

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

Dosen Pembimbing:

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara ST., M.Sc.

IGN Satriyadi Hernanda ST., MT.



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



HIGH VOLTAGE
LABORATORY

Jeremia Septa Pratama Sinuraya

2212 100 109



Latar Belakang

- Sistem tenaga listrik yang sangat kompleks dan membutuhkan sistem proteksi yang handal untuk melindungi sistem dari gangguan-gangguan seperti *overvoltage*, *overcurrent*, dsb.
- Ferresonansi dapat menimbulkan transien *overvoltage* dan *overcurrent* yang berbahaya bagi peralatan listrik.
- Transformator tegangan seperti *Capacitive Voltage Transformer (CVT)* merupakan komponen yang sangat penting dalam sistem tenaga dan rentan terhadap gangguan.



Tujuan Penelitian

- Mengetahui pengaruh kapasitansi pada sistem terhadap feroresonansi yang dipicu oleh gangguan impuls petir, *switching Circuit Breaker* (CB), dan hubung singkat fasa – tanah.
- Mengetahui sensitivitas sistem terhadap perubahan nilai-nilai kapasitansi melalui plotting diagram bifurkasi.



Batasan Masalah

- Model simulasi yang digunakan adalah *Capacitive Voltage Transformer* (CVT) pada incoming gardu induk 500 kV.
- Analisis mencakup pengaruh kapasitansi saluran per meter ($\mu\text{F}/\text{m}$), *grading capacitance*, dan *shunt capacitance* terhadap tegangan yang muncul pada sisi primer CVT.
- Software yang digunakan adalah ATP Draw dan MATLAB.



Objek Penelitian

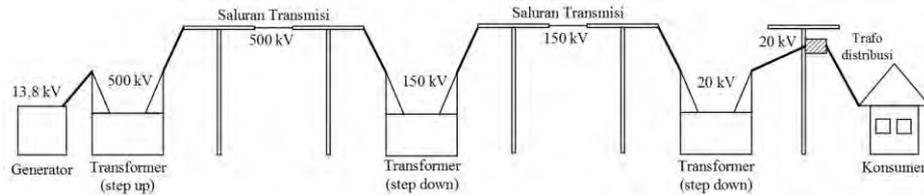
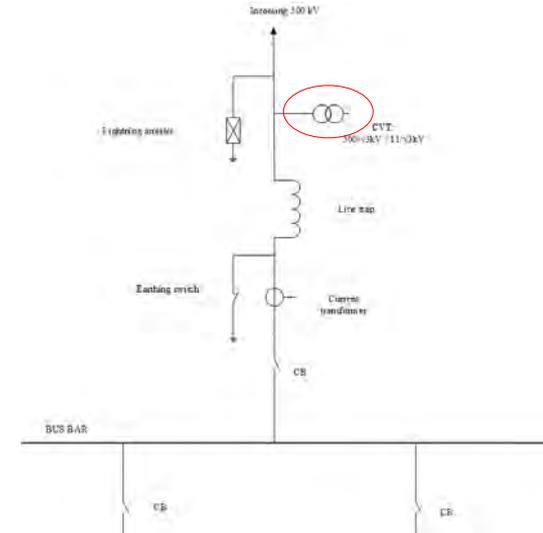


Diagram Sistem Tenaga Listrik

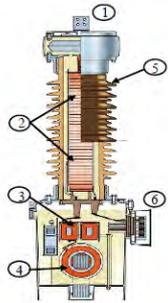


SLD Incoming Gardu Induk 500 kV



Capacitive Voltage Transformer (CVT)

CVT merupakan jenis transformator tegangan kapasitif yang digunakan untuk keperluan pengukuran tegangan tinggi, pembawa sinyal komunikasi (*power line carrier*), dan kendali jarak jauh



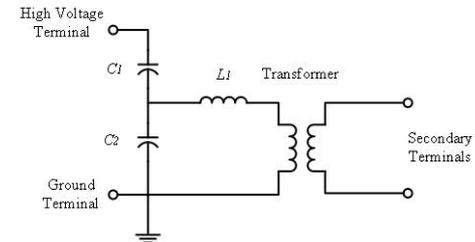
Keterangan:

1. Terminal tegangan tinggi
2. Capacitive Voltage Divider (C1&C2)
3. Medium voltage choke
4. Belitan primer
5. Isolator keramik
6. Terminal sekunder

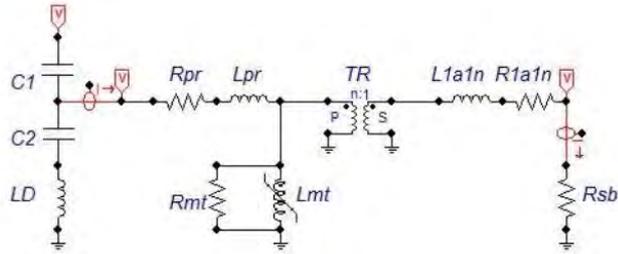
Konstruksi CVT



CVT pada Gardu Induk



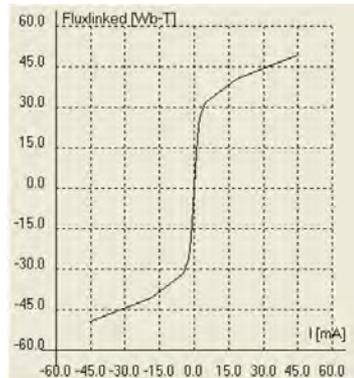
Komponen Utama CVT



Pemodelan CVT pada ATPDraw

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

Nilai-nilai Parameter CVT

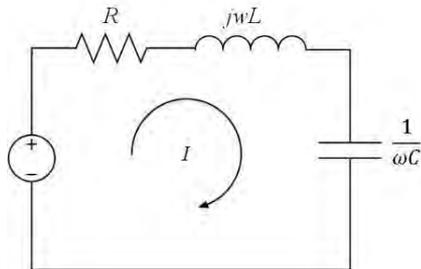


Kurva Magnetisasi Trafo Step-down pada CVT

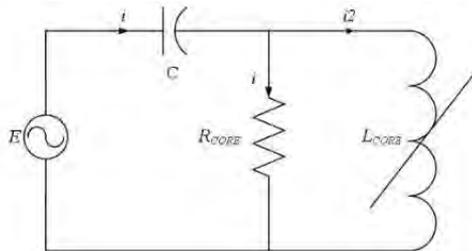


Feroresonansi

Feroresonansi merupakan resonansi yang terjadi antara parameter sistem seperti elemen kapasitif dengan material ferromagnetik pada suatu peralatan seperti trafo.



Rangkaian Resonansi Seri



Rangkaian Ferroresonansi

Feroresonansi dapat menyebabkan tegangan lebih pada sistem sehingga berbahaya bagi sistem transmisi, sistem proteksi, peralatan maupun operator.

Syarat terjadinya feroresonansi:

- Sumber tegangan bolak-balik dengan rugi-rugi daya yang rendah
- Elemen non-linier, misalnya induktor non-linier
- Elemen linier, seperti kapasitor

Klasifikasi Feroresonansi:

- **Fundamental Mode**
Respon periodik tegangan yang sama dengan sumber.
- **Sub-harmonic Mode**
Respon periodik tegangan kelipatan nT dari periode sumbernya.
- **Quasi-periodic Mode**
Respon tegangan non-periodik dan diskontinyu
- **Chaotic Mode**
Respon tegangan non-periodik dan tidak dapat diinterupsi oleh frekuensi apapun (*chaos*).

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

Perbandingan antara Resonansi Linier dengan Feroresonansi



Simulasi dan Analisis

- Keadaan normal → sistem transmisi 500 kV
- Keadaan pada saat terjadi gangguan
 - Gangguan impuls petir → kapasitansi saluran per meter ($\mu\text{F}/\text{m}$)
 - Gangguan switching circuit breaker → grading capacitance (μF)
→ shunt capacitance (μF)
 - Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah → kapasitansi saluran per meter ($\mu\text{F}/\text{m}$)

- Keadaan Normal
Tegangan Sumber

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

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

Maka tegangan puncak line-netral menjadi

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

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

Tegangan Primer CVT

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

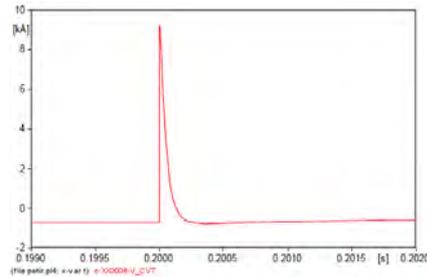
$$V_{inCVT(L-Nrms)} = \frac{C1}{C1 + C2} \times V_{sistem(L-Nrms)}$$

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

Maka tegangan primer CVT diperoleh 11,47 kV

Feroresonansi Akibat Gangguan Impuls Petir

- Pada simulasi ini petir memiliki bentuk umum $1,2/50 \mu\text{s}$ dan amplitudo 10 kA. Petir disimulasikan menerpa sistem pada waktu $t = 0,2\text{s}$



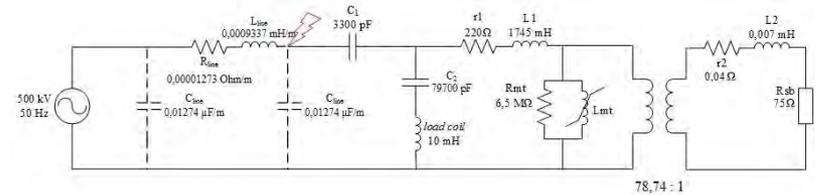
Gelombang Arus Impuls Petir

- Saluran transmisi dimodelkan oleh *Lumped RLC – Pi 1 Phase* pada ATP. Parameternya adalah sebagai berikut.

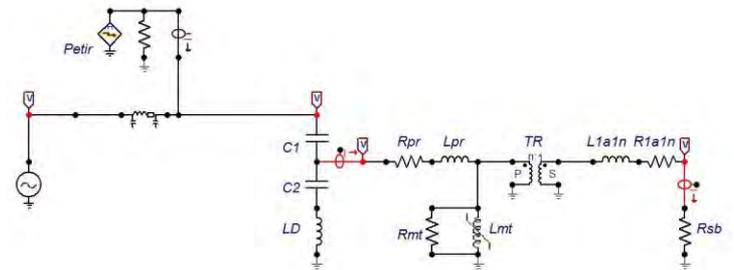
$$R = 0,00001273 \Omega/\text{m}$$

$$L = 0,0009337 \text{ mH}/\text{m}$$

$$C = 0,01274 \mu\text{F}/\text{m}$$

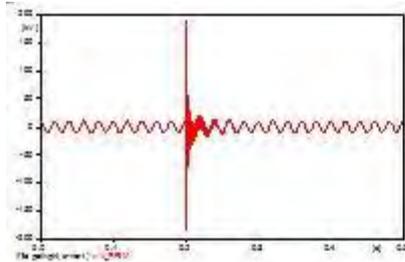


Rangkaian Ekivalen Feroresonansi

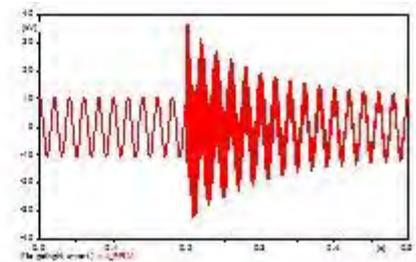


Pemodelan Rangkaian Feroresonansi pada ATPDraw

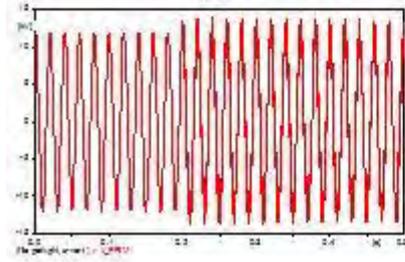
Feroresonansi Akibat Gangguan Impuls Petir (1)



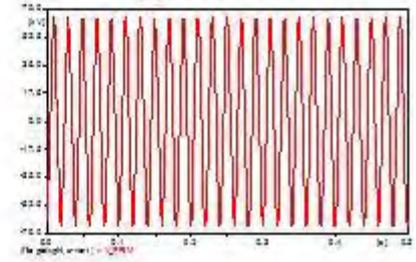
(a)



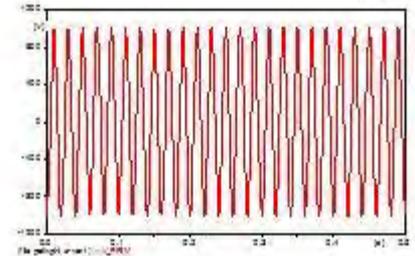
(b)



(c)



(d)



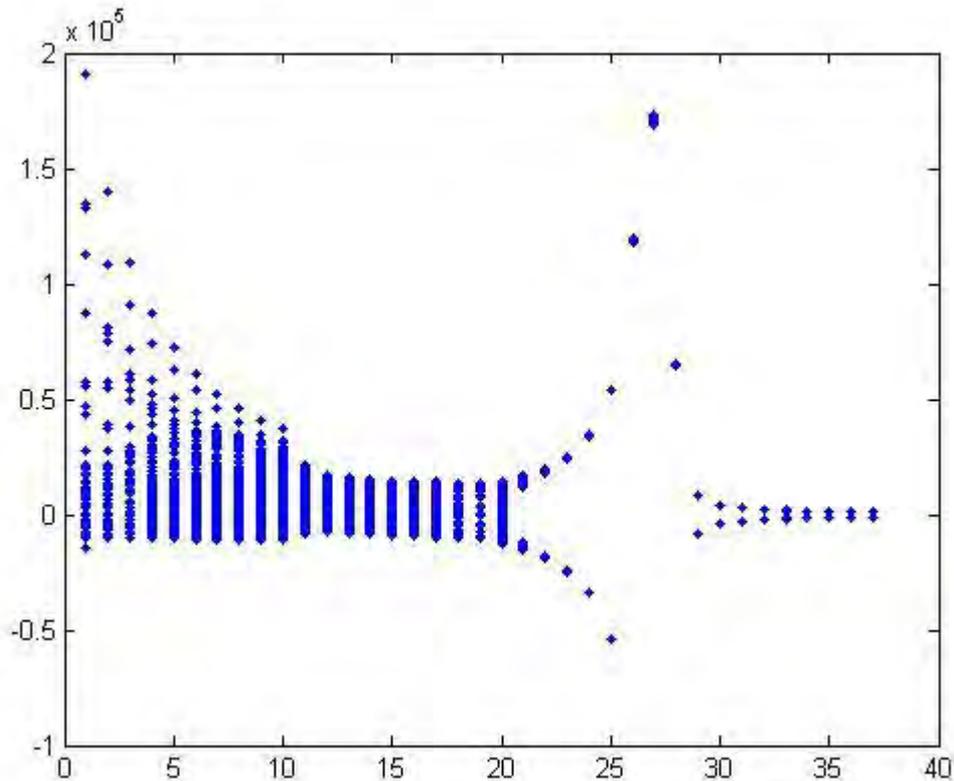
(e)

- (a) $C = 0,001 \mu\text{F/m}$
- (b) $C = 0,01 \mu\text{F/m}$
- (c) $C = 0,1 \mu\text{F/m}$
- (d) $C = 1 \mu\text{F/m}$
- (e) $C = 10 \mu\text{F/m}$

Respon Tegangan Primer CVT terhadap variasi C_{saluran}

$C_{\text{saluran}} (\mu\text{F})$	Tegangan Primer CVT (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0,001	10,60	190,39	Ya
0,01	10,72	37,19	Ya
0,1	11,97	13,88	Ya
1	64,93	64,98	Tidak
10	1,004	1,018	Tidak

Feroresonansi Akibat Gangguan Impuls Petir (2)

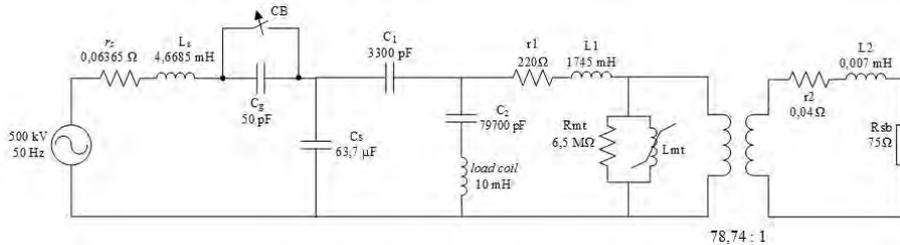


Sumbu X : Nilai kapasitansi saluran per meter pada range 0,001 – 10 $\mu\text{F}/\text{m}$

Sumbu Y : Nilai tegangan pada sisi primer CVT dalam kV

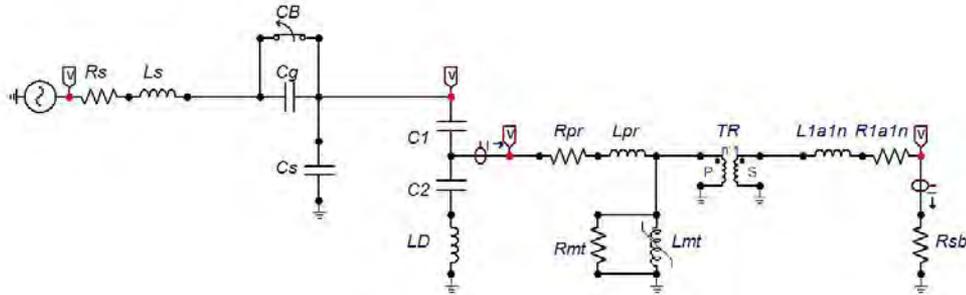
Diagram bifurkasi fungsi tegangan terhadap variasi nilai C_{saluran}

Feroresonansi Akibat Gangguan *Switching* CB



Rangkaian Ekuivalen Feroresonansi

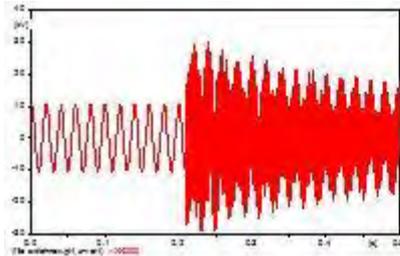
- Terdapat dua kapasitansi yang diperhitungkan dalam simulasi ini, yakni C_g dan C_s
- *Grading capacitance* (C_g) merupakan nilai kapasitansi yang muncul akibat pemutusan daya oleh circuit breaker. C_g divariasikan pada nilai 0,001 – 10 μF sedangkan C_s tetap pada 63,7 μF
- *Shunt capacitance* (C_s) merupakan representasi nilai kapasitif suatu saluran transmisi. C_s divariasikan pada nilai 0,001 – 10 μF sedangkan C_g tetap pada 50 pF.



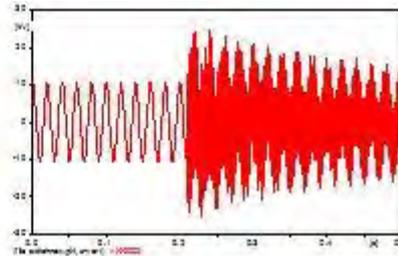
Pemodelan Rangkaian Feroresonansi pada ATPDraw

Feroresonansi Akibat Gangguan *Switching* CB (1)

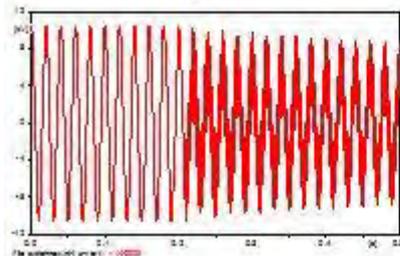
Variasi Nilai C_g



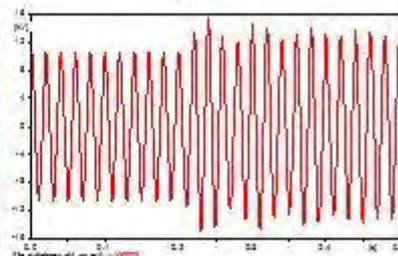
(a)



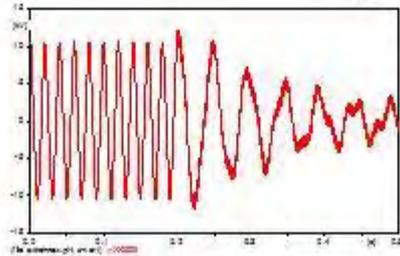
(b)



(c)



(d)



(e)

(a) $C = 0,001 \mu\text{F/m}$

(b) $C = 0,01 \mu\text{F/m}$

(c) $C = 0,1 \mu\text{F/m}$

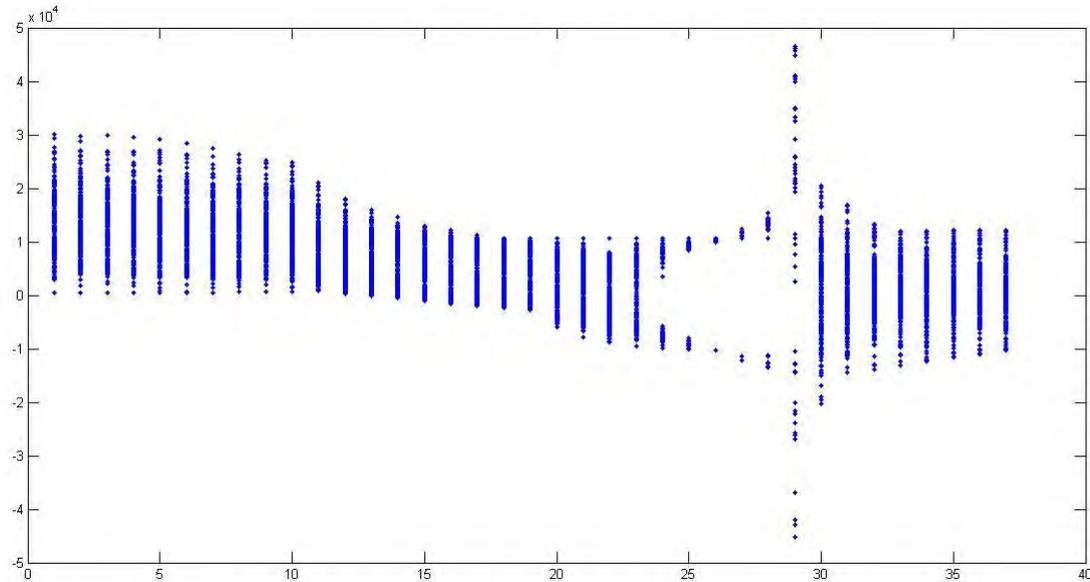
(d) $C = 1 \mu\text{F/m}$

(e) $C = 10 \mu\text{F/m}$

Respon Tegangan Primer CVT terhadap variasi C_g

C_g (μF)	Tegangan Primer CVT (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0,001	10,58	30,05	Ya
0,01	10,58	24,85	Ya
0,1	10,58	10,29	Tidak
1	10,58	15,46	Ya
10	10,58	12,14	Ya

Feroresonansi Akibat Gangguan *Switching* CB (2)



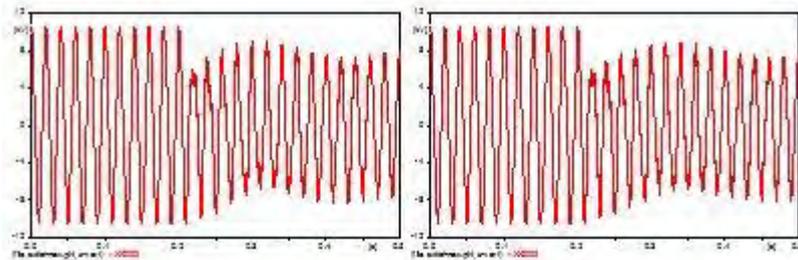
Sumbu X : Nilai *grading capacitance* (C_g) pada range 0,001 – 10 μF

Sumbu Y : Nilai tegangan pada sisi primer CVT dalam kV

Diagram bifurkasi fungsi tegangan terhadap variasi nilai C_g

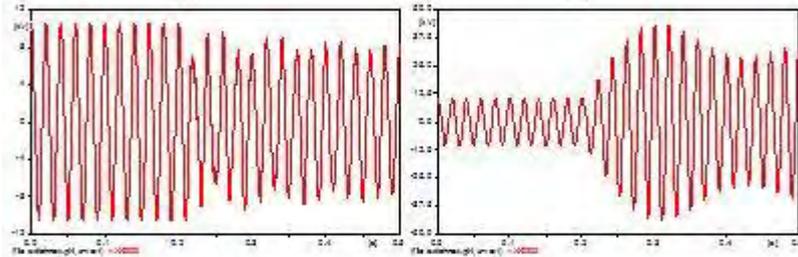
Feroresonansi Akibat Gangguan *Switching* CB (3)

Variasi Nilai C_s



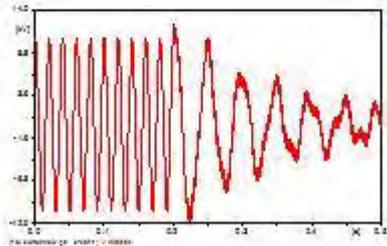
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(a) $C = 0,001 \mu\text{F/m}$

(b) $C = 0,01 \mu\text{F/m}$

(c) $C = 0,1 \mu\text{F/m}$

(d) $C = 1 \mu\text{F/m}$

(e) $C = 10 \mu\text{F/m}$

Respon Tegangan Primer CVT terhadap variasi C_s

C_s (μF)	Tegangan Primer CVT (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0,0010	10,58	8,913	Tidak
0,01	10,58	9,9138	Tidak
0,1	10,58	9,721	Tidak
1	10,58	43,92	Ya
10	10,58	12,15	Ya

Feroresonansi Akibat Gangguan *Switching* CB (4)

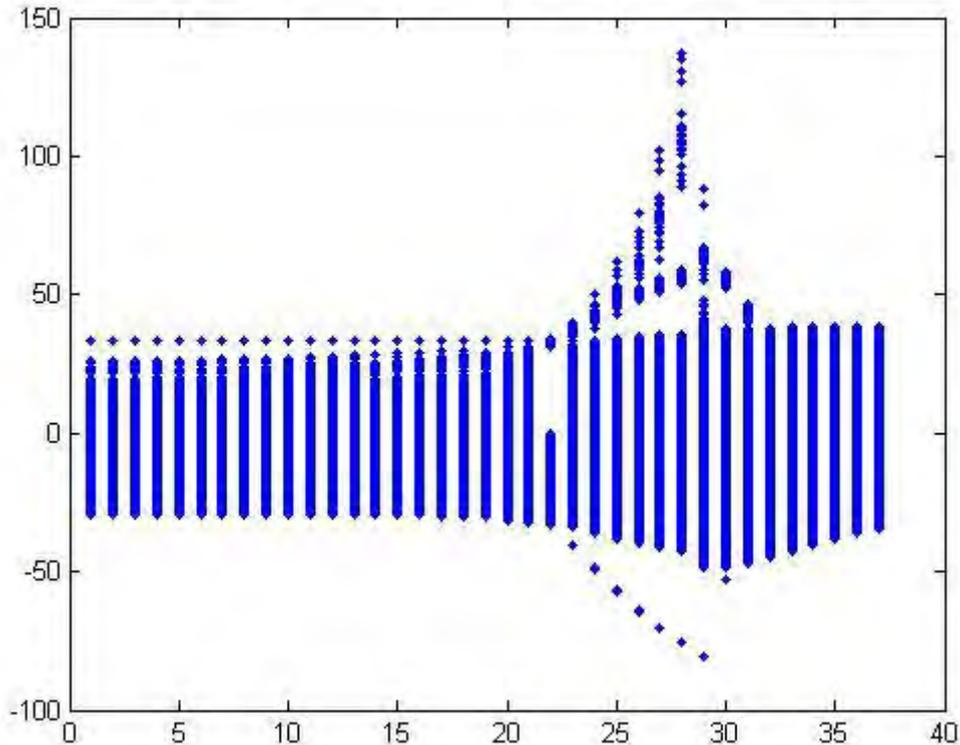


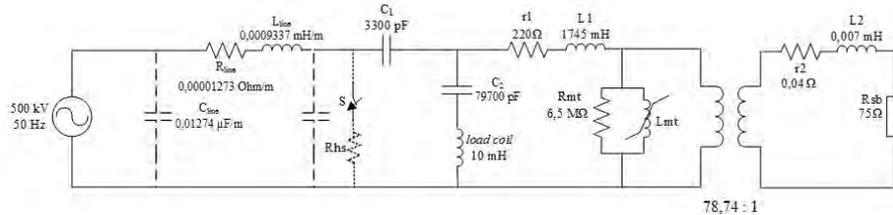
Diagram bifurkasi fungsi tegangan terhadap variasi nilai C_s

Sumbu X : Nilai *shunt capacitance* (C_s) pada range 0,001 – 10 μF

Sumbu Y : Nilai tegangan pada sisi primer CVT dalam kV

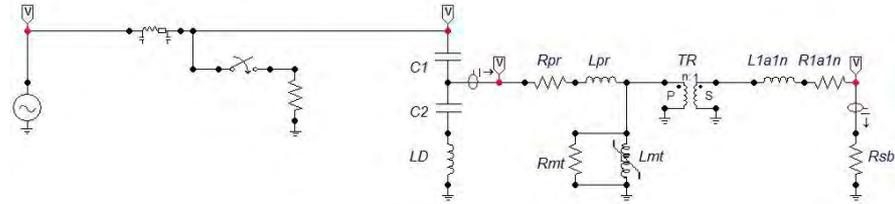
Feroresonansi Akibat Gangguan Hubung Singkat Fasa – Tanah

- Pada simulasi ini diasumsikan hubung singkat terjadi antara kawat konduktor saluran transmisi dengan tanah. Pada ATP, saluran transmisi dimodelkan oleh *Lumped RLC – Pi 1 Phase*.



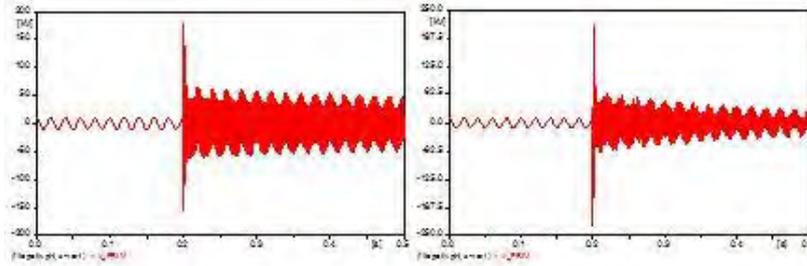
Rangkaian Ekuivalen Ferroresonansi

- Pada simulasi ini, fenomena hubung singkat direpresentasikan oleh sebuah saklar yang menutup pada waktu t 0,2 detik dan terhubung dengan sebuah impedansi R_{hs} sebesar 10Ω .



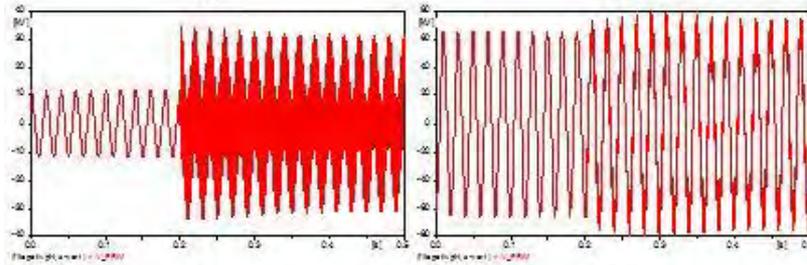
Pemodelan Rangkaian Ferroresonansi pada ATPDraw

Ferresonansi Akibat Gangguan Hubung Singkat Fasa – Tanah (1)



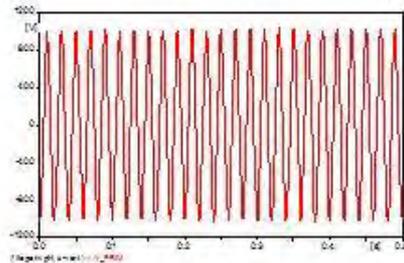
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(a) $C = 0,001 \mu\text{F/m}$

(b) $C = 0,01 \mu\text{F/m}$

(c) $C = 0,1 \mu\text{F/m}$

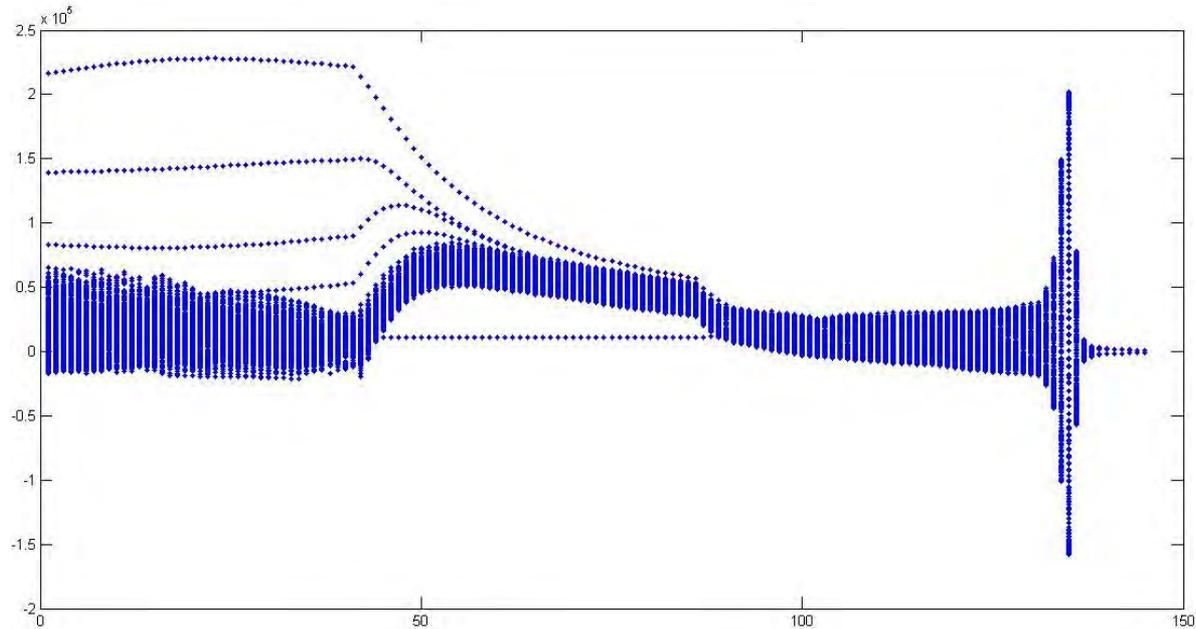
(d) $C = 1 \mu\text{F/m}$

(e) $C = 10 \mu\text{F/m}$

Respon Tegangan Primer CVT terhadap variasi C_{saluran}

$C_{\text{saluran}} (\mu\text{F})$	Tegangan Primer CVT (kV)		Ferresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0,001	10,60	216,2	Ya
0,01	10,72	180,77	Ya
0,1	11,97	34,32	Ya
1	64,93	78,38	Ya
10	1,004	1,003	Tidak

Feroresonansi Akibat Gangguan Hubung Singkat Fasa – Tanah (2)



Sumbu X : Nilai kapasitansi saluran (C_{saluran}) pada range 0,001 – 10 μF

Sumbu Y : Nilai tegangan pada sisi primer CVT dalam kV

Diagram bifurkasi fungsi tegangan terhadap variasi nilai C_s



Kesimpulan

- Feroresonansi yang terjadi pada pemodelan rangkaian feroresonansi dengan parameter gangguan impuls petir muncul pada variasi nilai kapasitansi lumped saluran transmisi $0,001 \mu\text{F} - 0,7 \mu\text{F}$. Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada variasi kapasitansi yang lebih besar, yakni $0,8 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$.
- Feroresonansi yang terjadi pada pemodelan rangkaian feroresonansi dengan parameter gangguan switching CB muncul pada dua range variasi nilai grading capacitance (C_g) yang berbeda, yakni pada range $0,001 \mu\text{F} - 0,76 \mu\text{F}$ dan $0,88 - 10 \mu\text{F}$.
- Feroresonansi yang terjadi pada pemodelan rangkaian feroresonansi dengan parameter gangguan switching CB muncul pada variasi nilai shunt capacitance (C_s) $0,51 \mu\text{F} - 3 \mu\text{F}$. Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada range $0,001 \mu\text{F} - 0,4 \mu\text{F}$ dan $4 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$.

Kesimpulan (2)

- Feroresonansi yang terjadi pada pemodelan rangkaian feroresonansi dengan parameter gangguan hubung singkat fasa ke tanah muncul pada variasi nilai kapasitansi lumped saluran transmisi 0,001 μF – 3 μF .
- 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.

Kesimpulan (3)

- **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.**



Terimakasih

Any Question?

