

Analisis Pengaruh Kapasitansi Terhadap Feroresonansi Pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Diagram Bifurkasi

Jeremia Septa Pratama Sinuraya⁽¹⁾, I Made Yulistya Negara⁽²⁾, IGN Satriyadi Hernanda⁽³⁾
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
Email: jeremia.sinuraya94@gmail.com⁽¹⁾, yulistya@ee.its.ac.id⁽²⁾, didit@ee.its.ac.id⁽³⁾

Abstrak – Feroresonansi merupakan salah satu fenomena transien dalam sistem tenaga listrik yang dapat menyebabkan kegagalan pada isolasi peralatan sistem tenaga. Feroresonansi dapat terjadi pada sistem yang memiliki elemen yang bersifat kapasitif seperti kabel, kopling kapasitif, switching serta adanya induktansi non-linier seperti trafo. Akibat paduan tersebut, kejadian transien seperti switching atau petir dapat memicu munculnya feroresonansi berupa tegangan dan arus lebih dengan tingkat harmonik tertentu yang menerpa peralatan seperti Capacitive Voltage Transformer (CVT).

Untuk memahami gejala feroresonansi diperlukan pembahasan yang lebih mendalam khususnya tentang seberapa besar peluang feroresonansi dapat terjadi pada sistem akibat pengaruh komponen/elemen di dalamnya. Salah satu metode yang digunakan adalah diagram bifurkasi, yaitu diagram yang menggambarkan seberapa besar pengaruh elemen kapasitansi terhadap gejala feroresonansi yang dapat terjadi. Pada tugas akhir ini digunakan software komputasi MATLAB untuk mengolah data yang dihasilkan dari simulasi model rangkaian feroresonansi. Hasil simulasi menunjukkan feroresonansi yang dipicu oleh impuls petir terjadi pada range $C_{saluran}$ 0,001-0,07 μF . Feroresonansi akibat switching CB muncul pada range C_g 0,001-0,76 μF dan C_s 0,51-3 μF . Sedangkan feroresonansi akibat hubung singkat muncul pada range 0,001-3 μF .

Kata Kunci – Feroresonansi, Capacitive Voltage Transformer (CVT), Induktansi Non-linier, Kapasitansi, Diagram Bifurkasi

I. PENDAHULUAN

Transformator dalam sistem tenaga merupakan peralatan listrik yang menjadi inti dari penyaluran listrik kepada konsumen. Salah satu jenis transformator yang banyak penggunaannya dalam sistem tenaga adalah transformator tegangan (*voltage transformer*). Transformator tegangan merupakan transformator satu fasa step-down yang mengubah tegangan sistem ke level tegangan rendah, sehingga mampu digunakan untuk perlengkapan indikator, alat ukur, rele, dan alat sinkronisasi. Hal ini diperlukan atas pertimbangan harga dan bahaya yang ditimbulkan tegangan tinggi bagi operator. Transformator tegangan dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *inductive voltage transformer* dan *capacitive voltage transformer* (CVT). Pada CVT terdapat pembagi tegangan kapasitif yang diselipkan suatu trafo penengah (*intermediate transformer*) yang merupakan induktor non-linier. Rangkaian ini

membentuk suatu rangkaian tertutup yang berpeluang menimbulkan gejala feroresonansi [4].

Feroresonansi dapat didefinisikan sebagai suatu rangkaian resonansi yang melibatkan interaksi antara elemen induktansi non-linier suatu transformator dengan elemen kapasitif pada sistem. Salah satu bahaya yang diakibatkan oleh feroresonansi adalah munculnya tegangan lebih dan arus lebih pada sistem [5]. Tingkat tegangan lebih atau arus lebih yang terjadi dapat berbahaya bagi peralatan listrik. Contoh kerusakan yang dialami adalah pemanasan yang berlebihan pada transformator sehingga dapat menyebabkan transformator tersebut terbakar.

Diagram bifurkasi didefinisikan sebagai diagram yang merepresentasikan perubahan kestabilan ataupun perubahan yang signifikan dalam dinamika suatu sistem akibat perubahan nilai parameter dari sistem itu [6]. Tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah mengevaluasi range nilai kapasitansi yang aman apabila terjadi gangguan yang dapat menyebabkan feroresonansi serta karakterisasi feroresonansi yang terjadi berdasarkan plot diagram bifurkasi yang diperoleh.

II. FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

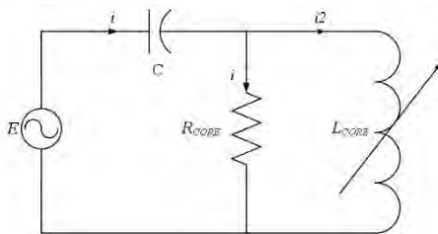
A. Feroresonansi

Feroresonansi atau resonansi non-linier merupakan fenomena kelistrikan kompleks yang dapat mengakibatkan tegangan lebih pada sistem tenaga sehingga membahayakan sistem transmisi, sistem proteksi, peralatan listrik maupun operator [9]. Apabila terdapat gangguan pada sistem dan tidak dapat dijelaskan secara spesifik jenis gangguannya, kemungkinan hal tersebut merupakan gejala dari feroresonansi.

Istilah feroresonansi mengacu pada fenomena osilasi yang muncul pada sebuah rangkaian listrik yang mengandung elemen induktansi nonlinier, kapasitor dan sumber tegangan sinusoidal, dan rugi-rugi yang rendah. Induktansi nonlinear diperoleh dari penggunaan trafo daya, trafo induktif pengukur tegangan, reaktor shunt pada sistem tenaga listrik. Sedangkan kapasitor diperoleh dari kapasitor bank, kabel, proses switching dan trafo tegangan kapasitif.

B. Penyebab dan Gejala Feroresonansi

Rangkaian resonansi seri sering digunakan sebagai pendekatan terhadap fenomena feroresonansi agar lebih mudah dipahami. Pada rangkaian feroresonansi, penggunaan induktor diganti menjadi induktor nonlinear sebagai pemodelan dari inti trafo. Sama halnya dengan resonansi pada rangkaian resonansi seri, fenomena yang terjadi pada rangkaian feroresonansi juga menimbulkan kenaikan arus yang sangat besar dikarenakan impedansi rangkaian yang kecil. Arus yang naik menyebabkan rapat fluks juga akan naik mencapai titik saturasi dan tidak lagi menjadi linear. Ketika nilai arus yang naik pada inti trafo yang bersifat feromagnetik melalui titik saturasinya maka induktansi akan berubah sangat cepat (menjadi nonlinear). Sehingga ketika terjadi interaksi antara kapasitor dan inti besi induktor akan menghasilkan tegangan dan arus yang tidak biasa. Gambar rangkaian feroresonansi dengan induktor menggunakan induktor nonlinear dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Rangkaian Pemodelan Feroresonansi

Timbulnya feroresonansi pada sebuah sistem tenaga listrik harus memenuhi tiga hal penting yakni induktansi nonlinear, elemen kapasitif dan sumber AC. Elemen yang digunakan untuk menimbulkan ketidaklinearan induktansi adalah bahan feromagnetik yang digunakan sebagai material inti trafo. Sehingga untuk fenomena feroresonansi trafo mendapatkan perhatian khusus. Hal tersebut dikarenakan induktansi nonlinear dihasilkan dari inti trafo yang dapat menyebabkan feroresonansi dapat terjadi.

Feroresonansi pada sebuah sistem tenaga ditandai dengan munculnya lebih dari satu respon steady state pada parameter jaringan yang sama [4]. Respon yang berubah secara tiba-tiba dari suatu respon *steady state* normal, menjadi respon *steady state* feroresonansi (ditandai dengan level harmonisa dan tegangan lebih yang tinggi) yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik. Gejala-gejala kelistrikan seperti pengisian daya trafo, *lightning overvoltage*, gejala transien dapat memungkinkan munculnya feroresonansi.

Beberapa gejala yang timbul yang menunjukkan kehadiran feroresonansi pada sistem tenaga listrik antara lain :

1. Penyimpangan yang besar untuk nilai tegangan lebih dan arus lebih (*High sustained overvoltage and overcurrent*).
2. Pemanasan berlebih dan suara bising pada transformator (*Transformer overheating and loud noise*).
3. Kerusakan peralatan listrik.

Tabel 1
Perbandingan Antara Resonansi Linier dengan Feroresonansi

Rangkaian	Parameter Sistem	Resonansi	Respon
Linier	Resistansi, kapasitansi, induktansi	Resonansi terjadi pada satu frekuensi, sesuai dengan frekuensi sumber	Tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada satu keadaan steady-state
Non-linier	Resistansi, kapasitansi, induktansi non-linier (material feromagnetik)	Feroresonansi terjadi pada frekuensi tertentu, ketika induktansi non-linier sesuai dengan kapasitansi sistem	Tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada beberapa keadaan steady-state

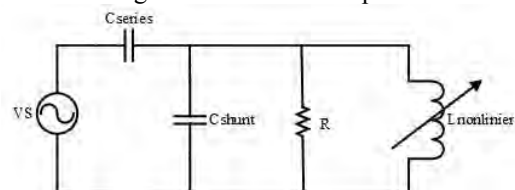
C. Klasifikasi Feroresonansi

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan bahwa resonansi linier digunakan sebagai pendekatan untuk memahami peristiwa feroresonansi. Elemen-elemen yang sangat berpengaruh dalam rangkaian feroresonansi adalah resistansi, kapasitansi dan induktansi non-linier. Dalam dunia sistem tenaga listrik, feroresonansi sering terjadi diakibatkan oleh operasi *switching*. Setelah suatu operasi *switching* terjadi akan muncul transien tegangan lebih inisial dan akan diikuti oleh transien berikutnya dimana sistem bisa memiliki lebih dari satu keadaan steady-state. Dikarenakan adanya elemen non-linier pada rangkaian feroresonansi, maka bisa muncul beberapa respon steady-state dari feroresonansi secara acak. Secara mendasar ada empat tipe respon *steady-state* dari suatu rangkaian feroresonansi. Keempat klasifikasi tersebut adalah:

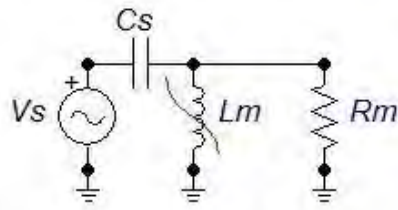
1. *Fundamental Mode*
2. *Sub-harmonic Mode*
3. *Quasi Periodic Mode*
4. *Chaotic Mode*

D. Simulasi Feroresonansi

Feroresonansi pada sistem tenaga dapat dipahami melalui sebuah pemodelan rangkaian simulasi. Gambar 2 merupakan rangkaian ekuivalen dari suatu rangkaian feroresonansi yang kompleks dan Gambar 3 merupakan representasi rangkaian feroresonansi pada ATPDraw.



Gambar 2 Rangkaian Ekuivalen Pemodelan Feroresonansi



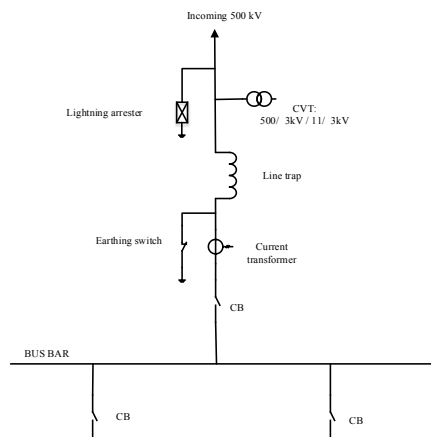
Gambar 3 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi pada ATPDraw

Pada studi ini feroresonansi yang disimulasikan terjadi pada perangkat *Capacitive Voltage Transformer* (CVT). Parameter-parameter gangguan yang dipelajari dalam studi ini yakni impuls petir dan operasi switching oleh *circuit breaker* (CB). Rangkaian ekivalen feroresonansi diatas dapat dimodelkan menjadi suatu pemodelan feroresonansi menggunakan *software* ATPDraw seperti pada Gambar 3. Rangkaian pemodelan tersebut terdiri dari sumber tegangan AC, kapasitor seri (Cs), resistansi R_m , dan induktor non-linier L_m sebagai ciri khas dari rangkaian feroresonansi.

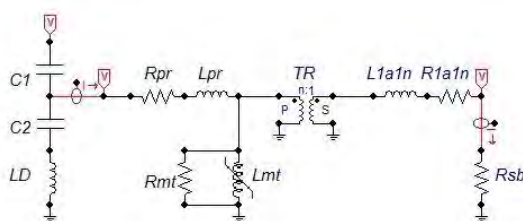
III. PEMODELAN RANGKAIAN FERORESONANSI

A. Pemodelan CVT

Pada studi ini, objek yang diamati dimana peristiwa feroresonansi terjadi adalah peralatan *Capacitive Voltage Transformer* (CVT). Gambar 4 merupakan pemodelan CVT pada ATPDraw.



Gambar 4 Single Line Diagram Incoming Gardu Induk 500 kV



Gambar 5 Pemodelan CVT pada ATPDraw

Model CVT yang digunakan dalam simulasi ini diambil dari referensi yang ada dan memiliki nilai-nilai parameter yang tetap sebagai berikut.

Tabel 2
Nilai-nilai Parameter CVT [7]

Parameter	Nilai
Kapasitor C_1	3300 pF
Kapasitor C_2	79700 pF
Resistansi primer (R_{pr})	220 Ω
Induktansi primer (L_{pr})	1,745 H
Resistansi sekunder (R_{1a1n})	0,04 Ω
Induktansi sekunder (L_{1a1n})	0,007 mH
Resistansi beban	75 Ω
$R_{magnetisasi}$ (R_{mt})	6500000 Ω
Load Coil (L_D)	10 mH
$V_{primer}/V_{sekunder}$	20/ $\sqrt{3}$ kV/ 100/ $\sqrt{3}$ V

B. Feroresonansi Akibat Impuls Petir

Rangkaian pemodelan feroresonansi yang terjadi di CVT dengan parameter gangguan impuls petir dapat dilihat pada Gambar 6. Sumber tegangan yang digunakan adalah tegangan bolak-balik (AC) rms *line-line* ($V_{L-L-rms}$) 500 kV, 50 Hz. Dikarenakan objek yang diteliti merupakan satu fasa, tegangan *line-netral* ($V_{L-netral}$) adalah:

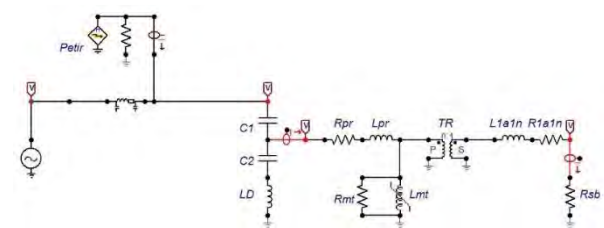
$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L-Nrms} = \frac{500000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 288675 \text{ V}$$

Tegangan puncak *line-netral* ($V_{peakL-netral}$) dapat dihitung menjadi:

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

$$V_{L-Npeak} = 288675 \times \sqrt{2} = 408248 \text{ V}$$

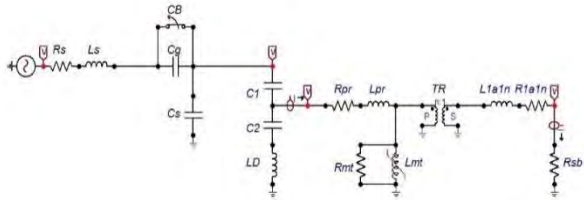


Gambar 6 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi pada CVT dengan Parameter Gangguan Impuls Petir

Untuk kasus gangguan impuls petir digunakan model saluran transmisi tipe pi yang memiliki komponen utama berupa komponen resistif, kapasitif, dan induktif. Pada ATPDraw dipilih model saluran *Lumped RLC-Pi 1 phase* dengan parameter sebagai berikut, panjang saluran diasumsikan 5 km, resistansi saluran 0,00001273 Ohm/m, induktansi saluran 0,0009337 mH/m, dan kapasitansi saluran sebesar 0,01274 μ F/m. Impuls petir pada simulasi ini dimodelkan dalam bentuk sumber arus impuls yang diberikan pada saluran transmisi. Arus impuls petir memiliki bentuk umum 1,2/50 μ s dan amplitudo 10 kA.

C. Feroresonansi Akibat Switching Circuit Breaker

Pada simulasi ini dibuat sebuah model rangkaian feroresonansi ketika sebuah *circuit breaker* bekerja saat terjadi gangguan pada sisi primer CVT. Pemodelan rangkaian feroresonansi pada ATPDraw dapat dilihat pada Gambar 7.

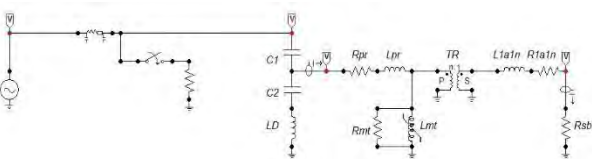


Gambar 7 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi pada CVT dengan Parameter Gangguan Switching CB

Sumber tegangan yang digunakan dalam simulasi ini sama dengan simulasi dengan parameter gangguan impuls petir yakni 500 kV_{L-Lrms} 50 Hz. Nilai-nilai parameter CVT juga sama seperti rangkaian simulasi sebelumnya. Dari rangkaian ekuivalen (Gambar 4.6) diatas dapat dilihat bahwa terdapat elemen C_g dan C_s . C_g dan C_s dalam kondisi existing bernilai 50 pF dan 63,7 μ F. C_g merupakan suatu nilai kapasitif yang muncul akibat pemutusan daya oleh *circuit breaker* (CB). Sedangkan C_s merupakan representasi kapasitansi shunt yang diperoleh dari nilai kapasitif saluran transmisi. Operasi *switching* pada simulasi ini dimodelkan dengan sebuah CB yang terbuka pada waktu 0,2 detik.

D. Feroresonansi Akibat Hubung Singkat Fasa – Tanah

Parameter gangguan ketiga yang dibahas dalam studi adalah hubung singkat fasa ke tanah. Secara teknis gangguan ini sangat sering terjadi pada sistem transmisi tenaga listrik. Salah satu penyebab terjadinya adalah degradasi atau bahkan kegagalan isolator antara kawat fasa dengan tiang transmisi.



Gambar 8 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi pada CVT dengan Parameter Gangguan Hubung Singkat Fasa – Tanah

Gambar 8 menunjukkan bahwa kejadian hubung singkat direpresentasikan oleh saklar S yang menutup pada waktu tertentu dan terhubung dengan sebuah impedansi Rsh. Pada simulasi ini model *Lumped RLC-Pi 1 phase* digunakan sebagai pemodelan saluran transmisi dimana nilai kapasitansi saluran divariasikan pada nilai tertentu.

IV. SIMULASI DAN ANALISIS

A. Keadaan Normal

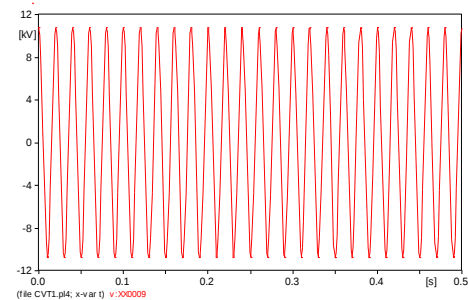
Dalam keadaan normal, hasil pengukuran tegangan input CVT merupakan tegangan kapasitor pembagi pada sisi primer CVT yang memiliki tegangan

line-netral rms (V_{L-Nrms}) 11 kV. Hasil perhitungan yang diperoleh adalah:

$$\frac{V_{sistem(L-Nrms)}}{V_{inCVT(L-Nrms)}} = \frac{C1+C2}{C1}$$

$$V_{inCVT(L-Nrms)} = \frac{C1}{C1+C2} \times V_{sistem(L-Nrms)}$$

$$V_{inCVT(L-Nrms)} = \frac{3300 \mu F}{3300 \mu F + 79700 \mu F} \times 288675 V = 11,47 kV$$

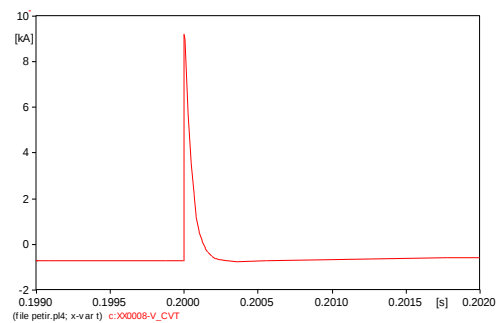


Gambar 9 Tegangan Pada Sisi Primer CVT

Hasil pengukuran dan perhitungan memiliki nilai yang sama. Perhitungan diatas menunjukkan bahwa tegangan yang terukur pada sisi primer CVT (V_{primer}) dalam keadaan normal adalah sebesar 11,47 kV. V_{primer} ini digunakan sebagai variabel yang dianalisis pada simulasi feroresonansi ini.

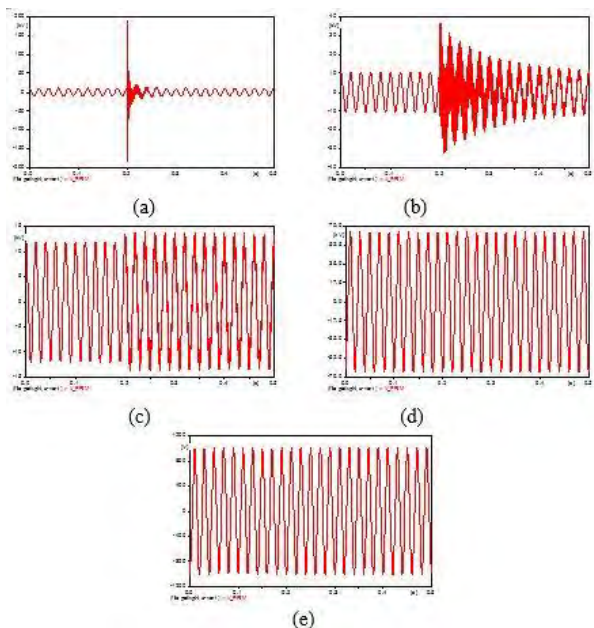
B. Feroresonansi dengan Parameter Gangguan Impuls Petir

Pada simulasi ini impuls petir dimodelkan dalam bentuk arus impuls yang memiliki bentuk umum 1,2/50 μ s dan amplitudo 10 kA. Impuls disimulasikan mulai menerpa saluran transmisi pada detik ke- 0,2 dan simulasi dijalankan selama 0,8 detik.



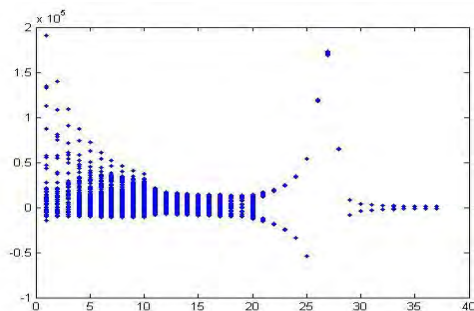
Gambar 10 Sinyal Arus Impuls Petir

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa syarat utama dalam analisis ini adalah adanya parameter sistem yang divariasikan pada range tertentu untuk mengetahui respon feroresonansi pada sistem terhadap perubahan tersebut. Dalam kasus gangguan impuls petir ini parameter yang divariasikan adalah nilai kapasitansi saluran. Pada analisis parametrik telah diketahui bahwa feroresonansi muncul untuk kondisi *existing* tersebut. Pada simulasi ini kapasitansi saluran divariasikan pada nilai 0,001 μ F – 10 μ F.



Gambar 11 Efek Perubahan Nilai $C_{saluran}$ (a) $C = 0,001 \mu F$ (b) $C = 0,01 \mu F$ (c) $C = 0,1 \mu F$ (d) $C = 1 \mu F$ (e) $C = 10 \mu F$

Dari Gambar 11 diatas dapat diketahui bahwa sistem mengalami feroresonansi pada range nilai $C_{saluran}$ $0,001 \mu F$; $0,01 \mu F$; dan $0,1 \mu F$. Perubahan variabel V_{primer} yang sangat signifikan terjadi pada $C_{saluran}$ $0,001 - 1 \mu F$ yakni perubahan dari tegangan lebih yang sangat tinggi sampai tegangan lebih tersebut teredam pada nilai $C_{saluran}$ $1 \mu F$. Diagram bifurkasi dibawah ini akan menampilkan analisis yang lebih mendalam terkait perubahan variabel V_{primer} pada range kapasitansi tersebut.



Gambar 12 Diagram Bifurkasi Variasi Nilai $C_{saluran}$

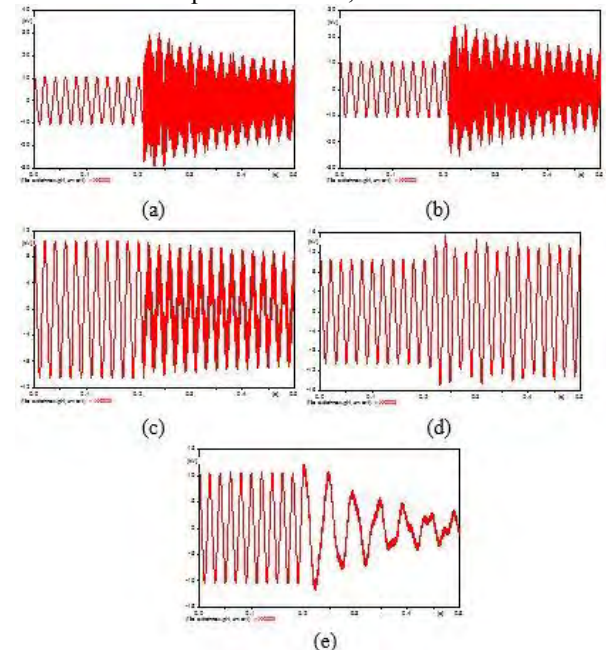
Diagram bifurkasi diatas merupakan representasi 37 simulasi variasi nilai-nilai kapasitansi saluran pada range $0,001 - 10 \mu F$. Diagram ini secara jelas memperlihatkan respon feroresonansi pada sistem untuk range kapasitansi tersebut. Diagram bifurkasi ini dapat menunjukkan area dimana tegangan cukup stabil dan tegangan yang melonjak tinggi (ditunjukkan dengan area chaotic).

C. Feroresonansi dengan Parameter Gangguan Switching Circuit Breaker

Pada simulasi ini terdapat dua parameter kapasitansi diluar kapasitansi perlatan (C_1 dan C_2) yakni *grading capacitance* (C_g) dan *shunt capacitance* (C_s). Kedua nilai kapasitansi ini merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap timbulnya feroresonansi pada CVT dan masing-masing memberikan respon yang berbeda. Pada studi-studi terkait feroresonansi yang lain, waktu switching *circuit breaker* dijadikan salah satu parameter yang mampu menimbulkan feroresonansi. Namun pada studi ini permasalahan yang dibahas dibatasi pada ruang lingkup kapasitansi (C_g dan C_s).

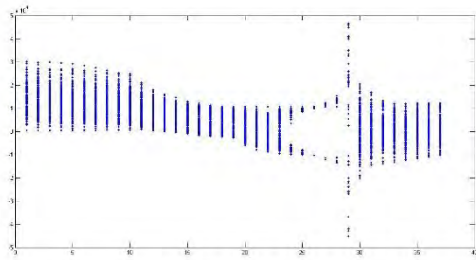
C.1 Efek Perubahan C_g

C_g merupakan parameter kapasitansi yang muncul akibat pemutusan daya oleh *circuit breaker*. Untuk melihat efek kapasitansi C_g terhadap kemungkinan feroresonansi yang terjadi, maka pada simulasi ini nilai C_g divariasikan pada nilai $0,001 - 10 \mu F$, sedangkan C_s dibuat tetap pada nilai $63,7 \mu F$. *Circuit breaker* terbuka pada waktu $t = 0,2$ detik.



Gambar 13 Efek perubahan nilai C_g (a) $C = 0,001 \mu F$ (b) $C = 0,01 \mu F$ (c) $C = 0,1 \mu F$ (d) $C = 1 \mu F$ (e) $C = 10 \mu F$

Perubahan V_{primer} yang sangat signifikan terjadi pada $C_{saluran}$ $0,01 - 1 \mu F$ yakni perubahan dari tegangan lebih yang sangat tinggi sampai tegangan lebih tersebut teredam pada nilai $C_{saluran}$ $0,1 \mu F$. Dari Gambar 13 diatas dapat dilihat bahwa feroresonansi sempat teredam pada nilai C_g $0,1$ namun kemudian feroresonansi muncul kembali pada nilai C_g $1 \mu F$. Diagram bifurkasi dibawah ini akan menampilkan analisis yang lebih mendalam terkait perubahan variabel V_{primer} pada range kapasitansi tersebut.

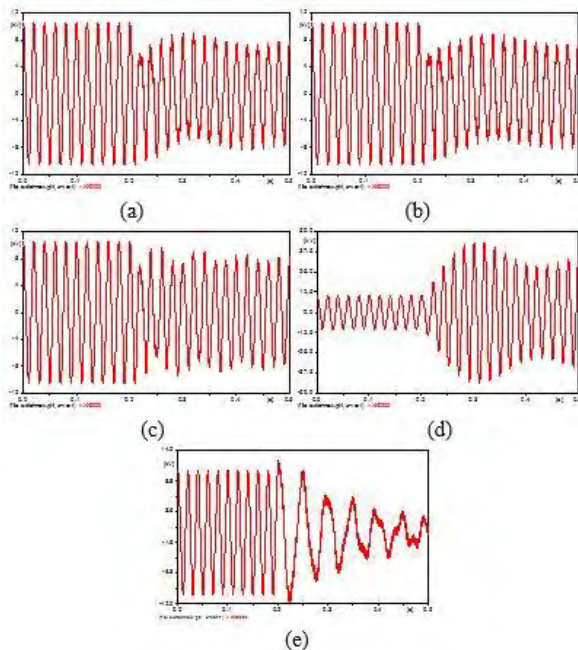


Gambar 14 Diagram Bifurkasi Variasi Nilai C_g

Diagram bifurkasi diatas merupakan representasi 37 simulasi nilai-nilai kapasitansi C_g yang divariasikan pada nilai $0,001 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$. Diagram ini secara jelas memperlihatkan respon feroresonansi pada sistem untuk range kapasitansi tersebut. Diagram bifurkasi ini dapat menunjukkan area dimana tegangan cukup stabil dan tegangan yang melonjak tinggi (ditunjukkan dengan area *chaotic*).

C.2 Efek Perubahan C_s

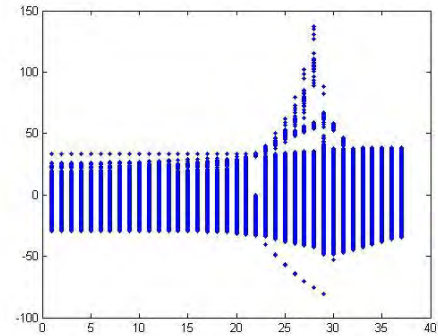
Dalam studi ini, *shunt capacitance* (C_s) merupakan representasi nilai kapasitif suatu saluran transmisi. Studi terkait feroresonansi lain juga mengatakan bahwa C_s dapat berupa efek kapasitif dari penggunaan kapasitor bank. Untuk melihat efek kapasitansi C_s terhadap kemungkinan feroresonansi yang terjadi, maka pada simulasi ini nilai C_s divariasikan pada nilai $0,001 - 10 \mu\text{F}$, sedangkan C_g dibuat tetap pada nilai 50 pF . Circuit breaker terbuka pada waktu $t 0,2$ detik.



Gambar 15 Efek perubahan nilai C_s (a) $C = 0,001 \mu\text{F}$ (b) $C = 0,01 \mu\text{F}$ (c) $C = 0,1 \mu\text{F}$ (d) $C = 1 \mu\text{F}$ (e) $C = 10 \mu\text{F}$

Dari Gambar 15 diatas dapat dilihat bahwa terjadi lonjakan tegangan lebih dan frekuensi tinggi pada nilai $C_s 1 \mu\text{F}$ dan $10 \mu\text{F}$ setelah $0,2$ detik. Sedangkan pada nilai $C_s 0,001 \mu\text{F}$; $0,01 \mu\text{F}$; dan $0,1 \mu\text{F}$ sistem memberikan respon yang hampir sama saat sebelum CB dibuka. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem mengalami feroresonansi pada range nilai $C_s 1 \mu\text{F}$

dan $10 \mu\text{F}$. Perubahan variabel V_{primer} yang sangat signifikan terjadi pada $C_s 0,1 - 1 \mu\text{F}$ yakni peralihan yang cukup besar antara kondisi terjadi feroresonansi dan feroresonansi teredam pada nilai $C_s 1 \mu\text{F}$. Diagram bifurkasi berikut ini akan menampilkan analisis yang lebih mendalam terkait perubahan V_{primer} pada range kapasitansi tersebut.

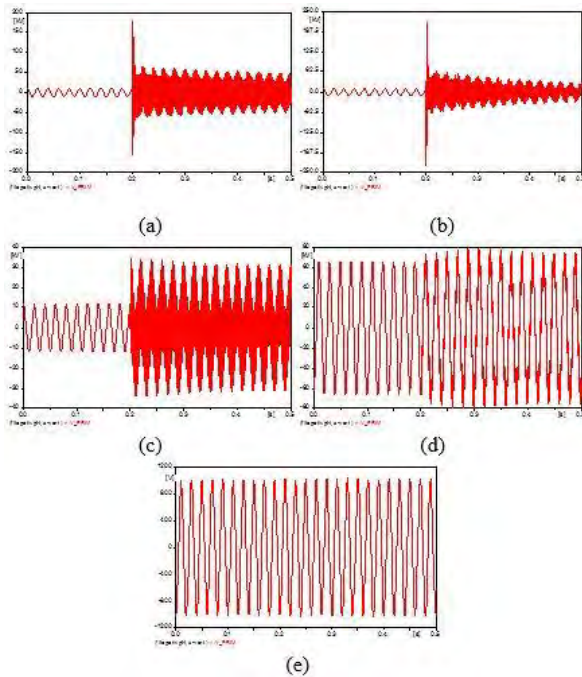


Gambar 16 Diagram Bifurkasi Variasi Nilai C_s

Diagram bifurkasi diatas merupakan representasi 37 simulasi nilai-nilai kapasitansi C_s yang divariasikan pada nilai $0,001 - 10 \mu\text{F}$. Diagram ini secara jelas memperlihatkan respon feroresonansi pada sistem untuk range kapasitansi tersebut. Diagram bifurkasi ini dapat menunjukkan area dimana tegangan cukup stabil dan tegangan yang melonjak tinggi (ditunjukkan dengan area *chaotic*).

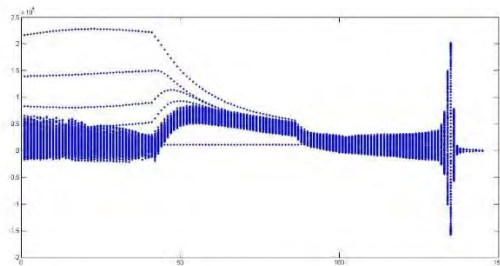
D. Feroresonansi dengan Parameter Gangguan Hubung Singkat Fasa – Tanah

Hubung singkat fasa ke tanah merupakan gangguan yang sering terjadi pada sistem transmisi tenaga listrik. Pada bagian ini akan dijelaskan pengaruh tersebut terhadap kemunculan feroresonansi serta seberapa besar pengaruh potensi tersebut terhadap feroresonansi pada CVT. Pada simulasi ini gangguan hubung singkat direpresentasikan oleh saklar S yang terhubung dengan suatu impedansi 10Ω dimana saklar tersebut menutup (*close*) pada waktu $t 0,2$ detik.



Gambar 17 Efek perubahan nilai C_{saluran} (a) $C = 0,001 \mu\text{F}$ (b) $C = 0,01 \mu\text{F}$ (c) $C = 0,1 \mu\text{F}$ (d) $C = 1 \mu\text{F}$ (e) $C = 10 \mu\text{F}$

Dari hasil simulasi menggunakan ATPDraw dengan variasi kapasitansi saluran pada model *Lumped RLC-Pi 1 phase* pada range $0,001 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$ diperoleh keadaan dimana feroresonansi terjadi pada range nilai kapasitansi $0,001 \mu\text{F} - 1 \mu\text{F}$, dan feroresonansi mulai teredam pada nilai $10 \mu\text{F}$. Lonjakan tegangan lebih terjadi pada range $0,001 \mu\text{F} - 1 \mu\text{F}$ serta perubahan tegangan yang signifikan dan tidak linier pada range $0,1 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$. Selain itu pada kasus ini, feroresonansi terjadi pada range yang lebih lebar jika dibandingkan dengan dua kasus sebelumnya. Oleh sebab itu diperlukan analisis yang lebih mendalam melalui diagram bifurkasi berikut.



Gambar 18 Diagram Bifurkasi Variasi Nilai C_{saluran}

Diagram bifurkasi diatas merupakan hasil dari 100 simulasi variasi nilai kapasitansi saluran pada range $0,001 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$. Dari diagram diatas, feroresonansi tidak terjadi pada range $4 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$, ditunjukkan dengan titik-titik yang sedikit pada daerah tersebut. Sedangkan pada range $0,001 \mu\text{F} - 3 \mu\text{F}$ dapat dikatakan sistem tersebut mengalami feroresonansi.

V. KESIMPULAN

Kapasitansi merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap munculnya feroresonansi. Pada saluran transmisi, untuk saluran daya yang panjangnya kurang dari 80 km (saluran pendek) pengaruh

kapasitansi saluran ke tanah sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Namun untuk saluran menengah pengaruh kapasitansi tersebut tidak dapat diabaikan. Persamaan umum nilai kapasitansi saluran ke tanah adalah:

$$C = \frac{0,02413}{\log \frac{2h}{r}} \mu\text{F}/\text{km}$$

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa untuk memperoleh nilai kapasitansi yang diinginkan maka variabel yang disesuaikan adalah h (jarak konduktor dengan tanah) atau r (radius konduktor). Atau dengan kata lain dalam aplikasinya, parameter jenis konduktor kawat transmisi dan tinggi menara transmisi dapat menjadi pertimbangan.

Diagram bifurkasi merupakan metode yang efektif untuk analisis sensitivitas suatu sistem terhadap perubahan nilai-nilai parameter pada sistem itu sendiri. Studi ini membuktikan bahwa diagram bifurkasi mampu merepresentasikan respon feroresonansi yang terjadi pada CVT terhadap perubahan/ variasi nilai kapasitansi pada sistem. Diagram bifurkasi yang diperoleh dari berbagai macam kasus dalam studi ini membuktikan bahwa feroresonansi pada CVT muncul pada range kapasitansi yang berbeda-beda, atau dengan kata lain kemunculannya tidak berdasarkan kenaikan ataupun penurunan nilai kapasitansi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. E. Martinez, G. Antonova and M. Olgun, "Ferroresonance Phenomenon in CFE, its Origin and Effects", IPST 2013, Vancouver, 2013.
- [2]. Ferraci, P., "Ferroresonance", Group Schneider: Cahier no 190, pp. 1-28, Maret, 1998.
- [3]. Javier Arturo Corea Araujo, "Modeling And Analysis Of Power Transformers Under Ferroresonance Phenomenon", Universitat Rovira, Virgili, 2015.
- [4]. Javier A. Corea-Araujo, Francisco Gonzales-Molina, Juan A. Martinez, Jose A. Barrado-Rodrigo, and Luis Guasch-Pesquer, "Tools for Characterization and Assessment of Ferroresonance Using 3-D Bifurcation Diagrams", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 6, 2014.
- [5]. Preecha Sakarung, Teratam Bunyagul, and Somchai Chatratana, "Investigation and Mitigation of Overvoltage Due to Ferroresonance in the Distribution Network", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 2, No. 3, 2007.

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Jeremia Septa Pratama Sinuraya, dan nama panggilan Jeremi. Penulis lahir di Kota Pematangsiantar pada tanggal 1 September 1994. Penulis mulai menempuh pendidikan formal di TK Assisi Pematangsiantar pada tahun 1999 – 2000. Kemudian melanjutkan pendidikan dasar pada tahun 2000 – 2006 di SD Assisi Pematangsiantar. Setelah lulus dari jenjang pendidikan dasar, penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP RK Bintang Timur Pematangsiantar pada tahun 2006 – 2009 serta menempuh pendidikan menengah atas di SMA RK Budi Mulia Pematangsiantar pada tahun 2009 – 2012. Pada tahun 2012 penulis memutuskan untuk melanjutkan pendidikan ke jenjang Perguruan Tinggi di Jurusan Teknik Elektro ITS pada tahun 2012 dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama berstatus sebagai mahasiswa, penulis aktif dalam berorganisasi dan berkarya di bidang musik dan akademik. Saat ini penulis aktif sebagai asisten di Laboratorium Tegangan Tinggi Elektro ITS.

Email: jeremia.sinuraya94@gmail.com