TUGAS AKHIR – TE 141599

STUDI PERANCANGAN *FERRORESONANCE SUPPRESSION CIRCUIT* (FSC) PADA *CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER* (CVT) SALURAN TRANSMISI 150 KV

NURUDDIN AFIF
NRP 2212 100 104

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

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

FINAL PROJECT – TE 141599

STUDY OF FERRORESONANCE SUPPRESSION CIRCUIT (FSC) DESIGN AT CAPASITOR VOLTAGE TRANSFORMER (CVT) IN 150 KV TRANSMISSION LINE

NURUDDIN AFIF
NRP 2212 100 104

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

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

STUDY OF FERRORESONANCE SUPPRESSION CIRCUIT (FSC) DESIGN AT CAPASITOR VOLTAGE TRANSFORMER (CVT) IN 150 KV TRANSMISSION LINE

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST.,M.Sc.	**IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.**
NIP 19700712 199802 1 001	**NIP 19730123 200212 1 001**

SURABAYA
JUNI, 2016

STUDI PERANCANGAN *FERRORESONANCE SUPPRESSION CIRCUIT* (FSC) PADA *CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER* (CVT) SALURAN TRANSMISI 150 KV

Nama	**: Nuruddin Afif**
Pembimbing I	**: Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**
Pembimbing II	**: IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.**

ABSTRAK

Peran CVT dalam sistem kelistrikan sangat vital, terutama untuk sistem pengaman dan pengukuran. Akan tetapi rangkaian pada CVT dapat menimbulkan feroresonansi. Fenomena ini dapat menyebabkan tegangan lebih dan arus lebih pada CVT. Dalam studi ini dilakukan mitigasi feroresonansi dengan FSC pasif. Perangkat lunak yang digunakan pada studi ini adalah ATP/EMTP. Parameter FSC pasif diteliti untuk mendapatkan nilai yang tepat. Dari hasil simulasi didapatkan nilai R_r = 12 Ohm dan R_n = 1000 Ohm pada FSC pasif. Selanjutnya FSC pasif diuji dengan perubahan beban CVT. Beban R dan L divarasi untuk mendapatkan perbandingan nilai tegangan dan arus sebelum serta sesudah dipasang FSC pasif. Dari hasil simulasi diperoleh kinerja dari FSC pasif dapat memitigasi feroresonansi dengan baik untuk setiap nilai beban yang diuji.

Kata kunci : Feroresonansi, CVT, FSC pasif

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDY OF FERRORESONANCE SUPPRESSION CIRCUIT (FSC) DESIGN AT CAPASITOR VOLTAGE TRANSFORMER (CVT) IN 150 KV TRANSMISSION LINE

Name : Nuruddin Afif
1st Advisor : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST, M.Sc.
2nd Advisor : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ABSTRACT

The role of Capacitive Voltage Transformer (CVT) in the power system is vital, especially for protection system and measuring. But the circuits in the CVT can cause a ferroresonance. This phenomenon leads to overvoltage and overcurrent in CVT. This paper presents a study of ferroresonance mitigation using passive Ferroresonance Suppression Circuit (FSC). The software that being used in the study is ATP/EMTP. the Parameter of passive FSC is studied to get the right value. Simulation results show that R_r = 12 ohm and R_n = 1000 ohm in passive FSC. Furthermore, the passive FSC is tested with CVT load changes. The resistive and inductive loads are be varied to obtain comparative voltage and current value before and after the passive FSC is placed. Simulation results show that passive FSC can effectively mitigate the ferroresonance for each tested value load

Keywords : Ferroresonance, CVT, passive FSC

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

Hal.

HALAMAN JUDUL
LEMBAR PERNYATAAN
LEMBAR PENGESAHAN
ABSTRAK i
ABSTRACT iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL xiii

BAB I PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang 1
1.2 SistematikaPenulisan 2

BAB II PERALATAN TEGANGAN TINGGI DAN PETIR
2.1 Saluran Transmisi 3
2.2 Transformator Tegangan 5
2.2.1 Transformator Tegangan Magnetik (Induktif) 6
2.2.2 Transformator Tegangan Kapasitif 7
2.3 Feroresonansi 11
2.3.1 Resonansi 11
2.3.2 Pengertian Feroresonansi 12
2.3.3 Klasifikasi Feroresonansi 13
2.4 *Ferroresonance Suppression Circuit* 15

BAB III PEMODELAN *CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER* (CVT) DAN PETIR
3.1 *Capacitive Voltage Transformer* 17
3.2 Komponen Utama CVT 18
3.3 *Ferroresonance Suppression Circuit* (FSC) 21

BAB IV ANALISA HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA *CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER*
4.1 Simulasi Feroresonansi 23
4.2 Analisa Hasil Simulasi 25

4.2.1 Keadaan Normal 25
4.2.2 Parameter ferroresonance suppression circuit 27
4.2.2.1 Studi nilai R_r pada *passive* FSC 28
4.2.2.2 Studi nilai R_n pada *passive* FSC 31
4.2.3 Analisa Tegangan 33
4.2.3.1 Studi Beban CVT 33
4.2.3.2 Studi Beban *R* dan *L* 37
4.2.4 Analisa Arus 40
4.2.4.1 Studi Beban CVT 41
4.2.4.2 Studi Beban *R* dan *L* 46

BAB V PENUTUP
5.1 Kesimpulan 51
5.2 Saran 51

DAFTAR PUSTAKA 53
LAMPIRAN
BIODATA PENULIS

DAFTAR TABEL

Hal

Tabel 3.1 Paramater CVT 20
Tabel 4.1 Pengaruh nilai R_r terhadap tegangan puncak primer 29
Tabel 4.2 Pengaruh nilai R_r terhadap tegangan puncak sekunder 30
Tabel 4.3 Pengaruh nilai R_n terhadap tegangan puncak primer 32
Tabel 4.4 Pengaruh nilai R_n terhadap tegangan puncak sekunder 32
Tabel 4.5 Pengaruh nilai R_b terhadap tegangan puncak primer 36
Tabel 4.6 Pengaruh nilai R_b terhadap tegangan puncak sekunder 37
Tabel 4.7 Pengaruh nilai R_b terhadap tegangan puncak primer 40
Tabel 4.8 Pengaruh nilai R_b terhadap tegangan puncak sekunder 40
Tabel 4.9 Pengaruh nilai R_b terhadap tegangan puncak primer 45
Tabel 4.10 Pengaruh nilai R_b terhadap tegangan puncak sekunder 46
Tabel 4.11 Pengaruh nilai L terhadap tegangan puncak primer 49
Tabel 4.12 Pengaruh nilai L terhadap tegangan puncak sekunder 50

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Hal

Gambar 2.1 Diagram garis sistem tenaga listrik 3
Gambar 2.2 Rangkaian trafo tegangan magnetik........................... 7
Gambar 2.3 Rangkaian lengkap trafo tegangan kapasitif.............. 9
Gambar 2.4 Konstruksi trafo tegangan kapasitif........................... 10
Gambar 2.5 Resonansi seri 11
Gambar 2.6 Mode fundamental.. 14
Gambar 2.7 Mode subharmonik 14
Gambar 2.8 Mode quasi-periodik... 15
Gambar 2.9 Mode chaotic 15
Gambar 2.10 Rangkaian FSC 16
Gambar 3.1 Komponen Utama CVT 18
Gambar 3.2 Rangkaian ekivalen CVT... 19
Gambar 3.3 Diagram skematik CVT 20
Gambar 3.4 Rangkaian FSC pasif 21
Gambar 4.1 *Layout* tipikal gardu induk 150 kV 23
Gambar 4.2 *Single Line Diagram* 23
Gambar 4.3 Rangkaian simulasi.. 24
Gambar 4.4 Kurva magnetisasi pada trafo CVT............................ 25
Gambar 4.5 Tegangan primer CVT normal................................... 26
Gambar 4.6 Tegangan sekunder CVT normal 26
Gambar 4.7 Tegangan sekunder CVT tanpa *ferroresonance suppression circuit*............................ 27
Gambar 4.8 Kurva magnetisasi pada induktor Ln 28
Gambar 4.9 Tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_r 1 Ohm....... 28
Gambar 4.10 Tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_r 10 Ohm..... 29
Gambar 4.11 Grafik perbandingan nilai R_r pada tegangan primer ... 30
Gambar 4.12 Grafik perbandingan nilai R_r pada tegangan sekunder. 30
Gambar 4.13 Tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_n 1 Ohm....... 31
Gambar 4.14 Tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_n 1000 Ohm. 32
Gambar 4.15 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 1 Ohm. 33
Gambar 4.16 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 30 Ohm. 34

Gambar 4.17 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 90 Ohm. 34
Gambar 4.18 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 150 Ohm. 34
Gambar 4.19 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 325 Ohm 35
Gambar 4.20 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 500 Ohm 35
Gambar 4.21 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 787 Ohm. 35
Gambar 4.22 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 787 Ohm 36
Gambar 4.23 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai L 7,5 mH.. 38
Gambar 4.24 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai L 75 mH.. 38
Gambar 4.25 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai L 100 mH.. 39
Gambar 4.26 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai L 150 mH.. 39
Gambar 4.27 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai L 175 mH.. 39
Gambar 4.28 Arus sekunder sebelum dipasang *FSC pasif* (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 1 Ohm 41
Gambar 4.29 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau)

dengan nilai R_b 30 Ohm 42
Gambar 4.30 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 90 Ohm 42
Gambar 4.31 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 150 Ohm 43
Gambar 4.32 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 325 Ohm. 43
Gambar 4.33 Arus sekunder sebelum dipasang *FSC pasif* (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 500 Ohm 44
Gambar 4.34 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 787 Ohm 44
Gambar 4.35 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai R_b 1000 Ohm 45
Gambar 4.36 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai L 7,5 mH 47
Gambar 4.37 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai L 75 mH 47
Gambar 4.38 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai L 100 mH 48
Gambar 4.39 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai L 150 mH 48
Gambar 4.40 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (hijau) dengan nilai L 175 mH 49

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Untuk memonitor dan mengendalikan suatu sistem tenaga listrik, diperlukan alat ukur, lampu indikator dan relay proteksi. Karena pertimbangan harga dan bahaya yang ditimbulkan tegangan tinggi bagi operator maka diperlukan trafo tegangan untuk mentransformasi tegangan sistem ke tegangan rendah agar dapat diukur dengan voltmeter dan dapat dimanfaatkan untuk keperluan lampu indikator dan relay proteksi. Untuk pengukuran tegangan diatas 110 kV akan lebih ekonomis menggunakan *capacitive voltage transformer* (CVT) karena kontruksi isolasi *capacitive voltage transformer* lebih sederhana. Pada CVT terdapat pembagi tegangan kapasitif yang diselipkan suatu trafo penengah (*intermediate transformer*) yang merupakan induktor non-linier. Artinya kapasitor membentuk suatu rangkaian tertutup dengan induktor non-linier yang berpeluang menimbulkan gejala feroresonansi (*ferroresonance*)[1].

Feroresonansi merupakan fenomena resonansi non-linier yang dapat mempengaruhi jaringan tenaga listrik. Penyebab utama dari fenomena ini adalah munculnya lebih dari satu respon *steady state* yang stabil pada parameter jaringan yang sama[2]. Osilasi feroresonansi dapat menyebabkan tegangan lebih yang cukup besar dan menghasilkan panas yang tidak diinginkan pada inti dan kumparan trafo penengah[1]. Timbulnya feroresonansi tentunya akan memberikan efek negatif yang dapat mengganggu kinerja dari CVT dalam sistem pengaman dan pengukuran.

Dari penjelasan diatas, diperlukan suatu studi tentang perancangan FSC (*Ferroresonance Supression Circuit*) pada CVT untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan oleh gejala feroresonansi. Permasalahan yang timbul adalah untuk mempelajari dan mengetahui fenomena feroresonansi pada CVT serta bagaimana memodelkannya pada suatu simulasi. Setelah itu dirancang *ferroresonance supression circuit* dengan parameter yang sesuai. Sehingga akan diperoleh bagaimana pengaruh FSC pada fenomena feroresonansi di CVT.

Pada studi ini, penelitian difokuskan pada CVT yang terletak sebelum transformator daya. Objek yang diteliti merupakan CVT pada salah satu fasa di gardu induk yang memiliki tegangan *line to line* 150 kV dengan frekuensi 50 Hz. Terjadi transien akibat *switching* pada kawat fasa

saluran transmisi didekat CVT. Penelitian ini akan disimulasikan dengan perangkat lunak ATP/EMTP.

1.2 Sistematika Penulisan

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

BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, serta manfaat dan relevansi

BAB 2 berisi teori penunjang yag membahas tentang sistem transmisi tenaga listrik , trafo tegangan, feroresonansi dan *ferroresonance supression circuit*.

BAB 3 berisi tentang pemodelan feroresonansi dan *ferroresonance supression circuit* pada CVT.

BAB 4 berisi tentang hasil simulasi yang telah dilakukan dan analisis mengenai hasil simulasi tersebut.

BAB 5 berisi tentang kesimpulan dan saran-saran dari proses pemodelan, simulasi, dan analisis mengenai *ferroresonance supression circuit.*

BAB II

TRAFO TEGANGAN KAPASITIF, FERORESONANSI DAN *FERRORESONANCE SUPPRESSION CIRCUIT*

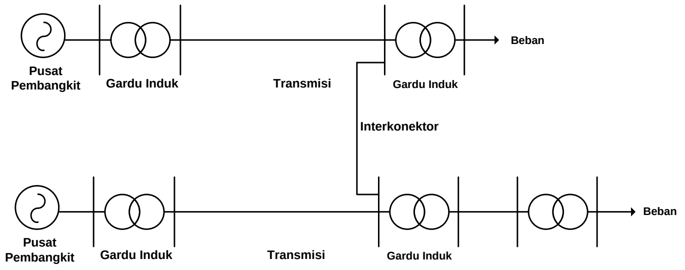
2.1 Sistem Transmisi[1]

Perkembangan kebutuhan energi listrik senantiasa diikuti pembangunan pusat-pusat tenaga listrik berkapasitas besar. Karena alasan ekonomi, kondisi geografis, potensi alam yang dapat diolah menjadi tenaga listrik, dan masalah sosial, maka pusat-pusat tenaga listrik dibangun jauh dari pusat pemukiman masyarakat atau konsumen. Oleh karena itu, untuk menyalurkan energi dari pusat pembangkit kepada konsumen dibutuhkan saluran atau transmisi tegangan tinggi dan peralatan tegangan tinggi yang mendukung pengadaan transmisi tegangan tinggi tersebut.

Diagram garis dari suatu sistem tenaga listrik sederhana diperlihatkan pada gambar 2.1. Ketika suatu sistem tenaga listrik sedang beroperasi, pada transmisinya terjadi rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya pada transmisi AC tiga fasa adalah:

$$\Delta P_t = 3I^2R \tag{2.1}$$

dengan ΔP = Rugi-rugi daya transmisi AC tiga fasa (Watt)
I = Arus pada kawat transmisi (A)
R =Resistansi kawat transmisi masing-masing fasa (Ohm)



Gambar 2.1 Diagram garis sistem tenaga listrik

Dengan mengabaikan arus kapasitif pada transmisi, maka arus di sepanjang kawat transmisi dapat dianggap sama dan besarnya adalah sama dengan arus pada ujung penerima transmisi. Jika P sama dengan daya beban pada ujung penerima transmisi (Watt), V_r sama dengan tegangan fasa ke fasa ujung penerima transmisi (Volt) dan cos φ sama dengan faktor daya beban, maka arus pada kawat transmisi adalah:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_r \cos\varphi} \tag{2.2}$$

Jika persamaan 2.2 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.1, maka diperoleh:

$$\Delta P_t = \frac{P^2 R}{{V_r}^2 \cos^2\varphi} \tag{2.3}$$

Terlihat bahwa rugi-rugi transmisi berbanding lurus dengan resistansi konduktor dan berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan transmisi, sehingga pengurangan rugi-rugi yang diperoleh dari peninggian tegangan transmisi jauh lebih besar daripada pengurangan rugi-rugi daya dari pengurangan resistansi konduktor. Maka rugi-rugi transmisi dikurangi dengan mempertinggi tegangan transmisi. Hal inilah yang membuat tegangan transmisi sistem tenaga listrik semakin tinggi dan saat ini sudah ada yang mencapai 750 kV.

Besarnya tegangan nominal saluran transmisi tegangan tinggi ataupun ekstra tinggi berbeda-beda untuk setiap negara atau perusahaan listrik di negara tersebut, tergantung kepada kemajuan tekniknya masing-masing. Secara umum klasifikasi tegangan tinggi adalah sebagi berikut [2].

1. Tegangan Tinggi (*High Voltage*), yaitu tegangan sistem : 110 kV, 132 kV, 156 kV, dan 220 kV di Eropa; 115 kV, 138 kV, 161 kV, dan 230 kV di Amerika; 150 kV di indonesia.
2. Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*), yaitu tegangan sistem : 275 kV, 380 kV, 400 kV, dan 800 kV di eropa; 287 kV, 345 kV, 500 kV, dan 765 kV di Amerika; 500 kV di Indonesia.

3. Tegangan Ultra Tinggi (*Ultra High Voltage*), yaitu tegangan sistem diatas 1000 kV.

Tegangan yang dibangkitkan generator terbatas dalam belasan kilovolt, sedangkan transmisi membutuhkan tegangan dari puluhan sampai ratusan kilovolt, sehingga diantara pembangkit dengan transmisi dibutuhkan trafo daya *step up.* Maka semua perlengkapan yang terpasang disisi sekunder trafo ini harus mampu memikul tegangan tinggi. Tegangan transmisi dari puluhan sampai ratusan kilovolt, sedangkan konsumen membutuhkan tegangan dari ratusan volt sampai puluhan kilovolt, sehingga diantara transmisi dengan konsumen dibutuhkan trafo daya *step down.* Semua perlengkapan yang terpasang di sisi primer trafo ini juga harus mampu memikul tegangan tinggi. Trafo-trafo daya ini bersama dengan perlengkapan-perlengkapannya disebut gardu induk. Salah satu peralatan tegangan tinggi yang penting pada suatu gardu induk adalah trafo tegangan (PT).

2.2 Trafo Tegangan[3]

Trafo tegangan adalah peralatan yang mentransformasi tegangan sistem yang lebih tinggi ke suatu tegangan sistem yang lebih rendah untuk kebutuhan peralatan indikator, alat ukur atau meter dan relai. Fungsi dari trafo tegangan yaitu:

- Mentransformasikan besaran tegangan sistem dari yang tinggi ke besaran tegangan listrik yang lebih rendah sehingga dapat digunakan untuk peralatan proteksi dan pengukuran yang lebih aman, akurat dan teliti.
- Mengisolasi bagian primer yang tegangannya sangat tinggi dengan bagian sekunder yang tegangannya rendah untuk digunakan sebagai sistem proteksi dan pengukuran peralatan dibagian primer.
- Sebagai standarisasi besaran tegangan sekunder untuk keperluan peralatan sisi sekunder.
- Memiliki 2 kelas, yaitu kelas proteksi (3P, 6P) dan kelas pengukuran (0,1; 0,2; 0,5;1;3).

Ada dua jenis trafo tegangan, yaitu: trafo tegangan magnetik dan trafo tegangan kapasitif.

2.2.1 Trafo Tegangan Magnetik[1]

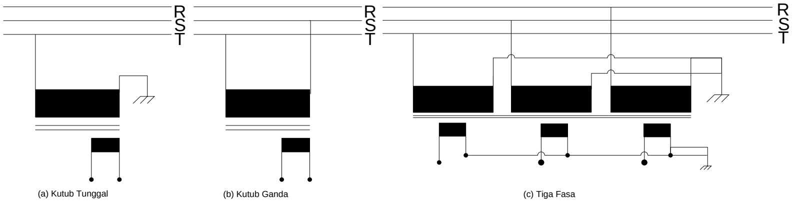
Komponen utama suatu trafo tegangan magnetik adalah: kumparan primer, kumparan sekunder, dan inti baja silikon. Ketiga komponen tersebut dicetak dalam isolasi padat atau dimasukkan dalam suatu bejana berisi isolasi cair atau gas. Dalam praktiknya, badan trafo tegangan selalu terhubung ke tanah.

Prinsip kerja trafo tegangan sama dengan trafo daya. Kumparan primer dihubungkan ke jaringan tegangan tinggi yang akan diukur, sehingga arus mengalir pada kumparan primer. Arus pada kumparan primer menimbulkan fluks magnetik pada inti trafo tegangan. Fluks tersebut akan menginduksikan gaya gerak listrik yang rendah pada kumparan sekunder, sehingga pada terminal kumparan sekunder terdapat beda tegangan yang sebanding dengan tegangan yang diukur.

Karakteristik yang membedakan trafo tegangan dengan trafo daya adalah

a) Kapasitasnya kecil (10 – 150 VA), karena bebannya hanya peralatan yang mengkonsumsi daya rendah, seperti voltmeter, kWh-meter, wattmeter, relai jarak, sinkronoskop dan lampu indikator.
b) Karena digunakan kontinyu dan menjadi beban bagi sistem yang menggunakannya, maka trafo tegangan dirancang menkonsumsi energi yang sekecil mungkin.
c) Untuk mengurangi kesalahan pengukuran, trafo tegangan dirancang sedemikian agar tegangan sekunder sebanding dan sefasa dengan tegangan primer.
d) Tegangan pengenal sekunder trafo tegangan umumnya ditetapkan 100-230 V atau (100-230) $\sqrt{3}$ V.

Ada tiga jenis trafo tegangan magnetik, yaitu: trafo tegangan kutub tunggal, trafo tegangan kutub ganda dan trafo tegangan tiga fasa. Pada trafo tegangan kutub tunggal, salah satu terminal dibumikan seperti pada gambar 2.2. Disamping untuk pengukuran sistem tiga fasa, trafo tegangan kutub tunggal dan trafo tegangan tiga fasa dapat sekaligus digunakan untuk mencatu tegangan kepada relai proteksi arus tanah. Dalam hal ini, trafo tegangan dilengkapi dengan kumparan tambahan yang digunakan untuk mendeteksi adanya arus gangguan tanah. Kumparan tambahan ini disebut kumparan proteksi. Trafo tegangan



Gambar 2.2 Rangkaian trafo tegangan magnetik

kutub ganda digunakan untutk pengukuran daya dan energi sistem tiga fasa.

2.2.2 Trafo Tegangan Kapasitif[2]

Untuk pengukuran tegangan diatas 110 kV, adalah lebih ekonomis menggunakan trafo tegangan kapasitif daripada menggunakan trafo tegangan magnetik, karena konstruksi isolasi trafo tegangan lebih sederhana daripada trafo tegangan magnetik. Trafo tegangan kapasitif akan lebih ekonomis lagi jika digunakan sekaligus untuk pengiriman sinyal melalui konduktor transmisi (*power line carrier*), yaitu sinyal komunikasi data, sinyal audio dan sinyal kendali jarak jauh (*telecontrol*). Trafo tegangan kapasitif digunakan juga untuk pengukuran energi pada konsumen industri. Sangat handal digunakan untuk mencatu tegangan ke relai elektronik yang bekerja sangat cepat, terutama jika trafo tegangan kapasitif menggunakan peredam osilasi elektronik.

Bagian utama trafo tegangan kapasitif adalah pembagi tegangan kapasitif $C_1 – C_2$. Secara teknis, dengan merancang nilai kapasitansi nilai C_1 dan C_2, tegangan pada kapasitor C_2 dapat diperoleh dalam orde ratusan volt (sesuai dengan kebutuhan alat ukur, relai, atau lampu indikator), tetapi cara ini tidak ekonomis. Oleh karena itu, kapasitansi C_1 dan C_2 dirancang sedemikian rupa, sehingga tegangan pada kapasitor C_2 diperoleh dalam orde puluhan kilovolt, umumnya 5, 10, 15 dan 20 kV. Diantara kapasitor C_2 dengan beban diselipkan suatu trafo tegangan magnetik yang disebut trafo penengah (*intermediate transformer*). Terminal kapasitor C_2 dihubungkan ke belitan primer trafo penengah, sehingga tegangan primer trafo penengah sama dengan tegangan pada terminal kapasitor C_2. Tegangan primer trafo penengah (dalam orde puluhan ribu Volt) diturunkan oleh trafo penengah menjadi ratusan Volt.

Ketika hubungan antara terminal kumparan trafo tegangan yang dibumikan dengan inti atau badan trafo tegangan dibuka, kumparan primer dirancang mampu memikul tegangan frekuensi daya sebesar 3 kV_{rms} dalam durasi singkat.

Jika rugi-rugi pada trafo penengah diabaikan dan impedansi bebannya tidak terhingga (terminal belitan sekunder terbuka), maka hubungan tegangan V_n, V_1, dan V_2 dinyatakan sebagai:

$$\frac{V_n}{V_1} = \frac{C_1+C_2}{C_1} = a_c \tag{2.4}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = a_t \tag{2.5}$$

$$\frac{V_n}{V_2} = a_c \times a_t = a_p \tag{2.6}$$

Dalam hal ini : a_c = factor pembagi tegangan kapasitor
a_t = factor transformasi trafo penengah
a_p = factor transformasi sistem pengukuran

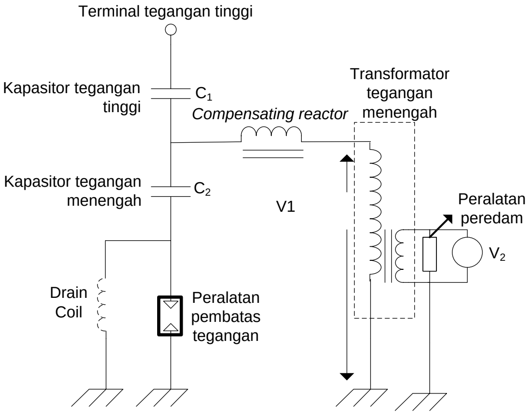
Jika rugi-rugi pada trafo penengah dan impedansi beban diperhitungkan, maka faktor pembagi tegangan kapasitor (a_c) dan factor transformasi sistem pengukuran (a_p) akan berubah. Untuk mengkompensasi perubahan tersebut, maka diantara kapasitor C_2 dengan trafo penengah disisipkan suatu induktor kompensasi (L) seperti pada gambar 2.3.

Jika Z_b adalah impedansi ekuivalen gabungan trafo penengah dengan beban dilihat dari sisi tegangan tinggi, maka hubungan tegangan jaringan dengan tegangan primer trafo penengah menjadi:

$$\frac{V_n}{V_1} = \frac{C_1+C_2}{C_1} + \frac{1-\omega^2 L(C_1+C_2)}{j\omega C_1 Z_b} \tag{2.7}$$

Bila nilai L, C_1 dan C_2 dipilih sedemikian sehingga memenuhi hubungan dibawah ini:

$$\omega^2 L(C_1 + C_2) = 1 \tag{2.8}$$



Gambar 2.3 Rangkaian lengkap trafo tegangan kapasitif

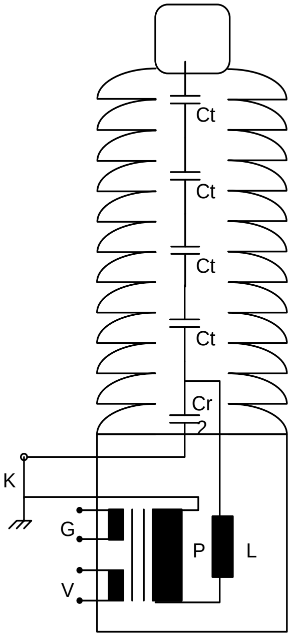
maka perbandingan V_n dengan V_1 akan tetap seperti dinyatakan pada persamaan 2.1. Artinya, impedansi trafo penengah maupun impedansi beban tidak berpengaruh terhadap faktor a_c.

Jika terjadi tegangan lebih pada jaringan transmisi, tegangan pada kapasitor C_2 akan naik dan dapat menimbulkan kerusakan pada kapasitor tersebut. Untuk mencegah kerusakan tersebut dipasang sela pelindung (*SP*). Sela pelindung akan terpecik pada tegangan yang lebih rendah daripada tegangan ketahanan isolasi kapasitor C_2, sehingga kapasitor C_2 terlindung dari bahaya tegangan lebih yang terjadi pada jaringan. Jika sela pelindung terpecik, terminal C_2 terhubung singkat ke tanah, sehingga mengalir arus yang besar ke tanah. Untuk membatasi arus yang besar tersebut, sela pelindung (*SP*) dihubungkan seri dengan suatu resistor (*R*).

Trafo penengah merupakan induktor non-linear. Trafo penengah ini membentuk rangkaian tertutup dengan kapasitor C_2. Artinya, kapasitor C_2 membentuk rangkaian tertutup dengan suatu induktor non-linear. Rangkaian seperti ini berpeluang menimbulkan gejala feroresonansi. Osilasi feroresonansi dapat menyebabkan tegangan lebih yang cukup besar dan menghasilkan panas yang tidak diinginkan pada inti dan kumparan trafo penengah. Untuk meredam efek feroresonansi tersebut, maka pada terminal belitan sekunder trafo penengah dipasang

ferroresonance suppression circuit (FSC) agar tegangan dan arus lebih yang terjadi tidak berbahaya untuk peralatan.

Rancangan konstruksi suatu trafo tegangan kapasitif biasanya seperti diperlihatkan pada gambar 2.4. Elemen-elemen kapasitor dihubungkan secara seri dan disusun di dalam suatu tabung porselen yang ramping. Induktor kompensasi dan trafo penengah ditempatkan didalam bejana logam. Diluar bejana disediakan terminal untuk peralatan komunikasi (*K*). Terminal ini dapat dibumikan jika trafo tegangan kapasitif tidak dimanfaatkan untuk komunikasi. Agar efektif sebagai kopling kapasitor, maka kapasitansi ekuivalen C_1 dan C_2 harus memiliki nilai minimum 4400 pF.



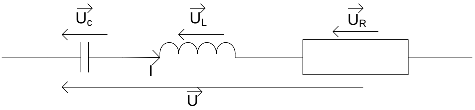
Keterangan
Ct = Kapasitor tegangan tinggi
Cr = Kapasitor tegangan rendah
L = Indukor kompensasi
P = Kumparan Primer
V = Kumparan sekunder untuk pengukuran
G = Kumparan sekunder untuk relai arus tanah
K = Terminal untuk alat komunikasi

Gambar 2.4 Konstruksi trafo tegangan kapasitif

2.3 Feroresonansi

2.3.1 Resonansi[4]

Resonansi merupakan fenomena yang terjadi pada sistem tenaga di semua level tegangan. Resonansi ini dapat diketahui dari contoh resonansi sistem pentanahan (*Petersen coil)*, yang digunakan untuk meminimalisir tegangan medium satu fasa ke arus gangguan tanah, atau dapat juga menyebabkan kerusakan dielektrik atau pengurangan umur dari peralatan karena tegangan dan arus lebih.



Gambar 2.5 Resonansi seri [2]

Persamaan vektor tegangan dari rangkaian diatas adalah sebagai berikut :

$$\vec{U} = \overrightarrow{U_R} + \overrightarrow{U_L} + \overrightarrow{U_C} \quad (2.9)$$

dimana $\vec{U}$ = tegangan total (Volt)
$\overrightarrow{U_R}$ = tegangan resistor (Volt)
$\overrightarrow{U_L}$ = tegangan induktor (Volt)
$\overrightarrow{U_C}$ = tegangan kapasitor (Volt)

Pada kasus tertentu, tegangan dari terminal pada kapasitor dan induktansi dapat terkompensasi sehingga rangkaian dapat dikatakan pada situasi resonansi. Syarat dari ω_n yang dapat memunculkan resonansi adalah sebagai berikut :

$$LC\omega_n^2 = 1 \quad (2.10)$$

dimana :L = induktor (Henry)
C = kapasitor (Farad)
ω_n = kecepatan sudut (Rad/s)

Nilai dari arus (I) sama dengan :

$$I = \frac{E}{R} \tag{2.11}$$

dimana : I = arus (Ampere)
E = tegangan (Volt)
R = resistor (Ohm)

Arus ini dapat bernilai sangat tinggi. Amplitudo tegangan dari terminal kapasitor dan induktor sama dengan *k.E*, dimana *k* adalah faktor kualitas yang dapat dinyatakan :

$$k = \frac{L\omega_n}{R} = \frac{1}{RC\omega_n} \tag{2.12}$$

Resonansi harmonisa terjadi jika ω_n sama dengan ω_0 (frekuensi dari sistem) yang terbentuk dari beberapa tipe mesin (*variable speed drive, statis rectifier*). Resonansi harmonisa dapat menyebabkan kerusakan peralatan listrik.

2.3.2 Pengertian feroresonansi

Istilah *ferroresonance* yang muncul pertama kali tahun 1920, merujuk pada semua fenomena osilasi yang muncul pada jaringan listrik, dimana setidaknya mengandung:

- Sebuah induktansi non-linear
- Sebuah kapasitor
- Sumber tegangan sinusoidal
- Rugi daya yang rendah

Jaringan listrik terdiri dari sejumlah induktansi saturabel (Transformator daya, VT, *shunt reactor*) serta kapasitansi (kabel, transmisi, CVT, *capacitor bank*) yang dapat menyebabkan terjadinya *ferroresonance.*

Penyebab utama dari fenomena ini adalah munculnya lebih dari satu respon *steady state* yang stabil pada parameter jaringan yang sama. Gejala *transient*, *lightning overvoltage*, pengisian tenaga transformator atau beban, kemunculan atau penghilangan gangguan, memungkinkan terjadinya *ferroresonance*. Responnya dapat berubah secara tiba-tiba dari

respon *steady state* normal (sinusoidal dengan frekuensi yang sama seperti sumber) ke respon *steady state ferroresonance* yang ditandai dengan *overvoltage* dan level harminonisa yang tinggi, yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik.

Perbedaan utama antara feroresonansi dengan resonansi linear adalah untuk ω yang diberikan:

- Kemungkinan resonansi lebih besar dalam berbagai nilai C.
- Frekuensi tegangan dan arus gelombang yang mungkin berbeda dari yang dari gelombang sinusoidal sumber tegangan.
- Adanya beberapa kondisi stabil *steady state* untuk beberapa konfigurasi dan parameter yang diberikan.

Ferroresonance pada sistem kelistrikan pada umumnya muncul ketika sistem dalam kondisi tidak seimbang. Misalnya pada *switching* yang menyebabkan sebuah komponen kapasitif terhubung seri dengan impedansi *magnetizing* transformator. Kondisi ini menyebabkan tegangan lebih yang akan berpengaruh besar pada terjadinya gangguan di transformator, kabel, maupun arrester. *Switching* yang terjadi merupakan gejala abnormal *switching* dimana dapat disebabkan oleh hal-hal berikut ini :

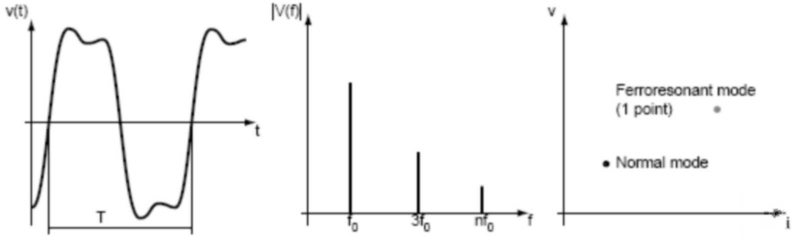
1. Kesalahan pada operator dimana saat *switching* menarik sebuah siku konektor secara manual.
2. Pengoperasian *fuse* ketika ada gangguan, yang menyebabkan *switch* terbuka.
3. Pengisian energi transformator secara manual
4. *Switching* kabel manual untuk rekonfigurasi sebuah rangkaian kabel pada saat kondisi darurat.

2.3.3 Klasifikasi Feroresonansi

Berdasarkan pengalaman pada terbentuknya gelombang di sistem tenaga, percobaan yang telah dilakukan pada model sistem serta simulasi numerik, *ferroresonance* dapat dibedakan menjadi 4 (empat) jenis yang berbeda. Klasifikasi ini sesuai dengan kondisi *steady state.* Keempat jenis *ferroresonance* tersebut adalah:

1. Fundamental Mode

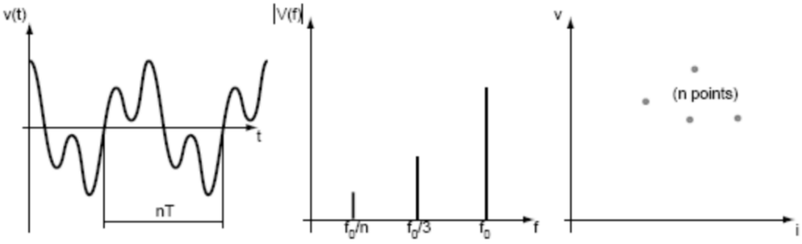
Tegangan dan arus memiliki periode yang sama dengan periode sistem dan dapat mengandung berbagai level harmonisa. Spektrum sinyal yang terbentuk merupakan spektrum diskontinue frekuensi fundamental sistem f_o dan harmonisanya. Gambar 2.6 merupakan model fundamental dari *ferroresonance.*



Gambar 2.6 Model fundamental [4]

2. Subharmonic Mode

Sinyal periodik dengan periode *nT* yang merupakan kelipatan dari periode sumber. Kondisi ini dikenal sebagai subharmonik atau harmonik 1/*n*. Kondisi subhamonik ini biasanya terdapat pada orde ganjil. Spektrum yang menunjukkan fundamental sama dengan f_0/n (di mana f_0 adalah frekuensi sumber dan *n* adalah bilangan bulat) dan harmonisanya. Model ini ditunjukkan pada gambar 2.7.



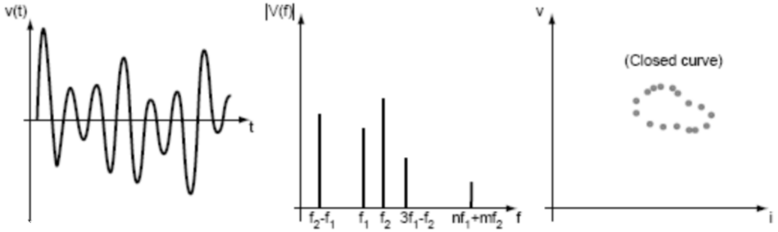
Gambar 2.7 Model subharmonik [4]

3. *Quasi-Periodic Mode*

Model ini (disebut juga *pseudo-periodic*) tidak periodik. Spektrum yang didapat merupakan spektrum diskontinyu yang frekuensinya terlihat pada rumus :

$$nf_1 + mf_2 \tag{2.9}$$

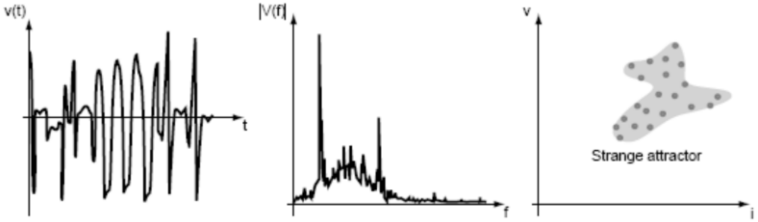
dimana *n* dan *m* adalah bilngan bulat dan f_1/f_2 adalah bilangan real irasional). Model ini terlihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Model quasi-periodik [4]

4. *Chaotic Mode*

Spektrum dari mode ini merupakan spektrum yang kontinyu karena tidak membatalkan frekuensi apapun. Gambarnya dapat terlihat pada gambar 2.9.

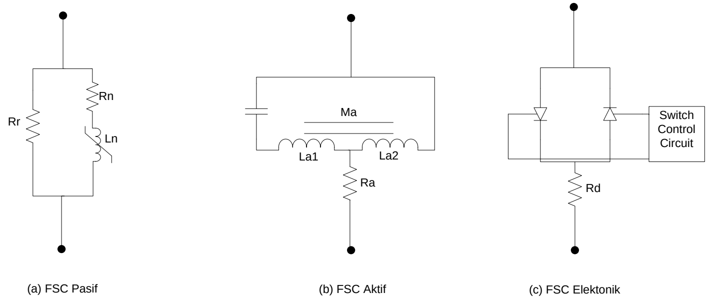


Gambar 2.9 Model chaotic [4]

2.4 *Ferroresonance Suppression Circuit (FSC)*[5]

Secara umum, *Ferroresonance Suppression Circuit (FSC)* dapat dikategorikan ke dalam FSC pasif, FSC aktif dan electronic FSC. Gambar 2.10 menunjukkan FSC pasif, FSC aktif dan electronic FSC.

FSC pasif terdiri dari resistor R_r yang terhubung parallel dengan reaktor saturabel (R_n dan L_n). Untuk mengurangi kondisi feroresonansi yang berkelanjutan, reaktor saturabel L_n dirancang untuk bersaturasi pada sekitar 150% dari tegangan normal. Tegangan lebih selama feroresonansi akan jenuh pada reaktor L_n. Resistansi seri R_n efektif menambah beban tambahan dan mengurangi osilasi feroresonansi. FSC aktif dikenal dengan filter frekuensi daya. Terdiri dari induktor L_{a1} dan L_{a2} yang terkopling M_a, kapasitor C_a dan resistor redaman R_a. Filter diatur untuk sistem daya frekuensi dasar dengan faktor Q yang tinggi. FSC aktif bertindak seperti *band-pass filter.* Rangkaian filter akan memiliki impedansi tinggi pada frekuensi fundamental. Ketika frekuensi menyimpang dari frekuensi dasar sistem tenaga, impedansi dari FSC aktif secara bertahap mendekati hambatan dari resistor redaman. Sehingga pada akhirnya osilasi feroresonansi teredam oleh resistor R_a di FSC aktif. Pendekatan ketiga adalah dengan menggunakan FSC elektronik di mana rangkaian *switching* aktif mengontrol koneksi dari resistor di seluruh CVT sekunder. Konfigurasi terdiri dari resistor redaman R_d, dua *back-to-back thyristor*. Selama *ferroresonance* atau kondisi *transient* saklar dihidupkan untuk interval waktu yang tetap. Jika feroresonansi masih ada maka saklar akan tetap diaktifkan hingga durasi feroresonansi teredam. Teknik ini tidak mengandung induktor atau kapasitor besar, yang memungkinkan pengurangan ukuran.



Gambar 2.10 Rangkaian FSC

BAB III

PEMODELAN CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER (CVT) DAN *FERRORESONANCE SUPPRESSION CIRCUIT* (FSC)

3.1 *Capacitive Voltage Transformer*[5]

Capacitive Voltage Transformer (CVT) merupakan peralatan yang digunakan secara luas untuk mengubah tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi menjadi tegangan rendah. Sinyal tegangan output dari CVT digunakan sebagai masukan untuk relai proteksi. Selain itu, juga digunakan dalam *monitoring* sistem tenaga dan aplikasi kontrol untuk mengurangi dampak dari peristiwa sistem tenaga yang tidak diinginkan serta menjaga stabilitas sistem tenaga. Kinerja relai proteksi tergantung pada sinyal yang dihasilkan oleh CVT. Sinyal output yang dihasilkan oleh CVT harus menjadi replika yang tepat dari tegangan dan arus sistem tenaga pada semua kondisi operasi. Namun sinyal output CVT mungkin tidak persis melacak kondisi sistem tenaga karena komponen nonlinear di CVT. Sinyal yang dihasilkan oleh CVT tergantung pada kinerja transien CVT dan berbagai jenis transien sistem tenaga.

Kinerja CVT juga dipengaruhi oleh fenomena resonansi non-linear yang dikenal sebagai *ferroresonance*. *Ferroresonance* terjadi karena interaksi antara kapasitor dan induktor non-linear dalam sistem. Selama periode *transient* sistem tenaga, perubahan tegangan sekunder atau primer CVT secara mendadak dapat menjenuhkan inti *step down transformer* dari CVT. Osilasi feroresonansi dapat mulai terjadi jika kapasitansi sistem beresonansi dengan induktor non-linear. Ketika induktor non-linear bersaturasi, perubahan induktansi terjadi secara acak. Ketika perubahan induktansi sama dengan sistem kapasitansi, kapasitansi dan induktansi membatalkan satu sama lain, yang akan menyebabkan tegangan lebih tinggi karena impedansi sistem yang rendah. Karena perubahan induktansi ke nilai lain, arus juga berubah yang menyebabkan perubahan tegangan. Fenomena ini dikenal sebagai *ferroresonance* yang ditandai oleh perilaku tak menentu pada besarnya tegangan dan arus serta frekuensi acak sistem. Ini akan ditunjukkan

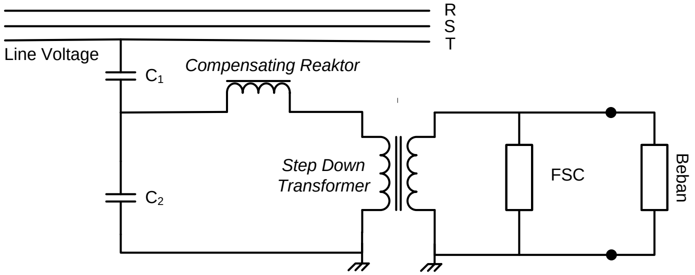
dalam penelitian ini bahwa *ferroresonance* dapat terjadi di CVT karena *switching* dari *circuit breaker*. Selama *switching*, kapasitor di rangkaian pemutus berinteraksi dengan induktor nonlinear dalam instrumen transformator yang mengarah pada terjadinya *ferroresonance*.

3.2 Komponen Utama CVT

Pada umumnya, CVT terdiri atas komponen-komponen utama seperti :

- Kapasitor pembagi tegangan (C_1 dan C_2)
- Compensating Reactor (L)
- *Step down transformer*
- *Ferroresonance suppression circuit* (FSC)

Kapasitor pembagi tegangan memiliki fungsi sebagai pembagi tegangan untuk menurunkan tegangan saluran ke level tegangan intermediet, umumnya 5, 10, 15 dan 20 kV. *Compensating reactor* membatalkan reaktansi dari kapasitor kopling pada frekuensi sistem. Proses ini mencegah pergeseran fasa antara tegangan primer dan tegangan sekunder pada frekuensi sistem. Selain itu agar burden tidak berpengaruh besar terhadap eror tegangan sekundernya, CVT perlu dilengkapi dengan kompensator berupa induktor. Kemudian, tegangan diturunkan lagi dari level intermediet ke level tegangan nominal relai tegangan, umumnya menjadi ratusan Volt.

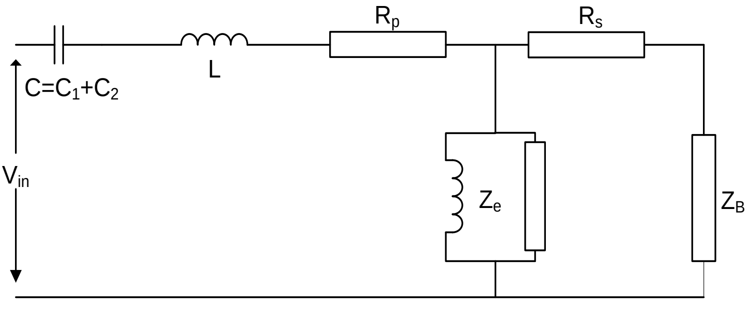


Gambar 3.1 Komponen Utama CVT

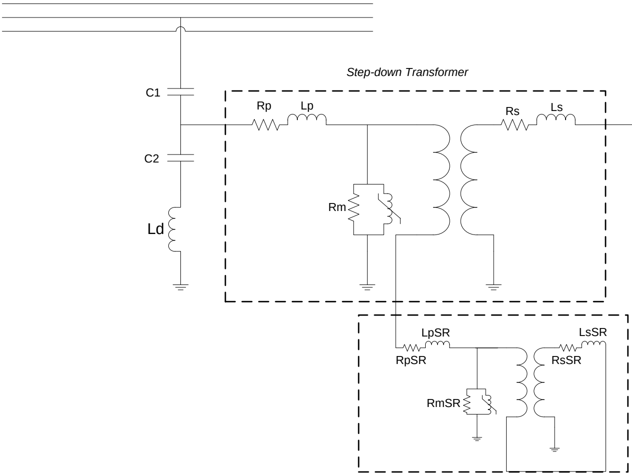
Compensating reactor dan transformator *step-down* memiliki inti besi. Disamping mengakibatkan terjadinya rugi-rugi inti besi, *compensating reactor* dan transformator *step-down* dapat menghasilkan *ferroresonance* akibat dari sifat non-linier pada inti besi yang membentuk rangkaian tertutup dengan kapasitor pembagi tegangan. Biasanya CVT dilengkapi dengan *ferroresonance suppression circuit* (FSC). Rangkaian ini digunakan pada sisi sekunder pada transformator *step-down*. Rangkaian ini diperlukan untuk menghindari bahaya dan kerusakan peralatan akibat *overvoltage* karena osilasi *ferroresonance*.

Rangkaian ekivalen CVT dapat terlihat pada Gambar 3.2. Rangkaian ekivalen diatas terdiri dari C_1 dan C_2 sebagai pembagi tegangan kapasitif, L merupakan reaktansi induktor kompensasi, R_p, R_s, Z_e merupakan parameter trafo penengah dan Z_B adalah impedansi beban.

Gambar 3.3 menunjukkan diagram skematik dan parameter dari (CVT). Sebuah *Capacitive Voltage Transformer* (CVT) yang terdiri dari kapasitif pembagi tegangan, transformator *step down*, reaktor kompensasi. Parameter yang dipakai dalam studi ini ditunjukkan dalam tabel 3.1.



Gambar 3.2 Rangkaian ekivalen CVT



reaktor
kompensasi

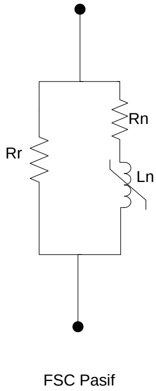
Gambar 3.3 Diagram skematik CVT[5]

Tabel 3.1 Paramater CVT[5]

Deskripsi	Parameter
Tegangan sistem	150 kV
Frekuensi	50 Hz
Pembagi tegangan kapasitif	C_1 = 12.6 pF C_2 = 78 pF *Drain coil* (*LD)* = 10 mH
Step down transformer (SDT)	R_p = 220 Ω L_p = 1.745 H R_m = 6500000 Ω R_s = 0.04 Ω L_s = 0.007 mH *Trans ratio* = 78.74
Reaktor kompensasi (SR)	R_pSR = 220 Ω L_pSR = 1.745 H R_sSR = 6500000 Ω L_sSR = 8841 H R_mSR = 0.04 Ω *Trans ratio* = 28

3.3 *Ferroresonance Suppression Circuit* (FSC)[5]

Dalam studi ini digunakan *passive ferroresonance suppression circuit* untuk meredam efek dari fenomena feroresonansi. *Passive ferroresonance suppression circuit* terdiri dari resistor R_r yang terhubung paralel dengan reaktor saturabel (R_n dan L_n yang terhubung seri). Untuk mengurangi efek feroresonansi L_n didesain bersaturasi pada 150% dari tegangan normal. Pada gambar 3.4 menjukkan rangkaian FSC pasif.



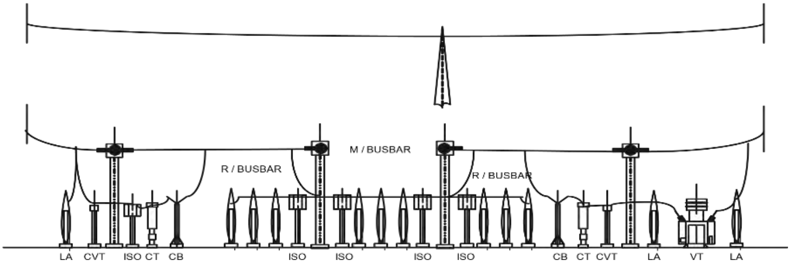
Gambar 3.4 Rangkaian FSC pasif

Halaman ini sengaja dikosongkan

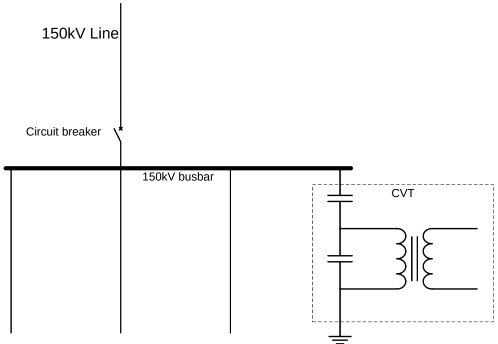
BAB IV
ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI DAN FSC PADA *CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER*

4.1 Simulasi Feroresonansi dengan *Ferroresonance Suppression Circuit*

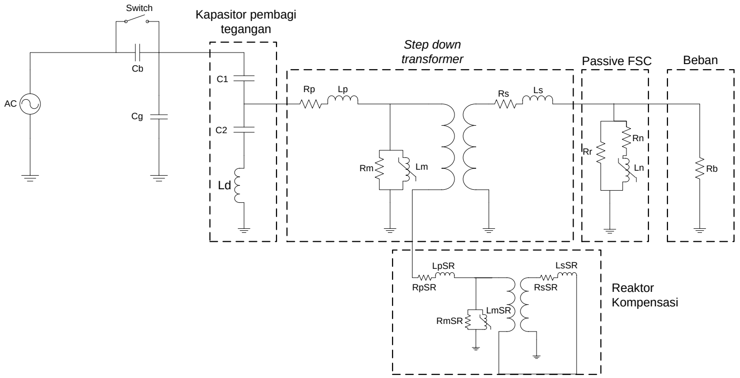
Penelitian ini difokuskan pada CVT yang terletak pada gardu induk 150 kV. Gambar 4.1 menunjukan *layout* tipikal gardu induk 150 kV. CVT terletak sebelum transformator daya. Sehingga pada penelitian ini disimulasikan dengan menggunakan sebuah sumber tegangan melewati rangkaian *switching* dari sebuah *circuit breaker* dan berakhir pada CVT seperti pada gambar 4.2. Pada Gambar 4.3 menunjukkan pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi dan *ferroresonance suppression circuit*.



Gambar 4.1 *Layout* tipikal gardu induk 150 kV



Gambar 4.2 *Single Line Diagram*



Gambar 4.3 Rangkaian simulasi

Sumber yang digunakan merupakan sumber arus bolak-balik (AC) dengan tegangan rms *line-line* ($V_{L\text{-}Lrms}$) 150 kV, 50 Hz. Karena objek yang diteliti merupakan satu fasa, maka besar tegangan sumber menggunakan tegangan *line-netral* ($V_{L\text{-}Netral}$).

$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \tag{4.1}$$

$$V_{L-Nrms} = \frac{150\ 000\ V}{\sqrt{3}} = 86.605\ V$$

Tegangan puncak *line-netral* ($\text{Vpeak}_{\text{L-Netral}}$) dapat dihitung dengan :

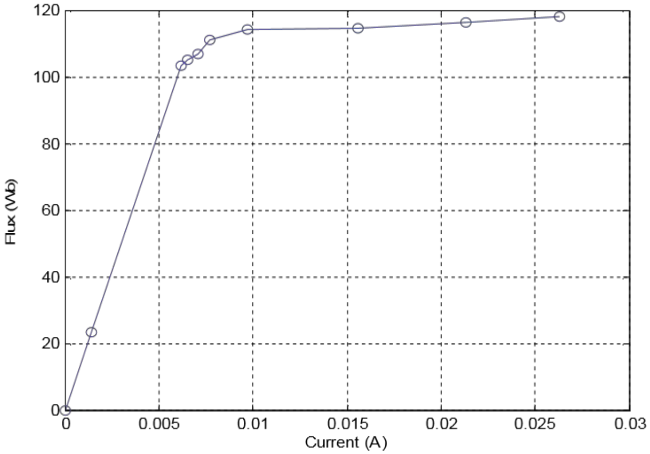
$$V_{L-Npeak} = V_{L-Nrms}\, x\, \sqrt{2} \tag{4.2}$$

$$V_{L-Npeak} = 86605\, x\, \sqrt{2} = 122.459\ V$$

Pada simulasi ini digunakan *Circuit Breaker* yang memiliki pengaturan waktu eksternal, yang diatur dengan *Timer*. Breaker ini terdiri dari sebuah *switch* yang disusun paralel dengan *grading capasitor* C_g sebesar 8 pF. Sedangkan kapasitor C_b merepresentasikan kapasitansi saluran dengan tanah.

Pada CVT, digunakan nilai kapasitor pembagi yang diambil dari referensi yang ada. Nilai kapasitor C_1 adalah 12,6 pF dan C_2 adalah 78 pF. Selain itu, terdapat *load coil* sebesar 10 mH yang terletak seri dengan

kapasitor sesuai dengan referensi yang ada. Transformator yang digunakan adalah transformator *step down* satu fasa yang memiliki nilai saturasi seperti pada Gambar 4.4 dengan perbandingan tegangan 20/√3 kV pada sisi primer, dan 100/√3 Volt pada sisi sekunder.



Gambar 4.4 Kurva magnetisasi pada trafo CVT[5]

Pada sisi primer transformator *step down* memiliki nilai resistansi R_1 = 220 Ω dan induktansi L_1 = 1,745 H. Pada sisi sekunder memiliki nilai resistansi R_2 = 0,04 Ω , induktansi L_2 = 0,007 mH dan nilai resistansi burden = 75Ω. Pada sisi magnetisasi memiliki resistansi R_m = 6500000 Ω [2]. Untuk reaktor kompensasi dimodelkan dengan parameter R_{pSR} = 220 Ω, L_{pSR} = 1.745H, RsSR = 6500000 Ω, L_{sSR} = 8841H, R_{mSR} = 0.04 Ω, *Trans ratio* = 28.

4.2 Analisa Hasil Simulasi

4.2.1 Keadaan Normal

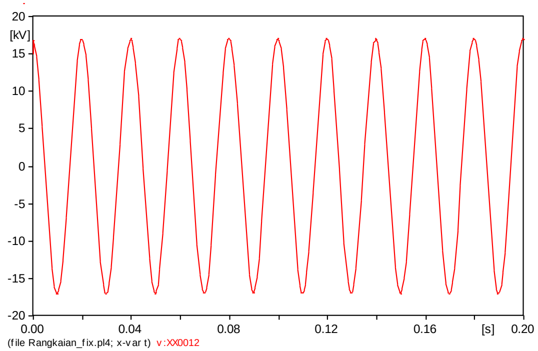
Pada keadaan normal,hasil pengukuran tegangan input pada CVT merupakan tegangan pembagi kapasitor yaitu memiliki tegangan puncak (Vpeak) 17 kV. Sedangkan hasil perhitungan dapat dicari dengan menggunakan persamaan (3.1) :

$$\frac{V_u}{V_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (4.3)$$

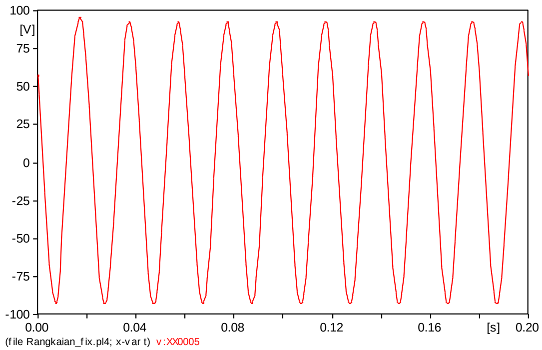
$$V_{inCVT(peak)} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \; x \; V_{system\,(peak)} \quad (4.4)$$

$$V_{inCVT(peak)} = \frac{12{,}6}{12{,}6 + 78} \; x \; 122459\,V = 17{,}021\,kV$$

Hasil hitungan dan pengukuran memiliki nilai sama. Pada Gambar 4.5 menunjukan tegangan primer CVT pada kondisi normal. Pada sisi sekunder CVT kondisi normal memiliki tegangan puncak sebesar 92,64 V. Gambar 4.6 menunjukan bentuk gelombang tegangan sekunder CVT.



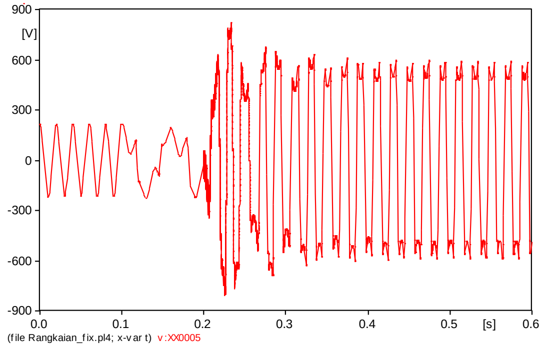
Gambar 4.5 Tegangan primer CVT normal



Gambar 4.6 Tegangan sekunder CVT normal

4.2.2 Parameter *Ferroresonance Suppression Circuit*

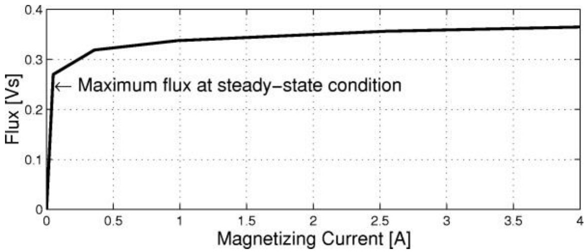
Sebelum menentukan parameter dari *ferroresonance suppression circuit* harus disimulasikan terlebih dahulu fenomena feroresonansi. Untuk membangkitkan fenomena feroresonansi dipilih dengan memberikan transien berupa *switching* (ON-OFF-ON) dengan durasi 0,1 detik. Fenomena *switching* disini dilakukan agar menimbulkan gejala feroresonansi. Dalam sistem tenaga fenomena *switching* ini berdurasi singkat, oleh karena itu disimulasikan dengan durasi 0,1 s. Dengan durasi ini fenomena feroresonansi sudah muncul. Dan beban R_b tetap 75 Ohm. Gambar 4.7 merupakan gelombang tegangan sekunder CVT.



Gambar 4.7 Tegangan sekunder CVT tanpa *ferroresonance suppression circuit*

Gejala feroresonansi ditandai dengan adanya tegangan lebih dan arus lebih. Dari respon tegangan diatas menunjukan terjadi gejala feroresonansi. Gejala feroresonansi merupakan hasil interaksi antara nilai kapasitor dan inti besi[9]. Tegangan puncak mencapai 821,23 Volt.

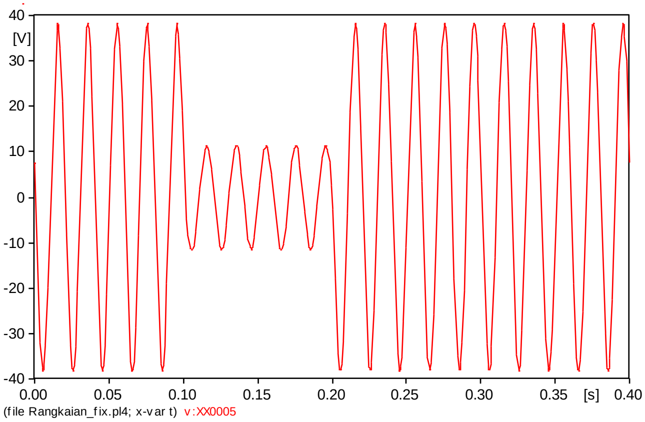
Dalam studi ini digunakan *passive ferroresonance suppression circuit* untuk meredam efek dari fenomena feroresonansi. *Passive ferroresonance suppression circuit* terdiri dari Resistor R_r yang terhubung parallel dengan reaktor saturabel (R_n dan L_n yang terhubung seri). Untuk mengurangi efek feroresonansi, L_n didesain bersaturasi pada 150% dari tegangan normal. Pada gambar 4.8 menunjukkan kurva magnetisasi pada induktor L_n.



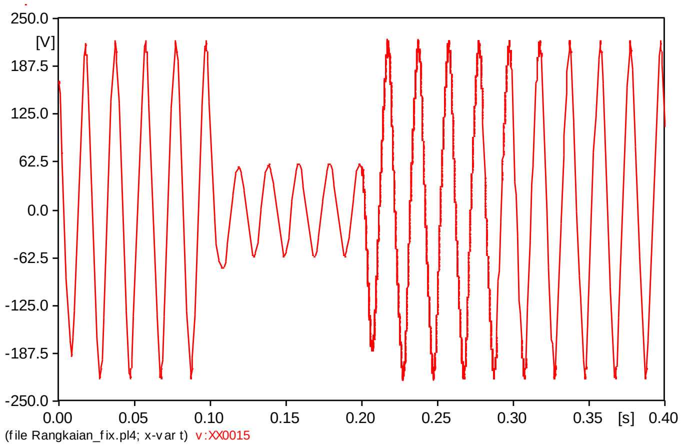
Gambar 4.8 Kurva magnetisasi pada induktor L_n[8]

4.2.2.1 Pengaruh Nilai R_r pada FSC Pasif

Pada studi ini akan disimulasikan feroresonansi dengan memvariasikan nilai dari R_r pada FSC pasif. Nilai dari R_r disimulasikan dari 1 Ohm hingga 12 Ohm sedangkan nilai dari R_n adalah 5 Ohm. Pada Gambar 4.9 menunjukan respon tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_r dari FSC pasif diberi nilai 1 Ohm dan Gambar 4.10 menunjukan respon tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_r dari FSC pasif diberi nilai 12 Ohm.



Gambar 4.9 Tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_r 1 Ohm



Gambar 4.10 Tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_r 12 Ohm

Saat nilai R_r 1 Ohm efek feroresonansi dapat dimitigasi dengan baik, akan tetapi nilai tegangan puncak sekunder CVT berkurang hingga nilai 38,11 volt. Saat nilai R_r 12 Ohm efek feroresonansi juga dapat diatasi dengan nilai tegangan puncak sekunder trafo 208,68 volt akan tetapi ada *ripple* pada beberapa *cycle* dan bentuk gelombang sedikit berubah. Pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 menunjukan respon tegangan pada primer dan sekunder saat diberi nilai R_r yang berbeda.

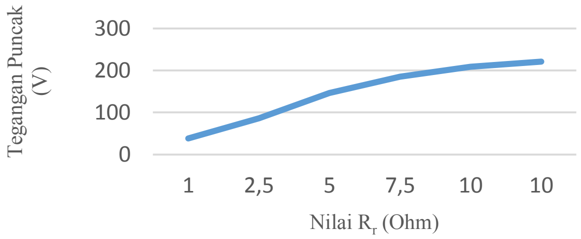
Tabel 4.1 Pengaruh nilai R_r terhadap tegangan puncak primer

R_r (Ohm)	Tegangan puncak primer (V)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
1	65.267	3.255	2005
2,5	65.267	7.356	887
5	65.267	12.156	536
7,5	65.267	15.149	430
10	65.267	17.037	383
12	65.267	18.047	361

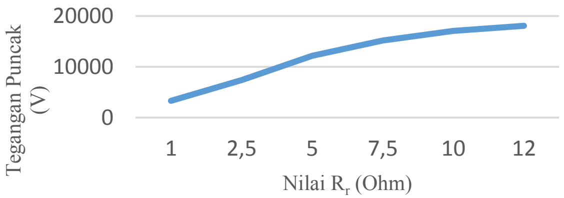
Tabel 4.2 Pengaruh nilai R_r terhadap tegangan puncak sekunder

R_r (Ohm)	Tegangan puncak sekunder (V)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
1	827	38	2176
2.5	827	86,6	961
5	827	146,24	566
7.5	827	185,12	447
10	827	209,4	395
12	827	221,8	374

Dari kedua tabel diatas menunjukkan tegangan puncak paling tinggi adalah saat nilai R_r 12 Ohm. Tegangan puncak sisi primer mencapai 18,047 kV dan tegangan puncak pada sekunder mencapai 221,8 V. Pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 menunjukan grafik perbandingan nilai R_r pada primer dan sekunder.



Gambar 4.11 Grafik pengaruh nilai R_r pada tegangan primer

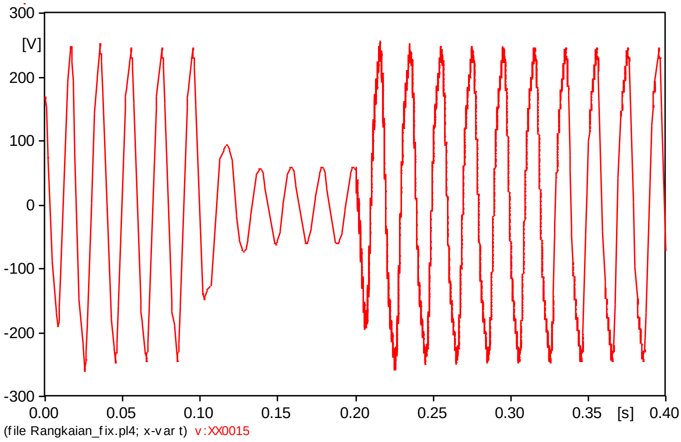


Gambar 4.12 Grafik pengaruh nilai R_r pada tegangan sekunder

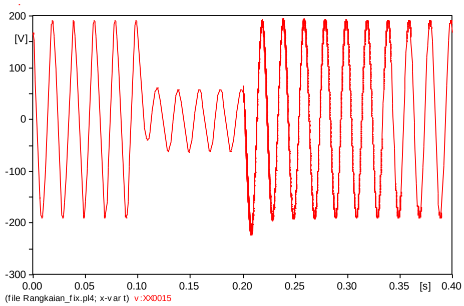
Dari kedua grafik menunjukan adanya kelinieran antara nilai R_r terhadap tegangan puncak. Semakin besar nilai R_r, maka semakin tinggi tegangan puncaknya. Semakin besar nilai R_r, maka semakin besar pula *ripple* yang terjadi. Untuk semua nilai dapat meredam fenomena feroresonansi.

4.2.2.2 Pengaruh Nilai R_n pada FSC Pasif

Pada studi ini akan disimulasikan feroresonansi dengan memvariasikan nilai dari R_n pada FSC pasif. Nilai dari R_n disimulasikan dari 1 Ohm hingga 1000 Ohm sedangkan nilai dari R_r adalah 12 Ohm. Pada Gambar 4.13 menunjukan respon tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_n dari FSC pasif diberi nilai 1 Ohm dan Gambar 4.14 menunjukan respon tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_n dari FSC pasif diberi nilai 1000 Ohm.



Gambar 4.13 Tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_n 1 Ohm



Gambar 4.14 Tegangan pada sisi sekunder saat nilai R_n 1000 Ohm

Saat nilai R_n 1 Ohm tegangan puncak sekunder CVT adalah 255 Volt dan saat nilai R_n 1000 Ohm nilai tegangan puncak sekunder CVT adalah 195 Volt. Pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 menunjukan respon tegangan pada primer dan sekunder saat diberi nilai R_n yang berbeda.

Tabel 4.3 Pengaruh nilai R_n terhadap tegangan puncak primer

R_n (Ohm)	Tegangan puncak primer (V)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
1	65.267	21.590	302
10	65.267	17.729	368
50	65.267	16.657	391
250	65.267	16.119	404
1000	65.267	16.058	406

Tabel 4.4 Pengaruh nilai R_n terhadap tegangan puncak sekunder

R_n (Ohm)	Tegangan puncak sekunder (V)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
1	827	255	324
10	827	214	384
50	827	199	415
250	827	195	424
1000	827	195	424

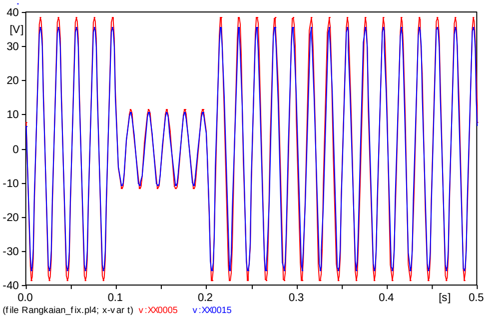
Dari kedua gambar gelombang dan tabel dapat disimpulkan bahwa feroresonansi dapat diredam dengan baik. Semakin besar R_n maka semakin kecil nilai tegangan puncaknya dan semakin baik juga bentuk gelombangnya.

4.2.3 Analisa Tegangan

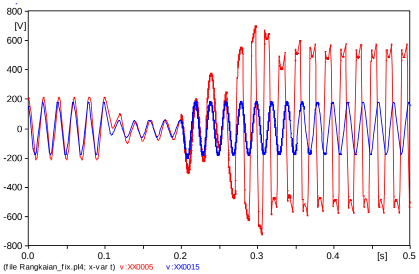
Pada analisa ini ditetapkan nilai dari parameter dari FSC pasif adalah R_r = 12 Ohm, R_n = 1000 Ohm dan karakteristi L_n seperti pada gambar 4.8. Parameter tersebut dipilih dari pertimbangan tegangan puncak dan *ripple* tegangan yang terjadi pada analisa sebelumnya.

4.2.3.1 Studi Beban CVT

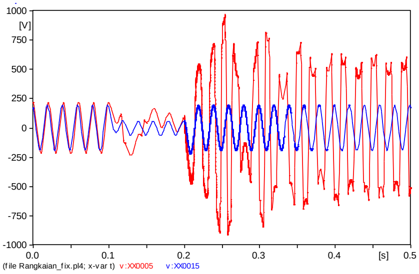
Beban CVT merupakan beban static diantaranya alat ukur, lampu indikator dan relay proteksi. Masing-masing peralatan tersebut memiliki karakteristik beban berbeda. Pada simulasi pertama akan dilakukan dengan memvariasikan nilai dari R_b mulai dari 1 Ohm sampai 1000 Ohm. Selanjutnya akan dilakukan uji performansi dari FSC pasif dalam meredam feroresonansi untuk setiap nilai beban yang berbeda dengan transien yang sama berupa *switching* berdurasi 0.1 detik. Nilai C_b dan C_g dibuat tetap yaitu 8 pF dan 6 pF. Pada gambar 4.15 sampai gambar 4.22 menunjukkan respon tegangan sekunder sebelum dan setelah dipasang FSC pasif dengan nilai R_b 1 Ohm hingga 1000 Ohm.



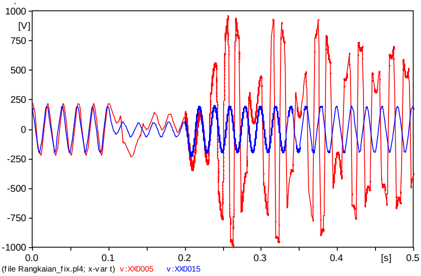
Gambar 4.15 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 1 Ohm.



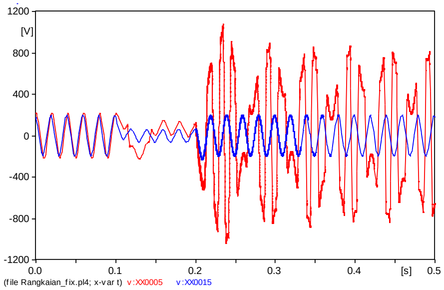
Gambar 4.16 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 30 Ohm.



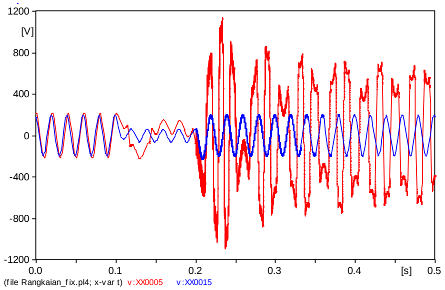
Gambar 4.17 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 90 Ohm.



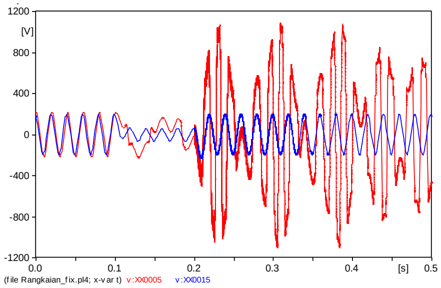
Gambar 4.18 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 150 Ohm.



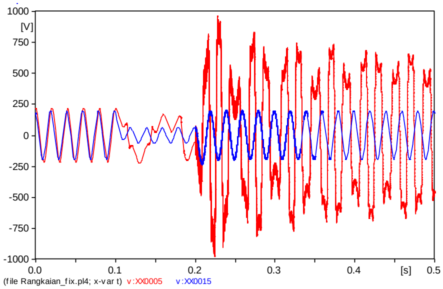
Gambar 4.19 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 325 Ohm.



Gambar 4.20 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 500 Ohm.



Gambar 4.21 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 787 Ohm.



Gambar 4.22 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 1000 Ohm.

Dari gambar 4.13-4.20 dapat dilihat bahwa untuk setiap nilai R_b yang berbeda dapat menimbulkan fenomena feroresonansi yang berbeda bentuk gelombang dan tegangan puncak primer serta sekunder CVTnya. Pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 menunjukan respon tegangan pada primer dan sekunder saat diberi nilai R_b yang berbeda.

Tabel 4.5 Pengaruh nilai R_b terhadap tegangan puncak primer

R_b (Ohm)	Tegangan puncak primer (V)		Prosentase (%)
	Sebelum dipasang FSC	Sesudah dipasang FSC	
1	3293	3058	61
30	56516	15524	27
90	76236	16235	20
150	78755	16311	21
325	84619	16389	20
500	89503	16429	19
787	89677	16452	19
1000	75542	17460	23

Tabel 4.6 Pengaruh nilai R_b terhadap tegangan puncak sekunder

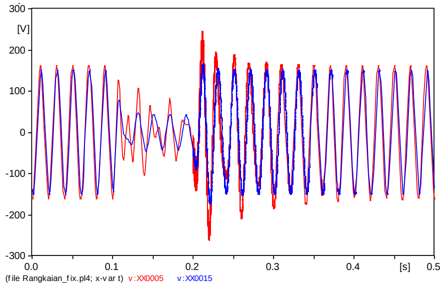
R_b (Ohm)	Tegangan puncak sekunder (V)		Prosentase (%)
	Sebelum dipasang FSC	Sesudah dipasang FSC	
1	38,5	35,7	91
30	700	184	25
90	967	193	20
150	960	198	20
325	1074	200	18
500	1136	200	18
787	1072	200	19
1000	960	201	21

Dari tabel diatas dapat disimpulkan bahwa sebelum dipasang FSC pasif semakin besar R_b maka semakin besar pula tegangan puncak. Tetapi untuk nilai R_b 787 Ohm dan 1000 Ohm tegangan puncak sebelum dipasang FSC pasif menurun. Untuk nilai R_b 1 Ohm tidak terjadi feroresonansi karena tidak terjadi tegangan lebih dan perubahan frekuensi. Setelah dipasang FSC pasif, tegangan lebih akibat fenomena feroresonansi dapat diatasi. Nilai tegangan puncak relatif sedikit naik untuk kenaikan nilai dari R_b.

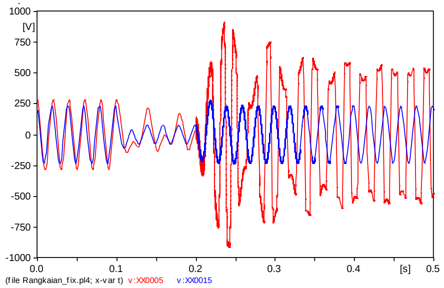
4.2.3.2 Studi Beban R dan L

Seperti yang sudah dijelaskan diatas beban CVT merupakan beban statik diantaranya alat ukur, lampu indikator dan relai proteksi. Masing-masing peralatan tersebut memiliki karakteristik beban berbeda. Alat ukur sendiri memiliki induktansi yang kecil, oleh karena itu pada simulasi ini akan dilakukan dengan memvariasikan nilai dari induktansi beban mulai dari 7,5 mH sampai 150 mH. Nilai R_b dibuat tetap 1000 Ohm. Selanjutnya akan dilakukan uji performansi dari FSC pasif dalam meredam feroresonansi untuk setiap nilai beban yang

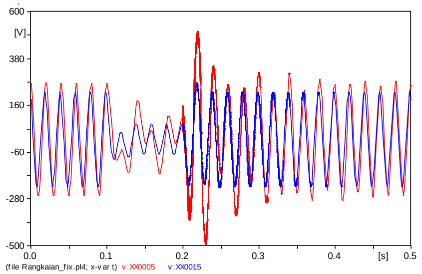
berbeda dengan transien yang sama berupa *switching* berdurasi 0.1 detik. Nilai C_b dan C_g dibuat tetap yaitu 8 pF dan 6 pF. Pada gambar 4.23 sampai gambar 4.27 menunjukkan respon tegangan sekunder sebelum dan setelah dipasang FSC pasif dengan nilai R_b 1000 Ohm dan nilai *L* dari 7,5 mH hingga 150 mH.



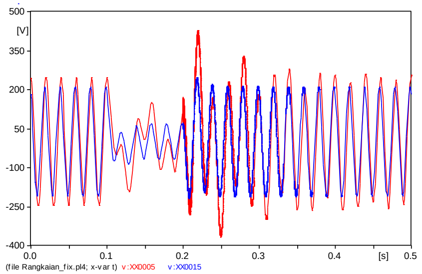
Gambar 4.23 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai *L* 7,5 mH.



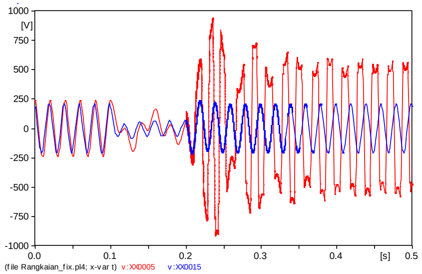
Gambar 4.24 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai *L* 75 mH.



Gambar 4.25 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai *L* 100 mH.



Gambar 4.26 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai *L* 150 mH.



Gambar 4.27 Tegangan sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai *L* 175 mH.

Pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 menunjukan respon tegangan pada primer dan sekunder saat diberi nilai *L* yang berbeda.

Tabel 4.7 Pengaruh nilai *L* terhadap tegangan puncak primer

L (mH)	Tegangan puncak primer (V)		Prosentase (%)
	Sebelum dipasang FSC	Sesudah dipasang FSC	
7,5	20.146	14.701	72
75	72.295	23.120	31
100	40.333	21.790	54
150	33.716	20.522	60
175	74.201	20.041	27

Tabel 4.8 Pengaruh nilai *L* terhadap tegangan puncak sekunder

L (mH)	Tegangan puncak sekunder (V)		Prosentase (%)
	Sebelum dipasang FSC	Sesudah dipasang FSC	
7,5	244	167	68
75	911	278	30
100	509	264	51
150	426	247	57
175	938	240	25

Dari tabel dapat disimpulkan bahwa untuk perubahan nilai dai *L* beban maka akan menimbulkan perubahan nilai tegangan puncak yang berbeda-beda. Nilai tegangan puncak tertinggi saat *L* bernilai 175 mH dengan tegangan puncak mencapai 938 V untuk sekunder dan 74.201 V untuk primer. Dari semua percobaan yang dilakukan efek feroresonansi dapat dimitigasi dengan baik.

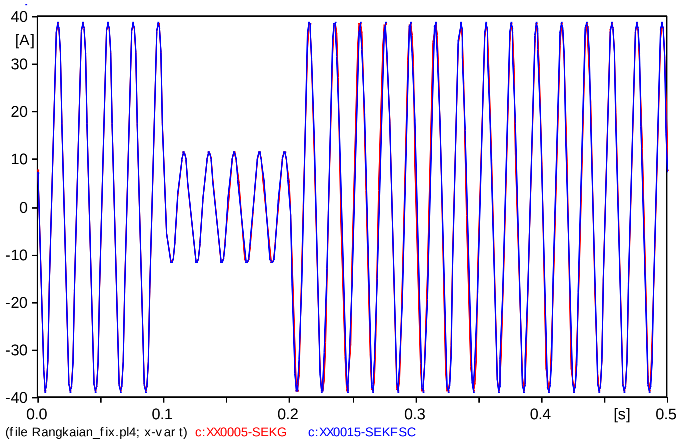
4.2.4 Analisa Arus

Pada analisa ini ditetapkan nilai dari parameter dari FSC pasif adalah R_r = 12 Ohm, R_n = 1000 Ohm dan karakteristi L_n seperti pada

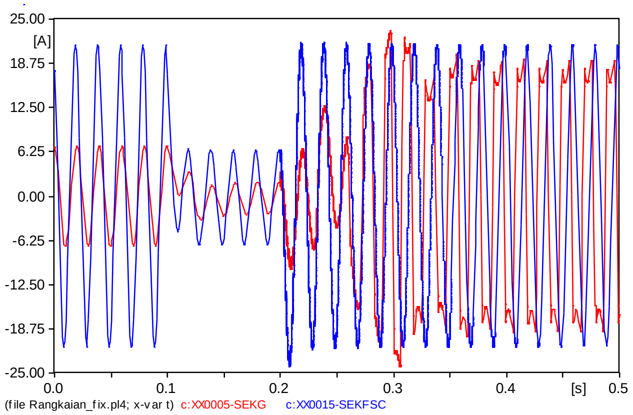
gambar 4.8. Parameter tersebut dipilih dari pertimbangan tegangan puncak dan *ripple* tegangan yang terjadi pada analisa sebelumnya.

4.2.4.1 Studi Beban CVT

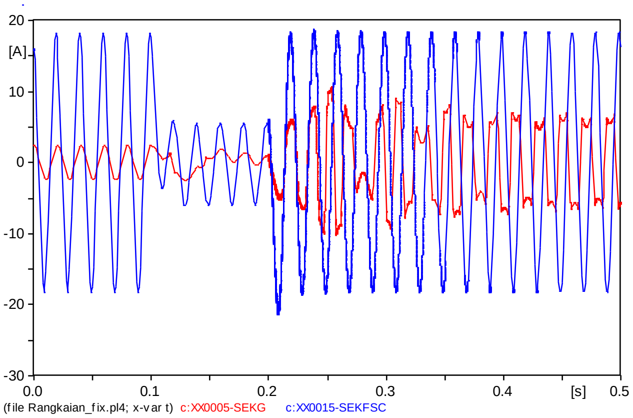
Beban CVT merupakan beban static diantaranya alat ukur, lampu indikator dan relay proteksi. Masing-masing peralatan tersebut memiliki karakteristik beban berbeda. Pada simulasi pertama akan dilakukan dengan memvariasikan nilai dari R_b mulai dari 1 Ohm sampai 1000 Ohm. Selanjutnya akan dilakukan uji performansi dari FSC pasif dalam meredam feroresonansi untuk setiap nilai beban yang berbeda dengan transien yang sama berupa *switching* berdurasi 0.1 detik. Nilai C_b dan C_g dibuat tetap yaitu 8 pF dan 6 pF. Pada gambar 4.28 sampai gambar 4.35 menunjukkan respon arus sekunder sebelum dan setelah dipasang FSC pasif dengan nilai R_b 1 Ohm hingga 1000 Ohm.



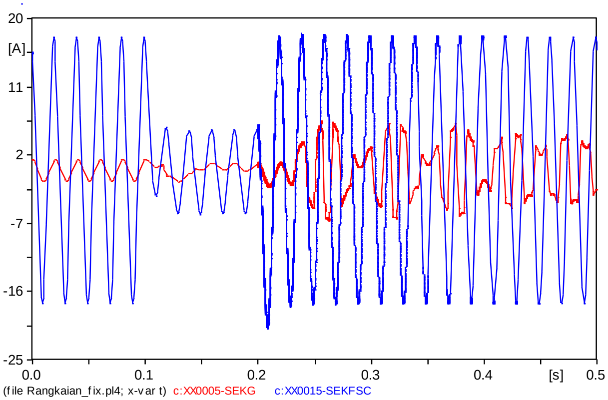
Gambar 4.28 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 1 Ohm.



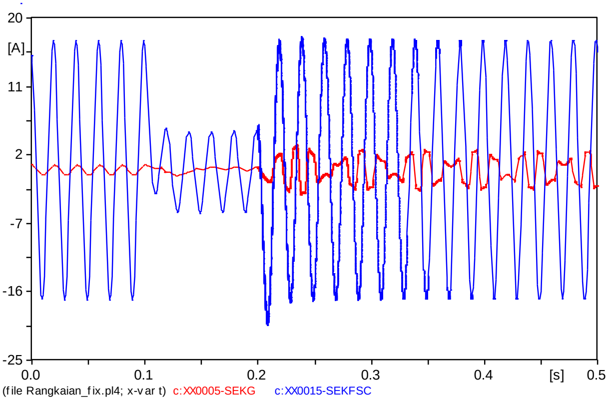
Gambar 4.29 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 30 Ohm.



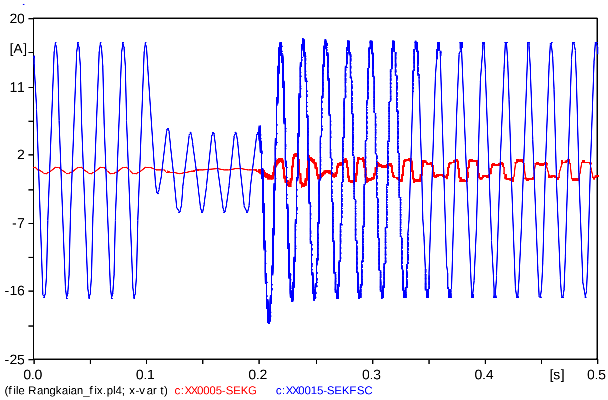
Gambar 4.30 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 90 Ohm.



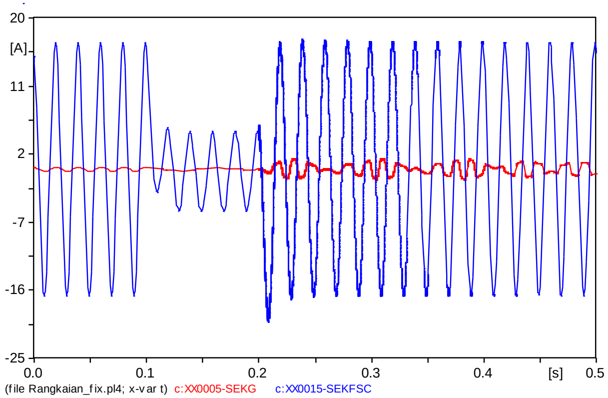
Gambar 4.31 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 150 Ohm.



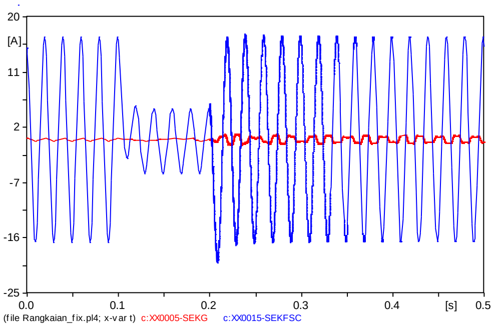
Gambar 4.32 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 325 Ohm.



Gambar 4.33 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 500 Ohm.



Gambar 4.34 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 787 Ohm.



Gambar 4.35 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai R_b 1000 Ohm.

Dari gambar dapat disimpulkan bahwa nilai arus puncak akibat feroresonansi semakin kecil dengan penambahan nilai dari R_b. Hal ini sesuai dengan teori yang ada bahwa arus berbanding terbalik dengan nilai hambatan. Walaupun semakin kecil, arus puncak akibat dari feroresonansi tetap melebihi batas nominal arus normal. Pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 menunjukan respon arus pada primer dan sekunder dari CVT saat diberi nilai R_b yang berbeda.

Tabel 4.9 Pengaruh nilai R_b terhadap arus puncak primer

R_b (Ohm)	Arus puncak primer (A)		Prosentase (%)
	Sebelum dipasang FSC	Sesudah dipasang FSC	
1	0,49	0,49	100
30	0,29	0,27	93
90	0,13	0,23	176
150	0,08	0,23	287
325	0,04	0,22	550
500	0,03	0,21	700
787	0,018	0,21	1166
1000	0,012	0,21	1750

Tabel 4.10 Pengaruh nilai R_b terhadap Arus puncak sekunder

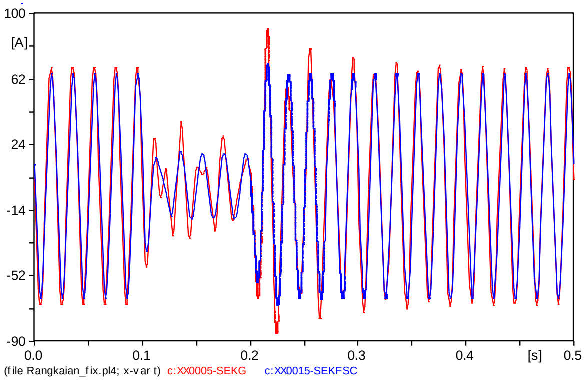
R_b (Ohm)	Arus puncak sekunder (A)		Prosentase (%)
	Sebelum dipasang FSC	Sesudah dipasang FSC	
1	38,6	38,7	100,2
30	23,3	21,7	93
90	10,7	18,7	174
150	6,4	18	281
325	3,3	17,4	527
500	2,2	17,2	781
787	1,35	17,1	1266
1000	0,96	17,1	1781

Dari gambar dan tabel diatas dapat disimpulkan bahwa FSC pasif dapat memitigasi efek feroresonansi dengan baik yang ditandai dengan arus yang relatif konstan. Untuk beban 1 Ohm tidak terjadi feroresonansi sehingga selisih arus tidak begitu besar.

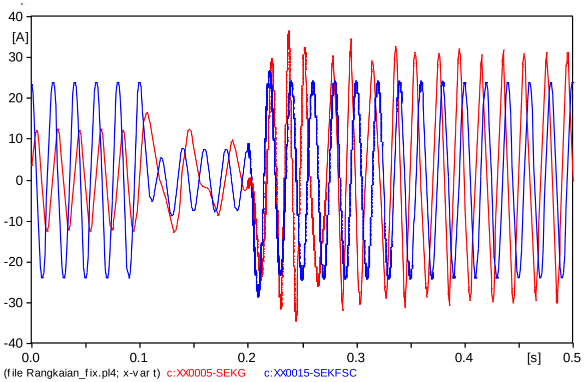
4.2.4.2 Studi Beban R dan L

Seperti yang sudah dijelaskan diatas beban CVT merupakan beban statik diantaranya alat ukur, lampu indikator dan relay proteksi. Masing-masing peralatan tersebut memiliki karakteristik beban berbeda. Alat ukur sendiri memiliki induktansi yang kecil, oleh karena itu pada simulasi ini akan dilakukan dengan memvariasikan nilai dari induktansi beban mulai dari 7,5 mH sampai 150 mH. Nilai R_b dibuat tetap 100 Ohm. Selanjutnya akan dilakukan uji performansi dari FSC pasif dalam meredam feroresonansi untuk setiap nilai beban yang berbeda dengan transien yang sama berupa *switching* berdurasi 0.1 detik. Nilai C_b dan C_g dibuat tetap yaitu 8 pF dan 6 pF. Pada gambar 4.36 sampai gambar 4.40

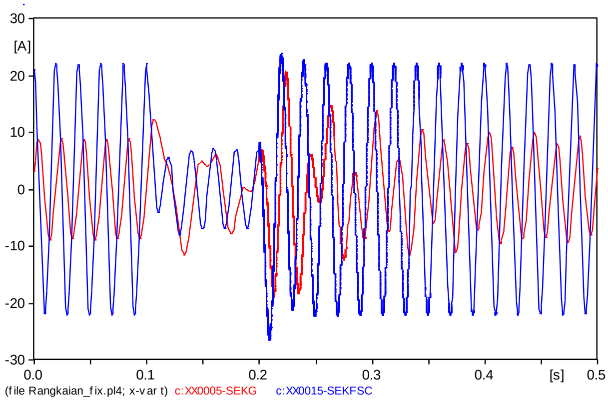
menunjukkan respon arus sekunder sebelum dan setelah dipasang FSC pasif dengan nilai R_b 75 Ohm dan nilai L dari 7,5 mH hingga 150 mH.



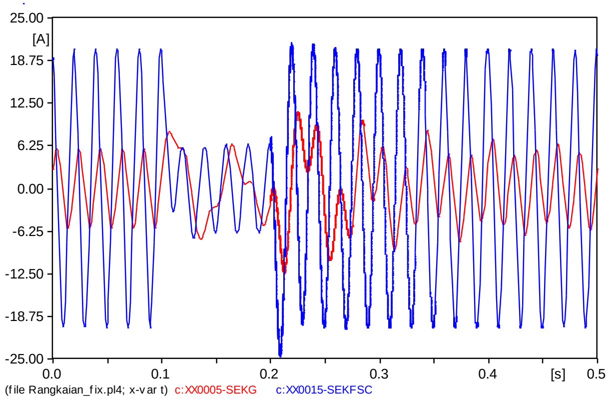
Gambar 4.36 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai *L* 7,5 mH.



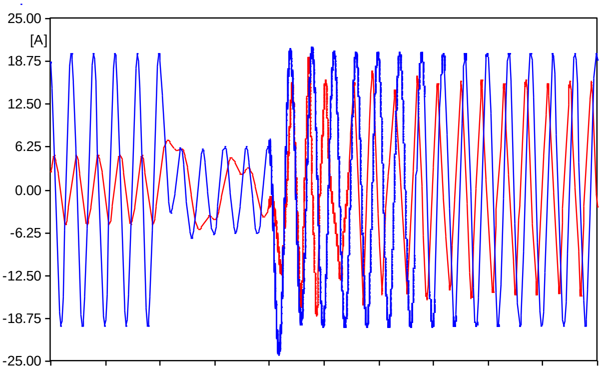
Gambar 4.37 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai *L* 75 mH.



Gambar 4.38 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai *L* 100 mH.



Gambar 4.39 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai *L* 150 mH.



Gambar 4.40 Arus sekunder sebelum dipasang FSC pasif (merah) dan setelah dipasang FSC pasif (biru) dengan nilai *L* 175 mH.

Dari gambar diatas dapat diambil kesimpulan bahwa untuk setiap *L* beban yang berbeda akan menimbulkan level arus yang berbeda akibat efek feroresonansi. Untuk semua nilai *L* yang diuji FSC pasif dapat memitigasi feroresonansi dengan baik. Pada tabel 4.11 dan tabel 4.12 menunjukkan respon arus pada primer dan sekunder dari CVT saat diberi nilai *L* yang berbeda.

Tabel 4.11 Pengaruh nilai *L* terhadap arus puncak primer

L (mH)	Arus puncak primer (A)		Prosentase (%)
	Sebelum dipasang FSC	Sesudah dipasang FSC	
7,5	1,15	0,9	78
75	0,46	0,34	123
100	0,26	0,3	220
150	0,14	0,27	325
175	0,24	0,26	188

Tabel 4.12 Pengaruh nilai *L* terhadap arus puncak sekunder

L (mH)	Arus puncak sekunder (A)		Prosentase (%)
	Sebelum dipasang FSC	Sesudah dipasang FSC	
7,5	91	71	78
75	36	26,8	123
100	20,7	23,7	217
150	11,2	21,2	326
175	19,4	20,8	188

Dari gambar dan tabel diatas dapat disimpulkan bahwa FSC pasif dapat memitigasi efek feroresonansi dengan baik yang ditandai dengan arus yang relatif konstan.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan studi yang dilakukan tentang *passive ferroresonance suppression circuit* pada CVT, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Fenomena feroresonansi akibat *switching* dapat menyebabkan tegangan lebih dan arus lebih pada *Capacitive Voltage Transformer* (CVT). Untuk memitigasinya dibutuhkan FSC pasif dengan parameter yang tepat. Semakin besar nilai R_r maka semakin besar pula tegangan puncak serta *ripple* yang terjadi. Dalam studi ini ditetapkan nilai R_r = 12 Ohm karena tegangan mendekati tegangan nominal CVT dan *drop* tegangan tidak terlalu besar. Untuk R_n dipilih nilai 1000 Ohm karena dengan nilai ini gelombang keluaran menjadi semakin baik.
2. Perubahan nilai *R burden* dapat menyebabkan perubahan nilai tegangan dan arus puncak pada primer dan sekunder CVT. Tegangan puncak saat terjadi feroresonansi mencapai 89,6 kV untuk primer dan 1136V untuk sekunder. Feroresonansi yang terjadi pada semua nilai R_b dapat dimitigasi dengan baik dengan FSC pasif.
3. Setiap *L* beban yang berbeda akan menimbulkan level tegangan dan arus yang berbeda akibat efek feroresonansi. Untuk semua nilai L yang diuji, FSC pasif dapat memitigasi feroresonansi dengan baik.

5.2 Saran

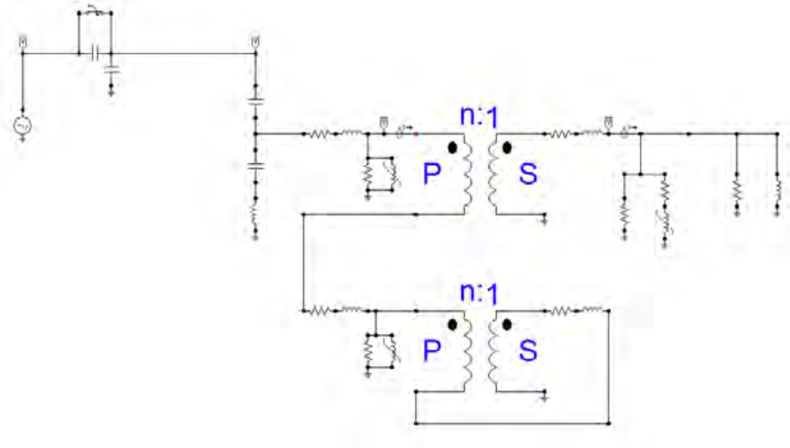
Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah

1. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut tentang parameter yang ada dilapangan karena setiap parameter yang ada belum tentu sama.
2. Diperlukan suatu usaha untuk mengurangi fenomena feroresonansi lebih baik lagi, karena *passive* FSC ini masih memiliki kekurangan sehingga kedepannya fenomena feroresonansi dapat dimitigasi lebih baik lagi untuk segala kondisi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Rangkaian simulasi pada ATP/EMTP



BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan studi yang dilakukan tentang *passive ferroresonance suppression circuit* pada CVT, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Fenomena feroresonansi akibat *switching* dapat menyebabkan tegangan lebih dan arus lebih pada *Capacitive Voltage Transformer* (CVT). Untuk memitigasinya dibutuhkan FSC pasif dengan parameter yang tepat. Semakin besar nilai R_r maka semakin besar pula tegangan puncak serta *ripple* yang terjadi. Dalam studi ini ditetapkan nilai $R_r = 12$ Ohm karena tegangan mendekati tegangan nominal CVT dan *drop* tegangan tidak terlalu besar. Untuk R_n dipilih nilai 1000 Ohm karena dengan nilai ini gelombang keluaran menjadi semakin baik.
2. Perubahan nilai *R burden* dapat menyebabkan perubahan nilai tegangan dan arus puncak pada primer dan sekunder CVT. Tegangan puncak saat terjadi feroresonansi mencapai 89,6 kV untuk primer dan 1136V untuk sekunder. Feroresonansi yang terjadi pada semua nilai R_b dapat dimitigasi dengan baik dengan FSC pasif.
3. Setiap *L* beban yang berbeda akan menimbulkan level tegangan dan arus yang berbeda akibat efek feroresonansi. Untuk semua nilai L yang diuji, FSC pasif dapat memitigasi feroresonansi dengan baik.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah

1. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut tentang parameter yang ada dilapangan karena setiap parameter yang ada belum tentu sama.
2. Diperlukan suatu usaha untuk mengurangi fenomena feroresonansi lebih baik lagi, karena *passive* FSC ini masih memiliki kekurangan sehingga kedepannya fenomena feroresonansi dapat dimitigasi lebih baik lagi untuk segala kondisi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

[1] Tobing, Bonggas L., *"Peralatan Tegangan Tinggi"*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.

[2] Wiratha, Putu W., *"Analisis fenomena ferroresonance pada Capacitive Voltage Transformer (CVT) akibat pelepasan beban secara mendadak"*, Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, ITS, Surabaya, 2011.

[3] Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo. PDM/PGI/03: PLN, Jakarta, 2014.

[4] Ferraci, P., *"Ferroresonance"*, Group Schneider: Cahier no 190, pp. 1-28, Maret, 1998.

[5] Khan, Shakil Ahamed, Bakar, A.H.A., Rahim, N.A., Tan, ChiaKwang, *"Analysis of Ferroresonance Suppression and Transient Response Performances for Various Ferroresonance Suppression Circuits in Capacitive Voltage Transformers"*. The 3rd International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT), 2014

[6] Wijayanto, Novandi, *"Studi Ferroresonance Akibat Sambaran Petir pada Capacitive Voltage Transformer (CVT) Saluran Transmisi 500 kV"*. Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, ITS, Surabaya, 2016.

[7] Bakar, A.H.A. *"Analysis of lighting-caused ferroresonance in Capasitor Voltage Transformer (CVT)"*. Elsivier.2011.Electrical Power and Energy System 33 pp 1536-1541.

[8] Graovac, M., Iravani, R., Wang, X., McTaggart, R.D., *"Fast Ferroresonance Suppression of Coupling Capacitor Voltage Transformers"*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, no. 1, January 2003.

[9] Jacobson, D.A.N., *"Examples of ferroresonance in a high voltage power system"*. IEEE, 1212 Vol. 2, 2003.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS

Penulis memiliki nama lengkap Nuruddin Afif. Sebagai anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Sunardi dan Ibu Sumiyem. Lahir di Sukoharjo pada tanggal 7 Februari 1994. Penulis mengawali pendidikan di SD N Pandean 02 pada tahun 2000-2006, kemudian melanjutkan pendidikan ke SMP MTA Gemolong hingga tahun 2009. Setelah lulus dari SMA MTA Surakarta tahun 2012, Penulis melanjutkan pendidikan Sarjana di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan program studi Sistem Tenaga.

Email: nurudinafif0@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan