

**ANALISA SIMULASI PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN DENGAN  
PENGATURAN SISTEM DAYA MENGGUNAKAN SSTS, D-STATCOM DAN  
DVR PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV PENYULANG PIER-BANGIL**

**SKRIPSI**

*Disusun Oleh :*

**SINGGIH ANGGI PRATAMA**  
**05.12.014**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
2011**



# LEMBAR PERSEMBAHAN

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

**Allah SWT** yang telah memberikan ridho-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini. Kuasamu Tak henti-hentinya memberikan anugrah yang seringkali tak kusadari, maaf jika hambamu seringkali merasa kurang mensyukuri rahmat-Mu, namun segala pujian dan sanjungan keagungan takkan pernah lupa kulantunkan untuk-Mu...

Kedua orang tua tercinta, **Ibunda dan Ayahanda** serta **Eyang Uti Djayatun** tersayang yang selalu memberikan doa, dukungan serta semangat, dan nasihat siang malam yang tak pernah terhenti. Kesemuanya itu menjadi bahan bakar bagi ananda untuk selalu berusaha terus maju. Untuk Ibunda dan Ayahanda, ananda berjanji akan membuat kalian bangga, selalu.

Adikku **Inggit Cintangsyu Putri**, serta adik2 Sepupuku serta semua keluarga, yang kadang2 mempeributkan hal kecil, kita bisa menyadari hal yang lebih besar... terima kasih atas segala support dan doa nya sehingga aku bisa menyusun puzzle kehidupanku dengan lebih baik.

Bapak. **Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT** selaku pembimbing I dan Dosen Wali, kepada Bapak **Ir. Eko Nurcahyo** selaku pembimbing II terima kasih selalu memberikan waktunya berkonsultasi untuk saya, terima kasih banyak.

*Orang-orang terdekat penulis :*

- Teman2 angkatan 2005 Putra, **Yusuf, Nasrudin, Arif (Gemat), Makik, Elsa** (yang sudah menjadi Alumni ITN Malang), **Frans (Iay), Johannes, Natan, Roni Moxer (SELAMAT BERJUANG)**.
- Friend like a brother Anak2 kosan yang tinggal satu atap sejak awal kuliah 2005 arpe aku lulus dan menjadi Sarjana hahahaha..... **Sulistyo Eka S (sulek), Marzuki, Arif Moxer**, (semangat tetap di jaga terus yo) **WISH U ALL THE BEST, Augusto Tri H (utto), Setly, Inom, Bayu**, (walaupun kaitan udah lulus duluan akhirnya ak menyusul juga), anak2 kosan jalan perusahaan gang **3 Irfan, Roni bali, Ota** terima kasih banyak atas dukungar kalian, tanpa dukungan kalian mungkin Skripsi ini bisa tertunda.
- Teman-teman seperjuangan penulis **Aap (kipli), Prastya (Pak Dhe), Yoni (gondrong), I Gede (Stff), Mifti (M2w), safitri (ardie)** yang kebanyakan bercandanya dari pada seriusnya, tanpa bantuan kalian mungkin Skripsi ini tidak bisa terselesaikan.
- Teman2 sekampung yang selalu mendukung selama Pengerjaan Tugas Akhir ini **Kang mas Minti, Yugo (Baser), Margono, Mukhlis (Bodeng), Memet (Cemet)** dan semuanya, yang selalu memberikan motivasi dan semangat selama pengerjaan Skripsi ini.
- Teman-teman SMK, teman SMP dan teman SD. Teman di luar lingkungan akademis, Yang selalu menanyakan kapan LULUS? Akhirnya aku LULUS juga.

Walaupun nanti Jarak memisahkan kita dan waktu yang tak berpihak pada kita, namun semuanya itu bukan menjadi halangan kita untuk tetap menjalin persaudaraan karena setiap hal menjadi berarti dalam setiap perjumpaan kita, thanks all...

Dan yang tidak terlewatkan juga, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang penulis tidak dapat disebutkan satu persatu dan membantu penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini. Terutama untuk seluruh Dosen dan Staf karyawan Institut Teknologi Nasional Malang.

**Semoga segala dukungan, doa dan kebahagiaan yang telah diberikan kepada penulis selama ini dicatat dan dibalas oleh-Nya Amiiiiiiiiiiiiin.....!!**

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**ANALISA SIMULASI PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN  
DENGAN PENGATURAN SISTEM DAYA MENGGUNAKAN SSTS,  
D-STATCOM DAN DVR PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV  
PENYULANG PIER-BANGIL**

**SKRIPSI**

Disusun dan diajukan untuk melengkapi dan memenuhi persyaratan guna mencapai  
gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:  
**SINGGIH ANGGI PRATAMA**  
NIM. 05.12.014

Mengetahui,  
**Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1**



**Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT**  
NIP. Y. 1018800189


Diperiksa dan Disetujui,

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**



**Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT**  
NIP. Y. 1018800189



**Ir. Eko Nurcahyo**  
NIP. Y. 1028700172

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
2011**

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan berkat dan rahmat-Nya sehingga penelitian berjudul Analisa Simulasi Perbaikan Kualitas Tegangan Dengan Pengaturan Sistem Daya Menggunakan SSTS, D-STATCOM dan DVR Pada Jaringan Distribusi 20 KV Penyulang PIER-Bangil dapat terselesaikan.

Penelitian ini dibuat untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar sarjana teknik. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan pada:

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Abraham Lomi, MSEE selaku Rector Institut Teknologi Nasional Malang.
2. Bapak Ir. Sidik Noertjahjono, MT selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri ITN Malang.
3. Bapak Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1.
4. Bapak Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT selaku Dosen Pembimbing I.
5. Bapak Ir. Eko Nurcahyo selaku Dosen Pembimbing II.
6. Karyawan PT. PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur Area Pelayanan dan Jaringan Pasuruan serta karyawan PT. PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur Area Pelayanan dan Jaringan Pasuruan - Unit Pelayanan dan Jaringan Bangil.
7. Rekan-rekan Asisten Laboratorium Analisis Sistem Tenaga Teknik Elektro ITN Malang.
8. Semua pihak yang telah membantu dalam penulisan dan penyusunan penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari sempurna, untuk itu kritik dan saran dari pembaca sangat penulis harapkan untuk perbaikan penelitian ini.

Malang, Februari 2011

Penulis

## DAFTAR ISI

Lembar Persetujuan .....	i
Abstrak.....	ii
Kata Pengantar.....	iii
Daftar Isi .....	iv
Daftar Gambar .....	vii
Daftar Tabel.....	ix
Daftar Grafik.....	x
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Pembahasan.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Metodologi Penelitian .....	2
1.6. Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB II SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK</b>	
2.1. Sistem Tenaga Listrik.....	4
2.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik .....	4
2.3. Jaringan Pada Sistem Distribusi Primer .....	5
2.3.1. Jaringan Radial.....	5
2.3.2. Jaringan Hantaran penghubung ( <i>Tie Line</i> ).....	6
2.3.3. Jaringan Lingkar ( <i>Loop</i> ).....	7
2.3.4. Jaringan Spindel .....	7
2.3.5. Sistem Gugus atau sistem Kluster .....	8
2.4. Sistem Distribusi Sekunder (Jaringan Tegangan Rendah).....	9
2.5. Gangguan Dalam Sistem Tenaga Listrik .....	10
2.6. Kualitas Daya ELEktrik.....	12
2.6.1. Klasifikasi Kualitas Daya.....	12
2.6.2. Daya Dalam Sistem Tenaga Listrik.....	13
2.6.2. 1. Daya Nyata ( <i>Real Power</i> ).....	13
2.6.2. 2. Daya Reaktif ( <i>Reactive Power</i> ).....	13
2.6.2. 3. Daya Semu ( <i>Apparent Power</i> ) .....	13
2.6.2. 4. Faktor Daya ( <i>Power Factor</i> ) .....	14
2.6.3. <i>Voltage Sag</i> dan <i>voltage Swell</i> .....	14
2.6.4. Penyebab <i>Voltage Sag</i> .....	15
2.6.5. Penyebab <i>Voltage Swell</i> .....	16
2.6.6. Perhitungan <i>Voltage Sag</i> dan <i>voltage Swell</i> Sistem .....	17
2.7. Perelatan Elektronika Daya .....	18
2.7.1. <i>Transistor Bipolar</i> .....	18
2.7.2. <i>Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)</i> .....	19
2.8. Sistem Pengendalian PWM Sinusoida .....	19
2.8.1. PWM Sinusoida.....	19
2.8.2. Aksi Kontrol PWM Sinusoida Terhadap DVR dan D-STATCOM.....	20
2.9. Aksi Kontrol Proporsional Integral (PI).....	20
2.9.1. Pengertian umum Kontrol PI.....	20

2.9.2. Prinsip Pengendalian Proses.....	22
2.9.3. Prinsip proses Pengendali.....	22
2.9.4 Pengendali Proporsional ( <i>Propositional Controller</i> ).....	23
2.9.5. Pengendali Integral ( <i>Integrator Controller</i> ).....	25
2.9.6. Pengendali Proporsional Integral ( <i>PI Controler</i> ).....	26

### BAB III PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN DENGAN PENGATURAN SISTEM DAYA MENGGUNAKAN SSTS, D-STATCOM DAN DVR

3.1. <i>Software PSCAD/EMTDC V 4.2 Power Simulation</i> .....	27
3.1.1 Memulai <i>PSCAD/EMTDC Power Simulation</i> .....	28
3.2. Sistem <i>Solid-State Transfer Switch (SSTS), Distribution Static Compensator (D-STATCOM) dan Dynamic Voltage Restorer (DVR)</i> ...	30
3.2.1. Model <i>Solid-State Transfer Switch (SSTS)</i> .....	30
3.2.1.1. Prinsip Dasar Operasi SSTS.....	31
3.2.2. Model <i>Distribution Static Compensator (D-STATCOM)</i> .....	34
3.2.2.1. Prinsip Dasar Operasi D-STATCOM.....	35
3.2.3. Model <i>Dynamic Voltage Restorer (DVR)</i> .....	36
3.2.2.1. Prinsip Dasar Operasi DVR.....	37
3.3. Kompensasi SSTS, D-STATCOM dan DVR Pada Sistem Distribusi 20 KV.....	38
3.3.1 Sistem Distribusi Tanpa Kompensasi SSTS, D-DSTATCOM dan DVR.....	38
3.4.2. Sistem Distribusi Dengan Kompensasi SSTS, D-DSTATCOM dan DVR.....	38
3.4. <i>Flowchart</i> .....	39
3.4.1. <i>Flowchart</i> Desain dan Simulasi Sistem dengan SSTS, D-STATCOM dan DVR.....	39
3.4.2. <i>Flowchart Wiring</i> Penyulang PIER.....	40
3.4.3. <i>Flowchart</i> Desain <i>Solid-State Transfer Switch (SSTS)</i> .....	41
3.4.4. <i>Flowchart</i> Desain <i>Distribution Static Compensator (D-STATCOM)</i> .....	42
3.4.5. <i>Flowchart</i> Desain <i>Dynamic Voltage Restorer (DVR)</i> .....	43
3.4.6. <i>Flowchart</i> Desain SSTS, D-DSTATCOM dan DVR.....	44
3.5. Input Data Dalam <i>PSCAD/EMTDC Power Simulation</i> .....	45
3.5.1. Input Data <i>Transformator dan Fixed Load</i> .....	45
3.5.2. Input Data Pengendalian Pada SSTS, D-DSTATCOM dan DVR.....	46
3.5.2.1. Input Data Pengendali PI Pada SSTS.....	46
3.5.2.2. Input Data Pengendali PI dan SPWM Pada D-DSTATCOM.....	47
3.6.2.3. Input Data Pengendali PI dan SPWM Pada DVR.....	47

### BAB IV HASIL DAN ANALISA HASIL

4.1. <i>Single Line</i> Sisiem Distribusi 20 KV Penyulang PIER.....	49
4.2. Data Sistem Distribusi Pada PT. PLN Bangil.....	50
4.2.1. Data Saluran PT. PLN Bangil.....	50
4.2.2. Data Pembebanan Penyulan PIER.....	51
4.2.3. Data Aliran Daya Tiap Saluran Pada Penyulang PIER.....	52

4.3. Perbaikan Kualitas Tegangan <i>Software PSCAD/EMTDC V.4.2 POWER SIMULATION</i> .....	52
4.4. Hasil Dan Analisa Hasil Perbaikan Kualitas Daya Dengan Pengaturan Sistem Daya Menggunakan SSTS, D-STATCOM dan DVR.....	53
4.4.1. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Simulasi Sebelum dan Sesudah Kompensasi SSTS, D-STATCOM dan DVR.....	53
4.4.1.1. Sistem Saat Mengalami Gangguan <i>Voltage Sag</i> .....	54
a. Terjadi <i>Voltage Sag</i> Selama (200-500 ms) Saat Pemasangan dan Tanpa Pemasangan SSTS.....	54
b. Terjadi <i>Voltage Sag</i> Selama (200-500 ms) Saat Pemasangan dan Tanpa Pemasangan D STATCOM... ..	55
c. Terjadi <i>Voltage Sag</i> Selama (200-500 ms) Saat Pemasangan dan Tanpa Pemasangan DVR .....	56
4.4.1.2. Sistem Saat Mengalami Gangguan <i>Voltage Swell</i> .....	57
a. Terjadi <i>Voltage Swell</i> Selama (200-500 ms) Saat Pemasangan dan Tanpa Pemasangan D-STATCOM.. ..	57
b. Terjadi <i>Voltage Swell</i> Selama (200-500 ms) Saat Pemasangan dan Tanpa Pemasangan DVR.....	58
4.4.1.3. Hasil Perhitungan Sebelum dan Sesudah Pemasangan SSTS, D-STATCOM dan DVR.....	59
 BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan.....	62
5.2 Saran.....	62
 DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1: Skema Penyaluran Sistem Distribusi Tenaga Listrik .....	5
Gambar 2.2: Konfigurasi Jaringan Radial .....	6
Gambar 2.3: Konfigurasi Jaringan Hantaran Penghubung .....	6
Gambar 2.4: Konfigurasi Jaringan <i>Loop</i> .....	7
Gambar 2.5: Konfigurasi Jaringan Spindel .....	8
Gambar 2.6: Konfigurasi Jaringan Kluster .....	9
Gambar 2.7: Hubungan Tegangan Menengah Ke Tegangan Rendah dan Konsumen .....	9
Gambar 2.8: Segitiga Daya .....	14
Gambar 2.9: Ilustrasi <i>Voltage Sag</i> Selama (200-500 ms) dan <i>Voltage Swell</i> Selama (700-1000 ms) .....	15
Gambar 2.10: Ilustrasi <i>Voltage Sag</i> Arus Pada Frekuensi Tegangan di Bawah 0.95 pu Unruk Durasi 0.5 <i>Cycle</i> Hingga 1 Menit .....	15
Gambar 2.11: Gambaran Terjadinya <i>Voltage Sag</i> .....	16
Gambar 2.12: Ilustrasi <i>Voltage Swell</i> Arus Pada Frekuensi Daya Antara 1.1 dan 1.8 pu Unruk Durasi 0.5 <i>Cycle</i> Hingga 1 Menit .....	17
Gambar 2.13: Model Pembagi Tegangan Untuk <i>Voltage Sag</i> dan <i>Voltage Swell</i> .....	17
Gambar 2.14: Kontroler Diagram Kotak PI .....	23
Gambar 2.15: Diagram Blok <i>Kontroler Proporsional</i> .....	24
Gambar 2.16: Respon Sebuah Pengendali Proporsional .....	24
Gambar 2.17: <i>Blok diagram Kontroler Integral</i> .....	26
Gambar 2.18: Diagram Kotak Pengendali .....	26
Gambar 2.19: Hubungan input-output Pengendali PI Dalam Fungsi Waktu .....	26
Gambar 3.1: Tampilan Utama <i>Software PSCAD/EMTDC Power Simulation</i> .....	28
Gambar 3.2: Tampilan <i>Master Library</i> .....	29
Gambar 3.3: Tampilan Modul Utama .....	29
Gambar 3.4: Tampilan <i>Single Line Penyulang PIER-Bangil</i> dalam <i>PSCAD</i> .....	30
Gambar 3.5: Diagram Blok Fungsional Untuk SSTS .....	31
Gambar 3.6: Diagram Sistem <i>Solid-State Transfer Switch</i> .....	31
Gambar 3.7: <i>Tyristor</i> dari SSTS Melakukan dalam Setengah Siklus Positif dan Negatif dari Sumber Yang di Inginkan .....	32
Gambar 3.8: <i>Tyristor</i> pada Pasokan Alternatif Yang Menyala pada Sebuah Sinyal Gangguan pad Sumber Yang di Inginkan .....	33
Gambar 3.9: Diagram Blok Fungsional D-STATCOM .....	34
Gambar 3.10: Pembuatan Blok D-STATCOM .....	35
Gambar 3.11: Model Operasi Dari D-STATCOM .....	36
Gambar 3.12: Diagram Blok Fungsional Untuk DVR .....	36
Gambar 3.13: Prinsip DVR Dengan Waktu Respon Kurang dari Satu <i>Milisecond</i> .....	37
Gambar 3.14: <i>Flowchart</i> Analisa Perbaikan Kualitas Tegangan Dengan SSTS, D-STATCOM dan DVR .....	39
Gambar 3.15: <i>Flowchart</i> Pembuatan <i>Single Line Diagram Penyulang PIER</i> .....	40
Gambar 3.16: <i>Flowchart</i> Pembuatan Rangkaian SSTS .....	41
Gambar 3.17: <i>Flowchart</i> Pembuatan Rangkaian D-STATCOM .....	42
Gambar 3.18: <i>Flowchart</i> Pembuatan Rangkaian DVR .....	43
Gambar 3.19: <i>Flowchart</i> Pembuatan Rangkaian Kontrol PWM UNTUK SSTS, D-STATCOM dan DVR .....	44
Gambar 3.20: Tampilan Input Data <i>Transformator</i> .....	45
Gambar 3.21: : Tampilan Input Data <i>Fixed Load</i> .....	45



Gambar 3.22:	
a.	Rangkaian Pengendali PI Untuk Mengendalikan SSTS..... 46
b.	Rangkaian Sinyal Komparator Untuk Mengendalikan SSTS..... 46
c.	Rangkaian Switching <i>Tyristor</i> Untuk Mengendalikan SSTS..... 46
Gambar 3.23:	
a.	Rangkaian Pengendali PI Untuk Mengendalikan D-STATCOM..... 47
b.	Rangkaian Sinyal Komparator Untuk Mengendalikan D-STATCOM .... 47
c.	Rangkaian Switching <i>Tyristor</i> Untuk Mengendalikan D-STATCOM..... 47
Gambar 3.24:	
a.	Rangkaian Pengendali PI Untuk Mengendalikan DVR..... 47
b.	Rangkaian Sinyal Komparator Untuk Mengendalikan DVR..... 47
c.	Rangkaian Switching <i>Tyristor</i> Untuk Mengendalikan DVR..... 48
Gambar 4.1:	<i>Single Line</i> Penyulang PIER..... 49

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1: Data Saluran PT, PLN Bangil .....	50
Tabel 4.2: Data Pembebanan Penyulang PIER .....	51
Tabel 4.3: Data Aliran Daya Penyulang PIER .....	52
Tabel 4.4: Perbandingan Tegangan Saat Gangguan <i>Voltage Sag</i> Dengan dan Tanpa Pemasangan SSTS .....	54
Tabel 4.5: Perbandingan Tegangan Saat Gangguan <i>Voltage Sag</i> Dengan dan Tanpa Pemasangan D-STATCOM .....	55
Tabel 4.6: Perbandingan Tegangan Saat Gangguan <i>Voltage Sag</i> Dengan dan Tanpa Pemasangan DVR .....	56
Tabel 4.7: Perbandingan Tegangan Saat Gangguan <i>Voltage Swell</i> Dengan dan Tanpa Pemasangan D-STATCOM .....	57
Tabel 4.8: Perbandingan Tegangan Saat Gangguan <i>Voltage Swell</i> Dengan dan Tanpa Pemasangan .....	58

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Permasalahan yang muncul pada Pada penyulang PIER-Bangil adalah Peralatan-peralatan listrik berteknologi tinggi yang digunakan dalam industri yang hampir semua beban didominasi oleh beban-beban induktif seperti motor-motor listrik, inverter, UPS dan masih banyak lagi peralatan yang menggunakan komponen-komponen induktif yang berakibat menimbulkan gangguan kestabilan tegangan. Besarnya tegangan yang di terima oleh konsumen listrik tidaklah sama, hal ini terjadi disebabkan karena adanya impedansi jaringan. Oleh karena itu, gangguan tegangan selalu ada pada setiap bagian dari sistem tenaga, mulai dari sumber sampai ke pelanggan. Oleh karena itu tegangan tersebut perlu di kendalikan. Adapun tujuan dari pengendalian dan perbaikan tegangan pada sistem adalah agar gangguan daya dan tegangan menjadi lebih ekonomis sampai pada suatu batas tertentu karena bisa berdampak terjadi penurunan tegangan pada saluran yang memungkinkan tegangan pada tidak memenuhi standar operasi yang ditetapkan yakni (0.95 pu – 1.05 pu) . Pada penyulang PIER-Bangil terdapat penyaluran tegangan yang menyebabkan tegangan sistem diluar batas operasi yakni sebesar 0.83 pu (315.4 Volt dari tegangan yang tersalurkan 380 Volt). Untuk itu perlu dilakukan perbaikan dalam mengatasi gangguan-gangguan dalam memperbaiki kualitas tegangan.

Alternatif yang paling efektif dan sering dipakai untuk memperbaiki kondisi tersebut pada jaringan akibat adanya gangguan kualitas tegangan adalah menyuplai daya dengan penambahan penyulang cadangan atau dengan menginjeksikan daya reaktif tambahan, dengan kata lain memasang kompensator daya tambahan yang dibutuhkan oleh sistem disisi beban. Dengan pemasangan salah satu perangkat *FACTS* untuk mengetahui masing-masing kinerja dari SSTS, D-STATCOM, dan DVR dalam mengatasi gangguan *flicker*, *sag/swell suppression*, serta memberikan stabilisasi tegangan. Dari ketiga perangkat *FACTS* tersebut mana yang paling cocok untuk di pasang pada penyulang PIER-Bangil, keandalan dari sistem dapat dianalisa memakai simulasi-simulasi *software PSCAD power system simulation*.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan hal tersebut diatas, maka muncul permasalahan – permasalahan yang akan dibahas yaitu:

1. Bagaimana mengetahui kinerja masing-masing perangkat SSTS, D-STATCOM dan DVR dalam mengatasi gangguan *voltage sag* dan *voltage swell* pada penyulang PIER-Bangil?
2. Mana dari ketiga perangkat tersebut yang paling memungkinkan untuk di pasang pada penyulang PIER-Bangil?

## 1.3. Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang dikemukakan di atas maka skripsi ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dari masing-masing pemasangan *Solid-State Transfer Switch* (SSTS), *Distribution Static Compensator* (D-STATCOM) dan *Dynamic Voltage Restorer* (DVR) dalam memperbaiki *voltage sag* dan *voltage swell* dan untuk menentukan mana dari ketiga perangkat tersebut yang memungkinkan untuk di pasang pada penyulang PIER-Bangil.

## 1.4. Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas tidak terlalu meluas, maka ruang lingkup pembahasan adalah sebagai berikut:

1. Pehitungan dan simulasi dilakukan dengan *software* PSCAD/EMTDC V4.2 Power Simulation.
  2. Studi dilakukan pada Gardu Induk (G. I), PT. PLN (PERSERO) Bangil penyulang PIER.
  3. Mekanisme kerja *Solid-State Transfer Switch* (SSTS), *Distribution Static Compensator* (D-STATCOM) dan *Dynamic Voltage Restorer* (DVR) dalam mengatasi permasalahan *voltage sag* dan *voltage swell*.
  4. Menyimpulkan hasil Perbaikan tegangan Pada saat terjadi *voltage sag* dan *voltage swell*.
-

### 1.5. Metodologi Pemecahan Masalah

Metode yang digunakan dalam penyelesaian ini adalah:

1. Studi literatur berupa pengumpulan dan pembahasan referensi yang berkaitan dengan pokok pembahasan masalah ini, sehingga membantu dalam memahami dasar-dasar dari peralatan yang digunakan dalam sistem dan membantu dalam memahami prinsip dan karakteristik setiap parameter elektronika daya yang digunakan.
2. Pengumpulan data lapangan sebagai objek penelitian.
3. Melakukan analisis berdasarkan hasil simulasi program PSCAD/EMTDC V.2.0 *Power Simulation* dengan analisis profil tegangan system.
4. Mengambil kesimpulan dari perbandingan sistem dengan pemasangan SSTS, D-STATCOM dan DVR dan tanpa pemasangan STS, D-STATCOM dan DVR.

### 1.6. Sistematika Penulisan

Penulisan dibagi dalam beberapa bab dan sub bab, adapun sistematika penulisan skripsi ini adalah:

#### BAB I : PENDAHULUAN

Berisi penguraian tentang Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan Penelitian, Batasan Masalah, Metodologi Penelitian dan Sistematika Penulisan.

#### BAB II : SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

Membahas sistem distribusi tenaga listrik secara umum dan pengaruh pemasangan alat kompensasi untuk memperbaiki kualitas tegangan.

#### BAB III : PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN DENGAN PENGATURAN SISTEM DAYA MENGGUNAKAN SSTS, D-STATCOM dan DVR

Berisi penguraian tentang perbandingan kualitas tegangan sistem yang menggunakan alat kompensasi SSTS, D-STATCOM dan DVR dengan tanpa menggunakan kompensasi SSTS, D-STATCOM dan DVR.

#### BAB IV : HASIL DAN ANALISA HASIL

Menguraikan tentang hasil simulasi dan menganalisa hasil simulasi

#### BAB V : PENUTUP

Berisi kesimpulan dan saran berdasarkan hasil simulasi.

## **BAB II**

### **SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK**

#### **2.1. Sistem Tenaga Listrik**

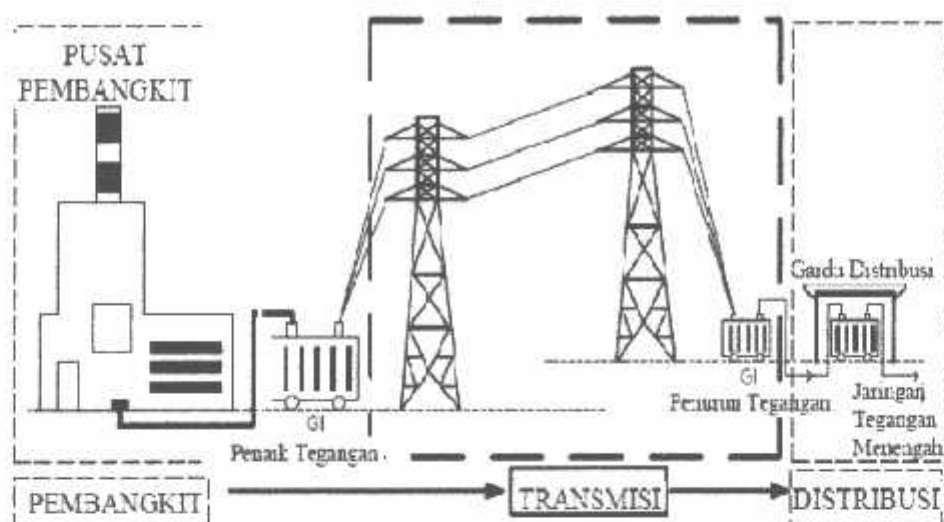
Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terpadu yang terbentuk oleh hubungan-hubungan peralatan dan komponen komponen listrik. Sistem tenaga listrik ini mempunyai peranan utama untuk menyalurkan energi listrik yang dibangkitkan oleh generator ke konsumen yang membutuhkan energi listrik tersebut (Marsudi, 1990).

Secara garis besar suatu sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian sub sistem yaitu :

1. Sistem pembangkitan : berperan sebagai sumber daya tenaga listrik dan disebut juga sebagai prodaktor energi.
2. Sistem transmisi atau penyalur : berfungsi sebagai penyalur daya listrik dalam skala besar dari pembangkit ke bagian sistem distribusi.
3. Sistem distribusi dan beban : berfungsi sebagai distributor energi ke konsumen yang memerlukan energi tersebut.

#### **2.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Jaringan distribusi berada pada akhir dari sistem tenaga listrik, perannya mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk atau pembangkit tenaga ke konsumen melalui gardu distribusi (Sukmawidjaja, 2008).



Gambar 2.1  
Skema Penyaluran Sistem Distribusi Tenaga Listrik

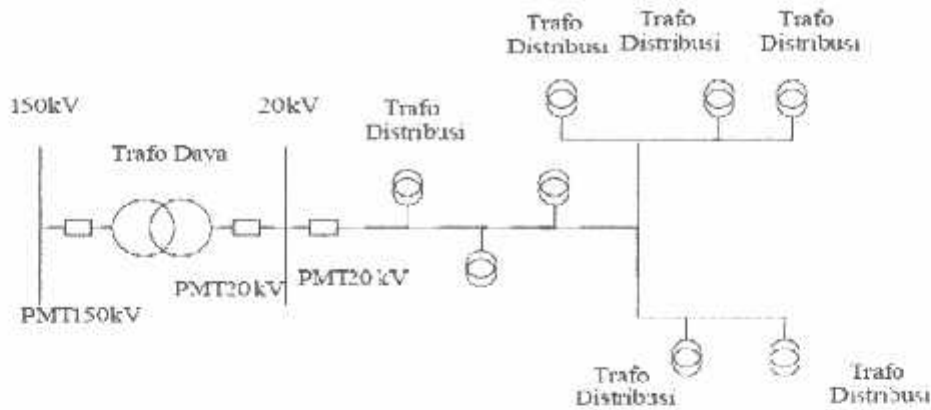
Tegangan sistem distribusi dapat dikelompokkan menjadi 2 bagian besar, yaitu distribusi primer (20KV) dan distribusi sekunder (380/220V). Jaringan distribusi 20KV sering disebut Sistem Distribusi Tegangan Menengah dan jaringan distribusi 380/220V sering disebut jaringan distribusi sekunder atau disebut Jaringan Tegangan Rendah 380/220V.

### 2.3. Jaringan Pada Sistem Distribusi Primer

Jaringan Pada Sistem Distribusi tegangan menengah (Primer, 20KV) dapat dikelompokkan menjadi lima model, yaitu Jaringan Radial, Jaringan hantaran penghubung (*Tie Line*), Jaringan Lingkaran (*Loop*), Jaringan Spindel dan Sistem Gugus atau Kluster (Sukmawidjaja, 2008).

#### 2.3.1 Jaringan Radial

Sistem distribusi dengan pola Radial seperti Gambar 2.2 Adalah sistem distribusi yang paling sederhana dan ekonomis. Pada sistem ini terdapat beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial.



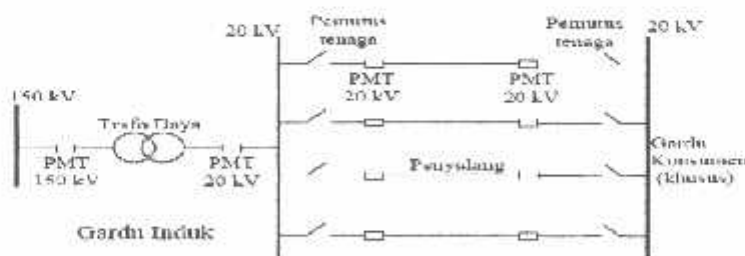
Gambar 2.2  
Konfigurasi Jaringan Radial

Dalam penyulang tersebut dipasang gardu-gardu distribusi untuk konsumen. Gardu distribusi adalah tempat dimana trafo untuk konsumen dipasang. Bisa dalam bangunan beton atau diletakan diatas tiang. Keuntungan dari sistem ini adalah sistem ini tidak rumit dan lebih murah dibanding dengan sistem yang lain (Sukmawidjaja, 2008).

Namun keandalan sistem ini lebih rendah dibanding dengan system lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam. Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada diujung saluran .

### 2.3.2. Jaringan Hantaran Penghubung (Tie Line)

Sistem distribusi Tie Line seperti Gambar 2.3. digunakan untuk pelanggan penting yang tidak boleh padam (Bandar Udara, Rumah Sakit, dan lainlain).



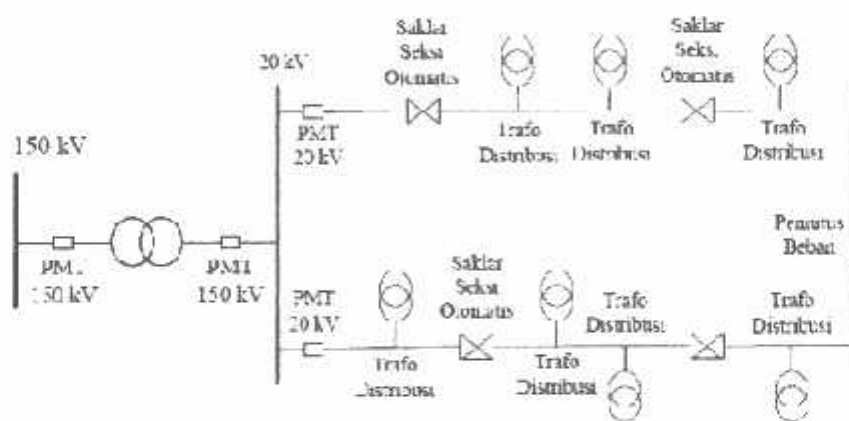
Gambar 2.3.  
Konfigurasi Jaringan Hantaran Penghubung



Sistem ini memiliki minimal dua penyulang sekaligus dengan tambahan Automatic Change Over Switch / Automatic Transfer Switch, setiap penyulang terkoneksi ke gardu pelanggan khusus tersebut sehingga bila salah satu penyulang mengalami gangguan maka pasokan listrik akan di pindah ke penyulang lain (Sukmawidjaja, 2008).

### 2.3.3. Jaringan Lingkar (Loop)

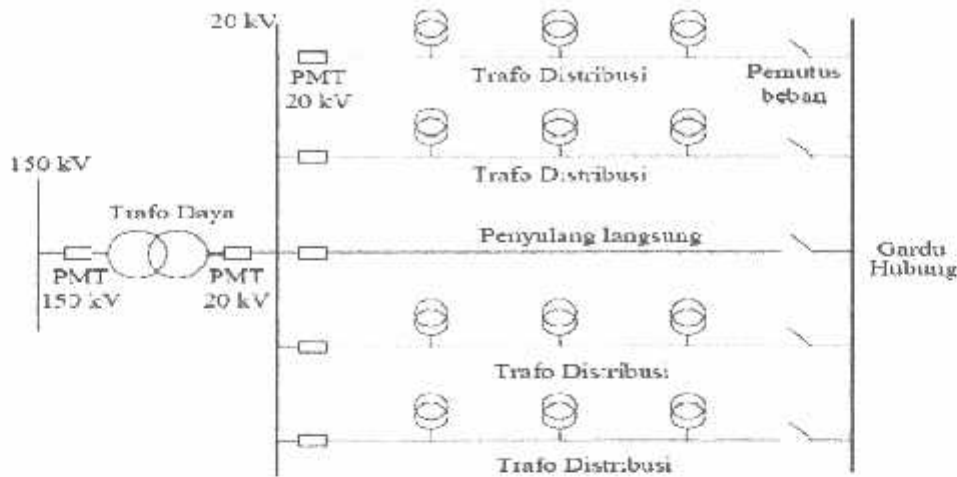
Pada Jaringan Tegangan Menengah Struktur Lingkaran (Loop) seperti Gambar 2.4. dimungkinkan pemasokannya dari beberapa gardu induk, sehingga dengan demikian tingkat keandalannya relatif lebih baik (Sukmawidjaja, 2008).



Gambar 2.4.  
Konfigurasi Jaringan Loop

### 2.3.4. Jaringan Spindel

Sistem Spindel seperti pada Gambar 2.5. adalah suatu pola kombinasi jaringan dari pola Radial dan Ring. Spindel terdiri dari beberapa penyulang (feeder) yang tegangannya diberikan dari Gardu Induk dan tegangan tersebut berakhir pada sebuah Gardu Hubung (GH).



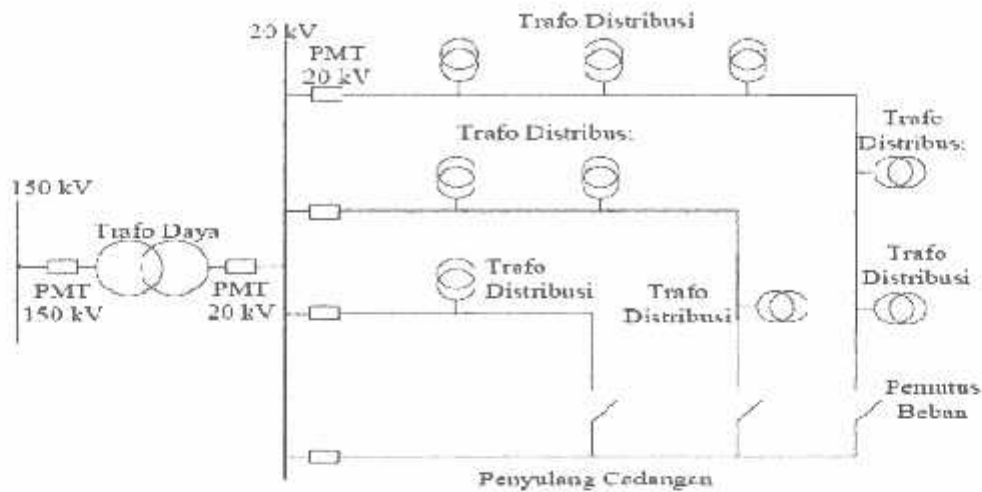
Gambar 2.5  
Konfigurasi Jaringan Spindel

Pada sebuah spindel biasanya terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan (*express*) yang akan dihubungkan melalui gardu hubung. Pola Spindel biasanya digunakan pada jaringan tegangan menengah (JTM) yang menggunakan kabel tanah/saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM).

Namun pada pengoperasiannya, sistem Spindel berfungsi sebagai sistem Radial. Di dalam sebuah penyulang aktif terdiri dari gardu distribusi yang berfungsi untuk mendistribusikan tegangan kepada konsumen baik konsumen tegangan rendah (TR) atau tegangan menengah (TM) (Sukmawidjaja, 2008).

### 2.3.5. Sistem Gugus atau Sistem Kluster

Konfigurasi Gugus seperti pada Gambar 2.6. banyak digunakan untuk kota besar yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi. Dalam sistem ini terdapat Saklar Pemutus Beban, dan penyulang cadangan.

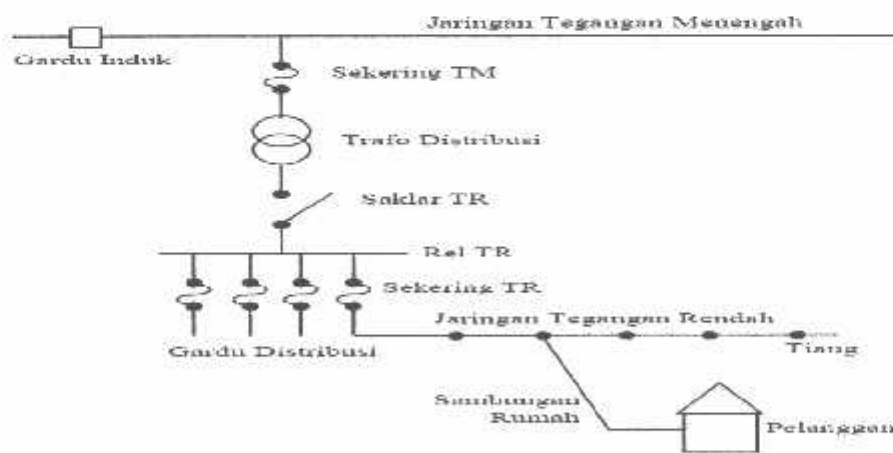


Gambar 2.6.  
Konfigurasi Jaringan kluster

Dimana penyulang ini berfungsi bila ada gangguan yang terjadi pada salah satu penyulang konsumen maka penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai kekonsumen (Sukmawidjaja, 2008).

#### 2.4. Sistem Distribusi Sekunder (Jaringan Tegangan Rendah 380/220V)

Sistem distribusi sekunder seperti pada Gambar 2.7. merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen.



Gambar 2.7.  
Hubungan tegangan menengah ke tegangan rendah dan konsumen

Melihat letaknya, sistem distribusi ini merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan konsumen, jadi sistem ini selain berfungsi menerima daya listrik dari sumber daya (trafo distribusi), juga akan mengirimkan serta mendistribusikan daya tersebut ke konsumen. Mengingat bagian ini berhubungan langsung dengan konsumen, maka kualitas listrik selayaknya harus sangat diperhatikan (Sukmawidjaja, 2008).

Jatuh tegangan pada sistem distribusi mencakup jatuh tegangan pada:

1. Penyulang Tegangan Menengah (TM)
2. Transformator Distribusi
3. Penyulang Jaringan Tegangan Rendah
4. Instalasi rumah.

Jatuh tegangan adalah perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Maka pemilihan penghantar (penampang penghantar) untuk tegangan menengah harus diperhatikan. Jatuh tegangan yang di-ijinkan tidak boleh lebih dari 5% ( $\Delta V \geq 5\%$ ). Secara umum  $\Delta V$  dibatasi sampai dengan 3,5%.

## 2.5. Gangguan Dalam Sistem Tenaga Listrik

Pada dasarnya gangguan dalam sistem distribusi tenaga listrik dapat dibedakan menjadi dua bagian, yaitu gangguan yang bersifat sementara dan yang bersifat permanen, gangguan yang bersifat sementara atau *temporary* biasanya hanya terjadi dalam waktu yang sebentar, kemudian normal kembali. Sehingga apabila terjadi gangguan sementara maka diusahakan tidak sampai trip pada sistem secara keseluruhan, karena menyangkut kontonuitas pelayanan ke beban.

Secara umum jenis gangguan yang dapat terjadi dapat digolongkan menjadi tiga macam yaitu:

- a. Gangguan shunt
  1. Gangguan tiga fasa ( $3\phi$ )
  2. Gangguan line to line (L-L)
  3. Gangguan double line to ground (2L-G)

4. Gangguan single line to ground (SL-G)
- b. Gangguan seri
  1. Gangguan satu saluran terbuka
  2. Gangguan dua saluran terbuka
  3. Impedansi seri tak seimbang
- c. Gangguan simultan, merupakan dua jenis gangguan yang terjadi pada waktu yang bersamaan, berupa:
  1. Gangguan shunt dengan gangguan shunt
  2. Gangguan shunt dengan gangguan seri
  3. Gangguan seri dengan gangguan seri

Dari bermacam-macam gangguan di atas tersebut, gangguan dapat dikelompokkan lagi menjadi dua bagian yaitu:

1. Gangguan hubung singkat simetris

Gangguan hubungan singkat tiga fasa merupakan jenis gangguan hubungan singkat simetris, sedangkan gangguan yang lain merupakan gangguan tidak simetris. Gangguan arus hubung singkat ini menyebabkan timbulnya arus yang sangat besar yang melewati kapasitas arus yang diijinkan, adapun akibat-akibat yang ditimbulkan dengan adanya gangguan hubung singkat tersebut:

- Rusaknya peralatan-peralatan listrik yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan arus-arus yang besar, arus tidak seimbang maupun tegangan-tegangan rendah.
- Terhentinya kontinuitas pelayanan listrik kepada konsumen apabila gangguan tersebut sampai mengakibatkan terputusnya *circuit* yang biasa disebut dengan pemadaman listrik.

Untuk menganalisa gangguan pada rangkaian tiga fasa seimbang, maka menganalisanya dapat diselesaikan secara langsung dengan menggunakan rangkaian setara fasa tunggal.

---

## 2. Gangguan hubung singkat tak simetris

Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah merupakan gangguan tidak simetri. Gangguan tidak simetri ini terjadi sebagai akibat dari gangguan satu fasa ke tanah, gangguan antar fasa atau gangguan dua fasa ke tanah (Stevenson 1996).

## 2.6. Kualitas Daya Elektrik

### 2.6.1. Klasifikasi Kualitas Daya

Istilah kualitas daya digunakan secara luas dalam fenomena elektromagnetik pada system daya. Peningkatan penggunaan peralatan elektronika telah memberikan keinginan yang sangat tinggi dalam menganalisis kualitas system dengan pengembangan terminologi khusus untuk menggambarkan fenomena tersebut.

Gangguan pada kualitas daya elektrik dapat dikategorikan sebagai berikut:

1. Transien tegangan lebih : Transien tegangan lebih ini berupa transien implus yang disebabkan oleh sambaran petir dan transien osilasi disebabkan oleh energisasi kapasitor bank, energisasi saluran dan Transformator.
2. Gangguan Variasi tegangan : gangguan variasi tegangan ini disebabkan pengasutan motor mengakibatkan terjadinya tegangan seperti *voltage Dip*, *Swell* dan interupsi.
3. Distorsi Harmonisa : Harmonisa ini muncul sebagai akibat dari beroperasinya beban nonlinier satu fasa dan harmonisa ketiga serta beban nonlinier tiga fasa.
4. Fluktuasi Tegangan : Gangguan ini disebabkan oleh adanya flicker dan gangguan tidak seimbang.

Dengan semakin tingginya biaya atau tarif listrik, maka tuntutan keandalan kualitas daya listrik menjadi pertimbangan utama. Kualitas daya listrik sangat dipengaruhi oleh penggunaan jenis-jenis beban tertentu, salah satunya pemakaian beban non linier. Dengan adanya pengoperasian beban seperti ini maka akan menghasilkan kualitas tegangan yang buruk dan dampaknya mempengaruhi kualitas daya, sehingga menimbulkan banyak kerugian-kerugian. Untuk mendapatkan kualitas tenaga listrik yang baik, maka perlu dilakukan langkah-langkah perbaikan kualitas daya, yaitu dengan cara melakukan audit *power quality* guna menentukan langkah-langkah serta upaya yang tepat untuk mengurangi kualitas tegangan yang buruk, contohnya dengan menggunakan alat kompensasi. Sehingga

---

kerugian dapat diminimalkan agar kualitas tenaga listrik dapat optimal sehingga kontinuitas pelayanan semakin terjaga (Soeprapto, 2004).

## 2.6.2. Daya dalam Sistem Tenaga Listrik

### 2.6.2.1. Daya aktif (*Active Power*)

Secara umum daya aktif dinyatakan oleh persamaan :

$$P = [ V ] [ I ] \cos \varphi \dots\dots\dots(2-1)$$

dimana :

V = tegangan

I = Arus

P = Daya rata-rata yang disebut juga daya aktif.

### 2.6.2.2. Daya Reaktif (*Reactive Power*)

Daya reaktif adalah daya yang timbul karena adanya pembentukan medan magnet pada beban-beban induktif (VAR).

Persamaan daya reaktif adalah :

$$Q = [ V ] [ I ] \sin \varphi \dots\dots\dots(2-2)$$

Dua macam daya reaktif yaitu : daya reaktif induktif dan daya reaktif kapasitif, dimana keduanya memiliki tanda yang berlawanan. Daya reaktif kapasitif adalah daya yang dibutuhkan oleh kapasitor yang tidak menghasilkan kerja, tetapi tersimpan dalam bentuk energi magnetis atau energi kapasitif (Stevenson, 1996).

Daya reaktif induktif adalah daya listrik yang dibutuhkan untuk menghasilkan medan magnet yang dibutuhkan oleh alat-alat seperti motor induksi, transformator dan sebagainya.

### 2.6.2.3. Daya Semu (*Apparent Power*)

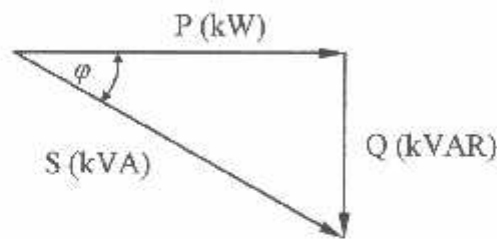
Daya semu merupakan penjumlahan secara vektoris antara daya aktif dan daya reaktif.

#### 2.6.2.4. Power Factor

Faktor daya pada dasarnya didefinisikan sebagai perbandingan antara daya nyata dan daya semu, dinyatakan oleh persamaan:

$$\text{Faktor Daya} = \frac{\text{Daya Nyata(kW)}}{\text{Daya Semu(kVA)}} \dots\dots\dots(2-3)$$

Untuk daya sendiri dibentuk oleh dua komponen, daya nyata (P) dan komponen daya reaktif (Q). Hubungan ini dapat digambarkan dalam diagram vektor berikut:



Gambar 2.8  
Segitiga Daya

Dengan Faktor Daya:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}} \dots\dots\dots(2-4)$$

$$\text{kW} = \text{kVA} \cos \varphi \dots\dots\dots(2-5)$$

$$\text{kVAR} = \text{kVA} \sin \varphi = \text{kW} \tan \varphi \dots\dots\dots(2-6)$$

$$\tan \varphi = \frac{\text{kVAR}}{\text{kW}} \dots\dots\dots(2-7)$$

dengan:

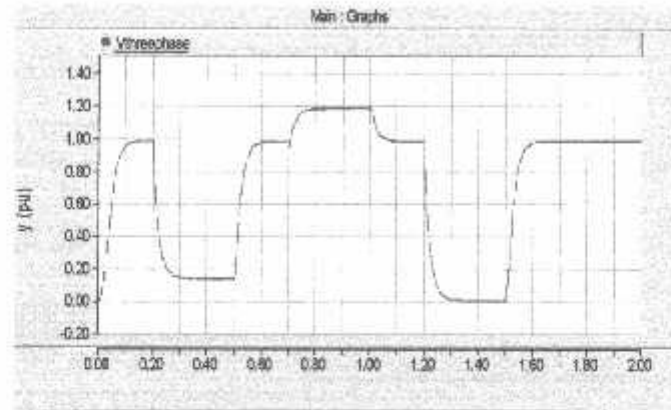
- $\cos \varphi$  = Faktor Daya
- P = Daya Nyata (kW)
- S = Daya Semu (kVA)
- Q = Daya Reaktif (kVAR)

#### 2.6.3. Voltage Sag dan Voltage Swell

Kebutuhan akan energi listrik yang terus berkembang menghendaki suatu kontinuitas pencatuan dan juga memerlukan kualitas dari bentuk tegangannya. Gangguan terhadap tegangan yang biasa terjadi antara lain, *Voltage Sag*, *Voltage Swell*, fluktuasi tegangan,



harmonisa, dan juga ketidakseimbangan tegangan. Gangguan yang sangat berpengaruh pada kualitas tegangan adalah *Voltage Sag* dan *Voltage Swell* (Stevenson, 1996).



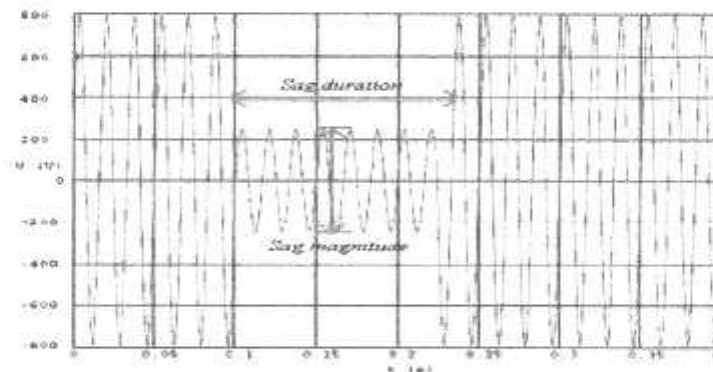
Gambar 2.9

Ilustrasi *Voltage Sag* selama (200-500 ms) dan *Voltage Swell* selama (700-1000 ms)

#### 2.6.4. Penyebab *Voltage Sag*

*Voltage Sag* atau *Voltage Dip* merupakan penurunan tegangan pada frekuensi daya antara 0.1 dan 0.9 pu selama durasi waktu dari 0.5 *cycles* hingga 1 menit yang disebabkan oleh :

1. Starting beban-beban yang besar seperti motor listrik, dimana hal ini akan menghasilkan perubahan yang cepat dari tegangan (Anaya, 2002).



Gambar 2.10

Ilustrasi *Voltage Sag* arus pada frekuensi tegangan di bawah 0.95 pu untuk durasi dari 0.5 *cycle* hingga 1 menit

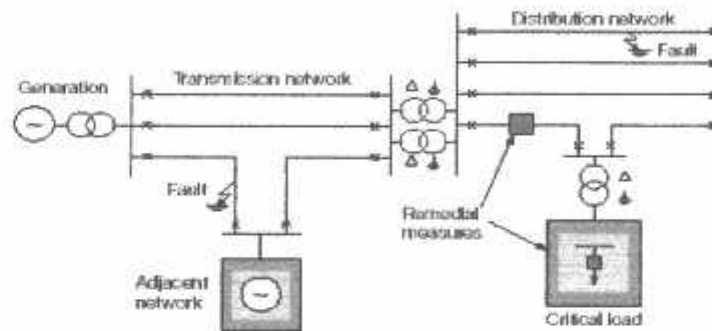
2. Saat de-energisasi kapasitor
3. Gangguan hubung singkat
4. Pengoperasian pemanas elektrik

5. Umumnya karena adanya kehilangan koneksi

Besaran *voltage sag* tergantung pada

1. Lokasi gangguan.
2. Tipe gangguan: satu-, dua- atau tiga-fasa; ditanahkan atau tidak ditanahkan.
3. Impedansi gangguan / resistansi.

Terjadinya *Voltage Sag* akibat *fault* dapat diilustrasikan pada Gambar 2.11



Gambar. 2.11  
Gambaran Terjadinya *Voltage Sag*

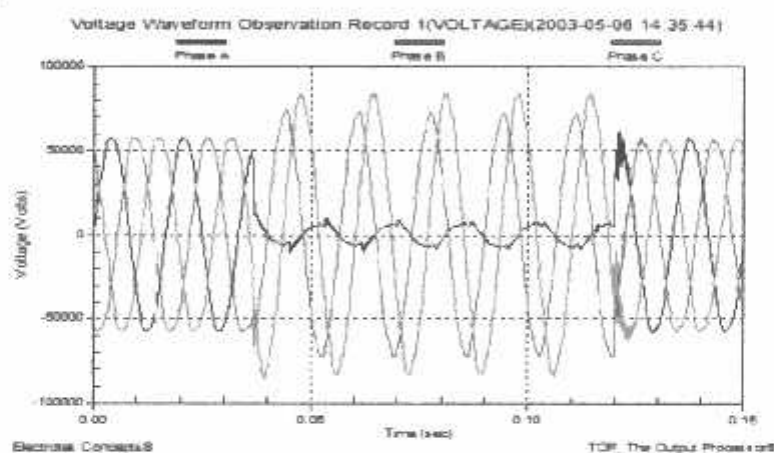
#### 2.6.5. Penyebab *Voltage Swell*

Tegangan swell merupakan kenaikan amplitudo tegangan terhadap nilai nominalnya selama interval waktu tertentu, yang pada umumnya disebabkan oleh swiching capacitor bank, gangguan pada pentanahan, pelepasan beban besar secara tiba-tiba. Tegangan swell adalah problem yang paling umum terjadi pada suatu sistem tenaga listrik diseluruh dunia. Dampak tegangan swell yang terjadi pada konsumen industri diantaranya proses produksi terhenti, kualitas produksi menjadi menurun, dan kerusakan pada peralatan produksi. Untuk mengetahui kinerja motor listrik akibat adanya tegangan swell, maka dalam tugas akhir kali ini dilakukan analisis terhadap perubahan arus, torsi, dan kecepatan motor induksi. Tegangan swell menghasilkan dua karakteristik respon yaitu respon pada saat kenaikan tegangan (fase swell) dan respon pada saat tegangan kembali normal (fase pemulihan). Pada fase swell terjadi kenaikan tegangan terhadap tegangan nominalnya, hal ini dapat digunakan sebagai acuan untuk melakukan setting pengaman dan menentukan langkah antisipasi yang disesuaikan dengan aplikasinya (Basri, 1997).

*Voltage Swell* juga didefinisikan sebagai kenaikan tegangan rms atau arus pada frekuensi daya antara 1.1 dan 1.8 pu untuk durasi dari 0.5 *cycle* hingga 1 menit. *Swell* biasanya timbul saat :

1. Bersama-sama dengan kondisi gangguan sistem
2. Dapat juga terjadi karena adanya kenaikan tegangan temporer pada fasa yang tidak terganggu selama gangguan satu fasa ke tanah
3. Saat energisasi kapasitor

*Voltage swells* banyak disebabkan karena adanya reduksi beban pada suatu rangkaian dengan regulator tegangan yang jelek, dan dapat juga karena disebabkan kehilangan koneksi netral.

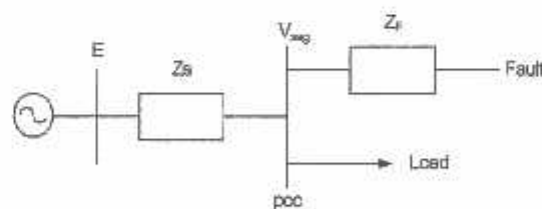


Gambar 2.12

Ilustrasi *Voltage Swell* arus pada frekuensi daya antara 1.1 dan 1.8 pu untuk durasi dari 0.5 *cycle* hingga 1 menit

### 2.6.6. Perhitungan Nilai *Voltage Sag* dan *Voltage Swell* Sistem

Untuk menghitung besaran *voltage sag* dan *voltage swell* pada sistem radial dapat dilihat pada contoh model yang ditunjukkan pada Gambar 2.13



Gambar. 2.13

Model Pembagi Tegangan untuk *Voltage Sag* dan *Voltage Swell*

Dari Gambar 2.13 di atas dilihat adanya 2 impedansi yaitu;  $Z_s$  (impedansi sumber pada titik kopling bersama) dan  $Z_f$  (impedansi antara titik kopling bersama dan gangguan). Titik kopling bersama (*point of common coupling* atau PCC) adalah titik dimana cabang-cabang arus beban dalam posisi off dari arus gangguan. Jadi besaran kedip tegangan dinyatakan dengan persamaan:

$$V_{sag} = \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} * E \dots\dots\dots(2-8)$$

Persamaan 1 dapat digunakan untuk menghitung besaran *voltage sag* sebagai fungsi dari jarak terhadap gangguan. Karenanya dinyatakan  $Z_f = Z * L$ , dimana  $Z$  adalah impedansi dari saluran per unit panjang dan  $L$  adalah jarak antara kesalahan dan PCC. Besaran kedip tegangan sebagai fungsi dari jarak terhadap gangguan dinyatakan dengan persamaan:

$$V_{sags} = \frac{zL}{Z_s + zL} * E \dots\dots\dots(2-9)$$

Perhitungan nilai *voltage sag* di atas juga dapat diterapkan untuk perhitungan *voltage swell*.

## 2.7. Peralatan Elektronika Daya

### 2.7.1. Transistor Bipolar

Transistor bipolar sangat lebih lambat daripada MOSFET. Secara prinsip, hal ini disebabkan oleh waktu gulir mati (*turn-off*) piranti bipolar yang lebih panjang. Kedua adalah resistansi saat kondisi menyambung (*on-state*) piranti bipolar yang relatif tak bergantung (bersifat invarian) terhadap temperatur, dibandingkan dengan adanya nilai koefisien temperatur yang tinggi pada MOSFET. Informasi koefisien temperatur ini merupakan pertimbangan penting dalam perencanaan batas aman thermal pada sistem-sistem yang berdaya tinggi (Soeprapto, 2004).

### 2.7.2. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), merupakan piranti atau komponen aktif pokok yang kini banyak digunakan dalam bidang Elektronika Daya, seperti UPS

(*Uninterruptible Power Supply*), dan sistem pengendali daya atau motor-motor besar di bidang industri.

Adanya suatu kendala tentang kecepatan respon penyakelar (*Switching Devices*) antara lain sulit untuk dimatikan (*turn-off*) dan lambat. Maka dalam hal ini dipilih IGBT yang memiliki kemampuan lebih baik (Soeprapto, 2004).

## 2.8. Sistem Pengendalian PWM Sinusoida

### 2.8.1. PWM Sinusoida

Gelombang sinusoidal pada tiga VSC dikendalikan dengan teknik PWM. Rencana Kendali berdasarkan PWM berkenaan dengan D-STATCOM diterangkan pada bagian ini. Rencana Kendali untuk DVR mengikuti prinsip yang sama. Tujuan rencana kendali adalah untuk memelihara *magnitude* tegangan konstan suatu beban sensitif. Sistem kendali mengukur tegangan rms di titik beban, tidak dibutuhkan pengukuran daya reaktif, strategi penyakelaran VSC adalah didasarkan pada suatu teknik PWM sinusoidal, yang sederhana dan memberikan respon yang baik. Metode PWM menawarkan suatu pilihan yang lebih fleksibel. Suatu sinyal error diperoleh dengan membandingkan tegangan acuan dengan tegangan rms pengukuran di titik beban. pengontrol PI memproses sinyal error dan menghasilkan sudut penundaan yang diperlukan ( $\delta$ ) untuk membawa kesalahan itu menjadi nol. Dalam generator PWM, kendali sinyal sinusoidal adalah *phase-modulated* dengan cara sudut  $\delta$ . Sinyal yang diatur dibandingkan dengan suatu sinyal bersegi tiga (*carrier*) dalam rangka menghasilkan sinyal penyakelaran untuk VSC. parameter utama dalam rencana sinusoidal PWM adalah index sinyal amplitudo modulasi ( $m_a$ ) pada sinyal  $V_{control}$ , dan sinyal segi tiga pada index modulasi frekuensi ( $m_f$ ). Index Amplitudo  $M_a$  dipertahankan tetap pada 1 pu, dalam hal memperoleh komponen dasar tagangan tinggi pada pengontrol keluaran. frekwensi *Switching* ditetapkan pada 450 Hz,  $M_f= 9$ , dan kasus pengujian dilakukan pada jaringan yang stabil. Sudut modulasi diterapkan pada pembangkit sinyal PWM pada fasa A. untuk fasa B dan C dengan pergeseran berturut-turut  $120^\circ$  dan  $240^\circ$ . Penerapan pengendalian sangat sederhana dengan menggunakan sinyal tegangan sebagai variabel umpan balik dalam perencanaan pengontrolan. Kecepatan respon dan efektifitas perencanaan pengontrolan ditunjukkan dalam hasil simulasi (Soeprapto, 2004).

---

### 2.8.2. Aksi Kontrol PWM Sinusoida Terhadap DVR dan D-STATCOM

Prinsip dari DVR dan D-STATCOM adalah menerima dan memproses sinyal *error* dari sumber. Hasilnya kemudian dimasukkan ke PWM *Voltage Source Converter* tiga fasa pada rangkaian utama. Dari hasil perhitungan arus referensi yang dihasilkan oleh sinyal *error* antara tegangan beban dengan tegangan referensi. Jadi sinyal yang diolah oleh PWM merupakan sinyal referensi yang diperoleh dari hasil perhitungan tersebut. Sinyal referensi ini kemudian dimodulasikan dengan sinyal *carrier* (*triangular wave*) yang berupa sinyal gigi gergaji (*saw tooth*). Sinyal *error* ini berbentuk sinusoidal yang dimodulasikan dengan sinyal gigi gergaji sebagai sinyal *carrier*. *Output* dari PWM di atas digunakan untuk mentrigger rangkaian *switching* yang terdiri atas 6 IGBT tiap fasa terdiri dari 2 IGBT (binti saudin, 2007).

## 2.9. Aksi Kontrol Proporsional Integral (PI)

### 2.9.1. Pengertian Umum Kontrol PI

Kontrol otomatis telah memegang peranan yang sangat penting dalam perkembangan ilmu dan teknologi. Disamping banyak diperlukan pada pesawat ruang angkasa, peluru kendali, sistem pengemudi pesawat dan sebagainya. Kontrol otomatis telah menjadi bagian penting dan terpadu dari proses-proses dalam pabrik dan industri modern. Misalnya, kontrol otomatis telah memegang peranan yang sangat penting dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Disamping banyak diperlukan pada pesawat ruang angkasa, peluru kendali, sistem pengemudi pesawat, dan sebagainya. Kontrol otomatis telah menjadi bagian yang sangat penting dan terpadu dari proses – proses dalam pabrik dan industri modern. Misalnya, kontrol otomatis sangat diperlukan di dalam dunia industri seperti pengontrolan tekanan, suhu, kelembaban, viskositas, dan arus dalam industri proses.

Karena kemajuan dalam teori dan praktek kontrol otomatis memberikan kemudahan dalam mendapatkan performansi dari sistem dinamik, mempertinggi kualitas dan menurunkan biaya produksi, mempertinggi laju produksi, meniadakan pekerjaan-pekerjaan rutin dan membosankan yang harus dilakukan oleh manusia, dan sebagainya.

Sejarah perkembangan. Hasil karya pertama yang sangat penting dalam kontrol otomatis adalah governor sentrifugal untuk pengontrolan kecepatan mesin uap yang dibuat

oleh *James Watt* pada abad ke delapan belas. Hasil karya lainnya yang penting pada tahap awal perkembangan teori kontrol dibuat oleh *Minorsky*, *Hazen*, *Nyquiste*, dan sebagainya. Pada tahun 1922, *Minorsky* membuat kontroler otomatis untuk mengendalikan pengemudian kapal dan menunjukkan cara menentukan kestabilan dari persamaan differensial yang melukiskan sistem. Pada tahun 1932 *Nyquis* mengembangkan suatu prosedur yang relatif sederhana untuk menentukan kestabilan sistem loop tertutup pada basis sistem loop terbuka terhadap masukan tunak (*steady state*) sinusoida. Pada tahun 1934 *Hazen*, yang memperkenalkan istilah servomekanis untuk sistem kontrol posisi, membahas desain servomekanis relay yang mampu mengikuti dengan baik masukan yang berubah. Selama dasawarsa 1940-an, metode respon frekuensi memungkinkan para insinyur untuk mendesain sistem kontrol linier berumpan balik yang memenuhi persyaratan kinerja. Metode respon frekuensi dan tempat kedudukan akar, yang merupakan inti teori kontrol fisik, akan membawa sistem yang stabil dan memenuhi seperangkat persyaratan kinerja yang hampir seimbang.

Hampir semua proses dalam industri membutuhkan peralatan – peralatan otomatis untuk mengendalikan parameter – parameter prosesnya. Otomatisasi tidak saja diperlukan demi operasi, keamanan, ekonomi maupun mutu produk, tetapi lebih merupakan kebutuhan pokok. Kelak akan dipelajari alat tidak mungkin menjalankan suatu proses industri tanpa bantuan sistem pengendali. Contohnya adalah pengendalian penggilingan minyak. Proses disuatu penggilingan minyak tidak mungkin dapat dijalankan tanpa bantuan fungsi sistem dari pengendalian.

Ada banyak parameter yang baru dikendalikan di dalam suatu proses. Diantaranya yang paling umum adalah tekanan (*pressure*) didalam sebuah *vassel* atau pipa, aliran (*flow*) didalam pipa, suhu temperatur di unit proses seperti *heat exchanger*, atau permukaan zat cair (*level*) disebuah tangki. Ada beberapa parameter lain diluar keempat parameter diatas yang cukup penting dan perlu dikendalikan karena kebutuhan spesifik proses, diantaranya : PH di industri petrokimia, *water cut (w&w)* diladang minyak mentah, warna produksi suatu fasilitas pencairan gas (NGL) dan sebagainya.

---

Gabungan serta kerja alat-alat pengendalian otomatis inilah dinamai sistem pengendalian proses (proses contoh sistem). Sedangkan semua peralatan yang menjalankan sistem pengendali disebut instrumentasi pengendalian proses (*Process Control Instrumentation*).

Kedua hal ilmu tersebut berhubungan satu dengan yang lain, dimana keduanya mempunyai hakikat yang berbeda. Pembahasan tentang ilmu proses kontrol sistem lebih dipusatkan pada kerja sistem, sering kali diperlukan penjelasan melalui alat kerja (Soeprapto, 2004).

### 2.9.2. Prinsip-Prinsip Pengendalian Proses

Dalam pengendali proses, operator mengerjakan empat langkah sebagai berikut: *Mengukur, Membandingkan, Menghitung dan Mengoreksi*. Keempat langkah yang dilakukan operator itu, seluruhnya dapat dikerjakan oleh instrumentasi. Manusia kemudian sama sekali tidak menentukan keempat langkah tadi. Operator hanya perlu menentukan besarnya *set point*, dan semuanya akan dikerjakan secara otomatis oleh instrument. Sistem pengendali semacam inilah yang disebut sistem pengendali otomatis (*automatic control system*). Keempat tahap pengendaliannya, sepenuhnya dilakukan oleh instrumentasi. Mata rantai pengendalinya kemudian disebut mata rantai tertutup, dan sistemnya juga disebut sistem pengendalian tertutup atau *sistem closed loop*.

### 2.9.3. Prinsip Kerja Pengendali

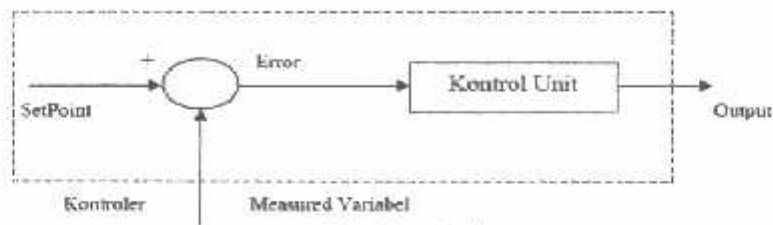
Ada tiga jenis pengendali kontinyu, yaitu pengendali proposional di singkat P, pengendali integral di singkat I, dan pengendali diferensial di singkat D. Karena kelebihan dan kekurangan ketiga pengendali itu, mereka seringkali dipakai dalam bentuk kombinasi, yaitu P+I disingkat PI, P+D disingkat PD, dan P+I+D disingkat PID. Ketiga jenis pengendali ini memberikan respon yang berbeda-beda. Pada dasarnya, tugas sebuah pengendali kontinyu terbagi dalam dua tahap, yaitu membandingkan dan menghitung.

Pembandingan itu sendiri dilakukan dengan mengurangi besarnya *set point* dengan besaran *measurement variabel*, yang hasilnya adalah besaran yang disebut *error*. Karena set

---



point bisa lebih besar atau lebih kecil dari *measurement variable*, nilai *error* bisa positif dan bisa juga negatif. Jadi *error* adalah input unit kontrol dan *manipulated variable* adalah output unit kontrol. Besarnya *manipulated variable* dihitung berdasarkan *error* dan *transfer function* unit kontrol. Bentuk *transfer function* dari unit kontrol terhitung pada “mode” yang ada dikontroler.

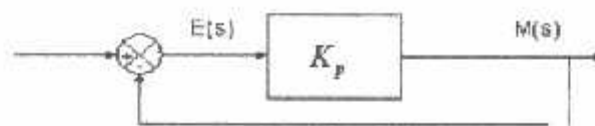


Gambar 2.14  
Kontroler Dan Diagram Kotaknya

#### 2.9.4. Pengendali Proporsional (*Proporsional Controller*)

Salah satu dari ketiga unit kontrol yang paling populer dan paling banyak dipakai adalah unit kontrol P, seperti tercermin dari namanya, besar *output* unit kontrol P selalu sebanding dengan besarnya *input*. Bentuk *transfer function* unit kontrol *proporsional* oleh karenanya akan sederhana sekali, sehingga bentuk *transfer function*-nya juga sederhana. Unit kontrol P adalah unit kontrol yang paling banyak dipakai, baik tersendiri dalam bentuk pengendali *P-only* maupun dalam kombinasi dengan mode integral (I) dan differensial (D).

Kontroler proporsional memiliki keluaran yang sebanding / proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya). Secara lebih sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran kontroler proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukan. Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya. Gambar 2.15 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran *setting*, besaran *actual* dengan besaran keluaran kontroler proporsional. Sinyal kesalahan (*error*) merupakan selisih antara besaran *setting* dengan besaran aktualnya. Selisih ini akan mempengaruhi kontroler, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat pencapaian harga *setting*) atau negatif (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan).



Gambar 2.15  
Diagram Blok Kontroler Proporsional

Kontroler proporsional memiliki 2 parameter, yaitu pita proporsional (*proporsional band*) dan konstanta proporsional.

Hubungan antara pita proporsional (*PB*) dengan konstanta proporsional ( $K_p$ ) ditunjukkan secara prosentase oleh persamaan berikut ini :

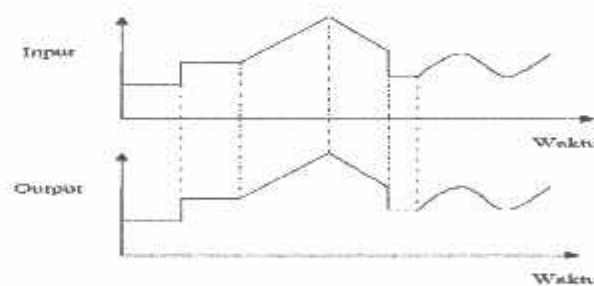
$$PB = \frac{1}{K_p} \times 100\% \dots\dots\dots(2-10)$$

Dimana:

PB = Proporsional Band

$K_p$  – Konstanta Proporsional

Walaupun hubungan input-output unit kontrol proporsional bukan merupakan fungsi waktu, untuk bahan perbandingan dengan unit kontrol lain, ada baiknya kalau hubungan itu dinyatakan dalam bentuk kurva fungsi waktu. Dari gambar 2.16 jelas terlihat bahwa output selalu mengikuti input secara proporsional. Naik turunnya input diikuti secara langsung oleh output, dan besarnya selalu sama dengan input kali gain. Karena unit kontrol proporsional ini bukan fungsi waktu, dinamik gain pengendali ini sama dengan *steady state* gainnya. Dengan kata lain, besarnya gain tidak tergantung pada besarnya frekuensi loop.



Gambar 2.16  
Response Sebuah Pengendali Proporsional

Contoh pengendali integral proporsional yang mudah ditemui dalam kehidupan sehari-hari adalah pengisian tangki penampung air di kloset. Hal yang perlu diperhatikan

pada contoh ini adalah bahwa kontrol unit di contoh bekerja secara proporsional. Artinya, koreksi dalam hal ini buka tutupnya *control valve* akan selalu sebanding dengan ketinggian level. *Set point* dalam hal ini adalah sama dengan ketinggian level maksimum (Soeprapto, 2004).

#### 2.9.5. Pengendali Integral (*Integrator Controller*)

Setelah pengendali proporsional diketahui “gagal” mengendalikan sistem secara sempurna dalam arti masih adanya *offset*. Dikarenakan sifat dasar pengendali proporsional yang masih memerlukan *error* untuk menghasilkan *output*. Oleh karena itu, untuk menghilangkan *offset*, diperlukan pengendali lain yang dapat menghasilkan *output* walaupun sudah tidak ada *input* lagi. Sifat unit inilah yang dimiliki oleh pengendali integral. Sayangnya, kemampuan pengendali integral menghilangkan *offset* tidak disertai kemampuan bereaksi secara cepat. Karena lambatnya reaksi tersebut maka pengendali integral biasanya dipakai dalam kombinasi dengan pengendali proporsional. Kedua pengendali tersebut dipasang secara paralel sehingga kelebihan kedua pengendali dapat dimanfaatkan secara serempak. Kalau diteliti dengan seksama, *offset* dapat terjadi di sistem pengendali proporsional, karena pengendali proporsional selalu membutuhkan *error* (dalam hal ini *input* ke *unit control*) untuk menghasilkan suatu *output*. Kalau tidak ada *error*, *output* yang keluar dari pengendali proporsional hanyalah bias yang biasanya disetel 50%.

Jadi untuk menghasilkan *offset* dibutuhkan sebuah pengendali lain, yang dapat menghasilkan *output* walaupun padanya tidak diberikan *input*. Dengan kata lain, diperlukan pengendali yang dapat menghasilkan *output* lebih besar atau lebih kecil dari bias pada saat *input (error)* sama dengan nol. Pengendali yang memenuhi kriteria ini adalah pengendali integral, disingkat I.

Kontroler integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol. Kalau sebuah plant tidak memiliki unsur *integrator* ( $1/s$ ), kontroler proporsional tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan mantapnya nol. Dengan kontroler integral, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai kesalahan keadaan mantapnya nol. Kontroler integral memiliki karakteristik

---

**BAB III**  
**PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN DENGAN PENGATURAN SISTEM DAYA**  
**MENGGUNAKAN SSTS, D-STATCOM DAN DVR**

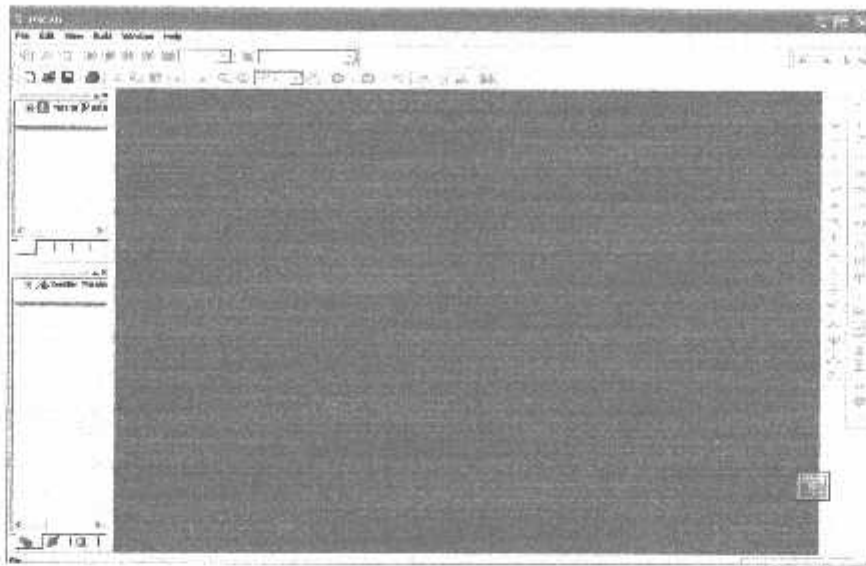
**3.1. *Software PSCAD/EMTDC V 4.2 Power Simulation***

PSCAD (*Power System CAD*) adalah *graphical user interface* yang sangat baik dan fleksibel. PSCAD memungkinkan pengguna menggambar mengkonstruksi sebuah rangkaian, menjalankan sebuah simulasi, analisa hasil dan manajemen data terintegrasi secara lengkap. Penggambaran, pengontrolan dan pengukuran juga tersedia, jadi pengguna dapat mengubah parameter sistem, menjalankan simulasi dan melihat hasil secara langsung. Dibawah ini adalah model umum yang terdapat di dalam studi sistem menggunakan PSCAD/EMTDC (Anaya, 2002) :

- *Resistors, inductors, capacitors*
- *Mutually coupled windings, such as transformers*
- *Frequency dependent transmission lines and cables (including the most accurate time domain line model in the world)*
- *Current and voltage sources*
- *Switches and breakers*
- *Protection and relaying*
- *Diodes, thyristors, GTOs, IGBTs*
- *Analog and digital control functions*
- *AC and DC machines, exciters, governors, stabilizers and inertial models*
- *Meters and measuring functions*
- *Generic DC and AC controls*
- *HVDC, SVC, and other FACTS controllers*
- *Wind source, turbines and governors*

### 3.1.1. Memulai *PSCAD/EMTDC Power Simulation*

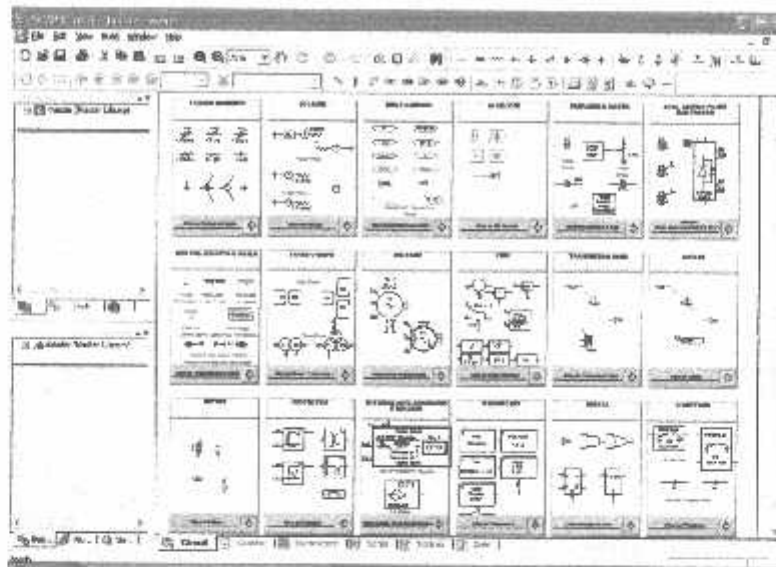
Tampilan Utama *PSCAD Power Simulation* adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1

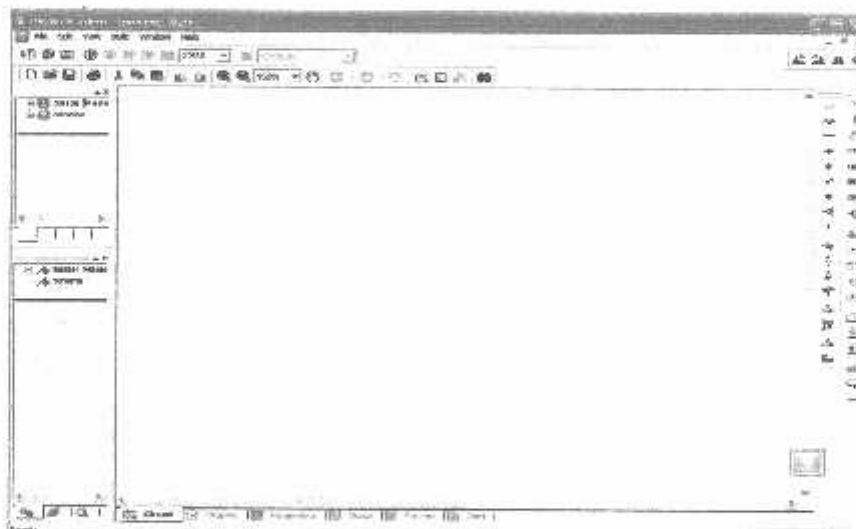
Tampilan utama *Software PSCAD/EMTDC Power Simulation*

- Untuk memulai membuat *single line* baru maka kita klik: File > New > case. Setelah melakukan prosedur di atas secara *default* PSCAD akan memberi nama *file* baru yang kita buat dengan nama "noname". Kemudian kita klik nama *file*-nya maka akan muncul tampilan seperti Gambar 3.2.
- Semua komponen yang akan digunakan dalam menggambar *single line* terdapat di dalam *Master Library* seperti pada tampilan di bawah ini. Untuk menggunakan *right click on the component > copy* dan kemudian *paste* pada modul.



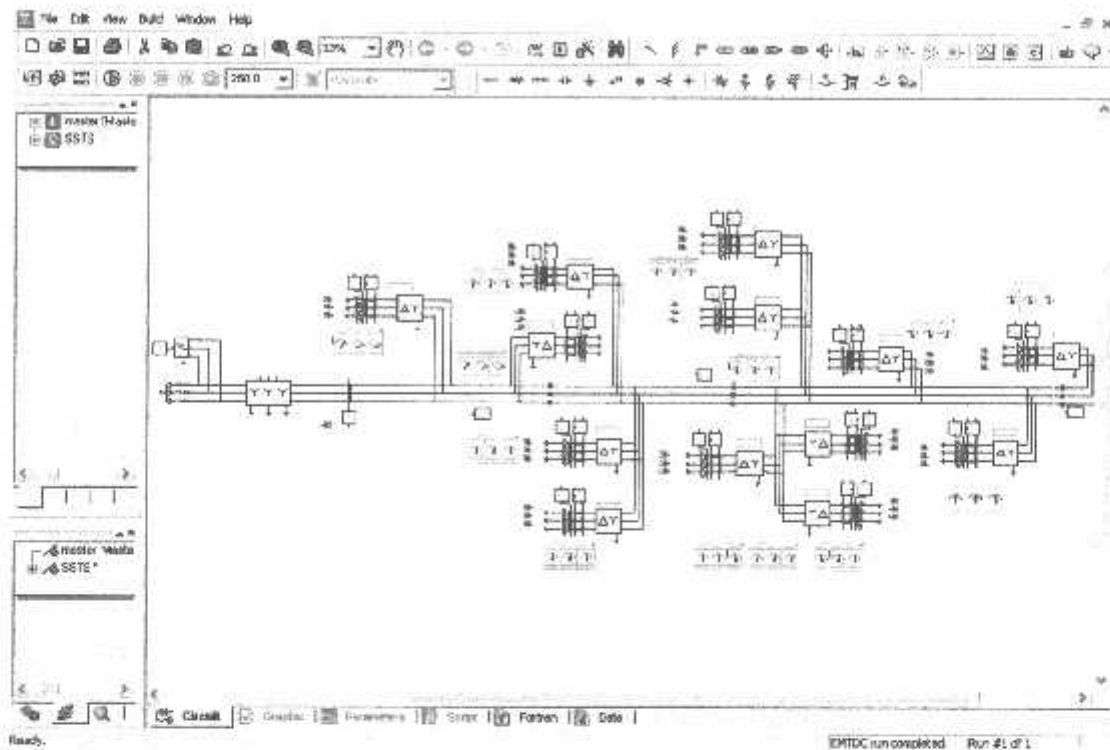
Gambar 3.2.  
Tampilan *Master Library*

- *Double klik file* baru yang sudah dibuat, maka akan muncul tampilan seperti di bawah ini, komponen-komponen dirangkai dalam modul ini.



Gambar 3.3  
Tampilan Modul Utama

- Setelah mendesain sistem seperti yang dibutuhkan, maka dapat kita lihat tampilan single line dalam modul utama sebagai berikut.

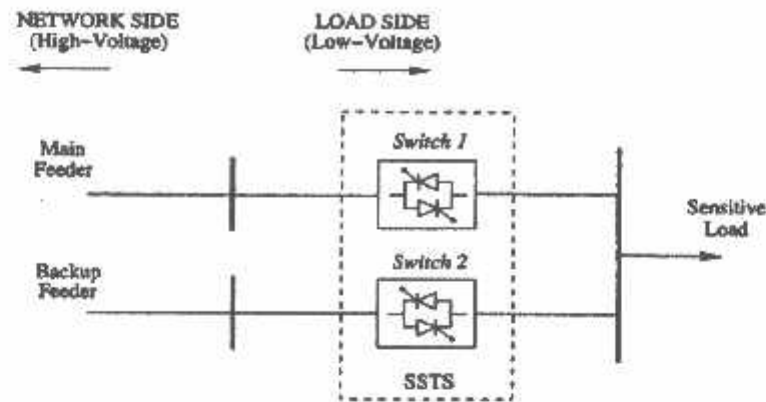


Gambar 3.4  
Tampilan *Single Line* Penyulang PIER-Bangil Dalam PSCAD

### 3.2. Sistem *Solid-State Transfer Switch (SSTS)*, *Distribution Static Compensator (D-STATCOM)* dan *Dynamic Voltage Restorer (DVR)*

#### 3.2.1. Model *Solid-State Transfer Switch (SSTS)*

SSTS dapat digunakan sangat efektif untuk melindungi beban sensitif terhadap *voltage sags*, *voltage swells* dan gangguan listrik lain. SSTS menjamin pasokan listrik terus menerus berkualitas tinggi untuk beban sensitif dengan mentransfer dalam skala waktu milidetik, beban dari bus yang terjadi gangguan ke satu bus yang tidak mengalami gangguan. Konfigurasi dasar perangkat ini terdiri dari dua *switch solid-state* tiga fase, satu untuk pengumpan utama dan satu untuk pengumpan cadangan. *Switch* ini memiliki pengaturan thyristor terhubung *back-to-back*, seperti digambarkan dalam diagram skematis pada Gambar 3.5.

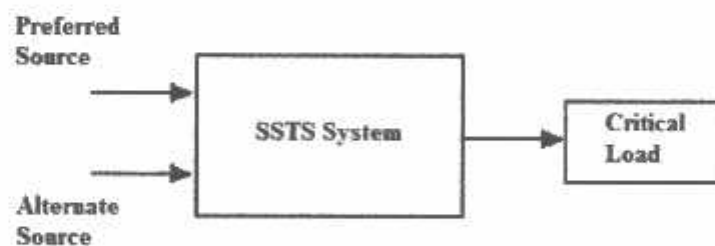


Gambar 3.5  
Diagram blok fungsional untuk SSTS

Setiap kali suatu kondisi kesalahan terdeteksi di pengumpan utama, sistem kontrol mengirim sinyal pemutus ke thyristor pada kedua *switch*, yaitu, *Switch 1* di pengumpan utama dinonaktifkan dan *Switch 2* di pengumpan cadangan diaktifkan. Sistem kontrol mengukur nilai puncak bentuk gelombang pada tegangan setiap *halfcycle* dan mengecek apakah itu adalah tidak atau dalam kisaran yang ditentukan. Jika di luar batas, suatu kondisi abnormal terdeteksi dan sinyal akan mengirim ke thyristor untuk berubah mentransfer beban ke pengumpan yang sehat (Binti saudin, 2007).

#### 3.2.1.1. Prinsip Dasar Operasi SSTS

SSTS seperti yang ditunjukkan pada Gambar di bawah adalah transisi kecepatan tinggi saklar yang terbuka, memungkinkan pengalihan beban listrik dari satu sumber listrik AC yang lain dalam beberapa milidetik.



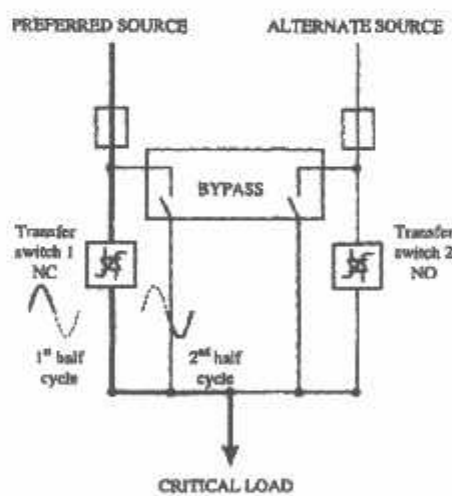
Gambar 3.6  
Diagram sistem *Solid State Transfer Switch*



Transisi perangkat yang terbuka dari SSTS yaitu berarti bahwa kontak yang beralih istirahat dengan satu sumber sebelum membuat kontak lagi dengan sumber lain. Keuntungan dari skema *transfer* atas transisi tertutup saklar mekanis ini adalah bahwa listrik sumber tidak pernah terhubung tanpa sengaja, hubungan silang dalam sumber AC dengan sumber alternatif beralih ke sistem yang salah tidak disarankan oleh konsep listrik.

Saklar *solid state transfer* terdiri dari dua switch tiga fasa *thyristor* AC. Pada *thyristor* beroperasi dalam dua bentuk, bentuk ini merupakan kunci dari komponen SSTS. Dalam keadaan ON, terjadi impedansi sangat rendah. Pada keadaan OFF sebuah sistem terbuka dengan impedansi hampir tak terbatas yang terjadi pada *thyristor*.

Pada dasarnya kondisi ON dan kondisi OFF di dalam *thyristor* digunakan untuk membentuk saklar yang cerdas yang bisa memilih antara dua sumber daya yang menyediakan kualitas yang lebih baik dari pasokan yang tersedia pada beban listrik. Dasar konfigurasi didasarkan pada kelompok *thyristor* yang tidak paralel pada sisi pilihan dan *alternative* saklar. *Thyristor* hanya mengikuti Sebuah arah ke depan yang memungkinkan. Gambar 3.7 menggambarkan bagaimana *thyristor transfer switch* 1 dapat melakukan dengan baik dalam keadaan positif atau negatif pada setengah siklus sinusoida AC dan aliran daya suplai yang ditunjukkan oleh garis tebal.

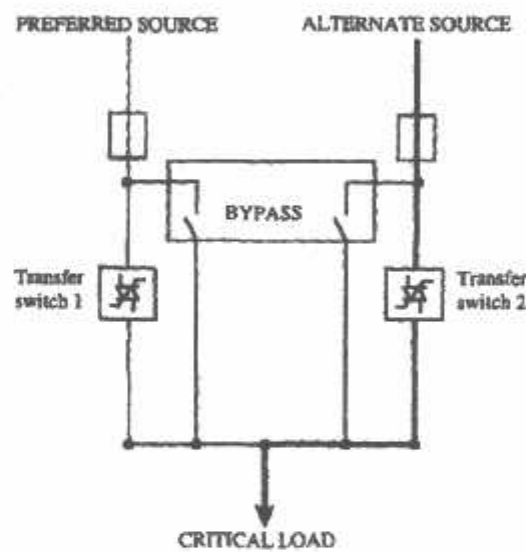


Gambar 3.7

*Thyristor* dari SSTS melakukan dalam setengah siklus positif dan negatif dari sumber yang diinginkan

Selama operasi normal, *thyristor* yang terkait dengan sumber biasanya dalam keadaan ON posisi tertutup (NC), sedangkan yang berhubungan dengan alternatif sumber biasanya dalam keadaan-OFF posisi terbuka (NO).

Pada gambar ini kita menyarankan melihat keadaan pada bagian sumber alternatif yang biasanya mengirim informasi ke pengontrol dengan pemantauan kecepatan tinggi yang mendeteksi hilangnya sumber tegangan yang diinginkan atau tidak berada dalam kisaran yang diinginkan, blok pengendali sinyal mengirimkan *impuls* ke gerbang *thyristor transfer switch 1* dan menginstruksikan *thyristor transfer switch 2* untuk mengaktifkan dengan gagal atau keadaan aman mekanisme *interlocking*. Daya kemudian mengalir melalui jalan seperti yang ditunjukkan oleh garis tebal di Gambar 3.8.



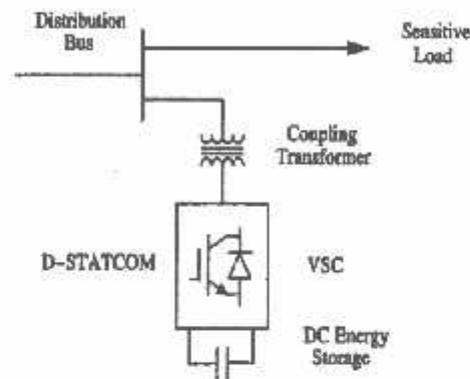
Gambar 3.8

*Thyristor* pada pasokan alternatif yang menyala pada sebuah sinyal gangguan pada sumber yang diinginkan.

Oleh karena itu, SSTS dapat secara efektif meningkatkan keandalan pasokan listrik dan melindungi peralatan listrik yang sensitif (Anaya, 2002).

### 3.2.2. Model *Distribution Static Compensator* (D-STATCOM)

Bentuk umum dari *Distribution Static Compensator* terdiri dari suatu gabungan dua level VSC, suatu sumber DC dan trafo penggabungan yang dihubungkan secara *shunt* dengan sistem arus bolak-balik dan unit kontrol yang terhubung. Bentuknya dapat dirancang lebih canggih menggunakan *multipulse* atau konfigurasi *multilevel*.



Gambar 3.9  
Diagram blok fungsional D-STATCOM

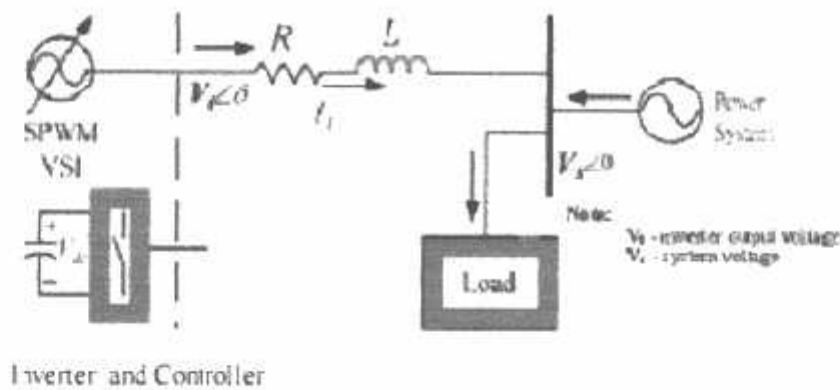
Pada gambar 3.9 menunjukkan diagram blok fungsional D-STATCOM, dimana VSC mengkonversi tegangan DC melewati peralatan sampai ke dalam satu keluaran arus bolak-balik tiga fasa. Tegangan ini digabungkan dengan sistem arus bolak-balik melalui reaktansi trafo penggabung. Penyesuaian terhadap keluaran tegangan D-STATCOM memberikan kontrol yang efektif terhadap daya aktif dan daya reaktif dari D-TATCOM dan sistem arus bolak-balik. VSC yang dihubungkan secara *shunt* dengan sistem arus bolak-balik memberikan kontribusi:

1. Mengkompensasi rugi-rugi dari daya reaktif.
2. Memberikan koreksi terhadap faktor daya.

D-STATCOM di sini digunakan untuk meregulasi tegangan yang ada pada titik penyaluran beban (Binti saudin, 2007).

#### 3.2.2.1. Prinsip Dasar Operasi D-STATCOM

D-STATCOM adalah perangkat tiga fasa yang berbasis elektronika yang di pasang secara paralel yang di hubung kan pada saluran distribusi, komponen utama D-STATCOM ditunjukkan pada Gambar 3.10 di bawah ini,



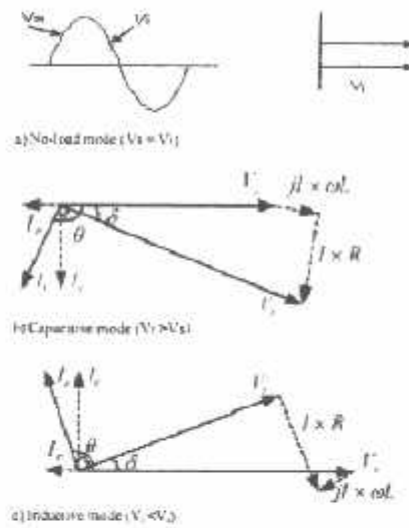
Gambar 3.10  
Pembuatan blok DSTATCOM

Terdiri dari kapasitor DC, tiga inverter modul seperti IGBT atau *thyristor*, AC filter, trafo kopling dan pengontrol sistem. Blok elektronik dasar dari D-STATCOM adalah mengkonverter sumber tegangan yang mengubah tegangan input dc menjadi tegangan output tiga fasa dalam bentuk frekuensi.

Mengacu pada Gambar 3.10, controller dari D-STATCOM digunakan untuk mengoperasikan *inverter* sedemikian rupa sehingga sudut fasa antara tegangan *inverter* dan garis tegangan secara dinamis disesuaikan sehingga D-STATCOM menghasilkan atau menyerap VAR yang diinginkan pada titik sambungan. *Out put* tegangan fasa dari *thyristor* berbasis *converter*  $V_i$  dikendalikan dalam cara yang sama seperti tegangan sistem distribusi  $V_s$ . Gambar 3.11 menunjukkan tiga mode operasi dasar dari keluaran D-STATCOM saat ini yang bervariasi tergantung pada  $V_i$ .

Sebagai contoh, jika  $V_i$  sama dengan  $V_s$ , daya reaktif adalah nol dan D-STATCOM tidak membuat atau menyerap daya reaktif. Ketika  $V_i$  lebih besar dari  $V_s$ , D-STATCOM melihat sebuah reaktansi induktif dihubungkan pada terminal. Oleh karena itu, sistem D-STATCOM melihat sebagai reaktansi kapasitif. Arus  $I$  mengalir melalui reaktansi trafo dari D-STATCOM ke sistem AC, dan perangkat menghasilkan daya reaktif kapasitif. Selanjutnya, jika  $V_s$  lebih besar dari  $V_i$ , sistem melihat dan reaktansi induktif dihubungkan pada terminal dan D-STATCOM melihat sistem sebagai reaktansi kapasitif, maka arus

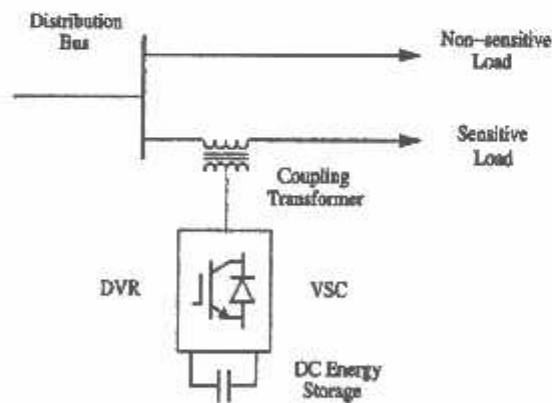
mengalir dari sistem AC ke D-STATCOM, mengakibatkan perangkat menyerap daya reaktif induktif (Anaya, 2002).



Gambar 3.11  
Model operasi dari D-STATCOM

### 3.2.3. Model *Dynamic Voltage Restorer* (DVR)

*Dynamic Voltage Restorer* merupakan pengontrol yang biasanya digunakan untuk meminimalisasikan *Voltage Sag*. DVR biasanya bekerja pada bagian yang sama dengan D-STATCOM dimana trafo penghubung dihubungkan secara seri dengan sistem arus bolak-balik seperti yang terlihat pada gambar 3.12.



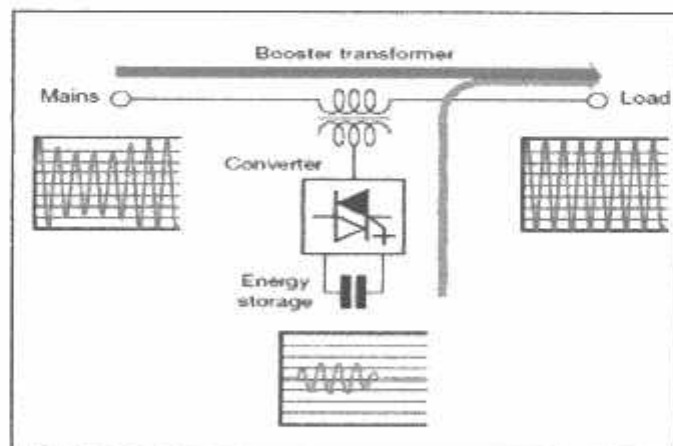
Gambar 3.12  
Diagram blok fungsional untuk DVR

VSC menghasilkan suatu output tegangan arus bolak-balik tiga fasa yang dikontrol pada fasa dan besarnya. Tegangan diberikan ke dalam sistem distribusi arus bolak-balik untuk menjaga tegangan beban sesuai dengan yang diinginkan (Binti saudin, 2007).

### 3.2.3.1. Prinsip Dasar Operasi DVR

DVR adalah *solid state switching* elektronika daya perangkat yang terdiri baik dari GTO atau IGBT, kapasitor bank sebagai perangkat yang penyimpanan energi dan injeksi trafo. Hal ini dihubungkan secara seri antara sistem distribusi dan beban yang ditunjukkan pada Gambar 3.13. Prinsip dasar dari DVR ini adalah menyuntikkan tegangan yang dihasilkan dari merubah tenaga yang di ringankan oleh *converter* dalam bentuk seri ke bus tegangan dalam batas kemampuan injeksi trafo. Sebuah kapasitor bank DC yang berfungsi sebagai perangkat penyimpanan energi, menyediakan tegangan DC yang diatur oleh sumber tegangan. Dalam perpindahan daari DC ke AC disini *inverter* mengatur tegangan menghasilkan PWM sinusoida.

Selama kondisi operasi normal, DVR hanya menyuntikkan tegangan kecil untuk mengkompensasi jatuh tegangan saat menginjeksi trafo dan saat mengalami kerusakan perangkat. Namun, ketika *voltage sag* terjadi pada sistem distribusi, sistem kontrol DVR menghitung dan menganalisa tegangan yang diperlukan untuk mempertahankan tegangan output ke beban dengan menyuntikkan tegangan terkontrol dengan *magnitude* tertentu dan sudut fase ke sistem distribusi pada beban kritis.



Gambar 3.13  
Prinsip DVR dengan waktu respon kurang dari satu millisecond

Perhatikan bahwa DVR mampu menghasilkan atau menyerap daya reaktif tetapi injeksi daya perangkat aktif harus disediakan oleh sumber energi eksternal atau sistem penyimpanan energi. Waktu respons dari DVR yang sangat pendek dan terbatas oleh perangkat elektronika daya dan waktu deteksi *voltage sag*. Respon yang diharapkan waktu sekitar 25 milidetik, dan yang jauh lebih kecil daripada beberapa metode koreksi tegangan seperti tap-perubahan trafo (Anaya, 2002).

### **3.3. Kompensasi SSTS, D-STATCOM, dan DVR Pada Sistem Distribusi 20 kV**

#### **3.3.1. Sistem Distribusi Tanpa Kompensasi SSTS, D-STATCOM dan DVR**

Hampir semua beban dalam sistem tenaga listrik didominasi oleh beban-beban induktif seperti motor-motor listrik, inverter, UPS dan masih banyak lagi peralatan yang menggunakan komponen-komponen induktif yang berakibat menimbulkan gangguan kestabilan tegangan. Untuk mengatasi permasalahan ini SSTS, D-STATCOM dan DVR menawarkan pengendalian yang fleksibel dalam mengatasi permasalahan yang ditimbulkan oleh beban-beban tersebut. Ini mungkin dilakukan dengan adanya perkembangan piranti elektronika daya yang berkembang cukup pesat, *full controlable* dan penggunaannya dapat dipadukan ke dalam sistem tenaga listrik baik sisi tegangan tinggi maupun tegangan rendah. Dalam hal ini SSTS, D-STATCOM dan DVR dilengkapi dengan pengendali PI dan kontrol SPWM (Anaya, 2002).

#### **3.3.2. Sistem Distribusi Dengan Kompensasi SSTS, D-STATCOM dan DVR**

Ketidakstabilan tegangan dalam sistem distribusi bisa menyebabkan terjadinya pemborosan energi listrik. Ketidakstabilan itu dapat diartikan tegangan pada suatu fase lebih besar, lebih kecil atau berfluktuasi terhadap tegangan standar. Sedangkan akibat pemborosan energi listrik itu maka timbul panas sehingga bisa menyebabkan pertama kerusakan isolator peralatan yang dipakai. Kedua memperpendek daya isolasi pada lilitan. Sementara itu dengan ketidakseimbangan sebesar 3% saja dapat memperbesar suhu motor yang sedang beroperasi sebesar 18% dari keadaan semula. Hal ini tentunya akan menimbulkan suara bising pada motor dengan kecepatan tinggi.

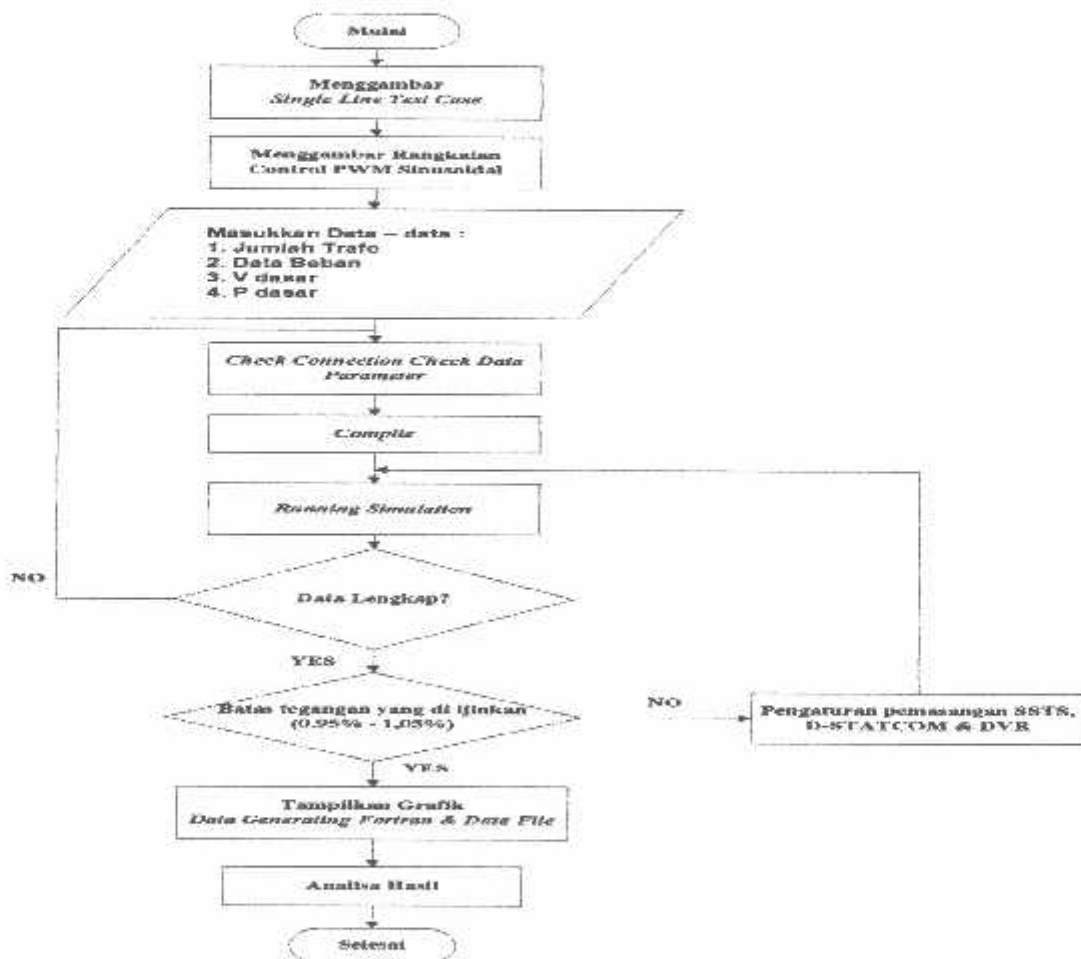
Untuk mengoptimalkan pemakaian energi listrik bisa digunakan beban-beban tiruan berupa LC yang dilengkapi dengan teknologi pengendalian. Sehingga ketepatan dan

---

keandalan dalam mendeteksi kualitas daya listrik bisa diperoleh. Pengendali itu berfungsi untuk mengolah komponen-komponen yang menentukan kualitas tenaga listrik. Seperti keseimbangan beban antar fasa dan harmonik. Apabila terdapat ketidakseimbangan antara fasa satu dengan fasa yang lainnya, maka pengendali akan memerintahkan beban-beban LC untuk membuka atau menutup agar arus disuplai ke fasa satu sehingga selisih arus antara fasa satu dengan fasa yang lainnya tidak ada. Banyaknya L atau C yang dibuka atau ditutup tergantung dari kondisi ketidakseimbangan beban yang terdeteksi oleh pengontrol. Komponen LC yang dimaksudkan diatas sudah terintegrasi dalam peralatan SSTS, D-STATCOM, dan DVR.

### 3.4. Flowchart

#### 3.4.1. Flowchart Desain dan Simulasi Sistem dengan SSTS, D-STATCOM dan DVR

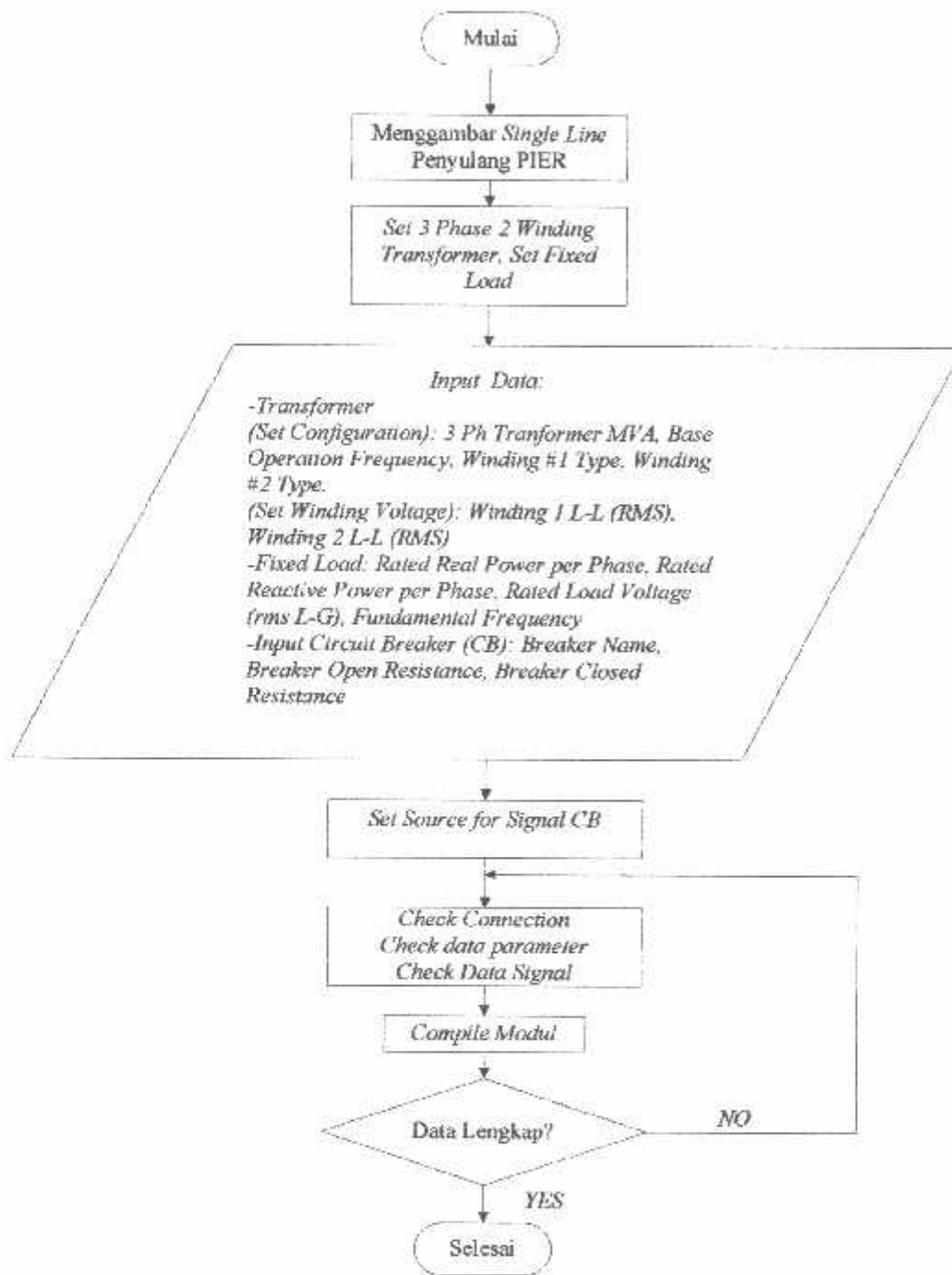


Gambar 3.14

Flowchart Analisa Perbaikan Kualitas tegangan Dengan SSTS, D-STATCOM dan DVR

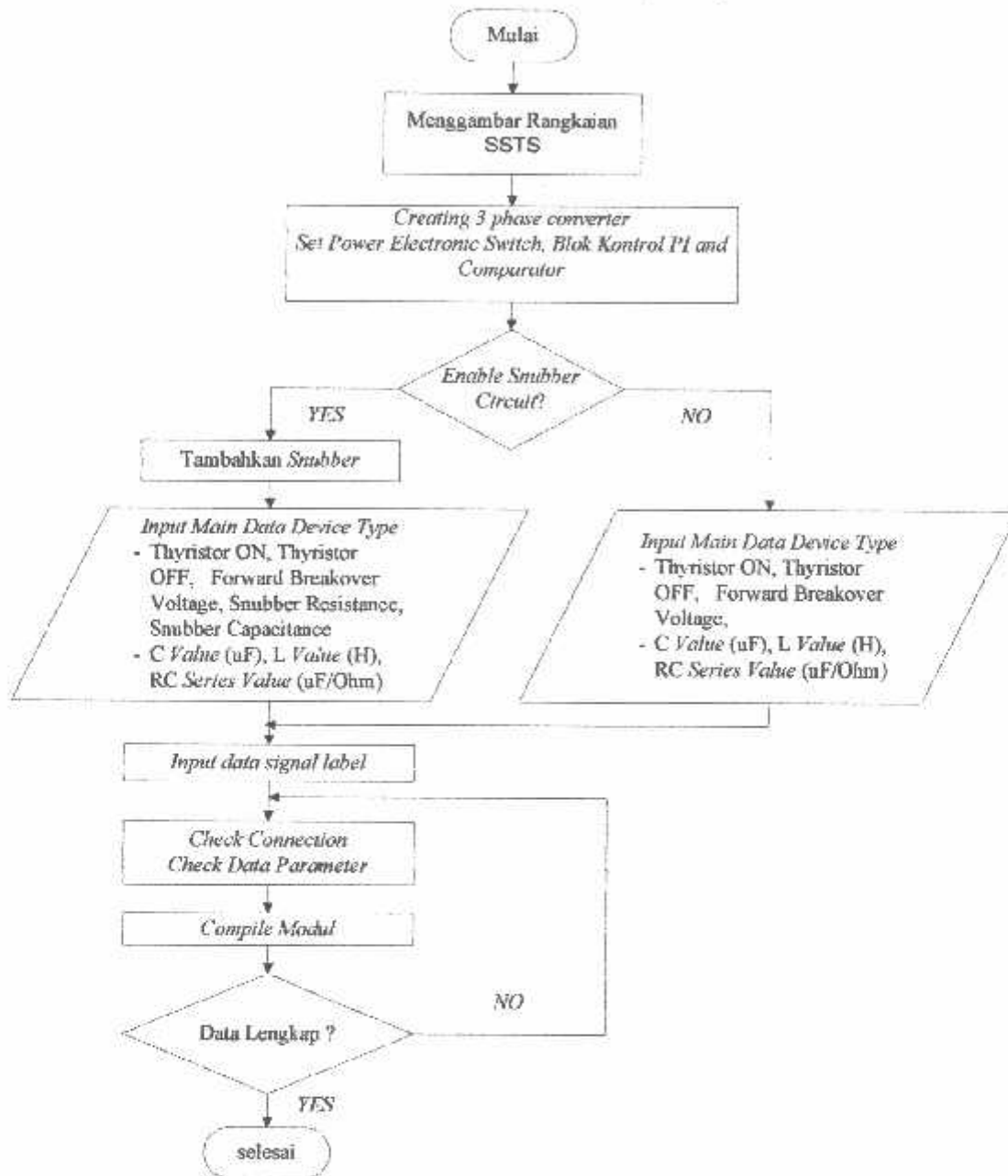


### 3.4.2. Flowchart Wiring Penyulang PIER



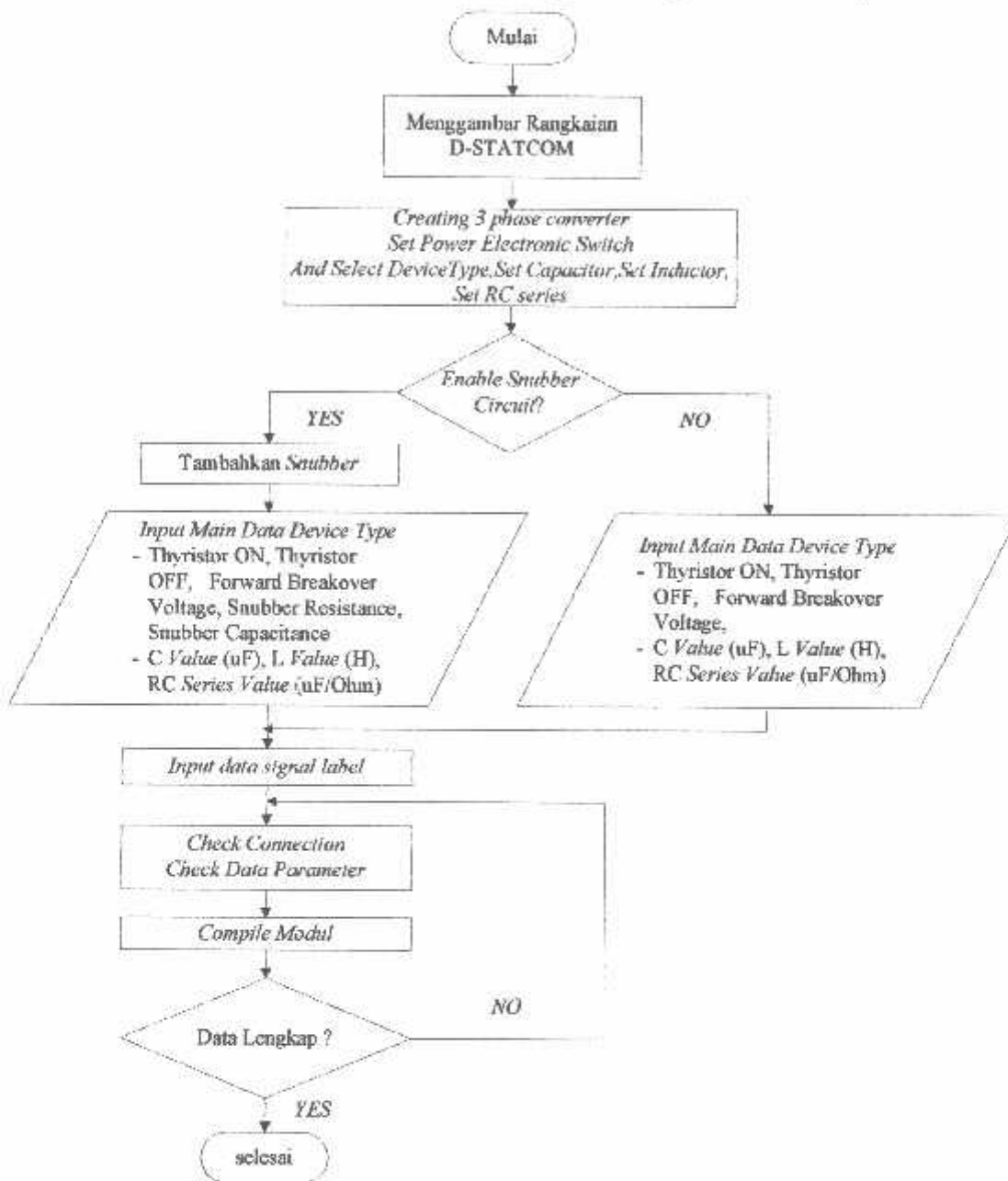
Gambar 3.15  
Flowchart Pembuatan Single Line Diagram Penyulang PIER

### 3.4.3. Flowchart Desain Solid-State Transfer Switch (SSTS)



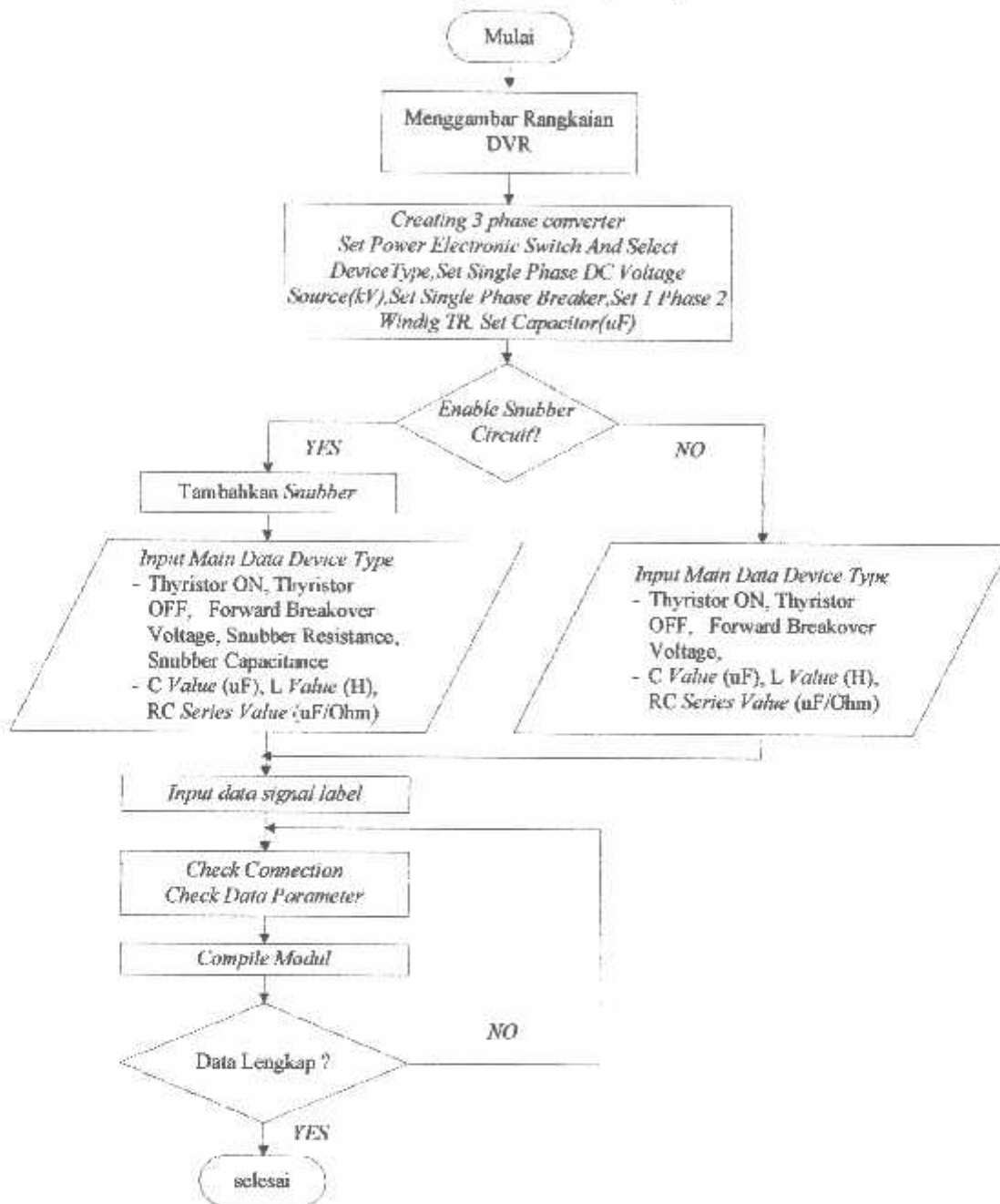
Gambar 3.16  
Flowchart Pembuatan Rangkaian (SSTS)

### 3.4.4. Flowchart Desain Distribution Static Compensator (D-STATCOM)



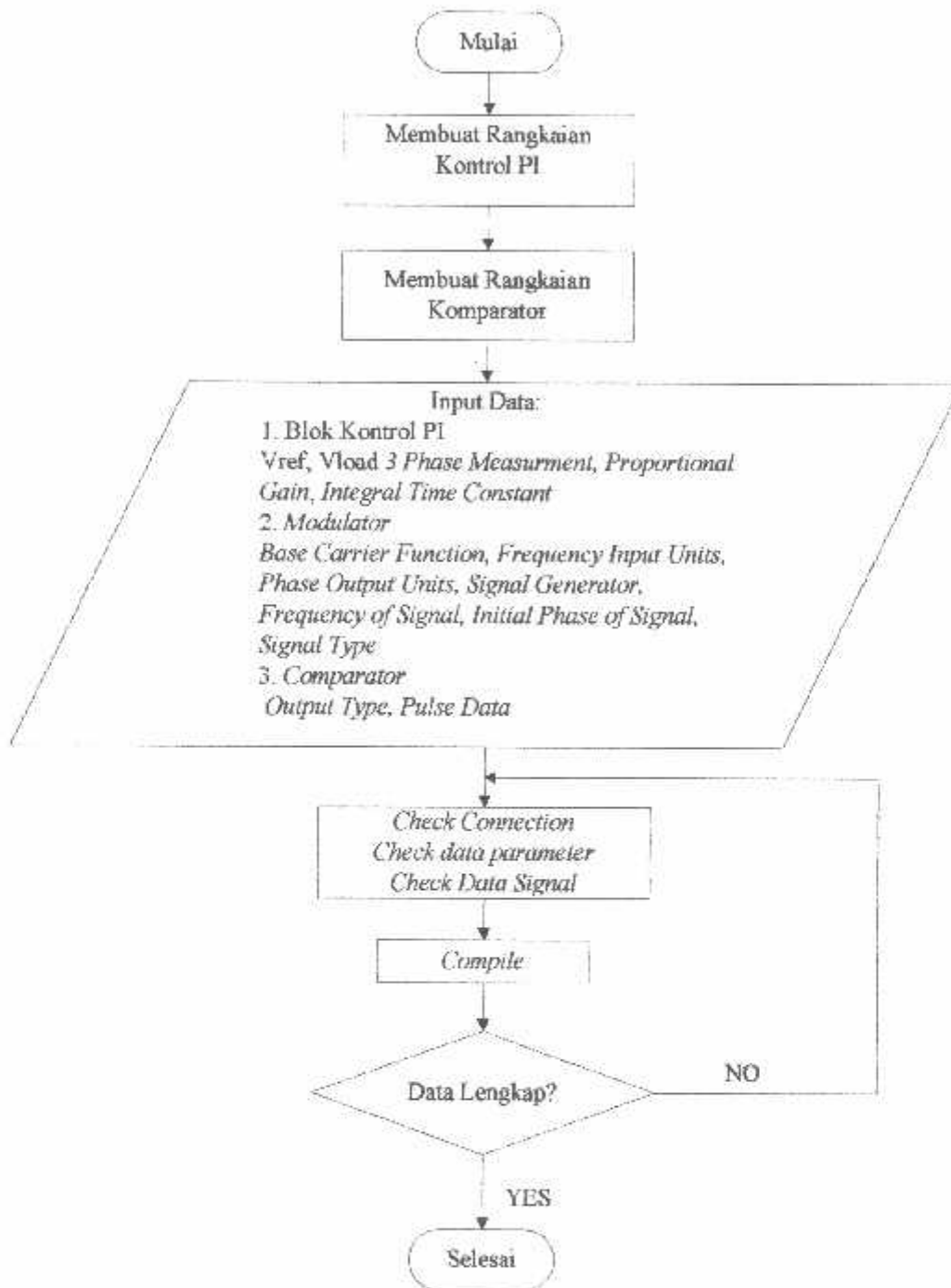
Gambar 3.17  
Flowchart Pembuatan Rangkaian (D-STATCOM)

### 3.4.5. Flowchart Desain Dynamic Voltage Restorer (DVR)



Gambar 3.18  
Flowchart Pembuatan Rangkaian (DVR)

### 3.4.6. Flowchart Desain Kontrol SSTS, D-STATCOM dan DVR

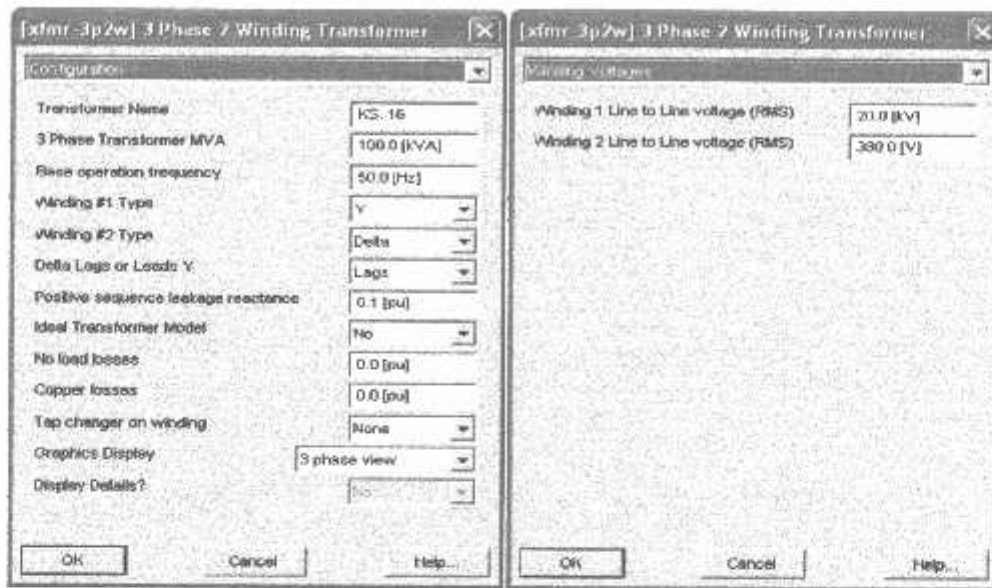


Gambar 3.19  
Flowchart Pembuatan Rangkaian Kontrol PWM Untuk  
SSTS, D-STATCOM dan DVR

### 3.5. Input Data Dalam PSCAD/EMTDC Power Simulation

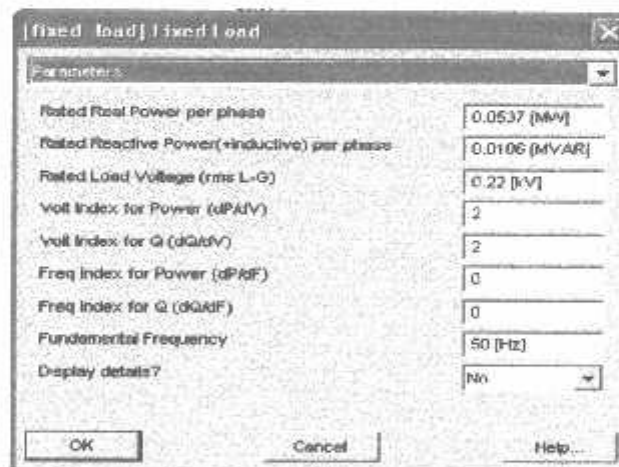
#### 3.5.1. Input Data Transformator dan Fixed Load

##### Data Transformator



Gambar 3.20  
Tampilan Input Data Transformator

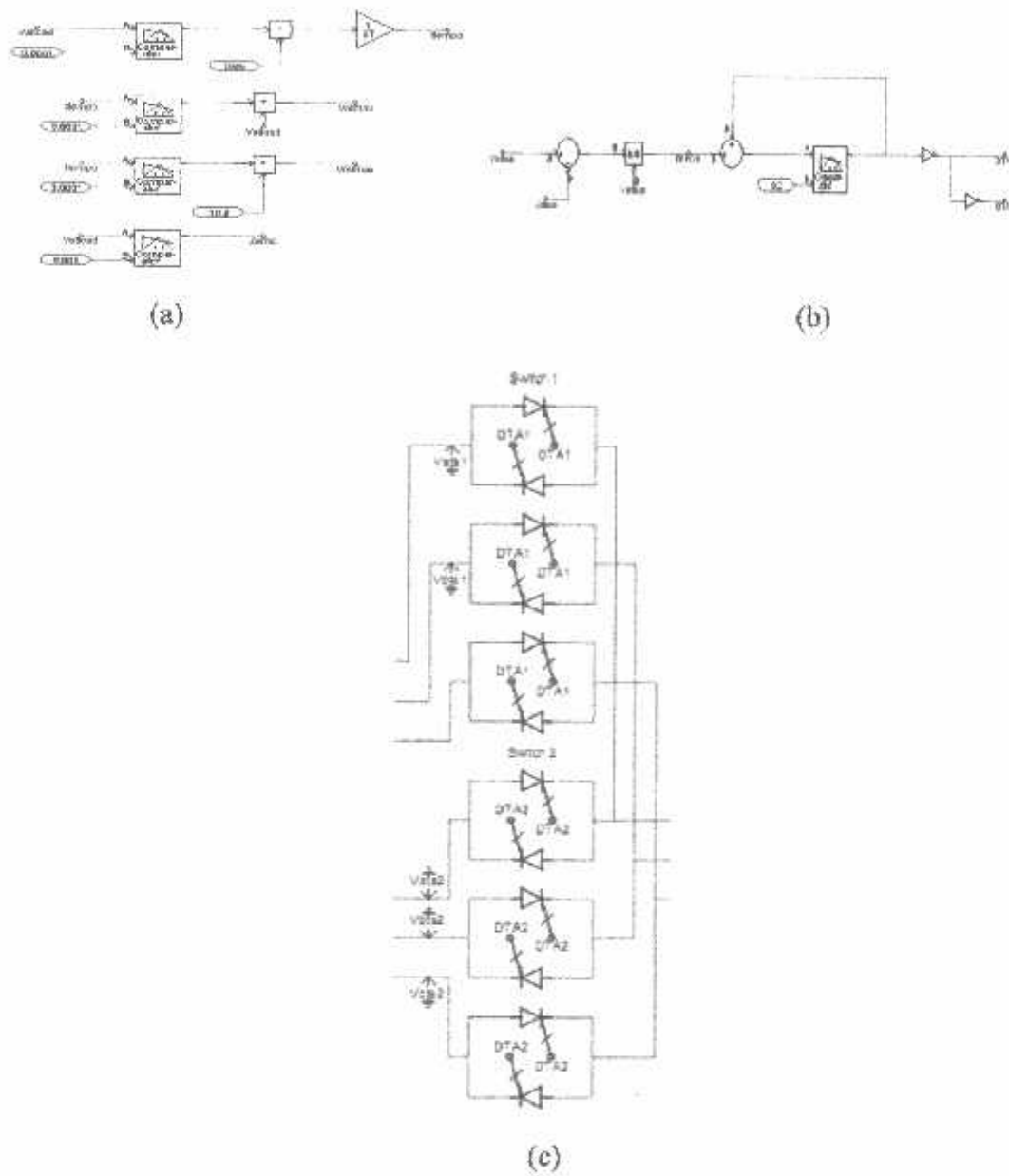
##### Data Fixed Load



Gambar 3.21  
Tampilan Input Data *Fixed Load*

### 3.5.2. Input Data Pengendali Pada SSTS, D-STATCOM dan DVR

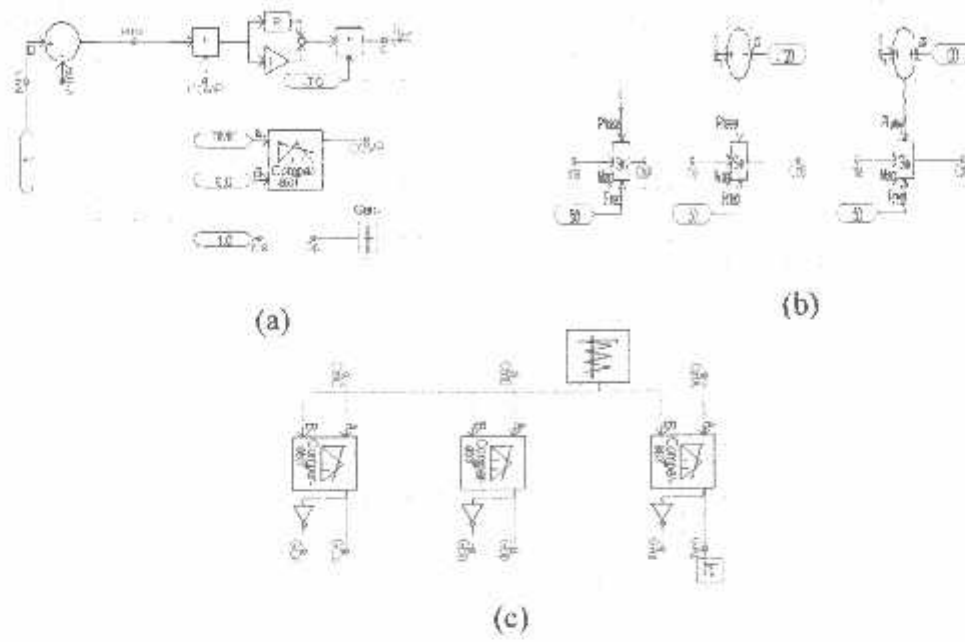
#### 3.5.2.1. Input Data Pengendali PI Pada SSTS



Gambar 3.22

- Rangkaian Pengendali PI untuk Mengendalikan SSTS
- Rangkaian Sinyal Komparator Untuk Mengendalikan SSTS
- Rangkaian *Switching* untuk Mengendalikan SSTS

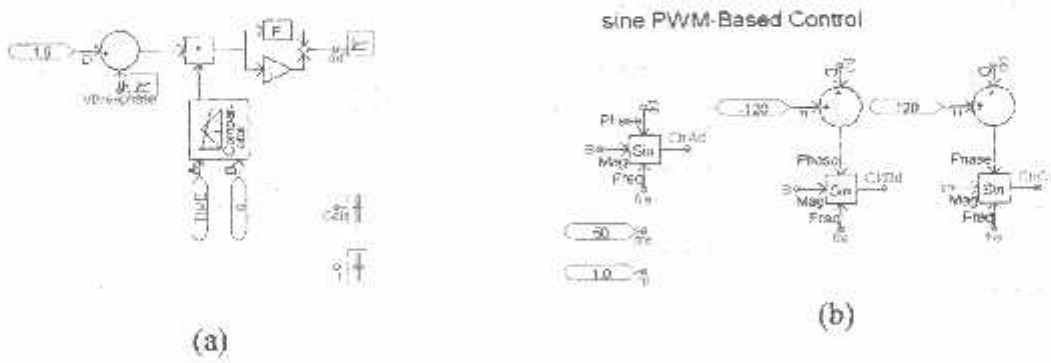
### 3.5.2.2. Input Data Pengendali PI dan SPWM Pada D-STATCOM



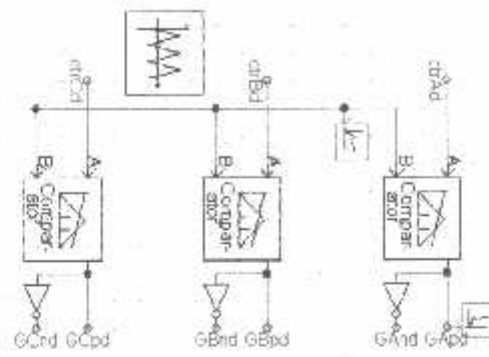
Gambar 3.23

- Rangkaian Pengendali PI untuk mengendalikan D-STATCOM
- Rangkaian Sinyal Komparator Untuk Mengendalikan D-STATCOM
- (Rangkaian Komparator Untuk Mengendalikan D-STATCOM

### 3.5.2.3. Input Data Pengendali PI dan SPWM Pada DVR







(c)

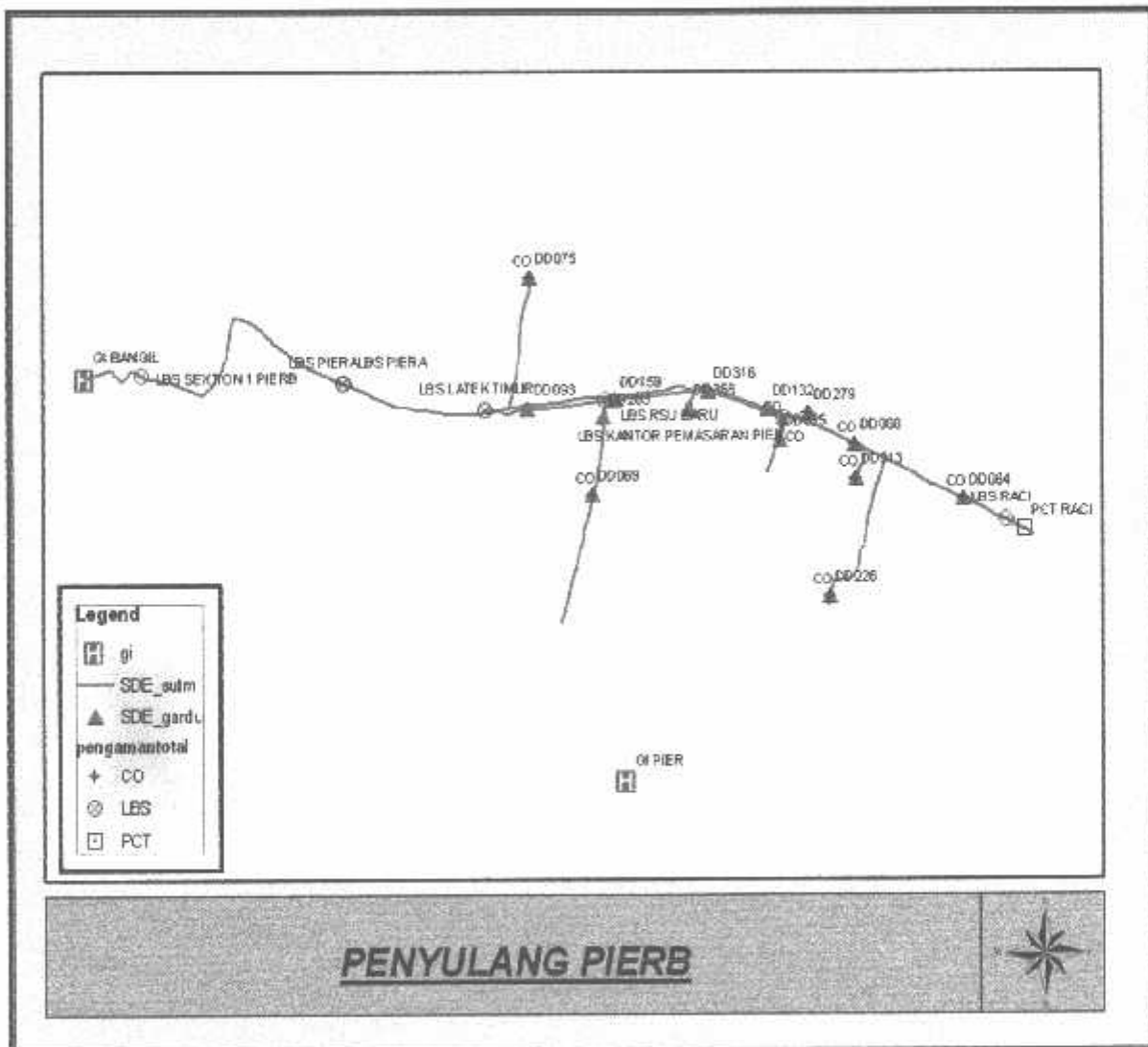
Gambar 3.24

- a) Rangkaian Pengendali PI untuk mengendalikan DVR
- b) Rangkaian Sinyal Komparator Untuk Mengendalikan DVR
- c) Rangkaian Komparator Untuk Mengendalikan DVR

## BAB IV HASIL DAN ANALISA HASIL

### 4.1. Single Line Sistem Distribusi 20 kV Penyulang PIER

Untuk mensimulasi sistem Penyulang PIER dalam *software PSCAD Power Simulation* maka terlebih dahulu digambarkan rangkaian penyulang tersebut ke dalam lembar kerja pada *software* kemudian disimulasi sesuai dengan urutan langkah kerja dan menganalisa hasilnya. Berikut adalah gambar *single line* penyulang PIER.



Gambar 4.1.  
Single Line Penyulang PIER

#### 4.2. Data Sistem Distribusi pada PT. PLN (PERSERO) Bangil

Sebelum pengisian data dalam program *PSCAD Power Simulation* maka di perlukan data-data hasil penelitian dilapangan, data tersebut antara lain data saluran pada tabel 4.1, data pembebanan pada tabel 4.2 dan data aliran daya pada tabel 4.3 sebagai berikut:

##### 4.2.1. Data Saluran PT. PLN (PERSERO) Bangil

Untuk pengisian data parameter menggunakan program *PSCAD Power Simulation* maka perlu data-data saluran yang tercantum pada tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4.1  
Data Saluran PT. PLN (PERSERO) Bangil.

NO	PENYUGLANG	KONDUKTOR			PANJANG JARINGAN
		JENIS	UKURAN (mm)	PANJANG (m)	
1	Pesanggrahan	AAAC	3x70	5.361	12.091
		AAAC	3x110	1.434	
		AAAC	3x150	5.296	
2	Raci	AAAC	3x110	2.692	6.354
		AAAC	3x150	2.632	
		AAACOC	3x150	1.579	
		XLPE	3x150	51	
3	Kebon Candi	AAAC	3x30	1.877	14.056
		AAAC	3x110	59	
		AAAC	3x150	3.317	
		AAACOC	3x150	8.720	
		AAACOC	3x240	83	
4	PIER A	AAAC	3x110	541	6.410
		AAAC	3x150	3.235	
		AAACOC	3x150	2.420	
		XLPE	3x150	76	
		XLPE	3x240	138	
5	PIER B	AAAC	3x30	891	49.465
		AAAC	3x110	62	
		AAAC	3x150	45.510	
		AAACOC	3x150	3.002	
6	USPI	AAAC	3x110	1.077	7.053
		AAAC	3x150	810	
		AAACOC	3x150	559	
		AAACOC	3x240	4.888	
		XLPE	3x150	125	
		XLPE	3x240	44	

7	Beji	AAAC	3x150	13.171	13.171
8	Kali Kunting	AAAC	3x30	2.616	15.100
		AAAC	3x70	1.466	
		AAAC	3x110	5.936	
		AAAC	3x150	2.159	
		AAACOC	3x150	2.923	
9	Kenep	AAAC	3x70	1.840	8.039
		AAAC	3x110	4.686	
		AAAC	3x150	1.421	
		CVT	3x150	48	
		XLPE	3x150	44	
10	Gunung Gangsir	AAAC	3x150	2.159	15.218
		AAACOC	3x150	4.688	
		AAACOC	3x240	198	
		XLPE	3x150	67	
		XLPE	3x240	67	

Data PT.PLN (Persero) Bangil 2010

#### 4.2.2. Data Pembebanan Penyulang PIER

Adapun pengisian data-data pada pembebanan pada penyulang PIER yang tercantum pada table 4.2 adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2.  
Data Pembebanan Penyulang PIER

No	No Gardu	Lokasi	Daya (KVA)	Beban Puncak	%
1	RN 23	Jln. Raya Latek	160	130.02	81.26
2	RN 64	Ds. Raci Pandelegan	3X50	122.86	81.90
3	RN 68	Ds. Raci / Makam Raci	100	77.82	77.82
4	RN 69	Ds. Mojoparon	200	159.57	79.79
5	RN 71	Ds. Mojokopek	160	126.32	78.95
6	RN 75	Ds. Keradenan	100	77.82	77.82
7	RN 82	Ds. Timur Latek	160	118.01	73.75
8	RN 93	Perum Pekoren	160	119.16	74.48
9	RN 132	Jln. Raya Raci	200	146.41	73.21
10	RN 159	Ds. Blawi	3X50	113.85	75.90
11	RN 203	Ds. Blawi	160	116.85	73.03
12	RN 226	Ds. Balai Panjang / Raci	160	124.70	77.94
13	RN 349	Polres Pasuruan	100	84.29	84.29

Data PT.PLN (Persero) Bangil 2010

#### 4.2.3. Data Aliran Daya Tiap Saluran Pada Penyulang PIER

Dari hasil analisa data menggunakan program *PSCAD Power Simulation* maka didapat hasil analisa aliran daya tiap saluran penyulang PIER telah dicatat pada tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4.3.  
Data Aliran Daya Penyulang PIER

Trafo	Tegangan (pu)	Daya	
		P (kW)	Q (kVAR)
1	1.010874173	113.9023498	64.5392042
2	1.029948375	112.5740162	48.1471417
3	1.024693248	68.90367553	35.604360481
4	1.018693018	142.28835631	73.654303145
5	1.019857707	112.578357719	58.970945908
6	1.018850812	168.99115457	37.00510829
7	1.025555135	104.71744184	56.5937735
8	1.020605025	104.89936848	59.96853901
9	1.019852579	126.05272662	75.864989184
10	1.025393085	101.04593614	52.41927241
11	1.021741474	100.55944141	59.457844254
12	1.016629153	108.8853441	61.877110283
13	1.007905718	80.24194344	39.542386115

Data Hasil Pengolahan Aliran Daya Menggunakan *Software PSCAD/EMTDC*

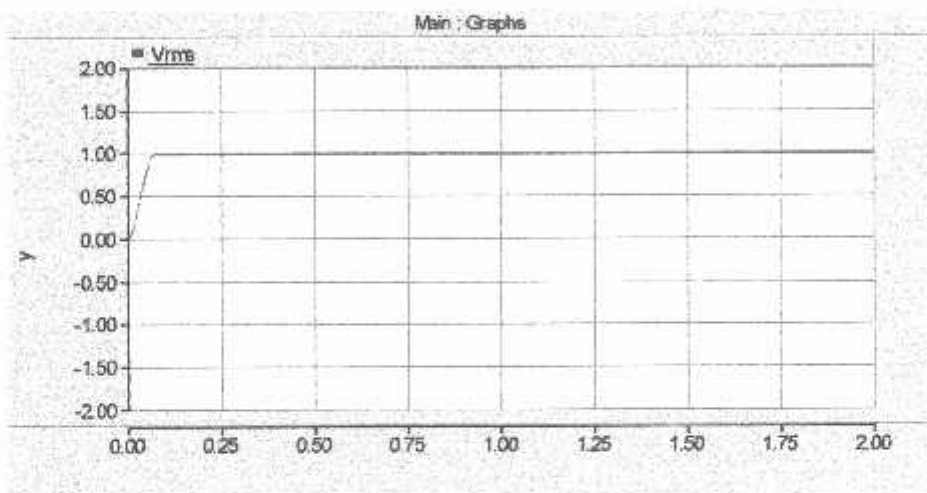
#### 4.3. Perbaikan Kualitas Tegangan *Software PSCAD/EMTDC V.4.2 Power Simulation*

*Software PSCAD/EMTDC V.4.2 Power Simulation* merupakan *graphical user interface* yang fleksibel dan *powerful*. Dengan *software* ini secara skematik kita dapat mengkonstruksi rangkaian, menjalankan simulasi, menganalisa hasil dan manajemen data dalam sebuah integrasi yang lengkap dalam hal grafis, termasuk kontrol dan alat-alat ukur. Dengan demikian permasalahan yang ada pada penyulang PIER dan solusi yang ingin diberikan dapat dilakukan dengan *software PSCAD*.

#### 4.4. Hasil dan Analisa Hasil Perbaikan Kualitas Daya Dengan Pengaturan Sistem Daya Menggunakan SSTS, D-STATCOM dan DVR

##### 4.4.1. Perbandingan Hasil Perhitungan Simulasi Sebelum dan Sesudah Kompensasi SSTS, D-STATCOM dan DVR

Pada simulasi awal, Komponen SSTS, D-STATCOM dan DVR tidak melakukan kompensasi sama sekali. SSTS sebelum memindahkan penyulang utama ke penyulang cadangan saat mengalami *voltage sag*. D-STATCOM tidak memberikan suplai daya reaktif maupun Penyerapan daya reaktif pada beberapa kondisi pengujian, DVR ini belum bekerja dan tidak memberikan tegangan injeksi ke beban. maka akan dapat diketahui perbedaan kondisi sistem sebelum dan sesudah menggunakan peralatan SSTS, D-STATCOM dan DVR.

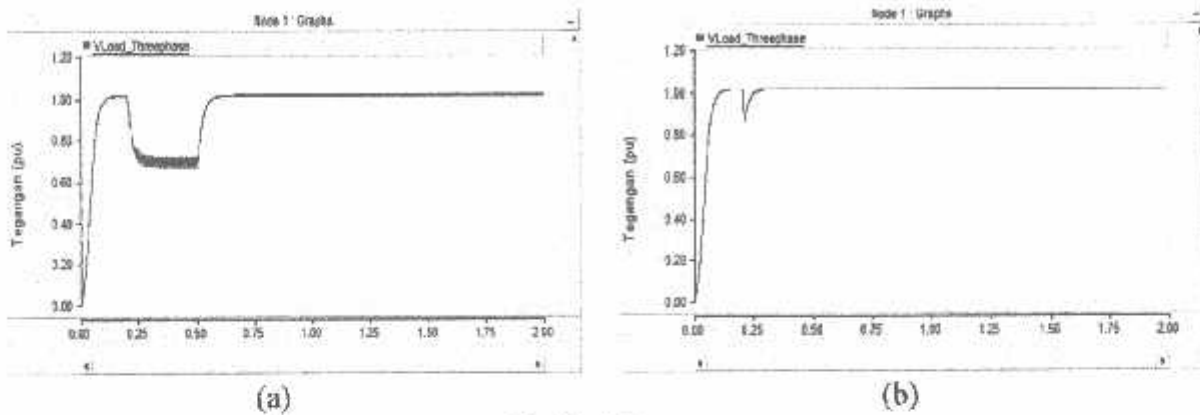


Grafik 4.1  
Bentuk Gelombang Tegangan

Untuk mengetahui kerja SSTS, D-STATCOM dan DVR maka yang dilakukan adalah mencari perbedaan nilai tegangan tiap trafo dengan simulasi yang terdiri dari kondisi saat gangguan dengan pemasangan dan tanpa pemasangan SSTS, D-STATCOM dan DVR.

#### 4.4.1.1. Sistem Saat Mengalami Gangguan *Voltage Sag*.

- a. Terjadi *Voltage Sag* Selama (200-500 ms) Saat Pemasangan dan Tanpa Pemasangan SSTS.



Grafik 4.2

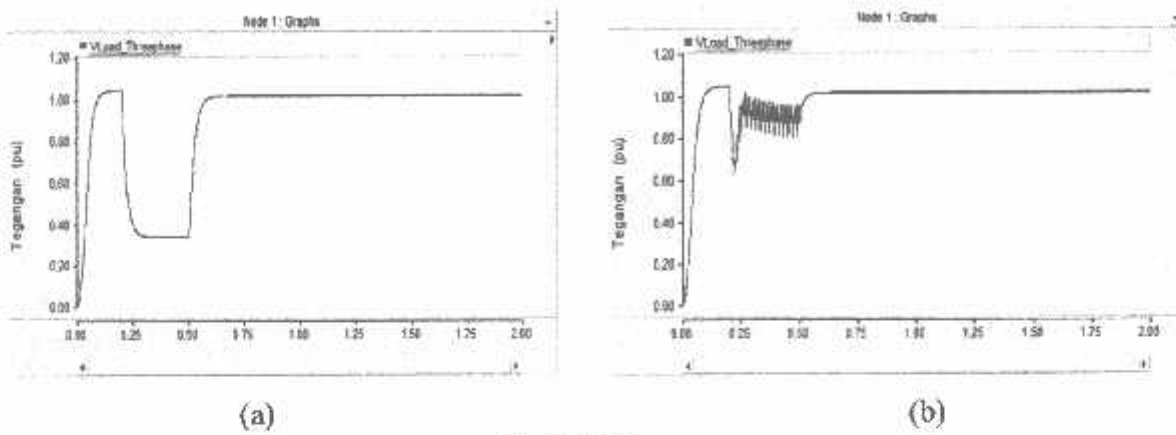
- (a) Bentuk Gelombang Tegangan Sebelum Pemasangan SSTS  
 (b) Bentuk Gelombang Tegangan Setelah Pemasangan SSTS Saat Terjadi *Voltage Sag*.

Tabel 4.4  
 Perbandingan Tegangan Saat Gangguan *Voltage Sag*  
 Dengan dan Tanpa Pemasangan SSTS

Trafo	Tanpa SSTS	Dengan SSTS	Prosentase Perbaikan (%)
	Tegangan (pu)	Tegangan (pu)	
1	0.677849899	1.013354695	33 %
2	0.691262083	1.032478148	33 %
3	0.686911216	1.027205545	33 %
4	0.683143033	1.021193449	33 %
5	0.683830131	1.022358152	33 %
6	0.682932466	1.02134744	33 %
7	0.68714282	1.028070768	33 %
8	0.683797518	1.023107646	33 %
9	0.683094332	1.022351303	33 %
10	0.68729253	1.027908777	33%
11	0.684320287	1.02424365	33 %
12	0.681391916	1.019124523	33 %
13	0,676870702	1,010385162	33 %

Pada keadaan *voltage sag* dalam selang waktu (0.2 – 0.5)s terjadi fluktuasi tegangan sehingga tegangan mengalami penurunan 0.67 pu, dengan pemasangan SSTS pada saat terjadi *voltage sag* dari selang waktu (0.2 - 0.5)s dapat ditekan menjadi (0.2-0.22)s dan tegangan dapat dinaikan kembali menjadi 1.01 pu.

b. Terjadi *Voltage Sag* Selama (200-500 ms) Saat Pemasangan dan Tanpa Pemasangan D-STATCOM.



Grafik 4.3

- (a) Bentuk Gelombang Tegangan Sebelum Pemasangan D-STATCOM  
 (b) Bentuk Gelombang Tegangan Setelah Pemasangan D-STATCOM Saat Terjadi *Voltage Sag*.

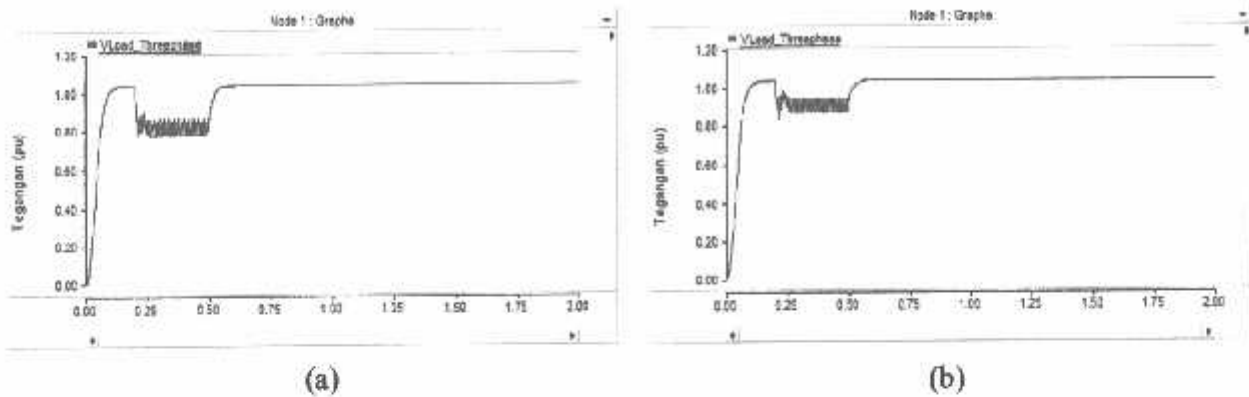
Tabel 4.5  
 Perbandingan Tegangan Saat Gangguan *Voltage Sag*  
 Dengan dan Tanpa Pemasangan D-STATCOM

Trafo	Tanpa D-STATCOM	Dengan D-STATCOM	Prosentase Perbaikan (%)
	Tegangan (pu)	Tegangan (pu)	
1	0.339993403	0.969759364	64 %
2	0.346402816	0.975858683	64 %
3	0.344618469	0.973873267	64 %
4	0.342585554	0.966620891	64 %
5	0.34297699	0.966620891	64 %
6	0.342639294	0.968451542	64 %
7	0.344901836	0.976242148	64 %
8	0.343239566	0.971330592	64 %
9	0.342987012	0.971330592	64 %
10	0.3448398	0.971702703	64%
11	0.343622578	0.973721231	64 %
12	0.341909808	0.973721231	64 %
13	0.338972506	0.953029676	64 %

Pada keadaan *voltage sag* dalam selang waktu (0.2 – 0.5) s terjadi fluktuasi tegangan sehingga tegangan mengalami penurunan 0.33 pu, dengan pemasangan D-STATCOM pada saat terjadi *voltage sag* dari selang waktu (0.2 - 0.5)s dapat ditekan menjadi (0.2-0.3)s dan tegangan dapat dinaikan kembali menjadi 0.96 pu.



c. Terjadi *Voltage Sag* Selama (200-500 ms) Saat Pemasangan dan Tanpa Pemasangan DVR



Grafik 4.4  
 (a) Bentuk Gelombang Tegangan Sebelum Pemasangan DVR  
 (b) Bentuk Gelombang Tegangan Setelah Pemasangan DVR  
 Saat Terjadi *Voltage Sag*.

Tabel 4.6  
 Perbandingan Tegangan Saat Gangguan *Voltage Sag*  
 Dengan dan Tanpa Pemasangan DVR.

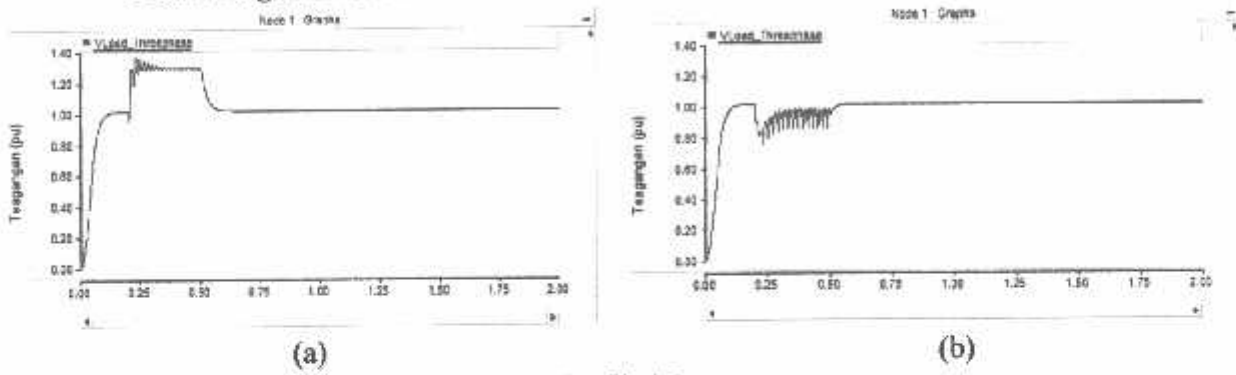
Trafo	Tanpa DVR	Dengan DVR	Persentase Perbaikan (%)
	Tegangan (pu)	Tegangan (pu)	
1	0.789458431	0.957798515	17 %
2	0.794281116	0.959727691	17 %
3	0.807353224	0.967002014	17 %
4	0.787381808	0.951995304	17 %
5	0.794584069	0.956153186	17 %
6	0.797008408	0.954840193	17 %
7	0.801684425	0.96481696	17 %
8	0.793827502	0.95563823	17 %
9	0.800637552	0.961398319	17 %
10	0.797405404	0.955469269	17 %
11	0.795959158	0.959281331	17 %
12	0.78958229	0.955958216	17 %
13	0.775992854	0.957773111	17 %

Pada keadaan *voltage sag* dalam selang waktu (0.2 – 0.5) s terjadi fluktuasi tegangan sehingga tegangan mengalami penurunan 0.78 pu, dengan pemasangan DVR pada saat terjadi *voltage sag* dari selang waktu (0.2 - 0.5)s dapat ditekan menjadi (0.2-0.3)s dan tegangan dapat dinaikan kembali menjadi 0.95 pu.

#### 4.4.1.2. Sistem Saat Mengalami Gangguan *Voltage Swell*

Untuk keadaan *voltage swell* di sini SSTS tidak dapat berfungsi atau tidak dapat mendeteksi terjadinya gangguan *voltage swell* untuk di perbaiki oleh SSTS, maka dalam perbandingan atau perbaikan *voltage swell* hanya memakai D-STATCOM dan DVR.

##### a. Terjadi *Voltage Swell* Selama (200-500 ms) Saat Pemasangan dan Tanpa Pemasangan D-STATCOM



Grafik 4.5

- (a) Bentuk Gelombang Tegangan Sebelum Pemasangan D-STATCOM  
 (b) Bentuk Gelombang Tegangan Setelah Pemasangan D-STATCOM  
 Saat Terjadi *Voltage Swell*.

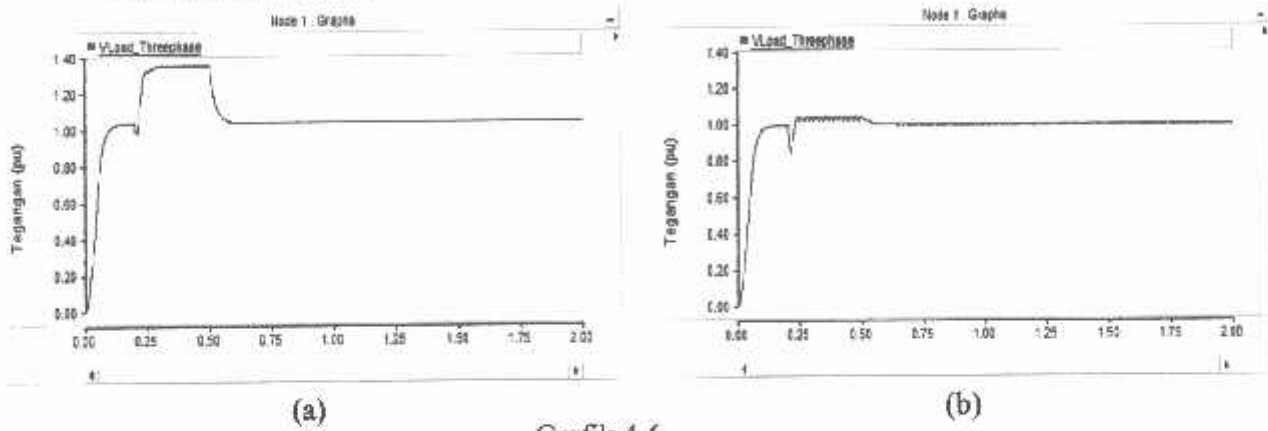
Tabel 4.7

Perbandingan Tegangan Saat Gangguan *Voltage Swell*  
 Dengan dan Tanpa Pemasangan D-STATCOM

Trafo	Tanpa D-STATCOM	Dengan D-STATCOM	Persentase Perbaikan (%)
	Tegangan (pu)	Tegangan (pu)	
1	1.314931426	0.968013993	35 %
2	1.339615657	0.981320918	36 %
3	1.332951468	0.982812202	36 %
4	1.32508683	0.974665174	35 %
5	1.326619881	0.976627625	35 %
6	1.325355971	0.977566115	35 %
7	1.325355971	0.98637272	34 %
8	1.327691895	0.98637272	34 %
9	1.326745165	0.983091087	34 %
10	1.333877565	0.98406545	36 %
11	1.329212159	0.985277873	34 %
12	1.322477758	0.976021892	35 %
13	1.310834948	0.957061294	35 %

Pada keadaan *voltage swell* dalam selang waktu (0.2 – 0.5)s terjadi fluktuasi tegangan sehingga tegangan mengalami kenaikan 1.31 pu, dengan pemasangan D-STATCOM pada saat terjadi *voltage swell* dari selang waktu (0.2 - 0.5)s dapat ditekan menjadi (0.2-0.3)s dan tegangan dapat diturunkan kembali menjadi 0.96 pu.

**b. Terjadi *Voltage Swell* Selama (200-500 ms) Saat Pemasangan dan Tanpa Pemasangan DVR.**



Grafik 4.6  
 (a) Bentuk Gelombang Tegangan Sebelum Pemasangan DVR  
 (b) Bentuk Gelombang Tegangan Setelah Pemasangan DVR Saat Terjadi *Voltage Swell*.

Tabel 4.8  
 Perbandingan Tegangan Saat Gangguan *Voltage Swell* Dengan dan Tanpa Pemasangan DVR.

Trafo	Tanpa DVR	Dengan DVR	Persentase Perbaikan (%)
	Tegangan (pu)	Tegangan (pu)	
1	1.348300062	1.011086732	33 %
2	1.373936042	1.029403384	33 %
3	1.367261382	1.024556953	33 %
4	1.365614162	1.018300563	33 %
5	1.355286597	1.018494203	33 %
6	1.339074122	1.021115029	33 %
7	1.368900199	1.024969091	33 %
8	1.367828972	1.025944471	33 %
9	1.361999392	1.019257564	33 %
10	1.367324911	1.028152607	33 %
11	1.363002873	1.021369711	33 %
12	1.352825974	1.017775692	33 %
13	1.353252029	1.028007674	33 %

Pada keadaan *voltage swell* dalam selang waktu (0.2 – 0.5)s terjadi fluktuasi tegangan sehingga tegangan mengalami kenaikan 1.34 pu, dengan pemasangan DVR pada saat terjadi *voltage swell* dari selang waktu (0.2 - 0.5)s dapat ditekan menjadi (0.2-0.3)s dan tegangan dapat diturunkan kembali menjadi 1.01 pu.

Keadaan sistem jauh lebih stabil dengan pemasangan SSTS, D-STATCOM dan DVR dibandingkan tanpa menggunakan SSTS, D-STATCOM dan DVR. Hal ini dapat diamati oleh simulasi sistem pada kondisi *voltage sag* dan *voltage swell*. Perbedaan ini dapat di amati pada grafik 4.2 sampai 4.6, tegangan saat terjadi gangguan mengalami perbaikan pada saat menggunakan kompensasi SSTS, D-STATCOM dan DVR.

#### 4.4.1.3. Hasil Perhitungan Sebelum dan Setelah Pemasangan SSTS, D-STATCOM dan DVR

Rumusannya adalah sebagai berikut :

Saat Terjadi *Voltage Sag*:

Dengan SSTS

- Optimasi Perbaikan Kualitas Tegangan Pada Kondisi *Voltage Sag*:

$$\begin{aligned} V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withSSTS}} - V_{\text{withoutSSTS}} \\ &= 1.0134 \text{ (pu)} - 0.6778 \text{ (pu)} \\ &= 0.3356 \text{ (pu) atau } 127.528 \text{ Volt.} \end{aligned}$$

Dengan D-STATCOM

- Optimasi Perbaikan Kualitas Tegangan Pada Kondisi *Voltage Sag* :

$$\begin{aligned} V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withSTATCOM}} - V_{\text{withoutSTATCOM}} \\ &= 0.9697 \text{ (pu)} - 0.3399 \text{ (pu)} \\ &= 0.6298 \text{ (pu) atau } 239.324 \text{ Volt.} \end{aligned}$$

Dengan DVR

- Optimasi Perbaikan Kualitas Tegangan Pada Kondisi *Voltage Sag* :

$$\begin{aligned} V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withDVR}} - V_{\text{withoutDVR}} \\ &= 0.9577 \text{ (pu)} - 0.7894 \text{ (pu)} \\ &= 0.1683 \text{ (pu) atau } 63.954 \text{ Volt.} \end{aligned}$$

Saat terjadi *Voltage Swell* :

Dengan D-STATCOM

- Optimasi Perbaikan Kualitas Tegangan Pada Kondisi *Voltage Swell* :

$$\begin{aligned} V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withSTATCOM}} - V_{\text{withoutSTATCOM}} \\ &= 0.9680 \text{ (pu)} - 1.3149 \text{ (pu)} \\ &= 0.3469 \text{ (pu) atau } 131.822 \text{ Volt.} \end{aligned}$$

Dengan DVR

- Optimasi Perbaikan Kualitas Tegangan Pada Kondisi *Voltage Swell* :

$$\begin{aligned} V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withDVR}} - V_{\text{withoutDVR}} \\ &= 1.0110 \text{ (pu)} - 1.3483 \text{ (pu)} \\ &= 0.3373 \text{ (pu) atau } 128.174 \text{ Volt.} \end{aligned}$$

Pada saat mengalami gangguan *voltage sag* dan *voltage swell* yang disimulasikan di atas, maka SSTS (*Solid-State Transfer Switch*), D-STATCOM (*Distribution Static Compensator*) dan DVR (*Dynamic Voltage Restorer*) dapat menunjukkan kompensasi yang lebih baik dalam mempertahankan kualitas tegangan pada sistem.

- Dilihat dari tegangan pada Trafo 1, saat kondisi *voltage Sag* :

Dengan pemasangan SSTS, mengalami perbaikan sebesar 0.3356 (pu) atau 127.528 Volt dari 0.6778 (pu) atau 257.564 Volt menjadi 1.0134 (pu) atau 385.092 Volt tegangan mengalami perbaikan 33%. Pada trafo yang lain dapat di lihat pada tabel 4.4.

Dengan pemasangan D-STATCOM, tegangan mengalami perbaikan sebesar 0.6199 (pu) atau 235.562 Volt dari 0.3399 (pu) atau 129.162 Volt menjadi 0.9598 (pu) atau 364.724 Volt tegangan mengalami perbaikan 64%. Pada trafo yang lain dapat dilihat pada tabel 4.5.

Dengan pemasangan DVR, tegangan mengalami perbaikan sebesar 0.1683 (pu) atau 63.954 Volt dari 0.7894 (pu) atau 299.972 Volt menjadi 0.9577 (pu) atau 363.926 Volt tegangan mengalami perbaikan 17%. Pada trafo yang lain dapat dilihat pada tabel 4.6.

- Dilihat dari tegangan pada trafo 1, Saat kondisi *voltage Swell* :

Dengan pemasangan D-STATCOM, tegangan pada trafo 1 mengalami perbaikan sebesar 0.3469 (pu) atau 131.822 Volt dari 1.3149 (pu) atau 499.662 Volt menjadi 0.9680 (pu) atau 367.84 Volt tegangan mengalami perbaikan 35%. Pada node yang lain dapat dilihat pada tabel 4.7.

Dengan pemasangan DVR, tegangan mengalami perbaikan sebesar 0.3373 (pu) atau 128.174 Volt dari 1.3483 (pu) atau 512.354 Volt menjadi 1.0110 (pu) atau 380.38 Volt tegangan mengalami perbaikan 33%. Pada trafo yang lain dapat dilihat pada tabel 4.6.

---

## BAB V PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Dari Hasil Analisa pemasangan SSTS (*Solid-State Transfer Switch*), D-STATCOM (*Distribution Static Compensator*) dan DVR (*Dynamic Voltage Restorer*) ketiganya mampu mempertahankan kualitas tegangan pada sistem distribusi PIER-Bangil dapat di simpulkan sebagai berikut :

- 1) D-STATCOM dan DVR mampu menjaga besarnya tegangan konstan pada titik dimana beban mengalami gangguan *voltage sag* dan *voltage swell* dikarenakan D-STATCOM dan DVR dapat menghasilkan atau menyerap daya reaktif yang diinginkan, kecepatan perbaikannya dari saat terjadi gangguan pada waktu (0.2-0.5)s dapat ditekan menjadi (0.2-0.3)s.
- 2) Sedangkan SSTS dapat menjadi perangkat yang lebih baik untuk mengatasi permasalahan *voltage sag* dengan teknik pemindahan titik beban yang mengalami beban kritis ke beban yang tidak mengalami gangguan dengan membutuhkan penyulang alternatif yang tersedia, karena SSTS dapat menjamin pasokan listrik terus menerus berkualitas tinggi dengan mentransfer dalam skala waktu milidetik dari saat terjadi gangguan pada waktu (0.2-0.5)s dapat ditekan menjadi (0.2-0.22)s. Tetapi perlu di catat SSTS tidak dapat mengatur tegangan juga tidak dapat menghasilkan atau menyerap daya reaktif, fungsinya hanya untuk menonaktifkan salah satu penyulang yang mengalami gangguan ke penyulang yang lebih sehat. Dapat diketahui dari kecepatan perbaikan ketiga pemasangan di atas SSTS lah yang paling memungkinkan untuk di pasang pada penyulang PIER-Bangil.

### 5.2.Saran

Untuk menganalisis *voltage Sag* dan *voltage Swell*, jika memungkinkan sebaiknya dapat diperoleh data lapangan yang mencatat waktu terjadinya *voltage Sag* dan *voltage Swell* agar dapat diketahui karakteristik beban yang dipakai konsumen dengan melihat jatuh dan kenaikan tegangan yang tercatat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anaya Lara, Olimpo, and Acha, E.2002. *Modeling and Analysis of Custom Power Systems*. by PSCAD/EMTDC, IEEE, *Trans. on Power Delivery*.17 (1): 265-272.
- Basri, Hasan,. 1997. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta : ISTN.
- Binti Saudin, Norshafinash,. 2007. "*Voltage Sags Mitigation Techniques Analysis*"  
**Universitas Teknologi Malaysia**.
- Cabang Bangil, PT. PLN (PERSERO) "*Data Unit Pelayanan Jaringan Distribusi Bangil*,  
agustus 2010.
- Marsudi,Djiteng,. 1990. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Balai Penerbit Dan Humas ISTN.
- Soeprapto,. 2004. *Diktat Kuliah Elektronika Daya*. Universitas Brawijaya.
- Stevenson, William D, Jr,. 1996. *Analisis Sistem Tenaga Elektrik*. Penerbit Erlangga edisi  
keempat, Jakarta.
- Sukmawidjaja, Maula,. Februari 2008. "*Perhitungan Profil Tegangan Pada Sistem  
Distribusi Menggunakan Matrix admitansi dan matrix Impedansi bus*".  
**Universitas Trisakti Vol 7 No. 2**.



# LAMPIRAN

---

# Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD/EMTDC

Olimpo Anaya-Lara and E. Acha

**Abstract**—This paper addresses the timely issue of modeling and analysis of custom power controllers, a new generation power electronics-based equipment aimed at enhancing the reliability and quality of power flows in low-voltage distribution networks [2], [3]. The modeling approach adopted in the paper is graphical in nature, as opposed to mathematical models embedded code using a high-level computer language. The well-developed graphic facilities available in an industry standard power system package, namely PSCAD/EMTDC, are used to conduct all aspects of model implementation and to carry out extensive simulation studies. Graphics-based models suitable for electromagnetic transient studies are presented for the following three custom power controllers: the distribution static compensator (D-STATCOM), the dynamic voltage restorer (DVR), and the solid-state transfer switch (SSTS). Comprehensive results are presented to assess the performance of each device as a potential custom power solution. The paper is written in a tutorial style and aimed at the large PSCAD/EMTDC user base.

**Index Terms**—Custom power, distribution static compensator (STATCOM), dynamic voltage restorer (DVR), PWM, solid-state transfer switch (SSTS), voltage source converter.

## I. INTRODUCTION

THE last decade has seen a marked increase on the deployment of end-user equipment that is highly sensitive to poor quality control electricity supply. Several large industrial users are reported to have experienced large financial losses as a result of even minor lapses in the quality of electricity supply [2], [3], [8]. A great many efforts have been made to remedy the situation, where solutions based on the use of the latest power electronic technology figure prominently. Indeed, custom power technology, the low-voltage counterpart of the more widely known flexible ac transmission system (FACTS) technology, aimed at high-voltage power transmission applications, has emerged as a credible solution to solve many of the problems relating to continuity of supply at the end-user level. In the FACTS and custom power concepts are directly credited to EPRI [1], [2].

At present, a wide range of very flexible controllers, which utilize on newly available power electronics components, are emerging for custom power applications. Among these, the distribution static compensator (D-STATCOM) and the dynamic voltage restorer (DVR), both of them based on the VSC prin-

ciple [6], and the SSTS are the controllers which have received the most attention. PSCAD/EMTDC [4], [5] has been used in this paper to perform the modeling and analysis of such controllers for a wide range of operating conditions.

PSCAD/EMTDC's highly developed graphical interface has proved instrumental in implementing the graphics-based PWM control reported in this paper for the D-STATCOM and DVR. It relies only on voltage measurements for its operation, i.e., it does not require reactive power measurements [7]. A sensitivity analysis is carried out to determine the impact of the dc capacitor size on D-STATCOM performance. In the case of the DVR, a constant dc source is assumed to provide the dc voltage; therefore, this analysis is not considered. With respect to the SSTS, the control scheme is implemented based on the detection of a fault condition developing in the energy supply system.

## II. PSCAD/EMTDC SIMULATION TOOL

PSCAD/EMTDC is an industry standard simulation tool for studying the transient behavior of electrical networks. Its graphical user interface enables all aspects of the simulation to be conducted within a single integrated environment including circuit assembly, run-time control, analysis of results, and reporting. Its comprehensive library of models supports most ac and dc of power plant components and controls, in such a way that FACTS, custom power, and HVDC systems can be modeled with speed and precision. It provides a powerful resource for assessing the impact of new power technologies in the power network.

Simplicity of use is one of the outstanding features of PSCAD/EMTDC. Its great many modeling capabilities and highly complex algorithms and methods are transparent to the user, leaving him free to concentrate his efforts on the analysis of results rather than on mathematical modeling. For the purpose of system assembling, the user can either use the large base of built-in components available in PSCAD/EMTDC or to its own user-defined models. Indeed, the thrust of this paper is to share with the large PSCAD/EMTDC user community our user-defined models for custom power applications, which are not yet available as standard models within PSCAD/EMTDC. In this respect, one of the aims of the paper is to act as a tutorial in the subject of custom power modeling using PSCAD/EMTDC. For newcomers to the use of PSCAD/EMTDC, it is recommended that the very useful, generic examples available in [4] be well-understood and then the custom power circuits presented in the paper attempted.

To show the effectiveness and simplicity of the proposed models, the ac network modeling capabilities of PSCAD/EMTDC are simplified as much as practicable, such that

Manuscript received February 14, 2001; revised July 13, 2001. O. Anaya-Lara supported by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, while doing Ph.D. studies at the University of Glasgow, Glasgow, U.K.

The authors are with the Centre for Economic Renewable Power Delivery (EPD), Department of Electronics and Electrical Engineering, The University of Glasgow, Glasgow, G12 8QQ, U.K.

Publisher Item Identifier S 0885-8977(02)00593-9.

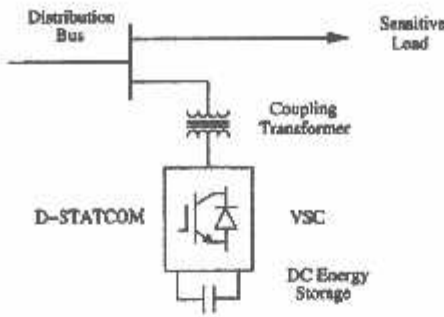


Fig. 1. Schematic representation of the D-STATCOM as a custom power controller.

standard features such as synchronous generator, transformer saturation, and frequency-dependent transmission line and cable models are not used in our test circuits.

### III. VSC-BASED CONTROLLERS

This section presents an overview of the VSC-based custom power controllers addressed in the paper.

#### D-STATCOM

In its most basic form, the D-STATCOM configuration consists of a two-level VSC, a dc energy storage device, a coupling transformer connected in shunt with the ac system, and associated control circuits [7]–[10]. More sophisticated configurations use multipulse and/or multilevel configurations [11], [12]. Fig. 1 shows the schematic representation of the D-STATCOM. The VSC converts the dc voltage across the storage device into that of three-phase ac output voltages. These voltages are in phase and coupled with the ac system through the reactance of the coupling transformer. Suitable adjustment of the phase and magnitude of the D-STATCOM output voltages allows effective control of active and reactive power exchanges between the D-STATCOM and the ac system.

The VSC connected in shunt with the ac system provides a bifunctional topology which can be used for up to three quite distinct purposes [13], [19]:

- ) voltage regulation and compensation of reactive power;
- ) correction of power factor;
- ) elimination of current harmonics.

The design approach of the control system determines the priorities and functions developed in each case. In this paper, the D-STATCOM is used to regulate voltage at the point of connection. The control is based on sinusoidal PWM and only requires the measurement of the rms voltage at the load point as explained in Section IV.

#### Dynamic Voltage Restorer

The DVR is a powerful controller that is commonly used for voltage sags mitigation at the point of connection [14]–[16]. The DVR employs the same blocks as the D-STATCOM, but in this application the coupling transformer is connected in series with the ac system, as illustrated in Fig. 2.

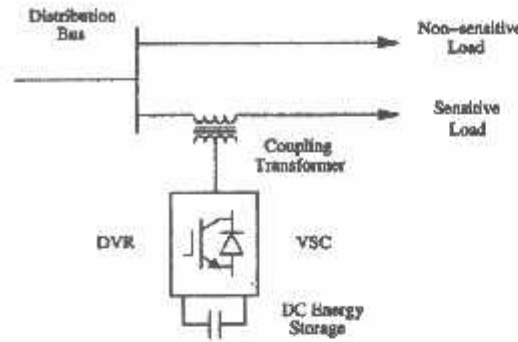


Fig. 2. Schematic representation of the DVR for a typical custom power application.

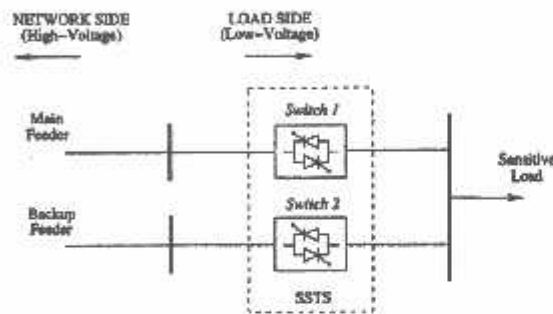


Fig. 3. Schematic representation of the SSTS as a custom power device.

The VSC generates a three-phase ac output voltage which is controllable in phase and magnitude. These voltages are injected into the ac distribution system in order to maintain the load voltage at the desired voltage reference. The main features of the DVR control scheme implemented in this paper are explained in Section IV.

### IV. SOLID-STATE TRANSFER SWITCH

The SSTS can be used very effectively to protect sensitive loads against voltage sags, swells and other electrical disturbances [17], [18]. The SSTS ensures continuous high-quality power supply to sensitive loads by transferring, within a time scale of milliseconds, the load from a faulted bus to a healthy one. The basic configuration of this device consists of two three-phase solid-state switches, one for the main feeder and one for the backup feeder. These switches have an arrangement of back-to-back connected thyristors, as illustrated in the schematic diagram of Fig. 3.

Each time a fault condition is detected in the main feeder, the control system swaps the firing signals to the thyristors in both switches, i.e., *Switch 1* in the main feeder is deactivated and *Switch 2* in the backup feeder is activated. The control system measures the peak value of the voltage waveform at every half-cycle and checks whether or not it is within a prespecified range. If it is outside limits, an abnormal condition is detected and the firing signals to the thyristors are changed to transfer the load to the healthy feeder.

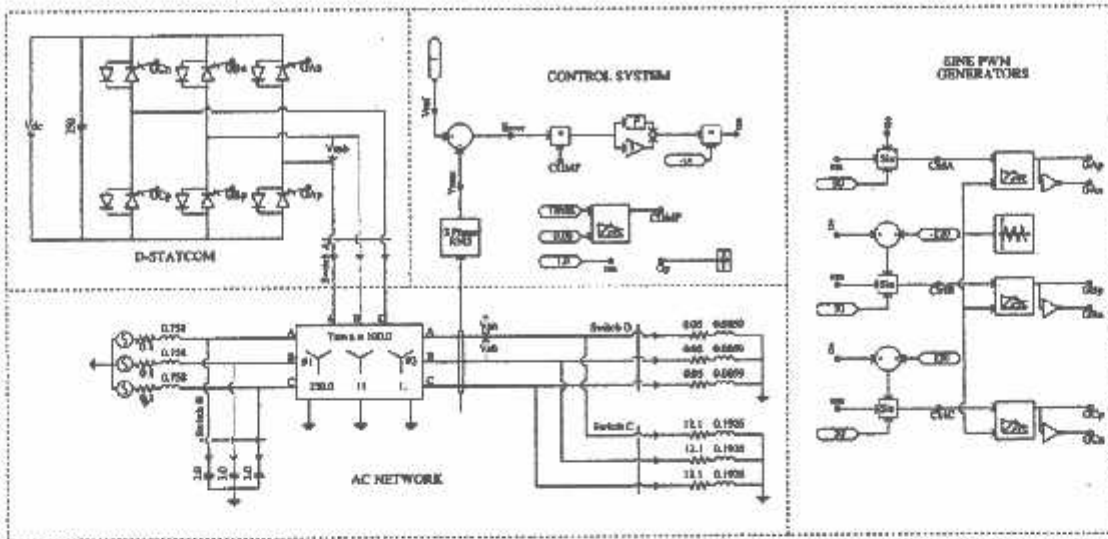


Fig. 4. Control scheme and test system implemented in PSCAD/EMTDC to carry out the D-STATCOM simulations.

## V. SINUSOIDAL PWM-BASED CONTROL

This section describes the PWM-based control scheme with reference to the D-STATCOM. The control scheme for the DVR follows the same principle. The aim of the control scheme is to maintain constant voltage magnitude at the point where a sensitive load is connected, under system disturbances. The control system only measures the rms voltage at the load point [7], i.e., reactive power measurements are not required [9]. The VSC switching strategy is based on a sinusoidal PWM technique which offers simplicity and good response. Since custom power is a relatively low-power application, PWM methods offer a more flexible option than the fundamental frequency switching (FS) methods favored in FACTS applications. Besides, high switching frequencies can be used to improve on the efficiency of the converter, without incurring significant switching losses.

Fig. 4 shows the test system and D-STATCOM controller implemented in PSCAD/EMTDC. The D-STATCOM control system exerts voltage angle control as follows: an error signal is obtained by comparing the reference voltage with the rms voltage measured at the load point. The PI controller processes the error signal and generates the required angle  $\delta$  to drive the error to zero, i.e., the load rms voltage is brought back to reference voltage. In the PWM generators, the sinusoidal reference signal  $v_{control}$  is phase-modulated by means of the angle  $\delta$ . The modulated signal  $v_{control}$  is compared against a triangular carrier in order to generate the switching signals for VSC valves.

The main parameters of the sinusoidal PWM scheme are the amplitude modulation index  $m_a$  of signal  $v_{control}$ , and the frequency modulation index  $m_f$  of the triangular signal. The amplitude index  $m_a$  is kept fixed at 1 pu, in order to obtain the best fundamental voltage component at the controller output [20]. The switching frequency  $m_f$  is set at 450 Hz,  $m_f = 1$  should be noted that, in this paper, balanced network and steady-state conditions are assumed. The modulating angle  $\delta$  is applied to the PWM generators in phase A. The angles for phases

B and C are shifted by  $240^\circ$  and  $120^\circ$ , respectively. It can be seen in Fig. 4 that the control implementation is kept very simple by using only voltage measurements as the feedback variable in the control scheme. The speed of response and robustness of the control scheme are clearly shown in the simulation results.

## VI. TEST CASES

This section is divided into three parts. Simulations relating to the D-STATCOM are presented first. This is followed by simulations carried out for the DVR and then for the SSTS. Comprehensive results are presented to assess the performance of each device as a Custom Power solution.

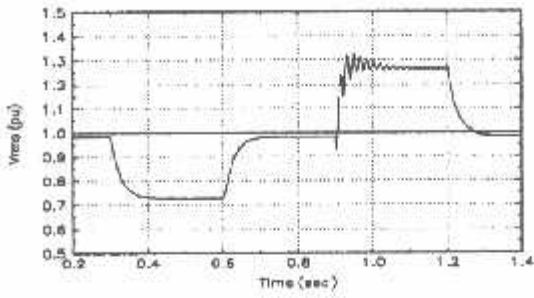
### A. D-STATCOM Simulations and Results

Fig. 4 shows the test system implemented in PSCAD/EMTDC to carry out simulations for the D-STATCOM. The test system comprises a 230 kV transmission system, represented by a Thévenin equivalent, feeding into the primary side of a 3-winding transformer. A varying load is connected to the 11 kV, secondary side of the transformer. A two-level D-STATCOM is connected to the 11 kV tertiary winding to provide instantaneous voltage support at the load point. A 750  $\mu$ F capacitor on the dc side provides the D-STATCOM energy storage capabilities.

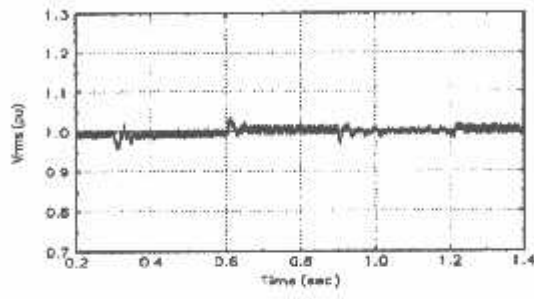
The set of switches shown in Fig. 4 were used to assist different loading scenarios being simulated with ease. To show the effectiveness of this controller in providing continuous voltage regulation, simulations were carried out with and without D-STATCOM connected to the system.

A set of simulations was carried out for the test system shown in Fig. 4. The simulations relate to three main operating conditions.

- 1) In the simulation period 300–600 ms, the load is increased by closing *Switch D*. In this case, the voltage drops by almost 27% with respect to the reference value.



(a)



(b)

5. Voltage  $V_{rms}$  at the load point: (a) with no D-STATCOM and (b) with D-STATCOM; capacitor size:  $750 \mu\text{F}$ .

- 2) At 600 ms, the switch  $D$  is opened and remains so throughout the rest of the simulation. The load voltage is very close to the reference value, i.e., 1 pu.
- 3) In the simulation period 900–1200 ms, Switch  $B$  is closed, connecting a capacitor bank to the high voltage side of the network. The rms voltage increases 27% with respect to the reference voltage.

Fig. 5(a) shows the rms voltage at the load point for the case when the system operates with no D-STATCOM. Similarly, a new set of simulations was carried out but now with the D-STATCOM connected to the system. The results are shown in Fig. 5(b), where the very effective voltage regulation provided by the D-STATCOM can be clearly appreciated. When Switch  $D$  closes, the D-STATCOM supplies reactive power to the system, and when Switch  $D$  opens and Switch  $B$  closes, D-STATCOM absorbs reactive power in order to get the voltage back to reference. In spite of sudden load variations, the regulated rms voltage shows a reasonably smooth profile, where the transient overshoots are almost nonexistent. The magnitude of these transients is kept within  $\pm 5\%$  with respect to the reference voltage. In fact, they do not last for more than a few cycles.

**1) Capacitor Sizing Based on Simulations:** In order to gain insight into the influence that capacitor size has on D-STATCOM performance, several simulations were carried out in PSCAD/EMTDC using the same test system and operating conditions as those used in the previous section. Extensive simulations were carried out to identify the most suitable capacitor size, aiming at minimizing waveform distortion and keeping transient overshooting at minimum values. It could be noted that no filters have been included in the test circuit in order to gain a better understanding of the role that capacitor size plays on harmonic distortion generation.

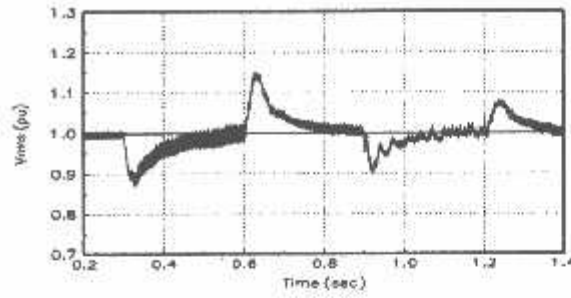


Fig. 6. Voltage  $V_{rms}$  at the load point with D-STATCOM; capacitor size:  $75 \mu\text{F}$ .

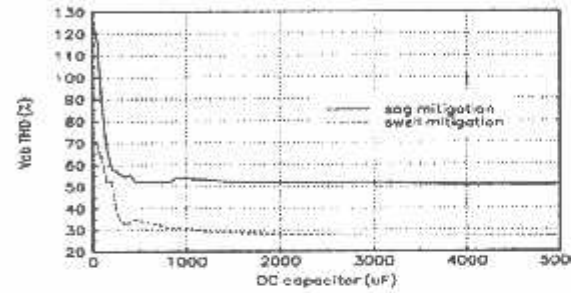


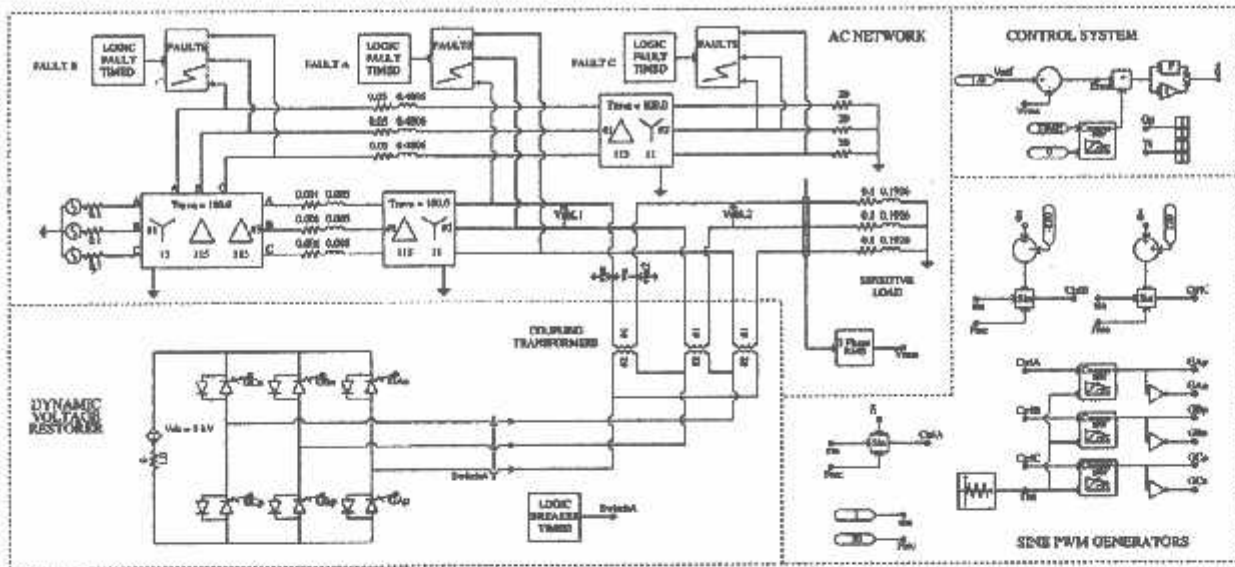
Fig. 7. Influence of capacitor size on D-STATCOM harmonic generation.

By way of example, Fig. 5(b) shows the regulated rms voltage corresponding to a  $750 \mu\text{F}$  capacitor, where a rapid regulation response is obtained and transient overshoots are almost nonexistent. This contrasts with cases where the capacitor is undersized. For instance, Fig. 6 shows the rms voltage for the case when a  $75 \mu\text{F}$  capacitor is employed.

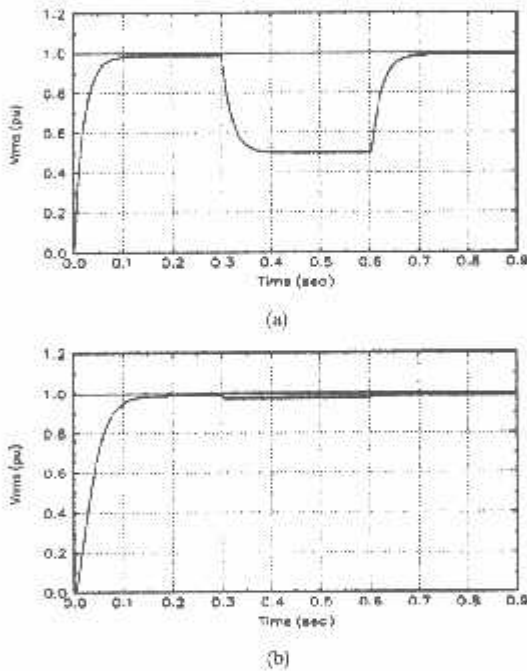
A sluggish response and large transient overshoots are observed, together with high harmonic distortion and unrealistic voltage ripple in the dc capacitor. In order to characterize further the impact of capacitor size on harmonic generation, extensive simulation results were performed to aid these investigations. Fig. 7 presents a summary of results where capacitor sizes ranging from 5 to  $5000 \mu\text{F}$ , with  $25 \mu\text{F}$  step sizes, were employed. It has been observed that the D-STATCOM exhibits a very different harmonic generation behavior when it acts as a source of reactive power than when it draws reactive power from the ac system. Hence, two plots are shown in Fig. 7, where a consistently lower voltage total harmonic distortion (VTHD) is present when the D-STATCOM draws reactive power from the ac system (swell mitigation). It can be observed from this figure that there is a point when further increases in capacitor size do not yield any further VTHD reductions.

**B. DVR Simulations and Results**

Fig. 8 shows the test system used to carry out the various DVR simulations presented in this section. The DVR coupling transformer is connected in delta in the DVR side, with a leakage reactance of 10%. A unity transformer turns ratio was used, i.e., no booster capabilities exist. The capacity of the dc storage device is 5 kV. Two simulations are carried out as follows.



8. Control scheme and test system implemented in PSCAD/EMTDC to carry out the DVR simulations.



9. Voltage  $V_{rms}$  at the sensitive load point: (a) with no DVR and (b) with the DVR in operation.

- 1) The first simulation contains no DVR and a three-phase short-circuit fault is applied at point A, via a fault resistance of  $0.66 \Omega$ , during the period 300–600 ms. The voltage sag at the load point is 50% with respect to the reference voltage.
- 2) The second simulation is carried out using the same scenario as above but now with the DVR in operation. The total simulation period is 900 ms. Using the facilities available in PSCAD/EMTDC, the DVR is simulated to be in operation only for the duration of the fault, as it is expected to be

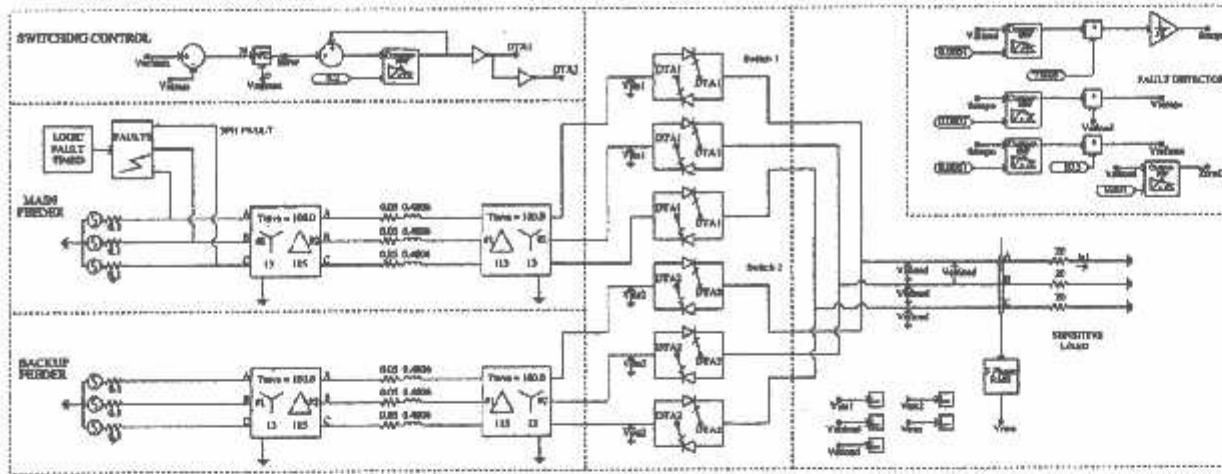
the case in a practical situation. The results for both simulations are shown in Fig. 9. When the DVR is in operation the voltage sag is mitigated almost completely, and the rms voltage at the sensitive load point is maintained at 98%, as shown in Fig. 9(b).

The PWM control scheme controls the magnitude and the phase of the injected voltages, restoring the rms voltage very effectively. The sag mitigation is performed with a smooth, stable, and rapid DVR response; no transient overshoots are observed when the DVR comes in and out of operation. It should be noted that in the DVR, the dc voltage is supplied by a dc source as opposed to the dc capacitor used in the D-STATCOM. Several simulations were carried out to assess the performance of the DVR as a function of short-circuit proximity. Three-phase faults via fault resistances were applied at the A, B, and C points shown in the test system of Fig. 8. As expected, the DVR required a higher rating of dc storage device to provide appropriate levels of sag mitigation when the fault was applied in point A. This is due to the short electrical distance between the point in fault and the DVR coupling transformer. Clearly, the controller must be designed to satisfy the most stringent case, i.e., the voltage sag is generated by a fault occurring quite close to the sensitive load.

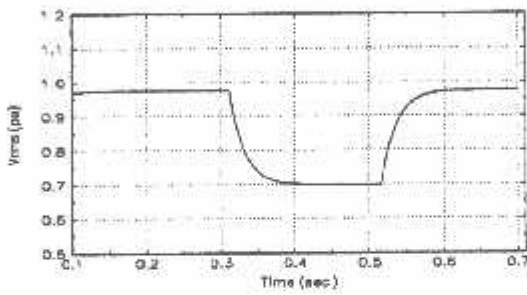
### C. SSTS Simulations and Results

Fig. 10 shows the test system used to carry out the SSTS simulations. The system comprises two identical feeders feeding into a 13 kV-busbar. A sensitive load is connected to the busbar. The following simulations were carried out to assess the effectiveness of the simple control scheme proposed in this paper for the SSTS:

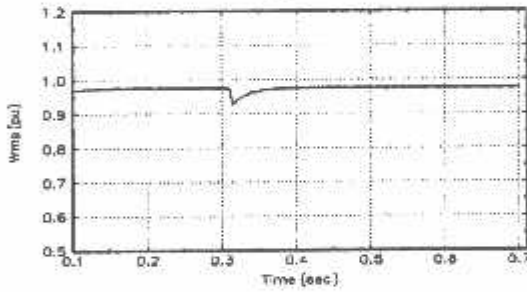
- 1) In the first experiment the SSTS is disconnected and a three-phase fault is applied at the main feeder at a time 310 ms, with a fault duration of 200 ms. The magnitude of the voltage sag due to the fault is 30%, as seen from the rms voltage shown in Fig. 11(a);



10. Control scheme and test system implemented in PSCAD/EMTDC to carry out the SSTS simulations.



(a)



(b)

11. Voltage  $V_{rms}$  at the load point: (a) with no SSTS and (b) with the S connected.

a second experiment was carried out using a similar scenario as above but now with the SSTS in operation. The rms voltage at the load point is shown in Fig. 11(b). The total period of simulation is 700 ms. In the simulations entered here, the control system monitors the maximum and minimum values of the voltage waveform at the load point every cycle. Whenever a faulted condition in the electrical supply is detected, the triggering signals to both three-phase switches are reversed. Fig. 11(b) shows that after the disturbance has occurred the rms voltage at the load point is driven back to the pre-value very rapidly. It should be noted that the SSTS does not regulate voltage neither generate/absorb reactive power, its function is to deactivate a faulty feeder in favor of a healthy

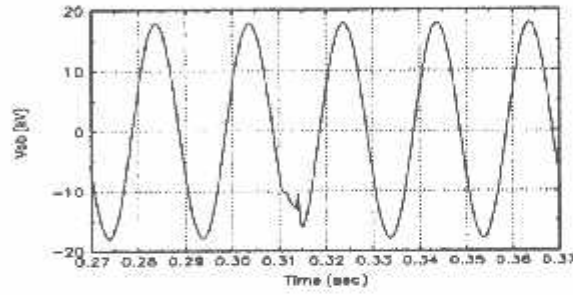


Fig. 12. Waveform of the voltage  $V_{ab}$  at the load point when the SSTS is in operation.

one. The waveform of the voltage  $V_{ab}$  at the load point is shown in Fig. 12.

It can be seen that when the faulted condition is registered, it only takes a fraction of a cycle (less than 4 ms at 50 Hz fundamental frequency) for the SSTS to perform the transfer of load to the backup feeder, and restore the voltage to the pre-fault condition. Arguably, there is always a load transfer delay associated with SSTS applications which is a function of the fault detection technique used. In our case, the health of the voltage waveform is checked at every peak and trough, with respect to a reference voltage value, e.g., 90% of rated value. In alternative schemes reported in the open literature, the delay incurred is higher than 1/4 of a cycle owing to the need to perform a Fourier analysis of the voltage waveform [18]. In our SSTS scheme, if a more stringent load transfer criteria is required then the sampling period can be reduced with ease. The technique does not require complicated software implementations. Monitoring the voltage at peak values reduces the possibility of the control scheme being adversely affected by the presence of strong harmonic distortion.

VII. CONCLUSIONS

This paper has presented electromagnetic transient models of custom power equipment, namely D-STATCOM, DVR,

STATCOMs, and applied them to the study of power quality. The highly developed graphic facilities available in PSCAD/EMTDC were used to conduct all aspects of model implementation and to carry out extensive simulation studies. A new PWM-based control scheme has been implemented to control the electronic valves in the two-level VSC used in the STATCOM and DVR. As opposed to fundamental frequency switching schemes already available in the PSCAD/EMTDC, this PWM control scheme only requires voltage measurements. This characteristic makes it ideally suitable for low-voltage custom power applications. The control scheme was tested under a wide range of operating conditions, and it was observed to be very robust in every case. Extensive simulations were conducted to gain insight into the impact of capacitor size on STATCOM harmonic generation, speed of response of the VM control and transient overshooting. It was observed that undersized capacitor degrades all three aspects. On the other hand, an oversized capacitor may also lead to a PWM control with a sluggish response but it will reduce D-STATCOM harmonic generation and transient overshooting. It was observed that there is a point when increasing the size of capacitor does not reduce VTHD any further.

The simulations carried out showed that the DVR provides excellent voltage regulation capabilities. It was observed that capacity for power compensation and voltage regulation depends mainly on two factors: the rating of the dc storage device and the characteristics of the coupling transformer. These two factors determine the maximum value of sag mitigation that the DVR can provide. The SSTS proved to be a suitable device for protecting selected load points against faulted conditions, but it does require an alternative feeder being available. The transfer of load from a faulted feeder to a healthy one can be achieved in a short period of time. The fault detection technique used in the DVR is very simple and yet has proved to yield very effective results.

#### REFERENCES

- [1] N. Hingorani, "FACTS—Flexible ac transmission systems," in *Proc. IEEE 5th Int. Conf. AC/DC Transmission*, London, U.K., 1991, Conf. Pub. 345, pp. 1–7.
- [2] ———, "Introducing custom power," *IEEE Spectrum*, vol. 32, pp. 41–48, June 1995.
- [3] S. Nilsson, "Special application considerations for Custom Power systems," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc., Winter Meeting 1999*, vol. 2, 1999, pp. 1127–1130.
- [4] Manitoba HVDC Research Centre, "PSCAD/EMTDC: Electromagnetic transients program including dc systems," 1994.
- [5] A. M. Gole, O. B. Nayak, T. S. Sidani, and M. S. Sachdev, "A graphical electromagnetic simulation laboratory for power systems engineering programs," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, pp. 599–606, May 1996.
- [6] L. Gyugyi, "Dynamic compensation of ac transmission lines by solid-state synchronous voltage sources," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 9, pp. 904–911, Apr. 1994.
- [7] A. Hernandez, K. E. Chong, G. Gallegos, and E. Acha, "The implementation of a solid state voltage source in PSCAD/EMTDC," *IEEE Power Eng. Rev.*, pp. 61–62, Dec. 1998.
- [8] G. Venkataramanan and B. Johnson, "A pulse width modulated power line conditioner for sensitive load centers," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, pp. 844–849, Apr. 1997.
- [9] J. T. Fernando, W. T. Kwasmicki, and A. M. Gole, Modeling of conventional and advanced static var compensators in electromagnetic transients simulation program. [Online]. Available: <http://www.ee.umanitoba.ca/~hvdc>.
- [10] L. Xu, O. Anaya-Lara, V. G. Agelidis, and E. Acha, "Development of prototype custom power devices for power quality enhancement," in *Proc. 9th ICHQP 2000*, Orlando, FL, Oct. 2000, pp. 775–783.
- [11] C. Schauder, M. Gerhardt, F. Stacey, T. Lemak, L. Gyugyi, T. W. Coase, and A. Edris, "Operation of  $\pm 100$  MVar TVA STATCOM," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, pp. 1805–1811, Oct. 1997.
- [12] Y. Chen and B. T. Ooi, "STATCOM based on multimodules of multilevel converters under multiple regulation feedback control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, pp. 959–965, Sept. 1999.
- [13] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, pp. 960–971, Oct. 1999.
- [14] K. Chan and A. Kara, "Voltage sags mitigation with an integrated gate commutated thyristor based dynamic voltage restorer," in *Proc. 8th ICHQP '98*, Athens, Greece, Oct. 1998, pp. 210–215.
- [15] N. H. Woodley, L. Morgan, and A. Sundaram, "Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, pp. 1181–1186, July 1999.
- [16] S. S. Choi, B. H. Li, and D. D. Vilathgamuwa, "Dynamic voltage restoration with minimum energy injection," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, pp. 51–57, Feb. 2000.
- [17] K. Chan, A. Kara, and G. Kieboom, "Power quality improvement with solid state transfer switches," in *Proc. 8th ICHQP '98*, Athens, Greece, Oct. 1998, pp. 210–215.
- [18] A. Gole and L. Palav, "Modeling of custom power devices in PSCAD/EMTDC," *Centre J.*, Summer 1998.
- [19] E. Acha, V. G. Agelidis, O. Anaya-Lara, and T. J. E. Miller, *Electronic Control in Electrical Power Systems*. London, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [20] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. New York: Wiley, 1995.

**Olimpo Anaya-Lara** was born in Mexico in 1968. He received the B.Eng. and M.Sc. degrees from the Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Mexico, in 1994 and 1998, respectively. He is currently pursuing the Ph.D. degree in electrical power systems at the University of Glasgow, Glasgow, U.K.

**E. Acha** was born in Mexico. He graduated from the University of Michoacán, Mexico, in 1979 and received the Ph.D. degree from the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, in 1988.

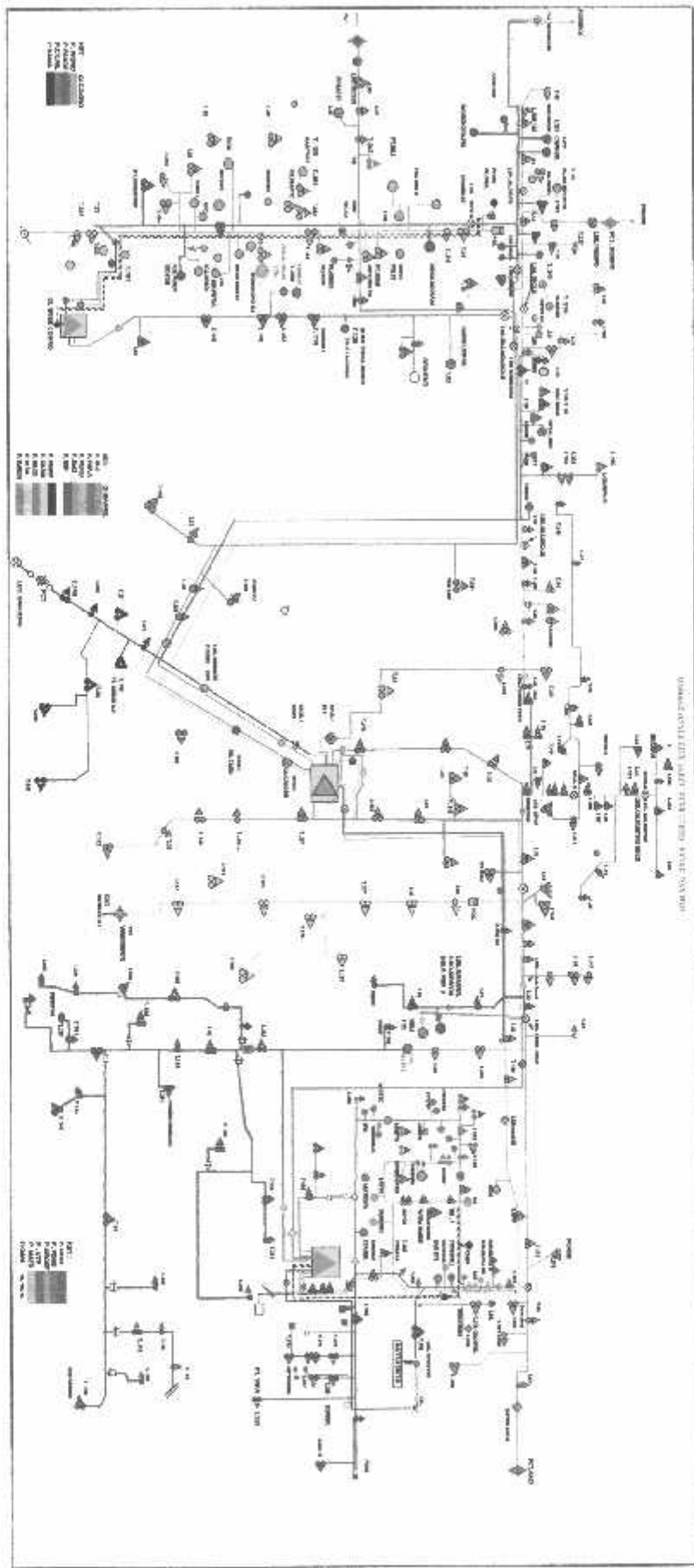
He was a Postdoctoral Fellow with the University of Toronto, Toronto, ON, Canada. Currently, he holds a permanent appointment at the University of Glasgow, Glasgow, U.K., where he lectures and conducts research on power systems analysis and power electronics applications in power systems.

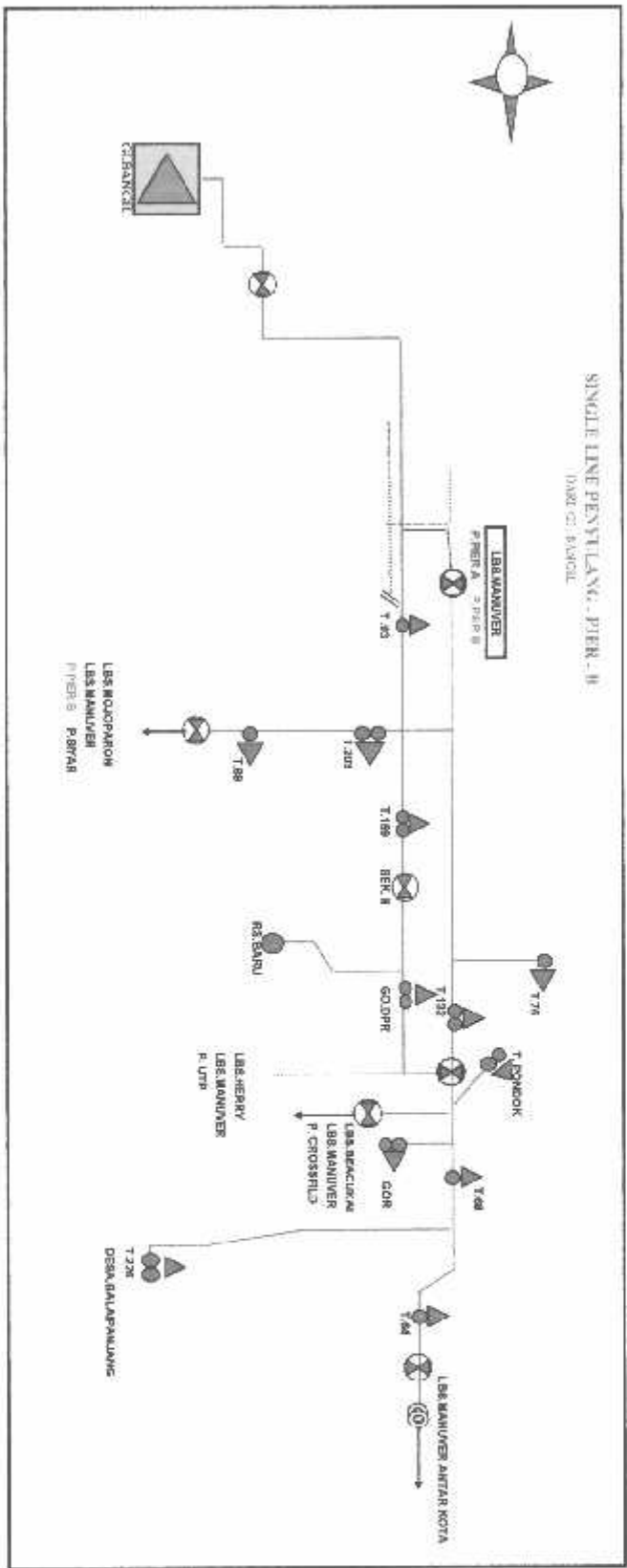


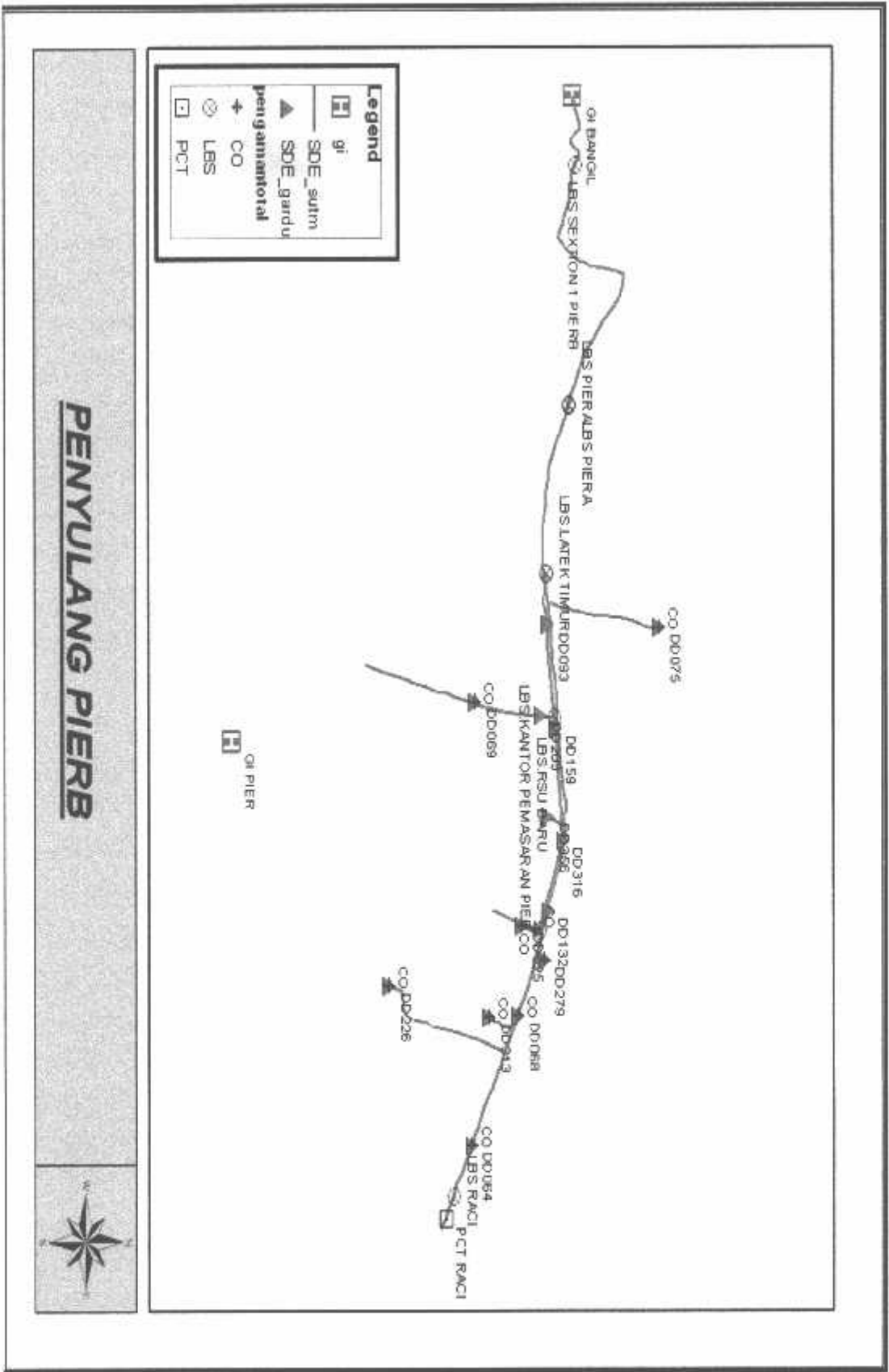














PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

T. BNI (PERSERO MALANG)  
BANK NIAGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145  
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

**BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

Nama : Singgih Anggi Pratama  
NIM : 05.12.014  
Jurusan : Teknik Elektro S-1  
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik  
Judul : ANALISA SIMULASI PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN  
DENGAN PENGATURAN SISTEM DAYA MENGGUNAKAN  
SSTS, D-STATCOM DAN DVR PADA JARINGAN  
DISTRIBUSI 20 KV PENYULANG PIER-BANGIL

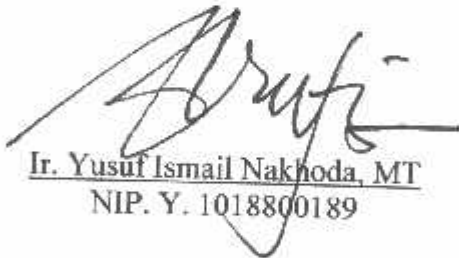
Dipertahankan dihadapan Majelis Penguji Skripsi Jenjang program Strata Satu (S-1) pada :

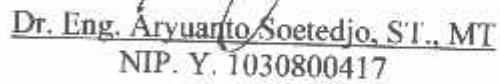
Hari : Senin  
Tanggal : 21 Februari 2011  
Nilai : 82,3 (A) *rs*

Panitia Ujian Skripsi:

Ketua Majelis Penguji

Sekretaris Majelis Penguji

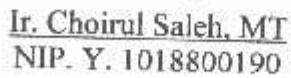
  
Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT  
NIP. Y. 1018800189

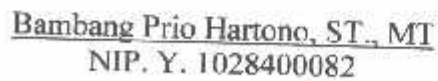
  
Dr. Eng. Aryuanto Soetedjo, S.T., MT  
NIP. Y. 1030800417

Anggota Penguji:

Penguji Pertama

Penguji Kedua

  
Ir. Choirul Saleh, MT  
NIP. Y. 1018800190

  
Bambang Prio Hartono, ST., MT  
NIP. Y. 1028400082



PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

T. BNI (PERSERO MALANG)  
BANK NIAGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145  
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

LEMBAR PERBAIKAN SKRIPSI

Nama : Singgih Anggi Pratama  
Nim : 05.12.014  
Jurusan : Teknik Elektro S-1  
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik  
Hari / Tanggal : Senin / 21 Februari 2011

No	Materi Perbaikan	Paraf
1	Judul ditambah analisa simulasi	<i>CS</i>
2	Kesimpulan di perbaiki	<i>CS</i>

Telah Diperiksa / Disetujui:  
Dosen Penguji I

Ir. Choirul Saleh, MT  
NIP.Y.1018800190

Mengetahui,

Dosen Pembimbing I

Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT  
NIP. Y. 1018800189

Dosen Pembimbing II

Ir. Eko Nurcahyo  
NIP. Y. 1028700172





PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

f. BNI (PERSERO MALANG)  
BANK NIAGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145  
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

**LEMBAR PERBAIKAN SKRIPSI**

Nama : Singgih Anggi Pratama  
Nim : 05.12.014  
Jurusan : Teknik Elektro S-1  
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik  
Hari / Tanggal : Senin / 21 Februari 2011

No	Materi Perbaikan	Paraf
1	Abstrak	b
2	Pendahuluan	b
3	Daftar pustaka	b
4	Tabel 4.4 - 4.6 di beri keterangan	b
5	Kesimpulan di perbaiki	b

Telah Diperiksa / Disetujui:  
Dosen Penguji II

Bambang Prio Hartono, ST., MT  
NIP. Y. 1028400082

Mengetahui,

Dosen Pembimbing I

Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT  
NIP. Y. 1018800189

Dosen Pembimbing II

Ir. Eko Nurcahyo  
NIP. Y. 1028700172



## FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : SINGGIH ANGGI PRATAMA  
Nim : 05.12.0514  
Masa Bimbingan : 26 DESEMBER 2010 s/d 26 JUNI 2011  
Judul Skripsi : ANALISA SIMULASI PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN  
DENGAN PENGATURAN SISTEM DAYA MENGGUNAKAN SSTS, D-  
STATCOM DAN DVR PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV  
PENYULANG PIER-BANGIL

NO	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1	15 - 12 - 2010	Bimbingan Bab I, II, III dan IV	
2	18 - 12 - 2010	Demo Program PSCAD Power Simulation	
3	06 - 01 - 2011	Bimbingan Perbaikan Bab I, II, III dan IV	
4	11 - 01 - 2011	Bimbingan Perbaikan Analisa Grafik & Kesimpulan	
5	17 - 01 - 2011	Pengajuan Makalah Seminar	
6	07 - 02 - 2011	Periksa Format Penulisan Makalah Seminar	
7	16 - 02 - 2011	Acc Makalah Seminar Hasil	
8	23 - 02 - 2011	Konsultasi seluruh Bab	
9	25 - 02 - 2011	Acc Ujian Skripsi	
10			

Malang, Febuari 2011  
Dosen Pembimbing I

Ir. Yusuf Ismail Nakhoda MT  
NIP. Y. 1018800189

Form S-4b



## FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : SINGGIH ANGGI PRATAMA  
Nim : 05.12.0514  
Masa Bimbingan : 26 DESEMBER 2010 s/d 26 JUNI 2011  
Judul Skripsi : ANALISA SIMULASI PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN  
DENGAN PENGATURAN SISTEM DAYA MENGGUNAKAN SSTS, D-  
STATCOM DAN DVR PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV  
PENYULANG PIER-BANGIL

NO	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1	02 - 11 - 2010	Bimbingan Bab I, II, III	
2	10 - 11 - 2010	Perbaikan Bab II Dan III	
3	24 - 11 - 2010	Bimbingan Bab IV dan Kesimpulan	
4	13 - 12 - 2010	Perbaikan Bab IV dan Kesimpulan	
5	12 - 01 - 2011	Konsultasi Perbaikan Analisa Grafik & Penambahan Kesimpulan	
6	27 - 01 - 2011	Periksa Format Penulisan Makalah Seminar Hasil	
7	03 - 02 - 2011	Acc Makalah Seminar Hasil	
8	21 - 02 - 2011	Konsultasi Revisi seluruh Bab	
9	22 - 02 - 2011	Acc Ujian Skripsi	
10			

Malang, Febuari 2011  
Dosen Pembimbing II

Ir. Eko Nurcahyo  
NIP. Y. 1028700172

Form S-4b



PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

II (PERSERO) MALANG  
INS NAGA MALANG

Kampus I : J. Bendungan Siguragung No.2 Telp. (0341) 551431 (Pusat), Fax. (0341) 553015 Malang 65145  
Kampus II : J. Raya Warungdoyo No.2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Nomor : ITN-153/III.TA-2/2/10  
Lampiran : -  
Perihal : Survey

Malang, 14 Desember 2010

Kepada : Yth. Pimpinan  
PT. PLN (Persero) APJ Pasuruan  
Jl. Panglima Sudirman No. 69  
Di - Pasuruan

Bersama ini dengan hormat kami mohon kebijaksanaan Bapak/Ibu agar Mahasiswa kami dari Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Elektro S-1 Konsentrasi Teknik Energi Listrik dapat diijinkan untuk melaksanakan survey pada PT. PLN (Persero) APJ Pasuruan yang Bapak/Ibu pimpin untuk mendapatkan data - data guna penyusunan Skripsi.

Mahasiswa tersebut adalah :

Singgih Anggi Pratama Nim. 05.12.014

Adapun lamanya Survey adalah : 14 Hari

Demikian agar maklum dan atas perhatian serta bantuannya kami ucapkan terima kasih.



Ir. H. Sidik Noertjahjono, MT. *BS*  
Nip. Y.1028700163



PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

BN (PERSERO), MALANG  
SANGI NAGA MALANG

Kampus : J. Brondongan Sng. Ngopa No. 2, Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145  
Kampus : J. Raya Karangb. Km 2 Telp. (0341) 417036 Fax. (0341) 417034 Malang

Nomor : ITN-126-ILTA-2.2.10 Malang, 29 Nopember 2010  
Lampiran : -  
Perihal : Survey

Kepada : Yth. Pimpinan  
PT. PLN (Persero) UPJ Bangil  
Jl. Minggu No. 68  
Di Bangil - Pasuruan

Bersama ini dengan hormat kami mohon kebijaksanaan Bapak/Ibu agar Mahasiswa kami dari Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Elektro S-1 Konsentrasi Teknik Energi Listrik dapat diijinkan untuk melaksanakan survey pada PT. PLN (Persero) UPJ Bangil yang Bapak/Ibu pimpin untuk mendapatkan data data guna penyusunan Skripsi.

Mahasiswa tersebut Adalah :

Singih Anggi Pratama Nim. 05.12.014

Adapun lamanya Survey adalah : 14 Hari

Demikian agar maklum dan atas perhatian serta bantuannya kami ucapkan terima kasih.



Dr. H. Sidik Noerjahjono, MT. *Sidik*  
Nip. Y. 1028700163

**P.T. PLN (PERSERO)  
DISTRIBUSI JAWA TIMUR  
AREA PELAYANAN & JARINGAN PASURUAN**

Panglima Sudirman No. 69 Pasuruan 67115  
: (0343) 426515 s/d 426517

Telex :  
Faximile : (0343) 426518

Alamat Kawat : PLN PSR

Order : (46) /041/APJ-PSR/2010  
Sdr. No. :  
Alamat :  
Tentang : Survey

KEPADA YTH :

DEKAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2

MALANG 65145

Menjawab surat Saudara Nomor : ITN-153/III.TA-2/2/10 tanggal 14 Desember 2010 perihal Survey, dengan ini disampaikan bahwa pada prinsipnya kami dapat mengijinkan pelaksanaan Survey Mahasiswa Saudara sebagai berikut :

NO.	NAMA	JURUSAN
1.	SINGGIH ANGGI PRATAMA NIM. 05.12.014	TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

Adapun pelaksanaannya mulai tanggal 22 Desember 2010 sampai dengan tanggal 05 Januari 2010 ditempatkan di UPJ Bangil PT PLN (Persero) Area Pelayanan dan Jaringan Pasuruan.

Untuk penjelasan lebih lanjut, diminta yang bersangkutan menghubungi langsung ASISTEN MANAJER SDM DAN KEUANGAN PT PLN (Persero) Area Pelayanan Dan Jaringan Pasuruan Jl. Panglima Sudirman No. 69 Pasuruan dengan membawa salinan surat ini.

Perlu kami sampaikan bahwa apabila diperlukan data, kami hanya akan memberikan yang bersifat **TIDAK RAHASIA**.

Demikian, atas perhatiannya disampaikan terima kasih.

MANAJER,



Dr. SIGIT WITJAKSONO

Tembusan Yth. :

- UPJ BANGIL