tegangan memiliki periode yang sama dengan periode sistem. Sinyal spectrum frekuensinya tediri dari frekuensi dasar sebagai komponen utamanya dan diikuti oleh harmonisa orde

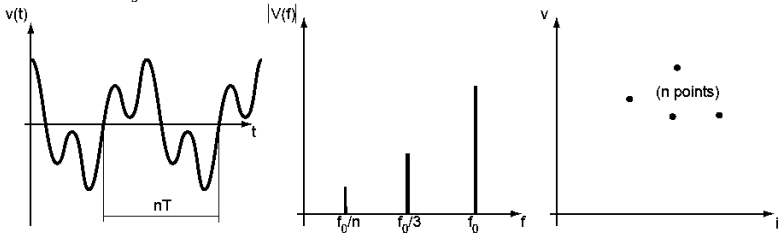
ganjil seperti 3, 5, 7 dan n. Gambar 2.10 menunjukkan respon sinyal feroresonansi mode fundamental.



Gambar 2.13 Karakteristik Feroresonansi Mode Fundamental [4]

b. Mode Subharmonik

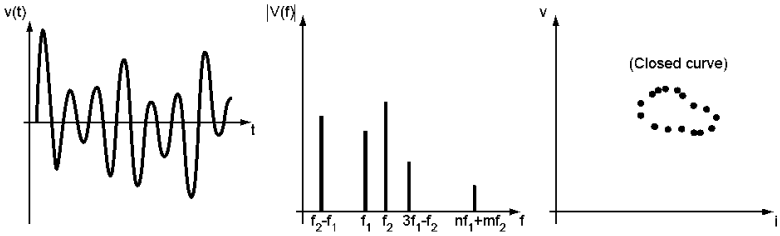
Pada mode ini periode sinyal tegangannya dua kali dari periode sinyal tegangan sumber. Mode fundamental biasanya disebut dengan periode 1 dan pada mode subharmonic disebut sebagai periode n. Dengan kata lain, isi dari frekuensinya adalah spektrum frekuensi yang nilainya sama dengan f_0/n dimana f_0 adalah frekuensi fundamental dan n adalah integer dan disertai tingkat harmonik tertentu. Gambar 2.11 menunjukkan respon sinyal feroresonansi mode fundamental.



Gambar 2.14 Karakteristik Feroresonansi Mode Subharmonik [4]

c. Mode Quasi-periodik

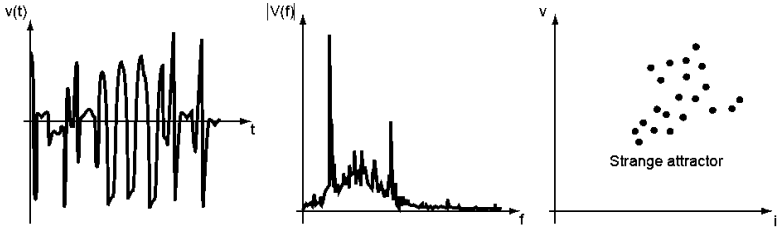
Sinyal tegangan dari mode ini tidak periodik. Spektrum sinyal frekuensinya termasuk diskontinyu dengan frekuensinya didefinisikan sebagai $nf_1 + mf_2$, dimana n dan m adalah integer dan f_1/f_2 adalah bilangan asli yang tidak rasional. Gambar 2.12 menunjukkan respon sinyal feroresonansi mode quasi-periodik.



Gambar 2.15 Karakteristik Feroresonansi Mode Quasi-Periodik [4]

d. Mode Chaotik

Sinyal tegangan dan arus pada mode chaotik adalah diskontinu dan non-periodik. Respon sinyal yang terbentuk tidak beraturan, tidak dapat diprediksi dan diinterupsi oleh frekuensi apapun. Gambar 2.13 menunjukkan respon sinyal feroresonansi mode chaotik.



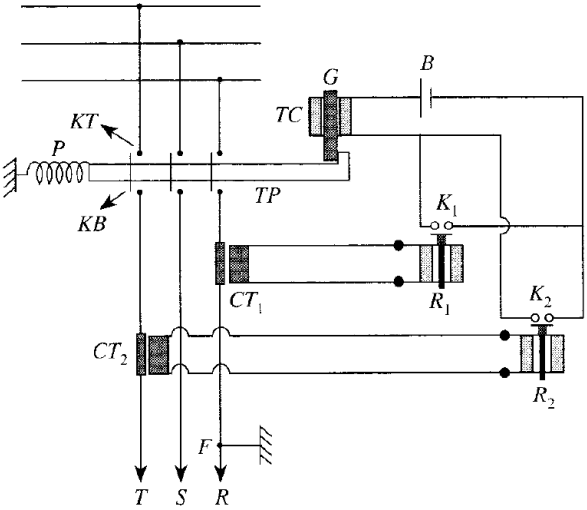
Gambar 2.16 Karakteristik Feroresonansi Mode Chaotik [4]

2.6 *Switching* yang Tidak Serempak

PMT atau *circuit breaker* bekerja dengan memanfaatkan relai proteksi. Relai berfungsi untuk merasakan arus gangguan yang dibaca oleh *current transformer* (CT) sehingga saat saat terjadi gangguan, relai proteksi ini akan bekerja dengan memberi suplai pada *tripping coil*. *Tripping coil* yang tersambung dengan sumber DC ini nantinya akan menggerakan kontak utama dari PMT [1]. Jika salah satu komponen dari peralatan proteksi terganggu maka kegagalan kerja proteksi dapat terjadi sehingga menyebabkan *circuit breaker* gagal terbuka secara serempak atau bahkan tidak terbuka sama sekali. Kegagalan kerja proteksi dapat disebabkan oleh:

1. Relai rusak
2. *Setting* relai tidak benar
3. Power suplai DC tidak ada atau hilang

4. Gangguan mekanis pada *tripping coil*
5. *Current Transformer* tidak jenuh pada arus gangguan
6. Kesalahan pengawatan *wiring* pada *tripping coil*



Gambar 2.17 Mekanisme Terbukanya *Circuit Breaker* [1]

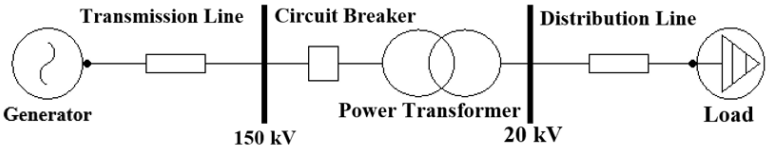
Dimana:

P	= Pegas
KI	= Kontak tetap pemutus daya
KB	= Kontak bergerak pemutus daya
TP	= Tungkai kontak bergerak
TC	= Kumparan pemutus
G	= Tungkai kumparan pemutus
CT	= Trafo arus
R	= Relai arus lebih
K	= Kontak relai
B	= Sumber arus searah

BAB III
PEMODELAN RANGKAIAN FERORESONANSI DAN HUBUNGAN BELITAN PADA TRANSFORMATOR DAYA

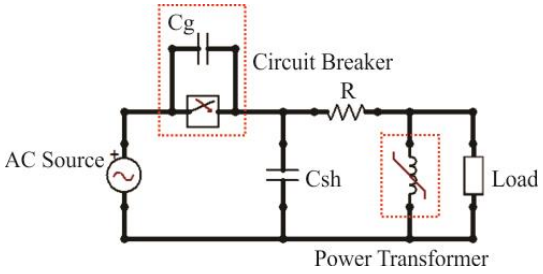
3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

Pemodelan rangkaian feroresonansi dengan tipe belitan yang berbeda dapat disimulasikan dengan software ATPDraw (*Alternative Transient Program*). Pada pemodelan rangkaian feroresonansi terdapat dua kondisi yang dilakukan, yaitu pada kondisi *trigger switching* yang tidak serempak serta keadaan pada saat normal sebagai variabel pembanding. Pemodelan rangkaiannya dapat dilihat pada gambar.



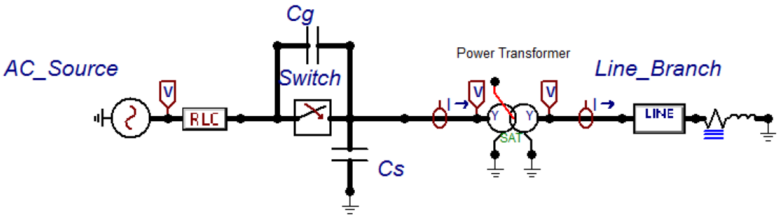
Gambar 3.1 *Single Line Diagram* Sistem Tenaga Listrik

Pada rangkaian pemodelan, fokusannya terdapat pada *trigger switching* yang tidak serempak. Kondisi *trigger switching* yang tidak serempak juga akan dikombinasikan dengan konfigurasi belitan transformator yang berbeda-beda, sehingga didapatkan respon feroresonansinya. Pemodelan pada gambar di atas dapat disederhanakan menjadi rangkaian ekivalen feroresonansi seperti gambar di bawah. Pada rangkaian ekivalen feroresonansi terdapat elemen-elemen seperti *switching*, resistansi, kapasitansi, serta induktansi non-linier. Komponen *switching* merepresentasikan *circuit breaker* pada sistem. Komponen resistansi merepresentasikan rugi pada jaringan. Komponen kapasitansi dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu Cg dan Csh. Cg muncul ketika terjadi operasi *switching* pada *circuit breaker*, sedangkan Csh merupakan kapasitansi yang muncul karena adanya komponen kapasitansi pada saluran transmisi. Induktansi non linier merupakan representasi dari inti transformator.



Gambar 3.2 Rangkaian Ekivalen Dari *Single Line Diagram*

Pemodelan rangkaian feroresonansi dilakukan pada sistem tenaga listrik yang meliputi sistem transmisi dan juga sistem distribusi sehingga melingkupi komponen komponen utama seperti sumber tegangan 150 kV, resistor, kapasitor, *switch*, dan induktansi nonlinier. Tujuan dari pemodelan rangkaian feroresonansi ini adalah untuk melihat respon tegangan dari perbedaan hubungan belitan transformator dengan *trigger switching* yang tidak serempak akibat feroresonansi pada transformator daya. Parameter yang diubah dari pemodelan rangkaian feroresonansi ini adalah hubungan belitan transformator daya yang merupakan kombinasi antara belitan Wye dan Delta serta waktu dari *trigger switching* yang tidak serempak. Di bawah ini merupakan pemodelan rangkaian feroresonansi menggunakan software ATPDraw dan juga tabel dari parameter yang digunakan pada sistem



Gambar 3.3 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi Dengan Software ATPDraw

Tabel 3.1 Parameter Rangkaian Pemodelan Feroresonansi

Parameter	Satuan	Nilai
Sumber Tegangan	kV	150
Frekuensi	Hz	50
Grading Capacitance (C_{g1}, C_{g2}, C_{g3})	µF	0,05
Shunt Capacitance (C_{s1}, C_{s2}, C_{s3})	µF	0,2

3.2 Pemodelan Transformator Daya

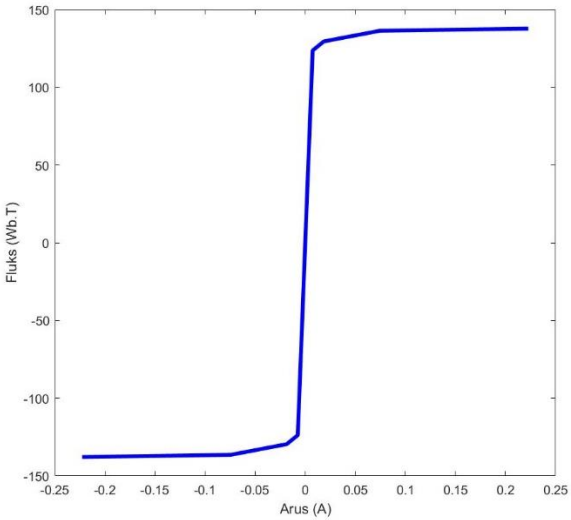
Transformator yang digunakan pada studi ini adalah transformator penurun tegangan tiga fasa dengan rating tegangan 150 kV / 20 kV. Parameter transformator yang digunakan berdasarkan referensi yang ada adalah sebagai berikut.

Tabel 3.2 Parameter Transformator Daya

Parameter	Satuan	Nilai
Resistansi Primer	Ω	0,913
Induktansi Primer	mH	130,85
R Magnetisasi	Ω	6500000
Resistansi Sekunder	Ω	0,02078
Induktansi Sekunder	mH	2,978

Tabel 3.3 Parameter Kurva Magnetisasi

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



Gambar 3.4 Kurva Magnetisasi Transformator Daya [10]

Kurva magnetisasi transformator daya dapat direpresentasikan menjadi komponen Xm dengan persamaan berikut [2].

$$e = \frac{d\phi}{dt} \tag{3.1}$$

$$e = L\,\frac{dI}{dt} \tag{3.2}$$

$$L\,\frac{dI}{dt} = \frac{d\phi}{dt} \tag{3.3}$$

$$L = \frac{d\phi}{dI} \tag{3.4}$$

Sehingga nilai Xm adalah:

$$\mathrm{Xm} = j\omega\,\frac{d\phi}{dI} \tag{3.5}$$

Dari persamaan 3.5 terlihat nilai reaktansi magnetisasi (Xm) bukan merupakan nilai yang linier. Nilai Xm sebanding dengan perubahan flux terhadap arus.

3.3 Nilai Tegangan Transformator Daya saat Kondisi Normal

Pada kondisi normal, variasi dari konfigurasi belitan transformator daya dapat diabaikan karena rangkaian pemodelan

feroresonansi belum mendapatkan pemicu atau *trigger* yang pada studi ini berupa ganguan operasi *switching*. Hasil dari simulasi kondisi normal dapat dijadikan sumber acuan saat diberikan gangguan operasi *switching*. Sumber tegangan yang digunakan adalah tegangan AC 150 kV ($V_{L\text{-}Lrms}$) pada sisi primer dan 20 kV ($V_{L\text{-}Lrms}$) dengan frekuensi 50 Hz. Tegangan puncak dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \tag{3.6}$$

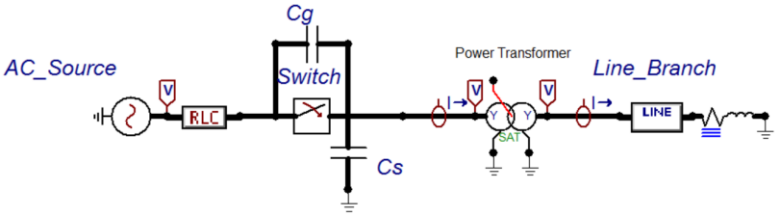
$$V_{L\text{-}Npeak} = V_{L-Nrms} \times \sqrt{2} \tag{3.7}$$

3.4 Konfigurasi Hubungan Belitan

Pada transformator daya terdapat belitan yang menghubungkan bagian primer dan bagian sekunder. Tiap jenis belitan memiliki karakteristik tersendiri seperti tegangan *line to line* atau arus *line to line* nya. Belitan jenis Wye memiliki titik netral sedangkan pada belitan jenis Delta tidak memilikinya yang nantinya akan berpengaruh terhadap kestabilan sistem. Oleh karena itu respon tegangan akibat hubungan belitan yang berbeda akibat feroresonansi pasti akan berbeda juga. Sehingga perlu adanya analisis pada hubungan belitan jenis Wye - Wye, Wye – Delta, Delta – Wye, dan Delta – Delta akibat feroresonansi.

3.4.1 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Hubungan Belitan Wye – Wye

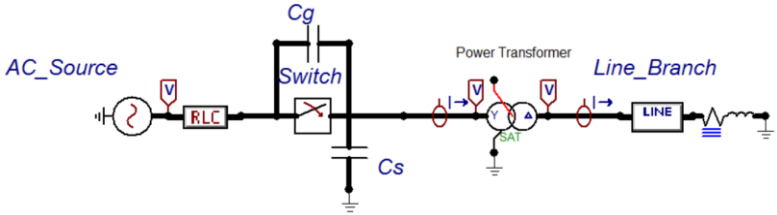
Pada simulasi ini transformator daya mempunyai hubungan belitan Wye – Wye. Belitan Wye berada pada sisi primer dan juga sisi sekundernya. Rangkaian simulasi transformator daya dengan hubungan belitan Wye – Wye dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 3.5 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye

3.4.2 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Hubungan Belitan Wye – Delta

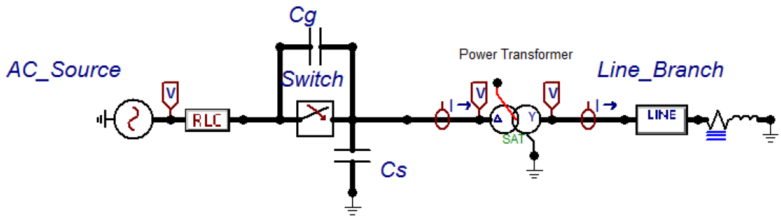
Pada simulasi ini transformator daya mempunyai hubungan belitan Wye – Delta. Belitan Wye berada pada sisi primer dan belitan Delta berada pada sisi sekunder. Rangkaian simulasi transformator daya dengan hubungan belitan Wye – Delta dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 3.6 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta

3.4.3 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Hubungan Belitan Delta - Wye

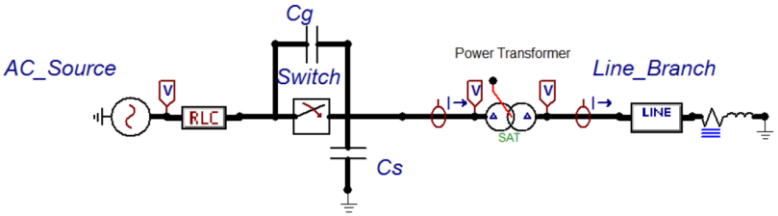
Pada simulasi ini transformator daya mempunyai hubungan belitan Delta – Wye. Belitan Delta berada pada sisi primer dan belitan Wye berada pada sisi sekunder. Rangkaian simulasi transformator daya dengan hubungan belitan Delta – Wye dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 3.7 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye

3.4.4 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Hubungan Belitan Delta – Delta

Pada simulasi ini transformator daya mempunyai hubungan belitan Delta – Wye. Belitan Delta berada pada sisi primer dan juga pada sisi sekunder. Rangkaian simulasi transformator daya dengan hubungan belitan Delta – Wye dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 3.8 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta

3.5 Rangkaian Feroresonansi Akibat Gangguan Operasi *Switching*

Fenomena feroresonansi dapat muncul dengan beberapa pemicu, salah satunya adalah *switching* yang dilakukan pada *circuit breaker*. Pada studi ini digunakan dua kondisi operasi *switching* yang tidak serempak sebagai metode pengambilan datanya. Pemillihan *time setting* yang diambil adalah berdasarkan ketidakserempakan dari waktu terbukanya *circuit breaker*.

Tabel 3.4 Operasi *Switching* Transformator 3 fasa

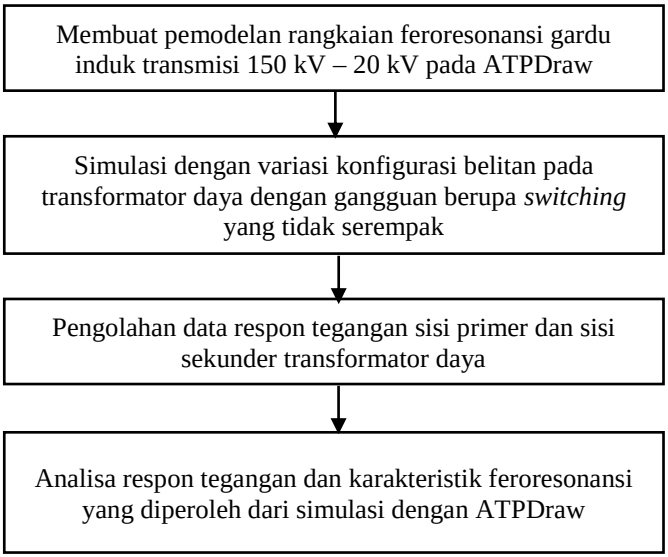
Parameter	Satuan	R	S	T
Kondisi 1	s	0,2	0,2	0,21
Kondisi 2	s	0,2	0,22	0,24

Kondisi 1 adalah kondisi saat fasa T gagal terbuka secara serempak. Kondisi 2 adalah kondisi saat fasa S dan T gagal terbuka secara serempak. Pada software ATPDraw, digunakan *Time-Controlled Switch* sebagai representasi dari *circuit breaker* dengan beberapa kondisi yang dijelaskan pada tabel 3.4.

3.6 Pengambilan dan Pengolahan Data

Proses pengolahan data pada studi ini dilakukan dengan menggunakan *software* ATPDraw. Pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi dilakukan dengan total waktu 0,7 detik dengan waktu variabel step 1 μ detik. Gangguan yang diberikan merupakan *switching* dengan berbagai kondisi seperti pada tabel 3.4. Pemodelan rangkaian feroresonansi yang diteliti menggunakan transformator daya dengan konfigurasi belitan Wye – Wye, Wye – Delta, Delta – Wye, dan Delta – Delta.

Data yang diambil adalah nilai serta respon gelombang tegangan pada sisi primer dan sekunder transformator daya pada tiap kondisi *switching*. Dari data yang telah diperoleh dilakukan analisis dengan membandingkan nilai dan respon gelombang tegangan dari masing masing konfigurasi belitan baik pada kondisi normal maupun pada saat operasi *switching* terhadap feroresonansi yang muncul.

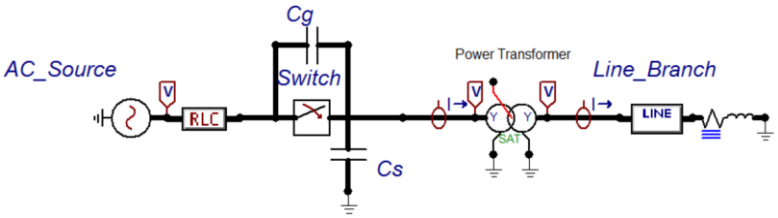


Gambar 3.9 Diagram Alir Pengolahan Data

BAB IV
ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA DENGAN INTI BERBEDA

4.1 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye

Pada simulasi rangkaian feroresonansi ini digunakan konfigurasi belitan Wye pada sisi primer dan juga pada sisi sekundernya. Simulasi rangkaian feroresonansi ini dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 4.1 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye

4.1.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal

Nilai tegangan line-netral ($V_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa di sisi primer adalah:

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

Tegangan puncak line-netral ($Vpeak_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa adalah:

$$V_{L\text{-}Npeak} = 86602{,}5 \times \sqrt{2} = 124274{,}5\ V$$

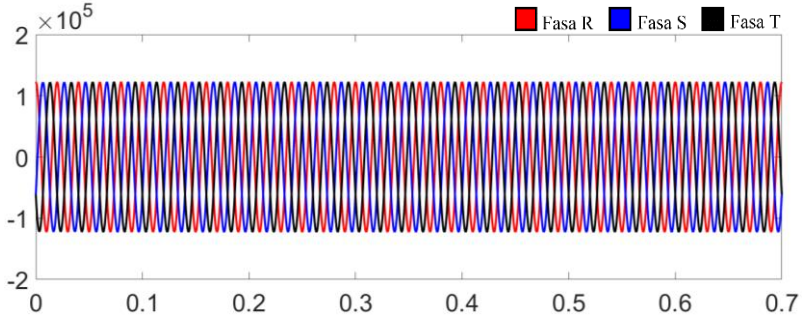
Nilai tegangan line-netral ($V_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa adalah di sisi sekunder adalah:

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

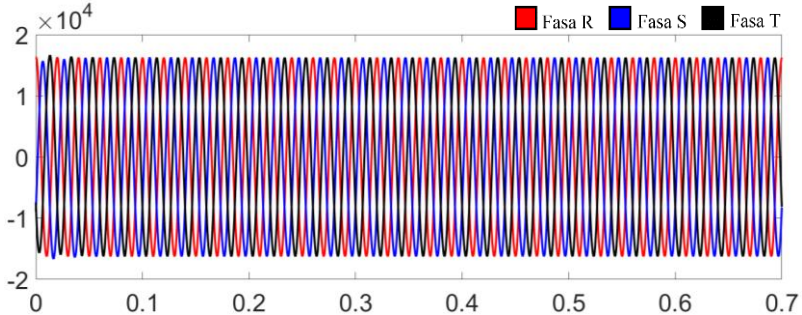
Tegangan puncak line-netral ($Vpeak_{L\text{-}netral}$) pada tiap fasa adalah:

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

Gambar di bawah ini merupakan respon tegangan saat kondisi normal pada konfigurasi belitan jenis Wye - Wye. Pada saat kondisi normal tidak dilakukan *trigger switching* sehingga tidak terjadi fenomena feroresonansi. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan perhitungan pada rumus diatas. Kondisi normal ini dapat dijadikan pembanding terhadap kondisi *switching* tidak serempak yang akan diberikan.



(a)

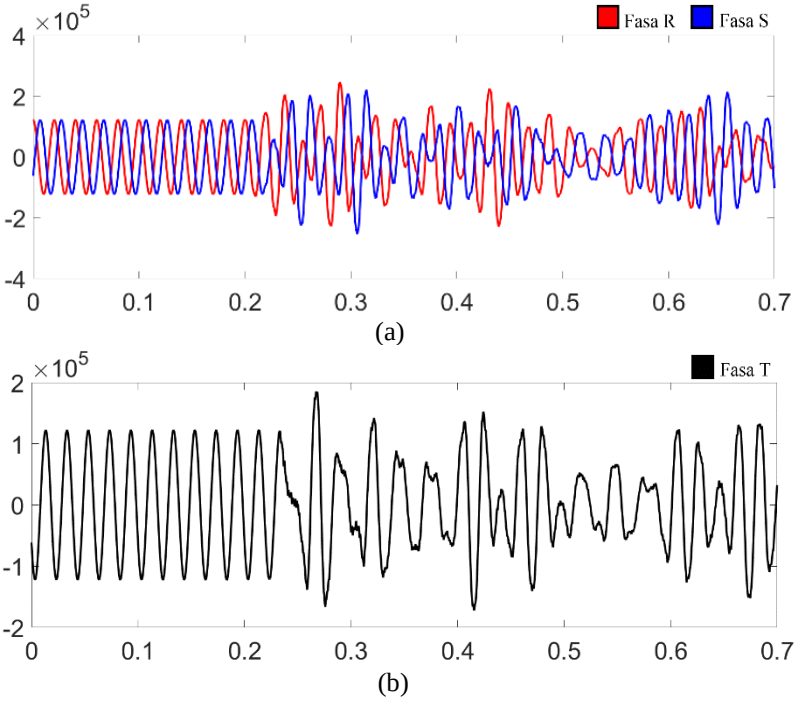


(b)

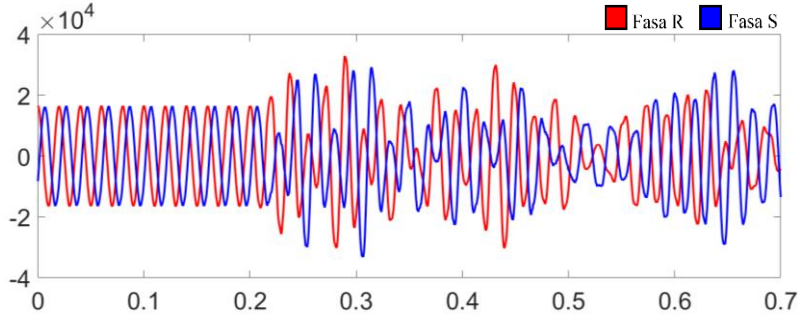
Gambar 4.2 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye – Wye pada kondisi normal (a) Tegangan sisi Primer (b) Tegangan sisi Sekunder

4.1.2 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 1)

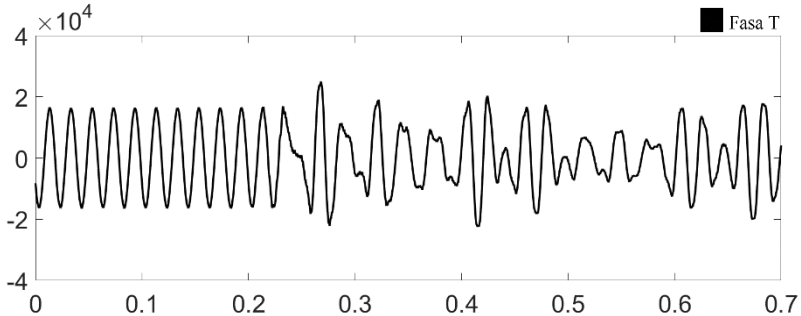
Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* ketika fasa T terbuka pada detik ke 0,21, sedangkan fasa R san S terbuka pada detik ke 0,2. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan puncak pada sisi primer (Vs) dan sisi sekunder (Vs) serta mode feroresonansi yang muncul. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.3 dan gambar 4.4. Berdasarkan hasil simulasi, feroresonansi muncul dengan mode yang sama pada sisi primer dan juga sisi sekunder. Karakteristik feroresonansi yang muncul adalah mode *Quasi-periodic* pada ketiga fasanya.



Gambar 4.3 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye – Wye Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T



(a)

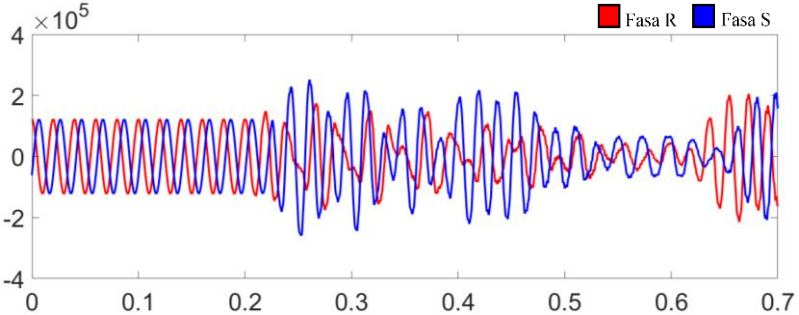


(b)

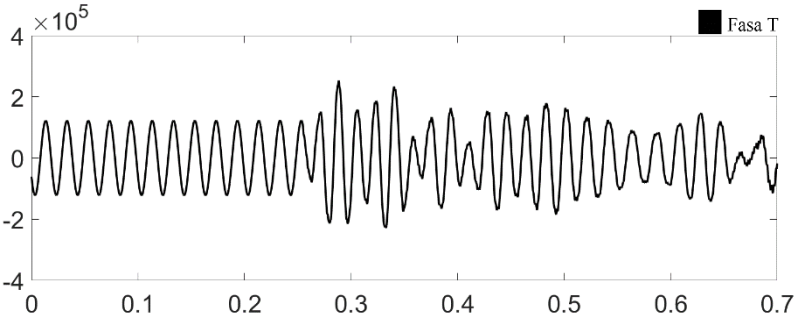
Gambar 4.4 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye – Wye Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T

4.1.3 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 2)

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* dengan fasa S terbuka pada detik ke 0,22, fasa T terbuka pada detik ke 0,24 sedangkan fasa R terbuka pada detik ke 0,2. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan puncak pada sisi primer (Vs) dan sisi sekunder (Vs) serta mode feroresonansi yang muncul. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6. Berdasarkan hasil simulasi, feroresonansi muncul dengan mode yang sama pada sisi primer dan juga sisi sekunder. Karakteristik feroresonansi yang muncul adalah mode *Quasi-periodic* pada fasa S dan T, sedangkan pada fasa R modenya adalah *Subharmonic*.

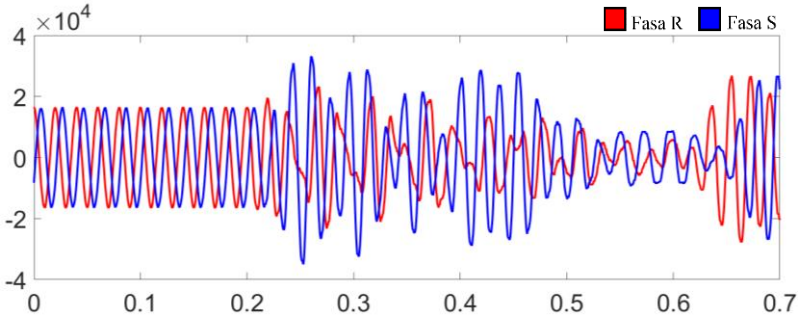


(a)

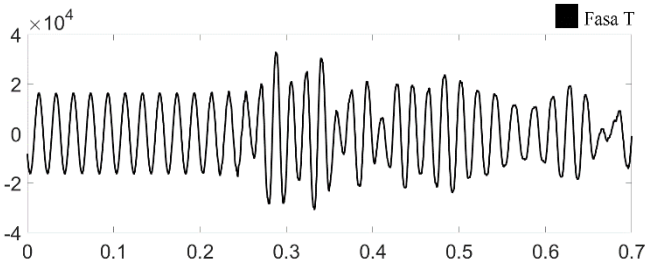


(b)

Gambar 4.5 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye – Wye Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T



(a)



(b)

Gambar 4.6 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye – Wye Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T

4.1.4 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye

Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 merupakan pengukuran tergangan transformator daya dengan konfigurasi belitan Wye - Wye. Dapat terlihat bahwa gangguan operasi *switching* yang tidak serempak menyebabkan transformator daya mengalami *overvoltage* pada ketiga fasanya baik pada sisi primer maupun sisi sekunder. Berdasarkan tabel 4.1 dan tabel 4.2 saat fasa T gagal terbuka serempak, *overvoltage* terparah terjadi di sisi primer yaitu pada fasa S sebesar 253,25 kV dan di sisi sekunder yaitu pada fasa S sebesar 33,25 kV. Sedangkan saat fasa S dan T gagal terbuka serempak menyebabkan *overvoltage* terparah di sisi primer yaitu pada fasa S sebesar 259,37 kV dan di sisi sekunder yaitu pada fasa S sebesar 35,04kV.

Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 merupakan hasil karakteristik feroresonansi yang didapat dari transformator daya dengan konfigurasi belitan Wye - Wye. Karakteristik feroresonansi yang muncul dari 2 operasi switching didominasi oleh mode *Quasi-periodic* baik pada kondisi 1 maupun kondisi 2.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye di Sisi Primer

Kondisi *Switching*	**Tegangan Puncak Sisi Primer (kV)**		
	R	**S**	**T**
Normal	**122,47**	**122,47**	**122,47**
Kondisi 1	**246,25**	**253,25**	**185,25**
Kondisi 2	**214,41**	**259,37**	**252,89**

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye di Sisi Sekunder

Kondisi *Switching*	Tegangan Puncak Sisi Sekunder (kV)		
	R	S	T
Normal	16,33	16,33	16,33
Kondisi 1	32,88	33,25	24,91
Kondisi 2	27,85	35,04	32,96

Tabel 4.3 Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye di Sisi Primer

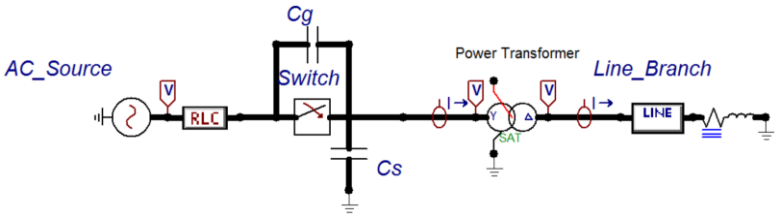
Kondisi *Switching*	Kondisi Feroresonansi Sisi Primer		
	R	S	T
Kondisi 1	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*
Kondisi 2	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*

Tabel 4.4 Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Wye di Sisi Sekunder

Kondisi *Switching*	Kondisi Feroresonansi Sisi Sekunder		
	R	S	T
Kondisi 1	*Subharmonic*	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*
Kondisi 2	*Subharmonic*	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*

4.2 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta

Pada simulasi rangkaian feroresonansi ini digunakan konfigurasi belitan Wye pada sisi primer dan belitan Delta pada sisi sekundernya. Simulasi rangkaian feroresonansi ini dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 4.7 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta

4.2.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal

Nilai tegangan line-netral ($V_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa di sisi primer adalah:

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

Tegangan puncak line-netral ($Vpeak_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa adalah:

$$V_{L\text{-}Npeak} = 86602{,}5 \times \sqrt{2} = 124274{,}5\ V$$

Nilai tegangan line-netral ($V_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa adalah di sisi sekunder adalah:

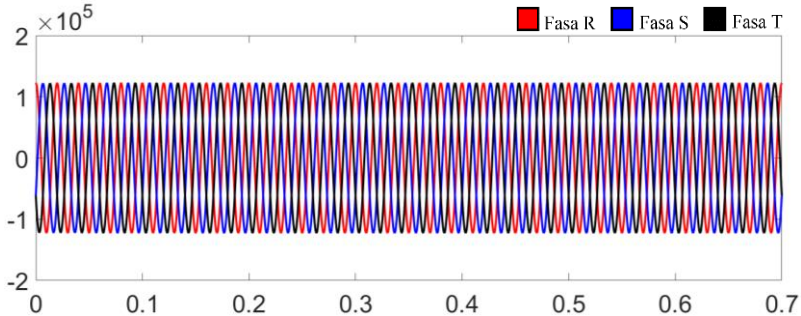
$$V_{L\text{-}Nrms} = \frac{20000\ V}{\sqrt{3}} = 11547{,}005V$$

Tegangan puncak line-netral ($Vpeak_{L\text{-}netral}$) pada tiap fasa adalah:

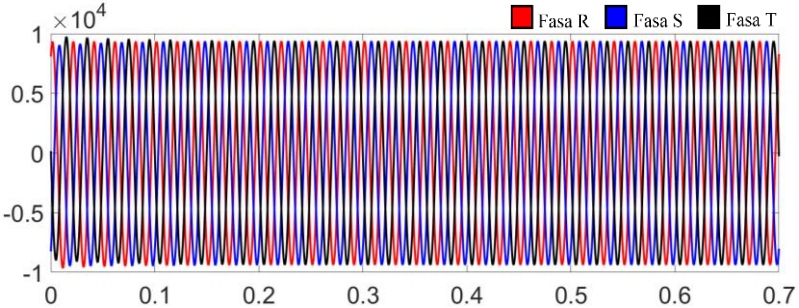
$$V_{L\text{-}Npeak} = 11547{,}005 \times \sqrt{2} = 16329{,}9\ V$$

$$V_{L\text{-}Nrms} = \frac{16329.9\ V}{\sqrt{3}} = 9439{,}24\ V$$

Gambar 4.8 merupakan respon tegangan saat kondisi normal pada konfigurasi belitan jenis Wye - Delta. Pada saat kondisi normal tidak dilakukan *trigger switching* sehingga tidak terjadi fenomena feroresonansi. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan perhitungan pada rumus diatas. Kondisi normal ini dapat dijadikan pembanding terhadap kondisi *switching* tidak serempak yang akan diberikan.



(a)

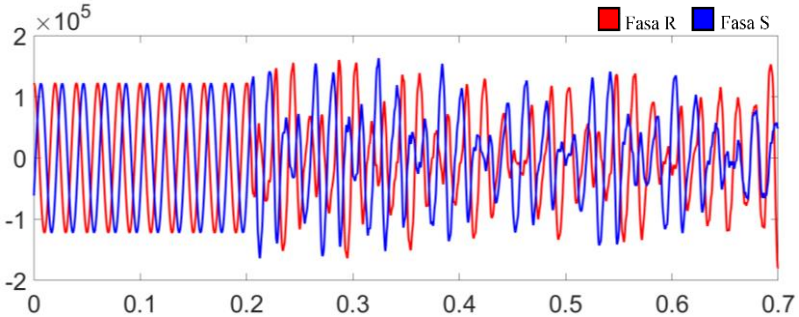


(b)

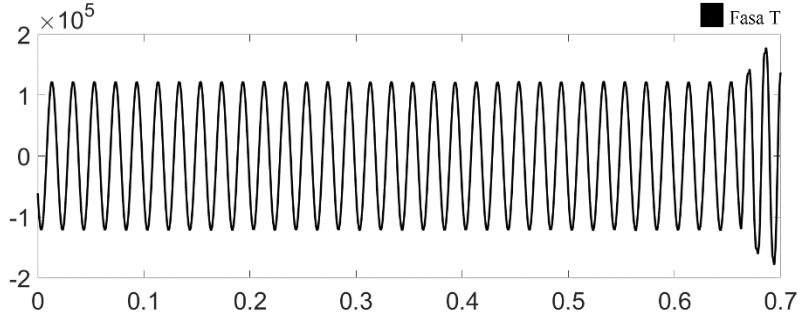
Gambar 4.8 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye – Delta pada Kondisi Normal

4.2.2 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 1)

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* dengan fasa T terbuka pada detik ke 0,21, sedangkan fasa R san S terbuka pada detik ke 0,2. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan puncak pada sisi primer (Vs) dan sisi sekunder (Vs) serta mode feroresonansi yang muncul. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.9 dan gambar 4.10. Berdasarkan hasil simulasi pada sisi primer, karakteristik feroresonansi yang muncul adalah; mode *Quasi-periodic* di fasa R, mode *Subharmonic* di fasa S, dan tidak terjadi feroresonansi di fasa T. Pada sisi sekunder, karakteristik feroresonansi yang muncul adalah mode *Subharmonic* di fasa R dan T, sedangkan mode *Quasi-periodic* terjadi di fasa S.

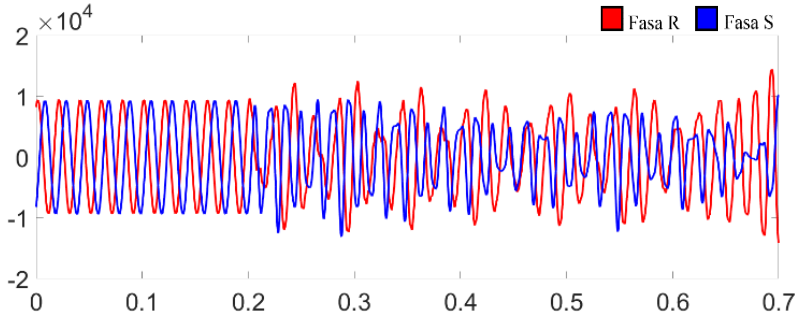


(a)

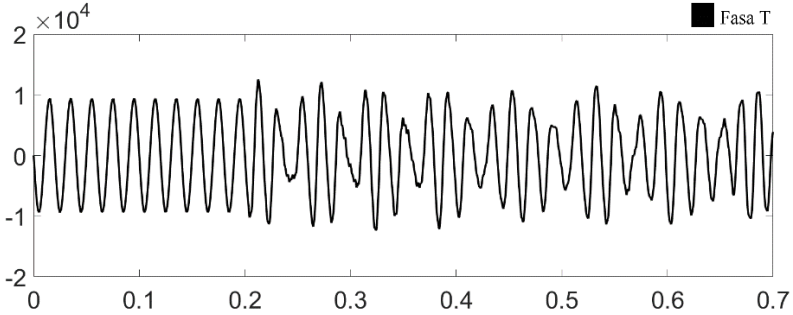


(b)

Gambar 4.9 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye – Delta Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T



(a)

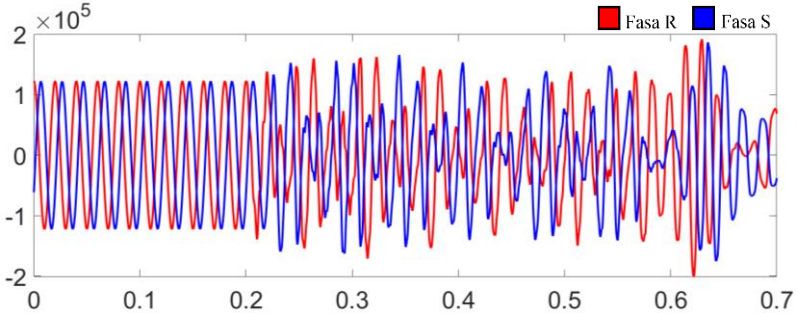


(b)

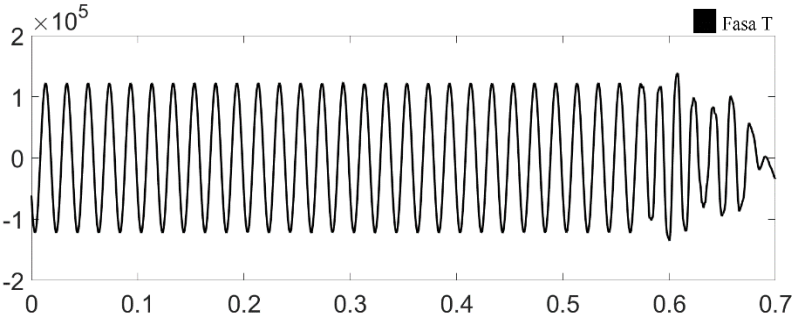
Gambar 4.10 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye – Delta Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T

4.2.3 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 2)

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* dengan fasa S terbuka pada detik ke 0,22, fasa T terbuka pada detik ke 0,24 sedangkan fasa R terbuka pada detik ke 0,2. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan puncak pada sisi primer (Vs) dan sisi sekunder (Vs) serta mode feroresonansi yang muncul. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.11 dan gambar 4.12. Berdasarkan hasil simulasi pada sisi primer, karakteristik feroresonansi yang muncul adalah; mode *Subharmonic* di fasa R dan S, dan tidak terjadi feroresonansi di fasa T. Pada sisi sekunder, karakteristik feroresonansi yang muncul adalah mode *Quasi-periodic* di fasa R dan S, sedangkan mode *Subharmonic* terjadi di fasa T.

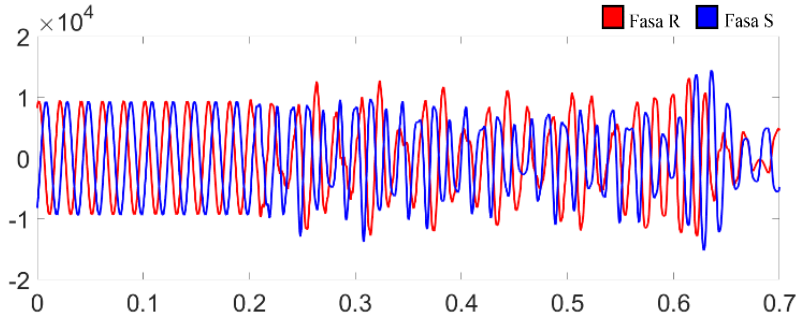


(a)

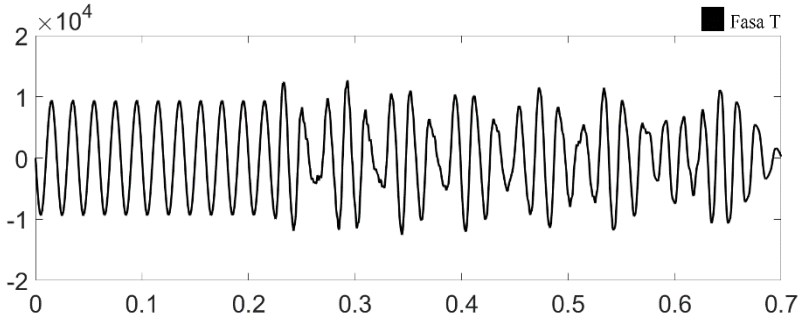


(b)

Gambar 4.11 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye – Delta Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T



(a)



(b)

Gambar 4.12 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye – Delta Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T

4.2.4 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta

Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 merupakan pengukuran tergangan transformator daya dengan konfigurasi belitan Wye - Delta. Dapat terlihat bahwa gangguan operasi *switching* yang tidak serempak menyebabkan transformator daya mengalami *overvoltage* pada ketiga fasanya baik pada sisi primer maupun sisi sekunder. Berdasarkan tabel 4.5 dan tabel 4.6 saat fasa T gagal terbuka serempak, *overvoltage* terparah terjadi di sisi primer yaitu pada fasa R sebesar 180,31 kV dan di sisi sekunder yaitu pada fasa R sebesar 14,41 kV. Sedangkan saat fasa S dan T gagal terbuka serempak *overvoltage* terparah terjadi di sisi primer yaitu pada fasa R sebesar 200,98 kV dan di sisi sekunder yaitu pada fasa S sebesar 15,17 kV.

Dari dua kondisi *switching* menghasilkan karakteristik feroresonansi yang berbeda dari tiap fasanya seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8. Namun pada fasa T saat diberikan 2 kondisi trigger switching yang berbeda tetap tidak menghasilkan feroresonansi.

Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta di Sisi Primer

Kondisi *Switching*	**Tegangan Puncak Sisi Primer (kV)**		
	R	**S**	**T**
Normal	**122,47**	**122,47**	**122,47**
Kondisi 1	**180,31**	**163,83**	**179,03**
Kondisi 2	**200,98**	**186,5**	**138,33**

Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta di Sisi Sekunder

Kondisi *Switching*	**Tegangan Puncak Sisi Sekunder (kV)**		
	R	**S**	**T**
Normal	**9,44**	**9,44**	**9,44**
Kondisi 1	**14,41**	**13,1**	**12,53**
Kondisi 2	**13,14**	**15,17**	**12,67**

Tabel 4.7 Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta di Sisi Primer

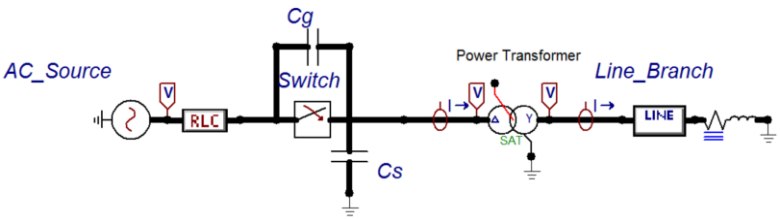
Kondisi *Switching*	**Kondisi Feroresonansi Sisi Primer**		
	R	**S**	**T**
Kondisi 1	*Quasi-periodic*	*Subharmonic*	*Non-Ferro*
Kondisi 2	*Subharmonic*	*Subharmonic*	*Non-Ferro*

Tabel 4.8 Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Wye - Delta di Sisi Sekunder

Kondisi *Switching*	**Kondisi Feroresonansi Sisi Sekunder**		
	R	**S**	**T**
Kondisi 1	*Subharmonic*	*Quasi-periodic*	*Subharmonic*
Kondisi 2	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*	*Subharmonic*

4.3 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye

Pada simulasi rangkaian feroresonansi ini digunakan konfigurasi belitan Delta pada sisi primer dan belitan Wye pada sisi sekundernya. Simulasi rangkaian feroresonansi ini dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 4.13 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye

4.3.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal

Nilai tegangan line-netral ($V_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa di sisi primer adalah:

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

Tegangan puncak line-netral ($Vpeak_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa adalah:

$$V_{L\text{-}Npeak} = 86602{,}5 \times \sqrt{2} = 124274{,}5\ V$$

Nilai tegangan line-netral ($V_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa adalah di sisi sekunder adalah:

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

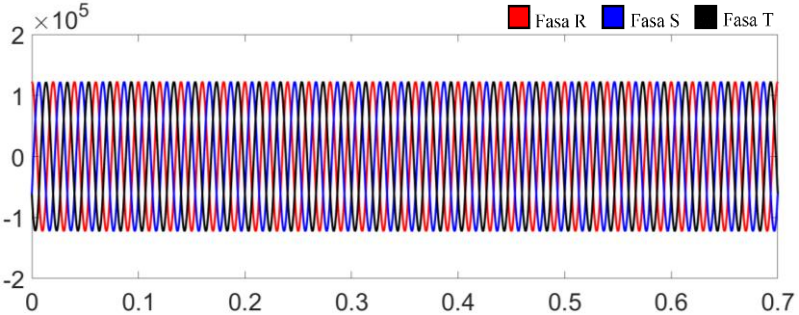
Tegangan puncak line-netral ($Vpeak_{L\text{-}netral}$) pada tiap fasa adalah:

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

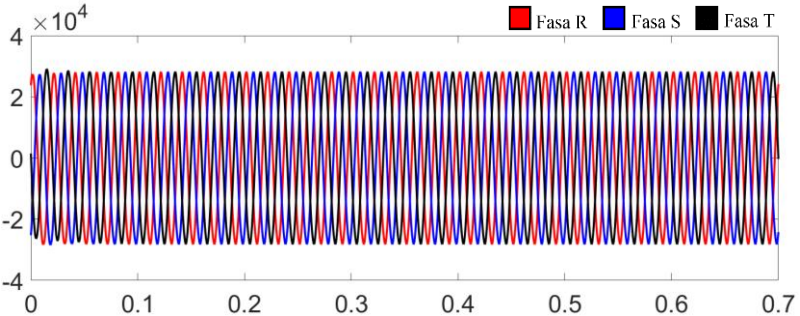
$$V_{L\text{-}Npeak} = 16329{,}9 \times \sqrt{3} = 28250{,}73\ V$$

Gambar 4.14 merupakan respon tegangan saat kondisi normal pada konfigurasi belitan jenis Delta - Wye. Pada saat kondisi normal tidak dilakukan *trigger switching* sehingga tidak terjadi fenomena feroresonansi. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan

perhitungan pada rumus diatas. Kondisi normal ini dapat dijadikan pembanding terhadap kondisi *switching* tidak serempak yang akan diberikan.



(a)



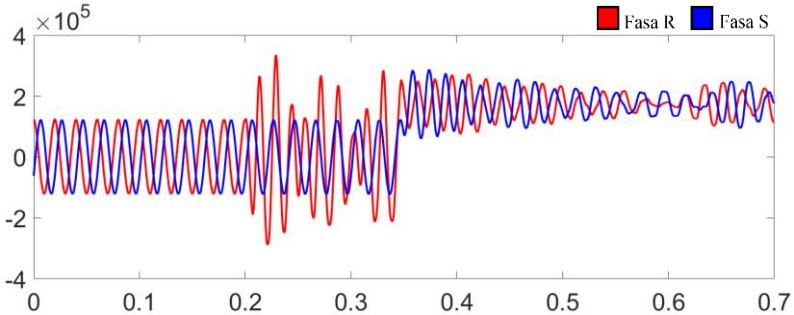
(b)

Gambar 4.14 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta – Wye pada Kondisi Normal

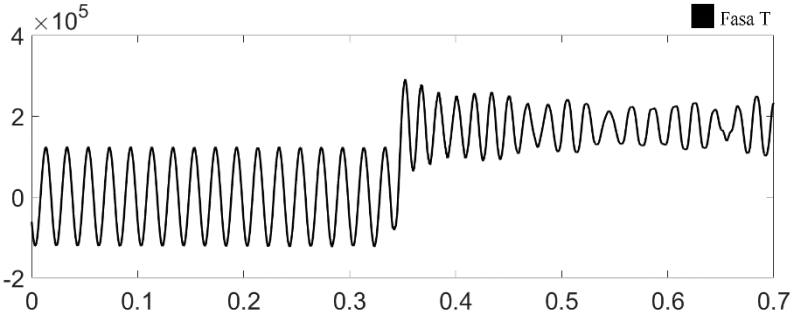
4.3.2 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 1)

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* dengan fasa T terbuka pada detik ke 0,21, sedangkan fasa R san S terbuka pada detik ke 0,2. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan puncak pada sisi primer (Vs) dan sisi sekunder (Vs) serta mode feroresonansi yang muncul. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.15 dan gambar 4.16. Berdasarkan hasil simulasi pada sisi primer, karakteristik feroresonansi yang muncul adalah; mode *Chaotic* di fasa R, mode *Quasi-periodic* di fasa S, dan mode *Subharmonic* di fasa T. Pada sisi sekunder, karakteristik feroresonansi yang muncul adalah mode

Quasi-periodic di fasa R dan S, sedangkan mode *Subharmonic* terjadi di fasa T.

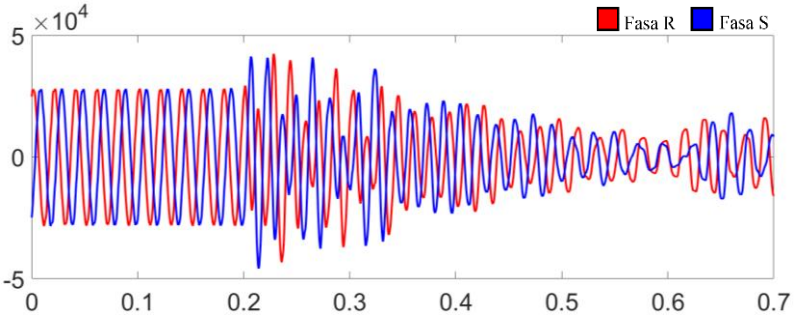


(a)

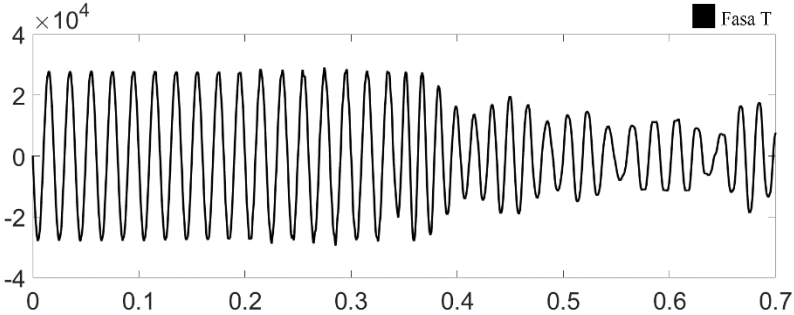


(b)

Gambar 4.15 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T



(a)

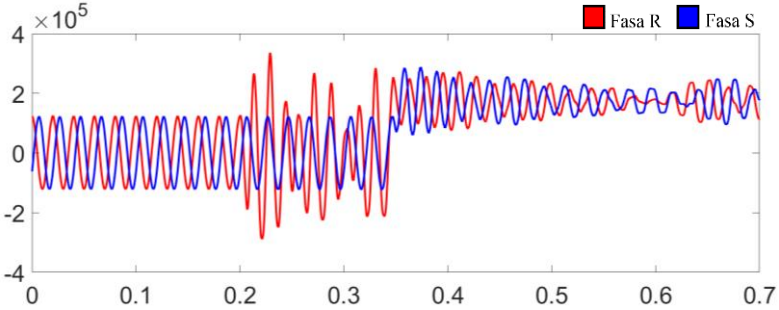


(b)

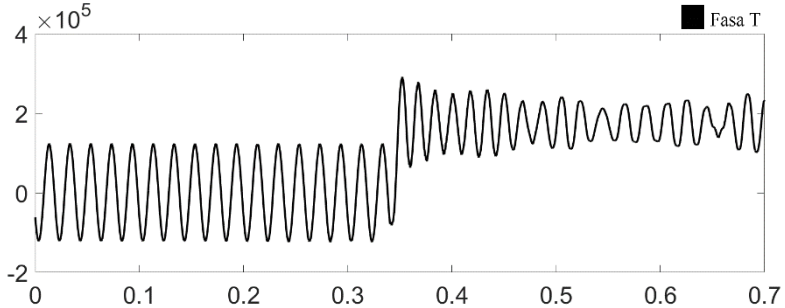
Gambar 4.16 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T

4.3.3 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 2)

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* dengan fasa S terbuka pada detik ke 0,22, fasa T terbuka pada detik ke 0,24 sedangkan fasa R terbuka pada detik ke 0,2. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan puncak pada sisi primer (Vs) dan sisi sekunder (Vs) serta mode feroresonansi yang muncul. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.17 dan gambar 4.18. Berdasarkan hasil simulasi pada sisi primer, karakteristik feroresonansi yang muncul adalah; mode *Chaotic* di fasa R, mode *Quasi-periodic* di fasa S, dan mode *Subharmonic* di fasa T. Pada sisi sekunder, karakteristik feroresonansi yang muncul adalah mode *Quasi-periodic* di fasa R dan S, sedangkan mode *Subharmonic* terjadi di fasa T.

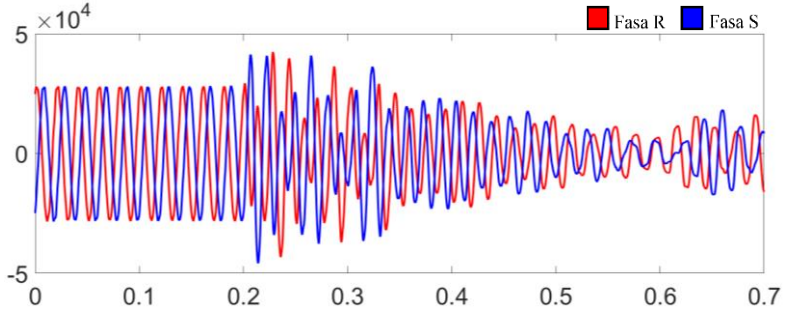


(a)

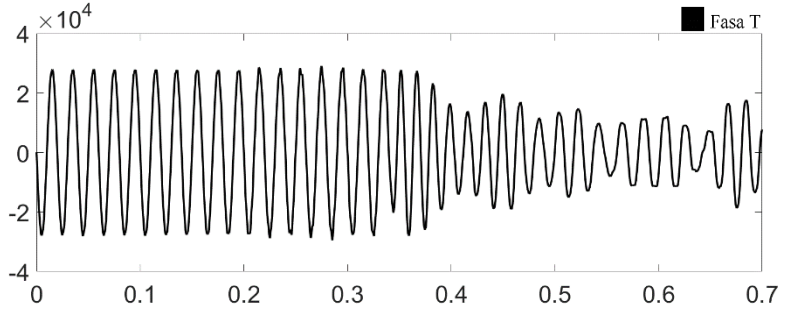


(b)

Gambar 4.17 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T



(a)



(b)

Gambar 4.18 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T

4.3.4 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Konfigurasi Belitan Delta Wye

Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 merupakan pengukuran tegangan dan Tabel 4.11 dan Tabel 4.12 merupakan hasil karakteristik feroresonansi yang didapat dari transformator daya dengan konfigurasi belitan Delta - Wye. Dapat terlihat bahwa gangguan operasi *switching* yang tidak serempak menyebabkan transformator daya mengalami *overvoltage* pada sisi primer maupun sisi sekunder. Dari 2 kondisi *switching* dapat diamati bahwa respon tegangan yang dihasilkan pada kondisi 2 sama dengan respon tegangan pada kondisi 1 sehingga *overvoltage* yang dihasilkan adalah sama. Pada sisi primer, *overvoltage* terjadi pada fasa R sebesar 335,73 kV dan di sisi sekunder yaitu pada fasa S sebesar 45,38 kV.

Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye di Sisi Primer

Kondisi *Switching*	**Tegangan Puncak Sisi Primer (kV)**		
	R	**S**	**T**
Normal	**122,47**	**122,47**	**122,47**
Kondisi 1	**335,73**	**287,98**	**291,06**
Kondisi 2	**335,73**	**287,98**	**291,06**

Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye di Sisi Sekunder

Kondisi *Switching*	**Tegangan Puncak Sisi Sekunder (kV)**		
	R	**S**	**T**
Normal	**28,25**	**28,25**	**28,25**
Kondisi 1	**43,28**	**45,84**	**Teredam**
Kondisi 2	**43,28**	**45,84**	**Teredam**

Tabel 4.11 Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye di Sisi Primer

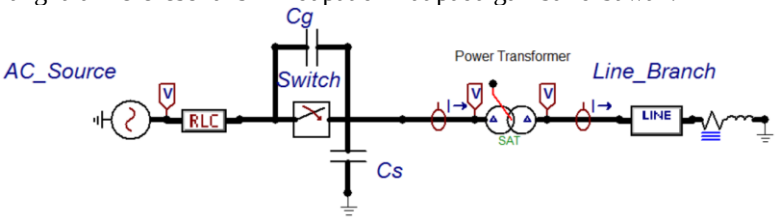
Kondisi *Switching*	**Kondisi Feroresonansi Sisi Primer**		
	R	**S**	**T**
Kondisi 1	*Chaotic*	*Quasi-periodic*	*Subharmonic*
Kondisi 2	*Chaotic*	*Quasi-periodic*	*Subharmonic*

Tabel 4.12 Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Wye di Sisi Sekunder

Kondisi *Switching*	**Kondisi Feroresonansi Sisi Sekunder**		
	R	**S**	**T**
Kondisi 1	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*	*Subharmonic*
Kondisi 2	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*	*Subharmonic*

4.4 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta

Pada simulasi rangkaian feroresonansi ini digunakan konfigurasi belitan Delta pada sisi primer dan juga sisi sekundernya. Simulasi rangkaian feroresonansi ini dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 4.19 Simulasi Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta

4.4.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal

Nilai tegangan line-netral ($V_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa di sisi primer adalah:

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

Tegangan puncak line-netral ($Vpeak_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa adalah:

$$V_{L\text{-}Npeak} = 86602.5 \times \sqrt{2} = 124274{,}5\ \text{V}$$

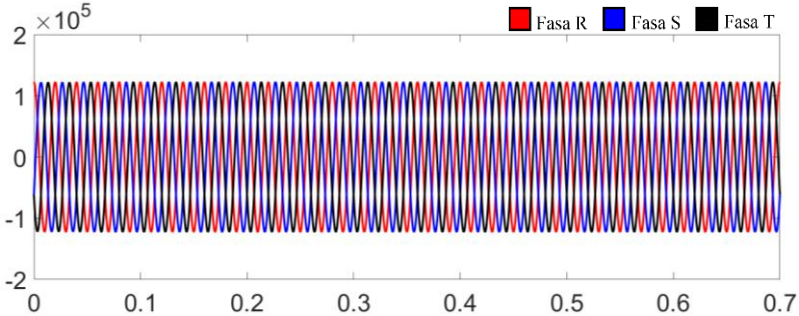
Nilai tegangan line-netral ($V_{L\text{-}Nrms}$) pada tiap fasa adalah di sisi sekunder adalah:

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

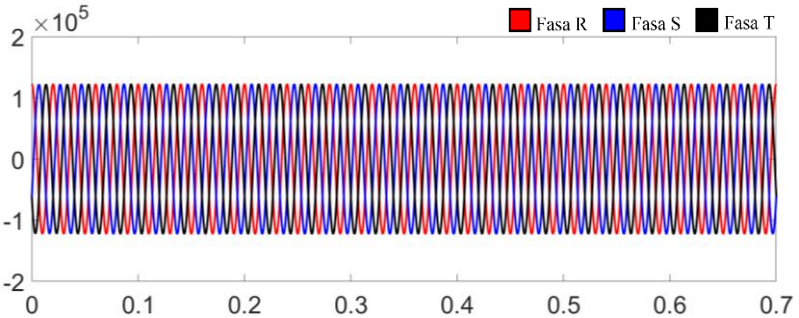
Tegangan puncak line-netral ($Vpeak_{L\text{-}netral}$) pada tiap fasa adalah:

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

Gambar di bawah ini merupakan respon tegangan saat kondisi normal pada konfigurasi belitan jenis Delta - Delta. Pada saat kondisi normal tidak dilakukan *trigger switching* sehingga tidak terjadi fenomena feroresonansi. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan perhitungan pada rumus diatas. Kondisi normal ini dapat dijadikan pembanding terhadap kondisi *switching* tidak serempak yang akan diberikan.



(a)

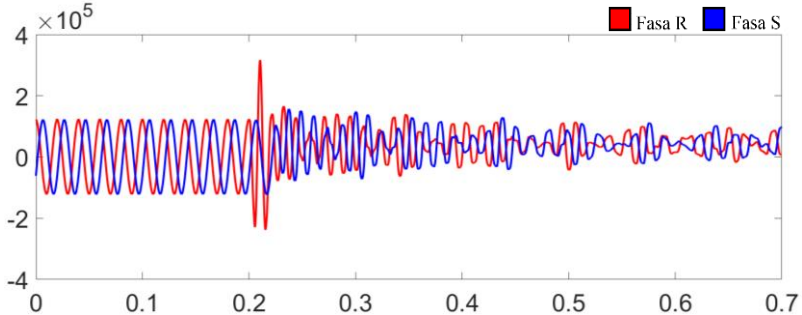


(b)

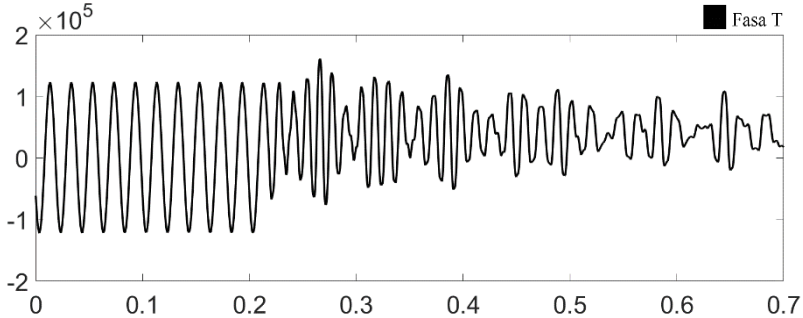
Gambar 4.20 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta – Delta pada Kondisi Normal (a) Tegangan sisi Primer (b) Tegangan sisi Sekunder

4.4.2 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 1)

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* dengan fasa T terbuka pada detik ke 0,21, sedangkan fasa R san S terbuka pada detik ke 0,2. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan puncak pada sisi primer (Vs) dan sisi sekunder (Vs) serta mode feroresonansi yang muncul. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.21 dan gambar 4.22. Berdasarkan hasil simulasi, feroresonansi muncul dengan mode yang sama pada sisi primer dan juga sisi sekunder. Karakteristik feroresonansi yang muncul adalah mode *Quasi-periodic* pada ketiga fasanya.

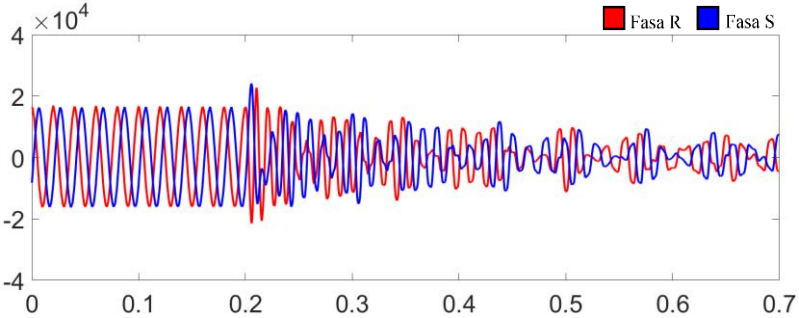


(a)

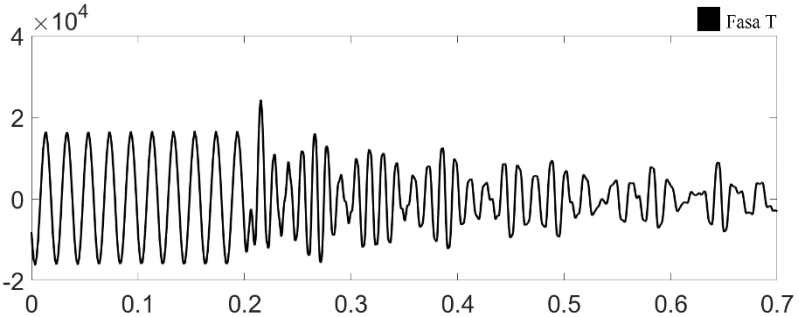


(b)

Gambar 4.21 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T



(a)

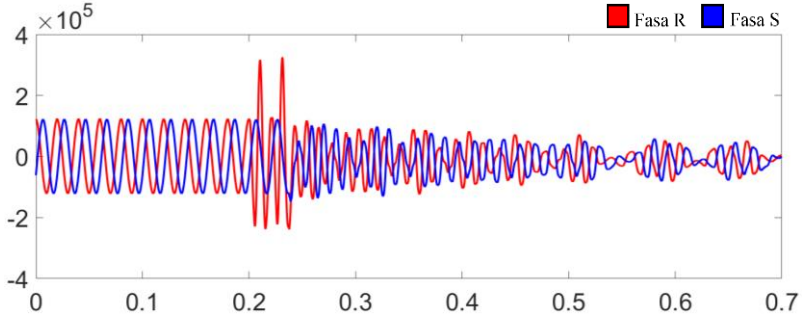


(b)

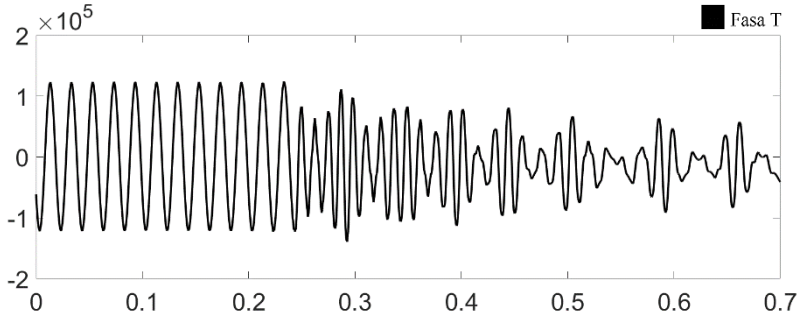
Gambar 4.22 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta Saat Fasa T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T

4.4.3 Respon Tegangan Saat Operasi Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak (Kondisi 2)

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* dengan fasa S terbuka pada detik ke 0,22, fasa T terbuka pada detik ke 0,24 sedangkan fasa R terbuka pada detik ke 0.2. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan puncak pada sisi primer (Vs) dan sisi sekunder (Vs) serta mode feroresonansi yang muncul. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.23 dan gambar 4.24. Berdasarkan hasil simulasi, feroresonansi muncul dengan mode yang sama pada sisi primer dan juga sisi sekunder. Karakteristik feroresonansi yang muncul adalah mode *Quasi-periodic* pada fasa R dan T, sedangkan mode *Subharmonic*, terjadi pada fasa S.

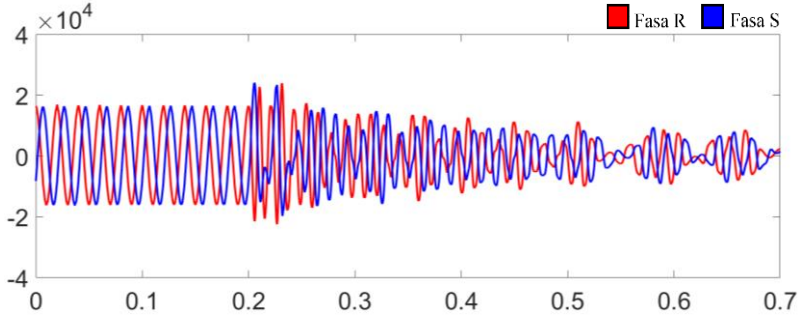


(a)

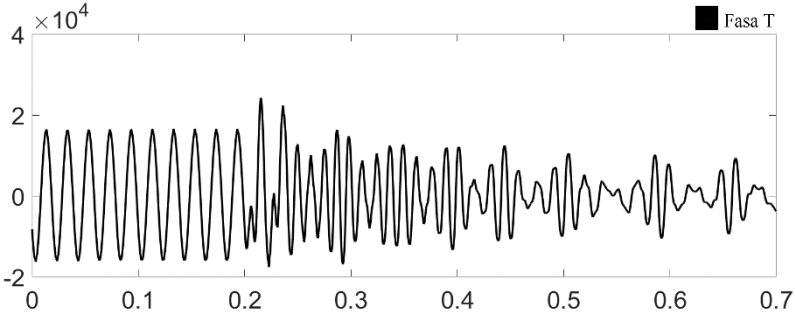


(b)

Gambar 4.23 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Primer. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T



(a)



(b)

Gambar 4.24 Respon Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta Saat Fasa S dan T Gagal Terbuka Serempak di Sisi Sekunder. (a) Fasa R dan S; (b) Fasa T

4.4.4 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta

Tabel 4.13 dan Tabel 4.14 merupakan pengukuran tergangan transformator daya dengan konfigurasi belitan Delta - Delta. Dapat terlihat bahwa gangguan operasi *switching* yang tidak serempak menyebabkan transformator daya mengalami *overvoltage* pada ketiga fasanya baik pada sisi primer maupun sisi sekunder. Berdasarkan tabel 4.13 dan tabel 4.14 saat fasa T gagal terbuka serempak, *overvoltage* terparah terjadi di sisi primer yaitu pada fasa R sebesar 316,49 kV dan di sisi sekunder yaitu pada fasa T sebesar 24,22 kV. Sedangkan saat fasa S dan T gagal terbuka serempak menyebabkan *overvoltage* terparah di sisi primer yaitu pada fasa R sebesar 325,26 kV dan di sisi sekunder yaitu pada fasa T sebesar 24,23 kV.

Tabel 4.15 dan Tabel 4.16 merupakan hasil karakteristik feroresonansi yang didapat dari transformator daya dengan konfigurasi belitan Delta - Delta. Karakteristik feroresonansi yang muncul dari 2 operasi switching didominasi oleh mode *Quasi-periodic* baik pada kondisi 1 maupun kondisi 2.

Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta di Sisi Primer

Kondisi *Switching*	Tegangan Puncak Sisi Primer (kV)		
	R	S	T
Normal	122,47	122,47	122,47
Kondisi 1	316,49	156,82	161,13
Kondisi 2	325,26	147,67	139,39

Tabel 4.14 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta di Sisi Sekunder

Kondisi *Switching*	Tegangan Puncak Sisi Sekunder (kV)		
	R	S	T
Normal	16,33	16,33	16,33
Kondisi 1	22,69	24,08	24,22
Kondisi 2	23,94	24,08	24,23

Tabel 4.15 Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta di Sisi Primer

Kondisi *Switching*	Kondisi Feroresonansi Sisi Primer		
	R	S	T
Kondisi 1	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*
Kondisi 2	*Quasi-periodic*	*Subharmonic*	*Quasi-periodic*

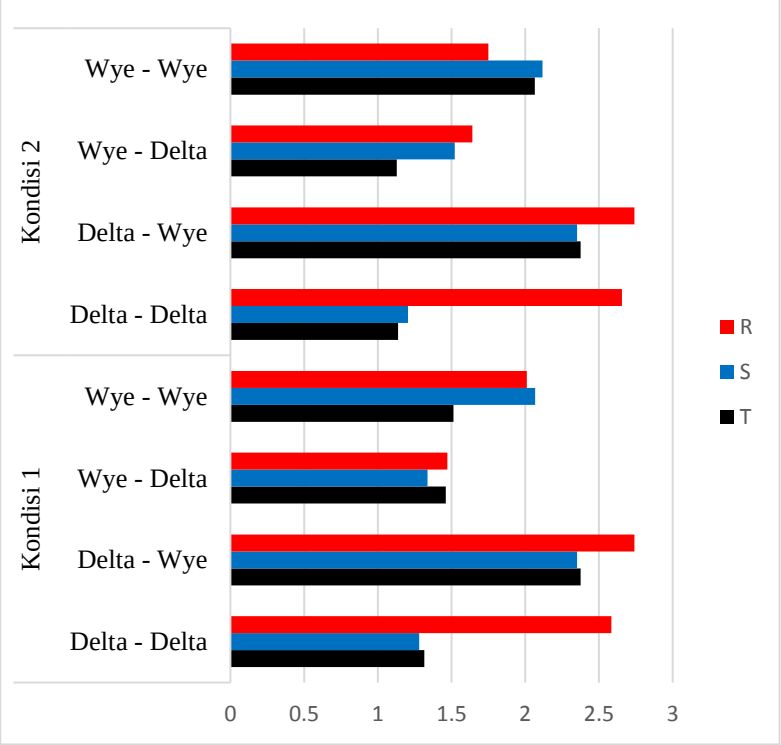
Tabel 4.16 Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya dengan Konfigurasi Belitan Delta - Delta di Sisi Sekunder

Kondisi *Switching*	Kondisi Feroresonansi Sisi Sekunder		
	R	S	T
Kondisi 1	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*	*Quasi-periodic*
Kondisi 2	*Quasi-periodic*	*Subharmonic*	*Quasi-periodic*

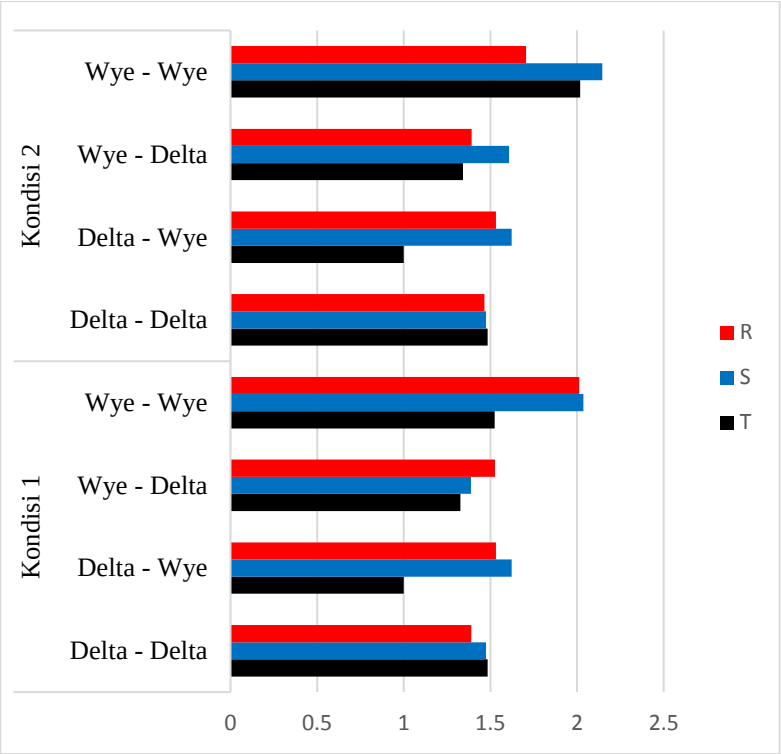
4.5 Analisis Tegangan Puncak Transformator Daya

Hasil pengukuran tegangan pada simulasi rangkaian feroresonansi yang telah dilakukan didapatkan nilai tegangan puncak yang berbeda-beda di setiap jenis konfigurasi belitan pada transformator daya saat diberikan gangguan operasi *switching* 1 fasa gagal terbuka serempak dan 2 fasa gagal terbuka serempak. Gambar 4.25 dan Gambar 4.26 merupakan

grafik yang menunjukkan nilai tegangan puncak dari setiap operasi *switching* yang diberikan pada belitan primer maupun belitan sekunder. Tegangan puncak ditampilkan dalam satuan per unit yang merupakan perbandingan antara tegangan puncak dengan tegangan normalnya. Berdasarkan grafik tersebut dapat diamati bahwa rangkaian dengan konfigurasi belitan Delta – Wye merupakan rangkaian yang paling rentan terjadi *overvoltage* akibat feroresonansi saat diberikan gangguan operasi *switching* karena memiliki nilai tegangan puncak tertinggi terhadap konfigurasi belitan yang lain. Sedangkan rangkaian dengan konfigurasi belitan Wye – Delta memiliki ketahanan terhadap *overvoltage* akibat feroresonansi karena memiliki nilai tegangan puncak yang cenderung lebih kecil saat diberikan gangguan operasi *switching* 1 fasa gagal terbuka serempak maupun 2 fasa gagal terbuka serempak.



Gambar 4.25 Grafik Tegangan Puncak Transformator Daya Pada Sisi Primer

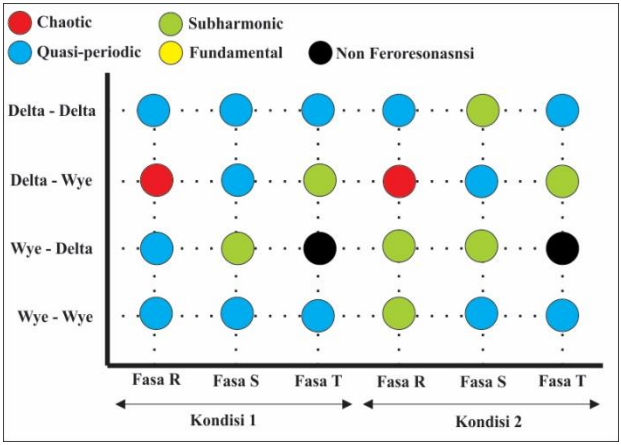


Gambar 4.26 Grafik Tegangan Puncak Transformator Daya Pada Sisi Sekunder

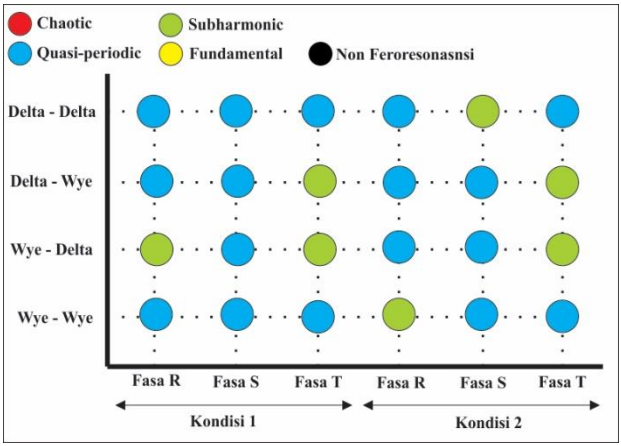
4.6 Analisa Karakteristik Feroresonansi Transformator Daya

Hasil karakteristik feroresonansi yang muncul pada simulasi rangkaian feroresonansi didapatkan karakteristik feroresonansi yang berbeda-beda di setiap jenis konfigurasi belitan pada transformator daya saat diberikan gangguan operasi *switching* 1 fasa gagal terbuka serempak dan 2 fasa gagal terbuka serempak. Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 merupakan grafik yang menunjukkan karakteristik feroresonansi dari setiap operasi *switching* yang diberikan pada belitan primer maupun belitan sekunder. Pada sisi primer karakteristik feroresonansi yang muncul didominasi oleh feroresonansi dengan mode *Quasi-periodic* pada operasi *switching* kondisi 1. Pada operasi *switching* kondisi 2,

karakteristik feroresonansi yang muncul didominasi oleh mode *Subharmonic dan Quasi-periodic*. Pada sisi Sekunder karakteristik feroresonansi yang muncul didominasi oleh feroresonansi dengan mode *Quasi-periodic* baik pada operasi *switching* kondisi 1 maupun kondisi 2. Karakteristik terparah didapatkan pada konfigurasi belitan Delta – Wye karena terdapat mode *Chaotic* saat diberikan gangguan operasi *switching* yang tidak serempak.



Gambar 4.27 Karakteristik Feroresonansi di Sisi Primer



Gambar 4.28 Karakteristik Feroresonansi di Sisi Sekunder

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai feroresonansi dengan operasi *switching* yang tidak serempak didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbedaan jenis konfigurasi belitan transformator mempengaruhi respon gangguan feroresonansi.
2. Secara keseluruhan operasi switching 2 fasa gagal terbuka serempak menyebabkan kondisi *overvoltage* yang lebih besar dibandingkan dengan operasi switching 1 fasa gagal terbuka serempak.
3. Gangguan operasi switching yang tidak serempak memunculkan karakteristik feroresonansi yang didominasi oleh mode *Quasi-periodic*.
4. Respon tegangan transformator daya dengan jenis konfigurasi belitan Delta – Wye memiliki nilai *overvoltage* akibat feroresonansi terbesar yaitu 2,74 p.u di sisi primer dan 1,62 p.u di sisi sekunder.
5. Respon tegangan transformator daya dengan jenis konfigurasi belitan Delta – Delta memiliki nilai *overvoltage* akibat feroresonansi terbesar yaitu 2,66 p.u di sisi primer dan 1,48 p.u di sisi sekunder.
6. Respon tegangan transformator daya dengan jenis konfigurasi belitan Wye – Wye memiliki nilai *overvoltage* akibat feroresonansi terbesar yaitu 2,12 p.u di sisi primer dan 2,15 p.u di sisi sekunder.
7. Respon tegangan transformator daya dengan jenis konfigurasi belitan Wye – Delta memiliki nilai *overvoltage* akibat feroresonansi terbesar yaitu 1,64 p.u di sisi primer dan 1,61 p.u di sisi sekunder
8. Konfigurasi belitan Delta – Wye merupakan konfigurasi belitan yang paling rentan terhadap feroresonansi karena memiliki *overvoltage* terbesar dan memiliki karakteristik feroresonansi yang paling buruk yaitu mode *Chaotic*.
9. Konfigurasi belitan Wye – Delta merupakan konfigurasi belitan yang paling tahan terhadap feroresonansi karena memiliki nilai *overvoltage* yang cenderung kecil saat diberikan operasi *switching* dan memiliki karakteristik feroresonansi yang cenderung bertipe *Subharmonic mode*.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari tugas akhir ini untuk studi di masa yang akan datang adalah melakukan studi atau simulasi tentang perbedaan respon tegangan serta karakteristik feroresonansi saat diberikan gangguan operasi *switching* yang tidak serempak pada jenis bahan inti yang berbeda. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan pada kurva magnetisasi dari setiap jenis inti besi. Dengan adanya studi ini diharapkan menjadi acuan dalam perancangan transformator tiga fasa untuk meminimalisir terjadinya gangguan feroresonansi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] B. L. Tobing, Peralatan Tegangan Tinggi, 2nd ed. Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan: Erlangga, 2012.

[2] S. J. Chapman, "*Electric Machinery Fundamentals"*, 4th ed., internat. ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2005.

[3] E. Price, "*A tutorial of Feroresonance*," Washington: IEEE, 2013, pp. 676–704.

[4] R. Zhang, H. Li, S. P. Ang, and Z. Wang, "*Complexity of ferroresonance phenomena: sensitivity studies from a single-phase system to three-phase reality*," 2010, pp. 172–175.

[5] F. A. M. Rizk and G. N. Trinh, "*High Voltage Engineering*". Boca Raton London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.

[6] T. Gonen, "*Electrical Power Transmission System Engineering Analysis and Design"*. Third Edition. California State University, Sacramento, USA: CRC Press, 2017.

[7] Daman Suswanto, "Sistem Distribusi Tenaga Listrik", Edisi Pertama. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Padang, 2009.

[8] J. H. Harlow, Ed., "*Electric Power Transformer Engineering*". Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2004.

[9] P. Ferracci, "Ferroresonance," in Cahier Techniques, Group Schneider, 1998, pp. 1–28.

[10] K. Andarini, I. M. Y. Negara, and I. G. N. S. Hernanda, "Deteksi Feroresonansi Pada Transformator Tiga Fasa Yang Tidak Simetri Terhadap Pengaruh Dari Pengubahan Kapasitansi," 2017, pp. 1–6.

[11] Charell Naufal Kiramindyo, I Made Yulistya Negara, dan IGN Satriyadi Hernanda, "Dampak Penambahan Impedansi Pada Kumparan Transformator Daya Terhadap Feroresonansi Di Saluran Transmisi 500 kV", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.

[12] IGN Satriyadi Hernanda, et al. "*Impact of Windings Cofiguration of Three-Phases Power Distribution Transformer on Ferroresonance*", Surabaya, 2017.

[13] I Made Yulistya Negara, Daniar Fahmi, Naufal Arif Kurniawan, “Pengaruh Topologi Pemotongan Inti Transformator 3 Fasa Terhadap Arus Inrush Dan Rating Kerja”, Tugas Akhir, 2016.

[14] Javier Arturo Corea Araujo, “Modeling and Analysis of Power Transformers Under Ferroresonance Phenomenon”, Universitat Rovira, Virgili, 2015.

[15] Satria Seventino Simamora, I Made Yulistya Negara, dan Daniar Fahmi, “Studi Pemasangan Damping Reaktor Untuk Mengatasi Feroresonansi Pada Incoming 20 KV GIS Tandes”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.

LAMPIRAN

```
BEGIN NEW DATA CASE
C ------------------------------------------------------
C Generated by ATPDRAW May, Saturday 11, 2019
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2015
C ------------------------------------------------------
POWER FREQUENCY                        50.
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
   1.E-6      .7
     500       1       1       1       1       0       0
1       0
C         1          2          3          4          5
6         7         8
C
345678901234567890123456789012345678901234567890123456
78901234567890123456789 0
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R < L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
  TRANSFORMER                              X0005A 6.5E6
0
         0.00745          123.79
        0.018562          129.59
       0.0745246          136.45
        0.222739          137.82
            9999
 1X0002A                    220. 1.745 1.5E5
 2X0004AX0004B                5.  .039  2.E4
  TRANSFORMER  X0005A                           X0005B
0
 1X0002B
 2X0004BX0004C
  TRANSFORMER  X0005A                           X0005C
0
 1X0002C
 2X0004CX0004A
  X0007A                                  3.E3   9.E3
0
  X0007B                                  3.E3   9.E3
0
```

```
  X0007C                                  3.E3    9.E3
0
  X0010AX0003A                                     .05
0
  X0010BX0003B                                     .05
0
  X0010CX0003C                                     .05
0
  X0003A                                            .2
0
  X0003B                                            .2
0
  X0003C                                            .2
0
-1X0006AX0007A            .033864.793340.255   1.5 0 0
0
-2X0006BX0007B            .01277.0079312.275   1.5 0 0
0
-3X0006CX0007C
0
  XX0008                                          500.
0
  X0001AX0010A                            3.86441.264
0
  X0001BX0010B                            3.86441.264
0
  X0001CX0010C                            3.86441.264
0
  XX0009                                           16.
0
BLANK BRANCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde ><   Ie   ><Vf/CLOP ><
type  >
  X0003AX0002A                              MEASURING
1
  X0003BX0002B                              MEASURING
1
  X0003CX0002C                              MEASURING
1
  X0010AX0003A                -1.                   .2
0
  X0010BX0003B                -1.                   .2
0
```

```
  X0010CX0003C                  -1.               .206
0
  X0004AX0006A                                MEASURING
1
  X0004BX0006B                                MEASURING
1
  X0004CX0006C                                MEASURING
1
BLANK SWITCH
C < n 1><>< Ampl.   >< Freq.   ><Phase/T0><    A1    ><
T1   >< TSTART >< TSTOP  >
14X0001A       122474.487                          50.
-1.        1.
14X0001B    122474.487              50.          -120.
-1.        1.
14X0001C    122474.487              50.          -240.
-1.        1.
Blank card ends electric sources.  KCONST = 3    |BLANK
SOURCE
```

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

RIWAYAT HIDUP

Bagas Kuntala Aji, lahir di Bekasi pada tanggal 14 Juli 1997. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Selama kuliah penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS sebagai Staff Departemen Pengabdian Masyarakat periode 2016 – 2017. Penulis juga aktif sebagai salah satu asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro ITS sebagai Staff Riset dan *Development* pada tahun 2018, Koordinator Riset dan *Development* pada tahun 2018, Koordinator Asisten pada tahun 2019. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu:

1. SDN Jaka Setia 4 Bekasi
2. SMPN 199 Jakarta
3. SMAN 61 Jakarta

Penulis dapat dihubungi pada email: bagaskuntalaaji@gmail.com.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---