



**UNIVERSITAS INDONESIA**  
**SIMULASI PEREDAMAN INTERAKSI TORSI**  
***SUBSYNCHRONOUS RESONANCE* PADA SISTEM TENAGA**  
**LISTRIK DENGAN MENGGUNAKAN *THYRISTOR***  
***CONTROLLED SERIES CAPACITOR***

**SKRIPSI**

**M.KUNCORO**

**04 05 03 05 16**

**FAKULTAS TEKNIK**  
**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**  
**DEPOK**  
**JUNI 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI PEREDAMAN INTERAKSI TORSI  
*SUBSYNCHRONOUS RESONANCE* PADA SISTEM TENAGA  
LISTRIK DENGAN MENGGUNAKAN *THYRISTOR*  
*CONTROLLED SERIES CAPACITOR***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik**

**M.KUNCORO**

**04 05 03 05 16**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK**

### HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : M. Kuncoro

NPM : 0405030516

Tanda Tangan : 

Tanggal : 30 Juni 2009

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : M. Kuncoro  
NPM : 0405030516  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : **SIMULASI PEREDAMAN INTERAKSI TORSI  
SUBSYNCHRONOUS RESONANCE PADA  
SISTEM TENAGA LISTRIK DENGAN  
MENGUNAKAN THYRISTOR CONTROLLED  
SERIES CAPACITOR**

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

## DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. I Made Ardita, MT

(.....)

Penguji : Ir. Agus R. Utomo, MT

(.....)

Penguji : Ir. Amien Rahardjo, MT

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2009

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena atas berkat dan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa selama masa penelitian sampai pada penyusunan skripsi ini banyak pihak yang telah membantu. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. I Made Ardita. MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; serta
3. Seluruh pihak yang telah membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah Subhanahu Wa Ta'ala berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penyusunan skripsi ini. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 30 Juni 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR  
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. Kuncoro  
NPM : 0405030516  
Departemen : Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**SIMULASI PEREDAMAN INTERAKSI TORSI *SUBSYNCHRONOUS*  
*RESONANCE* PADA SISTEM TENAGA LISTRIK DENGAN  
MENGUNAKAN TCSC *THYRISTOR CONTROLLED SERIES*  
*CAPACITOR***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 30 Juni 2009  
Yang menyatakan

(M. Kuncoro)

## ABSTRAK

Nama : M. Kuncoro  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul :

### **SIMULASI PEREDAMAN INTERAKSI TORSI *SUBSYNCHRONOUS* *RESONANCE* PADA SISTEM TENAGA LISTRIK DENGAN MENGUNAKAN TCSC *THYRISTOR CONTROLLED SERIES* *CAPACITOR***

Skripsi ini membahas tentang simulasi peredaman efek *subynchronous resonance* dengan menggunakan matlab simulink. Pemasangan kapasitor fix pada saluran transmisi sebagai kompensasi seri di satu sisi dapat meningkatkan kapabilitas transfer daya listrik, mengatur pengontrolan daya reaktif dan sudut fasa antara dua *terminal* dan mengurangi nilai impedansi saluran transmisi. Akan tetapi di sisi lain, hal ini menyebabkan terjadinya resonansi antara torsi elektrik dan torsi mekanis yang disebut dengan *subynchronous resonance*. Arus yang mengalir pada saluran transmisi dipengaruhi oleh frekuensi base dan frekuensi natural yang nilainya dipengaruhi oleh nilai L dan C pada saluran transmisi. Arus ini diinduksikan ke rotor generator yang secara matematis dengan park transformation di transformasi menjadi arus dengan frekuensi supersynchronous dan *subynchronous* sehingga menghasilkan torsi elektrik. Di lain pihak hubungan turbin generator shaft secara mekanis juga memiliki torsi mekanis dengan frekuensi *natural mode* tertentu. Jika besarnya frekuensi *subynchronous* bertepatan dengan salah satu natural mode turbin generator shaft maka akan terjadi fenomena. *Subsynchronous resonance* merupakan efek yang berbahaya karena dapat menyebabkan kerusakan pada generator sinkron. Gejalanya diawali dengan munculnya efek *torque fatigue*. Untuk mengetahui gejala *subynchronous resonance* maka dilakukan simulasi berdasarkan model *Second Benchmark Model SSR IEEE Trans.*, v.PAS-104,n.p dan untuk mengetahui efek peredaman *subynchronous resonance* digunakan simulasi dengan TCSC module berbasis matlab simulink.

Kata kunci :

*subynchronous resonance*, kompensasi seri, resonansi, torsi elektrik, torsi mekanis, frekuensi mode natural torsional, *Second Benchmark Model SSR IEEE Trans.*, v.PAS-104,n.p, TCSC.

## ABSTRACT

Name : M. Kuncoro  
Programe Study : Teknik Elektro  
Title :

### **DAMPING SIMULATION TORSIONAL INTERRACTION SUBSYNCHRONOUS RESONANCE IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM USING THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPACITOR**

This research discusse about damping simulation phenomena subsynchronous resonance using matlab simulink software programme . Instalation fix capacitor in the transmission line as series compensation can improve transfer capability of electric power, regulate the control of reactive power and phase angel between two transmission bus and reduce impedance of transmission line. However it's can cause resonant between electric and mechanic torque defined by subsynchronous resonance. The current flow in the transmission line is influenced by base frequency and natural frequency that's value determined by L and C value in the transmission line. This current is inducted to rotor generator matematically by park transformation is transformed become current in supersynchronous and subsynchronous frequency so that resulting electric torque. On the other hand turbine-generator shaft system mechanically have mechanic torque with natural torsional mode frequency. If magnitude of the subsynchronous frequency coincide with one of the natuatural mode frequency turbine-generator shaft system, it's will build up subsynchronous resonance effect. Subsynchronous resonance is danger effect because can damage the synchronous generator. The effect subsynchronous resonance to synchronous generator is signed by torque fatigue phenomena. To know more about subsynchronous resonance then simulation by reference of Second Benchmark Model SSR IEEE Trans., v.PAS-104,n.p is designed using matlab simulink software programme and the second simulation, TCSC is used to analysis effect of subsynchronous resonance damping.

Key word :

subsynchronous resonance, series compensation, electric torque, mechanic torque, natural torsional mode frequency, natural frequency, Second Benchmark Model SSR IEEE Trans., v.PAS-104,n.p ,TCSC

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvi
DAFTAR SINGKATAN .....	xvii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN .....	2
1.3 BATASAN MASALAH .....	2
1.4 METODOLOGI PENELITIAN.....	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN .....	3
<b>BAB 2 LANDASAN TEORI</b>	
2.1 Kapasitor fix sebagai kompensasi seri pada saluran transmisi.....	4
2.3 Karakteristik saluran transmisi dengan rugi rugi daya diabaikan .....	4
2.4 Pengaruh kompensasi seri terhadap impedansi jaringan .....	5
2.5 Pengaruh kompensasi seri terhadap kestabilan sudut fase .....	6
2.6 Pengaruh kompensasi seri terhadap kestabilan tegangan .....	7
2.7 Pengaruh kompensasi seri terhadap transfer daya maksimum .....	8
2.8 Perhitungan level kompensasi seri kapasitor fix .....	8
2.9 <i>Subsynchronous resonance</i> .....	9

2.9.2 Pengertian <i>Subsynchronous resonance</i> .....	9
2.9.3 Macam-macam subsynchronous resonance	
2.9.3.1 <i>Induction Generator Effect</i> .....	10
2.9.3.2 <i>Torsional Interaction</i> .....	10
2.9.3.3 <i>Transien Torque</i> .....	10
2.9.5 Torque Fatigue Sebagai Akibat <i>Subsynchronous resonance</i> .....	10
2.10 TCSC ( <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i> ) sebagai alat .....	11
kendali listrik FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System)	
2.10.1 Deskripsi TCSC .....	11
2.10.2 Operasi TCSC pada keadaan steady state .....	11
2.10.4 Rangkaian TCSC untuk meredam efek <i>subsynchronous</i> .....	15
2.10.4.2 Pengaturan impedansi TCSC .....	15
2.10.4.4 Pengontrolan rangkaian TCSC .....	16
2.10.4.3 Konsep Peredaman Osilasi Dengan TCSC .....	17
<b>BAB 3 PEMODELAN SISTEM DAN SIMULASI</b>	
3.1 Second Benchmark Model <i>Subsynchronous resonance</i> IEEE .....	20
3.2 Pemodelan sistem	
3.2.1 Pemodelan generator sinkron .....	20
3.2.1.4 Persamaan matematis fluks dan tegangan pada generator .....	21
Sinkron	
3.2.1.6 Hasil transformasi persamaan tegangan dan fluks pada .....	21
abc frame ke dq0 frame	
3.2.1.3 Analisis Persamaan d Axis dan q Axis .....	23
3.2.2 Pemodelan Turbine-Generator Shaft system .....	24
3.3 Desain simulasi <i>Subsynchronous resonance</i> pada turbin generator .....	26
shaft sistem dengan menggunakan matlab simulink	
3.3.1 Blok Generator Sinkron .....	26
3.3.2 Blok Turbin Uap-Generator <i>Shaft</i> Sistem .....	28
3.3.3 Blok sistem transmisi .....	30

3.3.4 Blok beban .....	31
3.4 Parameter simulasi .....	31
3.5 Desain TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) untuk meredam .32 efek <i>subsynchronous resonance</i> dengan menggunakan matlab simulink	
3.6 Deskripsi blok rangkaian TCSC .....	33
3.6.1 Blok switching TCSC .....	33
3.6.2 Blok pengontrolan .....	34
3.6.3 Blok TCSC impedance .....	34
<b>BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISA</b>	
4.1 Hasil simulasi dan analisa gejala <i>subsynchronous resonance</i> .....	35
akibat kompensasi seri	
4.1.1 Hasil Simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut.....	36
turbin-Generator pada keadaan normal tanpa kompensasi seri.	
4.3.2 Hasil Simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut .....	36
turbin-generator akibat arus gangguan 3 fasa.	
4.3.3 Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut .....	37
turbin-generator dengan level kompensasi seri dan arus gangguan 3 fasa .	
4.3.3.1 Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut .....	38
turbin-generator dengan kompensasi seri 25 %	
4.3.3.2 Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut .....	39
turbin-generator dengan kompensasi seri 35 %	
4.3.3.3 Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut .....	40
turbin-generator dengan kompensasi seri 45 %	
4.3.3.4 Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut .....	41
turbin-generator dengan kompensasi seri 55 %	
4.3.3.5 Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut .....	42
turbin-generator dengan kompensasi seri 65 %	
4.3.3.6 Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut .....	43
turbin-generator dengan kompensasi seri 75 %	

4.3.3.7 Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut .....	44
turbin-generator dengan kompensasi seri 85 %	
4.3.4 Analisa gejala <i>subsynchronous resonance</i> dari segi domain frekuensi ...	45
4.3.4.1 Perhitungan frekuensi natural jaringan dan frekuensi .....	45
<i>subsynchronous</i>	
4.3.4.2 perhitungan nilai eigen .....	47
4.3.4.3 Analisa gejala <i>subsynchronous resonance</i> berdasarkan nilai eigen ..	48
dan frekuensi <i>subsynchronous resonance</i>	
4.4 Hasil simulasi dan analisa peredaman <i>subsynchronous resonance</i> .....	49
dengan menggunakan TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)	
4.4.1 Hasil simulasi peredaman osilasi <i>subsynchronous resonance</i> .....	50
dengan menggunakan TCSC pada mode operasi <i>kapasitif boost mode</i> .	
4.4.2 Hasil simulasi peredaman osilasi <i>subsynchronous resonance</i> .....	52
dengan menggunakan TCSC pada mode operasi <i>induktif boost mode</i>	
4.4.3 Hasil simulasi karakteristik TCSC pada operasi <i>induktif boost mode</i> ....	52
4.4.4 Analisa peredaman osilasi <i>subsynchronous resonance</i> pada TCSC .....	54
dengan mode operasi <i>induktif boost mode</i> .	
BAB 5 KESIMPULAN.....	58
DAFTAR REFERENSI.....	60

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Transfer daya pada saluran transmisi.....	5
Gambar 2.2	Pengaruh kompensasi seri terhadap kestabilan sudut fase .....	7
Gambar 2.3	Pengaruh kompensasi seri terhadap kestabilan tegangan .....	7
Gambar 2.4	Rangkaian TCSC .....	11
Gambar 2.5	Pemodelan TCSC .....	12
Gambar 2.6	Gelombang arus line, tegangan kapasitor dan arus TCSC .....	13
Gambar 2.7	<i>By Pass thyristor mode</i> .....	13
Gambar 2.8	<i>Blocked thyristor mode</i> .....	14
Gambar 2.9	<i>Kapasitif boost mode</i> .....	14
Gambar 2.10	<i>Induktif boost mode</i> .....	14
Gambar 2.11	Kurva sudut penyalan terhadap daerah operasi kerja TCSC .....	15
Gambar 2.11	Rangkaian pengontrolan TCSC dengan metode <i>CC control</i> .....	16
Gambar 2.13	Dua mesin sinkron yang saling terinterkoneksi .....	17
Gambar 2.14	Grafik hubungan variasi deviasi sudut rotor, deviasi kecepatan rotor dan deviasi daya aktif antara dua terminal. ....	18
Gambar 3.1	<i>Second Benchmark Model Subsynchronous resonance</i> .....	20
Gambar 3.2	Turbin generator <i>shaft</i> sistem .....	24
Gambar 3.3	Pemodelan matematis turbin generator <i>shaft</i> sistem.....	24
Gambar 3.4	Bagan percobaan SBM SSR dengan simulink.....	26
Gambar 3.6	Blok generator sinkron.....	27
Gambar 3.7	Blok turbin uap-generator <i>shaft</i> sistem .....	29
Gambar 3.8	Blok sistem transmisi .....	30
Gambar 3.9	Blok beban .....	31
Gambar 3.18	Desain simulasi SBM SSR dan TCSC dengan menggunakan simulink 33	
Gambar 3.19	Blok TCSC .....	33
Gambar 4.1	Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator pada keadaan normal tanpa kompensasi seri. ....	36

Gambar 4.2	Hasil simulasi arus gangguan 3 fasa 3 fasa terhadap kestabilan.....37	
	Osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator	
Gambar 4.3	Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin- .....38	
	generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor	
	fix dengan tingkat kompensasi 25 %.	
Gambar 4.4	Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin- .....39	
	generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor	
	fix dengan tingkat kompensasi 35 %.	
Gambar 4.5	Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-..... 40	
	generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor	
	fix dengan tingkat kompensasi 45 %.	
Gambar 4.6	Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-..... 41	
	generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor	
	fix dengan tingkat kompensasi 55 %.	
Gambar 4.7	Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-..... 42	
	generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor	
	fix dengan tingkat kompensasi 65 %.	
Gambar 4.8	Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-..... 43	
	generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor	
	fix dengan tingkat kompensasi 75 %.	
Gambar 4.9	Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-..... 44	
	generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor	
	fix dengan tingkat kompensasi 85 %.	
Gambar 4.10	Plot pole turbin-generator shaft sistem..... 48	
Gambar 4.11	Hasil simulasi peredaman osilasi <i>subsynchronous resonance</i> .....50	
	dengan TCSC pada mode operasi <i>kapasitif boost mode</i>	
Gambar 4.12	Hasil simulasi peredaman osilasi <i>subsynchronous resonance</i> ..... 51	
	dengan TCSC pada mode operasi <i>induktif boost mode</i> .	
Gambar 4.13	Hasil simulasi arus, tegangan dan daya yang terukur pada TCSC.. 53	
	pada mode operasi <i>induktif boost mode</i>	

Gambar 4.14 Hasil simulasi impedansi dan sudut penyalaan TCSC .....	54
Gambar 4.15 Hasil Hasil simulasi arus, tegangan dan daya saluran .....	55
Gambar 4.16 Arus, tegangan dan daya yang dibangkitkan TCSC dan diinjeksikan ke saluran.	56



## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Hubungan tingkat kompensasi seri dengan kapasitansi kapasitor fix .....	46
Tabel 4.2 Hubungan tingkat kompensasi seri dengan frekuensi <i>subsynchronous</i> .....	46
Tabel 4.3 frekuensi natural torsional turbin-generator <i>shaft</i> sistem .....	48

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1** Persamaan Induktansi Persamaan Matriks Fluks Generator Sinkron..63
- Lampiran 2** Penurunan Persamaan Matriks Transformasi Park's.....65
- Lampiran 2** Parameter Percobaan Simulasi “*Second Benchmark Model*.....67  
*Subsynchronous Resonance IEEE Trans., v.PAS-104,n.p*” Dengan  
Menggunakan Matlab Simulink
- Lampiran 3** Parameter Simulasi Dengan Menggunakan Matlab Simulink.....69
- Lampiran 4** Blok Diagram Simulasi Dengan Menggunakan Matlab Simulink.....74

## DAFTAR SINGKATAN

FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i>
SBM SSR	<i>Second Benchmark Model Subsynchronous Resonance</i>
TCSC	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
TCR	<i>Thyristor Controlled Reactor</i>

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Sistem Tenaga Listrik merupakan sistem yang kompleks. Komponen penyusun Sistem tenaga listrik secara umum terbagi menjadi dua yaitu komponen mekanis dan komponen listrik. Komponen mekanis yang dimaksud terdiri dari generator yang dikopling dengan turbin atau primemover sedangkan komponen listriknya terdiri dari stator dan rotor generator beserta keseluruhan sistem jaringan listrik. Arus yang mengalir pada jaringan transmisi merupakan hasil modulasi arus dengan frekuensi base dan arus dengan frekuensi natural. Arus dengan frekuensi base dipengaruhi oleh output generator sedangkan arus dengan frekuensi natural dipengaruhi nilainya oleh karakteristik nilai L dan C pada jaringan.

Hubungan antara sistem mekanis dan listrik sistem tenaga listrik dihubungkan oleh suatu transformasi yang disebut dengan *Park Transformation*. Arus yang mengalir pada jaringan juga mengalir di stator generator dan kemudian direfleksikan ke rotor generator. Dengan transformasi park maka arus dengan frekuensi base jika dilihat dari stator pada keadaan steady statenya merupakan arus dc sedangkan arus dengan frekuensi natural akan ditransformasi kedalam arus dengan frekuensi *supersynchronous* (frekuensi base+frekuensi natural) dan frekuensi *subsynchronous* (frekuensi base-frekuensi natural).

Dilain pihak hubungan turbin-generator *shaft* sistem sebagai sistem mekanis secara alami memiliki frekuensi natural torsional. Permasalahannya adalah Arus dengan frekuensi *subsynchronous* ini dapat menghasilkan torsi yang besarnya berosilasi secara eksponensial jika besarnya frekuensi *subsynchronous* bertepatan dengan frekuensi natural torsional mode yang dihasilkan oleh turbin generator shaft sistem. Dan keadaan tersebut disebut dengan *Subsynchronous resonance*. *Subsynchronous resonance* ini menyebabkan sistem berosilasi menjadi tidak stabil dan memicu kerusakan pada generator. Untuk mengantisipasi efek *Subsynchronous*

*resonance* ini maka digunakan *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) yang bekerja untuk memberi efek peredaman osilasi.

## 1.2 TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan permasalahan tersebut, tujuan penulisan skripsi ini adalah penulis ingin menganalisis fenomena gejala *subsynchronous resonance* pada sistem tenaga listrik terutama pada turbin-generator *shaft* sistem akibat kompensasi seri jaringan dengan kapasitor fix dan arus gangguan 3 fasa. Selain itu penulis juga melakukan analisis terhadap peredaman osilasi torsi *subsynchronous resonance* yang timbul dengan menggunakan TCSC.

## 1.3 BATASAN MASALAH

Pada skripsi ini dibahas hal-hal berikut:

1. Pemodelan simulasi *subsynchronous resonance* berdasarkan *Second Benchmark Model IEEE* dan pemodelan peredaman gejala osilasi torsi yang ditimbulkan dengan menggunakan TCSC.
2. Simulasi pengaruh level kompensasi seri dan arus gangguan terhadap terjadinya *subsynchronous resonance* dengan menggunakan software matlab simulink.
3. Analisis hasil simulasi pengaruh level kompensasi seri dan arus gangguan terhadap terjadinya *subsynchronous resonance*.
4. Simulasi unjuk kerja TCSC dalam meredam efek *subsynchronous resonance* dengan menggunakan software matlab simulink berdasarkan *kapasitif boost mode dan induktif boost mode*.
5. Analisis hasil simulasi unjuk kerja TCSC *induktif boost mode* dalam meredam efek *subsynchronous resonance*.

## 1.4 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan dimulai dengan studi literatur mengenai efek *Subsynchronous resonance* dan TCSC. Kemudian dilakukan simulasi dengan menggunakan software matlab simulink versi 7.6.0.324 (R 2008) untuk kemudian dibandingkan dan dianalisis berdasarkan dasar teori hasil studi literatur. Parameter

parameter yang digunakan pada simulasi merupakan data campuran diambil dari berbagai sumber dan hasil perhitungan.

### 1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Agar mempermudah pembahasan, penulisan dibagi dalam beberapa bab. Bab satu menguraikan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan, bab dua membahas tentang dasar teori kapasitor fix sebagai kompensasi seri pada jaringan listrik, *Subsynchronous resonance* dan *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC), bab tiga membahas pemodelan matematis simulasi berdasarkan parameter *Second Benchmark Model IEEE*. Bab 4 membahas simulasi dan analisis pengaruh level kompensasi seri dan arus gangguan terhadap efek *subsynchronous resonance*. Pada bab empat juga dibahas simulasi dan analisis pengaruh pengontrolan TCSC untuk meredam efek *subsynchronous resonance*. Bab 5 merupakan penutup yang berisi kesimpulan.

## BAB 2 LANDASAN TEORI

### 2.1 Kapasitor Fix Sebagai Kompensasi Seri Pada Saluran Transmisi

Penggunaan kapasitor fix sebagai kompensasi seri pada saluran transmisi telah dimulai secara luas sejak awal tahun 70-an. Hal ini karena kompensasi seri adalah cara yang efektif untuk meningkatkan kapabilitas transfer daya listrik pada saluran transmisi tegangan tinggi. Penyisipan reaktansi kapasitif secara seri dengan reaktansi induktif alami pada saluran akan menurunkan impedansi total saluran. Selain itu kompensasi seri juga meningkatkan daya maksimum yang ditransmisikan dan mengurangi daya reaktif yang hilang. Meskipun kapasitor seri tidak digunakan untuk pengaturan tegangan akan tetapi berkontribusi untuk memperbaiki pengontrolan tegangan dan stabilitas sudut fase.

### 2.2 Karakteristik Saluran Transmisi Dengan Rugi-Rugi Daya Diabaikan

Parameter pada saluran transmisi secara umum ditentukan oleh resistansi seri  $r$ , induktansi seri  $l$ , konduktansi shunt  $g$  dan kapasitansi shunt  $c$ . Untuk saluran transmisi tanpa rugi-rugi maka parameter  $r$  dan  $g$  tidak digunakan. Persamaan arus dan tegangan pada saluran transmisi dengan mengabaikan rugi-rugi daya yang terjadi dituliskan sebagai

$$I_s = \frac{V_s \cos \beta a - V_r}{jZ_0 \sin \beta a} \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan

$$Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}} \Omega = \text{karakteristik impedansi}$$

$$\beta = \omega \sqrt{lc} \text{ rad / km}$$

$$\beta a = \omega \sqrt{lc} a = \text{panjang elektik dari } a \text{ km saluran transmisi}$$

Pada persamaan diatas  $l$  adalah induktansi saluran dalam henry/km,  $c$  adalah kapasitansi shunt saluran dalam farad/km dan  $\frac{1}{\sqrt{lc}}$  adalah kecepatan propagasi efek

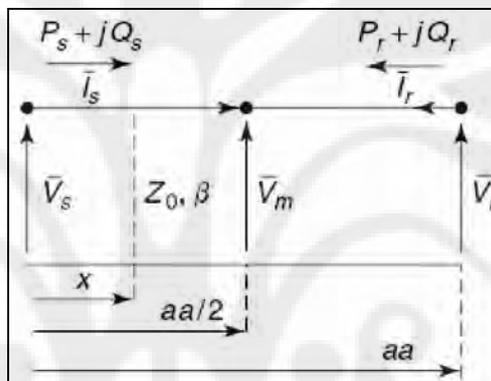
elektromagnetik pada saluran transmisi. Persamaan daya yang dialirkan pada terminal pengirim adalah

$$S_s = P_s + jQ_s = \frac{V_s V_r \sin \delta}{Z_0 \sin \beta a} + j \frac{V_s^2 \cos \beta a - V_s V_r \cos \delta}{Z_0 \sin \beta a} \dots\dots\dots(2.2)$$

dan persamaan daya yang diterima pada hādala 1 penerima hādala

$$S_r = P_r + jQ_r = -\frac{V_s V_r \sin \delta}{Z_0 \sin \beta a} + j \frac{V_r^2 \cos \beta a - V_s V_r \cos \delta}{Z_0 \sin \beta a} \dots\dots\dots(2.3)$$

Gambar berikut mengilustrasikan pentransferan daya pada saluran transmisi antara terminal pengirim dan terminal penerima.



Gambar 2.1 transfer daya pada saluran transmisi

Dari persamaan daya pada sisi pengirim dan penerima maka persamaan daya yang mengalir pada saluran transmisi adalah

$$P = \frac{V_s V_r \sin \delta}{Z_0 \sin \beta a} \text{ atau } P = \frac{V_s V_r}{X_l} \sin \delta \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan  $Z_0 \sin \beta a = Z_0 \beta a = \omega l a = X_l$

**2.3 Pengaruh Kompensasi Seri Terhadap Impedansi Jaringan**

Performa saluran ditentukan oleh karakteristik impedansi  $Z_c$  dan panjang listrik (disebut juga *line angle*). Tanpa kompensasi dengan mengabaikan rugi-rugi daya yang hilang persamaan line parameter dituliskan sebagai

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{x_L}{b_c}} = \sqrt{\frac{X_L}{B_C}} \text{ dengan } \theta = \beta l \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan konstanta phase  $\beta$  dinyatakan sebagai

$$\beta = \omega\sqrt{LC} = \sqrt{x_L b_c} = \frac{\sqrt{X_L B_C}}{l} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan : L = induktansi seri per satuan panjang

C = kapasitansi shunt per satuan panjang

$x_L$  = reaktansi induktansi seri per satuan panjang

$b_c$  = reaktansi kapasitansi shunt *susceptance* per satuan panjang

$X_L$  = reaktansi induktansi total

$B_C$  = reaktansi kapasitansi shunt *susceptance* total

l = panjang saluran

Dengan menggunakan tanda superscript (') sebagai tanda untuk sistem yang di kompensasi maka nilai efektif reaktansi seri yang dikompensasi dengan  $C_{se}$  sebagai kompensasi kapasitif seri dalam satuan perunit length adalah

$$x'_L = x_L - \frac{1}{\omega C_{se}} = x_L - x_{C_{se}} = x_L(1 - k_{se}) \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana  $k_{se}$  adalah level kompensasi kapasitif seri didefinisikan sebagai

$k_{se} = \frac{x_{C_{se}}}{x_L}$  dengan  $k_{se}$  bernilai positif untuk kompensasi seri kapasitif. Nilai efektif

dari karakteristik impedansi dan konstanta phase dengan kompensasi seri diberikan sebagai

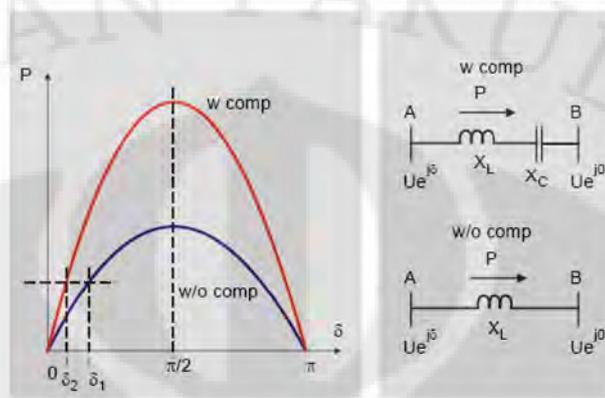
$$Z'_c = \sqrt{\frac{X'_L}{b_c}} = Z_c \sqrt{1 - k_{se}} \text{ dan } \beta' = \beta \sqrt{1 - k_{se}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dapat dilihat dari persamaan diatas bahwa kompensasi seri menurunkan nilai  $Z_c$  dan  $\beta$ .

#### 2.4 Pengaruh Kompensasi Seri Terhadap Kestabilan Sudut Fase

Pada gambar di bawah ini arus yang mengalir dari terminal A dan B bukan hanya ditentukan oleh perbedaan tegangan antara dua terminal tetapi juga dikarenakan perbedaan phase antara kedua terminal tersebut. Jika bagian reaktansi induktif dikompensasi dengan menyisipkan kapasitor seri maka total reaktansi saluran menjadi lebih kecil dan diperoleh sudut phase yang lebih kecil pada salah satu

terminal. Berikut kurva yang mengilustrasikan hubungan deviasi sudut antara dua terminal bus dengan kapasitas transfer daya.

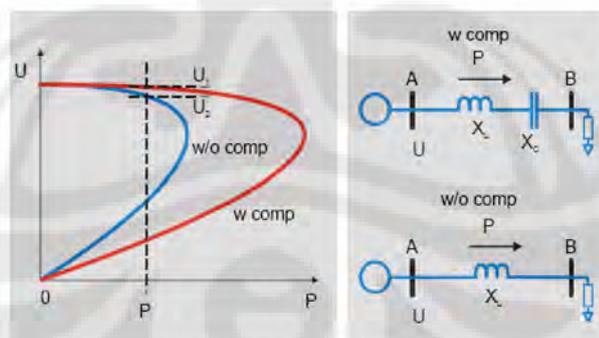


Gambar 2.2 Pengaruh kompensasi seri terhadap kestabilan sudut fase

Secara jelas dapat kita lihat dari grafik kurva diatas bahwa terjadi peningkatan pada maksimum daya yang ditransmisikan dan untuk level daya transmisi yang sama sudut fasenya lebih kecil dari  $\delta_1$  menjadi  $\delta_2$ . Dengan demikian maka selisih sudut phase antara terminal semakin besar.

### 2.8 Pengaruh Kompensasi Seri Terhadap Kestabilan Tegangan

Pada gambar berikut diilustrasikan pengaruh penggunaan kapasitor fix sebagai kompensasi seri terhadap kestabilan tegangan terminal.



Gambar 2.3 Pengaruh kompensasi seri terhadap kestabilan tegangan

Penyisipan kapasitor sebagai kompensasi seri mengubah karakteristik kurva. Dari grafik diatas dapat kita simpulkan bahwa pada level daya yang sama maka tegangan terminal dengan kompensasi seri lebih tinggi nilainya daripada tanpa kompensasi

seri. Hal tersebut menyebabkan jatuh tegangan yang lebih kecil yaitu dari  $|U_N - U_2|$  menjadi  $|U_N - U_1|$ .

### 2.7 Pengaruh Kompensasi Seri Terhadap Transfer Daya Maksimum

Pada pembahasan awal telah disebutkan bahwa kompensasi seri berpengaruh terhadap penurunan nilai impedansi saluran, menurunkan nilai tegangan jatuh, dan memperbaiki kestabilan beda phase antara dua terminal. Kesemuanya itu berpengaruh terhadap kapasitas daya yang ditransmisikan dan efek pemasangan kapasitor bank sebagai kompensasi seri terhadap kapasitas daya maksimum yang dapat di transmisikan adalah mengikuti persamaan berikut

$$P_R = \frac{VsVr}{Xl'} \sin \delta \dots\dots\dots(2.9)$$

$$\text{Atau } P_R = \frac{VsVr}{Z_c' \theta'} \sin \delta \dots\dots\dots(2.10)$$

dengan :

$$\theta' = \theta \sqrt{1 - kse}$$

$$Z_c' = Z_c \sqrt{1 - kse}$$

Dari persamaan tersebut maka nilai daya yang ditransmisikan dapat ditingkatkan dengan cara menurunkan  $Z_c'$  atau  $\theta'$  ataupun keduanya. Penggunaan kapasitor bank sebagai kompensasi seri maka dapat menurunkan kedua nilai tersebut secara bersamaan.

### 2.8 Perhitungan Level Kompensasi Seri Kapasitor Fix

Perhitungan level kompensasi seri kapasitor fix dilakukan dengan persentase terhadap impedansi transmisi jika dinyatakan dalam satuan Per Unit ataupun terhadap persentase nilai reaktansi induktansi saluran transmisi jika dinyatakan dalam satuan farad. Secara matematis perhitungan level kompensasi seri dituliskan sebagai berikut.

$$X_c (\text{dalampu}) = k\% \times X_L (\text{dalampu})$$

$$L = \frac{pu}{2\pi 60} \times \left( \frac{(KV)^2}{MVA} \right) \text{henry} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{\omega k \% x X_L} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi 60)^2 k \% x p u x \left( \frac{(KV)^2}{MVA} \right)} \dots \dots \dots (2.14)$$

## 2.9 Subsynchronous Resonance

### 2.9.1 Pengertian Subsynchronous Resonance

Secara umum *Subsynchronous Resonance* adalah resonansi yang terjadi pada sistem tenaga listrik antara torsi mekanis yang dihasilkan dari hubungan turbin generator *shaft* sistem dengan frekuensi natural mode dengan torsi listrik dengan frekuensi *subsynchronous*. Arus yang mengalir pada saluran AC memiliki dua komponen yaitu frekuensi yang dihasilkan oleh pembangkit dan satu lagi adalah frekuensi natural jaringan yang nilainya dipengaruhi oleh besarnya L dan C pada jaringan. Besarnya frekuensi natural dinyatakan dengan

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \omega_B \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \dots \dots \dots (2.15)$$

Sedangkan persamaan umum dari arus yang mengalir pada saluran transmisi dapat kita tuliskan sebagai

$$i(t) = K[A \sin(\omega_1 t + \psi_1) + B e^{-\xi \omega_2 t} \sin(\omega_2 t + \psi_2)] \dots \dots \dots (2.16)$$

dengan  $\omega_1$  adalah frekuensi dari sumber dan  $\omega_2$  adalah frekuensi pada saluran. Persamaan arus diatas menyatakan besarnya arus yang mengalir pada kumparan stator yang kemudian di induksikan ke rotor. Pada saat ditransformasikan ke rotor kumparan ,berdasarkan *transformasi Park* arus dengan komponen frekuensi 60 Hz jika dilihat dari rotor seolah olah adalah arus dc pada keadaan steady state. Sedangkan arus dengan frekuensi  $\omega_2$  ditransformasikan menjadi arus yang memiliki frekuensi *supersynchronous* sebesar  $(60 + \omega_2)$  dan frekuensi *subsynchronous*  $(60 - \omega_2)$ . Arus dengan frekuensi *subsynchronous* mengalir pada rotor dan menghasilkan torsi listrik subsynchronous yang akan berosilasi dengan torsi mekanis. Gejala osilasi antara torsi mekanis dan torsi listrik inilah yang disebut dengan *subsynchronous resonance*.

Universitas Indonesia

## **2.9.2 Macam-Macam Interaksi *Subsynchronous Resonance***

Terdapat beberapa cara suatu sistem tenaga listrik berinteraksi dengan efek *subsynchronous*. Secara umum interaksi yang menyebabkan timbulnya *subsynchronous resonance* adalah *Induction Generator Effect*, *Transien Torque* dan *Torsional Interaction*.

### **2.9.2.1 *Induction Generator Effect***

*InductionGenerator Effect* disebabkan karena sistem tenaga listrik menghasilkan eksitasi diri. Nilai resistansi rotor pada keadaan frekuensi *subsynchronous* dilihat dari rangkaian jangkar adalah negative sedangkan saluran memperlihatkan resistansi rotor untuk arus yang sama adalah positif. Jika resistansi negative pada generator lebih besar dari pada resistansi positif pada saluran maka akan timbul arus *subsynchronous*.

### **2.9.2.2 *Torsional Interaction***

Interaksi torsi terjadi ketika torsi *subsynchronous* yang diinduksikan di generator terkunci oleh natural torsi dari *shaft* sistem turbin generator. Interaksi torsional melibatkan sistem mekanis dan elektris. Sistem mekanis dicirikan oleh hubungan turbine generator *shaft* sistem sedangkan sistem elektrisnya terdiri dari stator generator dan jaringan transmisi.

### **2.9.2.3 *Transien Torque***

Torsi transien dihasilkan ketika sistem dalam keadaan terganggu. Gangguan pada sistem menyebabkan perubahan yang tiba tiba pada jaringan dan menghasilkan perubahan arus yang tiba tiba yang cenderung untuk berosilasi pada frekuensi natural saluran transmisi. Untuk jaringan yang dikompensasi dengan kapasitor seri arus transiennya akan mengandung satu atau lebih frekuensi osilasi yang tergantung oleh nilai L dan C. Selisih antara frekuensi natural jaringan dengan frekuensi natural jaringan inilah yang disebut dengan frekuensi *subsynchronous*. Jika frekuensi jaringan *subsynchronous* bertepatan dengan mode frekuensi natural kopel turbin generator akan terjadi torsi puncak yang sangat besar karena torsi ini secara langsung berbanding dengan magnitude arus osilasi yang terjadi.

## **2.9.3 *Torque Fatigue Sebagai Akibat Subsynchronous Resonance***

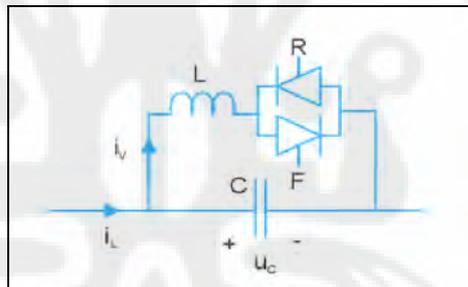
Universitas Indonesia

*Torque fatigue* (kelelahan torsi) adalah akibat fisik dari efek *subsynchronous resonance*. Fatigue adalah proses perubahan struktur suatu material secara permanen akibat fluktuasi tekanan dan regangan. Pada kasus Subsynchronous Resonance ini jika besarnya tekanan akibat osilasi terus menerus dikerjakan pada turbine generator *shaft* sistem maka selain munculnya kelelahan torsi maka akan terjadi juga kerusakan berupa keretakan pada *shaft* sistem.

## 2.10 TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) Sebagai Alat Kendali Listrik FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*)

### 2.10.1 Deskripsi TCSC

TCSC adalah salah satu alat FACTS yang digunakan untuk meningkatkan kapabilitas pentransferan daya pada saluran transmisi listrik tegangan tinggi. Secara fisik TCSC adalah rangkaian alat elektronika daya yang terdiri dari TCR (*thyristor controlled reactor*) yang dihubungkan parallel dengan kapasitor fix. Lebih jelasnya gambar rangkaian TCSC adalah sebagai berikut.

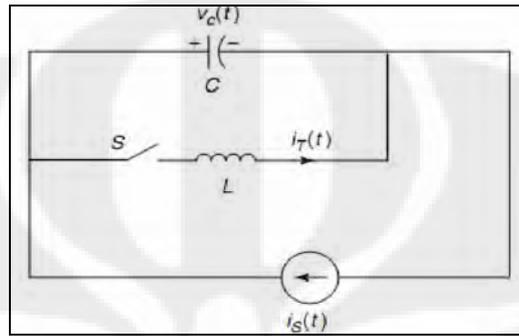


Gambar 2.4 rangkaian TCSC

Tiristor yang membawa arus pada arah positif ditandai dengan simbol F yang berarti *Forward direction*. Tiristor ini hanya akan ditrigger ketika tegangan positif kapasitor bernilai positif. Sedangkan tiristor yang membawa arus negatif ditandai dengan simbol R yang berarti *Revers direction*. Tiristor ini hanya akan ditrigger ketika tegangan kapasitor bernilai negatif

**2.10.2 Operasi TCSC Pada Keadaan Steady State**

Untuk menganalisis operasi TCSC pada keadaan steady statenya maka diperlukan rangkaian penyederhanaan TCSC gambar berikut.



Gambar2.5 pemodelan TCSC

Arus transmisi di modelkan sebagai *external current source*, arus yang melalui kapasitor fix ditentukan dengan persamaan

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_s(t) - i_T(t).u \dots\dots\dots(2.17)$$

dengan nilai  $u=1$  ketika saklar tertutup dan tiristor terkonduksi dan  $u=0$  untuk keadaan sebaliknya. Persamaan arus yang melalui tiristor adalah

$$L \frac{di_T}{dt} = v_c.u \dots\dots\dots(2.18)$$

dan arus saluran dinyatakan dengan

$$i_s(t) = I_m \cos \omega t \dots\dots\dots(2.19)$$

Dalam operasi normalnya TCSC di trigger dua kali setiap satu kali siklus dengan waktu  $t_1$  dan  $t_3$  yang dinyatakan dengan

$$t_1 = -\frac{\beta}{\omega} \text{ dan } t_3 = \frac{\pi - \beta}{\omega} \dots\dots\dots(2.20)$$

dan turnoff untuk selang waktu  $t_2$  dan  $t_4$  yang dinyatakan dengan

$$t_2 = t_1 + \frac{\sigma}{\omega} \text{ dan } t_4 = t_3 + \frac{\sigma}{\omega} \dots\dots\dots(2.21)$$

Hubungan  $\beta, \alpha$  dan  $\sigma$  dinyatakan dengan  $\beta = \pi - \alpha$  dan  $\sigma = 2\beta \dots\dots\dots(2.22)$

Dari persamaan diatas diperoleh persamaan arus yang melalui TCSC pada keadaan steady state

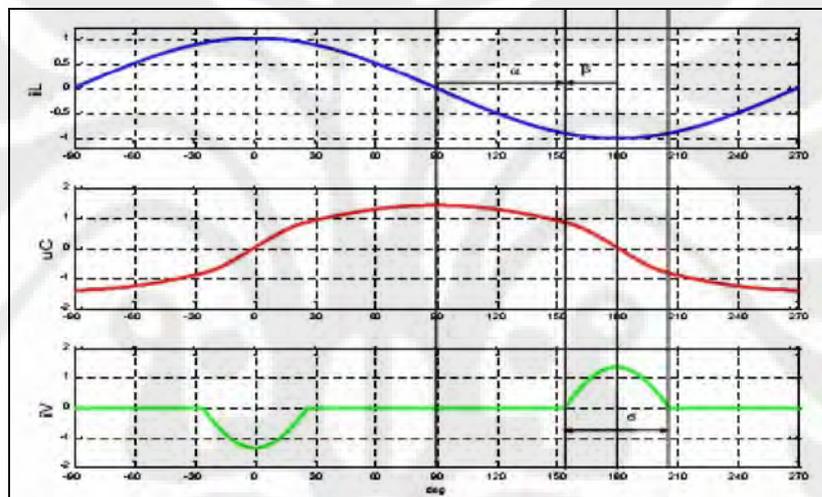
$$i_r(t) = \frac{k^2}{k^2 - 2} \operatorname{Im} \left[ \cos \omega t - \frac{\cos \beta}{\cos k\beta} \cos \omega_r t \right] \dots\dots\dots(2.23)$$

$$\text{dengan } \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ dan } k = \frac{\omega_r}{\omega} = \sqrt{\frac{1}{\omega L \omega C}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \dots\dots\dots(2.24)$$

Tegangan kapasitor fix pada TCSC dinyatakan dengan

$$v_c(t) = \frac{\operatorname{Im} X_C}{k^2 - 1} \left( -\sin \omega t + k \frac{\cos \beta}{\cos k\beta} \sin \omega_r t \right); -\beta \leq \omega t \leq \beta \dots\dots\dots(2.25)$$

Berikut adalah bentuk gelombang arus line, tegangan kapasitor dan arus TCSC pada keadaan *steady state*

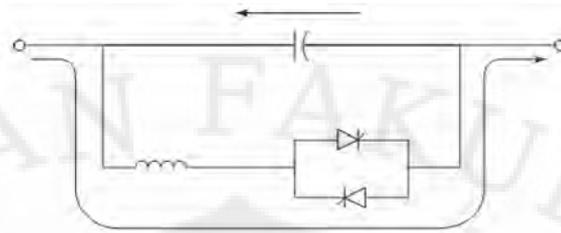


Gambar 2.6 gelombang arus line, tegangan kapasitor dan arus TCSC

Terdapat beberapa mode operasi TCSC yaitu

1. *By Pass thyristor mode*

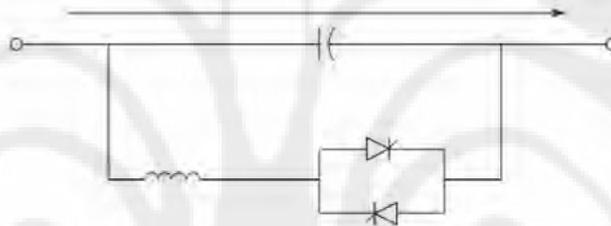
Pada mode operasi ini sudut konduktansi tiristor dibuat penuh yaitu 180°. Pulsa switching diaplikasikan segera setelah tegangan yang melalui tiristor mencapai nilai nol. Tegangan kemudian menjadi positif dan menghasilkan arus sinusoidal yang mengalir melalui tiristor. TCSC berperilaku seperti kombinasi kapasitor induktor. Berikut adalah gambar TCSC pada kondisi *By Pass thyristor mode*.



Gambar 2.7 By Pass thyristor mode

### 2. Blocked thyristor mode

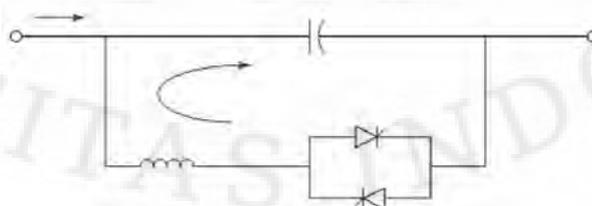
Pada mode operasi ini tidak ada sinyal triggering yang dikirimkan ke tiristor TCSC. Pada mode ini tiristor tidak terkonduksi. Ketika TCSC dalam keadaan *blocking mode* maka ini dapat ditinjau seperti kapasitor fix. Pada mode ini kasus *Subsynchronous* dapat terjadi. berikut adalah gambar TCSC pada kondisi Blocked thyristor mode.



Gambar 2.8 Blocked thyristor mode

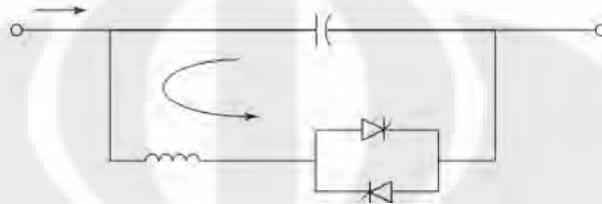
### 3. Kapasitif boost mode

Pada *kapasitif boost mode* katup thyristor di trigger ketika tegangan dan arus kapasitor memiliki polaritas yang negatif. Kondisi ini menyebabkan arus pada TCR memiliki arah berkebalikan terhadap arus pada kapasitor. Arus loop sebagaimana gambar berikut meningkatkan tegangan yang melalui kapasitor dan secara otomatis meningkatkan reaktansi kapasitif dan level kompensasi seri. Untuk menghindari resonansi maka sudut penyalaan dibuat dalam rentang  $\alpha_{min} \leq \alpha \leq 180^\circ$ . Nilai maksimum reaktansi TCSC diperoleh ketika  $\alpha = \alpha_{min}$ . Berikut adalah gambar TCSC pada keadaan *Kapasitif boost mode*.



Gambar 2.9 *Kapasitif boost mode*4. *Induktif boost mode*

Pada mode ini komponen frekuensi dasar arus TCR sefase dengan arus line dan besarnya magnitude melebihi arus line. Komponen frekuensi dasar dari arus kapasitor dalam arah melawan arah arus line sebagaimana ditunjukkan gambar berikut.

Gambar 2.10 *Induktif boost mode*

Oleh karena itu fase tegangan kapasitor yang disisipkan secara seri dengan line menjadi induktif ketika mengacu pada arah arus saluran. Pada mode ini reaktansi TCSC adalah induktif.

#### 2.10.4 Rangkaian TCSC Untuk Meredam Efek *Subsynchronous Resonance*

##### 2.10.4.1 Pengaturan impedansi TCSC

Pengaturan Nilai Impedansi TCSC adalah hal yang penting karena hal tersebut mempengaruhi besarnya rasio peredaman yang dihasilkan untuk meredam efek SSR. Karena nilai impedansi nyata TCSC selalu berubah ubah berdasarkan fungsi arus dan tegangan sesaat maka kita dapat mengatur Impedansi TCSC dengan menentukan perbandingan antara reaktansi TCSC dan reaktansi kapasitor bank.

Besarnya reaktansi TCSC dihitung berdasarkan perbandingan antara tegangan pada kapasitor fix  $V_{CF}$  dengan arus maksimum saluran  $I_m$ .

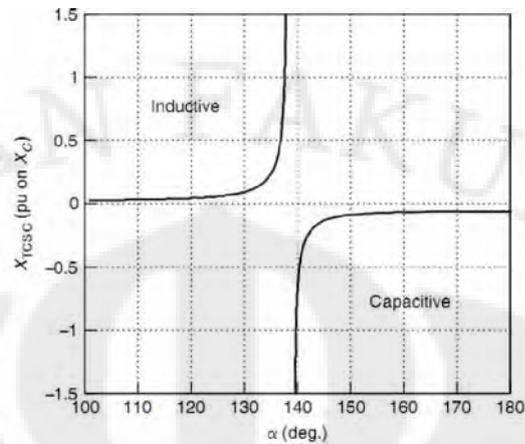
$$X_{TCSC} = \frac{V_{CF}}{I_m} = X_C - \frac{X_C^2}{(X_C - X_L)} \frac{2\beta + \sin 2\beta}{\pi} + \frac{4X_C^2}{(X_C - X_L)} \frac{\cos^2 \beta}{(k^2 - 1)} \frac{(k \tan k\beta - \tan \beta)}{\pi} \dots (2.26)$$

Dapat juga reaktansi TCSC dinyatakan dalam satuan per unit dari reaktansi fix  $X_C$  sebagai berikut.

$$X_{net} = 1 - \frac{X_C}{(X_C - X_L)} \frac{\sigma + \sin \sigma}{\pi} + \frac{4X_C}{(X_C - X_L)} \frac{\cos^2(\sigma/2)}{(k^2 - 1)} \frac{(k \tan(k\sigma/2) - \tan(\sigma/2))}{\pi} \dots (2.27)$$

Dengan  $X_{net} = X_{TCSC}/X_C$ . Dan hubungan antara per unit  $X_{net}$  dengan sudut penyalaan adalah sebagaimana grafik berikut.

Universitas Indonesia

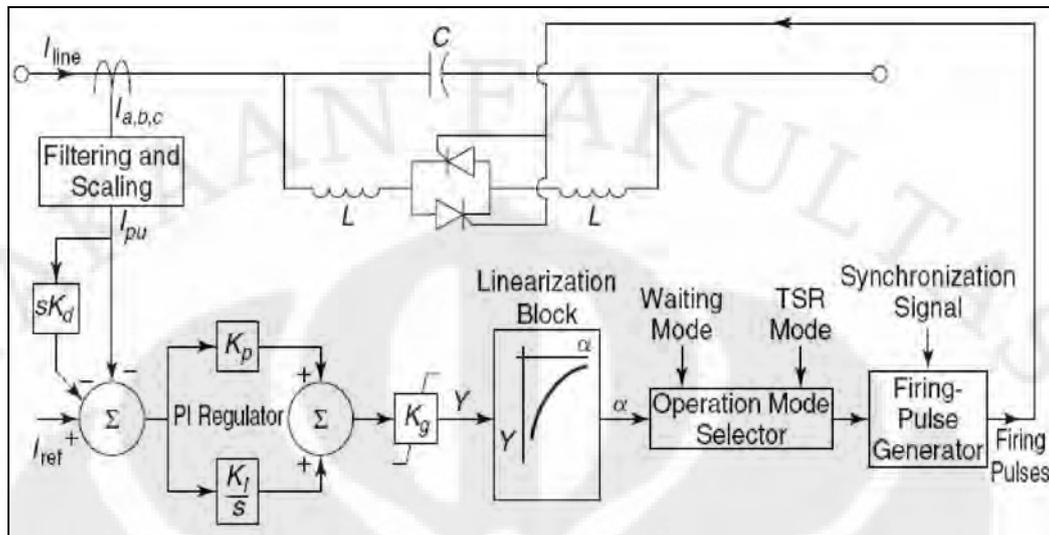


Gambar 2.11 kurva sudut penyalan terhadap daerah operasi kerja TCSC.

Impedansi TCSC sebenarnya adalah kapasitif pada frekuensi sinkron dan dapat ditingkatkan diatas nilai kapasitansi kapasitor seri dengan pengaturan sudut penyalan yang tepat. Akan tetapi pengontrollan impedansi TCSC pada frekuensi *subsynchronous* memperlihatkan karakteristik impedansi yang berbeda. TCSC bertindak untuk mengeliminasi risiko frekuensi resonansi dengan membuat kapasitor seri bersifat induktif pada daerah frekuensi *subsynchronous*.

#### 2.10.4.2 Pengontrollan Rangkaian TCSC

Pengontrollan *close loop* pada TCSC disebut juga dengan *constant current control*. Pada pengontrollan arus konstan, besar arus line yang diinginkan dijadikan sebagai sinyal referensi ke pengontrol TCSC, yang bertugas untuk menjaga nilai arus line pada nilai yang telah ditentukan. Berikut ini adalah gambar rangkaian pengontrol TCSC CC.



Gambar 2.12 rangkaian pengendalian TCSC dengan metode CC control

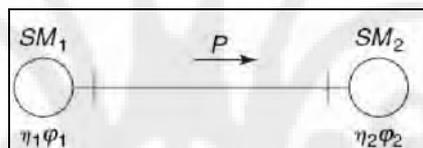
Pada skema ini arus 3 fasa diukur dan disalurkan pada rangkaian pengukuran. Sinyal penyearah dilewatkan melalui blok filter yang terdiri dari *high pass filter* dengan frekuensi 60 Hz dan 120 Hz. Untuk meningkatkan peredaman osilasi seperti osilasi *Subsynchronous erminal* maka *derivative line-current feedback* ditambahkan pada rangkaian pengontrol TCSC pengontrol. Sinyal ini kemudian di normalisasi untuk memastikan konsistensi per unit dengan sinyal arus referensi. Pengontrol yang digunakan adalah *proportional-integral (PI)*. Sebuah blok linearisasi mengubah sinyal keluaran PI pengontrol menjadi sinyal sudut penyalan. Sudut penyalan alpha diumpun ke blok operation mode selector untuk ditentukan operasi mode TCSC berdasarkan pengukuran sudut penyalan yang diperoleh. Selain itu sebuah mode operasi selector juga digunakan sebagai proteksi. Selama kondisi rangkaian short pada saat arus yang melalui metaloxide varistor (MOV) melebihi *threshold*, TCSC di switch ke mode *bypassed-thyristor mode* atau *thyristor-switched reactor (TSR) mode*. Pada mode ini tiristor terkonduksi penuh ( $\sigma = 180^\circ$ ), menurunkan tegangan TCSC dan arus yang melalui TCSC dan dengan demikian menurunkan tekanan pada MOV. Setelah arus gangguan hilang maka “*waiting mode*” diimplementasikan ketika kapasitor kembali berfungsi maka tegangan dc-offset yang dihasilkan di-discharge pada mode ini. Setelah blok operation mode selector menentukan operasi kerja mode TCSC maka sinyal sudut penyalan keluaran blok ini

Universitas Indonesia

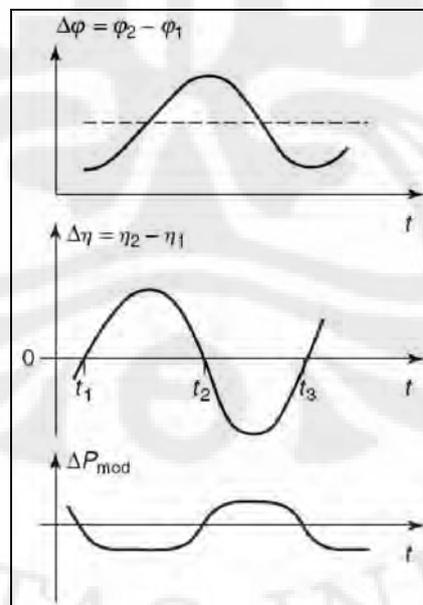
dimodulasi dengan sinyal sinkronisasi untuk dihasilkan pulsa penyalan dengan frekuensi tertentu. Pulsa penyalan ini digunakan untuk mentrigger katup katup tiristor TCSC. Dalam mekanismenya pengontrolan sudut penyalan TCSC efektif ketika di sinkronisasi dengan arus line dikarenakan arus line mewakili sinyal sinusoidal jaringan. Sinkronisasi dengan tegangan TCSC akan menghasilkan kesalahan karena tegangan ini disertai dengan komponen frekuensi harmonik.

#### 2.10.4.3 Konsep Peredaman Osilasi Dengan TCSC

TCSC digunakan untuk meredam gejala *Subsynchronous Resonance*. Prinsip utama TCSC adalah menyediakan peredaman elektromekanis antara sistem listrik dan mekanis pembangkit dengan mengamati perubahan reaktansi pada interkoneksi jaringan. Modulasi aktif “*boosting*” TCSC digunakan untuk menyediakan damping osilasi elektromekanis ( 0,1 – 2 Hz) pada sistem interkoneksi transmisi. Konsep peredaman osilasi dengan menggunakan TCSC diilustrasikan dengan gambar berikut.



Gambar 2.14 dua mesin sinkron yang saling terinterkoneksi



Gambar 2.15 grafik hubungan variasi ermina sudut rotor, ermina kecepatan rotor dan ermina daya aktif antara dua ermina.

Pada gambar diatas mesin SM1 menyuplai daya ke mesin lain SM2, melalui saluran transmisi. Misalkan kecepatan dan sudut rotor mesin SM1 di tandai dengan  $\eta_1$  dan  $\phi_1$  sedangkan kecepatan dan sudut rotor mesin SM2 di tandai dengan  $\eta_2$  dan  $\phi_2$ . Selama terjadi ayunan daya maka mesin berosilasi pada sudut relative  $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ . Jika daya saluran dimodulasi dengan TCSC maka akan dihasilkan torsi tambahan untuk mesin. Torsi ini tandanya berlawanan dengan turunan deviasi sudut rotor maka osilasi akan teredam. Strategi yang dilakukan oleh TCSC untuk meredam osilasi adalah sebagai berikut : ketika TCSC menerima kecepatan mesin SM2 lebih rendah daripada kecepatan SM1 maka  $\Delta\eta = \eta_2 - \eta_1$  nilainya negative sehingga TCSC meningkatkan daya yang mengalir pada saluran. Dengan kata lain ketika kecepatan mesin SM2 meningkat maka TCSC harus menarik daya dari mesin ini dengan menurunkan energi kinetik mesin. Sehingga jika  $\Delta\eta$  bernilai positif maka TCSC harus menurunkan daya pada saluran transmisi. Strategi peredaman ini ditunjukkan oleh gambar diatas. Variasi nilai aliran daya aktif saluran antara dua mesin dituliskan sebagai  $\Delta P$  dalam megawatt (MW) dan daya reaktif TCSC dengan  $\Delta Q_{TCSC}$  dalam MVAR. Hubungan keduanya dinyatakan sebagai

$$\frac{\Delta P}{\Delta Q_{TCSC}} = \frac{1}{2 \tan \delta / 2} \left( \frac{I}{I_N} \right)^2 \dots \dots \dots (2.28)$$

Dimana  $\delta$  adalah perbedaan angular antara tegangan terminal,  $I$  adalah arus line pada saat steady state dan  $I_N$  arus TCSC. Dengan demikian unjuk kerja TCSC berdasarkan variasi magnitude arus line. Idealnya perubahan pada transfer daya saluran disebabkan oleh perbedaan sudut angular terminal  $30^\circ - 40^\circ$ . Rasio perubahan daya generator terhadap daya yang diinjeksikan dari saluran ke bus generator dinyatakan dengan

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P} = \frac{\cos(\delta / 2 \pm \alpha)}{\cos(\delta / 2)} \dots \dots \dots (2.29)$$

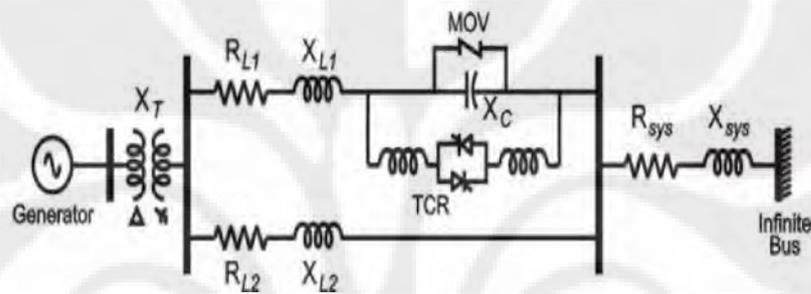
Dimana tanda + berarti mengrim dan tanda - berarti menerima.  $\Delta P_m$  adalah variasi nilai daya generator dan  $\Delta P$  adalah nilai variasi daya yang diinjeksikan dari saluran transmisi ke bus mesin dan  $\alpha = \tan^{-1}(X_{source} / R_{load})$ .

## BAB 3

### PEMODELAN SISTEM DAN SIMULASI

#### 3.1 Second Benchmark Model *Subsynchronous Resonance*

Untuk mempelajari efek *subsynchronous resonance* pada sistem tenaga listrik maka digunakan pemodelan simulasi berdasarkan referensi dari IEEE “*Second Benchmark Model Subsynchronous Resonance IEEE Trans., v.PAS-104,n.p*”. Berikut adalah bagan simulasi pemodelan sistem *Second Benchmark Model SSR IEEE IEEE Trans., v.PAS-104,n.p*.



Gambar 3.1 *Second Benchmark Model SSR IEEE Trans., v.PAS-104,n.p*

Diperlukan pendekatan matematis agar sistem tersebut dapat dianalisis dan di simulasikan. Oleh karena itu diperlukan pemodelan matematis dari komponen komponen dalam simulasi meliputi turbin generator *shaft* sistem dan generator sinkron.

#### 3.2 Pemodelan Sistem

##### 3.2.1 Pemodelan Generator Sinkron

Pemodelan generator sinkron meliputi persamaan arus dan tegangan pada rangkaian stator dan rotor generator sinkron. Acuan simbol yang digunakan pada pemodelan ini adalah

Tanda	Deskripsi rangkaian
a,b,c	Rangkaian stator dari phase a, b dan c
F	lilitan medan
D	Kumparan/amortisseur damper d axis
G	Medan q axis
Q	Kumparan/amortisseur damper q axis

### 3.2.1.1 Persamaan Matematis Fluks Dan Tegangan Pada Generator Sinkron.

Persamaan matematis fluks yang mengalir pada generator sinkron dinyatakan dalam bentuk matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_G \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aG} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bG} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cG} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_F & M_X & 0 & 0 \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & M_X & L_D & 0 & 0 \\ L_{Ga} & L_{Gb} & L_{Gc} & 0 & 0 & L_G & M_Y \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & 0 & 0 & M_Y & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix}$$

Perlu diketahui bahwa komponen yang merupakan konstanta adalah  $L_{DD}$  dan  $L_{QQ}$ . Komponen yang lain besarnya dipengaruhi waktu dan posisi sudut angular.

Dengan operator  $p=d/dt$  maka persamaan matriks tegangan generator sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ -v_F \\ -v_D \\ -v_G \\ -v_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & & & & & & \\ & r_b & & & & & \\ & & r_c & & & & \\ & & & r_F & & & \\ & & & & r_D & & \\ & & & & & r_G & \\ & & & & & & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p\psi_a \\ p\psi_b \\ p\psi_c \\ p\psi_F \\ p\psi_D \\ p\psi_G \\ p\psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_n \\ v_n \\ v_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Volt}$$

### 3.2.1.2 Hasil Transformasi Persamaan Tegangan Dan Fluks Pada abc Frame Ke dq0 Frame

Persamaan tegangan dan fluks generator yang sudah kita jabarkan pada abc frame akan ditransformasi kedalam dq0 frame dengan menggunakan matriks transformasi Park sebagai berikut.

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cos\theta & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \sin\theta & \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Berikut ini adalah matriks persamaan fluks hasil transformasi abc frame ke dq0 frame dalam satuan SI.

$$\begin{bmatrix} \psi_o \\ \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_G \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_G & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_X & 0 & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_X & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & kM_G & 0 & 0 & L_G & M_Y \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & M_Y & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix}$$

dengan  $k = \sqrt{\frac{3}{2}}$

Dari matriks diatas kita dapat bahwa seluruh komponen matriks dilinierisasi sehingga bernilai konstan, tidak ada komponen matriks yang nilainya variable dipengaruhi waktu ataupun deviasi posisi sudut.

Berikut ini adalah matriks persamaan tegangan hasil transformasi abc frame ke dq0 frame dalam satuan SI

$$\begin{bmatrix} v_o \\ v_d \\ -v_F \\ -v_D \\ v_q \\ -v_G \\ -v_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_o + 3r_n & & & & & & \\ & r_a & & & & & \\ & & r_F & & & & \\ & & & r_D & & & \\ & & & & r_a & & \\ & & & & & r_G & \\ & & & & & & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_o + 3L_n & & & & & & \\ & L_d & kM_F & kM_D & & & \\ & kM_F & L_F & M_X & & & \\ & kM_D & M_X & L_D & & & \\ & & & & L_q & kM_G & kM_Q \\ & & & & kM_G & L_G & M_Y \\ & & & & kM_Q & M_Y & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p i_o \\ p i_d \\ p i_F \\ p i_D \\ p i_q \\ p i_G \\ p i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega \psi_q \\ 0 \\ 0 \\ +\omega \psi_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### 3.2.1.3 Analisis Persamaan d Axis dan q Axis

Persamaan fluks pada d-axis dituliskan sebagai berikut

$$\psi d(s) = \frac{L_d(1+\tau''_d s)(1+\tau'_d s)}{(1+\tau''_{do} s)(1+\tau'_{do} s)} id(s) + \frac{K(1+\tau'_{Fo} s)}{(1+\tau''_d s)(1+\tau'_d s)} v_F(s) \dots\dots(3.1)$$

sedangkan persamaan fluks q axis adalah sebagai berikut

$$\psi q = L_q(s)I_q + G_q(s)v_G \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\psi q(s) = \frac{L_d(1+\tau''_d s)(1+\tau'_d s)}{(1+\tau''_{do} s)(1+\tau'_{do} s)} iq(s) + \frac{K(1+\tau'_{Fo} s)}{(1+\tau''_d s)(1+\tau'_d s)} v_G(s) \dots\dots(3.3)$$

Setelah menganalisis persamaan fluks dan tegangan pada generator sinkron maka diperoleh beberapa persamaan differensial sebagai berikut

1. Persamaan differensial tegangan generator

$$vd = -r_a i_d - \frac{1}{\omega} \frac{d\omega_d}{dt} - \omega \psi q \dots\dots\dots(3.4)$$

$$vq = -r_a i_q - \frac{1}{\omega} \frac{d\omega_q}{dt} - \omega \psi d \dots\dots\dots(3.5)$$

2. Persamaan differensial tegangan generator

$$\psi d = L_d(s)I_d + G_d(s)v_F \dots\dots\dots(3.6)$$

$$\psi q = L_q(s)I_q + G_q(s)v_G \dots\dots\dots(3.7)$$

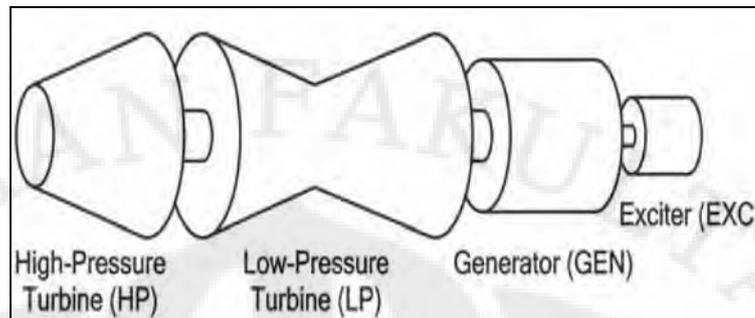
3. Persamaan torsi dan kecepatan generator berdasarkan base value sistem

$$\omega(s) = \frac{1}{2Hs} (Tm - Te - D\Delta\omega) \dots\dots\dots(3.8)$$

$$Te = \frac{1}{3} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \dots\dots\dots(3.9)$$

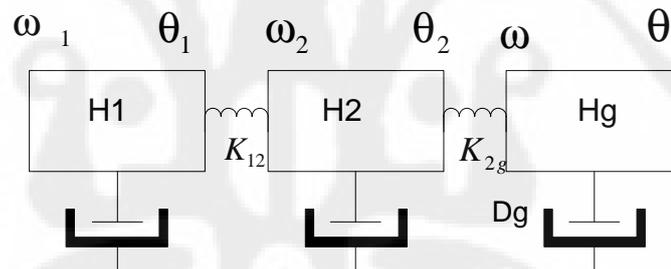
### 3.2.2 Pemodelan Turbine-Generator Shaft Sistem

Sistem pembangkit merupakan sistem yang kompleks, terdiri atas komponen mekanis dan komponen listrik. Komponen mekanis sistem pembangkit secara umum terdiri atas turbin dan rotor generator. Turbin dan rotor generator dihubungkan secara kopling (*shaft*) dengan sebuah batang poros. Berikut adalah gambar hubungan turbin-generator *shaft* sistem.



Gambar 3.2 turbin generator *shaft* sistem

Dalam mempelajari sistem mekanis pembangkit maka kita gunakan analogi turbin-generator menjadi sistem massa dengan momen inersia tertentu, poros penghubung sebagai spring/pegas dengan konstanta elastisitas tertentu, dan adanya gesekan dengan pemodelan koefisien *damping* tertentu. Misalkan kita mempunyai sebuah turbin generator *shaft* sistem dengan tiga buah massa dengan susunan 1 generator, 1 turbin tekanan tinggi dan 1 turbin tekanan rendah seperti gambar berikut.



Gambar 3.3 pemodelan matematis turbin generator *shaft* sistem

Persamaan matematis untuk hubungan turbin-generator *shaft* sistem tersebut adalah

1. Persamaan differential generator

$$2H_g \frac{d(\Delta\omega)}{dt} = -Pe - D_g(\omega) + K_{2g}(\theta_2 - \theta_1) \dots \dots \dots (3.10)$$

2. Persamaan differential turbin tekanan rendah

$$2H_2 \frac{d(\Delta\omega)}{dt} = Pm_2 - D_2(\omega_2) + K_{12}(\theta_1 - \theta_2) - K_{2g}(\theta_2 - \theta_1) \dots \dots \dots (3.11)$$

3. Persamaan differential turbin tekanan tinggi

$$2H_1 \frac{d(\Delta\omega)}{dt} = -Pm_1 - D_1(\omega_1) - K_{12}(\theta_1 - \theta_2) \dots \dots \dots (3.12)$$

Dengan keterangan :

$H_1, H_2$  dan  $H_3$  = koefisien inersia generator, LP turbin dan HP turbin

$K_1 - 2$  = konstanta pegas LP - HP,  $K_2 - g$  = konstanta pegas LP - generator

$D_1, D_2, D_g$  = faktor peredaman turbin HP, turbin LP dan generator

$\omega_1, \omega_2$  dan  $\omega$  = kecepatan massa1 (HP turbine), massa2 (LP turbine) dan massa generator

$\theta_1, \theta_2$  dan  $\theta$  = posisisudut massa1, massa2 dan massa generator

$P_e$  = daya elektrisouput generator

$P_{m1}$  = daya mekanis ouput turbin LP

$P_{m2}$  = daya mekanis output turbin HP

Sistem persamaan differensial diatas dinyatakan dalam bentuk matriks state space sebagai berikut :

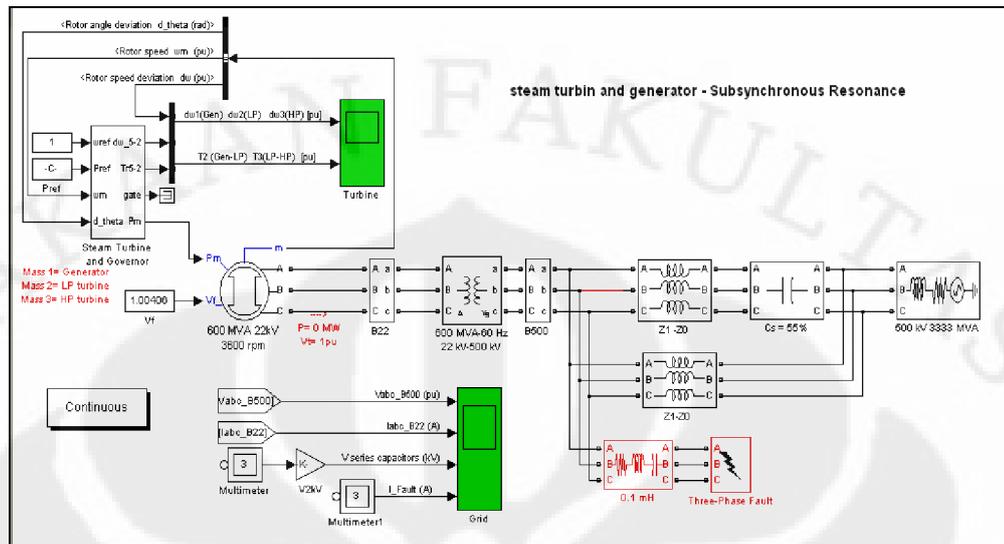
$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{7-7} & 0 & 0 \\ 0 & A_{8-8} & 0 \\ 0 & 0 & A_{9-9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{7-10} & A_{7-11} & 0 \\ A_{8-10} & A_{8-11} & A_{8-12} \\ 0 & A_{9-11} & A_{9-12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/2H_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2H_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{m1} \\ P_{m2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dengan keterangan :

$$\begin{aligned} A_{7-7} &= \frac{-D_1}{2H_1} & A_{8-10} &= \frac{-K_{12}}{2H_2} & A_{9-9} &= \frac{-D_g}{2H_g} \\ A_{7-10} &= \frac{-K_{12}}{2H_1} & A_{8-11} &= \frac{K_{12} - K_{2g}}{2H_2} & A_{9-11} &= \frac{K_{2g}}{2H_2} \\ A_{7-11} &= \frac{K_{12}}{2H_1} & A_{8-12} &= \frac{K_{2g}}{2H_2} & A_{9-12} &= \frac{-K_{1g}}{2H_2} \\ A_{8-8} &= \frac{-D_2}{2H_2} \end{aligned}$$

### 3.3 Desain Simulasi *Subsynchronous Resonance* Pada Turbin Generator Shaft Sistem Dengan Menggunakan Matlab Simulink

Gambar berikut adalah gambar simulasi sistem untuk menganalisis efek interaksi torsi *subsynchronous resonance* akibat kompensasi seri kapasitor fix dengan menggunakan matlab simulink versi 7.6.0.324 (R 2008).



Gambar3.4 bagan percobaan SBM SSR dengan simulink

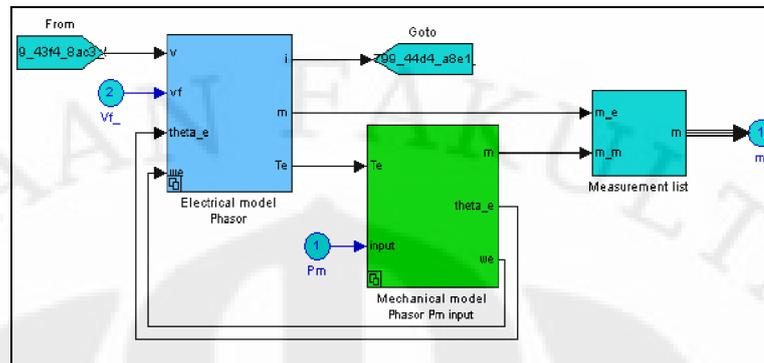
Secara umum terdapat tiga bagian blok utama pada desain simulasi sistem diatas yaitu:

1. Blok pembangkitan lengkap dengan turbin -generator *shaft* sistem
2. Blok saluran transmisi ganda dengan kompensasi seri pada salah satu saluran transmisinya dan arus gangguan 3 fasa
3. Blok beban

Berikut ini akan dibahas mengenai ketiga blok diatas dan kaitannya dengan munculnya efek *Subsynchronous resonance*.

### 3.3.1 Blok Generator Sinkron

Tipe generator yang digunakan pada simulasi adalah rotor sangkar tupai dengan rating 600 MVA, 22 KV, 3600 rpm. Blok generator sinkron mempunyai dua masukan yaitu tegangan eksitasi  $V_f$  yang besarnya konstan dan daya mekanis dari turbin uap. Blok generator juga memiliki dua keluaran yaitu tegangan tiga fasa ABC dan parameter output yang tergabung dalam “m” parameter.



Gambar3.5 sub-sub blok generator sinkron

Penjelasan dari sub-blok diatas adalah sebagai berikut :

### 1. *Electrical sub-block*

Electrical block mempunyai tiga input dan tiga output. Tegangan eksitasi  $V_f$  yang bernilai konstan, posisi sudut rotor  $\theta$ , dan kecepatan sudut rotor “ $\omega_e$ ” sebagai input sedangkan hasil pengukuran parameter listrik “ $m_e$ ”, arus 3 fasa stator “ $i$ ” dan torsi listrik “ $T_e$ ” adalah output electrical sub-blok sistem. Pada sub-blok ini tegangan GGL 3 fasa yang dibangkitkan diubah kedalam dq0 frame dengan transformasi abc to dq yang telah disinggung pada pemodelan sistem. Transformasi ini dilakukan pada blok “abc2qd” dan diperoleh tegangan  $V_d$  dan  $V_q$ . Nilai  $V_d$ ,  $V_q$  dan tegangan eksitasi  $V_f$  serta nilai input kecepatan sudut rotor  $\omega_e$  digunakan untuk menentukan persamaan fluks yang mengalir pada generator. Proses penghitungannya dilakukan dalam sub-sub blok yang terdapat pada *electrical sub-block* yang antara lain adalah sebagai berikut :

- Blok  $\phi_{iq}$  : menghitung fluks q-axis coil
- Blok  $\phi_{ikq}$  : menghitung fluks q-axis damper winding
- Blok  $\phi_{id}$  : menghitung fluks d-axis coil
- Blok  $\phi_{ifd}$  : menghitung fluks medan akibat eksitasi
- Blok  $\phi_{ifkd}$  : menghitung fluks d-axis damper winding

Selain itu terdapat sub-sub blok yang lain seperti :

- Blok  $V_f$  to  $V_{kq1}$  and  $V_{fd}$  : mengubah tegangan eksitasi menjadi  $V_{fd}$  (tegangan medan daxis) dan  $V_{kq1}$  (tegangan q axis)

Universitas Indonesia

- Blok current and mutual fluks : menghitung besarnya fluks bersama (*mutual fluks*) dan arus dq axis
- Blok electrical torque : menghitung torsi elektrik yang dibangkitkan
- Blok PQ : menghitung daya aktif dan daya reaktif yang dihasilkan
- Blok delta angle : menghitung posisi sudut rotor dalam frame acuan dq axis

Nilai arus, fluks, daya yang dibangkitkan dan posisi sudut rotor (delta angle) di kelompokkan menjadi satu keluaran yaitu “m\_e” parameter yang kemudian akan dikirimkan ke *measurement list block*.

## 2. *Mechanical sub-blok*

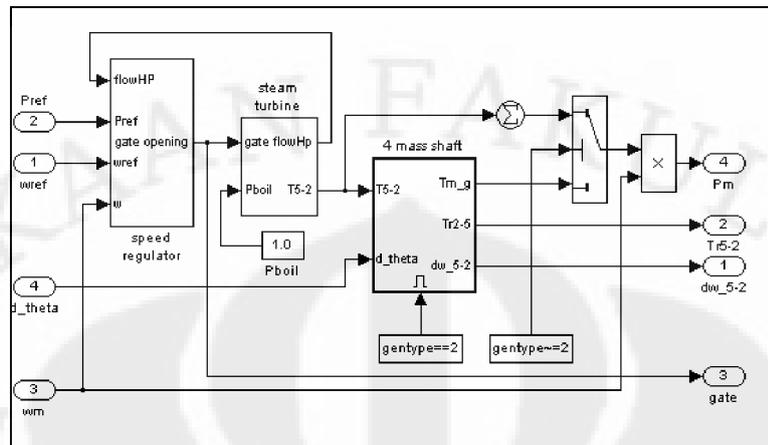
Mechanical sub-blok memperoleh inputan dari daya mekanis turbin uap dan torsi elektrik yang dihasilkan electrical blok. Kedua inputan ini ditransformasi menjadi tiga output yaitu kecepatan sudut rotor, posisi sudut rotor dan parameter mekanis “m\_m” yang merupakan gabungan sinyal torsi elektrik, daya elektrik, deviasi sudut rotor, kecepatan putar, posisi sudut rotor dll.

## 3. *Measurement list block*

Measurement list blok adalah sub-blok yang terdiri dari kumpulan sinyal-sinyal output mechanical (m-m) dan electrical sub-blok (m-e). Gabungan dari sinyal output mechanical sub-blok dan electrical sub-blok yang terdiri atas arus stator dan komponen dq0 menghasilkan output generator dengan tanda *subscript* “m” yang akan diumpan ke blok turbin uap-generator *shaft* sistem.

### 3.3.2 Blok Turbin Uap-Generator *Shaft* Sistem

Turbin uap-generator *shaft* sistem yang digunakan pada simulasi ini mempunyai dua massa sistem yaitu turbin tekanan rendah ( LP ) dengan turbin tekanan tinggi ( HP ). Turbin ini terkopel dengan generator dengan sebuah turbin uap generator *shaft* sistem. Hubungan inilah yang nantinya mempunyai frekuensi natural mode osilasi. Blok ini mempunyai 4 masukan dan 4 keluaran seperti gambar diatas. Blok turbin uap terdiri atas sub-sub blok seperti gambar berikut.



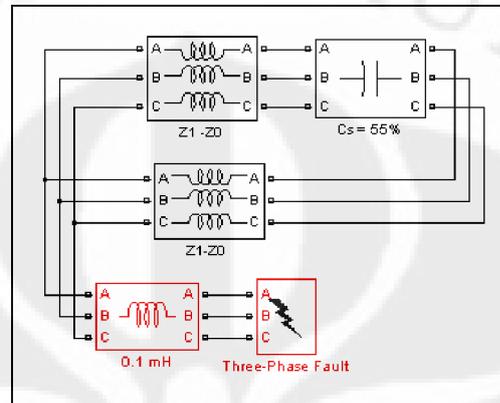
Gambar3.6 Blok turbin uap-generator *shaft* sistem

Turbin uap *shafts* sistem terdiri atas *speed governing* sistem, turbin uap tiga level tekanan dan *shaft* sistem untuk 4 sistem massa. Akan tetapi pada simulasi ini turbin uap yang digunakan hanya dua level tekanan yaitu tekanan tinggi dan tekanan rendah. Dengan demikian *shaft* sistem yang digunakan hanya terdiri atas 3 sistem massa. Deskripsi singkat mengenai sub-blok pada turbin uap *shaft* sistem adalah sebagai berikut :

- *Sub blok speed regulator* terdiri atas *proportional regulator* dan *speed relay* untuk mengatur batas kecepatan dan posisi sudut turbin-rotor *shaft* serta *servomotor* yang mengontrol gate opening terhadap tekanan boiler.
- *Sub-blok turbin uap* tidak dimodelkan dan nilai tekanan boiler dijaga konstan 1 p.u . dari sub-blok ini diperoleh nilai torsi mekanis *shaft* sistem.
- *Sub-blok mass shaft* merepresentasikan masing masing turbin sebagai sebuah sistem massa dengan momen inersia, damping dan konstanta spring. Hasil keluaran dari sub-blok *mass shaft* adalah deviasi kecepatan sudut rotor dan torsi mekanis rotor yang bekerja pada turbin uap *shaft* sistem. Kedua output inilah yang nantinya akan menjadi perhatian kita karena keduanya mewakili deskripsi terjadinya efek *subsynchronous resonance*. Dari persamaan *mass shaft* sistem dapat diperoleh nilai frekuensi mode natural *shaft*. Untuk simulasi ini diperoleh 2 frekuensi natural mode karena sistem

massa yang terhubung pada turbin uap generator *shaft* sebanyak tiga sistem massa yaitu dua sistem massa turbin ditambah sistem massa generator.

### 3.3.3 Blok Sistem Transmisi



Gambar 3.8 blok sistem transmisi

Blok sistem transmisi terdiri atas beberapa sub-blok yang membentuk sistem saluran transmisi ganda dengan kompensasi seri pada salah satu saluran transmisinya. Blok arus gangguan 3 fase digunakan untuk mengevaluasi dampak arus gangguan terhadap osilasi torsi pada keadaan *subsynchronous resonance*. Blok mutual induktansi Z1-Z0 3 fase mendeskripsikan impedansi induktif dan resistif 3 fase seimbang dengan *mutual coupling* antara masing-masing fase. Blok kapasitor seri memberikan nilai kompensasi impedansi kapasitif pada jaringan. Besarnya kompensasi seri dihitung sebagai persentase dari reaktansi induktansi saluran yang pada umumnya dinyatakan dengan satuan per unit. Secara matematis dituliskan dengan persamaan

$$X_C (\text{dalam pu}) = k\% \times X_L (\text{dalam pu}) \dots\dots\dots (3.13)$$

Dengan  $X_C$  = kapasitansi kapasitor fix sebagai kompensasi seri ( pu )

k = persentase kompensasi

$X_L$  = induktansi saluran transmisi ( pu )

Dalam perhitungan biasanya nilai induktansi dinyatakan dalam p.u sehingga untuk menentukan kapasitansi kompensasi seri perlu pengkonversian dari sistem *base value*. Hal ini akan dijelaskan pada bagian pembahasan parameter simulasi. Pada gambar diatas sistem transmisi ganda dikenai arus gangguan 3 fase pada ujung

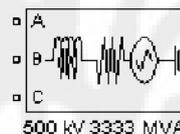
Universitas Indonesia

terminalnya. Adanya arus gangguan 3 fasa pada sistem transmisi mempengaruhi kestabilan sistem terlebih terhadap efek osilasi torsi pada turbin uap-generator *shaft* sistem. Arus yang mengalir pada sistem transmisi dengan efek gangguan 3 fasa dituliskan dengan persamaan :

$$i(t) = K[A \sin(\omega_1 t + \psi_1) + B e^{-\xi \omega_2 t} \sin(\omega_2 t + \psi_2)]$$

Persamaan arus diatas adalah arus yang mengalir pada saluran transmisi dan stator generator. Arus transien dengan komponen frekuensi  $\omega_2$  beresilasi dengan frekuensi natural tertentu dan jika frekuensi natural arus komponen ini bertepatan dengan frekuensi natural mode turbin uap-generator *shaft* maka akan timbul osilasi eksponensial yang besarnya tergantung dengan magnitude arus transien ini. Sebagai kesimpulan arus gangguan memperkuat efek torsional *Subsynchronousresonance* yang telah terjadi karena efek kompensasi seri.

### 3.3.4 Blok Beban



Gambar 3.9 blok beban

Pada simulasi ini digunakan beban 3 fasa dengan kapasitas 500 kV, 3333 MVA. Beban ini merupakan sumber tegangan 3 fasa seimbang (*balanced three-phase voltage source*) dengan impedansi RL internal. Beban ini terhubung dengan ground dengan hubungan Y.

### 3.4 Parameter Simulasi

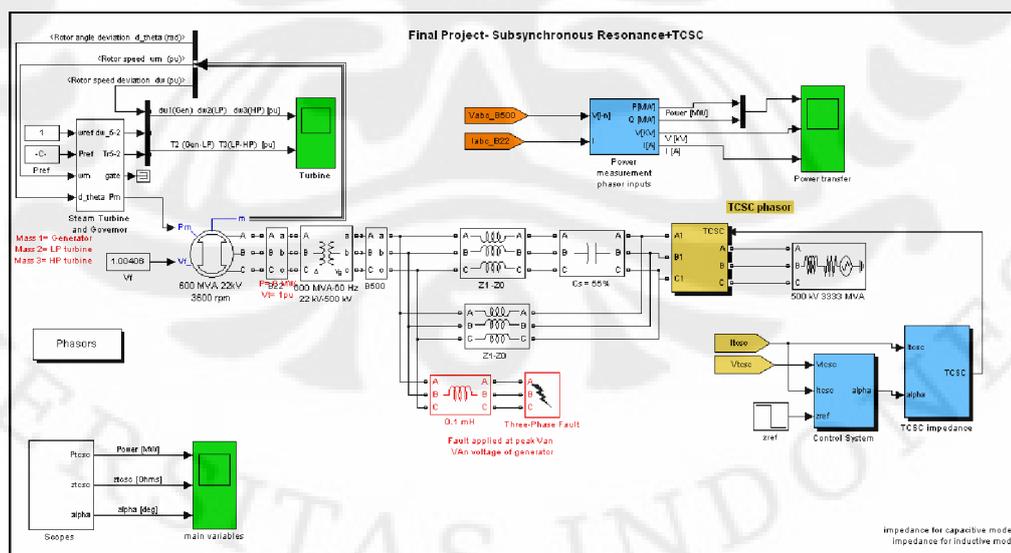
Pada bagian ini akan dibahas parameter parameter yang digunakan pada simulasi. Secara umum parameter parameter yang digunakan pada simulasi ini adalah data sekunder yang diambil dari buku *Subsynchronousresonance* in power sistem terbitan IEEE dan sebagian lainnya dari jurnal dan hasil perhitungan. Parameter yang digunakan meliputi Tabel parameter dan tampilan hasil parameter pada matlab simulink selengkapnya dapat dilihat pada bagian lampiran.

- Parameter generator sinkron dengan rating kerja daya pembangkitan 600 MVA dan tegangan line to line 22 kV

- Parameter turbin uap yang terdiri atas turbin tekanan rendah dan turbin tekanan tinggi
- Parameter trafo step up 3 fasa 600 MVA, 22 KV hubungan  $D_Y$  dengan tegangan primer 22 KV dan tegangan sekunder 500 KV
- Parameter saluran transmisi ganda dengan *base value* 100M VA, 500 KV
- Parameter kapasitor fix sebagai kompensasi seri dengan tingkat kompensasi dari 25 % - 85 %.
- Parameter arus gangguan 3 fasa simetris dengan fault clearing time 0,0169 sekon
- Parameter beban 3 fasa dengan rating 500 KV 3333MVA

### 3.5 Desain TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) Untuk Meredam Efek *Subsynchronous Resonance* Dengan Menggunakan Matlab Simulink.

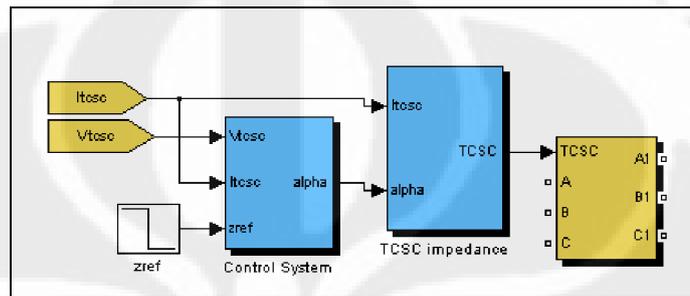
TCSC adalah perangkat elektronika daya yang terdiri atas TCR ( *Thyristor Controlled Reactor* ) yang dihubungkan parallel dengan kapasitor fix. Operasi kerja TCSC yang dapat bekerja pada mode induktif ataupun kapasitif berperan penting pada kompensasi impedansi jaringan. Berikut adalah gambar desain simulasi Second Benchmark Model *Subsynchronousresonance* yang sudah dikompensasi dengan TCSC dengan menggunakan matlab simulink.



Gambar 3.10 desain simulasi SBM SSR dan TCSC dengan menggunakan simulink

### 3.6 Deskripsi Blok Rangkaian TCSC

Rangkaian blok TCSC secara umum terdiri atas tiga bagian blok penting yaitu blok pengontrolan, blok impedansi dan blok switching TCSC. Hubungan ketiga blok tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3.19 blok TCSC

#### 3.6.1 Blok *Switching* TCSC

Blok *switching* TCSC terdiri atas rangkaian TCSC yang tersusun dari rangkaian paralel TCR dengan kapasitor fix. Blok ini bertugas untuk mengukur tegangan dan arus line yang melalui TCSC untuk kemudian dihitung arus dan tegangan pada TCSC. Blok ini juga bertugas menerima sinyal command TCSC hasil modulasi arus TCSC dan sudut penyalaan alpha untuk kemudian dilakukan switching pada tiristor. Arus line melalui TCR dan kapasitor fix pada TCSC kemudian menghasilkan arus TCSC dan tegangan TCSC. Arus dan tegangan TCSC akan diumpun balik ke blok pengontrolan untuk menghasilkan sinyal trigger sudut penyalaan alpha. Sinyal trigger berupa sudut penyalaan alpha yang dihasilkan blok pengontrolan akan diumpun ke blok TCSC impedance. Sudut penyalaan alpha dimodulasi oleh arus line yang bertindal sebagai sinkronisasi TCSC dan menghasilkan sinyal command untuk menswitching katup-katup thyristor dengan frekuensi tertentu untuk memberikan efek peredaman osilasi.

#### 3.6.2 Blok Pengontrolan

Blok pengontrolan terdiri atas tiga input dan satu output. Sinyal inputan terdiri atas arus dan tegangan line yang melalui TCSC dan referensi impedansi. Blok pengontrolan memiliki fungsi yang sangat penting karena dari blok inilah sudut

penyalaaan dihasilkan. Hasil pembagian antara tegangan tegangan TCSC dan arus TCSC menghasilkan impedansi. Kemudian hasil perhitungan impedansi ini dan impedansi referensi diinputkan ke blok *controller mode* untuk ditentukan jenis mode operasi TCSC dan besarnya sudut penyalaaan alpha. Terdapat dua mode operasi yaitu *induktif boost mode* dan *kapasitif boost mode*. Pada akhirnya sudut penyalaaan alpha ini diinputkan ke blok *TCSC impedance* untuk dihasilkan *signal command* TCSC. Telah dibahas sebelumnya bahwa besarnya sudut penyalaaan mempengaruhi impedansi TCSC sebagai impedansi kompensasi jaringan. Selain itu sudut penyalaaan berperan juga dalam memberikan trigger ke katup thyristor untuk memberikan efek peredaman subsynchronous resonance pada rentang frekuensi diskrit.

### **3.6.3 Blok TCSC Impedance**

Blok TCSC impedance berfungsi untuk menghitung impedansi kompensasi TCSC berdasarkan inputan sinyal arus TCSC dan sudut penyalaaan alpha. Pada blok ini arus TCSC digunakan sebagai sinyal sinkronisasi sedangkan sinyal sudut penyalaaan alpha ditransformasi menjadi reaktansi TCSC melalui blok *alpha to X TCSC* dan pada akhirnya kedua sinyal di modulasi untuk menghasilkan sinyal command TCSC. Sinyal command TCSC di teruskan ke blok TCSC switching untuk mentrigger katup tiristor TCSC. Selain itu sinyal command TCSC ini juga diumpun balik ke TCSC untuk memberi pengontrollan tegangan phasor TCSC.

## **BAB 4**

### **HASIL SIMULASI DAN ANALISIS**

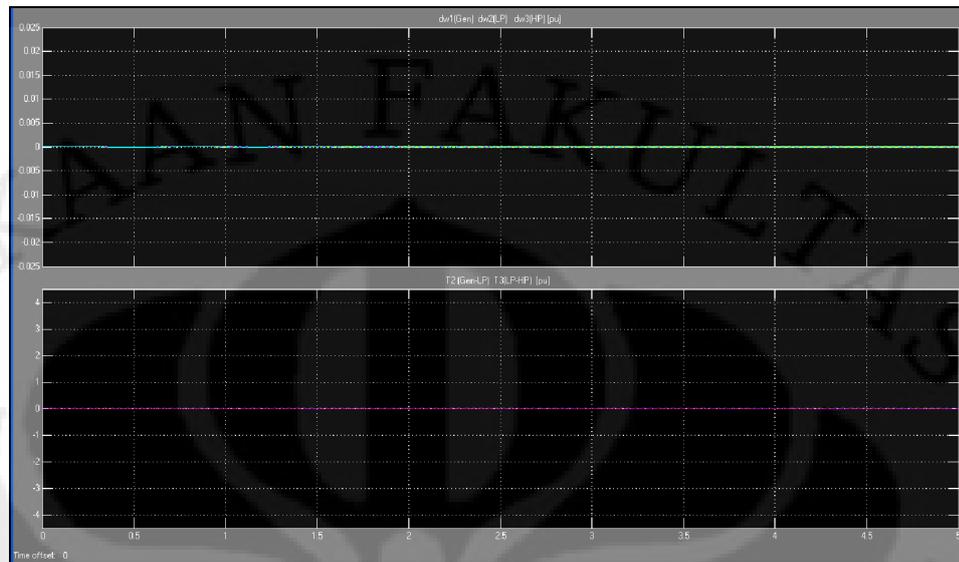
#### **4.1 Hasil Simulasi Dan Analisis Gejala *Subsynchronous Resonance* Akibat Kompensasi Seri**

Pada bab 3 telah dibahas pemodelan sistem dan desain simulasi *subsynchronous resonance* berdasarkan model *second benchmark model subsynchronous resonance* IEEE. Dengan menggunakan desain model dan parameter simulasi seperti yang telah dijelaskan pada bab 3 maka diperoleh hasil simulasi mengenai efek *subsynchronous resonance*. Untuk menganalisis gejala *subsynchronous resonance* maka simulasi dilakukan dalam 3 tahap yaitu

1. Simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator pada keadaan normal tanpa kompensasi seri.
2. Simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator akibat arus gangguan 3 fasa.
3. Simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator akibat arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor fix dengan berbagai tingkat kompensasi

##### **4.1.1 Simulasi Osilasi Torsi Dan Deviasi Kecepatan Sudut Turbin-Generator Pada Keadaan Normal Tanpa Kompensasi Seri.**

Simulasi pertama dilakukan dengan sistem transmisi tidak dikompensasi seri dan tanpa arus gangguan 3 fasa Gambar 4.1 berikut adalah hasil simulasi osilasi torsi antara LP turbin-generator dengan HP turbin-LP turbin dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin pada keadaan sistem beroperasi normal untuk rentang waktu simulasi 5 sekon. Osilasi torsi antara turbin dan generator ditunjukkan oleh gambar bawah berupa garis berwarna ungu sedangkan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin ditunjukkan oleh gambar atas dengan garis berwarna hijau.

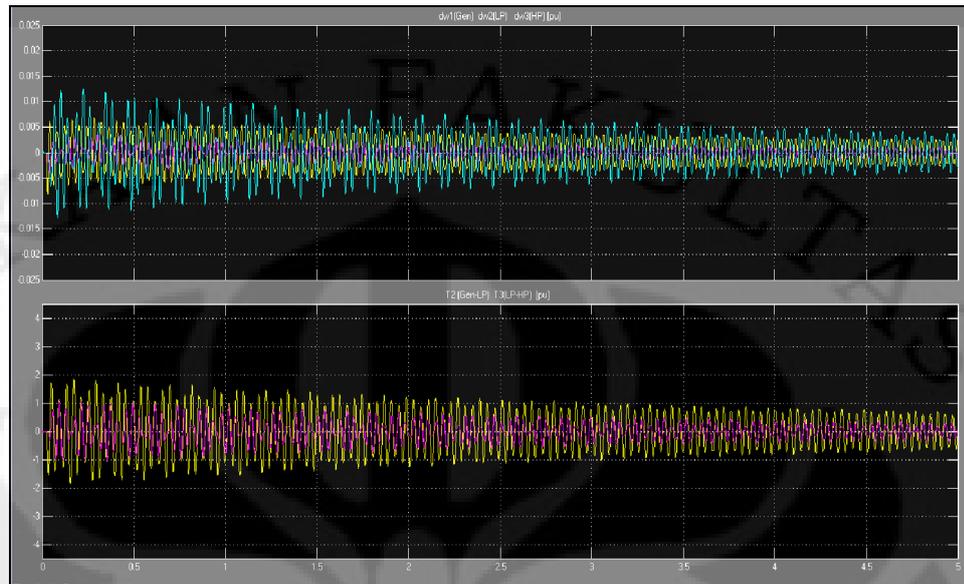


Gambar 4.1 Simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator pada keadaan normal tanpa kompensasi seri.

Dari gambar hasil simulasi diatas maka dapat disimpulkan bahwa pada keadaan sistem normal tanpa gangguan dan tanpa kompensasi seri maka tidak terjadi osilasi torsi turbin generator dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin.

#### 4.3.2 Simulasi Osilasi Torsi Dan Deviasi Kecepatan Sudut Turbin-Generator Akibat Arus Gangguan 3 Phasa.

Simulasi kedua adalah simulasi tentang pengaruh arus gangguan 3 phasa terhadap kestabilan torsi dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin. Oleh karena itu pada simulasi ini diaplikasikan arus gangguan 3 phasa pada sistem. Selang waktu terjadinya arus gangguan 3 phasa mulai dari gangguan terjadi sampai gangguan selesai diaplikasikan selama 0,0169 sekon atau 16,9 ms. Selang waktu ini disebut dengan *fault clearing time*. Gambar 4.2 berikut adalah hasil simulasi antara LP turbin-generator dengan HP turbin-LP turbin dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin pada saat arus gangguan 3 phasa simetris diaplikasikan. Rentang waktu yang digunakan pada simulasi ini adalah 5 sekon.



Gambar 4.2 simulasi arus gangguan 3 fasa terhadap kestabilan osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator

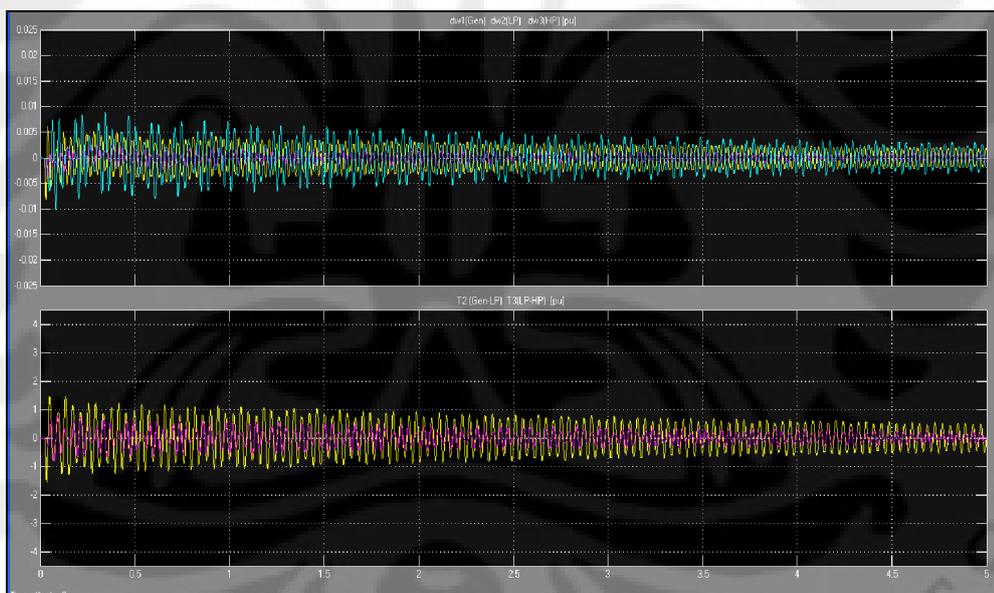
Pada gambar diatas grafik osilasi torsi antara antara LP turbin-generator dengan HP turbin-LP turbin ditunjukkan oleh grafik sebelah bawah berwarna kuning merah. Sedangkan grafik deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin ditunjukkan oleh grafik sebelah atas berwarna biru hijau ungu. Dari gambar hasil simulasi dapat kita simpulkan bahwa pada saat arus gangguan 3 fasa di aplikasikan ke sistem transmisi yang tidak dikompensasi seri maka terjadi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut rotor antara turbin generator Terjadinya osilasi ini diakibatkan karena arus gangguan menyuplai arus dengan urutan negatif / *negative sequence*. Arus dengan urutan negatif menghasilkan torsi elektrik yang arahnya berlawanan dengan torsi mekanis sehingga terjadi osilasi torsi dan osilasi kecepatan sudut pada turbin generator. Amplitude osilasi lama kelamaan mengecil secara eksponensial karena adanya damping mekanis yang diberikan oleh sistem. Dengan demikian dapat ditarik kesimpulan bahwa arus gangguan 3 fasa menyebabkan sistem menjadi tidak stabil sehingga terjadi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin.

### 4.3.3 Simulasi Osilasi Torsi Dan Deviasi Kecepatan Sudut Turbin-Generator Dengan Level Kompensasi Seri Dan Arus Gangguan 3 Fasa .

Simulasi ini bertujuan untuk melihat pengaruh arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri dengan berbagai tingkat kompensasi terhadap efek *subsynchronous resonance*. Pada simulasi ini jaringan di kompensasi seri dengan kapasitor fix dengan berbagai tingkat persentase kompensasi dan pada jaringan juga diaplikasikan arus gangguan 3 fasa dengan *fault clearing time* 16,9 ms.

#### 4.3.3.1 Simulasi Osilasi Torsi Dan Deviasi Kecepatan Sudut Turbin-Generator Dengan Kompensasi Seri 25 %

Gambar 4.3 berikut adalah hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator akibat kompensasi seri 25 % dan adanya arus gangguan 3 fasa untuk rentang waktu simulasi selama 5 sekon.



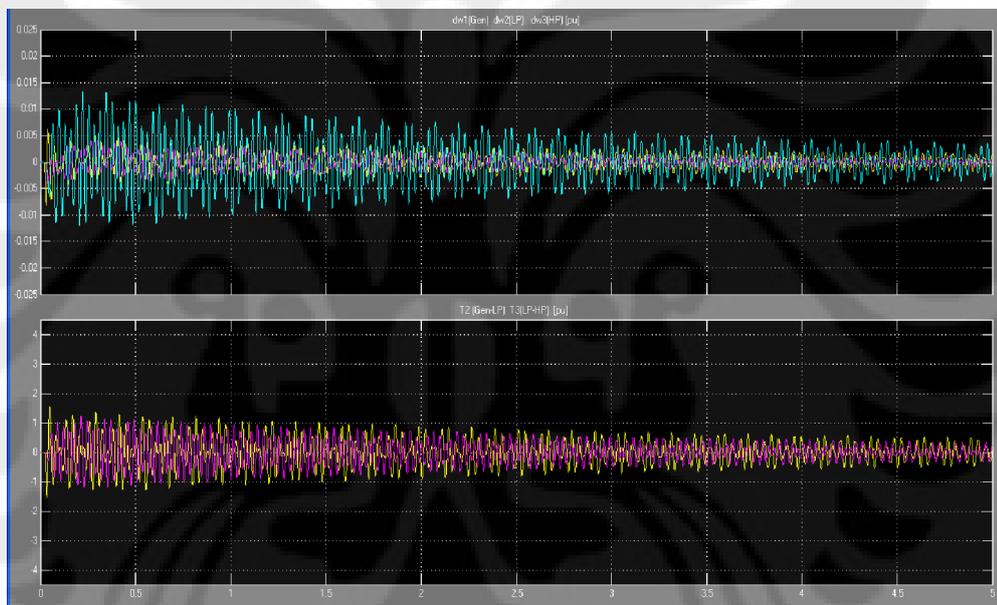
Gambar 4.3 hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor fix dengan tingkat kompensasi 25 %.

Dari gambar 4.3 hasil simulasi diatas ditunjukkan bahwa untuk kompensasi seri kapasitor fix dengan tingkat kompensasi sebesar 25 % maka osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator nilainya lebih kecil jika dibandingkan

saat osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator dengan keadaan terjadi arus gangguan 3 phasa tanpa kompensasi seri. Besar amplitude osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut semakin mengecil secara eksponensial. Hal ini mengindikasikan bahwa pada tingkat level kompensasi seri 25 % kompensasi kapasitor fix memberikan efek peredaman terhadap gangguan yang terjadi.

#### 4.3.3.2 Simulasi Osilasi Torsi Dan Deviasi Kecepatan Sudut Turbin-Generator Dengan Kompensasi Seri 35 %

Gambar 4.4 berikut adalah hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator dengan kompensasi seri kapasitor fix 35 % untuk rentang waktu simulasi selama 5 sekon

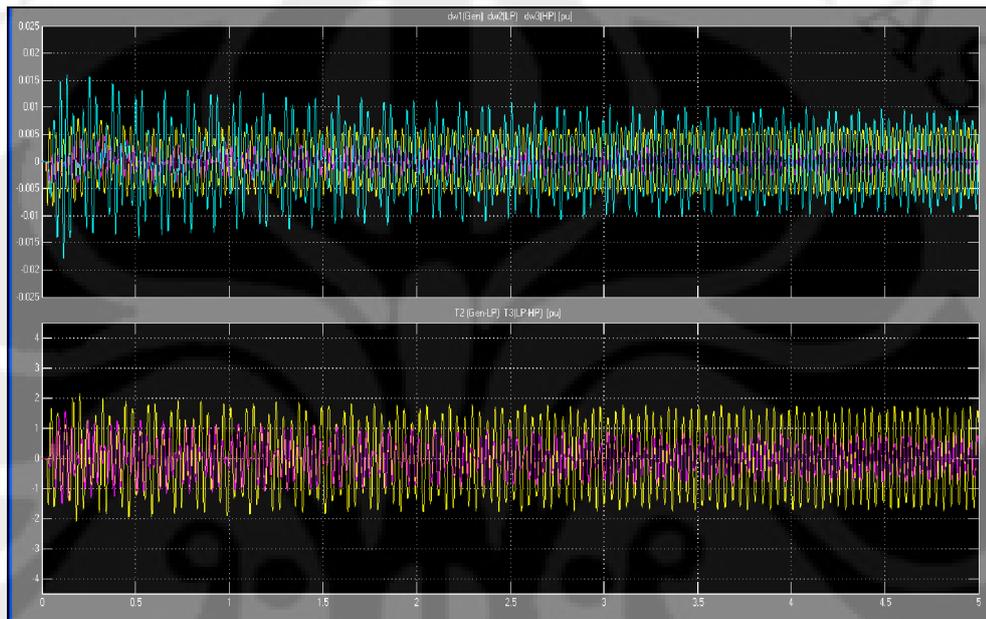


Gambar 4.4 hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator karena arus gangguan 3 phasa dan kompensasi seri kapasitor fix dengan tingkat kompensasi 35 %.

Dari gambar 4.4 hasil simulasi diatas maka untuk kompensasi seri kapasitor fix dengan tingkat kompensasi sebesar 35 % maka osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator nilainya lebih besar dari hasil simulasi dengan tingkat kompensasi seri dengan tingkat 25 % . Kesimpulan awal adalah bahwa semakin besar tingkat kompensasi seri kapasitor fix maka semakin besar pula osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin yang terjadi.

### 4.3.3.3 Simulasi Osilasi Torsi Dan Deviasi Kecepatan Sudut Turbin-Generator Dengan Kompensasi Seri 45 %

Gambar 4.5 berikut adalah hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator dengan kompensasi seri kapasitor fix 45 % untuk rentang waktu simulasi selama 5 sekond

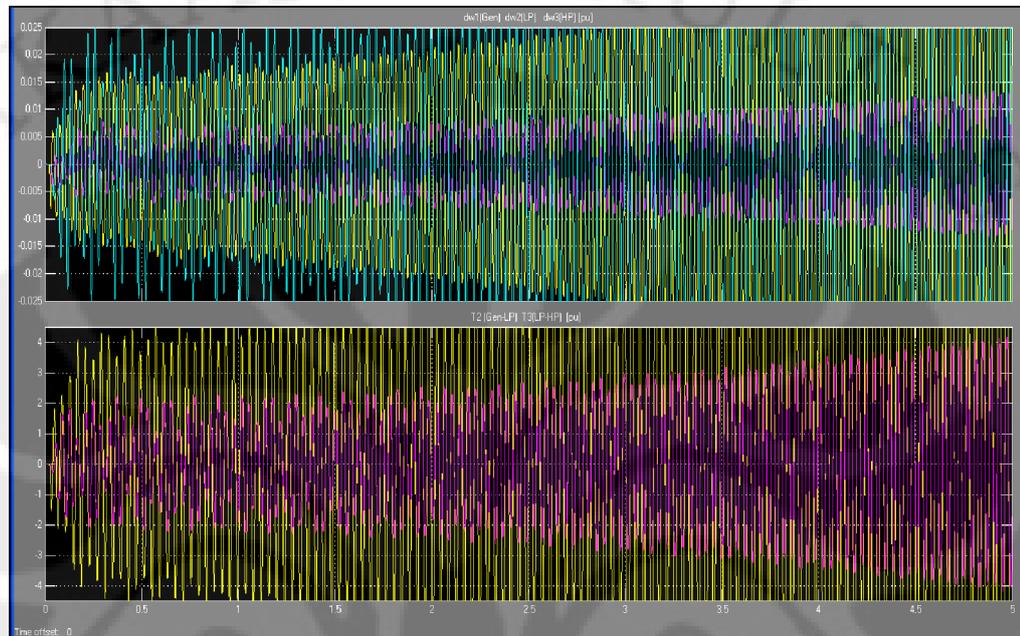


Gambar 4.5 hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor fix dengan tingkat kompensasi 45 %.

Dari gambar hasil simulasi diatas maka besarnya amplitude osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator untuk kompensasi seri 45 % lebih besar daripada amplitude osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator untuk kompensasi seri 35 %. Besarnya osilasi ini tidak seperti nilai kompensasi 25 % dan 35 % karena osilasinya bernilai konstan sedangkan untuk kompensasi 25 % dan 35 % amplitude osilasinya semakin lama semakin mengecil secara eksponensial. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya faktor peredaman yang dibangkitkan sistem mekanis sama dengan faktor peredaman yang dibangkitkan sistem elektris.

### 4.3.3.4 Simulasi Osilasi Torsi Dan Deviasi Kecepatan Sudut Turbin-Generator Dengan Kompensasi Seri 55 %

Gambar 4.6 berikut adalah hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator dengan kompensasi seri 55 % untuk rentang waktu simulasi selama 5 sekon.



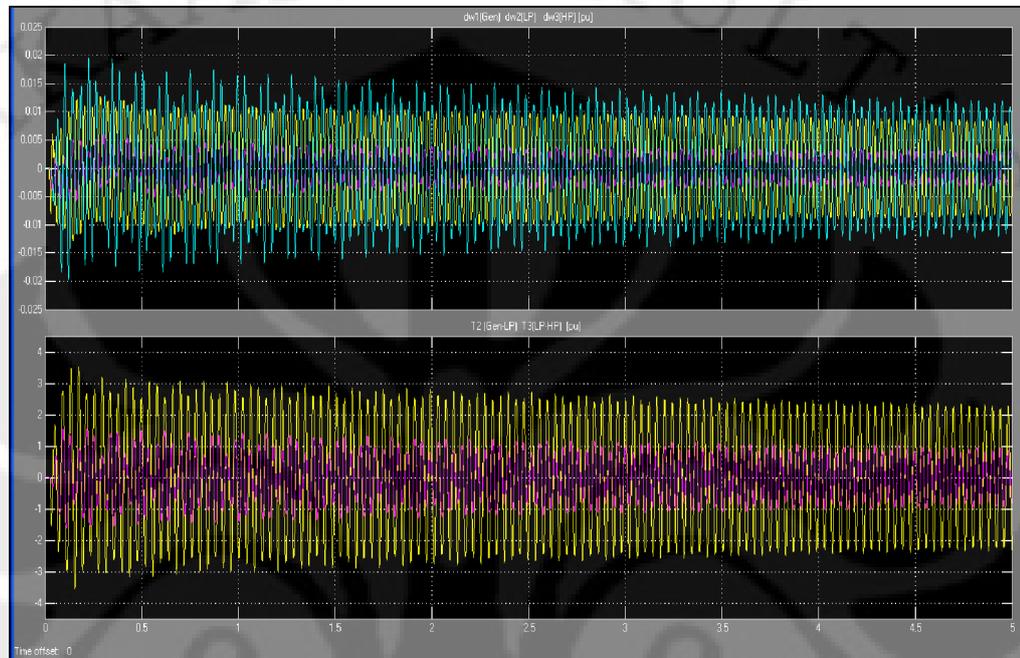
Gambar 4.6 simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator karena arus gangguan 3 phasa dan kompensasi seri kapasitor fix dengan tingkat kompensasi 55 %.

Grafik diatas menunjukkan bahwa pada tingkat kompensasi seri kapasitor fix sebesar 55 % terjadi gejala *subsynchronous resonance*. Ini ditandai dengan ampiltudo osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator yang semakin lama semakin membesar secara eksponensial dan sistem berosilasi dalam keadaan tidak teredam. Membesarnya amplitudo osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin secara eksponensial dengan bertambahnya selang waktu menandakan bahwa sistem dalam keadaan tidak stabil karena factor peredaman yang dihasilkan sistem tidak mampu meredam osilasi. Analisis yang lebih menyeluruh mengenai gejala *subsynchronous resonance* pada tingkat kompensasi seri kapasitor fix 55% memerlukan analisis nilai eigen dalam domain frekuensinya.

#### 4.3.3.5 Simulasi Osilasi Torsi Dan Deviasi Kecepatan Sudut Turbin-Generator Dengan Kompensasi Seri 65 %

Universitas Indonesia

Gambar 4.7 berikut adalah hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator dengan kompensasi seri 65 % untuk rentang waktu simulasi selama 5 sekond.

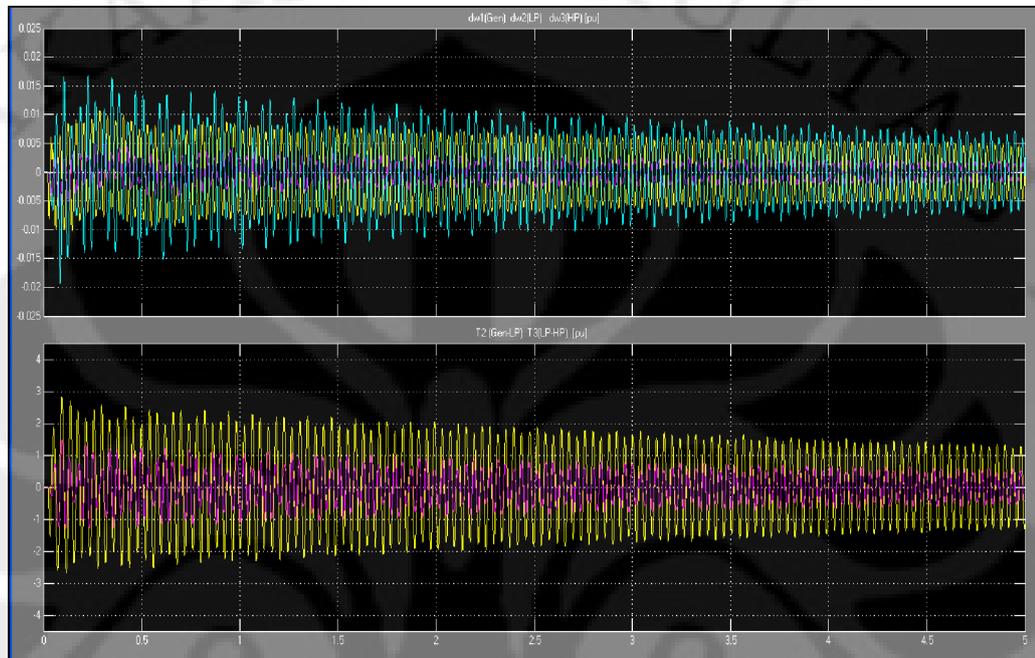


Gambar 4.7 simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor fix dengan tingkat kompensasi 65 %.

Dari gambar diatas diperlihatkan bahwa besarnya amplitude osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin dengan kompensasi 65 % lama kelamaan mengecil secara eksponensial. Karena setelah tingkat kompensasi 55 % besarnya amplitude osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin menjadi mengecil secara eksponensial dan terjadi peredaman osilasi. Maka dapat dinyatakan bahwa pada tingkat kompensasi seri 55 % lah besar amplitude osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin mencapai nilai maksimal yang menandakan telah terjadi gejala *subsynchronous resonance*.

#### 4.3.3.6 Simulasi Osilasi Torsi Dan Deviasi Kecepatan Sudut Turbin-Generator Dengan Kompensasi Seri 75 %

Gambar 4.8 berikut adalah hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator dengan kompensasi seri 75 % untuk rentang waktu simulasi selama 5 sekond.

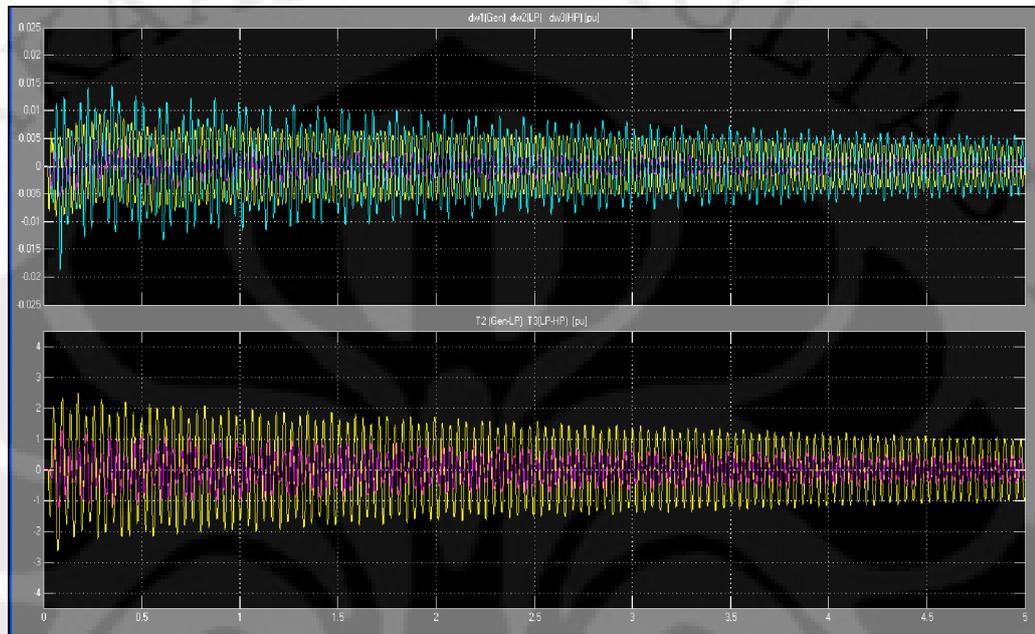


Gambar 4.8 simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator karena arus gangguan 3 fasa dan kompensasi seri kapasitor fix dengan tingkat kompensasi 75 %.

Pada grafik diatas terjadi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator dengan amplitude yang semakin mengecil secara eksponensial. Besarnya amplitude osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin untuk kompensasi 75% lebih kecil dibanding hasil yang diperoleh dari kompensasi 65 % dan osilasi teredam lebih cepat ketimbang peredaman osilasi pada kompensasi seri 65%. Semakin kecilnya amplitude osilasi ini karena frekuensi sistem dengan kompensasi 75 % semakin jauh dari frekuensi mode natural *shaft* sistem sehingga kemungkinan terjadinya resonansi semakin kecil.

#### 4.3.3.7 Simulasi Osilasi Torsi Dan Deviasi Kecepatan Sudut Turbin-Generator Dengan Kompensasi Seri 85 %

Gambar 4.9 berikut adalah hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator dengan kompensasi seri 85 % untuk rentang waktu simulasi selama 5 sekon.



Gambar 4.9 simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator karena arus gangguan 3 phasa dan kompensasi seri kapasitor fix dengan tingkat kompensasi 85 %.

Sama seperti hasil grafik simulasi dengan kompensasi seri 75%, grafik simulasi dengan kompensasi seri 85 % juga menunjukkan penurunan amplitudo osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin secara eksponensial hanya saja penurunan eksponensialnya lebih besar sehingga osilasi teredam lebih cepat. Hal ini menyimpulkan bahwa semakin jauh tingkat kompensasi seri 55 % maka osilasi yang terjadi semakin kecil dan semakin cepat teredam.

#### 4.3.3.8 Kesimpulan Pengaruh Arus Gangguan Dan Kompensasi Seri Terhadap Gejala *Subsynchronous Resonance*.

Setelah menganalisis dan membandingkan kondisi sistem dengan tingkat kompensasi seri yang berbeda beda dikenai arus gangguan 3 phasa maka dapat diperoleh kesimpulan bahwa *subsynchronous resonance* terjadi saat jaringan dikompensasi seri dengan nilai 55%. Hal ini ditunjukkan oleh hasil simulasi sistem yang beresilasi tidak stabil dalam keadaan tidak teredam. Besarnya tingkat kompensasi seri juga

Universitas Indonesia

mempengaruhi besarnya amplitude osilasi dengan hubungan amplitude osilasi akan semakin kecil dengan kecepatan peredaman osilasi yang semakin cepat untuk tingkat kompensasi yang semakin jauh dari 55%. Osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut pada sistem dikarenakan oleh arus gangguan 3 fasa yang diaplikasikan ke sistem. Arus gangguna 3 fasa menghasilkan arus dengan komponen *negative sequence*. Ketika arus dengan *negative sequence* ini ditransformasikan menjadi torsi elektrik maka akan dihasilkan torsi elektrik yang berlawanan arah dengan torsi mekanis. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya osilasi torsi pada sistem. Sedangkan tingkat kompensasi seri berpengaruh terhadap resonansi antara torsi elektrik dan torsi mekanis. Pembahasan pengaruh tingkat kompensasi seri terhadap gejala *subsynchronous resonance* harus ditinjau dari segi domain frekuensinya.

#### 4.3.4 Analisis Gejala *Subsynchronous Resonance* Dari Segi Domain Frekuensi

##### 4.3.4.1 Perhitungan Frekuensi Natural Jaringan Dan Frekuensi *Subsynchronous*

Hasil simulasi osilasi torsi dan deviasi kecepatan sudut turbin-generator dengan menggunakan matlab simulink menunjukkan bahwa gejala *subsynchronous resonance* terjadi saat sistem yang dikompensasi seri dengan tingkat kompensasi 55 % dikenai arus gangguan 3 fasa. Pembahasan gejala *subsynchronous resonance* pada domain frekuensinya memerlukan perhitungan analisis nilai eigen yang menyatakan nilai frekuensi natural torsional turbin-generator *shaft*. Selain itu juga diperlukan informasi mengenai frekuensi *subsynchronous* yang dihasilkan oleh modulasi tegangan generator. Frekuensi *subsynchronous* merupakan frekuensi selisih antara frekuensi base dengan frekuensi natural jaringan. Besarnya frekuensi natural jaringan dinyatakan sebagai

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{lc}} \times f_{base} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Xc}{Xl}} \times f_{base} \dots\dots\dots(4.1)$$

dimana  $f_{base}$  yang digunakan pada simulasi ini adalah 60 Hz. Besarnya frekuensi *subsynchronous* dinyatakan dengan hubungan  $f_{subsynchronous} = (60 - f)Hz$  oleh karena itu hal yang pertama dilakukan adalah menghitung nilai induktansi  $l$  dan nilai kapasitansi kompensasi seri  $c$ . Berikut persamaan matematis induktansi jaringan

$$L = \frac{pu}{2\pi 60} x \left( \frac{(KV)^2}{MVA} \right) \text{henry} \dots\dots\dots(4.2)$$

Untuk saluran transmisi dengan reaktansi induktif 0,08 pu dengan base value 100 MVA, 22 KV maka diperoleh induktansi jaringan sebesar

$$L = \frac{0.08}{120\pi} x \left( \frac{(500x10^3)^2}{600x10^6} \right)$$

$$L = 0.053 \text{ henry}$$

Sedangkan besarnya nilai kapasitansi kompensasi seri dinyatakan sebagai

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{\omega x k\% x X_L} \dots\dots\dots(4.4)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi 60)^2 x k\% x L pu x \left( \frac{(KV)^2}{MVA} \right)} \dots\dots\dots(4.5)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi 60)^2 x k\% x L} \text{farad} \dots\dots\dots(4.6)$$

Tabel berikut adalah hasil perhitungan kapasitansi kapasitor fix sebagai kompensasi seri dengan tingkat persentase kompensasi seri yang berbeda beda.

Tabel 4.1 Hubungan tingkat kompensasi seri dengan kapasitansi kapasitor fix

Tingkat kompensasi seri	Kapasitansi kapasitor fix (farad)
25 %	$5.3157x10^{-4}$
35 %	$3.7969x10^{-4}$
45 %	$2,953x10^{-4}$
55 %	$2,416x10^{-4}$
65 %	$2,045x10^{-4}$
75 %	$1,772x10^{-4}$
85 %	$1,563x10^{-4}$

Tabel berikut adalah hasil perhitungan frekuensi natural dan frekuensi *subsynchronous* dengan tingkat kompensasi seri yang berbeda beda.

Tabel 4.2 Hubungan tingkat kompensasi seri dengan frekuensi *subsynchronous*

Tingkat kompensasi seri	Frekuensi natural ( Hz)	Frekuensi <i>subsynchronous</i> (Hz)
25 %	30	30
35 %	35,946	24,054
45 %	40,25	19,75
55 %	45,49	14,51
65 %	48,7	11,3
75 %	51,96	8,04
85 %	55,325	4,675

#### 4.3.4.2 Perhitungan Nilai Eigen

Nilai eigen sebenarnya adalah pole (kutub) yang mewakili akar akar kestabilan sistem. Perhitungan nilai eigen menghasilkan akar akar pada domain real dan imajiner. Secara matematis dituliskan sebagai berikut :

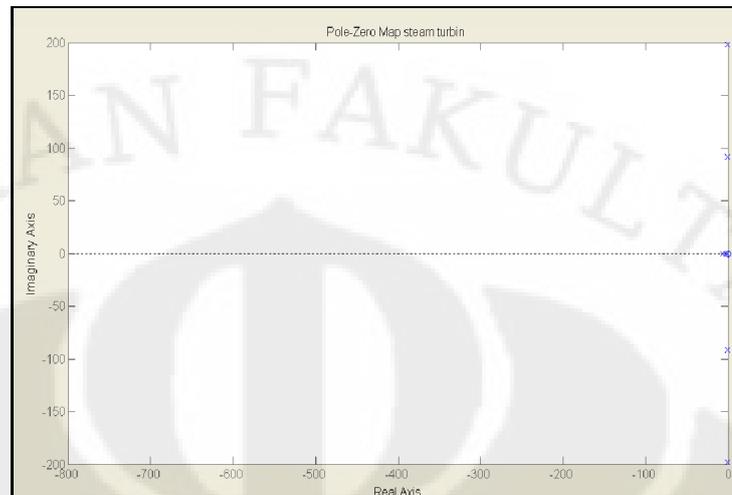
Jika suatu sistem dinyatakan dalam statespace sebagai

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \dots\dots\dots(4.7)$$

Maka nilai eigennya dinyatakan dengan

$$\det[\lambda I - A] = 0 \dots\dots\dots(4.8)$$

Dengan akar akar eigen :  $\lambda = \sigma + j\omega$ , dimana  $\sigma$  menunjukkan koefesien peredaman dan  $\omega$  menunjukkan frekuensi osilasi torsional. Jadi jelas sudah dengan mengetahui dan menganalisis nilai eigen *turbine-generator shaft* sistem dapat diperoleh besarnya frekuensi natural torsional yang dihasilkan oleh shaft sistem. Persamaan matriks state space untuk turbin generator *shaft* sistem sudah diturunkan pada pembahasan bab 3 pemodelan sistem dan simulasi. Berikut ini adalah plot diagram pole *steam* turbin generator dengan menggunakan matlab



Gambar 4.10 plot pole turbin-generator shaft sistem

Dari gambar plot pole steam turbin generator diatas diperoleh pole steam turbin generator terletak pada  $-0.401 \pm j198$  dan  $-0.401 \pm j91.4$ . Bagian real pole menyatakan faktor peredaman sedangkan bagian imajiner menyatakan frekuensi natural torsional shaft sistem. Dengan nilai eigen tersebut maka frekuensi natural torsional untuk turbine-generator shaft sistem adalah sebagai berikut.

Mode	Frekuensi natural torsional
1	14,5 Hz
2	31,6 Hz

Tabel 4.3 frekuensi natural torsional turbin-generator *shaft* sistem

#### 4.3.4.3 Analisis Gejala *Subsynchronous Resonance* Berdasarkan Nilai Eigen Dan Frekuensi *Subsynchronous Resonance*

Jika besarnya frekuensi natural torsional hasil turbin-generator shaft sistem besarnya sama dengan frekuensi *subsynchronous* maka akan terjadi gejala *subsynchronous resonance*. Saluran dengan kompensasi seri 55 % menghasilkan frekuensi natural jaringan 45,49 Hz yang berarti nilai frekuensi *subsynchronous* sebagai modulasi frekuensi base dan frekuensi natural yang dihasilkan adalah 14,51 Hz. Besarnya frekuensi *subsynchronous* ini bertepatan dengan salah satu frekuensi natural mode torsional yang dihasilkan oleh turbin uap generator shaft sistem.

#### 4.4 Hasil Simulasi Dan Analisis Peredaman *Subsynchronous Resonance* Dengan Menggunakan TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*)

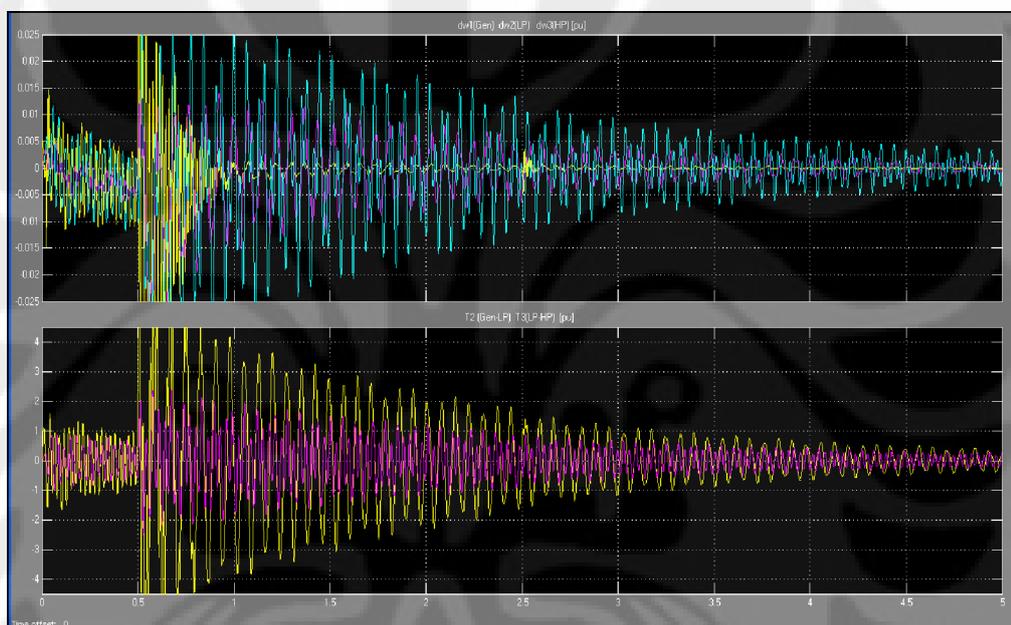
Pada hasil simulasi awal diperoleh bahwa gejala *subsynchronous resonance* terjadi ketika saluran transmisi dengan tingkat kompensasi seri saluran transmisi sebesar 55 % dikenai arus gangguan 3 fasa. Pada simulasi kali ini akan dianalisis penggunaan TCSC sebagai alat kendali elektrik untuk meredam osilasi *subsynchronous resonante*. Sebagaimana telah disebutkan pada landasan teori bahwa TCSC mempunyai karakteristik yang berbeda dari kapasitor fix. Jika nilai impedansi kapasitor fix adalah kapasitif maka nilai impedansi TCSC adalah variabel. TCSC dapat bekerja pada impedansi kapasitif ataupun induktif tergantung dengan pengontrollan sudut penyalaan. Dengan mengontroll besarnya sudut penyalaan maka dapat diperoleh pengaturan impedansi TCSC. Berdasarkan kurva karakteristik hubungan sudut penyalaan dan impedansi TCSC. Maka untuk sudut penyalaan  $0 < \alpha < 135^{\circ}$  maka diperoleh nilai impedansi TCSC bersifat induktif sedangkan untuk sudut penyalaan  $140 < \alpha < 360^{\circ}$  maka diperoleh nilai impedansi TCSC bersifat kapasitif. Atas dasar inilah maka TCSC secara umum bekerja pada dua mode operasi yaitu *kapasitif boost mode* dan *induktif boost mode*. Pengontrollan sudut penyalaan TCSC sangat dipengaruhi oleh masukan arus line dan tegangan yang terukur oleh TCSC. Karena kedua nilai ini mempengaruhi karakteristik impedansi yang terukur oleh TCSC. Impedansi terukur ini dibandingkan dengan impedansi referensi yang kemudian dari perbandingan akan diperoleh mode operasi kerja TCSC dan besarnya sudut penyalaan yang dihasilkan. Tentunya hal ini telah dibahas pada bagian pemodelan sistem.

TCSC mempunyai karakteristik impedansi kapasitif pada frekuensi sinkron akan tetapi pada frekuensi *subsynchronous* TCSC memperlihatkan karakteristik impedansi induktif. Oleh karena itu cara yang efektif untuk meredam osilasi *subsynchronous resonance* dengan menggunakan TCSC adalah dengan mengatur TCSC bekerja pada rentang impedansi induktif. Dengan kata lain mode operasi *induktif boost mode* digunakan untuk meredam osilasi *subsynchronous resonance*. Berikut ini akan

ditunjukkan hasil simulasi peredaman osilasi *subsynchronous resonance* dengan menggunakan TCSC pada mode operasi *kapasitif boost mode* dan *induktif boost mode*.

#### 4.4.1 Hasil Simulasi Peredaman Osilasi *Subsynchronous Resonance* Dengan Menggunakan TCSC Pada Mode Operasi *Kapasitif Boost Mode*.

Pada gambar 4.11 berikut ini ditunjukkan hasil simulasi peredaman osilasi *subsynchronous resonance* dengan menggunakan TCSC pada mode operasi *kapasitif boost mode*.



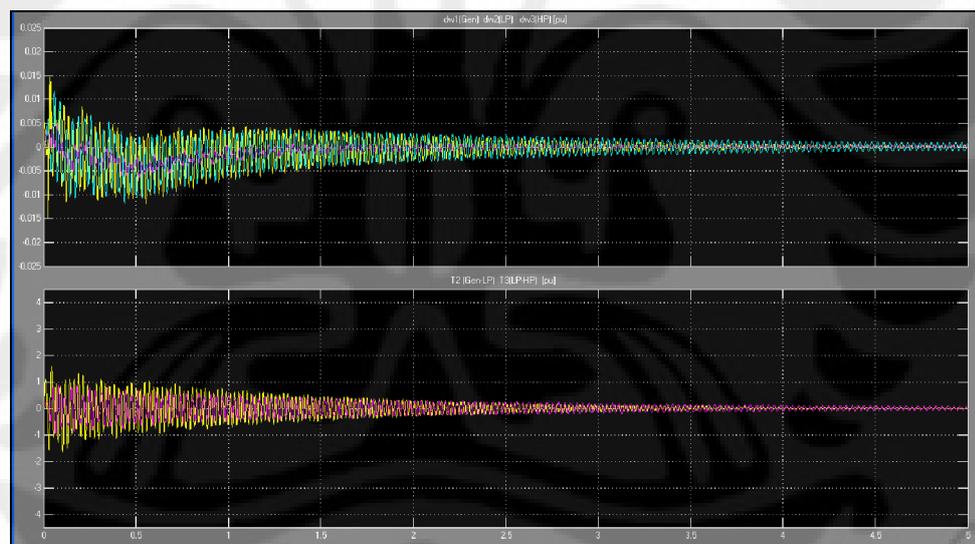
Gambar 4.11 simulasi peredaman osilasi *subsynchronous resonance* dengan TCSC pada mode operasi *kapasitif boost mode*.

Sesuai dengan gambar hasil simulasi diatas maka penggunaan mode operasi *kapasitif boost mode* pada TCSC untuk meredam osilasi *subsynchronous resonance* tidak begitu efektif. Amplitude osilasi *subsynchronous resonance* semakin lama semakin mengecil secara eksponensial dan sistem dalam keadaan teredam akan tetapi mode operasi *kapasitif boost mode* pada TCSC sebagaimana gambar diatas disertai adanya penguatan osilasi dan mencapai puncak torsi pada rentang waktu disekitar 0,5 sekon. Penguatan osilasi ini berbahaya karena amplitudonya besar sehingga dapat menyebabkan kerusakan

pada turbin-generator shaft sistem. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pengontrolan TCSC dengan mode operasi *kapasitif boost mode* tidaklah efektif karena walaupun mampu meredam osilasi torsi akan tetapi menimbulkan torsi puncak dengan amplitude yang besar dan bersifat merusak.

#### 4.4.2 Hasil Simulasi Peredaman Osilasi *Subsynchronous Resonance* Dengan Menggunakan TCSC Pada Mode Operasi *Induktif Boost Mode*.

Hasil simulasi awal menunjukkan bahwa penggunaan TCSC dengan mode operasi *kapasitif boost mode* tidaklah efektif. Hal ini karena TCSC memang menunjukkan karakteristik impedansi induktif pada daerah rentang frekuensi *subsynchronous*. Oleh karena itu TCSC perlu dikontrol dengan metode operasi *induktif boost mode* yang menyebabkan TCSC memiliki impedansi induktif. Gambar berikut adalah hasil simulasi peredaman osilasi *subsynchronous resonance* dengan menggunakan TCSC pada mode operasi *induktif boost mode*.



Gambar 4.12 hasil simulasi peredaman osilasi *subsynchronous resonance* dengan TCSC pada mode operasi *induktif boost mode*.

Hasil simulasi diatas menunjukkan efek peredaman osilasi *subsynchronous resonance* dengan menggunakan TCSC pada mode operasi *induktif boost mode* pada kompensasi seri kapasitor seri 55%. Grafik atas yang berwarna hijau kuning ungu menunjukkan peredaman osiliasi deviasi kecepatan sudut rotor

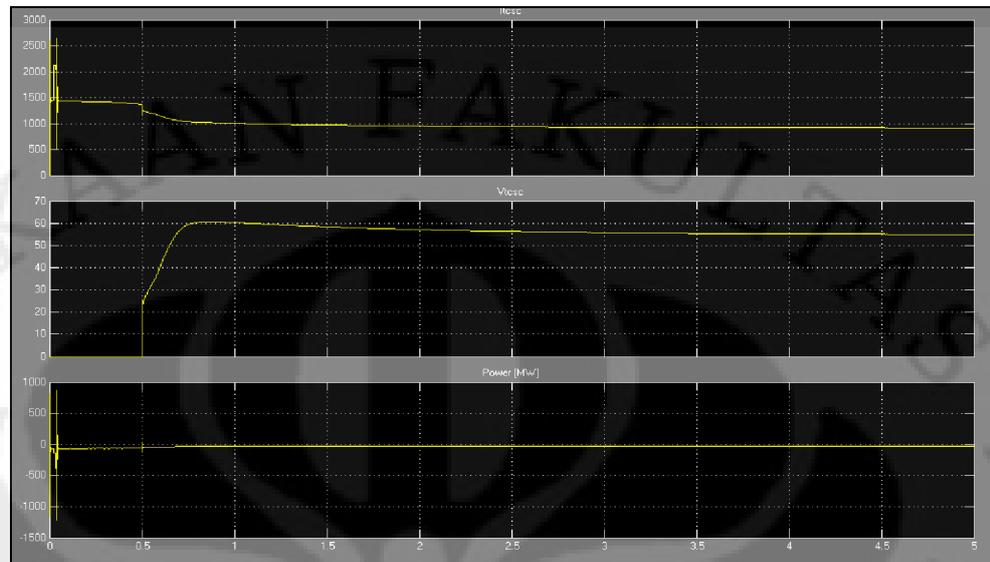
generator dan turbin sedangkan grafik bawah yang berwarna merah kuning adalah grafik peredaman osilasi torsi LP-HP turbin dan osilasi deviasi torsi generator-LP. Dengan demikian peredaman osilasi subsynchronous resonance efektif dilakukan dengan mengatur TCSC bekerja pada operasi *induktif boost mode*. Pembahasan lebih lanjut mengenai peredaman osilasi *subsynchronous resonance* pada kompensasi seri akan difokuskan pada pengendalian TCSC pada mode operasi *induktif boost mode*.

#### 4.4.3 Hasil Simulasi Karakteristik TCSC Pada Operasi *Induktif Boost Mode*

TCSC memiliki karakteristik impedansi induktif pada rentang frekuensi kerja *subsynchronous*. Karakteristik TCSC pada kondisi ini terkait dengan pengaturan sudut penyalan alpha, perbandingan arus line dan tegangan, hingga daya aktif dan daya reaktif yang disuplai oleh TCSC. Berikut ini diberikan hasil simulasi tentang karakteristik TCSC pada pengendalian mode operasi kerja *induktif boost mode*.

- Arus line, tegangan dan daya saluran

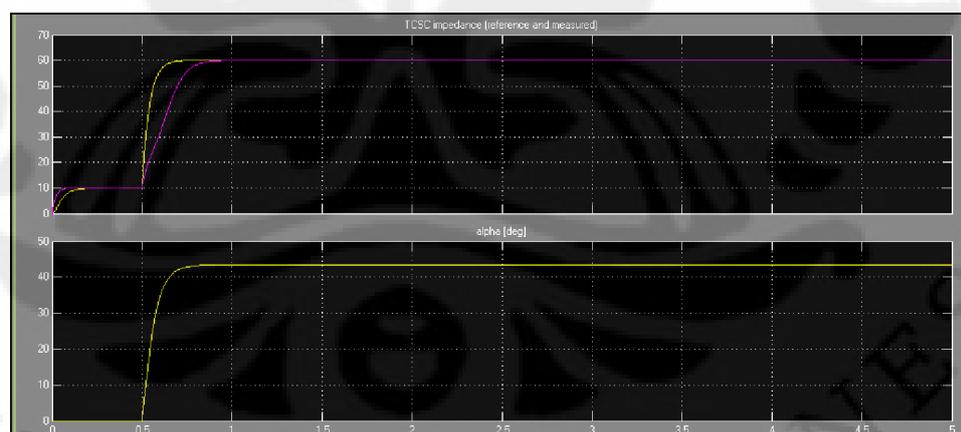
Pada pembahasan landasan teori telah dijelaskan mengenai pengendalian TCSC yang disebut dengan *current constant control*. Dengan pengendalian ini TCSC menggunakan arus dan tegangan line sebagai masukan sebagai dasar perhitungan menentukan arus, tegangan dan impedansi TCSC selain itu dari nilai nilai ini juga dapat diketahui besarnya kapasitas daya yang mengalir pada saluran. Berikut ini adalah hasil simulasi arus, tegangan dan daya yang terukur pada TCSC pada mode operasi *induktif boost mode*. Pada gambar hasil simulasi ini ditunjukkan bahwa besarnya daya yang terukur oleh TCSC adalah nol hal ini sesuai dengan analisis awal bahwa dalam efek *subsynchronous* perhatian difokuskan pada gejala osilasi torsi yang timbul sehingga untuk mempermudah analisis besarnya kapasitas daya yang dialirkan pada saluran transmisi di buat nol.



Gambar 4.13 simulasi arus, tegangan dan daya yang terukur pada TCSC pada mode operasi *induktif boost mode*.

- Impedansi dan sudut penyalan TCSC

Pada mode operasi *induktif boost mode* TCSC memiliki impedansi yang berada pada rentang  $19 < Z_{ref} < 60$  dan sudut penyalan  $0 < \alpha < 135^\circ$ . Berikut ini adalah grafik hasil simulasi tentang impedansi dan sudut penyalan TCSC pada operasi kerja *induktif boost mode*.



Gambar 4.14 simulasi impedansi dan sudut penyalan TCSC

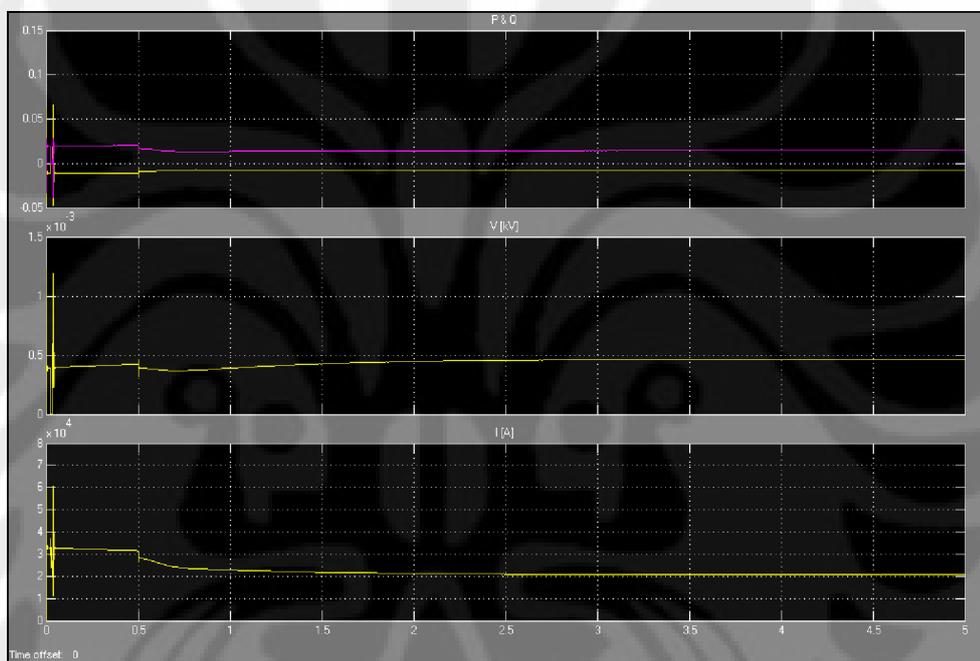
Pada grafik diatas hasil simulasi impedansi TCSC ditunjukkan oleh grafik sebelah atas sedangkan hasil simulasi sudut penyalan alpha diperlihatkan

oleh grafik bawah. Untuk grafik impedansi TCSC, nilai impedansi TCSC yang terukur dinyatakan dengan kurva garis berwarna kuning sedangkan nilai impedansi TCSC referensi dinyatakan oleh kurva garis berwarna ungu. Dari hasil simulasi nilai impedansi TCSC meningkat besarnya dari  $10 Z_{ref}$  pada rentang 0,5 sekon awal kemudian meningkat dan konstan pada nilai  $60 Z_{ref}$ . Sedangkan hasil simulasi sudut penyalan alpha menunjukkan besarnya sudut penyalan TCSC adalah  $45^\circ$  kedua hasil ini sesuai dengan karakteristik TCSC pada rentang kerja impedansi induktif.

#### **4.4.4 Analisis Peredaman Osilasi *Subsynchronous Resonance* Pada TCSC Dengan Mode Operasi *Induktif Boost Mode*.**

TCSC adalah alat kendali listrik yang efektif untuk meredam osilasi *subsynchronous resonance*. TCSC bekerja dengan memberikan efek *positif damping* pada sistem sehingga sistem menjadi stabil. Penjelasan teoritis mengenai cara kerja TCSC dalam meredam osilasi telah dibahas pada bagian landasan teori mengenai prinsip peredaman osilasi dengan menggunakan TCSC. Efek peredaman osilasi didasarkan pada ayunan daya yang terjadi selama osilasi. Pada keadaan sistem mengalami ayunan daya karena osilasi maka TCSC bertugas untuk menyuplai daya ke transmisi ataupun menyerap daya dari transmisi. Tugas TCSC tersebut tak lepas dari kemampuan TCSC dalam mendeteksi adanya perbedaan sudut phase terminal dan perbedaan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin dimana kedua parameter ini menunjukkan kapasitas daya yang dihasilkan oleh sebuah mesin generator. Setelah TCSC berhasil mendeteksi besarnya deviasi kecepatan sudut phase terminal dan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin maka TCSC mampu untuk menentukan jumlah daya yang diserap ataupun daya yang disuplai ke mesin. Adanya peranan TCSC dalam memodulasi daya pada mesin generator menghasilkan adanya torsi tambahan yang dikerjakan pada generator. Torsi tambahan ini tandanya berlawanan dengan turunan deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin sehingga dengan demikian peredaman osilasi dapat dilakukan. Untuk

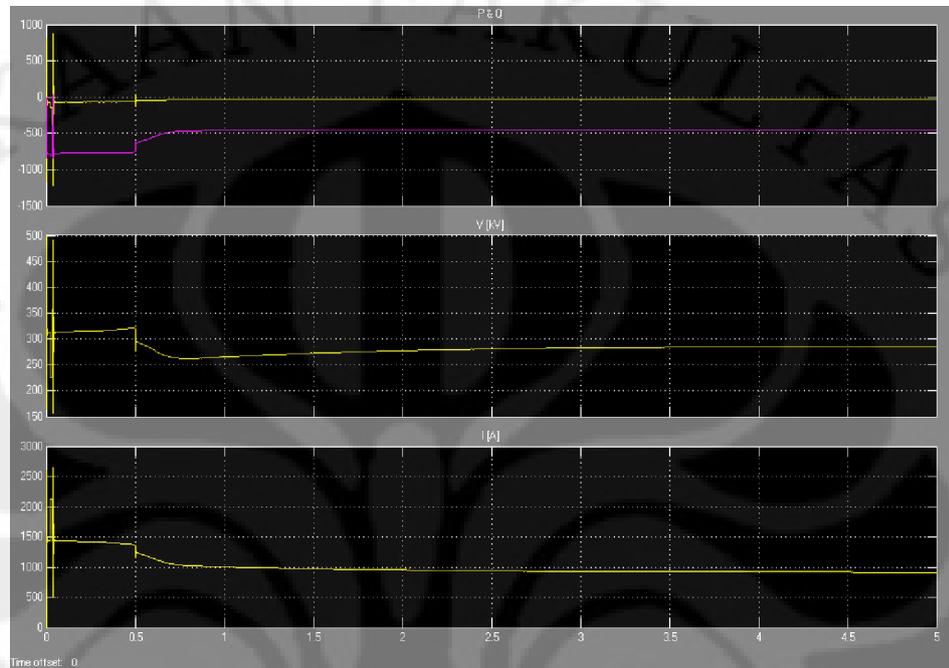
menganalisis efek peredaman osilasi *subsynchronous resonance* dengan menggunakan TCSC dapat dilakukan dengan membandingkan kapasitas pentransferan daya pada saluran transmisi yang terukur pada keluaran trafo dengan kapasitas pentransferan daya transmisi akibat modulasi daya yang dibangkitkan oleh TCSC. Berikut adalah hasil simulasi arus dan tegangan line serta kapasitas transfer daya yang terukur pada keluaran trafo. Daya keluaran yang terukur pada trafo merupakan daya transfer yang dibangkitkan oleh generator dan display ke beban.



Gambar 4.15 hasil simulasi arus, tegangan dan daya saluran

Pada gambar diatas daya reaktif saluran dinyatakan dengan garis berwarna ungu sedang akan daya aktif saluran ditandai dengan garis berwarna kuning. Keduanya dinyatakan dalam satuan MWatts dan MVAR Dapat kita lihat bahwa besarnya daya reaktif yang ditransmisikan lebih besar daripada daya aktif. Selain itu tegangan line yang terukur nilainya kecil dalam orde  $10^{-3}$  volt dan arus line yang terukur dalam orde sangat besar  $10^4$  ampere. Nilai arus, tegangan dan daya pada saluran ini terukur oleh TCSC kemudian TCSC merespon dengan memodulasi daya pada saluran. Berikut adalah hasil simulasi

arus, tegangan dan daya keluaran yang dibangkitkan dan disuplay TCSC kesaluran transmisi.



Gambar 4.16 arus, tegangan dan daya yang dibangkitkan TCSC dan diinjeksikan ke saluran. Gambar diatas adalah hasil simulasi arus, tegangan dan daya pada saluran transmisi sebagai hasil modulasi daya yang dibangkitkan oleh TCSC sebagai respon terhadap pengukuran arus, tegangan dan daya saluran transmisi. Sesuai dengan prinsip dasar peredaman osilasi pada TCSC yang telah dijelaskan sebelumnya. TCSC melihat adanya perbedaan kecepatan sudut rotor yang bernilai negatif dan deviasi kecepatan sudut phase terminal yang bernilai positif. Hal ini berasal dari pengukuran selisih antara kecepatan sudut beban dengan rotor pada generator dan pengukuran selisih antara sudut phase beban dan sudut phase generator. Beban bersifat statis sehingga deviasi kecepatan sudut rotor dan turbin dan deviasi kecepatan sudut phase terminal adalah negatif. Sesuai dengan prinsip ayunan daya yang terjadi selama osilasi, maka TCSC memberikan reaksi dengan menyuplai daya ke saluran transmisi. Hal ini dilakukan dengan meningkatkan kapasitas daya aktif dan menurunkan kapasitas daya reaktif yang ditransmisikan ke beban. Prinsip kerja TCSC yang

Universitas Indonesia

menurunkan daya reaktif secara teoritis sama dengan cara kerja filter aktif yang bekerja sebagai kompensasi VAR. TCSC mengkompensasi sebagian daya reaktif yang disuplai beban sehingga generator tidak perlu menyuplai keseluruhan daya reaktif yang diperlukan oleh beban. Hal ini jelas terlihat pada hasil simulasi dimana daya reaktif yang ditransmisikan bernilai negatif yang berarti TCSC berperan dalam melepas daya reaktif sebagai bentuk kompensasi VAR terhadap generator. Untuk itu tegangan saluran ditingkatkan menjadi beberapa kali lipat dan menurunkan arus saluran untuk meningkatkan efisiensi. Daya yang disuplai oleh TCSC akan dimodulasikan dengan daya yang dibangkitkan generator. Daya yang disuplai TCSC berlawanan tanda dengan daya yang awal yang disuplai oleh generator ke saluran transmisi. Daya yang disuplai TCSC dan bermodulasi dengan daya pada yang dibangkitkan generator menghasilkan torsi yang melawan torsi awal generator sehingga dihasilkan resultan torsi listrik yang semakin kecil. Dengan demikian osilasi torsi akibat *subsynchronous resonance* dapat diredam.

## BAB 5

### KESIMPULAN

- a. Hasil simulasi pada keadaan jaringan tanpa kompensasi seri dan tanpa arus gangguan menunjukkan kinerja generator dan turbin uap yang stabil tanpa osilasi torsi ataupun deviasi kecepatan sudut generator dan turbin.
- b. Hasil simulasi pada keadaan jaringan diaplikasikan arus gangguan 3 fasa tanpa kompensasi seri menunjukkan adanya osilasi torsi antara turbin-generator shaft sistem dan osilasi deviasi kecepatan sudut rotor-turbin. Hal ini dikarenakan arus gangguan yang dikenakan ke sistem mengandung arus komponen urutan negatif yang menghasilkan torsi elektrik dalam arah yang berlawanan dengan torsi mekanis. Akan tetapi osilasi ini lama kelamaan mengecil seiring waktu secara eksponensial dikarenakan faktor peredaman yang diberikan sistem.
- c. Hasil simulasi pada keadaan pada jaringan terkompensasi seri dan diaplikasikan arus gangguan menunjukkan gejala *subsynchronous* resonance berupa osilasi torsi pada turbine-generator shaft sistem yang tidak teredam dan terus membesar secara eksponensial. Gejala *subsynchronous* resonance terjadi ketika jaringan dikompensasi seri dengan tingkat kompensasi kapasitor fix sebesar 55%. Dari hasil analisis domain frekuensinya pada tingkat kompensasi ini besarnya frekuensi natural shaft sistem yang dimiliki turbine-generator shaft sistem besarnya sama dengan frekuensi *subsynchronous*.
- d. Simulasi peredaman osilasi torsi *subsynchronous* resonance dilakukan dengan mode operasi *kapasitif boost mode* dan *induktif boost mode*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peredaman osilasi torsi *subsynchronous* resonance efektif dilakukan dengan mode operasi *induktif boost mode*. Hal ini sesuai dengan teori bahwa TCSC bekerja pada rentang impedansi induktif pada frekuensi *subsynchronous*.
- e. Hasil simulasi peredaman osilasi torsi *subsynchronous* resonance menunjukkan bahwa peredaman osilasi oleh TCSC dilakukan dengan meningkatkan daya aktif

dan menurunkan daya reaktif pada jaringan. Pada keadaan ini TCSC berperan seperti filter aktif yang mengkompensasi daya reaktif yang disuplai generator ke beban. Peningkatan daya aktif dan penurunan daya reaktif akan berimbas pada daya generator sehingga peredaman osilasi torsi tercapai karena hasil modulasi torsi awal generator dan torsi tambahan akibat penambahan daya akan menghasilkan torsi listrik dengan amplitudo yang semakin kecil.

## Daftar Referensi

- [1] Ängquist, Lennart.(2002).*Synchronous Voltage Reversal Control of Thyristor Controlled Series Capacitor*.stockholm:Royal Institute of Technology
- [2] Grigsby ,Leonard L. (2007).*POWER SISTEM STABILITY and CONTROL*. London:CRC PRESS.
- [3] Hase, Yoshihide.(2007). *Handbook of Power Sistem Engineering*. West Sussex PO19 8SQ, England : John Wiley & Sons Ltd.
- [4] Hingorani NG & Gyugyi L.(1999).*Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*.New York:IEEE Computer Society Press.
- [5] Mathur, Mohanand Rajiv, Varma. (2002). *THYRISTOR-BASED FACTS CONTROLLERS FOR ELECTRICAL TRANSMISSION SYSTEMS*. United states : IEEE press.
- [6] P.M, Anderson, B.L.Agrawal and J.E Van Ness. (1990). *Subsynchronous Resonance In Power Sistem*. New York : IEEE press
- [7] Ping Zhang, Xiao, Rehtanz Christian & Pal Bikash.(2006). *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*. Berlin : Springer Berlin Heidelberg.
- [8] ABB Research LTD. (2007).*Thyristor Controlled Series Capacitor Adapted To damp Subsynchronous Resonance*. World Intellectual Property Organization International Bureau.
- [9] A. M. MIRI, C. SIHLER, T. ZÖLLER. *ACTIVE DAMPING OF TORSIONAL MODES IN TURBINE-GENERATOR SHAFTS*.
- [10] A Rahman, Mazilah Binti. *OVERVIEW OF THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPACITOR (TCSC) IN POWER TRANSMISSION SYSTEM*.
- [11] Ängquist,Lennart & Hailian Xie. *Synchronous Voltage Reversal control of TCSC – impact on SSR conditions*. stockholm:Royal Institute of Technology
- [12] Ängquist ,Lennart, Ingerstrom, Gunnar and, Jonsson, Hans-Ake.(1996). *DYNAMICAL PERFORMANCE OF TCSC SCHEMES*. ABB Power Systems AB Sweden.

- [13] Ching Wu, Rong, Ian Tsai, Jong, and Sheng Zhan, Tung. (2006). *A RANDOM SUBSYNCHRONOUS RESONANCE IN A TURBINE GENERATOR SET*. Proceeding of IASTED International Conference Energy and Power System March 29-31, 2006, Chiang Mai, Thailand.
- [14] Daniel H Baker & Einer V Larsen. (1996). *Assessment of FACTS Requirements on the PSE&G System*. California: General Electric Company.
- [15] G. E. Alexander, dkk. *Series Compensated Line Protection – A Practical Evaluation*. GE Power Management
- [16] G. Escobar, A.M. Stanković, P. Mattavelli and R. Ortega. (2002). On The Non Linear Control Of TCSC. Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences – 2002.
- [17] Herminio J.C.P. Pintod, Nelson Martins, and John J. Paserba. (2000) *USING A TCSC FOR LINE POWER SCHEDULING AND SYSTEM OSCILLATION DAMPING - SMALL SIGNAL AND TRANSIENT STABILITY STUDIES*. IEEE
- [18] L. ÄNGQUIST, dkk. *THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPACITOR USED AS A MEANS TO REDUCE TORSIONAL INTERACTION SUBSYNCHRONOUS RESONANCE*. Sweden
- [19] Mattavelli, Paolo, M. Stancovic, Aleksander, Verghese, George C. *SSR Analysis With Dynamic Phasor Model of Thyristor Controlled series Capacitor*. University of Padova
- [20] M.R. Iravani, R.M. Hamouda, and R. Hackam. (1989). *TORSIONAL OSCILLATIONS OF SERIES CAPACITOR COMPENSATED ACIDC SYSTEMS*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, August 1989
- [21] M.R. Feyzi, M.B.B. Sharifian, and M. Valizadeh. *Analysis of Damper Parameters Effect on Sub Synchronous Resonance Stability*. Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz
- [22] Nadia., & Al-Dabbagh, Madjid. *Subsynchronous Resonance Damping In Connection Power System*. School of Electrical and Computer Engineering RMIT University.

- [23] Panda, S., Padhy,N.P.&Patel,R.N.(2007). *Modelling, Simulation and Optimal Tuning Of TCSC Controller*. School of Electrical and Computer Engineering, IIT and School of Electrical and Computer Engineering, SSCETYousif
- [24] Sharaf, A.M., Yin, Bon. *Damping Subsynchronous Resonance Oscillations Using A Dynamic Switched Filter-Compensator Scheme*. Electrical and Computer Engineering Department University of New Brunswick.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1

#### Persamaan Induktansi Persamaan Matriks Fluks Generator Sinkron

- induktansi diri stator

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\text{dengan } L_s > L_m$$

$$\text{dan } \theta = \omega_B t + \delta + \frac{\pi}{2}$$

- induktansi mutual stator

$$L_{ab} = -M_s - L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$L_{bc} = -M_s - L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$L_{ca} = -M_s - L_m \cos 2\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right)$$

$M_s$  adalah konstanta induktansi mutual

- Induktansi diri rotor

Besarnya induktansi rotor adalah konstanta sehingga kita gunakan penulisan notasi tunggal untuk mempermudah analisa.

$$L_{FF} = L_F$$

$$L_{DD} = L_D$$

$$L_{GG} = L_G$$

$$L_{QQ} = L_Q$$

- Induktansi mutual rotor

Besarnya induktansi mutual rotor adalah nol karena hubungan antara salah satu kutub dengan yang lain adalah  $90^\circ$ .

$$L_{FD} = L_{DF} = M_X$$

$$L_{CQ} = L_{QC} = M_Y$$

$$L_{FG} = L_{GF} = 0$$

$$L_{FQ} = L_{QF} = 0$$

$$L_{DG} = L_{GD} = 0$$

$$L_{DQ} = L_{QD} = 0$$

Nilai  $M_X$  dan  $M_Y$  adalah positif

- Induktansi mutual stator rotor

Induktansi mutual stator rotor dibagi menjadi dua bagian yaitu:

1. Induktansi mutual stator rotor yang melibatkan d axis

$$L_{aF} = L_{Fa} = M_F \cos\theta$$

$$L_{bF} = L_{Fb} = M_F \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{cF} = L_{Fc} = M_F \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{aD} = L_{Da} = M_D \cos\theta$$

$$L_{bD} = L_{Db} = M_D \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{cD} = L_{Dc} = M_D \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Dengan  $M_F$  dan  $M_D$  bernilai positif

2. Induktansi mutual stator rotor yang melibatkan q axis

$$L_{aG} = L_{Ga} = M_G \sin\theta$$

$$L_{bG} = L_{Gb} = M_G \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{cG} = L_{Gc} = M_G \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{aQ} = L_{Qa} = M_Q \sin\theta$$

$$L_{bQ} = L_{Qb} = M_Q \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{cQ} = L_{Qc} = M_Q \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Dengan  $M_G$  dan  $M_Q$  bernilai positif.

## Lampiran 2

### Penurunan Rumus Persamaan Matriks Transformasi Park's

Matriks persamaan fluks pada generator sinkron dituliskan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_G \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aG} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bG} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cG} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_F & M_X & 0 & 0 \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & M_X & L_D & 0 & 0 \\ L_{Ga} & L_{Gb} & L_{Gc} & 0 & 0 & L_G & M_Y \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & 0 & 0 & M_Y & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \\ i_F \\ i_D \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix}$$

Dari matriks diatas dapat diperoleh nilai eigen untuk induktansi stator generator sinkron dengan  $\det[\lambda I - L_{SS}] = 0$

$$\lambda^3 - (L_{aa} + L_{bb} + L_{cc})\lambda^2 + (L_{aa}L_{bb} + L_{bb}L_{cc} + L_{cc}L_{aa} - L_{ab}^2 - L_{bc}^2 - L_{ca}^2)\lambda + (L_{aa}L_{bc}^2 + L_{bb}L_{ca}^2 + L_{cc}L_{ab}^2 - L_{aa}L_{bb}L_{cc} - 2L_{ab}L_{bc}L_{ca}) = 0$$

Nilai eigen untuk persamaan diatas adalah

$$\lambda_1 = L_s - 2M_s$$

$$\lambda_2 = L_s + M_s + \frac{3}{2}L_m$$

$$\lambda_3 = L_s + M_s - \frac{3}{2}L_m$$

Sedangkan nilai eigen vektor persamaan matriks induktansi generator sinkron dapat diperoleh dengan persamaan

$$(L_{SS} - \lambda_i I)v_i = 0, i = 1, 2, 3$$

$$v_1 = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

$$v_3 = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - 2\pi/3) \\ \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

$Q = [V_1 \ V_2 \ V_3]$ , dengan demikian diperoleh matriks persamaan transformasi Park's yang dinyatakan sebagai berikut

$$P = Q^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta & \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

### Lampiran 3

**Parameter Percobaan Simulasi “Second Benchmark Model Subsynchronous Resonance IEEE Trans., v.PAS-104,n.p” Dengan Menggunakan Matlab Simulink**

- Parameter generator sinkron 600 MVA, 22 KV

Parameter	Nilai
Daya pembangkitan	600 MVA
Tegangan line to line	22 KV
Frekuensi	60 Hz
$D$ -axis synchronous reactance ( $X_d$ )	1,65 pu
$D$ -axis transient reactance ( $X'_d$ )	0,25 pu
$D$ -axis sub-transient reactance ( $X''_d$ )	0,2 pu
$Q$ -axis synchronous reactance ( $X_q$ )	1,59 pu
$Q$ -axis transient reactance ( $X'_q$ )	0,46 pu
$Q$ -axis sub-transient reactance ( $X''_q$ )	0,2 pu
$D$ -axis transient open-circuit time constant ( $\tau'_{do}$ )	4,5 sekon
$D$ -axis sub-transient open-circuit time constant ( $\tau''_{do}$ )	0,04 sekon
$Q$ -axis transient open-circuit time constant ( $\tau'_{qo}$ )	0,67 sekon
$Q$ -axis sub-transient open-circuit time constant ( $\tau''_{qo}$ )	0,09 sekon
Resistansi stator	0,0045 pu
Induktansi stator	0,140 pu
Koefisien inersia (H)	0,8788
Jumlah pole	1
Tegangan eksitasi (Vf)	1,00406

- Parameter turbin uap

Parameter	Nilai
Kecepatan sinkron	3600 rpm
Koefisien inersia low pressure turbin	1,5498 s
Koefisien inersia high pressure turbin	0,24898 s
Konstanta spring generator-LP turbin	83,47 pu/rad
Konstanta spring LP-HP turbin	42,702 pu/rad
Damping factor LP turbin	0,3104 pu
Damping factor HP turbin	0,05 pu

- Impedansi saluran transmisi berdasarkan *base value* 100 MVA dan 500 KV

Parameter	Posistif sequence	Zero sequence
$R_T$	0.0002	0.0002
$X_T$	0.0200	0.0200
$R_1$	0.0074	0.0220
$X_{L1}$	0.0800	0.2400
$R_2$	0.0067	0.0186
$X_{L2}$	0.0739	0.2100
$R_{SYS}$	0.0014	0.0014
$X_{SYS}$	0.0300	0.0300

- Parameter trafo step-up 3phasa

Parameter	Nilai
Tegangan primer	22 KV
Tegangan sekunder	500 KV
Resistansi primer	0,0006 pu
Resistansi sekunder	0,0006 pu
Induktansi primer	0 pu
Induktansi sekunder	0,12 pu
Reaktansi dan resistansi magnetisasi	500 pu

## Lampiran 4

### Parameter Simulasi Dengan Menggunakan Matlab Simulink

- Parameter generator sinkron

**Block Parameters: 600 MVA 22kV 3600 rpm**

Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame.

Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced

Nominal power, line-to-line voltage, frequency [ Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ]:  
[ 600e6 22e3 60 ]

Reactances [ Xd Xd' Xd'' Xq Xq' Xq'' Xl ](pu):  
[ 1.65, 0.25, 0.2, 1.59, 0.46, 0.2, 0.14 ]

d axis time constants: Open-circuit

q axis time constants: Open-circuit

Time constants [ Tdo' Tdo'' Tqo' Tqo'' ](s):  
[ 4.5, 0.04, 0.67, 0.09 ]

Stator resistance Rs (pu):  
0.0045

Inertia coefficient, friction factor, pole pairs [ H(s) F(pu) p ]:  
[ 0.8788 0 1 ]

Initial conditions [ dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu) ]:  
[ -120.13 0.00246067 0.00246067 0.00246067 -120.13 119.87 -0.129783 1.00406 ]

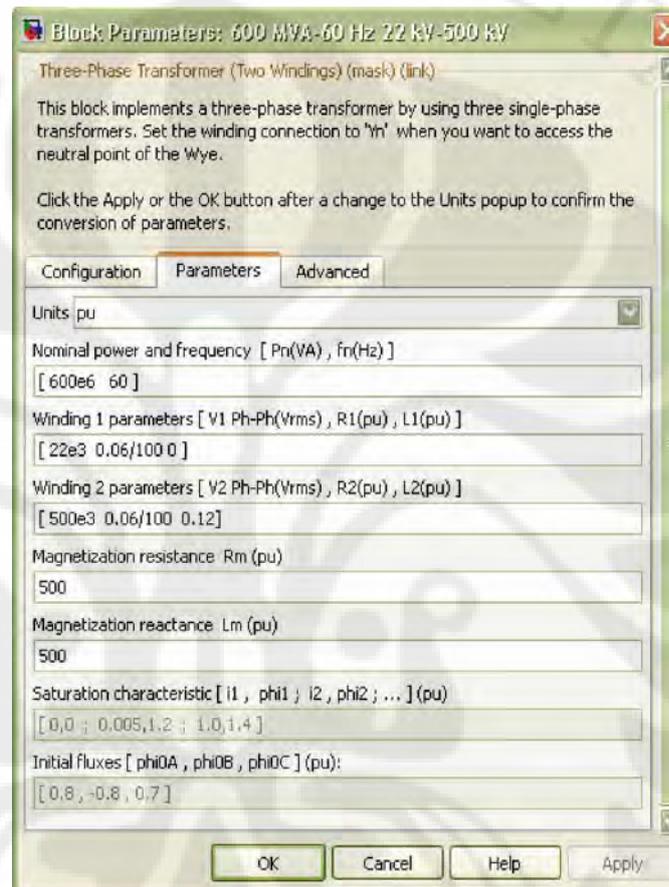
Simulate saturation

OK Cancel Help Apply

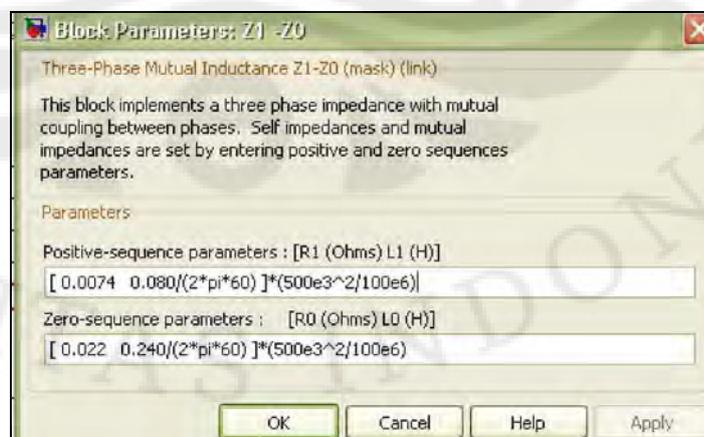
- Parameter steam turbin-governor



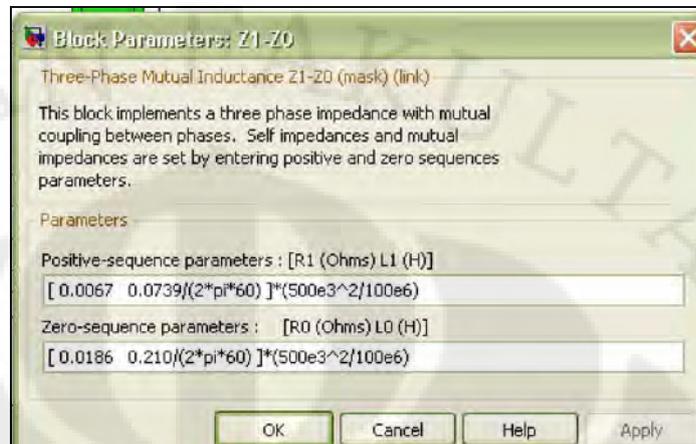
- Parameter trafo step up 3 fasa



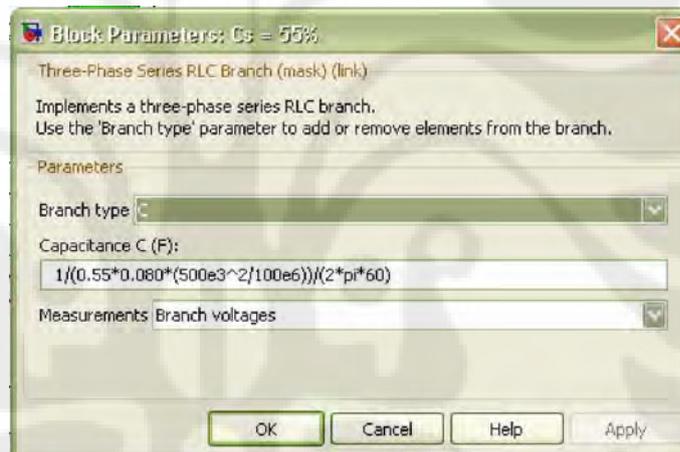
- Parameter saluran transmisi “a” atas.



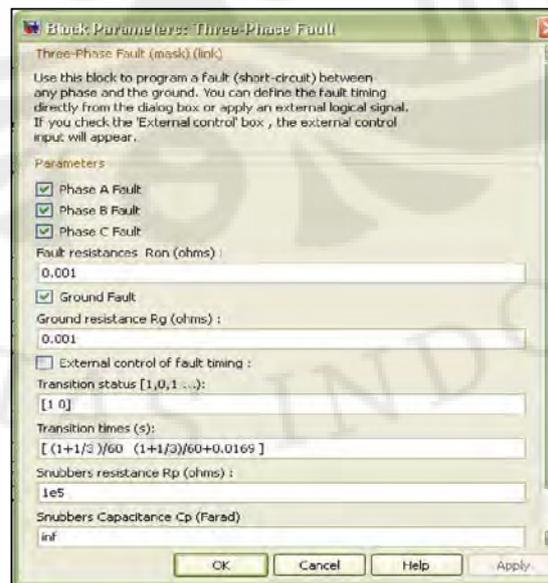
- Parameter saluran transmisi “b” bawah.



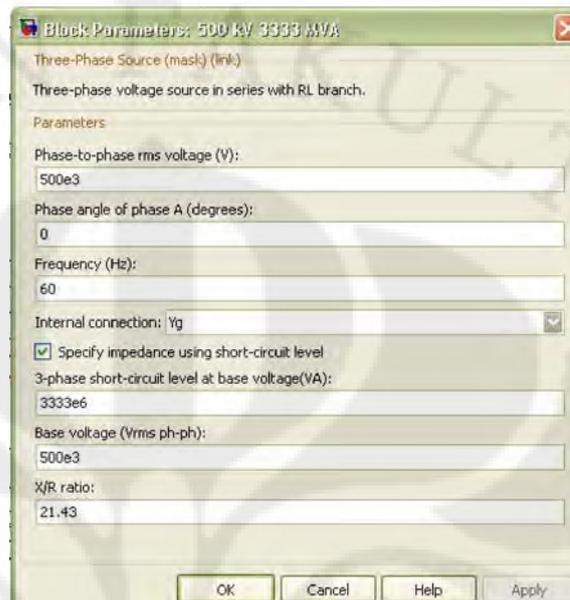
- Parameter kapasitor fix



- Parameter arus gangguan 3 fasa



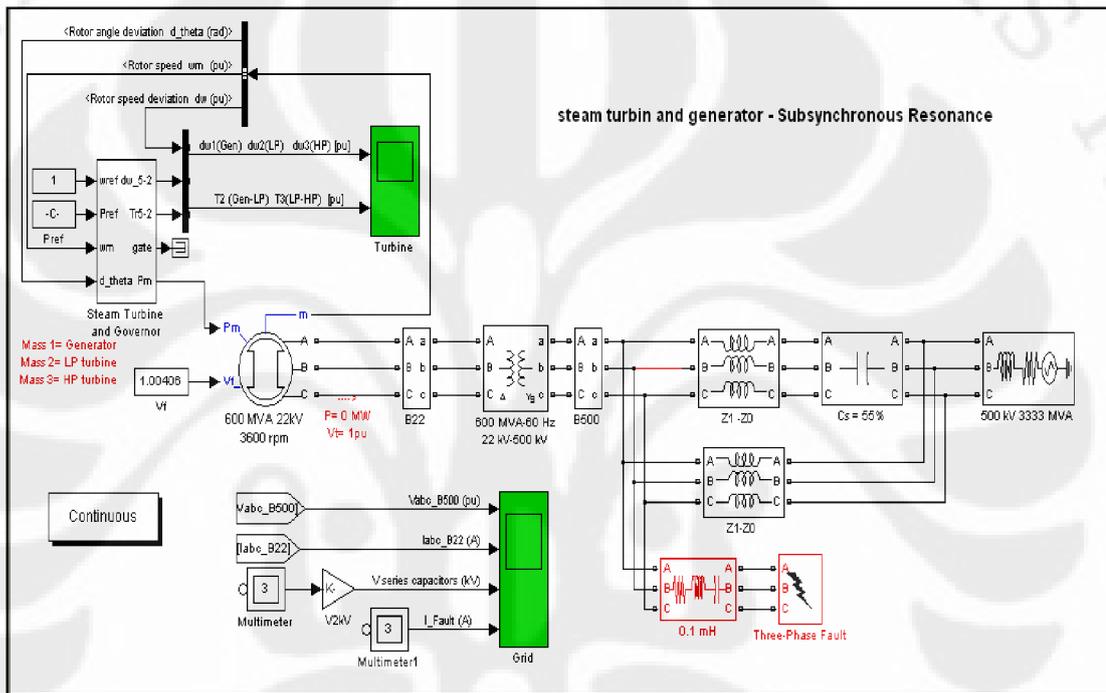
- Parameter blok beban 3 fasa



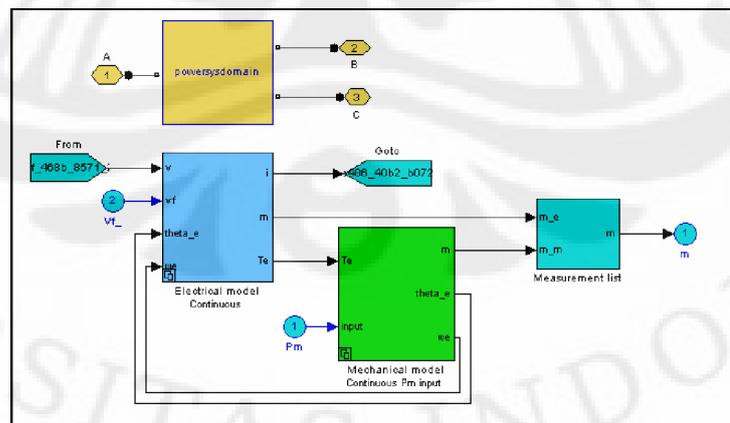
### Lampiran 5

#### Blok Diagram Simulasi Dengan Menggunakan Matlab Simulink

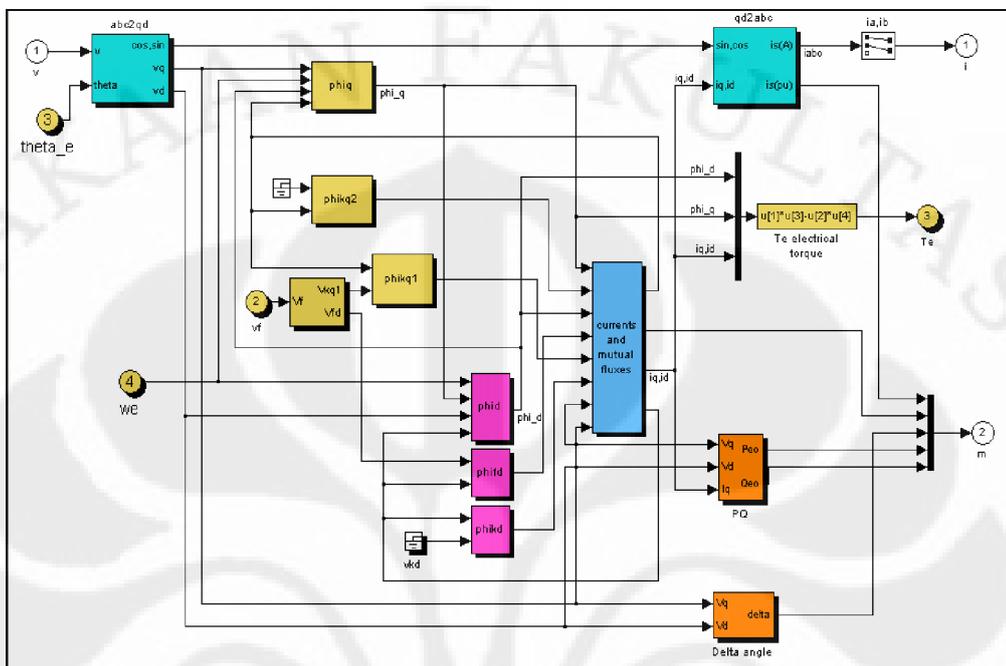
- Desain simulasi *subsynchronous resonance* berdasarkan Second Benchmark Model IEEE



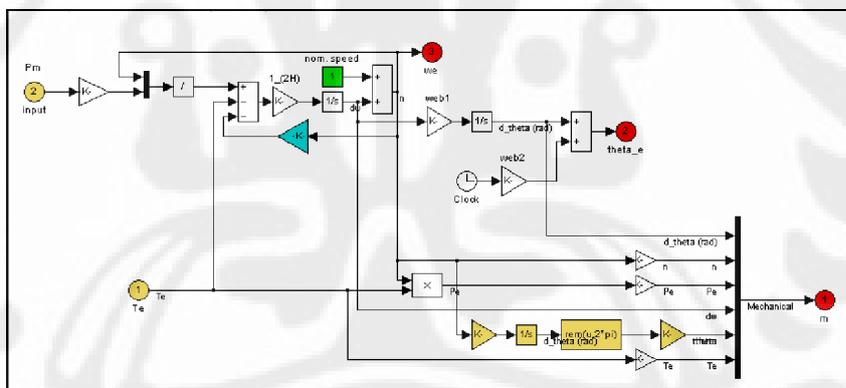
- Blok Generator sinkron



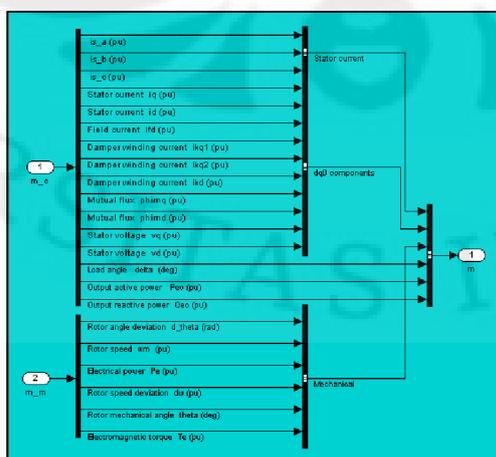
- Sub-blok Electrical model generator sinkron



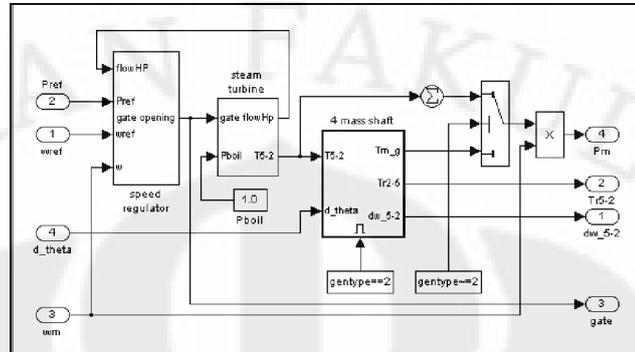
- Subsystem mechanical blok generator sinkron



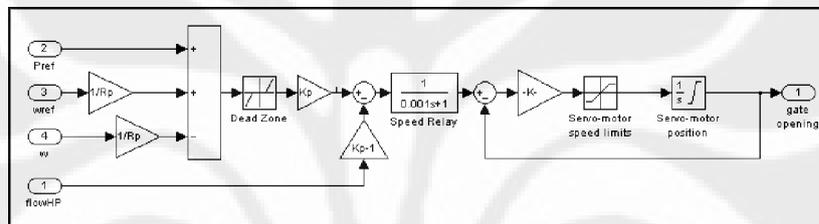
- Sub-blok measurement generator sinkron



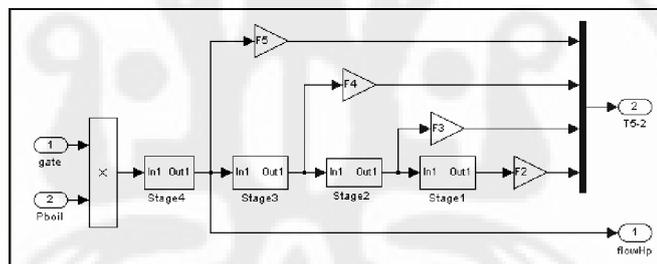
- Steam turbine-generator blok



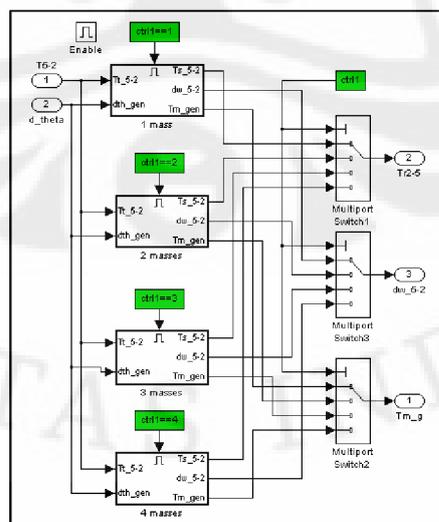
- Sub-blok speed regulator steam turbin generator



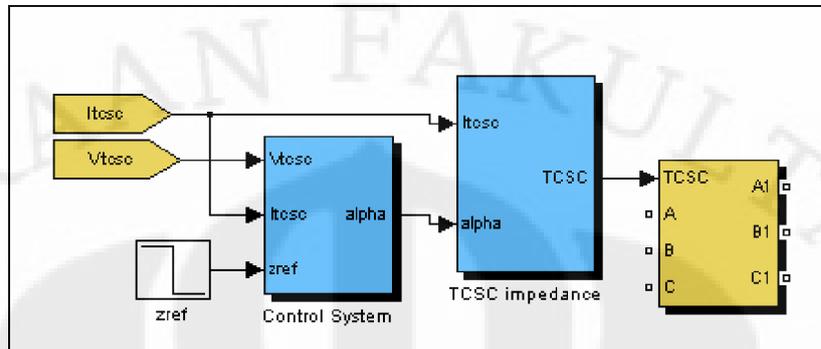
- Sub-blok boiler steam-turbine generator



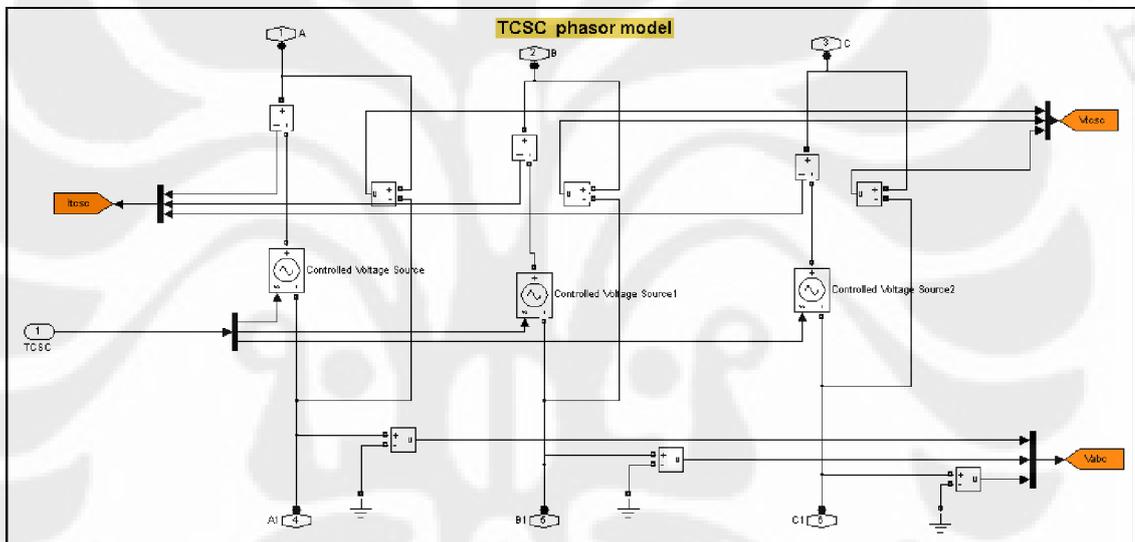
- Sub-blok mass system steam turbine-generator



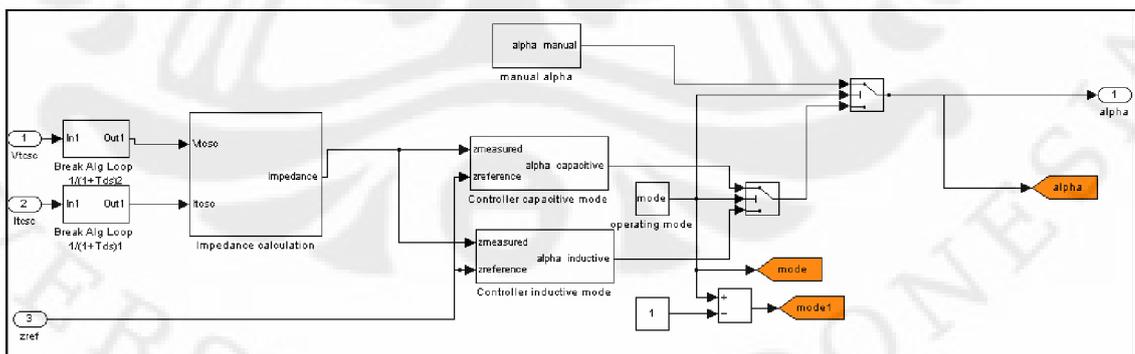
- Blok pengontrolan TCSC



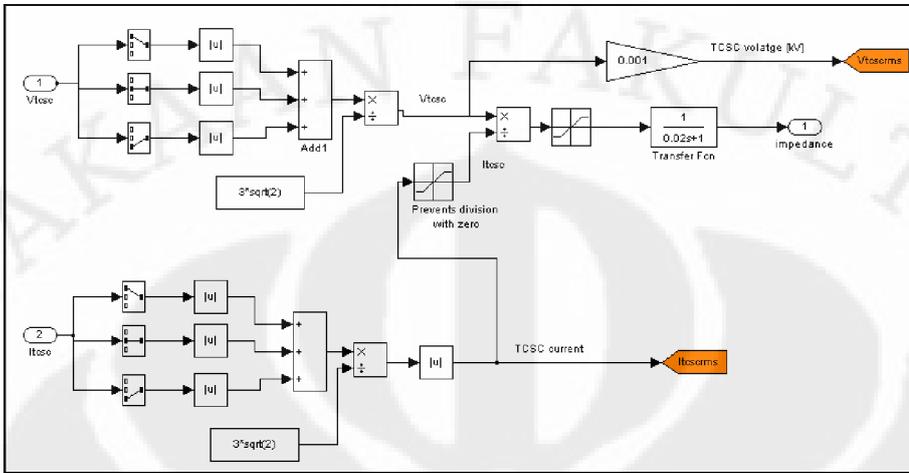
- Blok switching TCSC



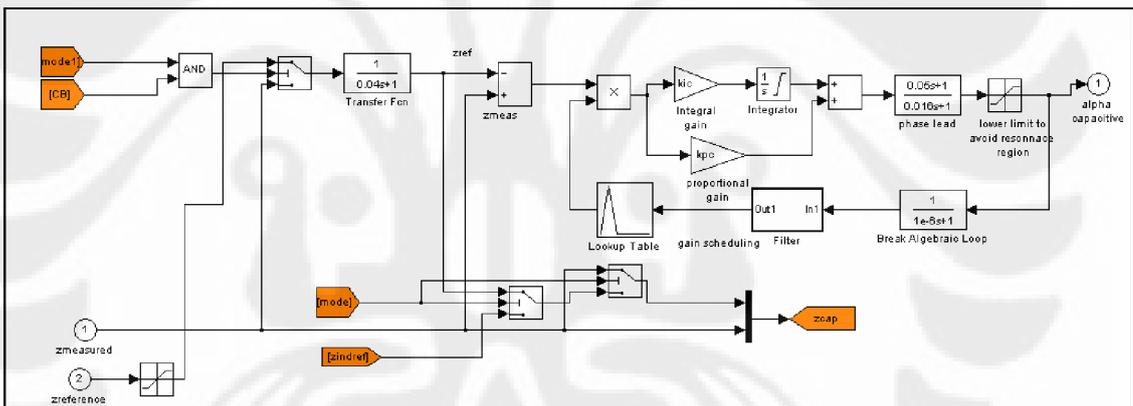
- Blok pengontrolan TCSC



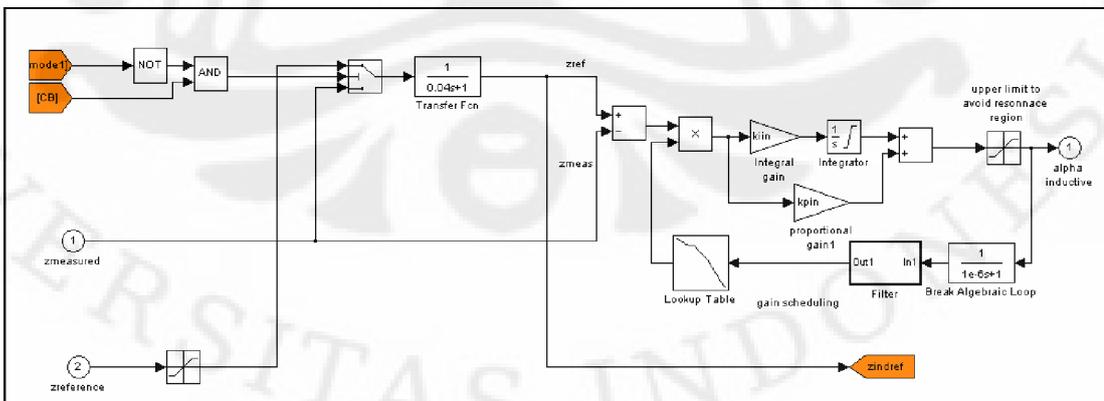
- Sub-blok impedance calculation



- Sub-blok controller capacitive mode



- Sub-blok induktif mode



- Blok impedansi TCSC

