



TUGAS AKHIR - EE 184801

**STUDI PENGARUH HUBUNGAN BELITAN
TRANSFORMATOR *DISTRIBUTED GENERATION* (DG)
TERHADAP FERORESONANSI PADA SALURAN
DISTRIBUSI**

Wildan Ihsanul Walid
NRP 07111540000100

Dosen Pembimbing
Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

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



TUGAS AKHIR - EE 184801

**STUDI PENGARUH HUBUNGAN BELITAN
TRANSFORMATOR *DISTRIBUTED GENERATION* (DG)
TERHADAP FERORESONANSI PADA SALURAN
DISTRIBUSI**

Wildan Ihsanul Walid
NRP 07111540000100

Dosen Pembimbing
Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

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



FINAL PROJECT - EE 184801

***STUDY OF DISTRIBUTED GENERATION (DG)
TRANSFORMER WINDING EFFECT ON
FERRORESONANCE IN DISTRIBUTION LINE***

Wildan Ihsanul Walid
NRP 07111540000100

Supervisor(s)
Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

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

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Studi Pengaruh Hubungan Belitan Transformator *Distributed Generation* (DG) Terhadap Feroresonansi Pada Saluran Distribusi**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

Surabaya, Juni 2020

Wildan Ihsanul Walid
NRP. 0711 15 4000 0100

**STUDI PENGARUH HUBUNGAN BELITAN
TRANSFORMATOR *DISTRIBUTED GENERATION*
(DG) TERHADAP FERORESONANSI PADA
SALURAN DISTRIBUSI**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. IGN Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.
NIP. 197301232002121001

**SURABAYA
JUNI, 2020**

**STUDI PENGARUH HUBUNGAN BELITAN
TRANSFORMATOR *DISTRIBUTED GENERATION*
(DG) TERHADAP FERORESONANSI PADA
SALURAN DISTRIBUSI**

TUGAS AKHIR


Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing II


Dimas Antor Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198109052005011002

**SURABAYA
JUNI, 2020**

STUDI PENGARUH HUBUNGAN BELITAN TRANSFORMATOR *DISTRIBUTED GENERATION* (DG) TERHADAP FERORESONANSI PADA SALURAN DISTRIBUSI

Nama : Wildan Ihsanul Walid
Pembimbing 1 : Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.
Pembimbing 2 : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Feroresonansi merupakan sebuah gangguan yang mungkin terjadi pada sistem tenaga listrik. Feroresonansi bisa mengakibatkan tegangan lebih dan osilasi pada gelombang tenaga listrik. Dewasa ini mulai banyak diterapkan pembangkit tenaga listrik menggunakan energi terbarukan yang berskala kecil yang biasa disebut *Distributed Generation* (DG). Pada penelitian kali ini akan meneliti pengaruh perubahan belitan transformator *step-up* DG. Untuk mencapai tujuan tersebut maka dibuat rangkaian simulasi feroresonansi yang terdiri dari rangkaian sederhana dari *Single Line Diagram* (SLD) dari PLN Nusa Penida, dan rangkaian ekivalen feroresonansi. Rangkaian tersebut terdiri dari sumber tegangan, pemicu berupa *switching*, kapasitansi serta induktansi non-linier. Data yang diambil berupa nilai tegangan puncak serta karakteristik feroresonansi pada transformator *step-up* DG dengan hubungan belitan bintang-bintang, bintang-delta, delta-bintang dan delta-delta. Penelitian ini memperoleh nilai tegangan puncak yang bervariasi serta karakteristik yang beragam. Dari hasil analisis didapat bahwa hubungan belitan yang rentan terhadap feroresonansi adalah hubungan belitan bintang-bintang. Dengan nilai tegangan puncak tertinggi bernilai 139660V. Sedangkan hubungan belitan yang aman adalah hubungan belitan bintang-delta. Dengan nilai tegangan puncak tertinggi bernilai 78079V.

Kata Kunci – *Distributed Generation*, Transformator, Feroresonansi, Distribusi, Belitan Transformator, ATPdraw.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

STUDY OF DISTRIBUTED GENERATION (DG) TRANSFORMER WINDING EFFECT ON FERRORESONANCE IN DISTRIBUTION LINE

Name : Wildan Ihsanul Walid
Advisor 1 : Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.
Advisor 2 : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Ferroresonance is a disturbance that may occur in the electric power system. Ferroresonance can cause overvoltage and oscillation in electric power wave. Nowadays many power plants are applied using small-scale renewable energy commonly called Distributed Generation (DG). This study will examine effect of the winding changes of DG step-up transformer. To achieve the goal, a series of ferroresonansi simulation was made consisting of a simple series of Single Line Diagram (SLD) from PLN Nusa Penida, and an equivalent series of ferroresonansi. The circuit consists of a voltage source, a trigger in the form of switching, capacitance also non-linear inductance. The Data collected is in the form of peak voltage values and ferroresonance characteristics of the DG step-up transformer with the windings connection of the turn of star-star, star-delta, delta-star and delta-delta. This study got varying peak voltage value and various characteristics. From the result of the analysis, it was found that the winding connection that is susceptible to ferroresonance is star-star winding. With the highest peak voltage value is 139660V . Whereas a safe winding connection is star-delta winding. With the highest peak voltage value is 78079V .

Keywords – *Distributed Generation*, Transformer, Ferroresonance, Distribution, Transformer Winding, ATPdraw.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat, hidayah serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Pengaruh Hubungan Belitan Transformator *Distributed Generation* (DG) Terhadap Feroresonansi pada Saluran Distribusi” dengan lancar dan tepat waktu.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama mengerjakan Tugas Akhir ini tidak luput dari bantuan berbagai pihak. Maka dari itu penulis mengucapkan terimakasih banyak kepada:

1. Kedua orang tua penulis yang selalu mendukung serta mendoakan dalam situasi apapun, sehingga penulis bisa sampai pada titik ini.
2. Kepada Bapak Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 1 dan Bapak Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberikan bimbingan, saran serta motivasi sehingga penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Seluruh dosen maupun karyawan Departemen Tekni Elektro ITS yang telah memberikan ilmunya selama proses studi di Departemen ini.
4. Angkatanku e55 yang selalu menjadi tempat untuk mewarnai dunia perkuliahan.
5. Teman-teman BEM FTI TORSI, HIMATEKTRO SERASI dan BEM FTE GEMAS yang telah memberikan pengalaman berharga selama perkuliahan.
6. Seluruh teman-teman lain yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Semoga Tugas Akhir ini bisa memberikan manfaat baik untuk penulis sendiri maupun untuk pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juni 2020

Penulis

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	I
ABSTRACT	III
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI	VII
DAFTAR GAMBAR	XI
DAFTAR TABEL	XII
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Relevansi dan Manfaat	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik	5
2.2 Sistem Distribusi	6
2.2.1 Gardu Induk	6
2.2.2 Gardu Distribusi	7
2.3 <i>Distributed Generation</i>	8
2.3.1 Pembangkit Listrik Tenaga Angin	8
2.3.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya.....	9
2.4 Transformator.....	10
2.4.1 Prinsip Kerja Transformator	11
2.4.2 Kurva Histeresis	11
2.4.3 Transformator Daya	12
2.5 Konfigurasi Belitan Transformator	12
2.5.1 Konfigurasi Belitan Bintang (Y)	13
2.5.2 Konfigurasi Belitan Delta (Δ)	13
2.5.3 Hubungan Belitan Bintang-Bintang (Y-Y)	14
2.5.4 Hubungan Belitan Bintang-Delta (Y- Δ)	15
2.5.5 Hubungan Belitan Delta-Bintang (Δ -Y)	15
2.5.6 Hubungan Belitan Delta-Delta (Δ - Δ)	16
BAB III ANALISIS PERMASALAHAN	17
3.1 Feroresonansi	17

3.1.1	Karakteristik Feroresonansi	19
3.2	Sistem Kelistrikan Nusa Penida	20
3.3	Simulasi Feroresonansi	21
3.3.1	Pemodelan Rangkaian Feroresonansi	21
3.3.2	Pemodelan Transformator Daya	24
3.3.3	Konfigurasi Belitan Transformator	25
3.4	Pengambilan dan Pengolahan Data	28
BAB IV HASIL DAN ANALISIS		31
4.1	Rangkaian Simulasi Feroresonansi Konfigurasi Y-Y	31
4.1.1	Respon Tegangan Saat Kondisi Normal.....	31
4.1.2	Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 1 Fasa	32
4.1.3	Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 2 Fasa	34
4.1.4	Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 3 Fasa	35
4.1.5	Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Bintang-Bintang	37
4.2	Rangkaian Simulasi Feroresonansi Konfigurasi Y- Δ	38
4.2.1	Respon Tegangan Saat Kondisi Normal.....	38
4.2.2	Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 1 Fasa	39
4.2.3	Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 2 Fasa	41
4.2.4	Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 3 Fasa	42
4.2.5	Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Bintang-Delta	44
4.3	Rangkaian Simulasi Feroresonansi Konfigurasi Δ -Y.....	45
4.3.1	Respon Tegangan Saat Kondisi Normal.....	45
4.3.2	Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 1 Fasa	46
4.3.3	Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 2 Fasa	48
4.3.4	Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 3 Fasa	49
4.3.5	Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Delta-Bintang	51
4.4	Rangkaian Simulasi Feroresonansi Konfigurasi Δ - Δ	52

4.4.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal	52
4.4.2 Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 1 Fasa	53
4.4.3 Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 2 Fasa	55
4.4.4 Respon Tegangan Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 3 Fasa	56
4.4.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Delta-Delta	58
4.5 Analisis Tegangan Puncak.....	59
4.6 Analisis Karakteristik Feroresonansi	60
BAB V PENUTUP	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	62
DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN.....	65
BIOGRAFI PENULIS	83

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Tenaga Listrik.....	5
Gambar 2.2	Gardu Induk Konvensional	7
Gambar 2.3	Gardu Distribusi.....	8
Gambar 2.4	Pembangkit Listrik Tenaga Angin.....	9
Gambar 2.5	Pembangkit Listrik Tenaga Surya	10
Gambar 2.6	Transformator	10
Gambar 2.7	Kurva Histeresis.....	11
Gambar 2.8	Konfigurasi Belitan Bintang/Wye (Y)	13
Gambar 2.9	Konfigurasi Belitan Delta (Δ)	13
Gambar 2.10	Hubungan Belitan Bintang-Bintang (Y-Y)	14
Gambar 2.11	Hubungan Belitan Bintang-Delta (Y- Δ).....	15
Gambar 2.12	Hubungan Belitan Delta-Bintang (Δ -Y).....	16
Gambar 2.13	Hubungan Belitan Delta-Delta (Δ - Δ)	16
Gambar 3.1	Rangkaian Feroresonansi	17
Gambar 3.2	<i>Fundamental Mode</i>	19
Gambar 3.3	<i>Subharmonic Mode</i>	19
Gambar 3.4	<i>Quasi-Periodic Mode</i>	19
Gambar 3.5	<i>Chaotic Mode</i>	20
Gambar 3.6	Rangkaian Sederhana Sistem Kelistrikan Nusa Penida.....	21
Gambar 3.7	Rangkaian Ekuivalensi Feroresonansi	22
Gambar 3.8	Rangkaian Simulasi Feroresonansi	22
Gambar 3.9	Kurva Magnetisasi Transformator.....	25
Gambar 3.10	Rangkaian Simulasi Bintang-Bintang (Y-Y)	26
Gambar 3.11	Rangkaian Simulasi Bintang-Delta (Y- Δ)	26
Gambar 3.12	Rangkaian Simulasi Delta-Bintang (Δ -Y).....	27
Gambar 3.13	Rangkaian Simulasi Delta-Delta (Δ - Δ)	27
Gambar 3.14	<i>Flowchart</i> Pengambilan dan Pengolahan Data	29
Gambar 4.1	Rangkaian Simulasi Hubungan Bintang-Bintang	31
Gambar 4.2	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi Normal	31
Gambar 4.3	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 1 Fasa	33
Gambar 4.4	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 2 Fasa	35
Gambar 4.5	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang	

	Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 3 Fasa	36
Gambar 4.6	Rangkaian Simulasi Hubungan Bintang-Delta .	38
Gambar 4.7	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi Normal	38
Gambar 4.8	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 1 Fasa	40
Gambar 4.9	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 2 Fasa	42
Gambar 4.10	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 3 Fasa	43
Gambar 4.11	Rangkaian Simulasi Hubungan Delta-Bintang	45
Gambar 4.12	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi Normal	45
Gambar 4.13	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 1 Fasa	47
Gambar 4.14	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 2 Fasa	49
Gambar 4.15	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 3 Fasa	50
Gambar 4.16	Rangkaian Simulasi Hubungan Delta-Delta	52
Gambar 4.17	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi Normal	52
Gambar 4.18	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 1 Fasa	54
Gambar 4.19	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 2 Fasa	56
Gambar 4.20	Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi <i>Switching</i> Terbuka 3 Fasa	57
Gambar 4.21	Grafik Nilai Tegangan Puncak	59

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter Rangkaian Pemodelan Feroresonansi.....	23
Tabel 3.2	Parameter Transformator DG.....	24
Tabel 3.3	Parameter Transformator Beban	24
Tabel 3.4	Parameter Kurva Magnetisasi	24
Tabel 4.1	Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Hubungan Belitan Bintang-Bintang.....	37
Tabel 4.2	Karakteristik Feroresonansi yang Dihasilkan dengan Hubungan Belitan Bintang-Bintang.....	37
Tabel 4.3	Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Hubungan Belitan Bintang-Delta.....	44
Tabel 4.4	Karakteristik Feroresonansi yang Dihasilkan dengan Hubungan Belitan Bintang-Delta.....	44
Tabel 4.5	Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Hubungan Belitan Delta-Bintang.....	51
Tabel 4.6	Karakteristik Feroresonansi yang Dihasilkan dengan Hubungan Belitan Delta-Bintang.....	51
Tabel 4.7	Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya dengan Hubungan Belitan Delta-Delta.....	58
Tabel 4.8	Karakteristik Feroresonansi yang Dihasilkan dengan Hubungan Belitan Delta-Delta.....	58
Tabel 4.9	Hasil Karakteristik Feroresonansi	60

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini listrik sudah menjadi kebutuhan pokok manusia. 24 jam nonstop kita terus bersinggungan dengan listrik, dimanapun dan dalam kondisi apapun. Listrik dihasilkan melalui pembangkit tenaga listrik yang secara letak jauh dari pusat konsumen atau beban, lalu disalurkan melalui saluran transmisi untuk menjangkau tempat yang jauh dan selanjutnya didistribusikan ke konsumen melalui saluran distribusi. Pembangkit tenaga listrik yang ada saat ini sebagian besar menggunakan bahan bakar batu bara. Penggunaan bahan bakar batu bara pada pembangkit tenaga listrik dikatakan mempunyai biaya yang murah. Akan tetapi penggunaan batu bara yang terus menerus akan membuat ketersediaan batu bara menipis dan butuh waktu berjuta-juta tahun lagi bagi tumbuhan mati untuk menjadi batu bara. Saat ini teknologi pembangkit dengan menggunakan sumber-sumber terbarukan mulai banyak dikembangkan. Seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan lain sebagainya. Hal itu tentu baik untuk keberlangsungan kehidupan kedepannya. Akan tetapi pembangkit dengan sumber energi terbarukan masih dalam lingkup skala kecil yang langsung bersinggungan dengan konsumen dan biasanya disebut *Distributed Generation* (DG).

Karena pentingnya listrik dalam kehidupan sehari-hari, maka dibutuhkan sistem tenaga listrik yang andal mulai dari pembangkit sampai bisa diterima oleh konsumen. Agar sistem tenaga listrik andal, diperlukan peralatan-peralatan yang harus bisa berfungsi secara optimal. Salah satu peralatan yang harus berfungsi secara optimal dan terus menerus adalah transformator. Transformator berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan. Didalam transformator terdapat komponen berupa belitan yang mempengaruhi kenaikan atau penurunan nilai tegangan pada transformator. Pada transformator penaik tegangan (*step-up*) belitan yang berada pada sisi primer merupakan belitan yang terhubung langsung dengan pembangkit atau tegangan yang lebih rendah dan belitan sekunder merupakan belitan yang terhubung langsung ke beban atau ke tegangan yang lebih tinggi. Begitu pula sebaliknya pada transformator penurun tegangan (*step-down*).

Belitan transformator mempunyai konfigurasi yang secara umum dapat dibedakan menjadi konfigurasi belitan bintang atau *wye* (Y) dan konfigurasi belitan delta (Δ). Kombinasi kedua belitan tersebut pada transformator akan memberikan perbedaan karakteristik pada transformator tersebut.[1]

Gangguan merupakan salah satu permasalahan yang harus dihadapi dalam sistem tenaga listrik agar sistem tersebut tetap andal. Salah satu gangguan yang mungkin terjadi adalah gangguan tegangan lebih. Tegangan lebih ini berupa lonjakan tegangan yang berisolasi pada frekuensi tinggi. Gangguan tersebut biasa disebut sebagai feroresonansi. Feroresonansi bisa saja merusak peralatan. Tegangan lebih yang dihasilkan bisa melebihi tegangan rating peralatan sehingga dapat merusak.

Feroresonansi bisa muncul akibat dari adanya komponen-komponen kapasitif yang berasal dari kabel atau saluran, komponen induktif non-linier dari inti transformator dan adanya pemuncu sesat seperti petir atau *switching*[2]. Gangguan ini dapat membahayakan sistem tenaga listrik dan dapat mengakibatkan menurunnya keandalan sistem tenaga listrik.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah :
Bagaimana mengetahui karakteristik sistem distribusi DG terhadap munculnya feroresonansi khususnya terkait dengan konfigurasi hubungan belitan pada transformator *step-up*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Transformator yang dipakai adalah transformator *step-up*
2. Feroresonansi yang dilihat pada saluran distribusi
3. Konfigurasi yang dipakai adalah Bintang-Bintang, Bintang-Delta, Delta-Bintang dan Delta-Delta

1.4 Relevansi dan Manfaat

Mengetahui pengaruh belitan transformator *step-up* DG terhadap feroresonansi pada saluran distribusi.

1.5 Metodologi

1. Studi literatur

Studi literatur yang dilakukan pertama yaitu mempelajari tentang DG dan transformator. DG merupakan sebuah teknologi baru yang dewasa ini baru mulai muncul di Indonesia. Studi tentang DG diharapkan memberikan wawasan tentang DG secara umum. Sedangkan mempelajari transformator karena pada penelitian ini terfokus pada hubungan belitan dari transformator yang akan dirubah. Selanjutnya, studi tentang feroresonansi yang terjadi pada saluran distribusi. Studi tentang feroresonansi bertujuan untuk memberikan wawasan tentang feroresonansi. Feroresonansi yang akan dilihat adalah pada bagian beban.

2. Membuat Model dan Simulasi

Pembuatan model rangkaian menggunakan *software* ATPdraw. Setelah membuat pemodelan rangkaian, langkah selanjutnya yang dilakukan yaitu mengubah parameter. Yaitu dengan mengubah hubungan belitan yang ada pada transformator dengan konfigurasi bintang-bintang, bintang-delta, delta-bintang dan delta-delta. Perubahan parameter merupakan pengaruh yang akan dipelajari pada penelitian ini. Feroresonansi yang dibangkitkan menggunakan metode *switching* 1 fasa, 2 fasa dan 3 fasa.

3. Analisis

Setelah mensimulasikan semua percobaan. Selanjutnya akan dianalisis setiap perubahan parameter yang terjadi. Dari hasil simulasi tersebut diharapkan akan terlihat perbedaan dari setiap perubahan parameter yang dilakukan.

4. Kesimpulan

Langkah terakhir yaitu menarik kesimpulan. Dari hasil analisis yang sudah didapat, maka akan ditarik kesimpulan yang nantinya akan menjelaskan tentang tiap perubahan belitan akan berdampak pada feroresonansi yang terjadi pada beban.

1.6 Sistematika

Bab I berisi pendahuluan yang mengandung latar belakang, permasalahan, batasan masalah, relevansi dan manfaat, metodologi dan sistematika pada penelitian ini.

Bab II berisi teori pendukung tentang sistem tenaga listrik khususnya pada sistem distribusi, selain itu membahas tentang transformator dengan berbagai konfigurasi belitan.

Bab III berisi tentang teori mengenai feroresonansi pada sistem tenaga listrik dan pemodelan rangkaian feroresonansi dengan mengubah parameter konfigurasi belitan transformator serta penambahan pemacu sesaat berupa *switching*, simulasi dilakukan dengan *software* ATPdraw.

Bab IV berisi tentang hasil simulasi yang sudah dilakukan serta analisis terhadap fenomena feroresonansi yang muncul dari simulasi yang telah dilakukan.

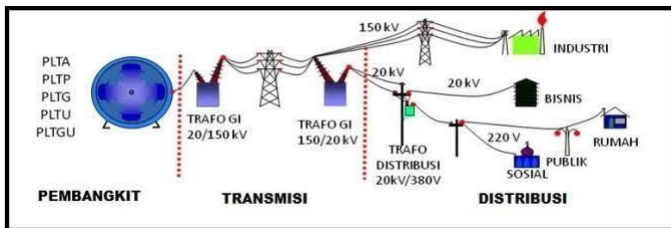
Bab V berisi kesimpulan dari hasil studi yang telah dilaksanakan dan saran mengenai studi tersebut maupun saran untuk studi kedepannya.

BAB II

SISTEM TENAGA LISTRIK DAN TRANSFORMATOR

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu : pembangkit, transmisi dan distribusi. Pembangkitan tenaga listrik di Indonesia masih banyak dibangkitkan menggunakan sumber daya batubara yang biasanya terletak di dekat laut. Dengan letak yang jauh dari pusat beban yang biasanya berada di kota-kota besar, membuat sistem tenaga listrik harus andal agar tenaga listrik tersebut bisa tersalurkan secara stabil dan terus menerus. Secara umum sistem tenaga listrik bisa dilihat seperti gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Pada sisi pembangkit perubahan energi terjadi. Energi yang awalnya berupa batubara, minyak, angin, air, dan lain sebagainya diubah menjadi energi listrik lewat generator yang ada pada pembangkit. Pada pembangkit terdapat transformator untuk menaikkan tegangan, dari tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit menjadi tegangan untuk sistem transmisi.

Sistem transmisi merupakan penyalur daya listrik dari pembangkit sampai ke sistem distribusi. Transmisi mempunyai jarak yang jauh. Jarak yang jauh itulah membuat sistem transmisi mempunyai nilai tegangan yang tinggi. Tegangan yang tinggi berfungsi untuk mengurangi *losses* atau *drop* tegangan selama penyaluran daya listrik. Menurut standar yang diberlakukan oleh PT. PLN, tegangan tinggi mempunyai nilai antara 35-245kV. Sedangkan tegangan ekstra tinggi mempunyai nilai >245kV. Sistem transmisi biasanya bertegangan 150/500 kV.[3]

Sistem distribusi bisa dibagi menjadi 2 bagian, yaitu sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder. Sistem distribusi primer mempunyai besaran nilai tegangan 20kV. Sedangkan sistem distribusi sekunder mempunyai nilai tegangan 220V.

2.2 Sistem Distribusi

Sistem distribusi merupakan salah satu dari tiga sistem yang ada pada sistem tenaga listrik. Sistem distribusi merupakan sistem yang paling dekat dengan konsumen. Sistem distribusi bisa dibagi menjadi sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder. Sistem distribusi primer dimulai dari gardu induk sampai ke gardu distribusi. Sedangkan sistem distribusi sekunder dimulai dari gardu distribusi sampai ke beban atau pelanggan.

Sistem distribusi primer mempunyai tegangan sebesar 20kV atau yang lebih dikenal dengan tegangan menengah. Pada tegangan menengah biasanya masih menggunakan jaringan 3 fasa untuk penyalurannya. Pelanggan yang berlangganan dengan daya besar juga langsung disuplai oleh jaringan distribusi primer.

Sistem distribusi sekunder mempunyai nilai tegangan sebesar 380/220V atau yang dikenal dengan tegangan rendah. Pada jaringan distribusi sekunder mensuplai listrik pada rumah-rumah atau pelanggan dengan daya yang kecil. Biasanya jaringan ini menggunakan sistem 1 fasa.

2.2.1 Gardu Induk

Gardu Induk merupakan penghubung antara sistem transmisi dan sistem distribusi. Gardu induk merupakan komponen penting dalam penyaluran listrik dari pembangkit hingga sampai ke konsumen[4]. Sistem transmisi yang mempunyai nilai tegangan yang tinggi akan diturunkan menjadi tegangan distribusi. Selain itu gardu induk akan membagi daya listrik untuk disalurkan ke sistem distribusi. Gardu induk sendiri bisa dibagi menjadi gardu induk konvensional dan gardu induk station. Contoh gardu induk seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Gardu Induk Konvensional

Gardu induk konvensional ditandai dengan letak peralatan yang berada pada ruangan terbuka. Sehingga membutuhkan lahan yang luas. Namun tidak semua peralatannya berada di ruang terbuka. Beberapa peralatan seperti peralatan pengaman di letakkan pada ruangan tertutup[5]. Di Indonesia gardu induk biasanya masih menggunakan gardu induk konvensional.

Gardu induk station merupakan gardu yang peralatannya diletakkan di ruangan tertutup. Gardu induk station biasanya terletak pada daerah perkotaan yang padat dengan pemukiman sehingga hanya terdapat lahan yang tidak terlalu luas. Pada gardu induk station, hanya transformator daya yang berada pada ruangan terbuka.

2.2.2 Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan salah satu komponen penting dalam penyaluran daya listrik pada saluran distribusi. Gardu distribusi mempunyai fungsi untuk menurunkan tegangan hingga ke level tegangan yang digunakan oleh pelanggan[6].



Gambar 2.3 Gardu Distribusi

Gambar 2.3 merupakan gardu distribusi jenis portal. Pada gardu distribusi terdapat beberapa komponen yang penting. Mulai dari tiang penyangga, peralatan pengaman, dan transformator. Besaran daya transformator pada gardu distribusi bergantung pada beban yang disuplai oleh gardu tersebut.

2.3 Distributed Generation

Distributed Generation (DG) merupakan sebuah generator pembangkit tenaga listrik yang berskala kecil dan letaknya dekat dengan konsumen. DG biasanya mempunyai beberapa modul generator dengan menggunakan energi terbarukan sebagai sumber energinya. Beberapa contoh DG yang terdapat di Indonesia adalah, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB).

2.3.1 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit Listrik Tenaga Angin atau yang sering disebut dengan PLTB merupakan sebuah pembangkit listrik yang menggunakan angin sebagai tenaga utama untuk menggerakkan kincir angin yang nantinya menggerakkan turbin. Bentuk dari kincir angin PLTB dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Kincir angin PLTB mempunyai beberapa komponen antara lain, *gearbox*, *break system*, generator, penyimpanan energi dan *rectifier-inverter*. *Gearbox* berfungsi untuk meningkatkan kecepatan putaran yang dihasilkan oleh kincir angin menjadi kecepatan yang dibutuhkan oleh generator. *Break system* berfungsi untuk menjaga kecepatan dari *gearbox* agar tetap pada putaran yang diinginkan apabila terdapat keadaan yang tidak terduga. Generator sendiri berfungsi untuk mengubah energi mekanik dari kincir angin menjadi energi listrik. Penyimpanan energi bertujuan agar listrik dapat dialirkan setiap saat dan tidak terpengaruh oleh kecepatan angin yang sedang berlangsung. *Rectifier-inverter* berfungsi untuk mengubah listrik AC ke DC (*rectifier*) agar bisa disimpan pada penyimpanan energi dan mengubah dari DC ke AC (*inverter*) untuk disalurkan ke konsumen dari penyimpanan energi.

2.3.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya atau biasa disebut PLTS merupakan sebuah pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari sebagai sumber energi untuk dirubah menjadi energi listrik. PLTS bisa dibagi menjadi 2 berdasarkan proses pembangkitan energi listriknya. Pertama adalah *Photovoltaik* (PV) dan yang kedua adalah PLTS *Thermal*. PV membangkitkan energi listrik dengan menggunakan efek fotolistrik. Dimana elektron dari sinar matahari akan dipisahkan yang nantinya bisa menjadi aliran arus listrik. PLTS *Thermal* menggunakan konsep pemanasan air menggunakan panas dari sinar matahari yang nantinya uap dari pemanasan air akan menggerakkan turbin dan menghasilkan energi listrik. Penerapan PLTS dalam keseharian dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

2.4 Transformator

Salah satu peralatan yang penting dalam penyaluran sistem tenaga listrik adalah transformator. Transformator atau yang sering disebut dengan trafo mempunyai fungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan. Dalam sistem tenaga listrik, transformator bisa dibagi menjadi transformator pembangkit, transformator gardu induk dan transformator distribusi. Pada gambar 2.6 merupakan transformator distribusi dengan 3 fasa.



Gambar 2.6 Transformator

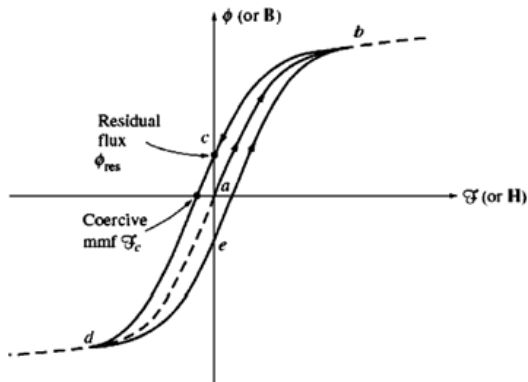
2.4.1 Prinsip Kerja Transformator

Pada transformator terdapat bagian penting seperti inti besi, belitan dan isolator. Inti besi transformator biasanya terbuat dari lembaran besi yang tipis dan terlaminasi. Belitan terbuat dari tembaga yang nantinya melilit inti besi. Isolator pada transformator biasanya menggunakan media cair atau gas. Belitan yang terhubung dengan sumber disebut kumparan primer. Sedangkan belitan yang terhubung dengan beban disebut kumparan sekunder.

Ketika belitan primer transformator diberikan tegangan arus bolak-balik maka akan timbul flusk pada belitan primer dan sekunder. Sehingga akan menimbulkan gaya gerak listrik[4]. Apabila belitan sekunder disambungkan ke beban, maka pada sekunder transformator akan mengalir arus. Nilai tegangan yang ditimbulkan oleh belitan sekunder bergantung pada banyaknya belitan kumparan tersebut.

2.4.2 Kurva Histeresis

Kurva histeresis merupakan kurva yang menunjukkan ketidaklinieran inti transformator. Kurva histeresis membandingkan antara kerapatan fluks magnetik (B) dan kuat medan magnet (H)[7]. Kurva tersebut merupakan representasi dari karakteristik magnetisasi inti transformator.



Gambar 2.7 Kurva Histeresis

Pada gambar 2.7 kurva histeresis, titik a merupakan titik awal kurva tersebut. Ketika transformator awal disuplai tegangan kerapatan fluks akan beranjak naik sampai pada titik saturasi. Pada saat nilai arus turun, kerapatan fluks akan turun juga. Akan tetapi penurunan nilai kerapatan fluks tidak sejalur dengan kenaikan saat awal. Hal tersebut dikarenakan adanya fluks sisa pada inti transformator. Pada saat naik lagi, kurva tersebut tidak sejalur lagi dengan kurva saat turun. Hal tersebut dikarenakan adanya fluks sisa pada inti transformator. Dan begitu seterusnya. Sisa fluks pada inti trafo dipengaruhi oleh permeabilitas inti transformator. Permeabilitas inti transformator diakibatkan oleh bahan dari inti transformator tersebut. Semakin bagus bahan yang digunakan pada inti transformator, maka kurva histeresis akan semakin rapat atau cenderung linier.

2.4.3 Transformator Daya

Transformator daya merupakan salah satu peralatan tegangan tinggi yang berfungsi untuk mentransformasikan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau dari tegangan rendah ke tegangan tinggi. Bagian utama dari transformator daya yaitu inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, dan tangki konservator, peralatan bantu transformator, dan peralatan proteksi. Dalam menghasilkan tegangan, ketika transformator terhubung dengan sumber tegangan bolak – balik maka akan menghasilkan gaya gerak listrik yang besarnya :

$$E1 = 4,44 fN1\phi \text{ (volt)} \quad (2.1)$$

$$E2 = 4,44 fN2 \phi \text{ (volt)} \quad (2.2)$$

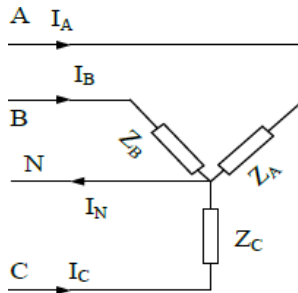
Dimana E1 dan E2 tegangan yang terbangkit di kumparan primer dan sekunder transformator, nilai f merupakan frekuensi tegangan dari sumber bolak –balik, N1 dan N2 merupakan belitan kumparan pada bagian primer dan sekunder transformator, dan ϕ merupakan besaran fluks magnetik pada inti transformator.

2.5 Konfigurasi Belitan Transformator

Konfigurasi belitan merupakan pola belitan yang berada pada inti transformator. Konfigurasi akan menentukan tegangan yang di transfer. Konfigurasi dari belitan inti transformator juga mempengaruhi karakteristik yang akan di timbulkan. Konfigurasi belitan dibagi menjadi 2, yaitu bintang (Y) dan delta (Δ)[4].

2.5.1 Konfigurasi Belitan Bintang (Y)

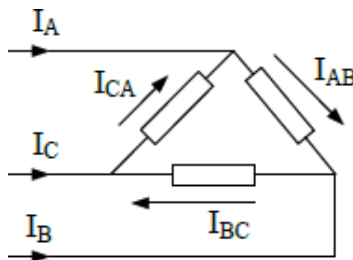
Konfigurasi belitan bintang mempunyai karakteristik dengan menghubungkan ujung-ujung setiap fasanya. Titik tersebut menjadi titik netral dari konfigurasi ini. Konfigurasi belitan bintang dapat dilihat pada gambar 2.8[8]. Arus pada konfigurasi bintang mempunyai perbedaan fasa sebesar 120° . Pada konfigurasi bintang, nilai arus tiap fasanya sama besar.



Gambar 2.8 Konfigurasi Belitan Bintang

2.5.2 Konfigurasi Belitan Delta (Δ)

Konfigurasi belitan delta mempunyai karakteristik dengan menghubungkan ujung akhir suatu fasa ke ujung awal fasa selanjutnya. Sehingga membentuk segitiga atau simbol delta. Konfigurasi belitan delta dapat dilihat pada gambar 2.9[8]. Pada konfigurasi delta, nilai tegangan fasa-fasa bernilai sama.



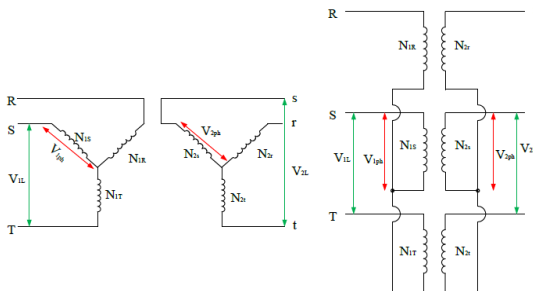
Gambar 2.9 Konfigurasi Belitan Delta

Pada transformator, pada sisi primer dan sekunder mempunyai belitan masing-masing. Sehingga hubungan belitan primer dan sekunder dari transformator mempunyai 4 macam hubungan belitan. Hubungan belitan transformator bisa bintang-bintang (Y-Y), bintang-delta (Y-Δ), delta-bintang (Δ-Y), dan delta-delta (Δ-Δ).

2.5.3 Hubungan Belitan Bintang-Bintang (Y-Y)

Hubungan bintang-bintang mempunyai rasio tegangan yang sama antara fasa-fasa primer dan sekunder. Sedangkan antara fasa-fasa dan fasa-netral mempunyai pergeseran sebesar 30°. Konfigurasi hubungan belitan bintang-bintang dapat dilihat pada gambar 2.10[8]. Pada hubungan Y-Y, beresiko memiliki tegangan antar fasa yang tidak seimbang apabila beban yang disuplai juga tidak seimbang. Selain itu pada hubungan ini, bisa memperbesar harmonisa ketiga. Dari risiko tersebut, bisa diminimalisir dengan penggunaan *solid grounded* dan penambahan belitan ketiga [8]. Perbandingan antara tegangan primer dan sekunder pada transformator hubungan bintang-bintang sebagai berikut:

$$\frac{V_{L,P}}{V_{L,S}} = \frac{\sqrt{3}V_{PH,P}}{\sqrt{3}V_{PH,S}} \quad (2.3)$$

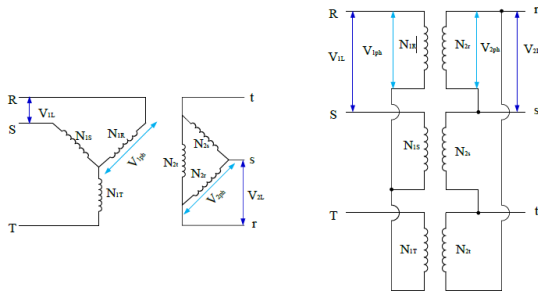


Gambar 2.10 Hubungan Belitan Bintang-Bintang

2.5.4 Hubungan Belitan Bintang-Delta (Y-Δ)

Hubungan bintang-delta mempunyai rasio tegangan fasa-fasa sebesar $1/\sqrt{3}$ antara primer dan sekunder dan mempunyai pergeseran fasa sebesar 30° . Konfigurasi hubungan belitan bintang-delta dapat dilihat pada gambar 2.11[8]. Hubungan bintang-delta lebih stabil dengan ketidakseimbangan dibanding hubungan bintang-bintang karena adanya hubungan delta. Selain itu, harmonisa ketiga juga tidak ada. Akan tetapi, dikarenakan adanya pergeseran fasa sebesar 30° , sehingga apabila akan memparalelkan transformator dengan hubungan ini maka transformator yang lain juga harus mempunyai perbedaan fasa sebesar 30° [8]. Perbandingan antara tegangan primer dan sekunder pada transformator hubungan bintang-delta sebagai berikut:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{PHP}}{V_{PHS}} \quad (2.4)$$

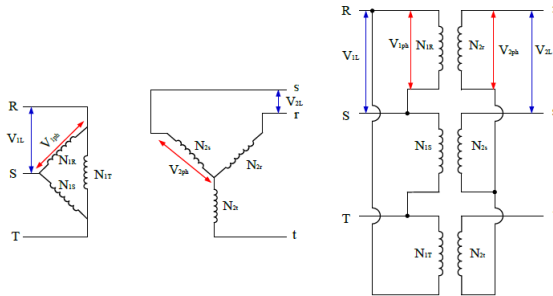


Gambar 2.11 Hubungan Belitan Bintang-Delta

2.5.5 Hubungan Belitan Delta-Bintang (Δ-Y)

Hubungan delta-bintang merupakan kebalikan dari hubungan bintang-delta. Hubungan belitan ini biasanya digunakan untuk menurunkan tegangan. Konfigurasi hubungan belitan delta-bintang dapat dilihat pada gambar 2.12[8]. Pada hubungan ini, karakteristik hampir sama dengan hubungan bintang-delta. Yang membedakan hanyalah pergeseran fasa sebesar 30° pada hubungan ini terjadi pada sisi primer [8]. Perbandingan antara tegangan primer dan sekunder pada transformator hubungan delta-bintang sebagai berikut:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{PHP}}{\sqrt{3}V_{PHS}} \quad (2.5)$$

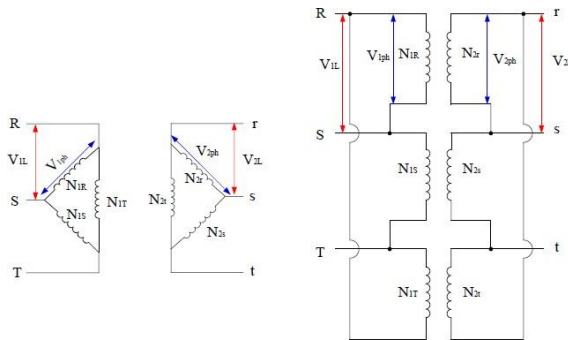


Gambar 2.12 Hubungan Belitan Delta-Bintang

2.5.6 Hubungan Belitan Delta-Delta (Δ - Δ)

Hubungan delta-delta mempunyai rasio tegangan fasa-fasa yang sama antara primer dan sekunder. Konfigurasi hubungan belitan delta-delta dapat dilihat pada gambar 2.13[8]. Tidak ada masalah ketidakseimbangan, harmonisa, maupun pergeseran fasa di hubungan belitan ini [8]. Perbandingan antara tegangan primer dan sekunder pada transformator hubungan delta-delta sebagai berikut:

$$\frac{V_{L P}}{V_{L S}} = \frac{V_{P H P}}{V_{P H S}} \quad (2.6)$$



Gambar 2.13 Hubungan Belitan Delta-Delta

BAB III

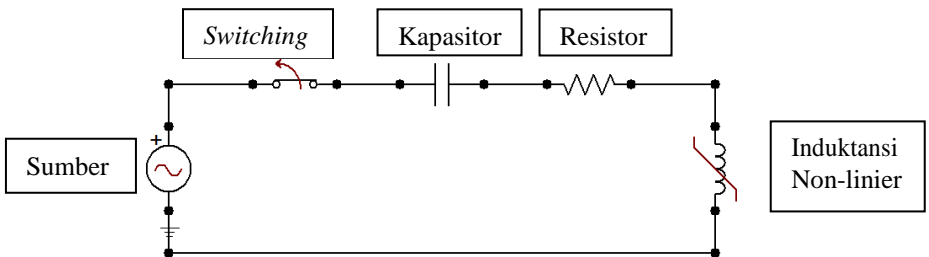
FERORESONANSI DAN RANGKAIAN PEMODELAN

Listrik sudah menjadi kebutuhan setiap manusia. Ketersediaan listrik yang bisa hadir terus menerus merupakan kewajiban yang harus dilaksanakan. Teknologi yang ada saat ini cukup membantu untuk kontinuitas aliran listrik. Sistem kelistrikan yang rumit, membuat teknologi yang ada pun masih belum mampu untuk menyelesaikan masalah-masalah yang hadir. Gangguan-gangguan yang mempengaruhi kualitas listrik bisa hadir dari internal sistem itu sendiri maupun dari eksternal. Gangguan dari internal bisa saja seperti *switching* akibat dari kebutuhan untuk pemeliharaan peralatan listrik. Sedangkan gangguan dari luar bisa berupa petir yang bisa saja menyambar saat musim penghujan tiba. Faktor-faktor tersebut menyebabkan sistem kelistrikan tidak dalam kondisi normal. Salah satu dampak dari ketidaknormalan sistem yaitu terjadinya fenomena transien atau kejadian sesaat.

Keadaan transien pada dasarnya disebabkan oleh banyak faktor. Bisa akibat dari kapasitansi saluran, inti transformator dan lain sebagainya. Keadaan tersebut bisa saja merusak peralatan yang akan mengakibatkan kerugian. Keadaan transien dalam sistem tenaga listrik sering disebut dengan istilah feroresonansi.

3.1 Feroresonansi

Feroresonansi merupakan sebuah fenomena transien yang terjadi akibat adanya induktansi non-linier pada sebuah rangkaian RLC[5].



Gambar 3.1 Rangkaian Feroresonansi

Feroresonansi sendiri biasanya terjadi akibat adanya sambaran dari petir, *switching* pada saluran fasa baik 1 fasa, 2 fasa, maupun 3 fasa, dan juga bisa saja terjadi akibat adanya gangguan *short circuit*. Hal tersebut mengakibatkan adanya osilasi pada gelombang tegangan. Secara sederhana rangkaian feroresonansi dapat dilihat pada gambar 3.1. Fenomena feroresonansi dapat mengakibatkan beberapa dampak yang bisa merusak peralatan listrik seperti *overvoltage*, *overcurrent*, dan harmonisa.

Rangkaian feroresonansi sama dengan rangkaian resonansi seri. Ketika nilai impedansi mengecil, maka akan menyebabkan nilai arus yang besar. Kenaikan arus menyebabkan kerapatan fluks menjadi naik dan mencapai keadaan saturasi. Sehingga kurva fluks yang dihasilkan menjadi tidak linier. Karena inti transformator bersifat feromagnetik, maka apabila nilai arus membesar sampai ke titik saturasi maka nilai induktansi dari inti transformator akan berubah secara cepat sehingga nilainya menjadi tidak linier. Sehingga apabila terjadi interaksi antara nilai kapasitansi dan induktansi inti transformator, maka dapat menghasilkan arus yang tinggi. Hal tersebut bisa sangat berbahaya dan dapat merusak peralatan listrik.

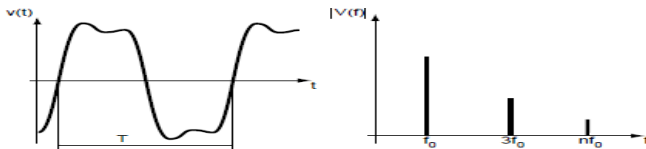
Feroresonansi bisa diketahui apabila terjadi beberapa gejala pada sistem tenaga listrik. Gejala-gejala tersebut bisa terjadi akibat adanya sambaran petir, *switching* fasa dan gangguan 1 fasa ke tanah. Gejala yang bisa mengindikasikan adanya feroresonansi antara lain :

- a. Penyimpangan yang besar pada tegangan dan arus lebih
- b. Munculnya frekuensi harmonisa
- c. Timbulnya panas berlebih dan suara bising pada transformator
- d. Kerusakan pada peralatan listrik[7].

3.1.1 Karakteristik Ferroresonansi

a. Fundamental Mode

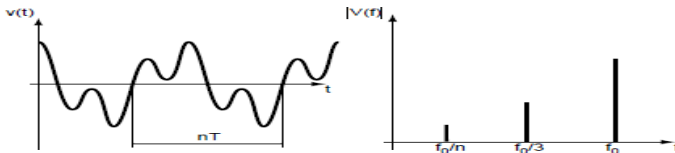
Fundamental mode, merupakan karakteristik ferroresonansi dimana tegangan dan arus yang terjadi mempunyai nilai periodik yang sama dengan sistem. Frekuensi pada *fundamental mode* terdiri dari frekuensi fundamental dan frekuensi harmonisnya yaitu frekuensi ke 3, 5, 7 dan seterusnya (ganjil).



Gambar 3.2 Fundamental Mode

b. Subharmonic Mode

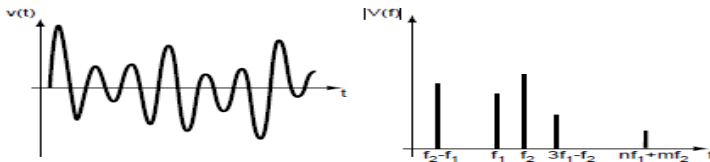
Untuk *subharmonic mode* pada dasarnya tidak jauh beda dengan *fundamental mode*. Akan tetapi pada *subharmonic mode* periodenya mempunyai kelipatan nT dari periode sumbernya.



Gambar 3.3 Subharmonic Mode

c. Quasi-Periodic Mode

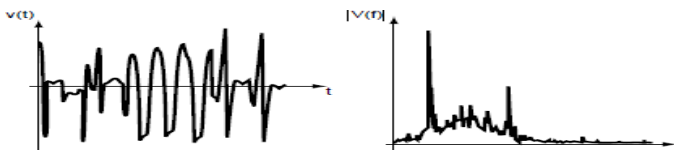
Pada mode ini, nilai tegangan dan arus tidak periodik. Serta sinyal yang dihasilkan merupakan sinyal diskontinu.



Gambar 3.4 Quasi-Periodic Mode

d. *Chaotic Mode*

Pada *chaotic mode*, sama halnya dengan *quasi-periodic mode* tegangan dan arus yang dihasilkan tidak periodik. Akan tetapi sinyal yang dihasilkan kontinyu walaupun bentuknya tidak teratur[9].



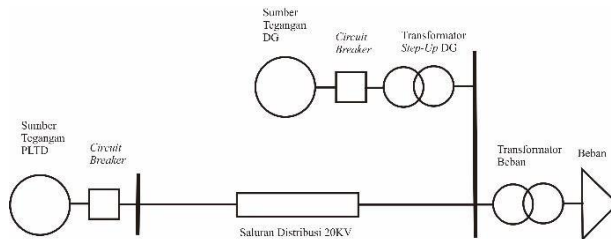
Gambar 3.5 *Chaotic Mode*

3.2 Sistem Kelistrikan Nusa Penida Bali

Nusa Penida merupakan salah satu kecamatan dari 4 kecamatan yang ada di kabupaten Klungkung, Bali. Nusa Penida adalah salah satu destinasi wisata yang sudah terkenal hingga ke mancanegara. Maka dari itu, tiap tahunnya banyak wisatawan baik domestik maupun mancanegara yang datang untuk menikmati keindahan alam dan budaya di Nusa Penida. Meningkatnya jumlah wisatawan yang berkunjung berdampak pada perekonomian meningkat. Meningkatnya jumlah wisatawan membuat penginapan di kawasan Nusa Penida tidak pernah sepi. Meningkatnya sektor ekonomi juga berdampak pada meningkatnya kebutuhan akan tenaga listrik. Di kepulauan Nusa Penida listrik dikelola oleh PT. PLN Nusa Penida Bali.

PT. PLN Nusa Penida Bali mensuplai energi listrik untuk kebutuhan di Nusa Penida dengan mengoperasikan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Sewatama. Selain menggunakan PLTD, PT. PLN Nusa Penida Bali juga mengoperasikan beberapa unit *Distributed Generation* (DG) berupa *Wind Turbine Generator* (WTG) sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) serta *Photovoltaic* (PV) sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). PLTD yang merupakan pembangkit utama mensuplai 4 *feeder* yang ada pada PT. PLN Nusa Penida Bali. Sedangkan PLTB dan PLTS terdistribusi pada *feeder* Tanglad. *Singel Line Diagram* (SLD) sistem kelistrikan Nusa Penida terlampir pada lampiran. PT. PLN Nusa Penida Bali mempunyai 3 unit PLTD yang diberi nama PLTD Sewatama unit 1 sampai 3. Selain itu PLTB di Nusa Penida terdiri dari 9 Unit serta PLTS terdiri dari 2 unit. Data spesifikasi dari pembangkit di PT. PLN Nusa Penida terlampir pada lampiran[10].

Dari SLD PT. PLN Nusa Penida, dapat disederhanakan menjadi rangkaian sederhana untuk mempermudah pemodelan sistem kelistrikan PT. PLN Nusa Penida. Rangkaian sederhana dari sistem kelistrikan Nusa Penida seperti pada gambar 3.6 Pada rangkaian sederhana tersebut, terdapat sumber tegangan sebagai pengganti PLTD. Terdapat juga sumber tegangan lain sebagai pengganti dari DG. Terdapat impedansi RLC sebagai pengganti impedansi saluran, dan terdapat beban sebagai pengganti beban pada sistem kelistrikan Nusa Penida.



Gambar 3.6 Rangkaian sederhana sistem kelistrikan Nusa Penida

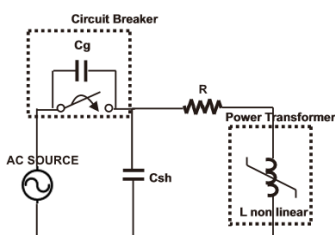
3.3 Simulasi Ferroresonansi

3.3.1 Pemodelan Rangkaian Ferroresonansi

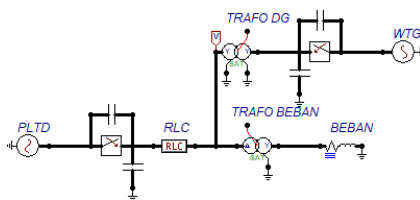
Pada studi kali ini ferroresonansi yang dipelajari adalah pada sistem distribusi akibat adanya penambahan DG pada saluran distribusi. Sehingga dilakukan pemodelan rangkaian ferroresonansi transformator daya pada transformator *step-up* dari DG ke sistem yang diakibatkan oleh pengoperasian *switching* sebuah *circuit breaker* (CB). Pemodelan yang digunakan bisa menjadi rangkaian ekivalen ferroresonansi seperti pada gambar 3.7.

Pada gambar 3.8 terdapat elemen-elemen seperti Tegangan Sumber, C_g , C_{sh} , L non-linier dan R . C_g merupakan nilai kapasitif yang diakibatkan pengoperasian *switching* sebuah *circuit breaker*. C_s merupakan nilai kapasitif yang ditimbulkan oleh kapasitansi saluran distribusi. L non-linier merupakan pemodelan dari induktansi non-linier yang terdapat pada inti transformator. Sementara R merupakan pemodelan terhadap rugi-rugi pada jaringan.

Berdasarkan SLD pada sistem kelistrikan Nusa Penida, maka dibuat pemodelan rangkaian feroresonansi pada perangkat lunak ATP Draw. Pemodelan rangkaian feroresonansi dapat dilihat pada gambar 3.8 Pada gambar 3.9 terdapat beberapa komponen seperti sumber tegangan yang terdiri dari sumber tegangan sistem 20kV dan sumber tegangan dari DG. Terdapat juga CB yang merupakan sebagai pemacu feroresonansi pada rangkaian tersebut. Selain itu terdapat transformator yang berfungsi untuk menaikkan tegangan dari DG ke sistem. Terdapat juga impedansi saluran dan beban sebagai pemodelan saluran dan beban pada sistem kelistrikan Nusa Penida.



Gambar 3.7 Rangkaian Ekuivalen Feroresonansi



Gambar 3.8 Rangkaian Simulasi Feroresonansi

Pemodelan rangkaian feroresonansi ini meliputi pemodelan rangkaian dengan trigger berupa *switching* serta rangkaian pada kondisi normal sebagai pembandingan. Pemodelan rangkaian feroresonansi ini terdiri dari komponen-komponen utama seperti sumber tegangan 20 kV, sumber tegangan 3kV sebagai pemodelan dari DG, resistor, kapasitor, *switching*, dan induktor non-linier. Pemodelan rangkaian dilakukan pada *Alternative Transient Program* atau ATPDraw.

Tujuan dari pemodelan rangkaian feroresonansi ini yaitu untuk melihat pengaruh dari berbagai macam hubungan belitan pada transformator daya terhadap feroresonansi yang muncul. Parameter yang dirubah pada rangkaian ini yaitu hubungan belitan pada transformator daya. Parameter pada rangkaian dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Rangkaian Pemodelan Feroresonansi[10].

Parameter	Nilai	Satuan
Sumber Tegangan Sistem	20	kV.
Sumber Tegangan DG	3	kV.
<i>Grading Capacitance</i> (Cg)	1	μ F
<i>Shunt Capacitance</i> (Csh)	0,2	μ F
Frekuensi	50	Hz
<i>Switching</i> Sistem	0,1	s
<i>Switching</i> DG	0,2	s

Nilai sumber tegangan, baik sumber tegangan sistem maupun sumber tegangan DG didapat dari data sistem kelistrikan PT. PLN Nusa Penida[10]. Sumber tegangan sistem di tentukan pada nilai 20kV karena rangkain simulasi ini pada sistem distribusi 20kV. Sedangkan nilai sumber tegangan DG bernilai 3kV karena sebagai pengganti DG pada sistem kelistrikan Nusa Penida yang bernilai 3kV. Nilai frekuensi menggunakan nilai 50Hz karena sesuai dengan frekuensi pada sistem kelistrikan Nusa Penida. Nilai *switching* terbuka CB sistem dan DG di atur berurutan pada detik ke 0,1 dan 0,2 karena apabila hanya CB DG yang di atur tertutup maka suplai tegangan dari sistem 20kV akan terus mensuplai beban, sehingga tidak terjadi transien. Sedangkan apabila CB sistem yang di atur terbuka, maka DG akan *off* karena tidak dibantu oleh generator *swing* yang berada pada sistem 20kV. Oleh karena itu, nilai *switching* terbuka CB pada sistem di atur detik ke 0,1s lalu menyusul *switching* terbuka CB pada DG di detik ke 0,2s. Cg merupakan kapasitansi yang di akibatkan oleh pengoperasian dari CB. Sedangkan Cs merupakan nilai kapasitansi dari saluran. Dari penelitian terdahulu, terdapat rentang nilai kapasitansi dapat memunculkan fenomena feroresonansi. Rentang nilai kapasitansi antara 0,001-1 μ F [9]. Maka dari itu dipilih nilai kapasitansi 1 μ F untuk Cg dan 0,2 μ F untuk Cs.

3.3.2 Pemodelan Transformator Daya

Transformator yang digunakan untuk studi kali ini adalah transformator 3 fasa *step-up* dari sumber DG ke sistem dengan rating 3kV/20kV. Parameter transformator yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.2 Parameter Transformator DG[10].

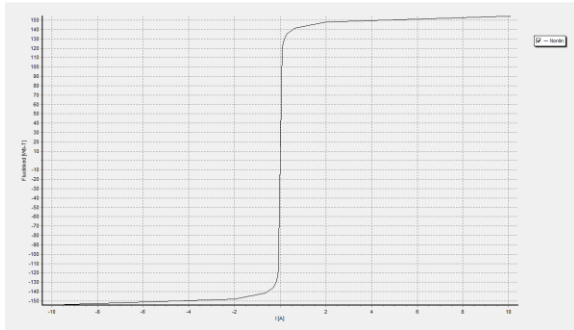
Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Sisi Primer	3	kV.
Tegangan Sisi Sekunder	20	kV.
Resistansi Primer	0,11973	Ω
Resistansi Sekunder	4,4266	Ω
Induktansi Primer	0,00057168	mL.
Induktansi Sekunder	0,021135	mL.
Resistansi Magnetisasi	650000	Ω

Tabel 3.3 Parameter Transformator Beban[10].

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Sisi Primer	20	kV.
Tegangan Sisi Sekunder	0,4	kV.
Resistansi Primer	5,6237	Ω
Resistansi Sekunder	0,0268	Ω
Induktansi Primer	0,00227	mL.
Induktansi Sekunder	0,00001086	mL.
Resistansi Magnetisasi	650000	Ω

Tabel 3.4 Parameter Kurva Magnetisasi[11].

I (A)	Fluks (Wb/T)
0,075491	115,9751
0,104418	122,4181
0,161089	128,8612
0,288721	135,3642
0,643332	141,7473
2,009947	148,1904
10,407075	154,6334



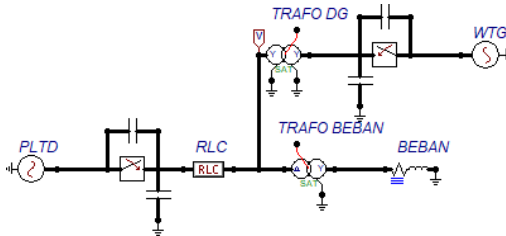
Gambar 3.9 Kurva Magnetisasi Transformator

3.3.3 Konfigurasi Belitan Transformator

Transformator mempunyai 2 belitan yaitu Bintang (Y) dan Delta (Δ). Sehingga apabila dihubungkan antara sisi primer dan sekunder maka akan membentuk hubungan belitan Bintang-Bintang (Y-Y), Bintang-Delta (Y- Δ), Delta-Bintang (Δ -Y) dan Delta-Delta (Δ - Δ) [8]. Maka dari itu pada penelitian kali ini menggunakan keempat hubungan belitan di atas untuk mengetahui karakteristik tiap hubungan belitan terhadap munculnya feroresonansi pada saluran distribusi. Hubungan belitan yang dipakai dalam penelitian ini sebagai berikut :

3.3.3.1 Simulasi Konfigurasi Bintang-Bintang (Y-Y)

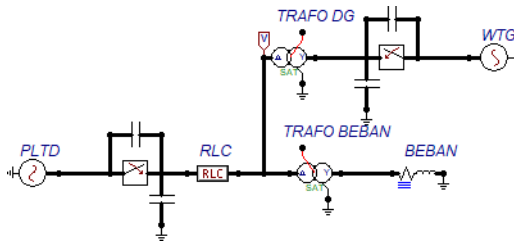
Pada simulasi ini konfigurasi yang digunakan adalah hubungan bintang-bintang. Dimana konfigurasi bintang pada sisi DG dan konfigurasi bintang pada sisi sistem. Rangkaian simulasi feroresonansi dengan hubungan belitan Bintang-Bintang (Y-Y) dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Rangkaian Simulasi Bintang-Bintang

3.3.3.2 Simulasi Konfigurasi Bintang-Delta (Y- Δ)

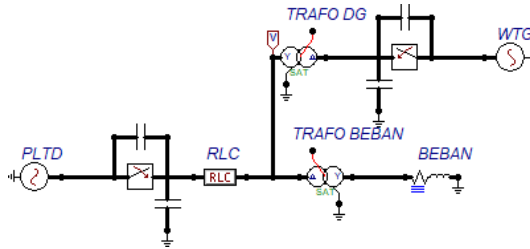
Pada simulasi ini konfigurasi yang digunakan adalah hubungan bintang-delta. Dimana konfigurasi bintang pada sisi DG dan konfigurasi delta pada sisi sistem. Rangkaian simulasi feresonansi dengan hubungan belitan Bintang-Delta (Y- Δ) dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Rangkaian Simulasi Bintang-Delta

3.3.3.3 Simulasi Konfigurasi Delta-Bintang (Δ -Y)

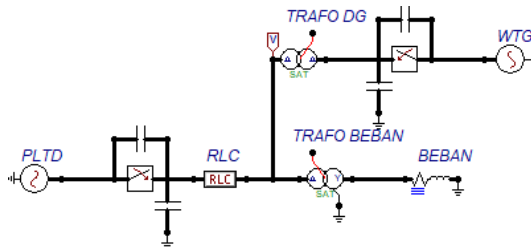
Pada simulasi ini konfigurasi yang digunakan adalah hubungan delta-bintang. Dimana konfigurasi delta pada sisi DG dan konfigurasi bintang pada sisi sistem. Rangkaian simulasi feroresonansi dengan hubungan belitan Delta-Bintang (Δ -Y) dapat dilihat pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Rangkaian Simulasi Delta-Bintang

3.3.3.4 Simulasi Konfigurasi Delta-Delta (Δ - Δ)

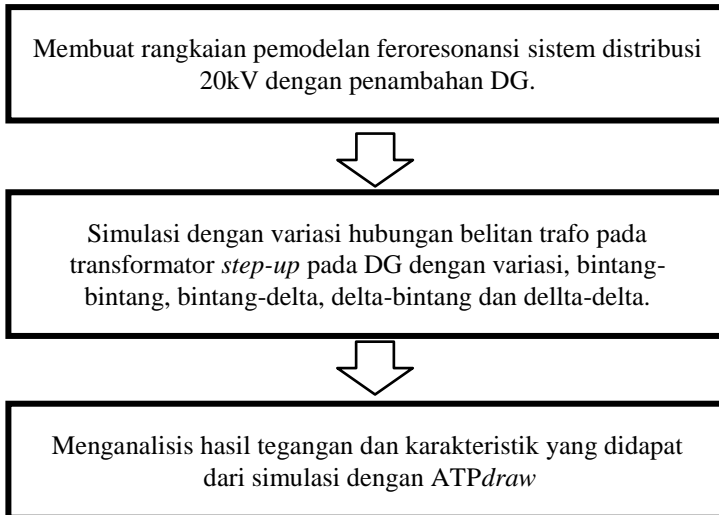
Pada simulasi ini konfigurasi yang digunakan adalah hubungan delta-delta. Dimana konfigurasi delta pada sisi DG dan konfigurasi delta pada sisi sistem. Rangkaian simulasi feroresonansi dengan hubungan belitan Delta-Delta (Δ - Δ) dapat dilihat pada gambar 3.13.



Gambar 3.13 Rangkaian Simulasi Delta-Delta

3.4 Pengambilan Dan Pengolahan Data

Pada studi ini, pemodelan rangkaian feroresonansi disimulasikan pada perangkat lunak ATPDraw. Rangkaian simulasi feroresonansi dijalankan dalam waktu 0,8 detik dengan waktu variabel step 1 μ detik. Gangguan yang diberikan yaitu berupa operasi *switching* sistem pada detik ke 0,1 s dan *switching* DG pada detik 0,2 s dengan menggunakan tiga kondisi yaitu operasi *switching* terbuka satu fasa, operasi *switching* terbuka dua fasa, dan operasi *switching* terbuka tiga fasa. Pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi yang diteliti yaitu menggunakan transformator daya dengan konfigurasi belitan yang diubah-ubah antara lain, bintang-bintang, bintang-delta, delta-bintang, dan delta-delta. Dengan membuat pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi tersebut, maka didapatkan data setelah menjalankan simulasi untuk kondisi normal, *switching* terbuka satu fasa pada fasa R, *switching* terbuka dua fasa pada fasa R dan S, dan *switching* terbuka tiga fasa pada fasa R, S, dan T Data yang diambil adalah berupa nilai serta respon gelombang tegangan pada sisi sekunder transformator daya untuk setiap kondisi operasi *switching*. Dari data yang telah diperoleh dilakukan analisis dengan membandingkan nilai dan respon gelombang tegangan dari masing – masing konfigurasi belitan pada transformator daya terhadap feroresonansi yang muncul akibat gangguan operasi *switching* yang diberikan.



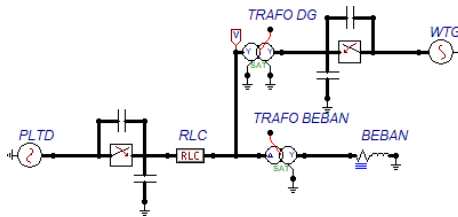
Gambar 3.14 *Flowchart* Pengambilan dan Pengolahan Data

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

4.1 Rangkaian Simulasi Feroresonansi Konfigurasi Y-Y

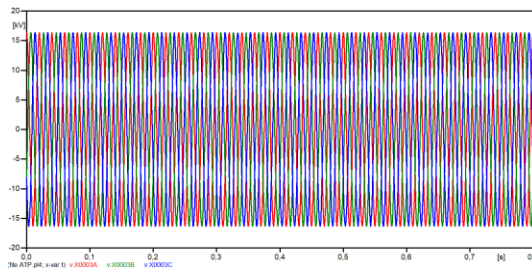
Pada simulasi ini digunakan hubungan belitan bintang-bintang. Sesuai dengan SLD pada gambar 3.6, yaitu konfigurasi bintang pada sisi DG dan konfigurasi bintang pada sisi sistem.



Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi Hubungan Bintang-Bintang

4.1.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal

- Nilai tegangan line-netral (VL-Nrms) pada tiap fasa di sisi sekunder adalah:
$$VL-Nrms = 20000 \text{ V} / \sqrt{3}$$
$$= 11547,005 \text{ V}$$
- Tegangan puncak line-netral (VL-Npeak) pada tiap fasa adalah:
$$VL-Npeak = 11547,005 \times \sqrt{2}$$
$$= 16329,9 \text{ V}$$

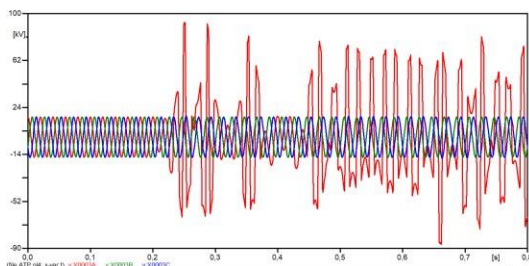


Gambar 4.2 Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi Normal

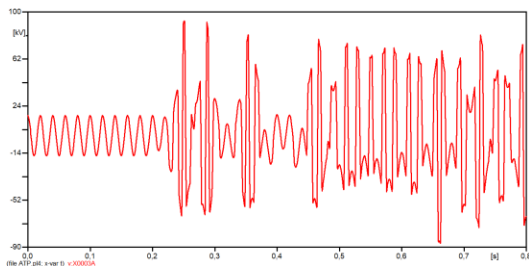
Gambar yang diperoleh dari simulasi menunjukkan nilai 16328 V untuk tegangan puncaknya. Hasil tersebut sesuai dengan nilai dari perhitungan.

4.1.2 Respon Tegangan Saat *Switching* Terbuka 1 Fasa

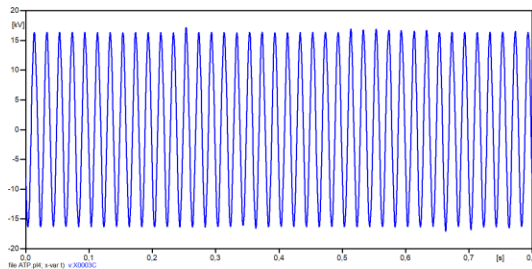
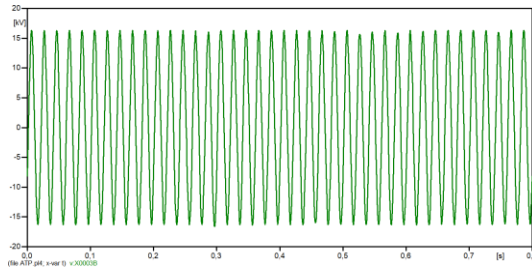
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 1 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



(a)



(b)

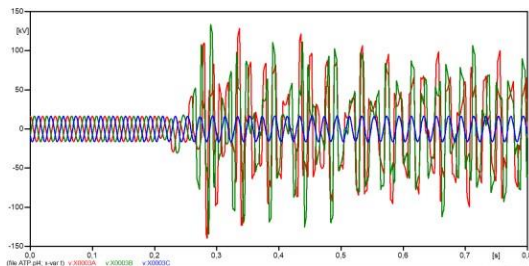


Gambar 4.3 Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi *Switching* Terbuka 1 Fasa, (a) fasa R, S dan T, (b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T

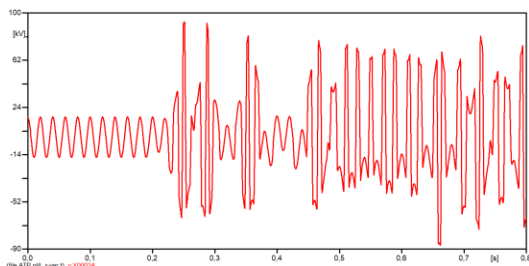
Hasil simulasi didapatkan nilai tegangan puncak pada fasa R sebesar 92750 V. Sedangkan pada fasa S diperoleh tegangan sebesar 16647 V. Dan pada fasa T sebesar 17188 V. Dari bentuk gelombang yang terbentuk pada fasa R menunjukkan bentuk gelombang dengan karakteristik *Quasi-periodic*, sedangkan fasa S dan T berbentuk Normal.

4.1.3 Respon Tegangan Saat *Switching* Terbuka 2 Fasa

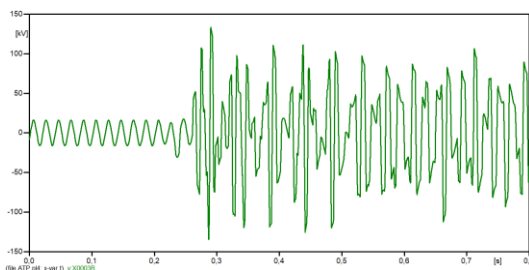
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 2 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R dan S. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



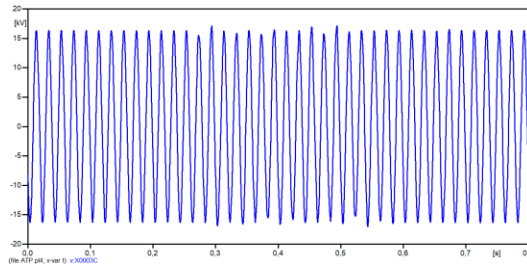
(a)



(b)



(c)



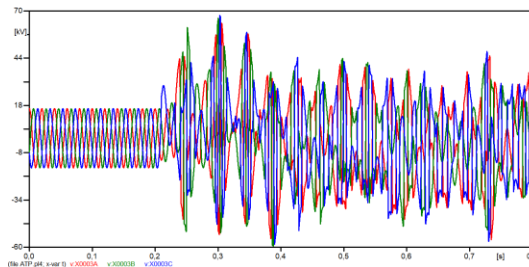
(d)

Gambar 4.4 Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi *Switching* Terbuka 2 Fasa, (a) fasa R, S dan T, (b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T

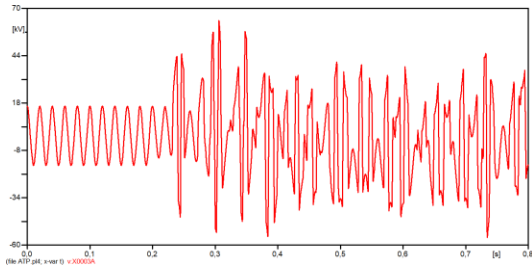
Hasil simulasi saat kondisi *switching* terbuka 2 fasa mendapatkan nilai tegangan puncak pada fasa R sebesar 139660 V dan fasa S sebesar 134620 V. Sedangkan pada fasa T nilai tegangan puncak sebesar 17102 V. Dari bentuk gelombang yang didapat, menunjukkan karakteristik *Quasi-periodic* pada fasa R, *Chaotic* pada fasa S, dan Normal pada fasa T.

4.1.4 Respon Tegangan Saat *Switching* Tebuka 3 Fasa

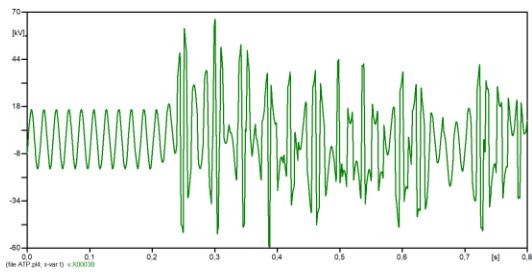
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 3 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R, S dan T. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



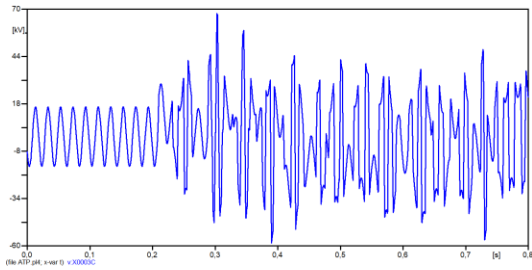
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.5 Respon Tegangan Hubungan Bintang-Bintang Saat Kondisi Switching Terbuka 3 Fasa, (a) fasa R, S dan T, (b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T.

Dari hasil simulasi didapat nilai tegangan puncak pada fasa R sebesar 63092 V, pada fasa S sebesar 66180 V dan pada fasa T sebesar 67580 V. Dari gambar yang diperoleh menunjukkan karakteristik gelombang cenderung *Chaotic*.

4.1.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Bintang-Bintang

Dari simulasi yang dilakukan diperoleh nilai tegangan pada sisi sekunder transformator sebagai berikut:

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Belitan Bintang-Bintang.

Kondisi <i>Switching</i>	Tegangan Puncak (V)		
	R	S	T
Normal	16328	16328	16328
1 Fasa (Fasa R)	92750	16647	17188
2 Fasa (Fasa R dan S)	139660	134620	17102
3 Fasa	63092	66180	67580

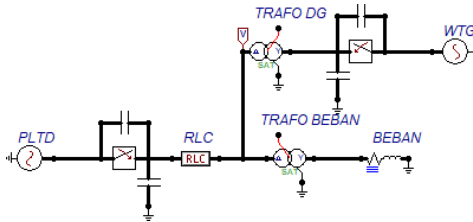
Tabel 4.2 Karakteristik Feroresonansi yang Dihasilkan dengan Hubungan Belitan Bintang-Bintang

Kondisi <i>Switching</i>	Karakteristik Feroresonansi		
	R	S	T
1 Fasa (Fasa R)	<i>Quasi-periodic</i>	Normal	Normal
2 Fasa (Fasa R dan S)	<i>Quasi-Periodic</i>	<i>Chaotic</i>	Normal
3 Fasa	<i>Chaotic</i>	<i>Chaotic</i>	<i>Chaotic</i>

Dari tabel hasil tegangan puncak dan tabel karakteristik feroresonansi di atas diperoleh nilai tegangan yang bervariasi akibat adanya gangguan berupa *switching*. Nilai tegangan tertinggi diperoleh ketika terdapat gangguan *switching* 2 fasa pada fasa R dengan nilai 139660 V. Sedangkan nilai tegangan terendah diperoleh ketika dalam keadaan *switching* 1 pada fasa S dengan nilai 16647 V. Dari tabel karakteristik yang didapat diperoleh karakteristik yang berbeda, dengan karakteristik yang dominan adalah *Chaotic*.

4.2 Rangkaian Simulasi Feroresonansi Konfigurasi Y-Δ

Pada simulasi ini digunakan hubungan belitan bintang-delta. Sesuai dengan SLD pada gambar 3.6, yaitu konfigurasi bintang pada sisi DG dan konfigurasi delta pada sisi sistem.

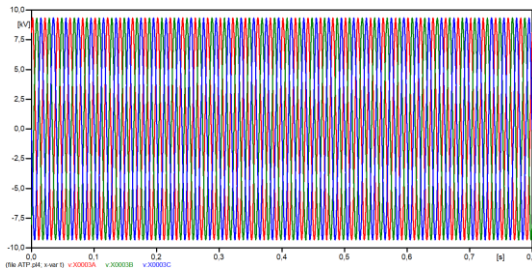


Gambar 4.6 Rangkaian Simulasi Hubungan Bintang-Delta

4.2.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal

- Nilai tegangan line-netral (VL-Nrms) pada tiap fasa di sisi sekunder adalah:
$$VL-N_{rms} = 20000 \text{ V} / \sqrt{3}$$
$$= 11547,005 \text{ V}$$
- Tegangan puncak line-netral (VL-Npeak) pada tiap fasa adalah:
$$VL-N_{peak} = 11547,005 \times \sqrt{2}$$
$$= 16329,9 \text{ V}$$

$$VL-N_{peak} = 16329,9 \text{ V} / \sqrt{3}$$
$$= 9439,24 \text{ V}$$

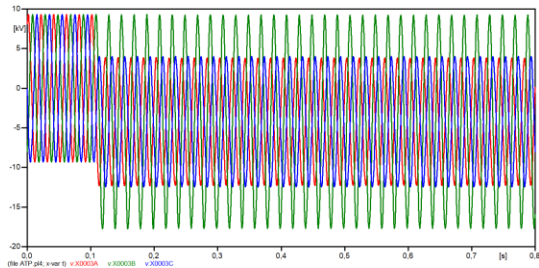


Gambar 4.7 Respon Tegangan Hubungan Bintang-Delta Saat Kondisi Normal

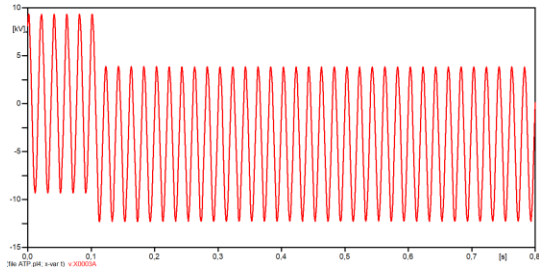
Dari hasil simulasi diperoleh nilai tegangan puncak pada fasa R, S dan T sebesar 9326 V. Dari hasil simulasi menunjukkan nilai yang sesuai dengan perhitungan.

4.2.2 Respon Tegangan Saat *Switching* Terbuka 1 Fasa

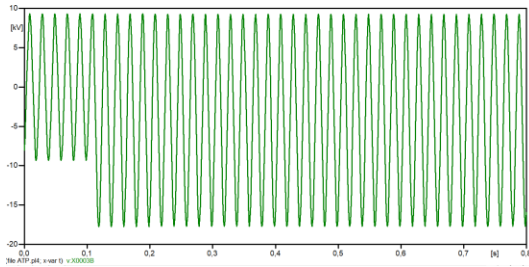
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 1 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



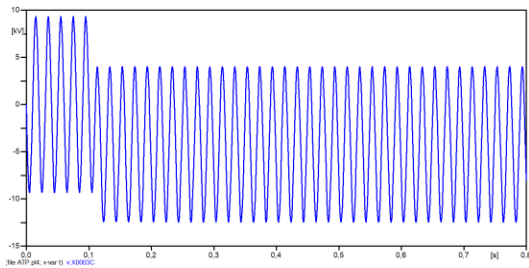
(a)



(b)



(c)



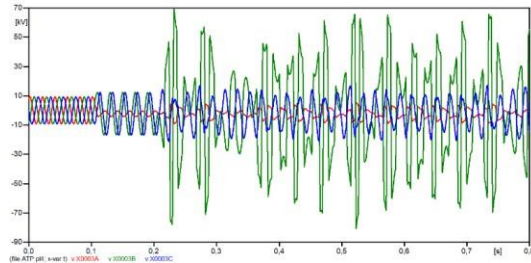
(d)

Gambar 4.8 Respon Tegangan Hubungan Bintang-Delta Saat Kondisi *Switching* Terbuka 1 Fasa, (a) fasa R, S dan T, (b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T

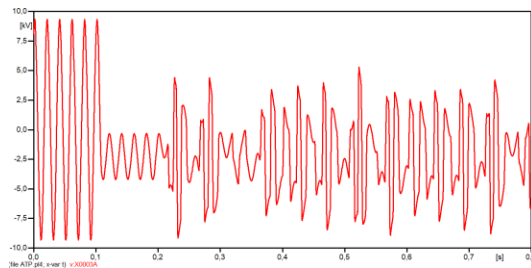
Hasil simulasi saat kondisi *switching* terbuka 1 fasa menunjukkan nilai puncak pada fasa R sebesar 12286 V. Sedangkan pada fasa S sebesar 17701 V dan pada fasa T sebesar 12464 V. Dari bentuk gelombang diperoleh karakteristik Normal pada fasa R, S dan T.

4.2.3 Respon Tegangan Saat *Switching* Terbuka 2 Fasa

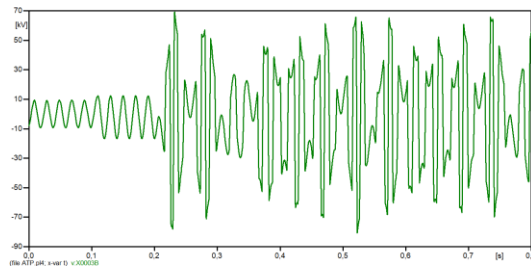
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 2 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R dan S. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



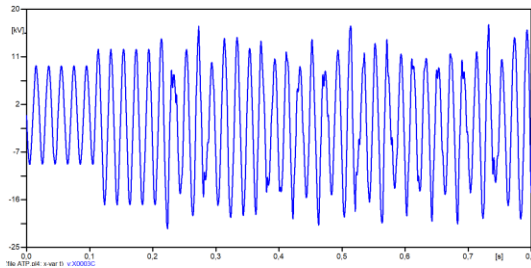
(a)



(b)



(c)



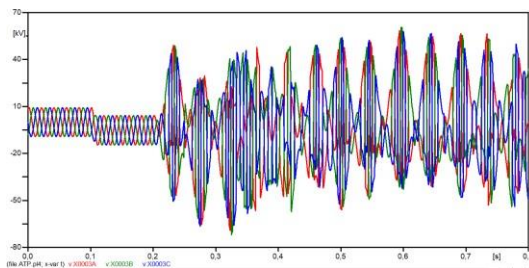
(d)

Gambar 4.9 Respon Tegangan Hubungan Bintang-Delta Saat Kondisi *Switching* Terbuka 2 Fasa, (a) fasa R, S dan T, (b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T

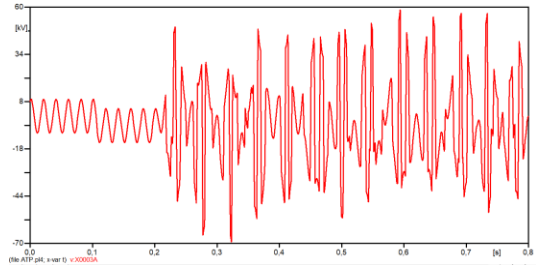
Hasil simulasi didapat nilai tegangan puncak pada fasa R sebesar 9078 V dan fasa S sebesar 78079 V. Sedangkan pada fasa T sebesar 21472 V. Dari karakteristik feroresonansi diperoleh pada fasa R, dan S menunjukkan karakteristik *Quasi-periodic*. Dan pada fasa T menunjukkan karakteristik *Fundamental*.

4.2.4 Respon Tegangan Saat *Switching* Tebuka 3 Fasa

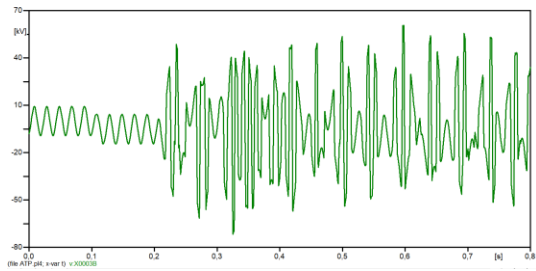
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 3 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R, S dan T. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



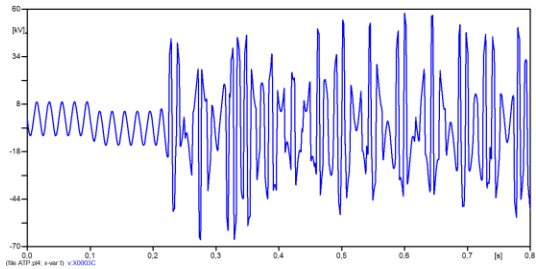
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.10 Respon Tegangan Hubungan Bintang-Delta Saat Kondisi Switching Terbuka 3 Fasa, (a) fasa R, S dan T, (b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T

Hasil yang diperoleh dari simulasi menunjukkan nilai tegangan puncak pada fasa R sebesar 69163 V, pada fasa S sebesar 71884 V dan pada fasa T sebesar 66409 V. Karakteristik yang ditunjukkan dari hasil gambar gelombang menunjukkan ketiga fasa mempunyai karakteristik *Quasi-periodic*.

4.2.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Bintang-Delta

Dari simulasi yang dilakukan diperoleh nilai tegangan pada sisi sekunder transformator sebagai berikut:

Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Belitan Bintang-Delta.

Kondisi <i>Switching</i>	Tegangan Puncak (V)		
	R	S	T
Normal	9326	9326	9326
1 Fasa (Fasa R)	12286	17701	12464
2 Fasa (Fasa R dan S)	9078	78079	21472
3 Fasa	69163	71884	66409

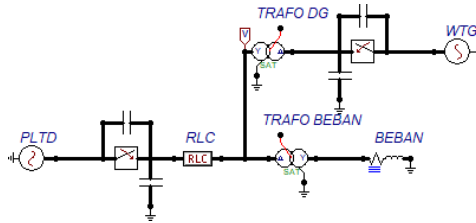
Tabel 4.4 Karakteristik Feroresonansi yang Dihasilkan dengan Hubungan Belitan Bintang-Delta

Kondisi <i>Switching</i>	Karakteristik Feroresonansi		
	R	S	T
1 Fasa (Fasa R)	Normal	Normal	Normal
2 Fasa (Fasa R dan S)	<i>Quasi-periodic</i>	<i>Quasi-periodic</i>	<i>Fundamental</i>
3 Fasa	<i>Quasi-periodic</i>	<i>Quasi-periodic</i>	<i>Quasi-periodic</i>

Dari tabel di atas diperoleh nilai tegangan yang bervariasi akibat adanya gangguan yang terjadi. Nilai tegangan tertinggi diperoleh ketika terdapat gangguan *switching* 3 fasa pada fasa S dengan nilai 71884 V. Sedangkan nilai tegangan terendah diperoleh ketika dalam keadaan *switching* 2 fasa pada fasa R dengan nilai 9078 V. Dari karakteristik yang didapat diperoleh karakteristik yang dominan yaitu *Quasi-periodic* yang muncul pada kondisi gangguan *switching* terbuka 2 dan 3 fasa.

4.3 Rangkaian Simulasi Feroresonansi Konfigurasi Δ -Y

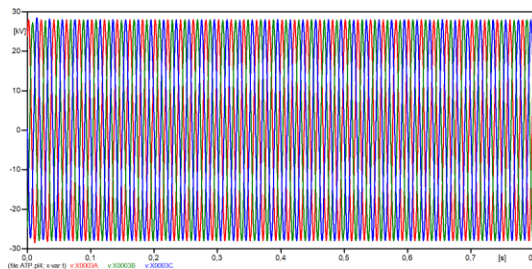
Pada simulasi ini digunakan hubungan belitan delta-bintang. Sesuai dengan SLD pada gambar 3.6, yaitu konfigurasi delta pada sisi DG dan konfigurasi bintang pada sisi sistem.



Gambar 4.11 Rangkaian Simulasi Hubungan Delta-Bintang

4.3.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal

- Nilai tegangan line-netral (V_L -Nrms) pada tiap fasa di sisi sekunder adalah:
$$V_L\text{-Nrms} = 20000 \text{ V} \sqrt{3}$$
$$= 11547,005 \text{ V}$$
- Tegangan puncak line-netral (V_L -Npeak) pada tiap fasa adalah:
$$V_L\text{-Npeak} = 11547,005 \times \sqrt{2}$$
$$= 16329,9 \text{ V}$$
$$V_L\text{-Npeak} = 16329,9 \times \sqrt{3}$$
$$= 28250,73 \text{ V}$$

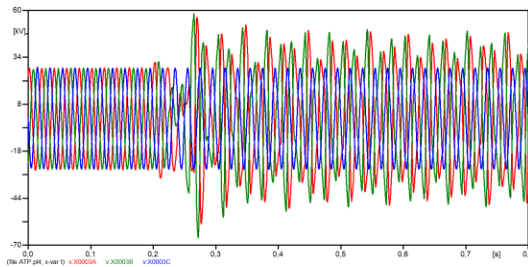


Gambar 4.12 Respon Tegangan Hubungan Delta-Bintang Saat Kondisi Normal

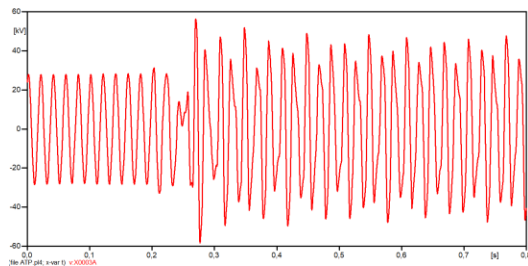
Dari hasil simulasi didapat nilai tegangan puncak saat kondisi normal pada 27960 V. Dari hasil simulasi didapat nilai yang sama dengan perhitungan.

4.3.2 Respon Tegangan Saat *Switching* Terbuka 1 Fasa

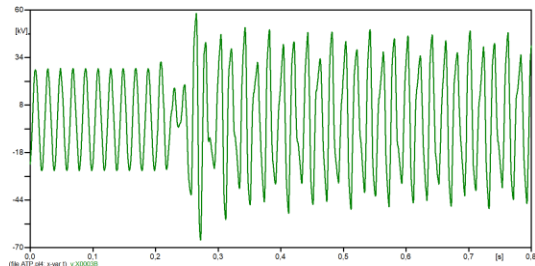
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 1 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs)



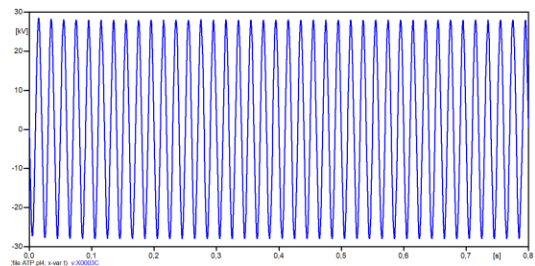
(a)



(b)



(c)



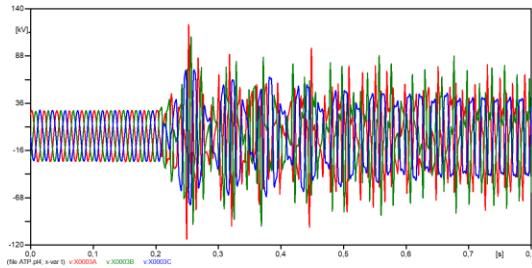
(d)

Gambar 4.13 Respon Tegangan Hubungan Delta-Bintang Saat Kondisi *Switching* Terbuka 1 Fasa, (a) fasa R, S dan T, (b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T

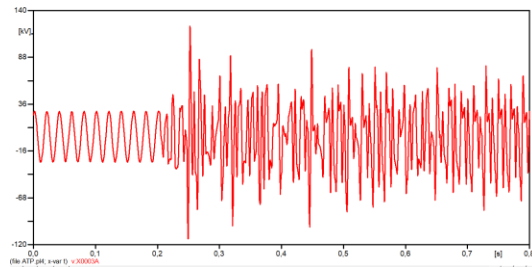
Dari hasil simulasi gangguan *switching* terbuka 1 fasa mendapatkan nilai tegangan puncak pada fasa R sebesar 58430 V. Sedangkan pada fasa S sebesar 58008 V dan fasa T sebesar 27959 V. Dari hasil gelombang didapat ketiga fasa mempunyai karakteristik *Subharmonic*.

4.3.3 Respon Tegangan Saat *Switching* Terbuka 2 Fasa

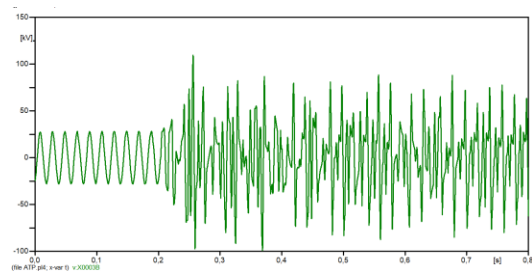
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 2 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R dan S. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



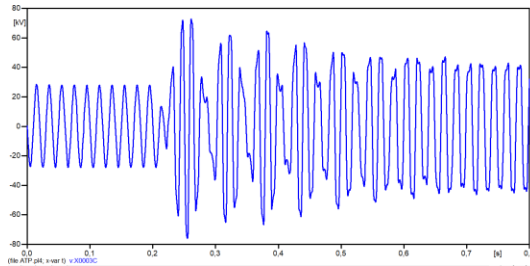
(a)



(b)



(c)



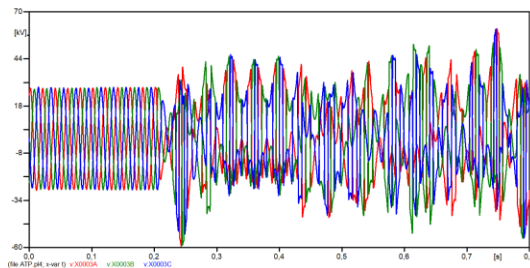
(d)

Gambar 4.14 Respon Tegangan Hubungan Delta-Bintang Saat Kondisi *Switching* Terbuka 2 Fasa, (a) fasa R, S dan T,(b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T

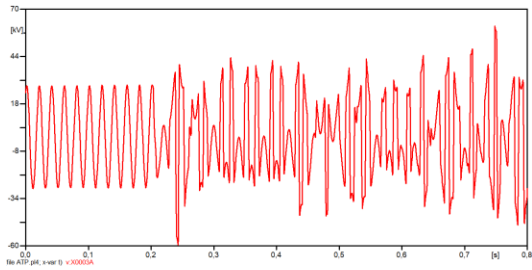
Hasil dari simulasi menunjukkan nilai tegangan puncak dari fasa R sebesar 122790 V dan fasa S sebesar 109040 V. Sedangkan pada fasa T mempunyai nilai tegangan puncak sebesar 76086 V. Karakteristik yang didapat menunjukkan bahwa ketiga fasa mempunyai karakteristik *Chaotic* pada fasa R, dan S serta karakteristik *Fundamental* pada fasa T.

4.3.4 Respon Tegangan Saat *Switching* Tebuka 3 Fasa

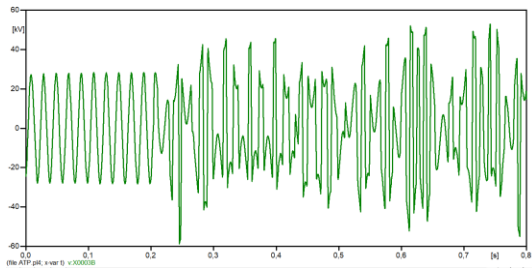
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 3 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R, S dan T. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



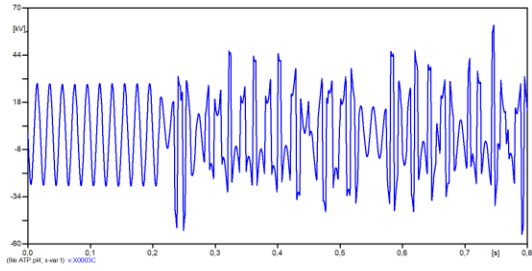
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.15 Respon Tegangan Hubungan Delta-Bintang Saat Kondisi Switching Terbuka 3 Fasa, (a) fasa R, S dan T, (b) fasa R, (c) fasa S, dan (d) fasa T

Dari hasil simulasi didapatkan nilai tegangan puncak pada fasa R sebesar 60589 V, pada fasa S sebesar 58732 V dan pada fasa T sebesar 60377 V. Dari gambar gelombang yang didapat menunjukkan ketiga fasa berkarakteristik *Subharmonic*.

4.3.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Delta-Bintang

Dari simulasi yang dilakukan diperoleh nilai tegangan pada sisi sekunder transformator sebagai berikut:

Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Belitan Delta-Bintang.

Kondisi <i>Switching</i>	Tegangan Puncak (V)		
	R	S	T
Normal	27960	27960	27690
1 Fasa (Fasa R)	58430	58008	27959
2 Fasa (Fasa R dan S)	122790	109040	76086
3 Fasa	60589	58732	60377

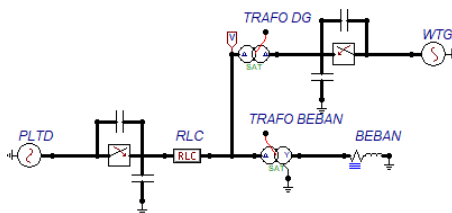
Tabel 4.6 Karakteristik Feroresonansi yang Dihasilkan dengan Hubungan Belitan Delta-Bintang

Kondisi <i>Switching</i>	Karakteristik Feroresonansi		
	R	S	T
1 Fasa (Fasa R)	<i>Subharmonic</i>	<i>Subhaarmonic</i>	<i>Subharmonic</i>
2 Fasa (Fasa R dan S)	<i>Chaotic</i>	<i>Chaotic</i>	<i>Fundamental</i>
3 Fasa	<i>Subharmonic</i>	<i>Subharmonic</i>	<i>Subharmonic</i>

Hasil dari tegangan puncak dan karakteristik feroresonansi pada hubungan belitan Delta-Bintang menunjukkan nilai tegangan puncak tertinggi terdapat pada saat gangguan *switching* 2 fasa pada fasa R dengan nilai 122790 V. Sedangkan nilai tegangan terendah terdapat pada saat kondisi *switching* 1 fasa pada fasa T dengan nilai tegangan 27959 V. Karakteristik yang diperoleh menunjukkan karakteristik *Subharmonic* mendominasi dengan kondisi *switching* terbuka 1 dan 3 fasa. Sedangkan pada saat *switching* 2 fasa mempunyai karakteristik yang cenderung *Chaotic* pada fasa R dan S, sedangkan fasa T adalah *Fundamental*.

4.4 Rangkaian Simulasi Feroresonansi Konfigurasi Δ - Δ

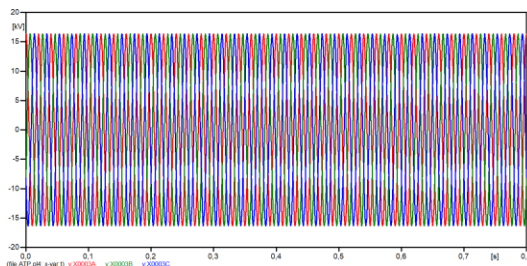
Pada simulasi ini digunakan hubungan belitan delta-delta. Sesuai dengan SLD pada gambar 3.6 yaitu konfigurasi delta pada sisi DG dan konfigurasi delta pada sisi sistem.



Gambar 4.16 Rangkaian Simulasi Hubungan Delta-Delta

4.4.1 Respon Tegangan Saat Kondisi Normal

- Nilai tegangan line-netral (V_{L-Nrms}) pada tiap fasa di sisi sekunder adalah:
$$V_{L-Nrms} = 20000 \text{ V} \sqrt{3}$$
$$= 11547,005 \text{ V}$$
- Tegangan puncak line-netral ($V_{L-Npeak}$) pada tiap fasa adalah:
$$V_{L-Npeak} = 11547,005 \times \sqrt{2}$$
$$= 16329,9 \text{ V}$$

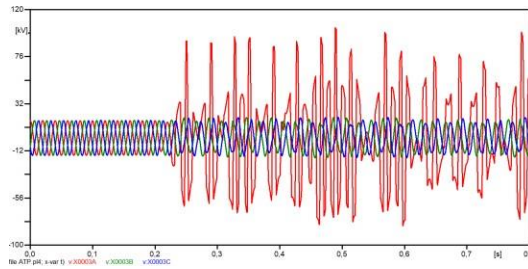


Gambar 4.17 Respon Tegangan Hubungan Delta-Delta Saat Kondisi Normal

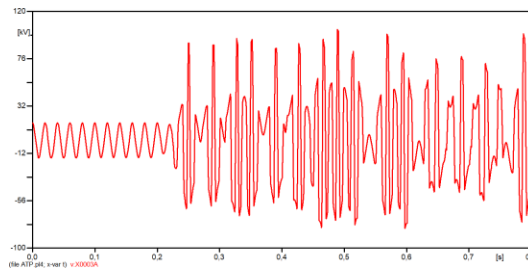
Hasil yang diperoleh dari simulasi menunjukkan nilai tegangan puncak sebesar 16329 V pada fasa R, S dan T. Hasil yang didapat dari simulasi sama dengan hasil yang didapat dari perhitungan.

4.4.2 Respon Tegangan Saat *Switching* Terbuka 1 Fasa

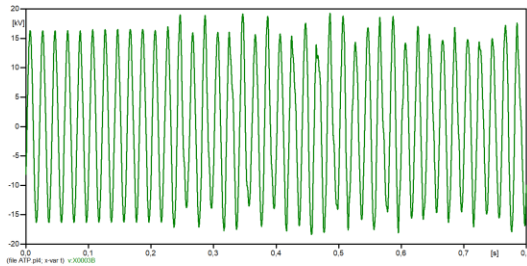
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 1 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



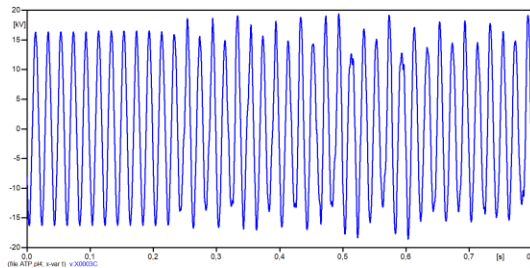
(a)



(b)



(c)



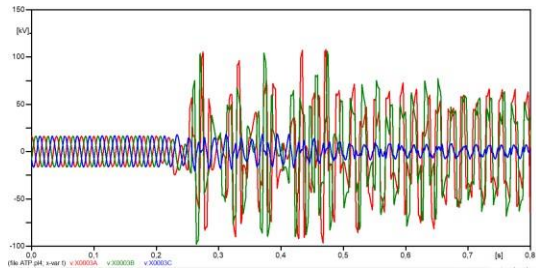
(d)

Gambar 4.18 Respon Tegangan Hubungan Delta-Delta Saat Kondisi *Switching* Terbuka 1 Fasa, (a) fasa R, S dan T,(b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T

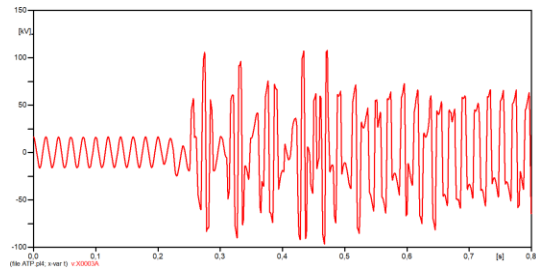
Hasil simulasi didapat nilai tegangan puncak pada fasa R sebesar 103090 V. Sedangkan pada fasa S mempunyai nilai tegangan puncak sebesar 18871 V, dan pada fasa T sebesar 19041 V. Karakteristik yang tampak pada simulasi ini adalah *Subharmonic* pada fasa R, *Fundamental* pada fasa S dan T.

4.4.3 Respon Tegangan Saat *Switching* Terbuka 2 Fasa

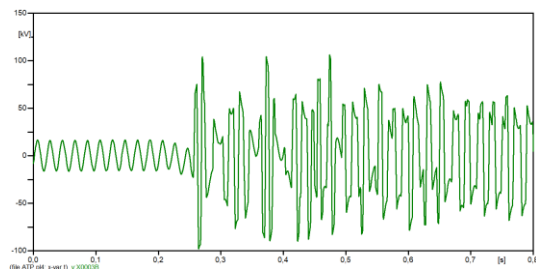
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 2 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R dan S. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



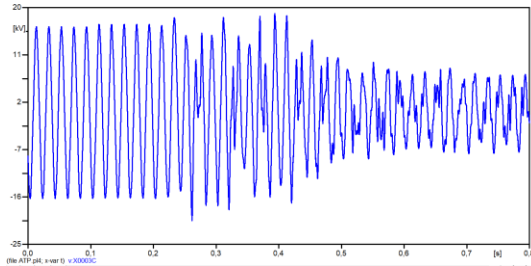
(a)



(b)



(c)



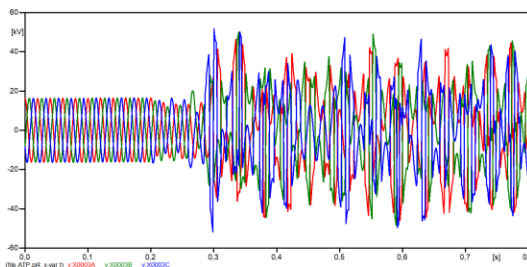
(d)

Gambar 4.19 Respon Tegangan Hubungan Delta-Delta Saat Kondisi *Switching* Terbuka 2 Fasa, (a) fasa R, S dan T, (b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T

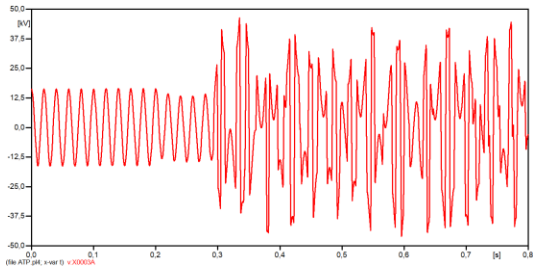
Dari hasil simulasi didapatkan nilai tegangan puncak pada fasa R sebesar 105650 V dan pada fasa S sebesar 103740 V. Sedangkan pada fasa T mempunyai nilai tegangan puncak sebesar 20486 V. Dari gambar gelombang hasil simulasi didapat karakteristik pada fasa R dan S adalah *Subharmonic* dan fasa T adalah *Quasi-periodic*.

4.4.4 Respon Tegangan Saat *Switching* Tebuka 3 Fasa

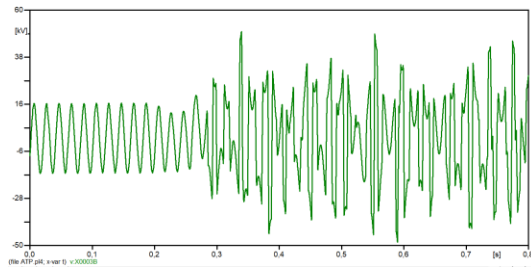
Pada simulasi ini diberikan gangguan berupa *switching* terbuka 3 fasa sistem pada detik ke 0.1 s dan DG pada detik ke 0.2 s di fasa R, S dan T. Tegangan yang akan dilihat yaitu pada tegangan sekunder transformator (Vs).



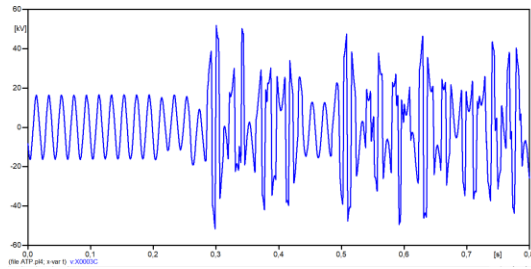
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.20 Respon Tegangan Hubungan Delta-Delta Saat Kondisi *Switching* Terbuka 3 Fasa, (a) fasa R, S dan T, (b) fasa R, (c) fasa S, (d) fasa T

Hasil simulasi gangguan *switching* terbuka 3 fasa menunjukkan nilai tegangan puncak pada fasa R sebesar 46353 V, fasa S sebesar 50027 V dan fasa T sebesar 51713 V. Karakteristik yang terlihat adalah ketiga fasa mempunyai karakteristik *Quasi-periodic*.

4.4.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Delta-Delta

Dari simulasi yang dilakukan diperoleh nilai tegangan pada sisi sekunder transformator sebagai berikut:

Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Daya Dengan Hubungan Belitan Delta-Delta.

Kondisi <i>Switching</i>	Tegangan Puncak (kV)		
	R	S	T
Normal	16329	16329	16329
1 Fasa (Fasa R)	103090	18871	19041
2 Fasa (Fasa R dan S)	105650	103740	20486
3 Fasa	46353	50027	51713

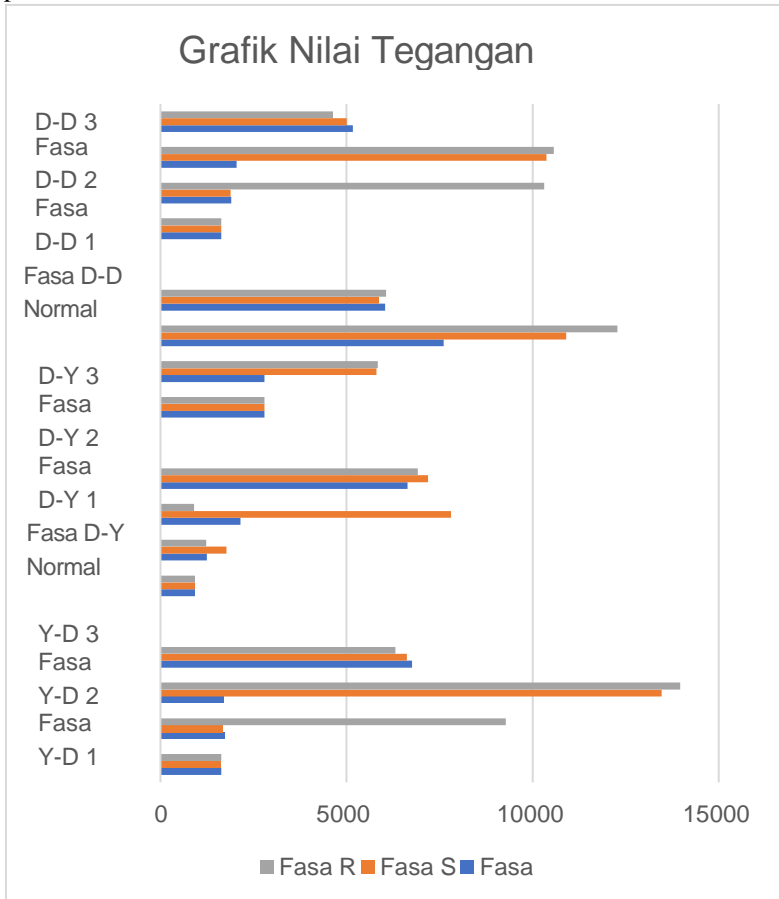
Tabel 4.8 Karakteristik Feroresonansi yang Dihasilkan dengan Hubungan Belitan Delta-Delta

Kondisi <i>Switching</i>	Karakteristik Feroresonansi		
	R	S	T
1 Fasa (Fasa R)	<i>Subharmonic</i>	<i>Fundamental</i>	<i>Fundamental</i>
2 Fasa (Fasa R dan S)	<i>Subharmonic</i>	<i>Subharmonic</i>	<i>Quasi-periodic</i>
3 Fasa	<i>Quasi-periodic</i>	<i>Quasi-periodic</i>	<i>Quasi-periodic</i>

Dari tabel di atas diperoleh nilai tegangan yang bervariasi akibat adanya gangguan berupa *switching*. Nilai tegangan tertinggi diperoleh ketika terdapat gangguan *switching* 2 fasa pada fasa R dengan nilai 105650 V. Sedangkan nilai tegangan terendah diperoleh ketika *switching* 1 fasa pada fasa S dengan nilai 18871V. Dari karakteristik yang didapat diperoleh karakteristik yang hampir merata yaitu *Subharmonic*, *Fundamental*, dan *Quasi-periodic*.

4.5 Analisis Tegangan Puncak

Dari hasil simulasi yang didapat diperoleh beragam nilai tegangan puncak.



Gambar 4.21 Grafik Nilai Tegangan Puncak

Dari grafik diatas, nilai tegangan puncak yang tinggi terdapat pada hubungan belitan Bintang-Bintang dengan spesifikasi gangguan pada saat *switching* 2 fasa. Sedangkan nilai tegangan puncak terendah didapat pada hubungan Bintang-Delta dengan *switching* 1 fasa.

4.6 Analisis Karakteristik Ferroresonansi

Dari hasil simulasi yang didapat, diperoleh beragam karakteristik ferroresonansi.

Tabel 4.9 Hasil Karakteristik Ferroresonansi

Hubungan Belitan	Kondisi <i>Switching</i> Terbuka								
	1 Fasa			2 Fasa			3 Fasa		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
Bintang-Bintang	●	○	○	●	●	○	●	●	●
Bintang-Delta	○	○	○	●	●	●	●	●	●
Delta-Bintang	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Delta-Delta	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● : Chaotic ● : Fundamental ● : Subharmonic ● : Quasi-Periodic
 ○ : Normal

Dari tabel di atas didapatkan bahwa karakteristik ferroresonansi yang tampak begitu beragam. Karakteristik yang cukup dominan adalah karakteristik *Quasi-periodic*. Terjadi pada hubungan Delta-Delta ketika *switching* 3 fasa, hubungan Bintang-Delta saat *switching* 2 dan 3 fasa, serta pada fasa R di hubungan Bintang-Bintang saat *switching* 1 dan 2 fasa.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berikut kesimpulan berdasarkan hasil simulasi dan analisis feroresonansi pada sisi sekunder transformator *step-up* DG dengan mengubah parameter hubungan belitan transformator:

1. Pada hubungan belitan Bintang-Bintang nilai tegangan puncak, bernilai tinggi saat kondisi *switching* 2 fasa pada fasa R dan S dengan nilai 139660V pada fasa R dan 134620V pada fasa S. Selain itu saat kondisi *switching* 1 fasa pada fasa R juga bernilai tinggi dengan nilai 92750V.
2. Pada hubungan belitan Delta-Delta sama halnya dengan hubungan Bintang-Bintang, nilai tegangan puncak bernilai tinggi saat kondisi *switching* 1 fasa terbuka pada fasa R dengan nilai 103090V dan *switching* 2 fasa terbuka pada fasa R dan S dengan nilai 105650V pada fasa R dan 103740V pada fasa S.
3. Hubungan Delta-Bintang berdampak pada tegangan puncak yang tinggi pada kondisi *switching* 2 fasa di semua fasa dengan nilai 122790V pada fasa R, 109040V pada fasa S dan 76086V pada fasa T.
4. Pada hubungan belitan Bintang-Delta juga berdampak pada nilai tegangan puncak yang tinggi pada kondisi *switching* 2 fasa pada fasa S dengan nilai 17701V.
5. Hubungan belitan yang rentan terhadap feroresonansi adalah hubungan belitan Bintang-Bintang dengan nilai tegangan puncak tertinggi adalah 139660V, merupakan tegangan puncak paling tinggi dibandingkan dengan nilai tegangan puncak pada hubungan belitan yang lain. Selain itu, karakteristik yang dominan pada hubungan belitan ini adalah cenderung *chaotic*.
6. Hubungan belitan yang aman terhadap feroresonansi adalah hubungan belitan Bintang-Delta dengan tegangan puncak tertinggi bernilai 78079V, merupakan tegangan puncak paling rendah dibandingkan dengan nilai tegangan puncak pada hubungan belitan yang lain. Karakteristik yang dominan pada hubungan belitan ini adalah *quasi-periodic*.

5.2 Saran

Berdasarkan studi yang telah dilakukan, didapatkan saran untuk yang akan datang yaitu. Melakukan studi mengenai dampak dari hubungan belitan transformator *step up* DG dengan tegangan sistem yang lebih tinggi. Mengingat dewasa ini perkembangan DG semakin pesat dan berskala lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. R. Damara, I. M. Y. Negara, I. G. N. S. Hernanda “Pengaruh Konfigurasi Belitan Transformator Daya Tiga-Fasa Terhadap Feroresonansi Pada Sistem Jaringan Distribusi,” 2017.
- [2] P. Elmo, “A Tutorial on Feroresonance,” IEEE, no. in Group ABB Inc 40th Annual Western Protective Relay Conference, pp. 676–704, Oct. 2013
- [3] P. L. Negara, “Tegangan - standar,” 1995.
- [4] S. S. Simamora, I. M. Y. Negara, and D. Fahmi, “Studi Pemasangan Damping Reaktor untuk Mengatasi Feroresonansi pada Incoming 20 kV GIS Tandem,” vol. 4, no. 2, pp. 130–135, 2015.
- [5] P. Ferracci, “Groupe Schneider Cahier Technique No: 190 Feroresonance,” 1998.
- [6] D. Suswanto, Sistem Distribusi Tenaga Listrik, Edisi Pertama. Universitas Negeri Padang, 2009
- [7] B. L. Tobing, Peralatan Tegangan Tinggi, 2nd ed. Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan: Erlangga, 2012. [9] Stephen J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals 5th edition", Mc- Graw Hill, USA, 2012.
- [8] Stephen J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals 5th edition", Mc- Graw Hill, USA, 2012
- [9] 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.
- [10] R. B. Y. Bahtiar, M. Pujiantara, S. Anam “Analisis Skema Proteksi Arus Lebih Communication-Assisted pada Sistem Distribusi Radial- Tie Switch Jaring Menengah 20 kV dengan Distributed Generation (DG),” vol. 5, no. 2, 2016.
- [11] R. Hidayat, I. M. Y. Negara, I. G. N. S. Hernanda, “Analisis pengaruh karakteristik histerisis inti transformator terhadap gangguan feroresonansi,” 2018.
- [12] M. Esmaeili, M. Rostami, and G. B. Gharehpetian, “The effect of various types of DG interconnection transformer on feroresonance,” 2013 21st Iran. Conf. Electr. Eng. ICEE 2013, 2013.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Sistem Kelistrikan PT. PLN Nusa Penida

Tabel Data Transformator *Step-up*.

No.	ID	MVA	KV(p)	KV(s)	A(p)	A(s)	%Z	X/R
1	<i>Step-up</i> 1	2	0,4	20	2,8873	57,74	6	7,09
2	<i>Step-up</i> 2	2	0,4	20	2,8873	57,74	6	7,09
3	<i>Step-up</i> 3	2	0,4	20	2,8873	57,74	6	7,09
4	<i>Step-up</i> WTG	2	3	20	384,9	57,74	4	1,5
5	<i>Step-up</i> PV	0,1	0,8	20	72,17	2,887	4	3,09

Tabel Data Trafo Beban (*Feeder Karang Sari*)

No.	ID	MVA	KV(p)	KV(s)	A(p)	A(s)	%Z	X/R
1	NP0101	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
2	NP0047	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
3	NP0046	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
4	NP0042	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
5	NP0036	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
6	NP0073	50	20	0,4	1,443	72,17	4	3,09
7	NP0048	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
8	NP0014	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
9	NP0013	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
10	NP0058	50	20	0,4	1,443	72,17	4	3,09
11	NP0012	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
12	NP0063	50	20	0,4	1,443	72,17	4	3,09
13	NP0019	50	20	0,4	1,443	72,17	4	3,09
14	NP0057	50	20	0,4	1,443	72,17	4	3,09
15	NP0022	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
16	NP0004	100	20	0,4	2,887	144,3	4	3,09
17	NP0064	50	20	0,4	1,443	72,17	4	3,09
18	NP0003	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
19	NP0062	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09

Tabel Data Trafo Beban (*Feeder Tanglad*)

No.	ID	MVA	KV(p)	KV(s)	A(p)	A(s)	%Z	X/R
1	NP0091	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
2	NP0089	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
3	NP0088	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
4	NP0029	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
5	NP0028	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
6	NP0027	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
7	NP0026	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
8	NP0098	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
9	NP0023	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
10	NP0025	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
11	NP0055	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
12	NP0028	50	20	0,4	1,443	72,17	4	3,09
13	NP0024	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
14	NP0077	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
15	NP0035	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
16	NP0034	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
17	NP0033	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
18	NP0043	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
19	NP0087	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09

Tabel Data Trafo Beban (*Feeder Bungemekar*)

No.	ID	MVA	KV(p)	KV(s)	A(p)	A(s)	%Z	X/R
1	NP0051	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
2	NP0052	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
3	NP0053	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
4	NP0054	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
5	NP0041	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
6	NP0061	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
7	NP0066	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
8	NP0079	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
9	NP0083	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
10	NP0084	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
11	NP0086	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
12	NP0085	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
13	NP0097	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
14	NP0096	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
15	NP0037	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
16	NP0038	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
17	NP0087	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09

No.	ID	MVA	KV(p)	KV(s)	A(p)	A(s)	%Z	X/R
18	NP0021	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
19	NP0094	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
20	NP0022	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
21	NP0082	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
22	NP0095	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
23	NP0032	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
24	NP0018	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
25	NP0093	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
26	NP0039	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
27	NP0017	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
28	NP0076	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09

Tabel Data Trafo Beban (*Feeder PED*)

No.	ID	MVA	KV(p)	KV(s)	A(p)	A(s)	%Z	X/R
1	NP0068	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
2	NP0001	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
3	NP0011	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
4	NP0099	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
5	NP0065	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
6	NP0056	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
7	NP0009	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
8	NP0049	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
9	NP0031	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
10	NP0045	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
11	NP0044	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
12	NP0081	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
13	NP0006	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
14	NP0074	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
15	NP0005	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
16	NP0071	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
17	NP0092	50	20	0,4	1,443	72,17	4	3,09
18	NP0008	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
19	NP0059	50	20	0,4	1,443	72,17	4	3,09
20	NP0069	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
21	NP0075	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
22	NP0015	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
23	NP0016	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09
24	NP0002	160	20	0,4	4,619	230,9	4	3,09

Tabel Data Beban (*Feeder Karang Sari*)

No.	ID	KVA	V	A	Jenis
1	NP0101	25,3	0,4	36,52	Lumped
2	NP0047	14,6	0,4	21,07	Lumped
3	NP0046	7,2	0,4	10,39	Lumped
4	NP0042	22	0,4	31,75	Lumped
5	NP0036	14,7	0,4	21,22	Lumped
6	NP0073	3,1	0,4	4,47	Lumped
7	NP0048	29,5	0,4	42,58	Lumped
8	NP0014	24,9	0,4	35,94	Lumped
9	NP0013	27,7	0,4	39,98	Lumped
10	NP0058	15,4	0,4	22,23	Lumped
11	NP0012	48,5	0,4	70,00	Lumped
12	NP0063	11,4	0,4	16,45	Lumped
13	NP0019	19,2	0,4	27,71	Lumped
14	NP0057	12,3	0,4	17,75	Lumped
15	NP0022	32,2	0,4	46,48	Lumped
16	NP0004	41,8	0,4	60,33	Lumped
17	NP0064	8,3	0,4	11,98	Lumped
18	NP0003	64,1	0,4	92,52	Lumped
19	NP0062	14,5	0,4	20,93	Lumped

Tabel Data Beban (*Feeder Tanglad*)

No.	ID	KVA	V	A	Jenis
1	NP0091	4,1	0,4	5,92	Lumped
2	NP0089	2,7	0,4	3,90	Lumped
3	NP0088	3,9	0,4	5,56	Lumped
4	NP0029	25,3	0,4	36,52	Lumped
5	NP0028	28,1	0,4	40,56	Lumped
6	NP0027	10,3	0,4	14,87	Lumped
7	NP0026	3,2	0,4	4,62	Lumped
8	NP0098	7,8	0,4	11,26	Lumped
9	NP0023	10,5	0,4	15,16	Lumped
10	NP0025	12,2	0,4	17,61	Lumped
11	NP0055	8	0,4	11,55	Lumped
12	NP0028	2,4	0,4	3,46	Lumped
13	NP0024	14	0,4	20,21	Lumped
14	NP0077	9,7	0,4	14,00	Lumped
15	NP0035	15,9	0,4	22,95	Lumped
16	NP0034	26,7	0,4	38,54	Lumped
17	NP0033	13,9	0,4	20,06	Lumped

No.	ID	KVA	V	A	Jenis
18	NP0043	16,5	0,4	13,82	Lumped
19	NP0087	10,3	0,4	14,87	Lumped

Tabel Data Beban (*Feeder Bungamekar*)

No.	ID	KVA	V	A	Jenis
1	NP0051	8,7	0,4	12,56	Lumped
2	NP0052	3,5	0,4	5,05	Lumped
3	NP0053	3,5	0,4	5,05	Lumped
4	NP0054	1,4	0,4	2,02	Lumped
5	NP0041	1,7	0,4	24,54	Lumped
6	NP0061	4,8	0,4	6,93	Lumped
7	NP0066	9,6	0,4	13,86	Lumped
8	NP0079	1,5	0,4	2,17	Lumped
9	NP0083	12,3	0,4	17,75	Lumped
10	NP0084	10	0,4	14,43	Lumped
11	NP0086	6,5	0,4	9,38	Lumped
12	NP0085	6,4	0,4	9,24	Lumped
13	NP0097	143	0,4	206,4	Lumped
14	NP0096	44,8	0,4	64,66	Lumped
15	NP0037	12,9	0,4	18,62	Lumped
16	NP0038	3,7	0,4	5,34	Lumped
17	NP0087	1,2	0,4	1,73	Lumped
18	NP0021	27	0,4	38,97	Lumped
19	NP0094	2,4	0,4	3,46	Lumped
20	NP0022	35,5	0,4	51,24	Lumped
21	NP0082	12,7	0,4	18,33	Lumped
22	NP0095	85,7	0,4	123,70	Lumped
23	NP0032	14,1	0,4	20,35	Lumped
24	NP0018	17,6	0,4	25,40	Lumped
25	NP0093	14,6	0,4	6,64	Lumped
26	NP0039	24,7	0,4	35,65	Lumped
27	NP0017	22,8	0,4	32,91	Lumped
28	NP0076	9,5	0,4	13,71	Lumped

Tabel Data Beban (*Feeder PED*)

No.	ID	KVA	V	A	Jenis
1	NP0068	6,2	0,4	8,95	Lumped
2	NP0001	89,1	0,4	128,6	Lumped
3	NP0011	17,8	0,4	25,69	Lumped
4	NP0099	35,5	0,4	51,24	Lumped
5	NP0065	9,4	0,4	13,57	Lumped
6	NP0056	13,6	0,4	19,63	Lumped
7	NP0009	11,8	0,4	17,03	Lumped
8	NP0049	17,1	0,4	24,68	Lumped
9	NP0031	18,2	0,4	26,27	Lumped
10	NP0045	7,8	0,4	11,26	Lumped
11	NP0044	1,7	0,4	2,45	Lumped
12	NP0081	6,5	0,4	9,38	Lumped
13	NP0006	45,5	0,4	65,57	Lumped
14	NP0074	47,7	0,4	68,85	Lumped
15	NP0005	32	0,4	46,19	Lumped
16	NP0071	12,9	0,4	18,62	Lumped
17	NP0092	3,1	0,4	4,47	Lumped
18	NP0008	23	0,4	33,20	Lumped
19	NP0059	5,3	0,4	7,65	Lumped
20	NP0069	3,6	0,4	5,20	Lumped
21	NP0075	1,5	0,4	2,17	Lumped
22	NP0015	25,5	0,4	36,81	Lumped
23	NP0016	26,7	0,4	38,54	Lumped
24	NP0002	46,9	0,4	67,69	Lumped

Tabel Data Kabel (*Feeder Karang Sari*)

No	ID	Jenis	A(mm ²)	l(m)	impedansi
1	Line62	AAAC	75,6	2517	0,70474+j0,63762
2	Line60	AAAC	75,6	2517	0,70474+j0,63762
3	Line08	AAAC	75,6	2517	0,70474+j0,63762
4	Line58	AAAC	147,1	3157	0,36293+j0,63762
5	Line53	AAAC	147,1	160	0,36293+j0,63762
6	Line51	AAAC	147,1	286	0,36293+j0,63762
7	Line49	AAAC	147,1	200	0,36293+j0,63762
8	Line44	AAAC	147,1	1996	0,36293+j0,63762
9	Line40	AAAC	147,1	3319	0,36293+j0,63243
10	Line38	AAAC	147,1	280	0,36293+j0,63243
11	Line36	AAAC	147,1	280	0,36293+j0,63762
12	Line34	AAAC	147,1	1805	0,36293+j0,63762

No	ID	Jenis	A(mm ²)	l(m)	impedansi
13	Line30	AAAC	147,1	800	0,36293+j0,63762
14	Line28	AAAC	147,1	500	0,36293+j0,63762
15	Line26	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
16	Line22	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
17	Line20	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
18	Line15	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
19	Line13	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
20	Line11	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
21	Line09	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
22	Line05	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
23	Line02	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
24	Line01	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
25	Cable4	XPLE3/C	150	50	0,265+j0,106

Tabel Data Kabel (*Feeder Tanglad*)

No	ID	Jenis	A(mm ²)	l(m)	impedansi
1	Line217	AAAC	147,1	1519	0,70474+j0,63762
2	Line215	AAAC	147,1	1628	0,70474+j0,63762
3	Line213	AAAC	147,1	1100	0,70474+j0,63762
4	Line211	AAAC	147,1	1100	0,36293+j0,63762
5	Line209	AAAC	147,1	2512	0,36293+j0,63762
6	Line207	AAAC	147,1	1412	0,36293+j0,63762
7	Line205	AAAC	147,1	1059	0,36293+j0,63762
8	Line203	AAAC	147,1	2250	0,36293+j0,63762
9	Line99	AAAC	157,6	196	0,33789+j0,60111
10	Line97	AAAC	157,6	1396	0,33789+j0,60111
11	Line94	AAAC	157,6	3409	0,33789+j0,60111
12	Line86	AAAC	157,6	30	0,33789+j0,60111
13	Line84	AAAC	157,6	1848	0,33789+j0,60111
14	Line82	AAAC	157,6	50	0,33789+j0,60111
15	Line80	AAAC	157,6	2312	0,33789+j0,60111
16	Line76	AAAC	157,6	111	0,33789+j0,60111
17	Line74	AAAC	157,6	1339	0,33789+j0,60111
18	Line72	AAAC	157,6	817	0,33789+j0,60111
19	Line70	AAAC	157,6	1971	0,33789+j0,60111
20	Line68	AAAC	157,6	801	0,33789+j0,60111
21	Line66	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
22	Cable7	XPLE3/C	150	50	0,265+j0,106

Tabel Data Kabel (*Feeder Bungamekar*)

No	ID	Jenis	A(mm ²)	l(m)	impedansi
1	Line99	AAAC	147,1	695	0,36203+j0,63243
2	Line191	AAAC	147,1	1294	0,36203+j0,63243
3	Line193	AAAC	147,1	834	0,36203+j0,63243
4	Line189	AAAC	147,1	1026	0,36203+j0,63243
5	Line179	AAAC	147,1	2331	0,36203+j0,63243
6	Line141	AAAC	147,1	1236	0,36203+j0,63243
7	Line139	AAAC	147,1	222	0,36203+j0,63243
8	Line137	AAAC	147,1	2468	0,36203+j0,63243
9	Line127	AAAC	147,1	996	0,36203+j0,63243
10	Line125	AAAC	147,1	112	0,36203+j0,63243
11	Line113	AAAC	147,1	1800	0,36203+j0,63243
12	Line109	AAAC	157,6	200	0,33789+j0,60111
13	Line105	AAAC	157,6	8500	0,33789+j0,60111
14	Line135	AAAC	147,1	958	0,36203+j0,63243
15	Line133	AAAC	147,1	50	0,36203+j0,63243
16	Line129	AAAC	147,1	633	0,36203+j0,63243
17	Cable9	XPLE3/C	150	50	0,265+j0,106

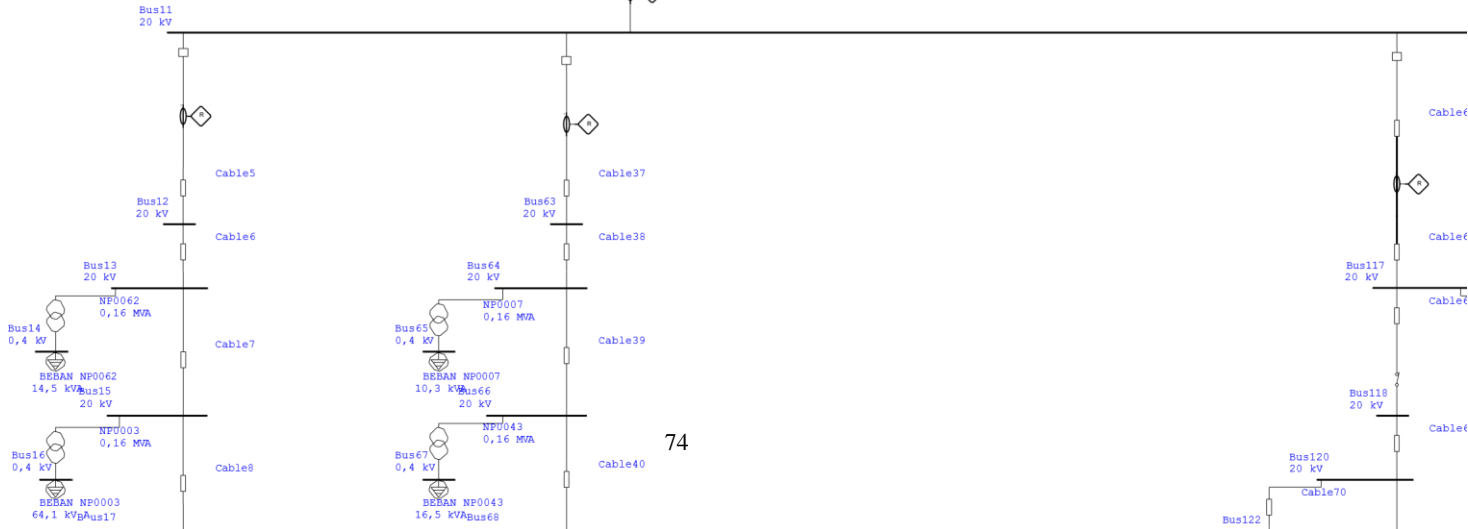
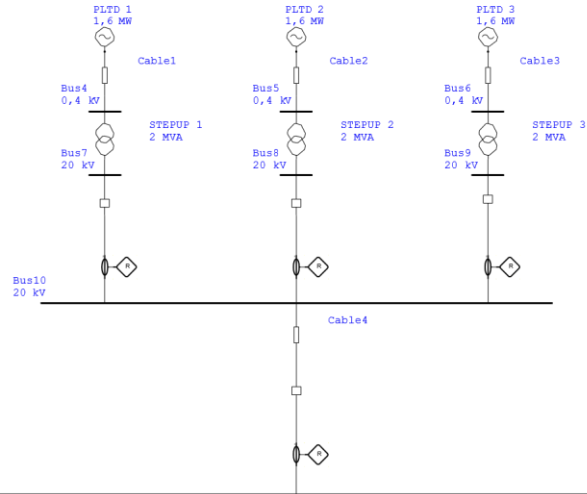
Tabel Data Kabel (*Feeder PED*)

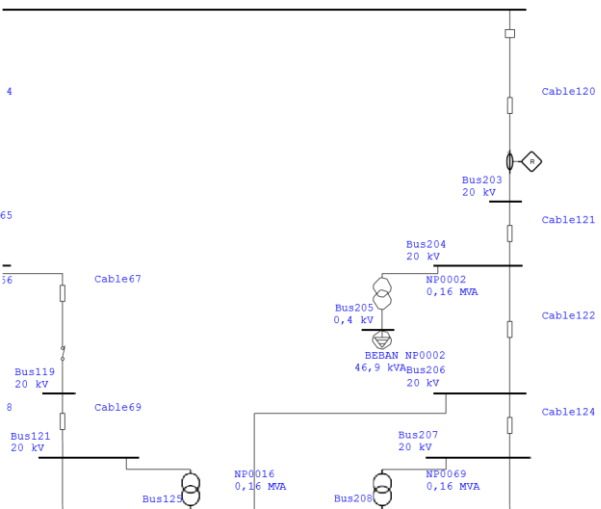
No	ID	Jenis	A(mm ²)	l(m)	impedansi
1	Line276	AAAC	157,6	600	0,33789+j0,60111
2	Line272	AAAC	157,6	2500	0,33789+j0,60111
3	Line274	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
4	Line270	AAAC	157,6	675	0,33789+j0,60111
5	Line264	AAAC	157,6	131	0,33789+j0,60111
6	Line262	AAAC	157,6	574	0,33789+j0,60111
7	Line260	AAAC	157,6	1299	0,33789+j0,60111
8	Line258	AAAC	157,6	131	0,33789+j0,60111
9	Line256	AAAC	157,6	131	0,33789+j0,60111
10	Line254	AAAC	157,6	1414	0,33789+j0,60111
11	Line252	AAAC	157,6	361	0,33789+j0,60111
12	Line250	AAAC	157,6	1259	0,33789+j0,60111
13	Line238	AAAC	157,6	700	0,33789+j0,60111
14	Line236	AAAC	157,6	1000	0,33789+j0,60111
15	Line234	AAAC	157,6	820	0,33789+j0,60111
16	Line230	AAAC	157,6	172	0,33789+j0,60111
17	Line228	AAAC	157,6	571	0,33789+j0,60111
18	Line224	AAAC	157,6	523	0,33789+j0,60111
19	Line222	AAAC	157,6	1000	0,33789+j0,60111

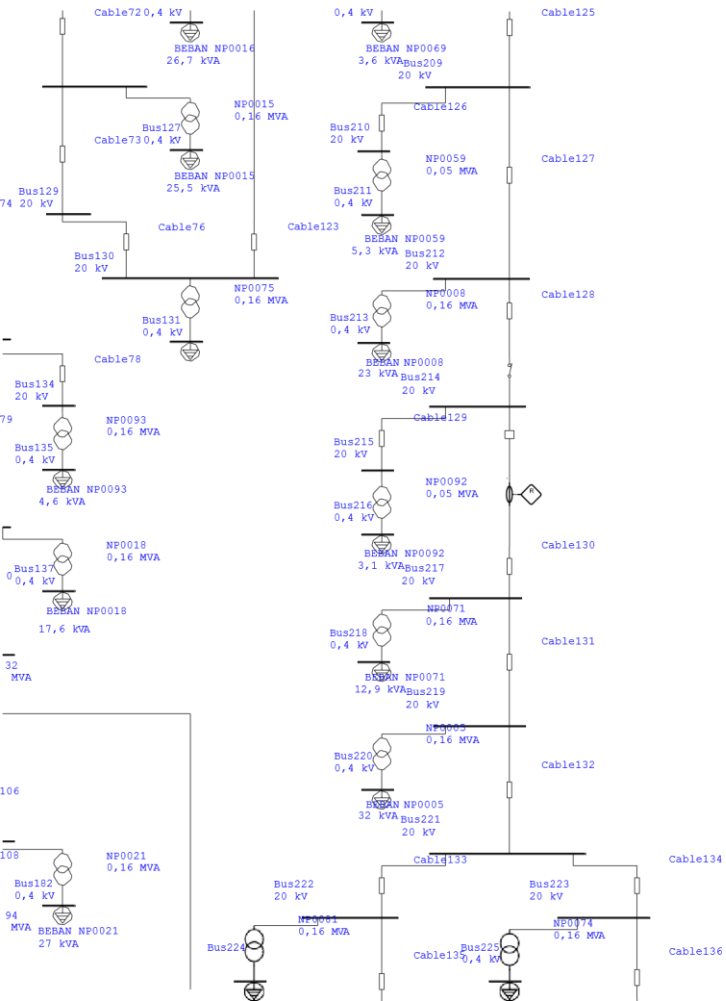
No	ID	Jenis	A(mm ²)	l(m)	impedansi
20	Line220	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
21	Line219	AAAC	157,6	500	0,33789+j0,60111
22	Cable11	XPLE3/C	150	50	0,265+j0,106

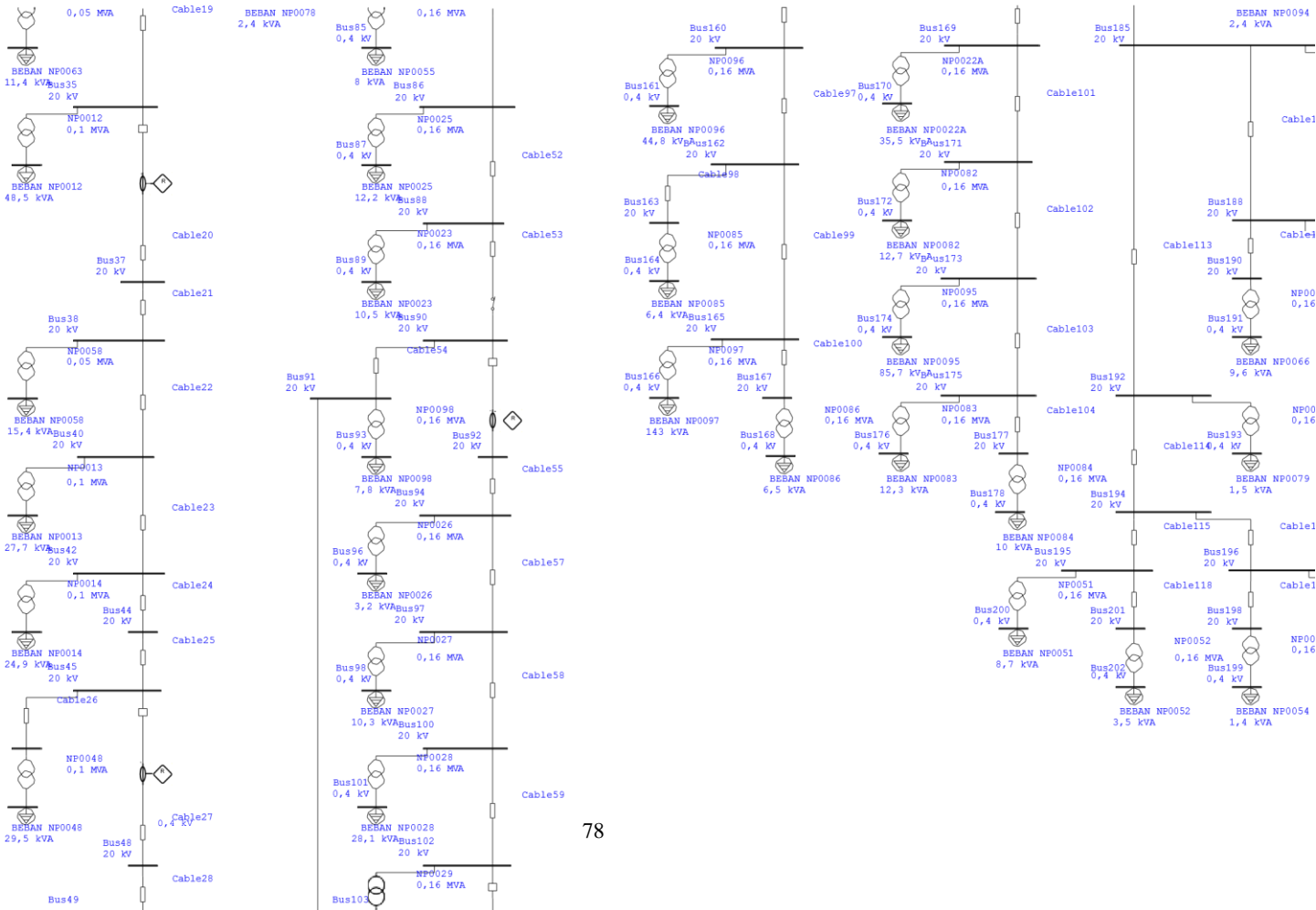
Tabel Data Generator

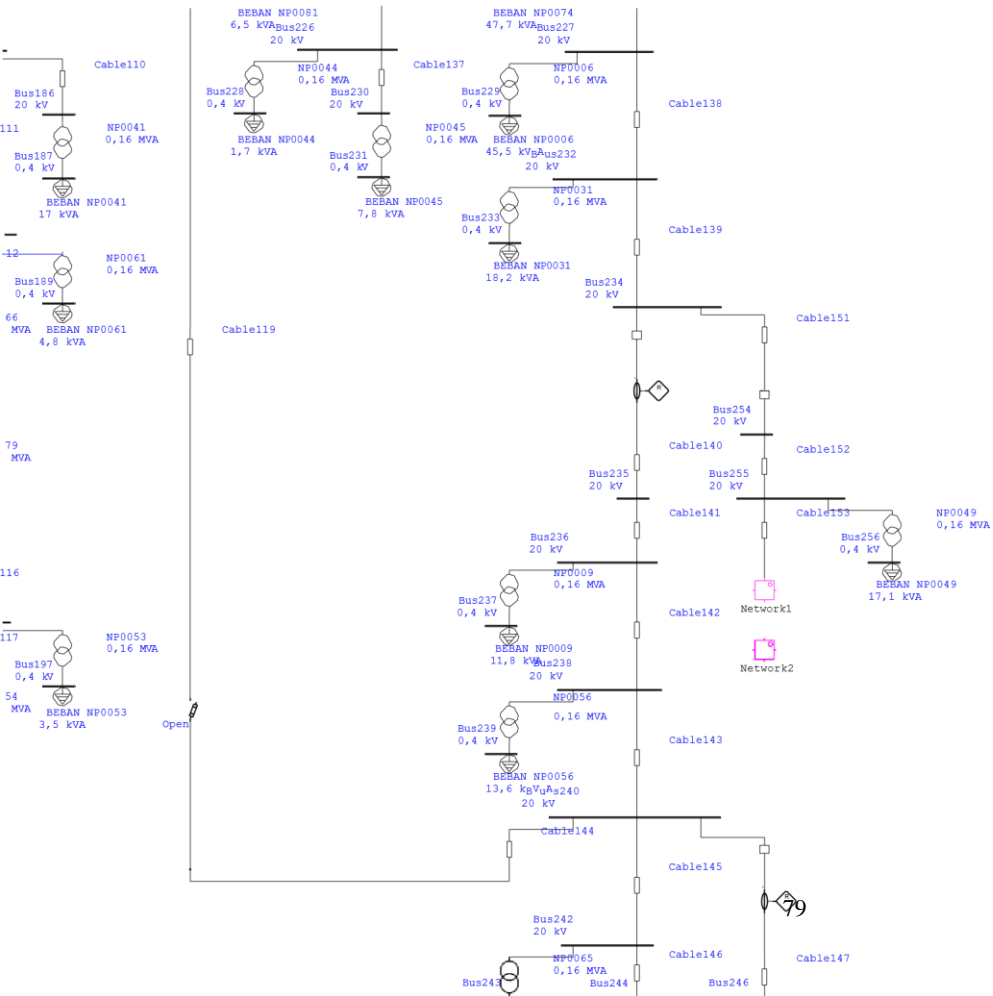
No	ID	Rating	KV	MW	MVAR	A	%Pf	%G
1	Sewamata 1	1,6MW	0,4	0,365	0,517	912,7	57,69	22,8
2	Sewamata 2	1,6MW	0,4	0,365	0,517	912,7	57,69	22,8
3	Sewamata 3	1,6MW	0,4	0,365	0,517	912,7	57,69	22,8
4	WTG	0,755MW	3	0,755	-0,566	187,2	-80	100

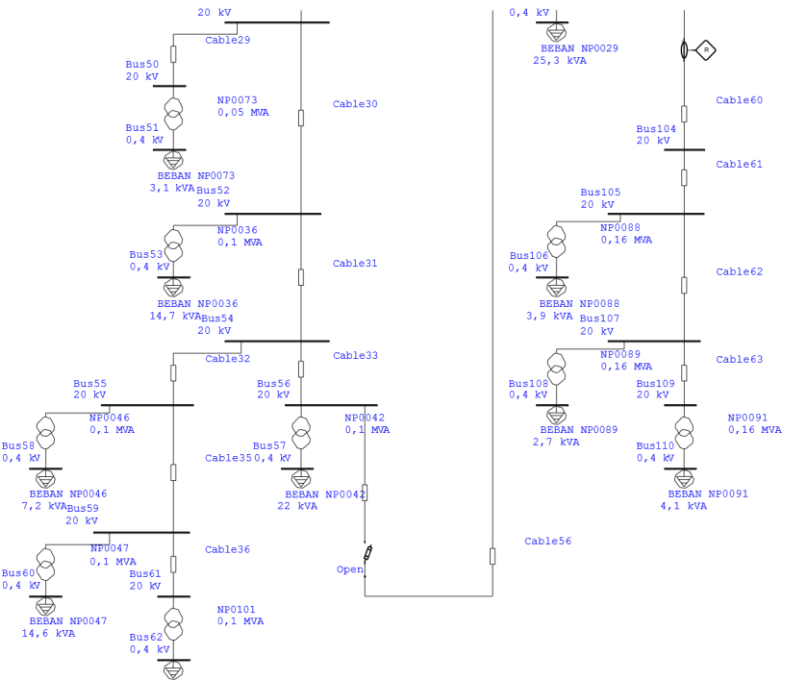


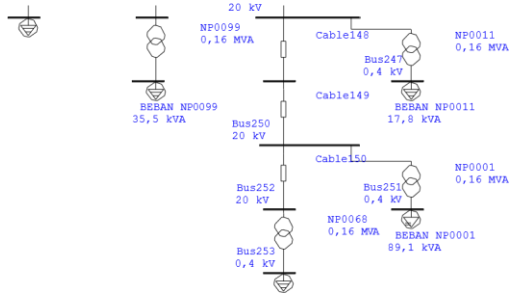












---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BIOGRAFI PENULIS



Wildan Ihsanul Walid, lahir di Lamongan 17 Juni 1998. Wildan melanjutkan studi di Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama kuliah, Wildan aktif di organisasi kemahasiswaan mulai dari menjadi staff di Departemen Dalam Negeri BEM FTI ITS, dan terakhir menjadi Kepala Departemen Dalam Negeri BEM FTE ITS.