

# SKRIPSI

**ANALISA PEMASANGAN *UNIFIED POWER FLOW CONTROL*  
UNTUK MEMPERBAIKI PROFIL TEGANGAN DENGAN *D- Q CONTROL*  
PADA SALURAN DISTRIBUSI 20KV GI. TENGGAWANG  
KALIMANTAN TIMUR**



Disusun Oleh :  
**Arik Setyo Nugroho**  
03.12.038



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
2010**

0091128

APRILIA PERAGANAN MENTERI PERTANIAN DAN PERUMAHAN  
KEMENTERIAN PERTANIAN DAN PERUMAHAN  
PADA SALLAM DISTRIKUSI SONY BI TENGKAWANG  
SUMIT WATMANLIX



0091128  
0091128  
0091128

0091128  
0091128  
0091128  
0091128  
0091128

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**ANALISA PEMASANGAN *UNIFIED POWER FLOW CONTROL*  
UNTUK MEMPERBAIKI PROFIL TEGANGAN DENGAN *D-Q CONTROL*  
PADA SALURAN DISTRIBUSI 20kV GI. TENGGAWANG  
KALIMANTAN TIMUR**

**SKRIPSI**

Disusun Untuk Melengkapi dan Memenuhi Guna Mencapai Gelar Sarjana Teknik Elektro  
Strata Satu (S-1)

Disusun Oleh :

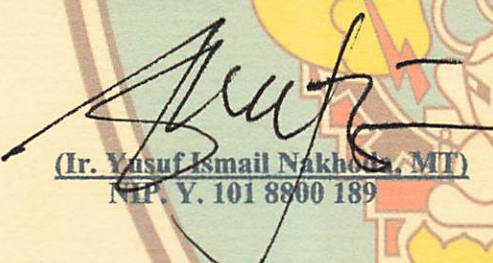
Arik Setyo Nugroho

03.12.038

Diperiksa dan disetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

  
(Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT)  
NIP. Y. 101 8800 189

  
(Ir. H. Choirul Saleh, MT)  
NIP. Y. 101 8800 190

  
Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1

(Ir. F. Yudi Jimpraptono, MT)  
NIP.Y. 103 9500 274

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
2010**

## KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan karunia-Nya, sehingga penyusun dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar sarjana teknik elektro di Institut Teknologi Nasional Malang. Penyusun menyadari bahwa penyusun skripsi ini mungkin masih jauh dari kesempurnaan, sehingga sangat diharapkan adanya saran dan masukan yang bersifat membangun dari semua pihak untuk membantu penyelesaian penyusunan skripsi ini. Dalam penyusunan laporan skripsi ini, penulis tak lupa mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Abraham Lomi, MSEE, selaku Rektor ITN Malang.
2. Bapak Ir. F. Yudi Limpraptono, MT, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1.
3. Bapak Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT, selaku Dosen Pembimbing.
4. Bapak Ir. H. Choirul Saleh, MT, selaku Dosen Pembimbing
5. Mr. Budi s.s.s. SH. Selaku Asisten Manager PT. IMECO INTER SARANA
6. Bapak Awan Uji kusumo, Selaku Dosen Dan Pemateri.
6. Orang Tua Tercinta yang selalu memberikan semangat, motivasi serta do'a.
7. Teman-teman yang telah memberikan bantuan, motivasi dan do'a.
8. Semua pihak yang telah membantu terselesainya skripsi ini Terutama Lab. SSTE Dan Kru.

Akhirnya penulis mengharapkan skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak, khususnya pada jurusan Teknik Elektro konsentrasi Teknik Energi Listrik.

Malang, JANUARI 2010

Penulis

**ANALISA PEMASANGAN *UNIFIED POWER FLOW CONTROL* UNTUK  
MEMPERBAIKI PROFIL TEGANGAN DENGAN *D-Q CONTROL*  
PADA SALURAN DISTRIBUSI 20 kV G.I TENGGAWANG  
KALIMANTAN TIMUR**

**Arik Setyo Nugroho**

Jurusan Teknik Elektro S-1, Konsentrasi Teknik Energi Listrik  
Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang  
E-mail : [arik\\_siwa@yahoo.co.id](mailto:arik_siwa@yahoo.co.id)

**Abstraksi**

Energi listrik umumnya dibangkitkan oleh pusat pembangkit yang jauh dari perkotaan, dialirkan ke beban yang berupa rumah tangga, industri dan komersil. Dalam proses penyaluran energi listrik ke beban terjadi rugi-rugi, yaitu rugi daya, rugi energi dan drop tegangan mulai dari pembangkit, transmisi hingga distribusi yang dapat merusak peralatan listrik, *UNIFIED POWER FLOW CONTROL* merupakan solusi permasalahan berikut.

PSCAD/EMTDC adalah perangkat lunak yang digunakan untuk permodelan dan simulasi. Pada penelitian ini penulis membahas performa UPFC. Dengan adanya jatuh tegangan yang terjadi pada saluran distribusi, *UNIFIED POWER FLOW CONTROL* digunakan untuk memperbaiki profil tegangan. Dari hasil simulasi pada G.I Tengkwang dengan pemasangan UPFC pada saat terjadi jatuh tegangan sebesar 0.716 (pu) dalam selang waktu (0.2 -0.5) s. mampu memperbaiki profil tegangan dengan rata-rata 0.08 (pu) tiap node, daya reaktif system berkurang sehingga suplay daya dapat diperbaiki seperti saat system dalam keadaan normal/tidak terjadi drop tegangan.

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PERSETUJUAN .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAKSI.....</b>	<b>ii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GRAFIK .....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Metodologi .....	3
1.6. Sistematika .....	4
<b>BAB II SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK.....</b>	<b>6</b>
2.1. Sistem Tenaga Listrik.....	6
2.2. Sistem Jaringan Distribusi Tenaga Listrik .....	6
2.3. Struktur Jaringan Distribusi Tenaga Listrik .....	7
2.3.1. Struktur Jaringan Primer .....	7
2.3.2. Sistem Distribusi Sekunder .....	8
2.3.2.1. Struktur Jaringan Radial.....	8
2.3.2.2. Struktur Jaringan Loop (Lingkaran).....	9

2.3.2.3. Struktur Jaringan Grid atau Mesh (Anyaman).....	9
2.4. Kualitas Daya Elektrik .....	11
2.4.1. Gangguan Dalam Sistem Tenaga Listrik .....	11
2.4.2. Daya Dalam Sistem Tenaga Listrik .....	13
2.4.3. <i>Voltage Sag</i> .....	15
2.4.3.1. Penyebab <i>Voltage Sag</i> .....	16
2.4.3.3. Perhitungan Nilai <i>Voltage Sag</i> Sistem .....	16
2.5 Peralatan Elektronika Daya .....	20
2.5.1. <i>Transistor Bipolar</i> .....	20
2.5.2. <i>Metal Oxide Semiconductor FET (MOSFET)</i> .....	21
2.5.3. <i>Insulate Gate Bipolar Transistor (IGBT)</i> .....	21
2.5.4. Perbandingan Umum Antara Kinerja MOSFET dan IGBT .....	22
2.6. Peralatan Kompensasi Dalam Sistem Tenaga Listrik .....	26
2.6.1. <i>Static VAR Compensator (SVC)</i> .....	26
2.6.2. <i>NGH – Sub Synhronous Resonance (SSR)</i> .....	27
2.6.3. <i>Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)</i> .....	27
2.6.4. <i>Static Condenser (STATCON)</i> .....	29
2.6.5. <i>Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPR)</i> .....	30
2.6.6. <i>Unified Power Flow Controller (UPFC)</i> .....	31

**BAB III      PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN MENGGUNAKAN  
UNIFIED POWER FLOW CONTROL ( UPFC )**

..... 33

3.1.	3.1.	Sistem Pengendalian PWM Sinusoida.....	32
	3.3.1.	Strategi kendali D – Q untuk <i>UPFC</i> .....	32
	3.3.2.	PWM Sinusoida.....	32
	3.13.	Aksi Kontrol PWM Sinusoida Terhadap <i>UPFC</i> .....	41
3.4.		Aksi Kontrol Proporsional Integral (PI).....	43
	3.4.1.	Umum.....	43
	3.4.2.	Prinsip-Prinsip Pengendalian Proses.....	46
	3.4.3.	Prinsip Kerja Pengendali.....	46
	3.4.4.	Pengendali Proporsional ( <i>Proporsional Controller</i> ).....	47
	3.4.5.	Pengendali Integral ( <i>Integrator Controller</i> ).....	49
	3.4.6.	Pengendali Proporsional Integral ( <i>PI Controller</i> ).....	51
3.5.		Kompensasi UPFC pada sistem distribusi 20 kV.....	52
	3.5.1.	Sistem Distribusi Tanpa Kompensasi UPFC.....	52
	3.5.2.	Sistem Distribusi Dengan Kompensasi UPFC.....	53
<b>BAB IV</b>		<b>HASIL DAN ANALISA HASIL.....</b>	<b>54</b>
4.1.		<i>Single Line</i> Sistem Distribusi 20 kV G.I Tengawang.....	54
4.2.		Data Penyaluran dan Pembebanan Tengawang.....	55
	4.2.1.	Data Saluran.....	55
	4.2.2.	Data Pembebanan.....	56
	4.2.3.	Data Aliran Daya Tiap Saluran.....	57



4.3. Solusi Perbaikan Kualitas Tegangan Dengan <i>Software PSCAD/EMTDC</i>	
<i>V 4.2 Power Simulation</i> .....	58
4.4. Hasil dan Analisa Hasil Perbaikan Profil Tegangan Dengan UPFC.....	58
4.4.1. Hasil Perhitungan dan Simulasi Sebelum Pemasangan UPFC .....	58
4.4.1.1. Sistem Sebelum Mengalami Gangguan .....	58
4.4.1.2. Sistem Setelah Mengalami Gangguan.....	59
4.4.2. Hasil Perhitungan Saat Terjadi Jatuh Tegangan Tanpa <i>UPFC</i> .....	59
4.4.3. Perbandingan hasil Perhitungan dan Simulasi Sebelum	
Kompensasi dan Setelah Kompensasi.....	60
4.4.3.1. Perbandingan Tegangan Dengan dan Tanpa UPFC.....	61
4.4.3.2. Perbandingan Tegangan Saat Gangguan Jatuh Tegangan....	61
<b>BAB IV PENUTUP</b> .....	<b>65</b>
5.1. Kesimpulan.....	65
5.2. Saran.....	65
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>66</b>

## DAFTAR GAMBAR

2.1	Skema Penyaluran Sistem Distribusi Tenaga Listrik .....	7
2.2	Jaringan Tegangan Menengah (JTM), Jaringan Tegangan Rendah (JTR) dan Sambungan Rumah Ke Pelanggan.....	8
3.2	Bentuk Sederhana dari system Distribusi Radial.....	9
2.4	Jaringan Tegangan Menengah Struktur Loop yang Dipasok Dari Satu Sumber .....	10
2.5	Jaringan Tegangan Menengah Struktur Mesh .....	10
2.6	Segitiga Daya.....	15
2.7	Ilustrasi <i>Voltage Sag</i> .....	16
2.8	Gambaran terjadinya <i>Voltage Sag</i> .....	17
2.10	Model Pembagi Tegangan .....	19
2.11	Tegangan Drop Dalam Kondisi Mneyambung Untuk Sebuah MOSFET dan Dua IGBT .....	25
2.12	<i>Static VAR Compensator</i> .....	26
2.13	NGH – <i>SubSynchronous Resonance</i> .....	27
2.14	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)</i> .....	28
2.15	<i>Static Condenser (STATCON)</i> .....	30
2.16	<i>Thyristor Controlled Phase angle Regulator (TCPR)</i> .....	31
2.17	<i>Unified Power Flow Controller (UPFC)</i> .....	32
3.1	Control Tegangan Dc .....	36
3.2	Rangkaian Control Tegangan Ac.....	36

3.3	Rangkaian Firing Pulse Generation .....	37
3.4	Rangkaian control sudut fasa inverter seri.....	38
3.5	Circuit For Pulse Generation .....	39
3.6	Bentuk logika transformasi d-q to abc.....	39
3.7	Rangkaian Inverter yang terhubung seri dengan saluran transmisi.....	42
3.8	Gambar Rangkaian Inverter yang terhubung paralel dengan saluran transmisi.....	43
3.9	Kontroler Dan Diagram Kotaknya.....	47
3.10	Diagram Blok Kontroler Proporsional .....	48
3.11	Response Sebuah Pengendali Proporsional.....	49
3.12	Blok Diagram Kontroler Integral .....	51
3.13	Diagram Kotak Pengendali PI .....	51
3.14	Hubungan Input-Output Pengendali PI dalam Fungsi Waktu.....	52
4.1	<i>Single Line G.I</i> Tengkawang Kalimantan Timur.....	54

## DAFTAR TABEL

2.1	Perbandingan Tiga Piranti Penyalur Daya Untuk Kemampuan (rating) Yang Setara.....	21
2.2	Perbandingan Karakteristik Piranti Penyalur Daya.....	22
2.3	Perbandingan Tegangan Drop dan Rating Tegangan Antara IGBT dan MOSFET.....	23
4.1	Data Saluran.....	55
4.2	Data Pembebanan .....	56
4.3	Data Aliran daya .....	57
4.4	Hasil Perhitungan Saat Terjadi Jatuh Tegangan Tanpa <i>UPFC</i> .....	59
4.5	Hasil Perhitungan Saat Terjadi Jatuh Tegangan Setelah Kompensasi <i>UPFC</i> .....	60
4.6	Perbandingan Tegangan Saat Gangguan Jatuh Tegangan Dengan <i>UPFC</i> dan Tanpa <i>UPFC</i> .....	61

## **DAFTAR GRAFIK**

<b>4.1</b>	<b>Bentuk Gelombang Tegangan.....</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>(a) Bentuk Gelombang Tegangan (b) Bentuk Gelombang Daya Aktif dan Daya Reaktif, Saat Terjadi Jatuh Tegangan Tanpa UPFC.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>(a) Bentuk Gelombang Tegangan (b) Bentuk Gelombang Daya Aktif dan Daya Reaktif, Saat Terjadi Jatuh Tegangan Dengan UPFC .....</b>	<b>60</b>

# BAB I

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Sistem tipikal tenaga listrik memiliki empat unsur utama yaitu: pembangkit tenaga listrik, saluran transmisi, saluran distribusi dan beban atau disebut juga sebagai pengguna tenaga listrik. Perkembangan sistem kelistrikan saat ini telah mengarah pada peningkatan efisiensi dan mutu tegangan dalam penyaluran energi listrik. Peningkatan efisiensi dan mutu tersebut dapat dimulai dari pembangkitan, transmisi dan distribusi, pada sisi distribusi, pengurangan terjadinya jatuh tegangan pada saluran dan memberikan tingkat tegangan yang aman bagi peralatan pelanggan.

Besarnya tegangan yang diterima oleh konsumen listrik tidaklah sama, hal ini terjadi karena adanya impedansi dari jaringan. Oleh karena itu, jatuh tegangan selalu ada pada setiap bagian dari sistem tenaga, mulai dari sumber sampai ke pelanggan. Jatuh tegangan berbanding lurus dengan besarnya arus dan sudut fasanya, yaitu arus yang mengalir di seluruh sistem tenaga.

*Unified Power Flow Controller (UPFC)* adalah alat fact device yang mana perancangannya berbasis inverter dengan menggunakan *Thyristor*. pada UPFC, vektor tegangan  $V_m$  yang dihasilkan oleh inverter disuntikkan secara seri ke jaringan transmisi. Tegangan searah (dc) yang digunakan inverter ini didapatkan dari hasil penyearah (*rectification*) tegangan dari transmisi yang sama. Studi kasus terhadap UPFC, baik itu dalam skala besar maupun kecil telah berhasil dilaksanakan. Sebagai contoh, 1060 MVA UPFC telah dipasang pada jaringan

transmisi 500kV yang menghubungkan kota Phoenix (negara bagian Arizona) dengan kota Las Vegas (negara bagian Nevada) dan kota Los Angeles (negara bagian California). Gangguan tiga fasa pada satu titik di jaringan tersebut disimulasikan untuk menginvestigasi reaksi UPFC dan peralatan konvensional. Hasil simulasi menunjukkan UPFC memberikan reaksi lebih stabil dibandingkan dengan reaksi peralatan konvensional. Tegangan dari transmisi menunjukkan lebih kurang osilasinya dengan menggunakan UPFC dibandingkan pemasangan peralatan lama. Dengan demikian, UPFC merupakan alat yang dapat diandalkan untuk mengoptimalkan tegangan dengan sekaligus menjaga kestabilan sistem jaringan transmisi itu sendiri.

Strategi untuk memperoleh kemampuan yang maksimum dari UPFC, diperlukan suatu sistem kendali dengan suatu respon yang lebih cepat . akan menguntungkan, jika time-varying persamaan dapat diubah ke suatu time-invariant yang dapat di set . Ini akan mengakibatkan penyederhanaan kalkulasi kedua-duanya untuk kondisi-kondisi mantap dan terutama ketika kita sedang mempertimbangkan suatu sistem tenaga sangat besar. R.H.Park memperkenalkan kendali d-q. banyak pengoperasian UPFC yang menggunakan control strategi yang didasarkan pada d-q axis teori . control d-q axis ini memungkinkan UPFC untuk mengikuti perubahan nilai-nilai acuan seperti tegangan arus bolak-balik, tegangan DC, daya nyata dan daya reaktif yang terhubung dengan saluran.dengan pengontrolan D-Q axis ini diharapkan mampu menghasilkan tanggapan yang cepat dan mengurangi interaksi antara arus,tegangan, daya aktif dan reaktif.

Makalah ini menganalisa pengontrolan tegangan pada jaringan 20 kV menggunakan UPFC. Sehingga besarnya tegangan yang diterima di sisi sending dapat dioptimalkan kualitasnya.

## **1.2 RUMUSAN MASALAH**

Pusat-pusat pembangkit tenaga listrik berada jauh dari pusat beban, hal ini mengakibatkan kerugian yang cukup besar dalam penyaluran daya listrik. Kerugian tersebut disebabkan oleh saluran yang cukup panjang. Sehingga dalam penyaluran daya listrik melalui transmisi maupun distribusi akan mengalami tegangan jatuh (*drop voltage*) sepanjang saluran yang dilalui. Untuk mengatasi hal tersebut dapat di atasi dengan pemasangan UPFC.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan permasalahan yang dikemukakan di atas maka skripsi ini bertujuan untuk memperbaiki profil tegangan dengan pemasangan *UNIFIED POWER FLOW CONTROL (UPFC)*.

## **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 sistem Distribusi GI. Tengawang Kaltim.
3. Data pembebanan di ambil tanggal 25-26 Maret 2009



4. Mekanisme kerja *Unfied power flow control (UPFC)* dalam mengatasi jatuh tegangan.

### **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*.
  - Analisa profil tegangan dan arus pada sistem.
4. Mengambil kesimpulan dari perbandingan sistem yang menggunakan alat kompensasi UPFC dan dengan tanpa menggunakan UPFC.

### **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 transmisi tenaga listrik secara umum dan pengaruh pemasangan alat kompensasi untuk memperbaiki kualitas tegangan

## **BAB III : PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN DENGAN UPFC**

Berisi penguraian tentang perbandingan kualitas daya sistem yang menggunakan alat kompensasi UPFC dengan tanpa menggunakan kompensasi UPFC.

## **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 Distribusi Tenaga Listrik**

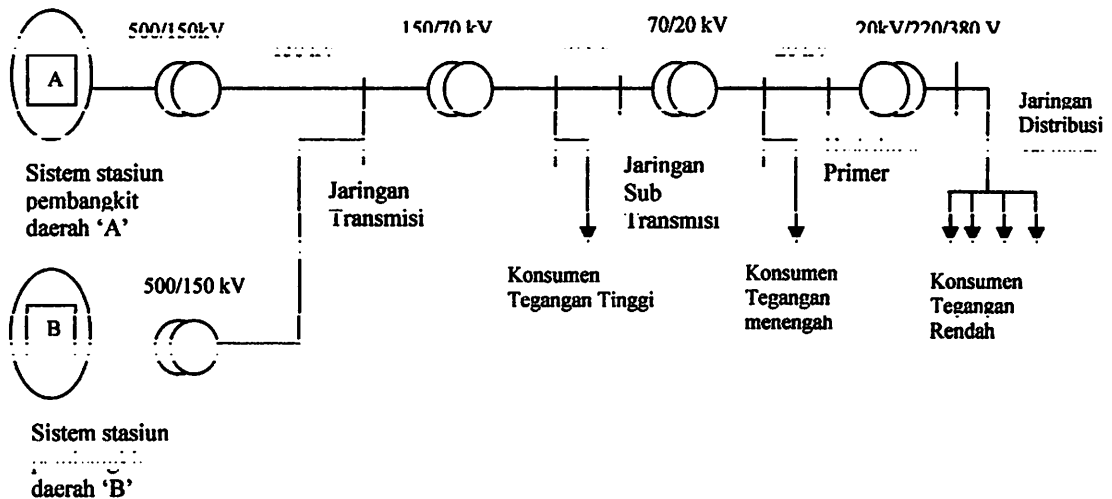
Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terpadu yang terbentuk oleh hubungan-hubungan peralatan dan komponen komponen listrik. Sistem tenaga listrik ini mempunyai peranan utama untuk menyalurkan energi listrik yang dibangkitkan oleh generator ke konsumen yang membutuhkan energi listrik tersebut.

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. Struktur Jaringan 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.



**Gambar 2.1**  
**Skema Penyaluran Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Dalam pendistribusian tenaga listrik ke konsumen, tegangan yang digunakan bervariasi tergantung pada jenis konsumen yang membutuhkan. Dengan demikian maka sistem distribusi tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian sistem yaitu :

1. Sistem distribusi primer
2. Sistem distribusi sekunder

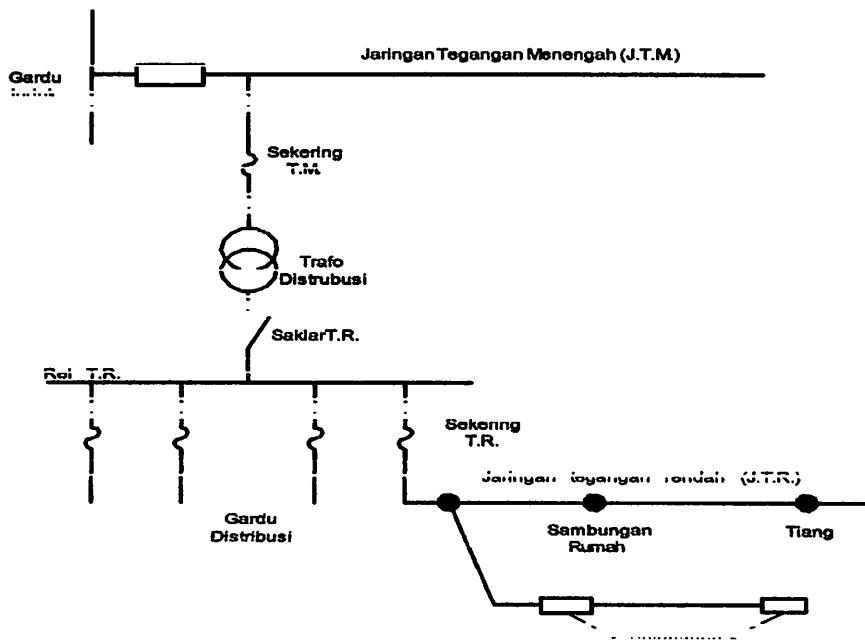
Pengklasifikasian sistem distribusi tenaga listrik menjadi dua ini berdasarkan tingkat tegangan distribusinya.

### **2.3. Struktur Jaringan Distribusi Tenaga Listrik**

Dalam rangka mengantisipasi peningkatan kebutuhan energi listrik pada masa tertentu, maka struktur jaringan harus dipertimbangkan terlebih dahulu sehingga untuk ekspansi sistem di masa yang akan datang tidak menjadi masalah.

### 2.3.1. Sistem Distribusi Primer

Jaringan Distribusi Primer merupakan sistem tenaga listrik yang menyalurkan energi listrik antara Gardu Induk Distribusi sampai ke Gardu Distribusi dengan tegangan kerja 20 kV atau 6 kV.



Gambar 2.2

Jaringan Tegangan Menengah (JTM), Jaringan Tegangan Rendah (JTR) dan Sambungan Rumah Ke Pelanggan

### 2.3.2. Sistem Distribusi Sekunder

Secara garis besar jaringan distribusi primer diklasifikasikan menjadi :

#### 2.3.2.1. Struktur Jaringan Radial

Bentuk jaringan ini merupakan bentuk dasar yang paling sederhana dan paling banyak digunakan. Sistem ini dikatakan radial karena dari kenyataan bahwa jaringan ini ditarik secara radial dari GI ke pusat – pusat beban / konsumen yang dilayaninya. Sistem ini terdiri dari saluran utama (tunk line) dan saluran cabang (lateral).

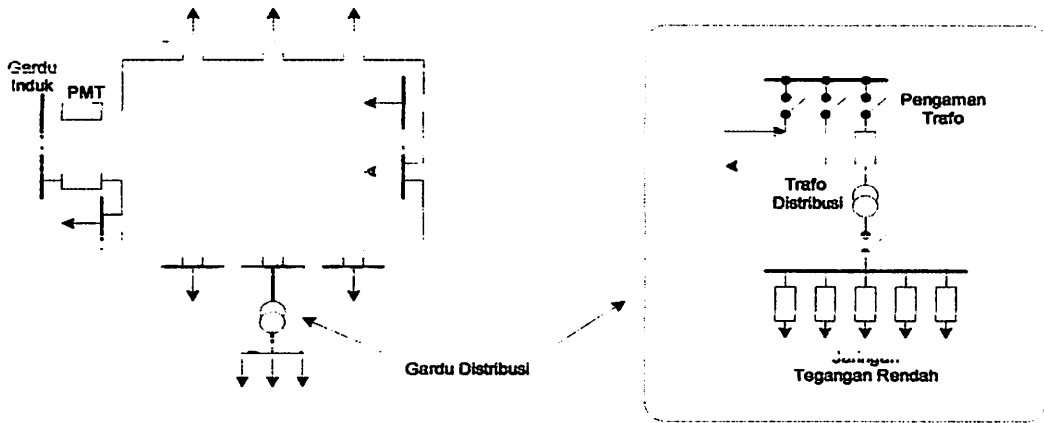


**Gambar 2.3**  
**Bentuk Sederhana dari Sistem Distribusi Radial**

Pelayanan untuk suatu daerah beban tertentu dilaksanakan dengan memasang transformator di sembarang titik pada jaringan sedekat mungkin dengan beban yang dilayani. Untuk daerah beban yang menyimpang jauh dari saluran utama maupun saluran cabang, maka akan ditarik lagi saluran tambahan yang dicabangkan pada saluran tersebut.

### **2.3.2.2. Struktur Jaringan Loop (Lingkaran)**

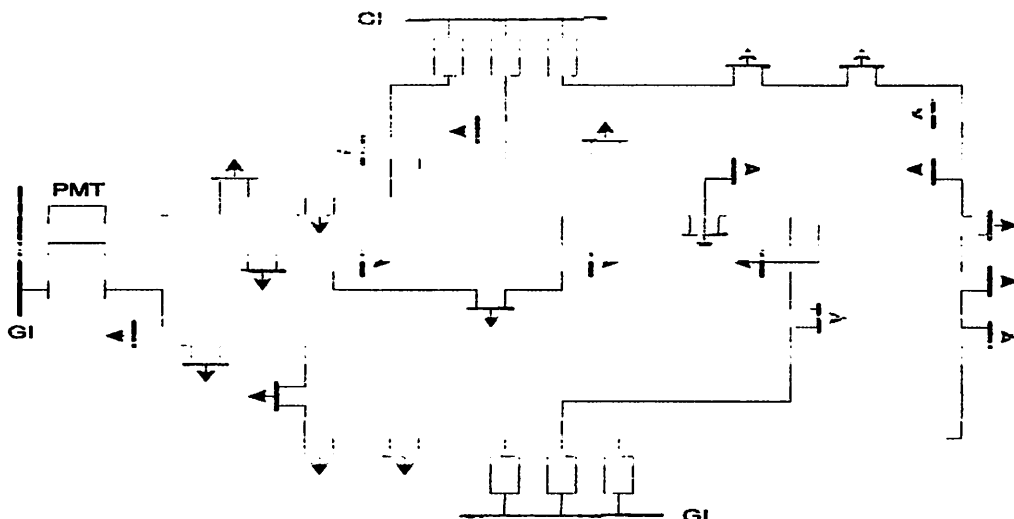
Struktur jaringan loop merupakan gabungan dari dua struktur jaringan radial. Dimana pada ujung kedua jaringan dipasang sebuah pemutus (CB) atau pemisah (DS). Pada saat terjadi gangguan, setelah gangguan dapat diisolir, maka pemutus atau pemisah ditutup sehingga aliran daya listrik ke bagian yang tidak terkena gangguan tidak terhenti. Struktur jaringan loop mempunyai keandalan yang baik, sehingga biaya pembangunannya lebih mahal dibandingkan stuktur jaringan radial.



**Gambar 2.4**  
**Jaringan Tegangan Menengah Struktur Loop**  
 yang dipasok dari satu sumber.

### 2.3.2.3. Struktur jaringan Grid atau Mesh (Anyaman)

Struktur jaringan ini merupakan kombinasi antara struktur jaringan radial dengan struktur jaringan loop. Titik beban memiliki lebih banyak alternative penyulang, sehingga bila salah satu penyulang terganggu maka dengan segera dapat digantikan oleh penyulang yang lain.



**Gambar 2.5**  
**Jaringan Tegangan Menengah Struktur Mesh**

## **2.4. Kualitas Daya Elektrik**

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 *UPFC*. Agar kerugian dapat diminimalkan dan kualitas tenaga listrik dapat optimal sehingga kontinuitas pelayanan semakin terjaga.

### **2.4.1. 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

- Gangguan satu saluran terbuka
- Gangguan dua saluran terbuka
- Impedansi seri tak seimbang

c. Gangguan simultan, merupakan dua jenis gangguan yang terjadi pada waktu yang bersamaan, berupa:

- Gangguan shunt dengan gangguan shunt
- Gangguan shunt dengan gangguan seri
- 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 phasa 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.

### 2.4.2. Daya dalam Sistem Tenaga Listrik

#### ➤ Daya aktif (*Active Power*)

Secara umum daya aktif dinyatakan oleh persamaan :

$$P = [ V ] [ I ] \cos \phi \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana :

V = tegangan

I = Arus

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

➤ **Daya Reaktif (*Reactive Power*)**

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

Persamaan daya reaktif adalah :

$$Q = [ V ] [ I ] \sin \varphi \dots\dots\dots(2.8)$$

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.

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

➤ **Daya Semu (*Apparent Power*)**

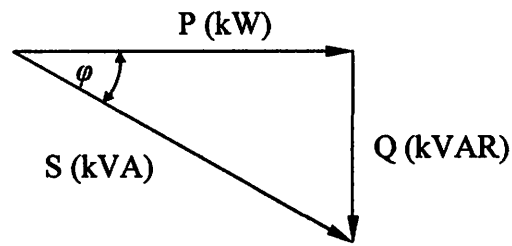
Daya semu merupakan penjumlahan secara vektoris antara daya aktif dan daya reaktif.

➤ **Power Factor**

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

$$\text{Faktor Daya} = \frac{\text{Daya Nyata(kW)}}{\text{Daya Semu(kVA)}} \dots\dots\dots(2.9)$$

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



Gambar 2.6  
Segitiga Daya

Dengan Faktor Daya:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{kW}{kVA}$$

$$kW = kVA \cos \varphi$$

$$kVAR = kVA \sin \varphi = kW \tan \varphi$$

$$\tan \varphi = \frac{kVAR}{kW}$$

dengan:

$\cos \varphi$  = Faktor Daya

P = Daya Nyata (kW)

S = Daya Semu (kVA)

Q = Daya Reaktif (kVAR)

### 2.4.3. Voltage Sag dan Voltage Swell

Kebutuhan akan energi listrik yang terus berkembang menghendaki suatu kontinuitas pencatuan dan juga memerlukan kualitas dari bentuk tegangannya.

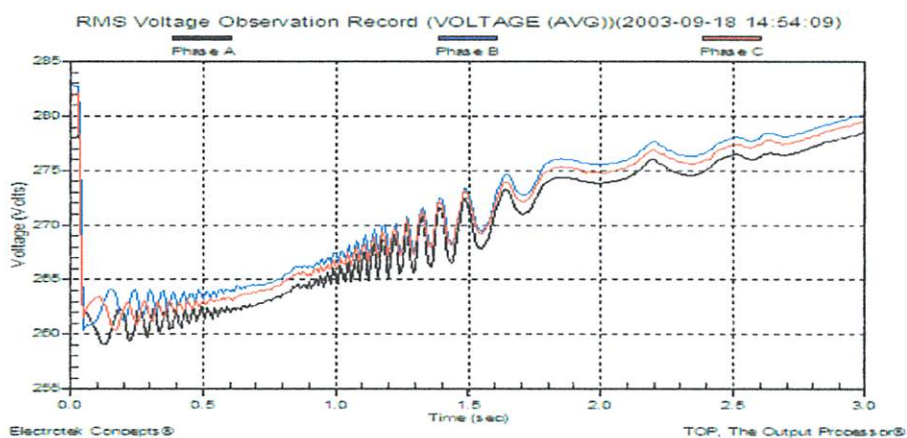
Gangguan terhadap tegangan yang biasa terjadi antara lain, *Voltage Sag*, *Voltage Swell*, fluktuasi tegangan, harmonisa, dan juga ketidakseimbangan tegangan.

Gangguan yang sangat berpengaruh pada kualitas tegangan adalah *Voltage Sag* dan *Voltage Swell*.

### 2.4.3.1. 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.



Gambar 2.7

#### Ilustrasi *Voltage Sag*

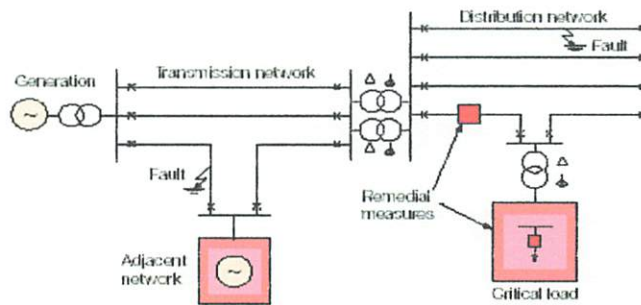
Gambar di atas menunjukkan suatu besaran rms *voltage sag* untuk suatu peristiwa *motor starting*. Peristiwa ini direkam dengan *Dranetz-BMI 5530 DataNode* [4].

2. Saat de-energisasi kapasitor
3. Gangguan hubung singkat
4. Pengoperasian pemanas elektrik
5. Gangguan kenaikan impedansi sumber
6. 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.



Gambar 2.8

Gambaran terjadinya *voltage sag*

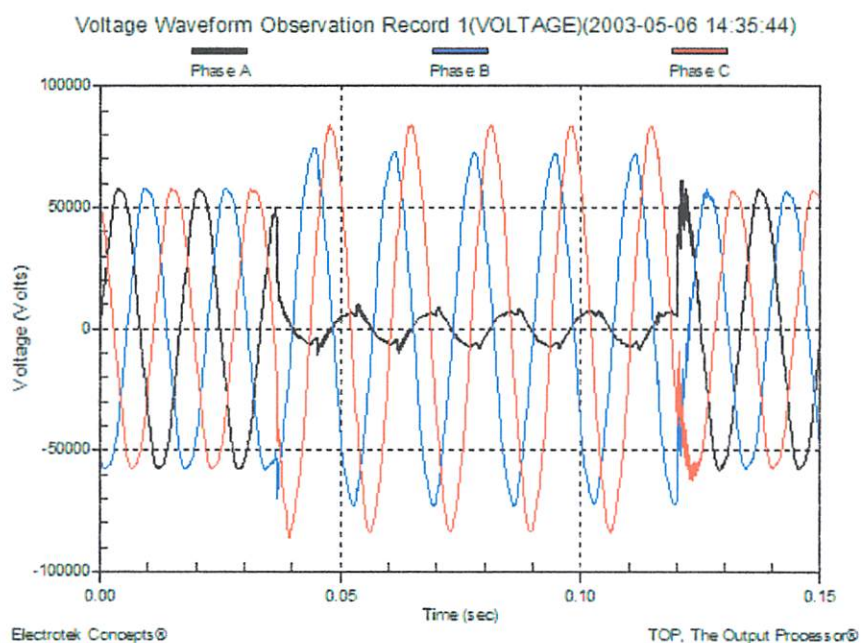
#### 2.4.3.2. Penyebab *Voltage Swell*

*Voltage Swell* 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.



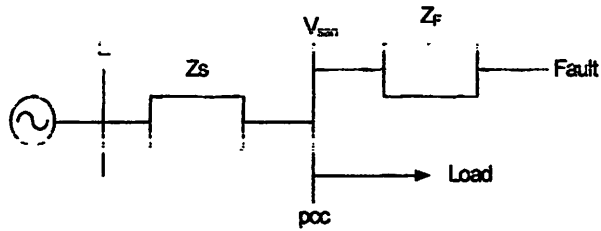
Gambar 2.9

### Ilustrasi *Voltage Swell*

Gambar 3 di atas menunjukkan terjadinya *Voltage Swell* yang dekat dengan titik gangguan. Bentuk gelombang ini direkam dengan *Dranetz-BMI 5530 DataNode* [4].

#### 2.4.3.3. 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 2.10.



Gambar 2.10

Model pembagi tegangan untuk *voltage sag* dan *voltage swell*

Dari Gambar 2.10 diatas 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:

$$V_{sag} = \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} \dots\dots\dots(1)$$

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:

$$V_{sags} = \frac{ZL}{Z_s + ZL} \dots\dots\dots(2)$$



## **2.5. Peralatan Elektronika Daya**

### **2.5.1. 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.

### **2.6.1. Metal Oxide Semiconductor FET (MOSFET)**

*Power MOSFET* adalah piranti elektronik daya konvensional yang beroperasi pada tegangan tinggi dan rugi konduksi yang rendah. Sebelum adanya kemajuan kinerja *power MOSFET*, gelanggang penyalak daya dulunya memang didominasi oleh BJT (*bipolar junction transistor*), dan SCR yang sulit untuk dimatikan (*turn-off*) dan lambat. MOSFET merupakan piranti elektronik yang dikendalikan oleh tegangan, dengan kebutuhan akan daya pengemudi yang relatif kecil saja. Sementara itu, pada transistor bipolar yang sifatnya dikendalikan oleh arus, ia memerlukan pengemudi dengan daya yang relatif lebih besar.

Dalam hal kapasitas masukan, untuk MOSFET bergantung pada ratingnya (kemampuan arusnya). Kapasitas ini dapat menjadi demikian besar, sehingga rangkaian pengemudinya dituntut memiliki kemampuan untuk mengisi dan membuang dengan cepat muatan kapasitas yang besar ini. Rugi penyaklaran (*switching losses*) dari piranti ini sangat kecil, hal ini menandakan bahwa

MOSFET memiliki transisi saat menyambung (*turn-on*) dan memutus (*turn-off*) sangat cepat.

### 2.5.3. *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.

### 2.5.4. Perbandingan Umum Antara Kinerja MOSFET dan IGBT

Perbandingan kinerja penyakelaran MOSFET dan IGBT secara singkat disajikan dalam Tabel 2.1. Untuk tujuan komparasi, Tabel 2.1 tersebut juga menyertakan pula perbandingannya dengan transistor bipolar. Besaran tegangan kolektor-emitor dalam kondisi menyambung atau jenuh ( $V_{CEsat}$ ) yang biasa digunakan untuk menggambarkan karakter suatu IGBT, dalam Tabel 2.1 tersebut ditranslasikan ke dalam besaran resistansi kolektor-emitor dalam kondisi menyambung ( $R_{on}$ ).

Karakteristik	MOSFET	IGBT	Bipolar
Kemampuan arus (A)	20	20	20
Kemampuan tegangan (V)	500	600	500

$R_{on}$ (ohm) Pada 25° C	0,2	0,24	0,18
$R_{on}$ (ohm) Pada 150° C	0,6	0,23	0,24
Waktu turun (nanodetik)	40	200	200

Tabel 2.1.  
Perbandingan tiga piranti penyalak daya untuk kemampuan  
(rating) yang setara

Dua fakta yang bersumber pada Tabel 2.1 tersebut adalah bahwa; pertama, 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.

Tabel 2.2 menyatakan perbandingan yang lebih umum mengenai karakteristik penyalak arannya. Disebabkan oleh struktur masukan gate nya, MOSFET dan IGBT merupakan piranti elektronik yang dikendalikan oleh tegangan, dengan kebutuhan akan daya pengemudi yang relatif kecil saja. Sementara itu, pada transistor bipolar yang sifatnya dikendalikan oleh arus, ia memerlukan pengemudi dengan daya yang relatif lebih besar.

Dalam hal kapasitansi masukan, untuk MOSFET dan IGBT bergantung pada ratingnya (kemampuan arusnya). Kapasitansi ini dapat menjadi demikian besar, sehingga rangkaian pengemudinya dituntut memiliki kemampuan untuk mengisi dan membuang dengan cepat muatan kapasitansi yang besar ini.

IGBT tampaknya memang menawarkan rating kemampuan arus yang lebih baik. Namun demikian, kekurangan dan kelebihan masing-masing piranti yang tercantum pada Tabel 2.2 tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk memilih salah satu di antara ketiganya.

Karakteristik	MOSFET	IGBT	Bipolar
Tipe pengemudi	Tegangan	Tegangan	Arus
Daya pengemudi	minimum	Minimum	Rendah
Tingkat kerumitan pengemudi	Sederhana	Sederhana	Cukup atau sedang
nilai tegangan drop di ujung-ujung terminal	Sangat rendah; rendah pada teg. tinggi	Sangat tinggi (terpengaruh oleh kecepatan pengemudi)	Cukup (sangat terpengaruh oleh kecepatan pengemudi)
Rugi penyaklaran	Sangat rendah	Rendah sampai sedang (dipengaruhi oleh rugi konduksi)	Sedang sampai tinggi (dipengaruhi oleh rugi konduksi)

Tabel 2.2  
Perbandingan Karakteristik Piranti Penyaklar Daya

Untuk mempertahankan nilai resistansi yang tetap rendah, pembuat IGBT membuat kemampuan arus yang lebih rendah untuk tipe yang lebih cepat. Sebagai contoh, Perusahaan *International Rectifier* (IR) di pasaran menawarkan tiga tipe IGBT; yakni tipe standar, cepat dan ultra cepat. IR mendeskripsikan kemampuan arus dengan perbandingan terbalik terhadap kecepatan penyaklarannya.

Parameter terakhir dalam Tabel 2.2 tersebut adalah rugi penyaklaran (*switching losses*), yang mencerminkan kecepatan penyaklaran dari ketiga piranti elektronik tersebut. Untuk MOSFET, baik transisi saat menyambung (*turn-on*) dan memutus (*turn-off*) sangat cepat. Sedang untuk IGBT, kita dihadapkan pada kenyataan bahwa ada perubahan dalam hal kecepatan penyaklaran versus kemampuan

arus; jenis yang lebih cepat akan mengalami rugi konduksi yang lebih tinggi. Waktu penyakelaran pada IGBT sebagian besar didominasi oleh waktu saat menyambung, sehingga secara garis besar membatasi penggunaannya dalam sistem yang beroperasi pada laju penyakelaran yang lebih rendah daripada 100 kHz.

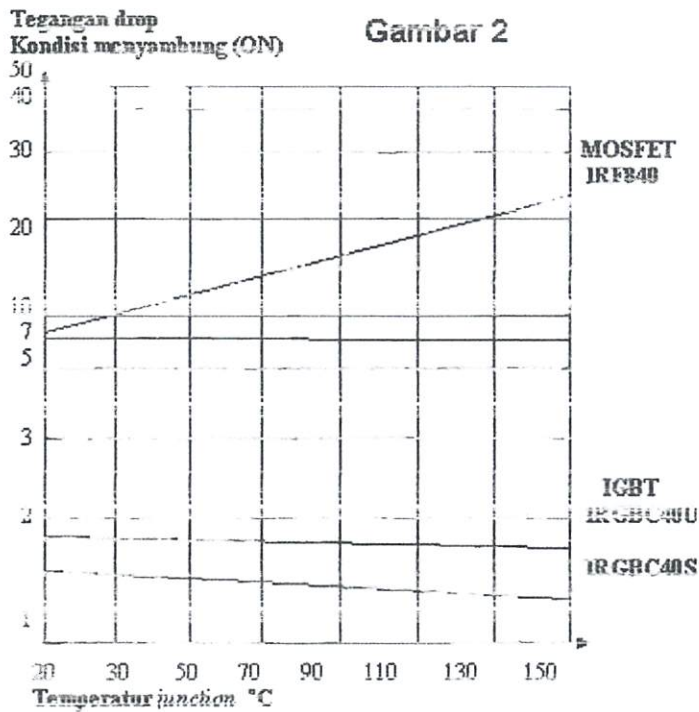
Rating Tegangan (Volt)	IGBT	100	300	600	1200
	MOSFET	100	250	500	1000
Tegangan drop untuk 1,7 ampere per mm <sup>2</sup> pada temperatur 100°C (Volt)	IGBT	1,5	2,1	2,4	3,1
	MOSFET	2,0	11,2	26,7	100

Tabel 2.3  
Perbandingan tegangan drop dan rating tegangan  
antara IGBT dan MOSFET

Tabel diatas menunjukkan perbandingan IGBT dengan MOSFET dalam rugi konduksi yang dinyatakan dalam bentuk tegangan drop (tegangan yang terdapat pada kedua ujung terminalnya saat pirantai tersebut dalam keadaan menyambung) untuk kondisi kemampuan arus pada luasan (area) piranti maupun temperatur yang sama. Pada MOSFET, untuk kemampuan arus yang sama per satuan luasan silikon, resistansi dalam kondisi menyambung naik secara eksponensial terhadap rating tegangannya. Sementara itu, untuk piranti IGBT (yang dinyatakan dalam besaran tegangan kolektor-emitor jenuh ketimbang resistansi dalam kondisi menyambung) lebih mampu mempertahankan rugi konduksi yang rendah untuk semua rating tegangan. Dari Tabel 2.3 tersebut juga dapat diketahui bahwa MOSFET memiliki rating tegangan yang sedikit lebih rendah daripada IGBT.

Perbandingan MOSFET dan IGBT untuk luasan die (irisian tipis bahan semikonduktor yang dipakai untuk membuat transistor atau piranti semikonduktor

lainnya) yang sama, secara grafis dinyatakan dalam [Gambar 2.11](#). Pada gambar tersebut, jelas tampak bahwa IGBT memiliki rugi pada kondisi menyambung lebih rendah. Grafik tersebut menunjukkan tegangan drop dalam kondisi menyambung untuk sebuah MOSFET dan dua IGBT hasil produksi IR untuk arus beban 10 ampere. Piranti yang memiliki rugi yang paling rendah dalam gambar tersebut adalah IRGBC40S, yakni IGBT tipe standar. Tipe ultra cepatnya, IRGBC40U menawarkan penyaklaran yang lebih cepat, namun rugi dalam kondisi menyambungnya juga lebih tinggi.

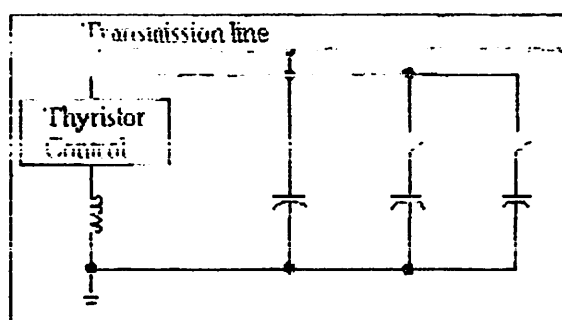


Gambar 2.4  
tegangan drop dalam kondisi menyambung  
untuk sebuah MOSFET dan dua IGBT

## 2.6. Peralatan Kompensasi dalam Sistem Tenaga Listrik

### 2.6.1. *Static VAR Compensator (SVC)*

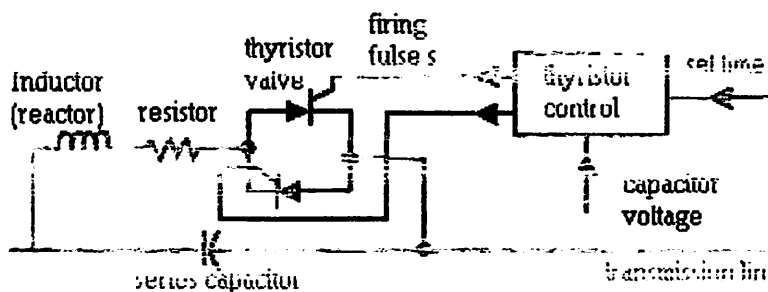
Perkembangan teknologi FACTS telah mengalami dua generasi. Generasi pertama menghasilkan dua jenis peralatan. Alat pertama diberi nama *Static Var Compensator (SVC)* yang sudah diimplementasikan pada jaringan transmisi listrik semenjak pertengahan tahun 70-an. SVC berfungsi sebagai pemelihara kestabilan tegangan dan dinamis tegangan dalam batasan yang sudah ditentukan pada jaringan transmisi berjarak jauh dan herbeban tinggi (*heavily loaded*). Fungsi SVC diperoleh dengan menggunakan thyristor yang secara cepat dapat menghubungkan atau memutuskan induktor ataupun kapasitor pada jaringan transmisi. Namun demikian, alat ini tidak dapat dipergunakan sebagai alat pengendali aliran daya listrik aktif (*active power*) yang sangat vital dalam sistem jaringan transmisi listrik AC. Selain itu, SVC juga dipakai sebagai alat efisiensi jika terjadi turunnya tegangan dari transmisi secara drastis. Contoh awal pertama pemasangan SVC dilaksanakan tahun 1978 pada jaringan transmisi 115kV Minnesota Power & Light dan telah berhasil menunjukkan perbaikan kondisi stabilisasi dan tegangan pada jaringan transmisi tersebut. Gambar 2.12 menunjukkan contoh dari topologi SVC.



Gambar 2.12  
*Static VAR Compensator*

### 2.6.2. NGH – Sub Synchronous Resonance (SSR)

Alat berikutnya yang dikembangkan pada generasi pertama diberi nama NGH-SSR (*Narain G. Iingorani – SubSynchronous Resonance*) Damper. Alat ini dirancang untuk mengatasi permasalahan *subsynchronous resonance* (SSR) yang ditemukan pada jaringan transmisi listrik AC. Jaringan transmisi 500kV Southern California Edison dijadikan tempat pemasangan pertama dari alat ini pada tahun 1990-an setelah SSR mengakibatkan kerusakan fatal pada salah satu generatornya. NGH-SSR seperti yang ditunjukkan gambar 2.13 juga terdiri dari *thyristor* yang dihubungkan dengan induktor dan tahanan secara seri. Alat inilah yang kemudian menjadi cikal bakal dari salah satu alat yang dikembangkan dalam generasi kedua FACTS yaitu alat yang dikenal dengan nama *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC).



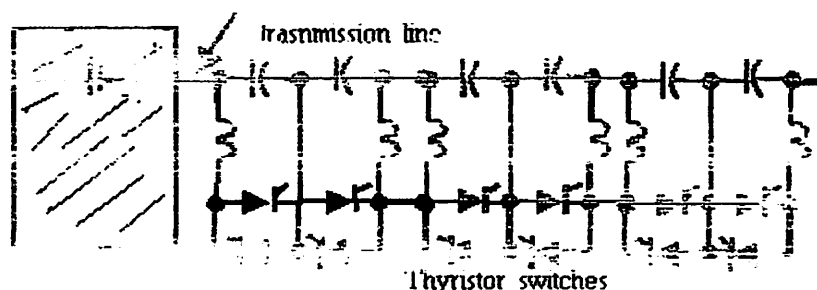
Gambar 2.13  
NGH - *SubSynchronous Resonance*

### 2.6.3. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

Semakin berkembangnya teknologi dibidang pembuatan *Thyristor* mendorong terciptanya generasi kedua dari FACTS. Pada generasi kedua beberapa peralatan FACTS baru telah dikembangkan. Pertama adalah alat yang diberi nama *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) yang berfungsi sebagai pengendali impedansi dari jaringan transmisi. Seperti diketahui



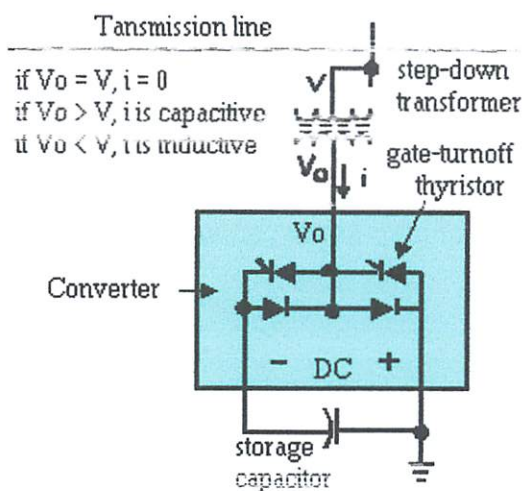
impedansi sepanjang jaringan transmisi umumnya bersifat induktif sedangkan yang bersifat resistif hanya berkisar 5 sampai 10 persen. Ini berarti akan terasa sangat besar manfaatnya apabila kita mampu mengendalikan impedansi transmisi yang bersifat induktif pada kondisi stabil (*steady state impedance*). Hal ini dapat ditempuh dengan cara penambahan kapasitor dan induktor secara seri. Penghubungan kapasitor secara seri akan berakibat pengurangan impedansi pada transmisi sedangkan penghubungan induktor secara seri akan berarti penaikan impedansi pada transmisi yang sama. Gambar 2.14 menunjukkan contoh dari TCSC yang telah dipasang pada jaringan transmisi 500kV milik Bonneville Power Administration (BPA) di negara bagian Oregon. Studi kasus pemasangan TCSC yang telah dilaksanakan oleh Electric Power Research Institute (EPRI) pada satu jaringan transmisi menunjukkan bahwa TCSC berhasil meningkatkan kuantitas aliran daya (dalam MW) sebanyak 30% dengan sekaligus menjaga stabilitas sistim jaringan transmisi tersebut. Hal ini yang mengakibatkan pemasangan TCSC, menurut studi kasus pada jaringan transmisi tersebut, akan memberikan keuntungan sebesar kurang lebih \$68 juta US dolar setiap tahunnya.



Gambar 2.14  
*Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)*

#### 2.6.4. *Static Condenser* (STATCON)

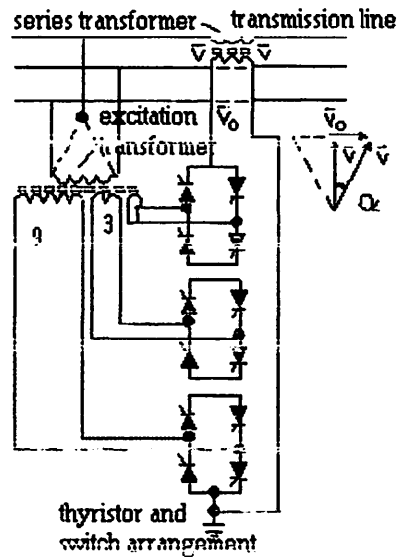
Alat yang kedua diberi nama *Static Condenser* (STATCON) dan berfungsi sebagai penyedia Volt Amp Reactive (VAR) untuk menjaga kestabilan tegangan pada jaringan transmisi yang panjang dan berbeban tinggi (*heavily loaded*). Pada akhirnya nanti, STATCON diharapkan untuk dapat menggantikan pemakaian alat *Rotating Synchronous Condensers* yang kini umum dipasang. STATCON adalah alat FACTS pertama yang menggunakan tipe *thyristor* berbeda dari peralatan FACTS sebelumnya. Jenis *thyristor* yang dipakai adalah jenis GTO (*Gate Turned-Off*). Pada dasarnya, STATCON adalah alat yang berbasis inverter tiga fasa yang dihasilkan oleh tegangan satu arah (dc) dari kapasitor seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 2.15. Pada gambar tersebut, jika tegangan  $V_0$  lebih tinggi (atau lebih rendah) dari pada tegangan sistem transmisi  $V$ , maka selisih sudut fasa dari kedua tegangan tersebut akan menentukan jumlah arus listrik yang mengalir serta arus listrik akan menjadi lead (atau lag). Dengan jalan demikian, maka daya reaktif beserta arahnya pada sistem transmisi akan dapat dikendalikan secara cepat dan berkelanjutan (*continuous*). Dua contoh studi kasus pemasangan STATCON di Amerika Serikat telah dilaksanakan dengan hasil yang memuaskan. Percobaan pertama adalah pemasangan 1 Mvar STATCON pada jaringan transmisi milik Orange & Rockland Utilities Inc. di negara bagian New York pada tahun 1989. Sedangkan studi kasus berikutnya adalah pemasangan 100-Mvar STATCON pada tahun 1995 di jaringan transmisi Sullivan milik Tennessee Valley Authority (TVA) di negara bagian Tennessee.



Gambar 2.15  
 Static Condenser (STATCON)

**2.6.5. Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPAR)**

Selanjutnya adalah alat FACTS yang disebut TCPAR kependekan dari *Thyristor Controlled Phase angle Regulator*. Fungsi dari alat ini tidak lain adalah sebagai pengendali selisih sudut fasa pada tegangan dari kedua ujung jaringan transmisi yang sama. Fungsi tersebut dimungkinkan dengan cara penyuntikan tegangan secara seri pada jaringan transmisi listrik. Gambar 2.16 menunjukkan konsep dari TCPAR ini. Penambahan sudut fasa  $\alpha$  pada tegangan transmisi  $V$  dicapai dengan cara menambahkan tegangan  $V_q$  yang tegak lurus terhadap  $V$ . Tegangan  $V_q$  sendiri dihasilkan dari tegangan sekunder dari transformer yang dihubungkan ke dua fasa dari sistim transmisi tiga fasa ini. Percobaan pemasangan TCPAR telah dilaksanakan dengan sukses diberbagai lokasi jaringan transmisi di Amerika Serikat. Salah satu contoh adalah pemasangan TCPAR di jaringan transmisi 230kV milik Minnesota Power yang telah terbukti mampu menghasilkan selisih sudut fasa dengan sangat cepat.

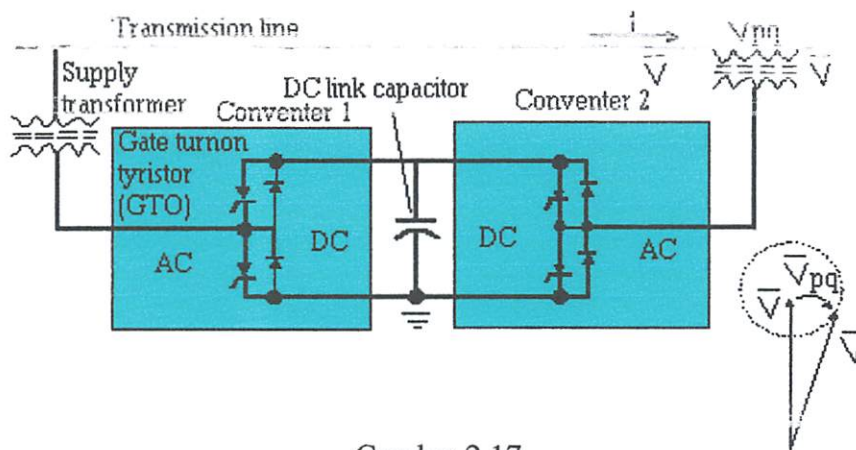


Gambar 2.16  
*Thyristor Controlled Phase angle Regulator (TCPR)*

### 2.6.6. Unified Power Flow Controller (UPFC)

Alat selanjutnya adalah konsep lain dari pengaturan selisih sudut fasa seperti pada TCPR. Alat ini diberi nama *Unified Power Flow Controller (UPFC)* yang mana perancangannya berbasis inverter dengan menggunakan *Thyristor*. Sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.17, pada UPFC, vektor tegangan  $V_{pq}$  yang dihasilkan oleh inverter disuntikkan secara seri ke jaringan transmisi. Tegangan searah (dc) yang digunakan inverter ini didapatkan dari hasil penyusutan (*rectification*) tegangan dari transmisi yang sama. UPFC merupakan alat kendali daya aktif dan daya reaktif secara terpisah pada transmisi listrik dan dapat dipasang pada ujung pengirim maupun penerima daya. Lebih penting lagi, UPFC juga merupakan alat pengendali daya yang sangat fleksibel karena dapat mengatur salah satu ataupun kombinasi parameter dasar dari sistem aliran daya yaitu tegangan transmisi, impedansi transmisi, dan selisih sudut fasa transmisi. Hal ini merupakan suatu keuntungan karena dengan pemasangan satu UPFC yang dapat mengendalikan ketiga parameter tersebut, maka tidak hanya sistem jaringan

transmisi akan menjadi lebih baik, tetapi juga akan menjadi lebih murah dan mudah dalam pemeliharaan dan pengoperasiannya. Dengan kata lain, pemasangan satu UPFC akan sama halnya dengan pemasangan alat TCSC, STATCON dan TCPR secara bersamaan. Studi kasus terhadap UPFC, baik itu dalam skala besar maupun kecil telah berhasil dilaksanakan. Sebagai contoh, 1060 MVA UPFC telah dipasang pada jaringan transmisi 500kV yang menghubungkan kota Phoenix (negara bagian Arizona) dengan kota Las Vegas (negara bagian Nevada) dan kota Los Angeles (negara bagian California). Gangguan tiga fasa pada satu titik di jaringan tersebut disimulasikan untuk menginvestigasi reaksi UPFC dan peralatan konvensional. Hasil simulasi menunjukkan UPFC memberikan reaksi lebih stabil dibandingkan dengan reaksi peralatan konvensional. Tegangan dari transmisi menunjukkan lebih kurang osilasinya dengan menggunakan UPFC dibandingkan pemasangan peralatan lama. Dengan demikian, UPFC merupakan alat yang dapat diandalkan untuk pengendalian aliran daya listrik dengan sekaligus menjaga kestabilan sistem jaringan transmisi itu sendiri.



Gambar 2.17  
Unified Power Flow Controller (UPFC)

**BAB III**  
**PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN**  
***UPFC DENGAN D-Q control***

**3.1. Sistem Pengendalian PWM Sinusoida**

**3.1.1. Strategi kendali D – Q untuk UPFC**

Kendali sistem elektronik mempunyai Respon lebih cepat yang dibandingkan ke kendali sistem didasarkan dengan mesin tradisional. Oleh karena itu untuk memperoleh kemampuan yang maksimum dari UPFC, diperlukan suatu sistem kendali dengan suatu respon yang lebih cepat . akan menguntungkan, jika time-varying persamaan dapat diubah ke suatu suatu time-invarian yang dapat di set . Ini akan mengakibatkan penyederhanaan kalkulasi kedua-duanya untuk kondisi-kondisi mantap dan terutama ketika kita sedang mempertimbangkan suatu sistem tenaga sangat besar. R.H.Park memperkenalkan kendali d-q. banyak pengoperasian UPFC yang menggunakan control strategi yang didasarkan pada d-q axis teori . control d-q axis ini memungkinkan UPFC untuk mengikuti perubahan nilai-nilai acuan seperti tegangan arus bolak-balik, tegangan DC, daya nyata dan daya reaktif yang terhubung dengan saluran.dengan pengontrolan D-Q axis ini diharapkan mampu menghasilkan tanggapan yang cepat dan mengurangi interaksi antara arus,tegangan, daya aktif dan reaktif. Di sistem kendali ini, transformasi 3-phase ke d-q dan d-q ke 3-phase dilaksanakan menurut transformasi Park'S , dimana daya reaktif dan riil dapat dikendalikan secara individu, meski sedang mengatur lokal bus voltage.

Ooi et Al., mengusulkan suatu sistem kendali untuk UPFC yang mana didasarkan pada prinsip bahwa daya riil dipengaruhi oleh sudut fase sedangkan

daya reaktif adalah bergantung pada besar tegangan. Oleh karena itu untuk mengendalikan daya riil yang mengalir pada jalur transmisi, rangkaian UPFC dan control melakukan penyesuaian sudut, tegangan untuk mengatur daya aktif dan reaktif yang mengalir, dengan begitu tegangan yang diinginkan pada rangkaian dapat dikendalikan.

➤ Shunt inverter control circuit

shunt inverter dapat dikendalikan dua cara berbeda, viz. *VAR control mode* and *Automatic voltage control mode*.

- *VAR control mode* : inputan berupa var induktif atau kapasitif yang dibutuhkan.
- *Automatic voltage control mode* : bertujuan untuk mempertahankan tegangan transmisi agar tetap atau mendekati nilai referensi.

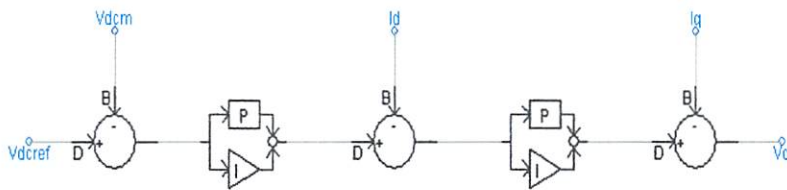
Pengontrol silang q-axis menggunakan tegangan  $V_q$ , untuk mengendalikan d-axis arus  $I_d$  dan d-axis menggunakan tegangan  $V_d$ , untuk mengendalikan q-axis arus  $I_q$ . Ini membuat daya aktif dan daya reaktif mungkin untuk dikendalikan dengan bebas. Dalam simulasi ini inverter shunt dipakai dengan model *Voltage control mode*. Pada gambar 3.1 ditunjukkan model untuk pengontrolan tegangantegangan dc yang terukur dibandingkan dengan tegangan referensi, jika ada kesalahan maka akan di hubungkan ke control pi yang kemudian akan dihasil kan tegangan  $V_q$ . arus  $I_d$  Dan  $I_q$  yang mengalir pada saluran transmisi didapat lewat transformasi Park'S.

Control d-q dengan Transformasi Park'S ditunjukkan pada rumus di bawah ini:

$$\begin{bmatrix} V_{xds} \\ V_{xqs} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{xa} \\ V_{xb} \\ V_{xc} \end{bmatrix} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{V_{xqs}}{V_{xds}}$$

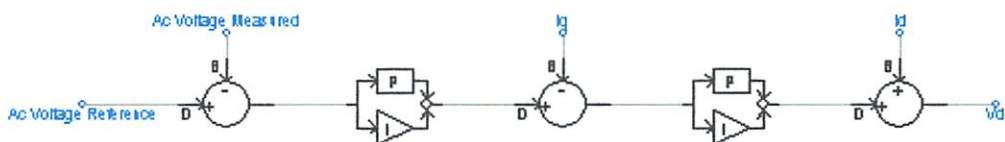
$$\begin{bmatrix} V_{xds} \\ V_{xqs} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{xa} \\ V_{xb} \\ V_{xc} \end{bmatrix}$$

Berikut adalah gambar control yang di susulkan Park's:



Gambar 3.1 Control Tegangan Dc

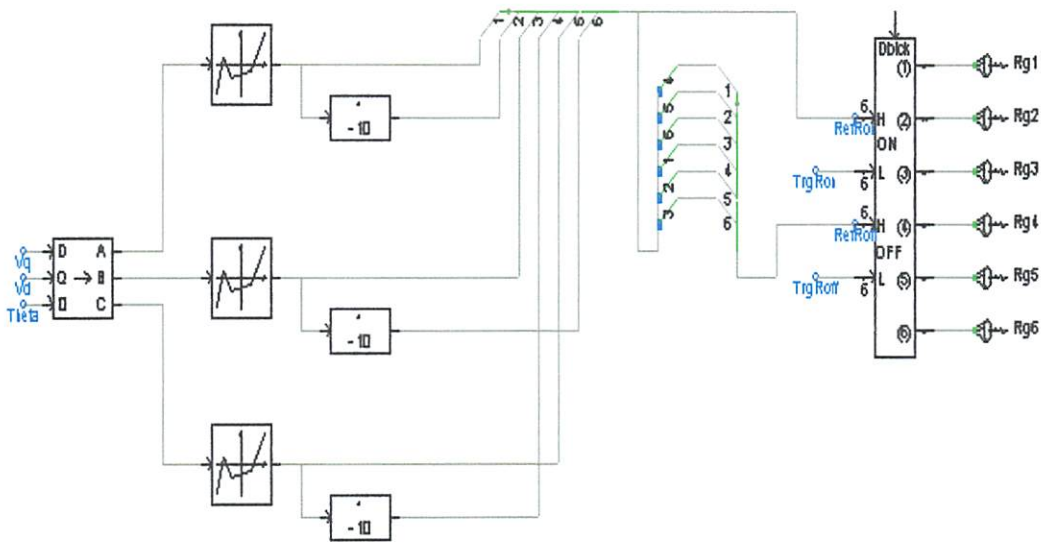
Dengan cara yang sama, Tegangan ac yang masuk ke upfc ter ukur dalam satuan p.u ( $V_{pum}$ ) dan dibandingkan tegangan ac yang di set (di sini 1.0 p.u).jika ada kesalahan maka control pi akan bekerja dan akan menyuntikan tegangan Vd. Seperti yang di tunjukan dalam gambar 3.2 :



Gambar 3.2 Rangkaian Control Tegangan Ac



Output dari  $V_d$  dan  $V_q$  di gunakan untuk sinyal penyalan pada 6 GTO pada inverter, yang di tunjukkan pada gambar 3.3 yang ada pada software PSCAD. Sinyal yang di gunakan pada software PSCAD yaitu dengan logika H-L (High-Low), perbandingan sinyan pembawa dengan sinyal tringular di gunakan untuk membuka dan menutup gerbang GTO



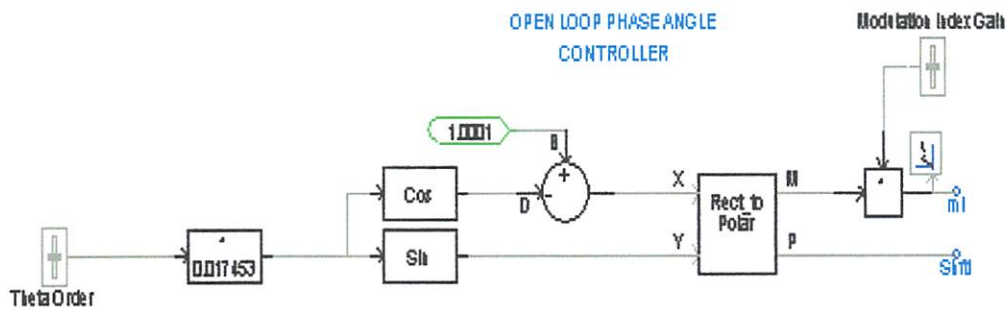
Gambar 3.4 Rangkaian Firing Pulse Generation

➤ Series Inverter Control Circuit

Inverter UPFC yang terhubung seri dengan transmisi line digunakan untuk mengontrol magnitud dan sudut fasa tegangan.sasaran utama dari pengontrolan ini agar saat terjadi gangguan scsegera mungkin menginjeksi tegangan agar tidak terdapat jatuh tegangan.besar tegangan yang di injeksikan dapat diperoleh dengan banyak cara :

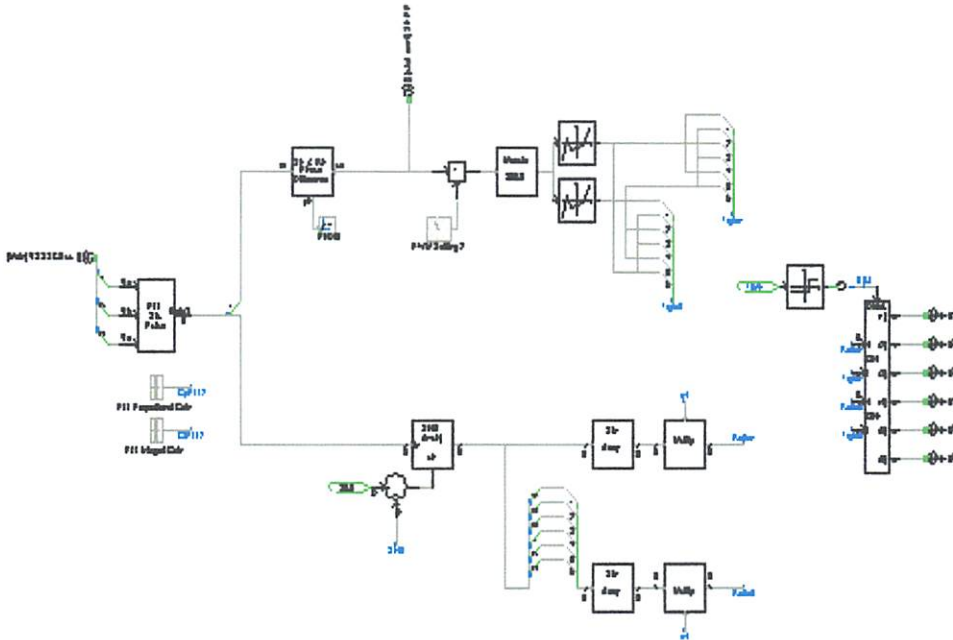
- Direct voltage injection mode : acuan input mengijeksi magnitude tegangan dan sudut fasa secara langsung pada transmisi yang terhubung seri.
- phase angle shifter emulation mode : acuan input yaitu pergeseran tegangan sumber dan tegangan penerima
- line impedance emulation mode : input acuan yaitu menginjeksikan impedansi pada saluran tranmisi
- automatic powerflow control mode : input acuan yaitu menjaga kestabilan P dan Q saat terjadi gangguan pada saluran transmisi.

Pada simulasi ini cara pengontrolan untuk inverter seri menggunakan Direct voltage injection mode,yaitu menyuntikkan tegangan per theta. Rangkaian control inverter seri di tujukkan pada gambar 3.5 dengan *open loop phase angel controller* , manghasilkan index modulasi, mi dan shift



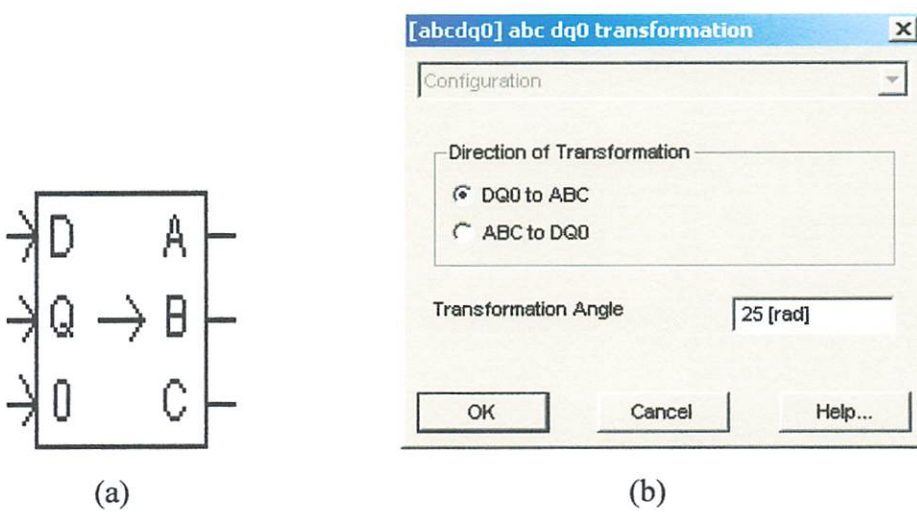
Gambar 3.5 Rangkaian control sudut fasa inverter seri

Index modulasi,mi dan shift digunakan untuk buka tutup gerbang GTO,yang berlogika H-L (high- low) yang ditunjukkan pada gambar 3.6



Gambar 3.6 Circuit For Pulse Generation

Berikut Bentuk logika d-q to abc/abc to d-q yang di gunakan pada UPFC :



Gambar 3.7 Bentuk logika transformasi d-q to abc (a)

Configurasi setting dari komponen (b)

Logika di atas di buat berdasarkan rumus d-q to abc, Maupun abc to d-q di mana bentuk persamaannya seperti dibawah ini :

- d-q to abc

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix}$$

- abc to d-q

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

### 3.1.2. PWM Sinusoida

Gelombang sinusoidal pada tiga VSC dikendalikan dengan teknik PWM. Rencana Kendali berdasarkan PWM berkenaan dengan UPFC diterangkan pada bagian ini.. 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 penyaklaran VSC adalah didasarkan pada suatu teknik PWM sinusoidal, yang sederhana dan memberikan respon yang baik. Sejak *custom power* adalah secara relatif sebagai aplikasi *low-power*, metode PWM menawarkan suatu pilihan yang lebih fleksibel dibandingkan dengan metode *Fundamental Frequency Switching* (FFS) yang diunggulkan dalam aplikasi FACTS. 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.

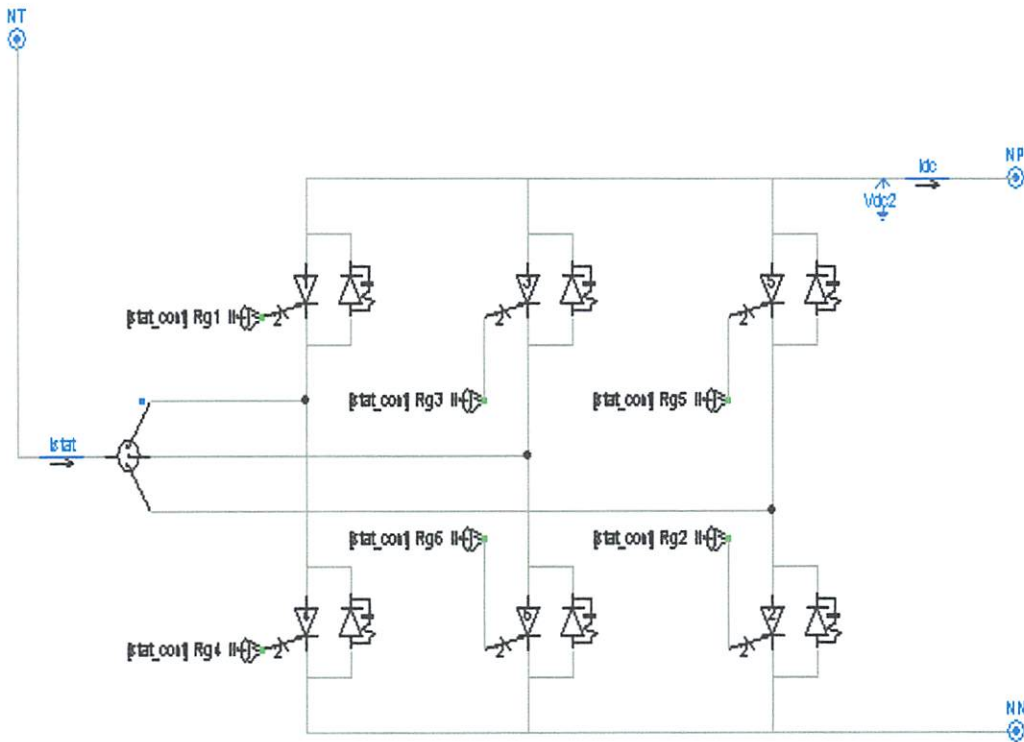
### 3.1.3. Aksi Kontrol PWM Sinusoidal Terhadap UPFC

Prinsip dari UPFC adalah menerima dan memproses sinyal *error* dari sumber. Hasilnya kemudian dimasukan 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*).

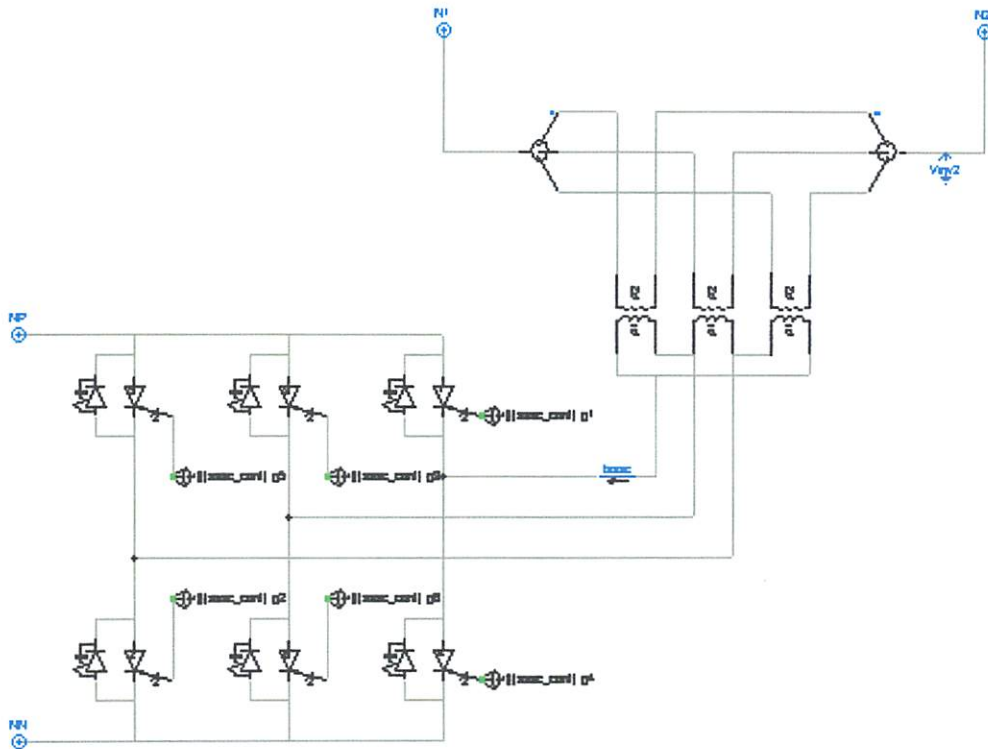
Sinyal *error* ini berbentuk sinusoidal yang dimodulasikan dengan sinyal gigi gergaji sebagai sinyal *carrier*.

*Output* dari PWM di atas digunakan untuk mentrigger rangkaian *switching* yang terdiri atas 6 GTO tiap fasa terdiri dari 2 GTO.

Berikut gambar inverter dengan 6 GTO :



Gambar 3.8 Rangkaian Inverter yang terhubung seri dengan saluran transmisi



Gambar 3.9 Rangkaian Inverter yang terhubung paralel dengan saluran transmisi

### 3.2. Aksi Kontrol Proporsional Integral (PI)

#### 3.2.1. Umum

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 *vessel* 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 : PII 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.

### 3.2.2. Prinsip-Prinsip Pengendalian Proses

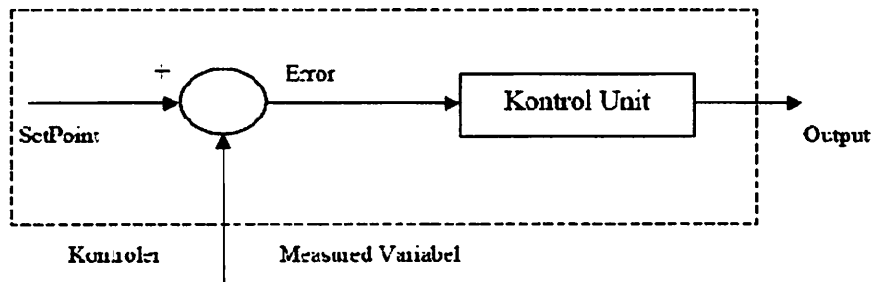
Dalam pengendali proses, operator mengerjakan empat langkah sebagai berikut: *Mengukur, Membandingkan, Menghitung dan Mengoreksi*. Keempat langkah yang dilakukan operator itu, seluruhnya dapat dikerjakan oleh instrumentasi. Manusia kemudian sama sekali tidak menentukan keempat langkah tadi. Operator 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*.

### 3.2.3. Prinsip Kerja Pengendali

Ada tiga jenis pengendali kontinu, 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 kontinu 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.



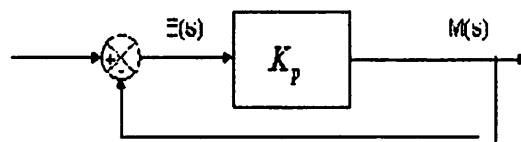
Gambar 3.10  
Kontroler Dan Diagram Kotaknya

### 3.2.4. 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 3.2 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 negative (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan).



Gambar 3.11  
Diagram Blok Kontroler Proporsional

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

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

$$PB = \frac{1}{K_p} \cdot 100\%$$

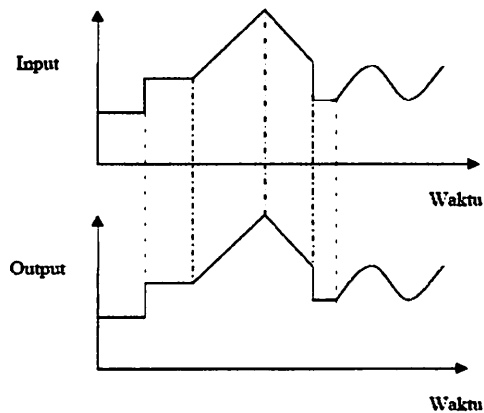
Dimana:

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 3.3 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 3.12

#### 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.

#### 3.2.5. 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.

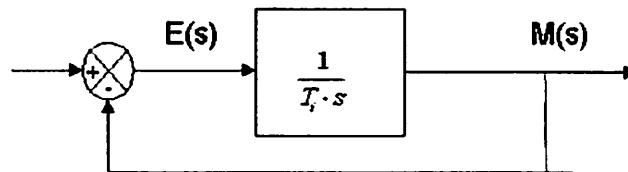
Kalau diteliti dengan seksama, *offset* dapat terjadi di sistem pengendali proporsional, karena pengendali proporsional selalu membutuhkan *error* (dalam hal ini *input ke unit control*) untuk menghasilkan suatu *output*. Kalau tidak ada *error*, *output* yang keluar dari pengendali proporsional hanyalah 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 seperti halnya sebuah integral. Keluaran kontroler sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Keluaran kontroler ini merupakan jumlahan yang terus menerus dari perubahan

masukannya. Kalau sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan.

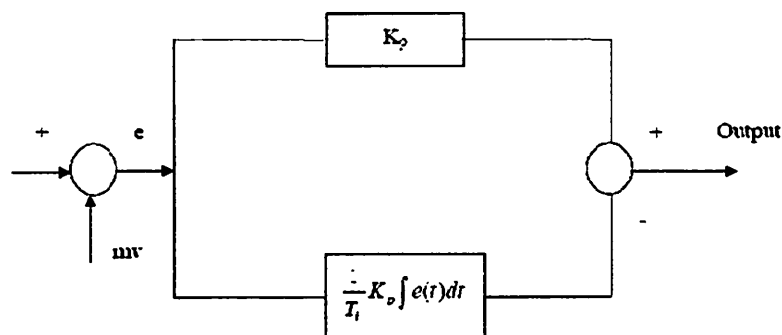
Gambar 3.4 menunjukkan blok diagram antara kesalahan dengan keluaran suatu kontroler integral.



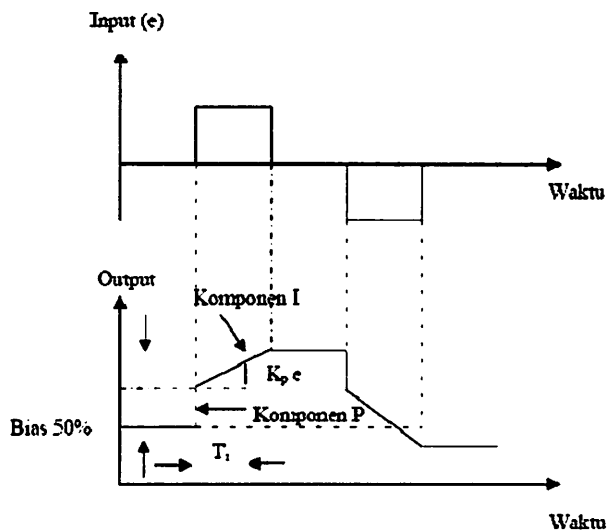
Gambar 3.13  
Blok Diagram Kontroler Integral

### 3.2.6. Pengendali Proporsional Integral (*PI Controller*)

Karena sifatnya yang tidak mengeluarkan *output* sebelum selang waktu tertentu, pengendali integral jadi memperlambat respon, walaupun *offset* hilang oleh karenanya. Untuk memperbaiki lambatnya respon, umumnya pengendali integral dipasang paralel dengan pengendali proporsional seperti *gambar 3.7*. Gabungan kedua pengendali tersebut lazim disebut dengan pengendali PI atau PI kontroler, dan pengendali dikatakan punya dua mode, yaitu P dan I.



Gambar 3.14  
Diagram Kotak Pengendali PI



Gambar 3.15

Hubungan Input-Output Pengendali PI dalam Fungsi Waktu

### 3.3. Kompensasi UPFC Pada Sistem Distribusi 20 kV

#### 3.3.1. Sistem Distribusi Tanpa Kompensasi UPFC

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 UPFC 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*. Dalam hal ini UPFC dilengkapi dengan pengendali PI dan kontrol SPWM.



### **3.3.2. Sistem Distribusi Dengan Kompensasi UPFC**

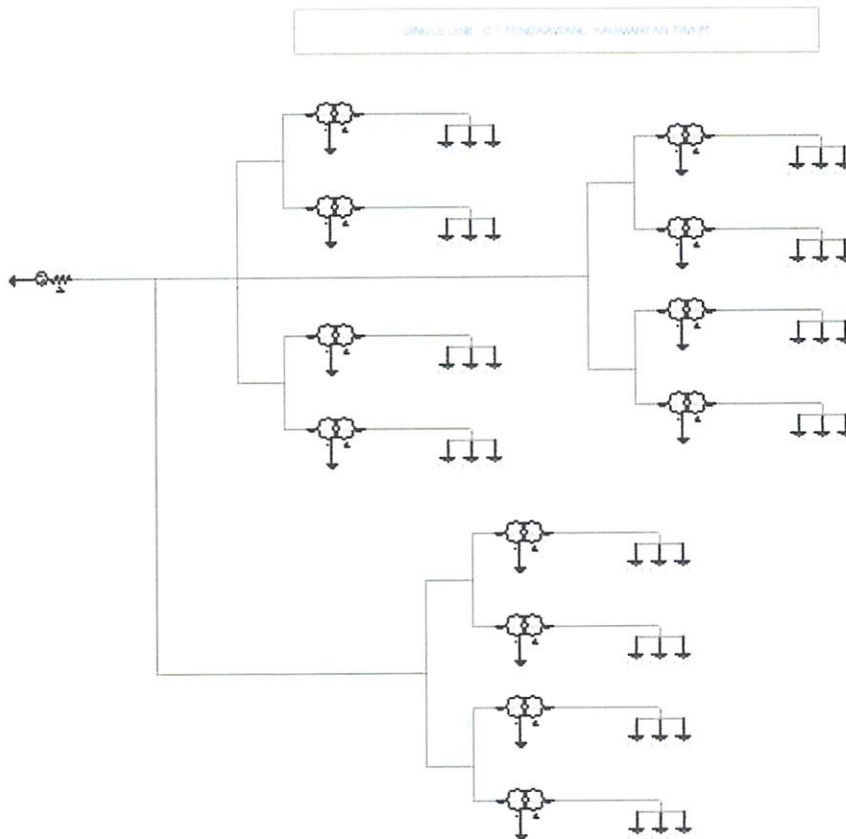
Ketidakstabilan tegangan dalam sistem distribusi bisa menyebabkan terjadinya pemborosan energi listrik. Ketidakstabilan itu dapat diartikan tegangan pada suatu fase lebih besar, lebih kecil atau berfluktuasi terhadap tegangan standar. Sedangkan akibat pemborosan energi listrik itu maka timbul panas sehingga bisa menyebabkan pertama kerusakan isolator peralatan yang dipakai. Ke dua 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 memcrintahkan 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 UPFC.

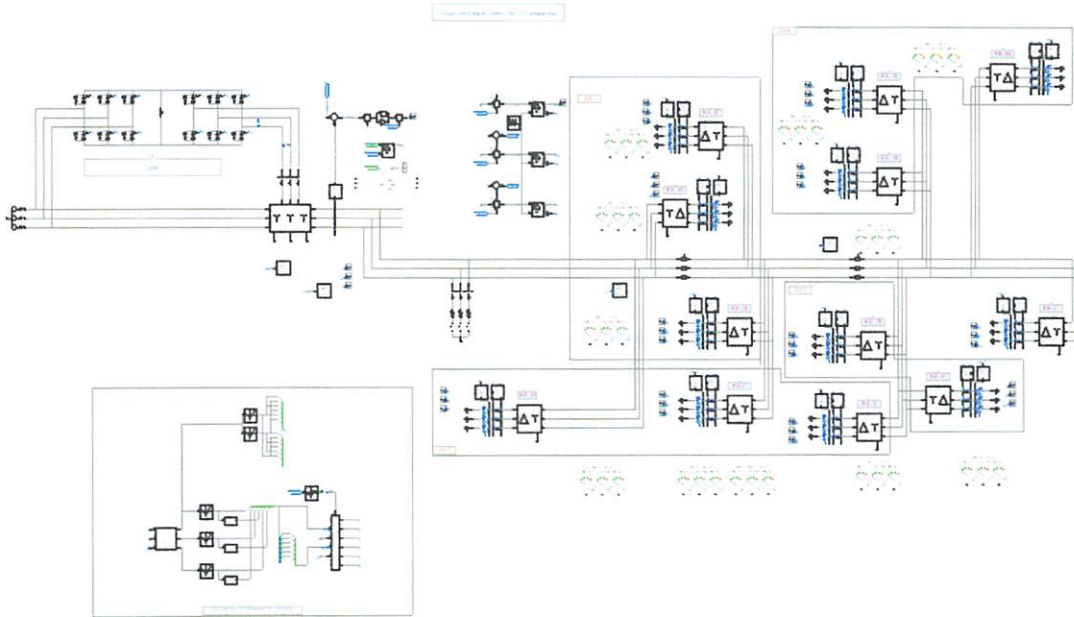
## BAB IV HASIL DAN ANALISA HASIL

### 4.1. Single Line Sistem Distribusi 20 kV Penyulang Tingkat 1

Untuk mensimulasikan sistem dari G.I Tengkwang menggunakan *software PSCAD/EMTDC Power Simulation*, maka terlebih dahulu kita harus menggambarkan sistem tersebut pada lembar kerja. Kemudian dijalankan sesuai urutan langkah kerja untuk memperoleh hasil simulasi dan menganalisa hasilnya.



Gambar 4.1. *Single Line* G.I Tengkwang Kalimantan Timur



Gambar 4.2. *Single Line* G.I Tengkwang Kalimantan Timur Menggunakan UPFC

## 4.2. Data Penyaluran dan Pembebanan G.I Tengkawang

### 4.2.1 Data Saluran

Tabel 4.1. Data Saluran

NO Saluran	Dari Node	Ke Node	Panjang Saluran ( m )	Impedansi	
				R	XL
1	1	2	309.75	66.96795	102.372375
2	2	3	392.7	84.90174	129.78735
3	3	4	40.7	8.79934	13.45135
4	3	5	94	20.3228	31.067
5	4	6	434.39	200.166912	155.164108
6	4	7	80.84	17.477608	26.71762
7	5	9	86.62	18.727244	28.62791
8	7	8	203.17	43.925354	67.147685
9	9	10	329.33	71.201146	108.843565
10	10	11	618.96	133.819152	204.56628
11	11	12	306.2	141.09696	109.37464
12	11	13	51.54	11.142948	17.03397
13	13	14	291.87	134.493696	104.255964
14	13	16	291.79	63.084998	96.436595
15	14	15	474.2	218.51136	169.38424
16	16	17	89.6	19.37152	29.6128
17	17	18	558.2	257.21856	199.38904
18	17	19	205.47	44.422614	67.907835
19	19	20	106.08	48.881664	37.891776
20	19	21	68.18	14.740516	22.53349
21	21	22	145.45	67.02336	51.95474
22	21	27	310.63	67.158206	102.663215
23	22	23	149.78	69.018624	53.501416
24	23	24	224.56	103.477248	80.212832

#### 4.2.2 Data Pembebanan

Tabel 4.2. Data Pembebanan

No. Node	No. Gardu	Kapasitas Nominal (kVA)	Beban Puncak (kVA)	Beban		Type Bus
				P (kW)	Q (kVAR)	
1		0	0	0	0	Slack
2	KS. 16	100	93.03	93.01639213	18.51273622	Load
3		0	0	0	0	Load
4		0	0	0	0	Load
5	KS. 83	100	67.35	67.34090775	22.9777995	Load
6	KS. 13	160	165	164.9787295	64.66652907	Load
7	KS. 49	160	104.66	104.6453094	29.3048	Load
8	KS. 62	100	42.98	42.97409214	13.42050066	Load
9	KS. 43	200	59.369	59.36321295	35.6214	Load
10	KS. 52	160	122.23	122.2174823	69.95999305	Load
11		0	0	0	0	Load
12	KS. 47	160	106.48	106.4677249	52.50014725	Load
13		0	0	0	0	Load
14	KS. 06	160	87.84	87.82792586	27.42803113	Load
15	KS. 71	100	55.91	55.9031025	24.37060397	Load
16	KS. 56	200	149.58	149.5643055	83.43024788	Load
17		0	0	0	0	Load
18	KS. 34	200	162.321	162.3000749	63.61657979	Load
19		0	0	0	0	Load
20	KS. 77	100	65.338	65.32844275	13.00209781	Load
21		0	0	0	0	Load
22	KS. 07	160	101.17	101.1580674	48.05308751	Load
23		0	0	0	0	Load
24	KS. 78	50	33.7	33.69574959	13.97229796	Load

### 4.2.3 Data Aliran Daya

Tabel 4.3. Data Aliran Daya

NO Saluran	Dari Node	Ke Node	Daya	
			P (kW)	Q (kVAR)
1	1	2	1257.8	725.9
2	2	3	1067.3	652.3
3	3	4	214.8	161.6
4	3	5	657.1	489.2
5	4	6	-	-
6	4	7	-	-
7	5	9	617.1	488.8
8	7	8	25.1	9.6
9	9	10	435.9	404.3
10	10	11	-	-
11	11	12	32.9	23.6
12	11	13	370.4	303.2
13	13	14	44.9	20.7
14	13	16	325.4	273.6
15	14	15	17.3	9.2
16	16	17	-	-
17	17	18	41.9	22.3
18	17	19	-	-
19	19	20	17.1	5.1
20	19	21	-	-
21	21	22	50.5	26.9
22	21	27	175.7	120.1
23	22	23	26	12.3
24	23	24	82	42

### 4.3. SOLUSI Perbaikan Profil Tegangan dengan *Software PSCAD/EMTDC*

#### *V.4.2 Power Simulation*

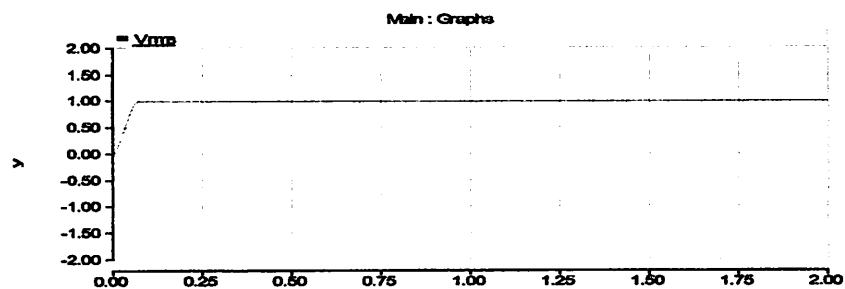
*Software PSCAD/EMTDC V.4.2 Power Simulation* merupakan *graphical user interface* yang fleksibel dan *powerful*. Dengan *software* ini secara skematik kita dapat mengkonstruksi rangkaian, menjalankan simulasi, menganalisa hasil dan manajemen data dalam sebuah integrasi yang lengkap dalam hal grafis,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

### 4.4 Hasil dan Analisa Hasil Perbaikan Profil Tegangan Dengan UPFC

#### 4.4.1 Hasil Perhitungan dan Simulasi Sebelum Pemasangan UPFC

Pada simulasi awal, Komponen UPFC tidak melakukan kompensasi sama sekali. UPFC ini belum bekerja dan tidak memberikan tegangan injeksi ke beban dan tidak memberikan suplai VAR maupun Penyerapan VAR pada bebcrapa kondisi pengujian, maka akan dapat diketahui perbedaan kondisi sistem sebelum dan sesudah menggunakan peralatan UPFC.

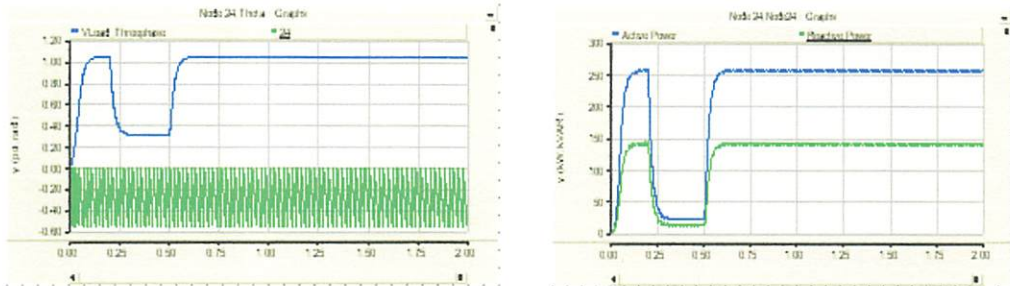
##### a. Sistem Sebelum Mengalami Gangguan, $V_{in} = 1$ pu, $V_o = 1$ pu,



Grafik 4.1 Bentuk Gelombang Tegangan

**b. Sistem Setelah Mengalami Gangguan**

- Terjadi Gangguan *Drop Voltage* Selama (200-500 ms) Tanpa UPFC



(a)

(b)

Grafik 4.2 (a) Bentuk Gelombang Tegangan (b) Bentuk Gelombang Daya Aktif dan Daya Reaktif, Saat Terjadi Jatuh Tegangan Tanpa UPFC

Tabel 4.4. Hasil Perhitungan Saat Terjadi Jatuh Tegangan Tanpa *UPFC*

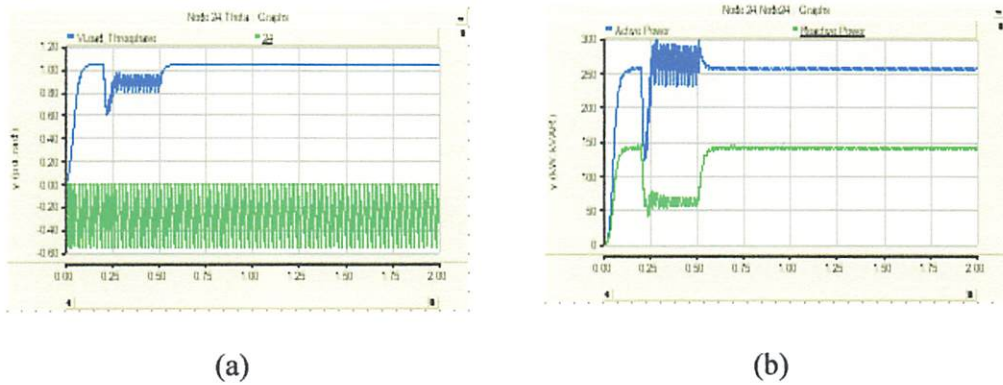
Dari Node	Ke Node	Tegangan (pu)	Sudut Fasa (rad)	P (kW)	Q (kVAR)
1	2	0.912188538	-0.028243256	1079.487204	595.5434225
3	5	1.021336388	-0.282944948	576.8957135	383.7816129
7	8	0.928683398	-0.028295843	22.22701623	7.759547582
9	10	0.937898984	-0.282611974	382.5027938	323.6357712
11	12	0.895826896	-0.028320458	32.01283723	19.57401659
13	14	0.920895298	-0.282363417	40.21342457	17.39648567
14	15	0.881674801	-0.028280069	17.32154488	7.525770692
21	22	0.87208805	-0.283114608	46.10720122	23.30969284
23	24	0.874688591	-0.028319971	73.95181646	33.86185474

Pada kondisi gangguan di atas tampak bahwa tegangan dan daya mengalami penurunan. Pada keadaan Tegangan Jatuh dalam selang waktu (0.2 – 0.5) s.



#### 4.4.2 Hasil Perhitungan dan Simulasi Setelah kompensasi

- **Kompensasi dengan UPFC Saat Terjadi Gangguan Jatuh Tegangan Selama (200-500 ms)**



Grafik 4.5 (a) Bentuk Gelombang Tegangan (b) Bentuk Gelombang Daya Aktif dan Daya Reaktif, Saat Terjadi Jatuh Tegangan Dengan UPFC

Tabel 4.5. Hasil Perhitungan Saat Terjadi *Jatuh Tegangan* Setelah Kompensasi UPFC

Dari Node	Ke Node	Tegangan (pu)	Sudut Fasa (rad)	P (kW)	Q (kVAR)
1	2	0.996208953	-0.028312857	1253.566115	632.0834645
3	5	1.01286013	-0.282865411	672.3038176	407.0325043
7	8	1.014242885	-0.028265346	25.97219128	8.225775067
9	10	1.024272357	-0.282542774	445.3650709	343.292264
11	12	0.978332193	-0.028249099	37.31470476	20.75874746
13	14	1.005719274	-0.282788592	46.93080442	18.44568015
14	15	0.962883686	-0.028278524	20.21398957	7.979619984
21	22	0.952409714	-0.282555753	53.76291604	24.71901505
23	24	0.955249735	-0.028255149	86.18745249	35.91261594

**4.4.3. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Simulasi Sebelum Dan Sesudah di pasang UPFC.**

**4.4.3.1 Perbandingan Tegangan Dengan dan Tanpa UPFC**

Untuk mengetahui kerja UPFC maka yang dilakukan adalah mencari perbedaan nilai tegangan tiap *node* dengan simulasi yang terdiri dari kondisi saat gangguan dengan UPFC Dan Tanpa UPFC.

Tabel 4.6. Perbandingan Tegangan Saat Gangguan Jatuh Tegangan Dengan UPFC Dan Tanpa UPFC

Dari Node	Ke Node	Tanpa UPFC	Dengan UPFC
		Tegangan (pu)	Tegangan (pu)
1	2	0.912188538	0.996208953
3	5	1.021336388	1.01286013
7	8	0.928683398	1.014242885
9	10	0.937898984	1.024272357
11	12	0.895826896	0.978332193
13	14	0.920895298	1.005719274
14	15	0.881674801	0.962883686
21	22	0.87208805	0.952409714
23	24	0.874688591	0.955249735

Berdasarkan tabel 4.4, 4.5, 4.6 di atas bahwa pemasangan *UPFC* dapat mengoptimasi tegangan saat terjadi drop voltage dengan rata-rata tiap node 0.082 pu.

**Drop Voltage**

✓ **Optimasi Kualitas Tegangan :**

$V_{\text{optimasi}}$  Pada Node 1 ke node 2 :

$$V_{\text{optimasi}} = V_{\text{withUPFC}} - V_{\text{withoutUPFC}}$$

$$= 0.996208953 \text{ (pu)} - 0.912188538 \text{ (pu)}$$

$$= 0.08 \text{ (pu)}$$

**V<sub>optimasi</sub> Pada Node 3 ke node 5 :**

$$\begin{aligned} V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withUPFC}} - V_{\text{withoutUPFC}} \\ &= 1.01286013 \text{ (pu)} - 1.021336388 \text{ (pu)} \\ &= 0 \text{ (pu)} \end{aligned}$$

**V<sub>optimasi</sub> Pada Node 7 ke node 8 :**

$$\begin{aligned} V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withUPFC}} - V_{\text{withoutUPFC}} \\ &= 1.014242885 \text{ (pu)} - 0.928683398 \text{ (pu)} \\ &= 0.083 \text{ (pu)} \end{aligned}$$

**V<sub>optimasi</sub> Pada Node 9 ke node 10 :**

$$\begin{aligned} V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withUPFC}} - V_{\text{withoutUPFC}} \\ &= 1.024272357 \text{ (pu)} - 0.937898984 \text{ (pu)} \\ &= 0.085 \text{ (pu)} \end{aligned}$$

**V<sub>optimasi</sub> Pada Node 11 ke node 12 :**

$$\begin{aligned} V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withUPFC}} - V_{\text{withoutUPFC}} \\ &= 0.978332193 \text{ (pu)} - 0.895826896 \text{ (pu)} \\ &= 0.08 \text{ (pu)} \end{aligned}$$

**V<sub>optimasi</sub> Pada Node 13 ke node 14 :**

$$\begin{aligned}V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withUPFC}} - V_{\text{withoutUPFC}} \\ &= 1.005719274 \text{ (pu)} - 0.920895298 \text{ (pu)} \\ &= 0.08 \text{ (pu)}\end{aligned}$$

**V<sub>optimasi</sub> Pada Node 14 ke node 15 :**

$$\begin{aligned}V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withUPFC}} - V_{\text{withoutUPFC}} \\ &= 0.962883686 \text{ (pu)} - 0.881674801 \text{ (pu)} \\ &= 0.08 \text{ (pu)}\end{aligned}$$

**V<sub>optimasi</sub> Pada Node 21 ke node 22 :**

$$\begin{aligned}V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withUPFC}} - V_{\text{withoutUPFC}} \\ &= 0.952409714 \text{ (pu)} - 0.87208805 \text{ (pu)} \\ &= 0.08 \text{ (pu)}\end{aligned}$$

**V<sub>optimasi</sub> Pada Node 24 :**

$$\begin{aligned}V_{\text{optimasi}} &= V_{\text{withUPFC}} - V_{\text{withoutUPFC}} \\ &= 0.955249735 \text{ (pu)} - 0.874688591 \text{ (pu)} \\ &= 0.08 \text{ (pu)}\end{aligned}$$

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

1. UPFC adalah alat elektronika yang mempunyai dua inverter dimana yang satu terhubung seri dengan transmisi berfungsi sebagai penginjeksi tegangan dan yang lain terhubung shunt dengan saluran transmisi berfungsi sebagai penghasil sumber dc.
2. UPFC merupakan control elektronik yang mempunyai respon lebih cepat dalam mereduksi gangguan (*drop tegangan*) dibandingkan peralatan FACT lainnya.
3. Control d-q yang digunakan pada UPFC bertujuan untuk mempercepat respon dari UPFC dan memungkinkannya untuk menentukan besar injeksi tegangan yang dibutuhkan agar sistem stabil secara otomatis.
4. Saat terjadi *drop voltage* sebesar 0.716 (pu) dalam selang waktu (0.2 -- 0.5) s. *UPFC* mampu memperbaiki tegangan dengan rata-rata 0.08 (pu) di tiap node, daya reaktif pada saluran berkurang sehingga daya aktif dapat dipertahankan seperti saat system dalam keadaan stabil/tidak terjadi *drop voltage*.

#### **5.2. Saran**

Untuk menganalisis kondisi *drop voltage*, jika memungkinkan sebaiknya dapat diperoleh data lapangan pada G.I tengkawang yang dicatat per jam agar dapat diketahui karakteristik beban yang dipakai oleh konsumen perharinya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Maliszewski, R. M., and Rahman, M., "*Planing and Operating Consideration for the World's firs UPFC instalation*,"CIGRE Report No.37-96 (US) 13 (E), Paris, 1996.
- [2]. Mehraban, A. S., et al., "*Aplication of the World's firs UPFC on the system*,"EPRI Conference-The Future of Power Dilivery,wasington DC, April 9-11, 1996.
- [3]. Narain G. Hingorani and L. Gyugyi. 2000. Understanding FACTS, Concepts, and Technology of Flexible AC Transmisstion systems. Piscataway, NJ: IEEE Press.
- [4]. Klaus Habur and Donal O'Leary. FACTS For Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy.
- [5]. Mahdi Syukri. Perhitungan Drop Tegangan Pada Jaringan Distribusi Primer Banda Aceh, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala.



## FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : ARIK SETYO NUGROHO  
Nim : 03.12.038  
Bimbingan : 11 September 2009/ 11 Februari 2010  
Judul Skripsi : ANALISA PEMASANGAN UNIFIED POWER  
FLOW CONTROL UNTUK MEMPERBAIKI  
PROFIL TEGANGAN DENGAN D-Q CONTROL  
PADA SALURAN 20kV GI.TENGKAWANG  
KALIMANTAN TIMUR.

No.	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1	12 November	Bab 1 & 2	
2	15 November	Bab 3	
3	20 November	Bab 3, Penambahan control d-q	
4	25 November	Bab 4, Grafik out put setelah di pasang UPFC	
5	26 November	Perhitungan Optimasi	
6	27 November	Bab 5	
7			
8			
9			
10			

Malang, Oktober 2009

Ir. Yusuf Ismail Nakhora, MT  
Nip. Y-1018800198

Form.S-4b



## FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : ARIK SETYO NUGROHO  
Nim : 03.12.038  
Bimbingan : 11 September 2009 s/d 11 Maret 2010  
Judul Skripsi : ANALISA PEMASANGAN *UNIFIED POWER FLOW CONTROL* UNTUK MEMPERBAIKI PROFIL TEGANGAN DENGAN *D-Q CONTROL* PADA SALURAN DISTRIBUSI 20kV GI. TENGGAWANG KALIMANTAN TIMUR

No.	Tanggal	Uraian	Parap Pembimbing
1.	13 NOV	Bab 1 & 2	
2.	17 NOV	Bab 3	
3.	23 NOV		
4.	23 NOV	Bab 3 , Penambahan Tool PSCAD	
5.			
6.	27 NOV	Bab 4, Tabel hasil agar di tampilkan kembali	
7.			
8.	29 NOV	Seminar hasil	
9.	30 NOV	Ujian Skripsi	
10.			

Malang,  
Dosen Pembimbing,

Ir. Choirul Saleh, MT.  
Nip.Y. 1018800190





## FORMULIR PERBAIKAN SKRIPSI

Dalam pelaksanaan ujian skripsi jenjang Strata satu (S-1) Jurusan Teknik Elektro konsentrasi Teknik Energi Listrik, maka perlu adanya perbaikan skripsi untuk mahasiswa :

Nama : ARIK SETYO NUGROHO  
NIM : 03.12.038  
Jurusan : Teknik Elektro S-1  
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik  
Masa Bimbingan : 11 Agustus 2009 s/d 11 Februari 2010  
Judul Skripsi : Analisa Pemasangan *Unified Power Flow Control* Untuk Memperbaiki Profil Tegangan Dengan *D-Q Control* Pada Saluran Distribusi 20 kV G.I Tengkwang Kalimantan Timur

Tanggal	Uraian	Paraf
Penguji I 5 September 2009	1. Pembuatan Rangkaian D-Q. 2. Pembuatan Rangkaian SPWM. 3. Gambar Rangkaian D-Q. 4. UPFC Berupa apa Dan di pasang dimana?	
Penguji II 5 September 2009	1. Teori dan metode D-Q agar di cantumkan 2. Koreksi Untuk Daya pada saluran sebelum dan sesudah pemasangan UPFC	

Mengetahui,

Dosen Pembimbing I

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

Dosen Pembimbing II

Ir. Choirul Saleh, MT  
NIP. Y.1018800190

Dosen Penguji,

PENGUJI I

Ir. Taufik Hidayat, MT  
NIP.1018700151

PENGUJI II

Ir. Eko Nurcahyono  
NIP.Y.1028700172



## FORMULIR PERBAIKAN SKRIPSI

Dalam pelaksanaan ujian skripsi terdapat Sheet nomor 12-13 jurusan Teknik Elektro konsentrasi Teknik Energi Listrik, maka perlu adanya perbaikan skripsi untuk mahasiswa :

Nama : ARIK SELINDA GORBO  
 NIM : 0312038  
 Jurusan : Teknik Elektro 2-1  
 Konsentrasi : Teknik Energi Listrik  
 Masa Bimbingan : 11 Agustus 2009 s.d 11 Februari 2010  
 Judul Skripsi : Analisis Pemangangan (Voltage) Power Area (Power) Untuk Memperbaiki Profil Tegangan (Voltage) Busbar (Bus) Saluran Distribusi 20 kV di Lingkungan Komunitas Lima

Tanggal	Isian	Paraf
Pengujian I 2 September 2009	1. Perbaikan Rangkaian D-G 2. Perbaikan Rangkaian P/W/M 3. Gambar Rangkaian D-G 4. UPTC Berupa apa Dan di pasang dimana?	
Pengujian II 2 September 2009	1. Test dan metode D-G agar di konfirmasi 2. Koreksi Data Bus pada saluran sebelum dan sesudah pemangangan UPTC	

Mengesahkan

Dosen Pembimbing II

Dosen Pembimbing I

Ir. Cahaji Satrio, MT  
 NIP. 1018800190

Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT  
 NIP. 1018800189

PENGETUIH

Dosen Penguji

PENGETUIH

Ir. Eko Nurcahyono  
 NIP. 1028700172

Ir. Taufik Hidayat, MT  
 NIP. 1018700151



**BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

Nama Mahasiswa : Arik Setyo Nugroho  
NIM : 03.12.038  
Jurusan : Teknik Elektro S-1  
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik S-1  
Judul Skripsi : Analisa Pemasangan *Unified Power Flow Control* Untuk  
Memperbaiki Profil Tegangan Dengan *D-Q Control* Pada  
Saluran Distribusi 20 kV G.I Tengawang Kalimantan Timur

Dipertahankan dihadapan tim penguji skripsi jenjang Strata Satu (S-1) pada:

Hari : Sabtu  
Tanggal : 5 September 2009  
Dengan Nilai : 77.2 (B+) *Fy*

**PANITIA UJIAN SKRIPSI**

**Ketua Majelis Penguji**

**Ir. H. Sidik Noertjahjono, MT.**  
NIP.Y. 1028700163

**Sekretaris Majelis Penguji**

**Ir. F. Yudi Limpraptono, MT**  
NIP.Y. 1039500274

**ANGGOTA PENGUJI**

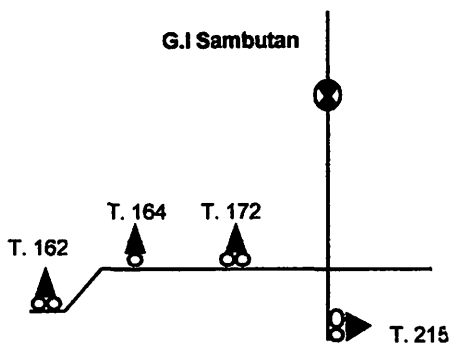
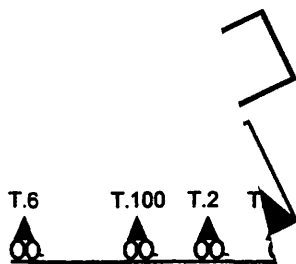
**PENGUJI I**

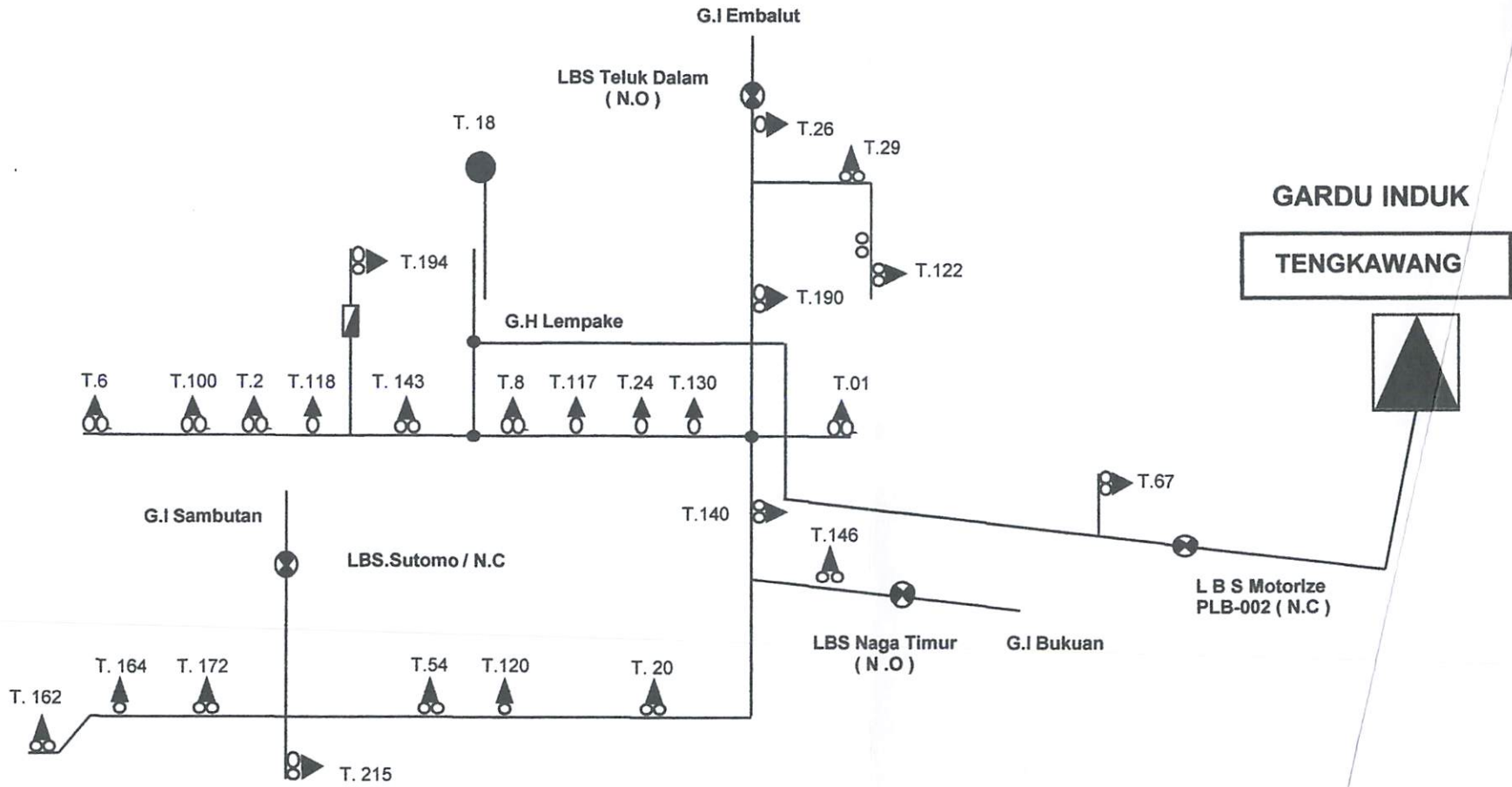
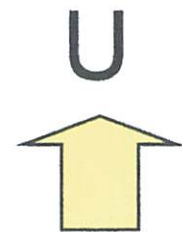
**Ir. Taufik Hidayat, MT**  
NIP. 1018700151

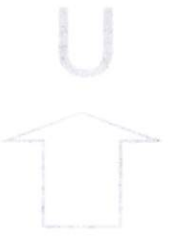
**PENGUJI II**

**Ir. Eko Nurcahyono**  
NIP.Y. 1028700172

LAMPIRAN







GARDU INDUK  
TENGGAWANG



L B S Motofze  
PLB-002 (N.O.)

L B S Mera Timur  
(N.O.)  
G. Bukuan

G. Embelut

L B S Teluk Dalam  
(N.O.)

G. H. Lembaka

L B S Sutomel N.C.

G. Sambutan

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

T 100

G. Embelut

L B S Teluk Dalam  
(N.O.)

G. H. Lembaka

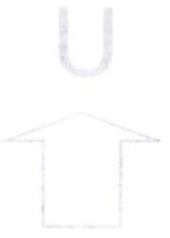
L B S Sutomel N.C.

G. Sambutan

L B S Mera Timur  
(N.O.)  
G. Bukuan

L B S Motofze  
PLB-002 (N.O.)

GARDU INDUK  
TENGGAWANG







DATA PENGUKURAN BEBAN  
Okt-08

NO	GARDU					PENGUKURAN BEBAN												PENGUKURAN TEGANGAN UJUNG												
	nomor	DAYA	Alamat	Waktu pengukuran		arus total			tegangan trafo			beban		jurusan A			jurusan B			jurusan C			jurusan D							
				Tanggal	Pukul	R	S	T	N	R-N	S-N	T-N	kva	%	R-N	S-N	T-N	R-N	S-N	T-N	R-N	S-N	T-N	R-N	S-N	T-N				
1	EC001	150	Ds.GIREEJO	11-Nop-08	20:15	145	122	157	45	212	212	208	208	89	60	-	-	-	200	201	204	-	-	-	198	200	200			
2	EC002	150	Ds.BEBUAH	15-Nop-08	18:45	57	101	134	31	225	229	224	224	66	44	-	-	-	-	-	-	-	-	215	215	215	-	-	-	
3	EC003	200	Ds.BATUAH	22-Nop-08	19:02	174	204	272	52	214	216	213	213	139	70	198	200	196	-	-	-	-	-	195	198	194	-	-	-	
4	EC005	150	Ds.SEPARI	22-Nop-08	19:20	89	131	98	42	227	222	229	229	72	48	222	222	222	-	-	-	-	-	215	215	215	-	-	-	
5	EC006	160	Ds.RAPAK INDAH	18-Nop-08	18:26	158	80	72	92	222	224	230	230	70	43	206	217	205	-	-	-	-	-	204	214	202	-	-	-	
6	EC008	160	Ds.M.SAID	16-Nop-08	19:30	152	142	109	56	217	220	217	217	88	55	221	221	221	-	-	-	-	-	220	220	220	-	-	-	
7	EC010	200	Ds.BUKIT PINANG	23-Okt-08	18:50	231	246	227	62	220	223	224	224	157	78	-	-	-	198	200	196	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	EC011	100	Ds.A.W.SYAHIRANI	13-Nop-08	19:35	98	63	67	40	216	216	218	218	49	49	-	-	-	195	200	196	-	-	-	198	200	200	-	-	-
9	EC012	250	Ds.AIR HITAM	23-Nop-08	18:10	305	373	274	114	206	208	207	207	197	79	195	196	195	-	-	-	-	-	200	202	200	-	-	-	
10	EC013	160	Ds.KARANG ASAM	23-Nop-08	19:25	159	174	188	65	227	225	221	221	117	73	-	-	-	-	-	-	-	-	210	206	205	-	-	-	
11	EC014	50	Ds.SLAMET RIADI	15-Nop-08	19:45	36	31	61	26	221	223	225	225	29	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200	198	202
12	EC015	100	Ds.HASANUDIN	22-Nop-08	19:11	104	137	60	26	229	229	230	230	69	69	-	-	-	205	207	205	-	-	-	-	-	-	202	204	204
13	EC018	200	Ds.SUTAMI	09-Nop-08	18:40	73	40	73	41	218	218	217	217	40	20	-	-	-	-	-	-	-	-	206	208	205	-	-	-	
14	EC019	200	Ds.GANI MULYA	08-Nop-08	18:30	280	137	185	47	218	218	215	215	131	65	-	-	-	198	195	197	-	-	-	-	-	200	198	196	
15	EC020	200	Ds.HARAPAN BARU	10-Okt-08	18:32	151	185	142	83	215	204	203	203	99	50	215	215	215	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	EC021	200	Ds.SUMALINDO	23-Okt-08	18:40	236	200	242	37	214	224	220	220	149	74	-	-	-	225	225	231	-	-	-	-	-	225	225	231	
17	EC022	160	Ds.SUMBER MAS	23-Okt-08	18:30	130	122	146	36	224	230	225	225	90	56	198	195	195	-	-	-	-	-	200	196	196	-	-	-	
18	EC023	150	Ds.PURWAJAYA	23-Nop-08	19:27	135	120	155	62	233	230	230	230	72	48	200	202	200	-	-	-	-	-	198	196	199	-	-	-	
19	EC025	160	Ds.KLEDANG	05-Okt-08	21:45	186	149	177	54	227	231	230	230	117	73	198	202	200	-	-	-	-	-	198	195	196	-	-	-	
20	EC026	250	Ds.LOA KULU	22-Nop-08	19:35	290	303	282	91	211	216	216	216	188	75	198	195	195	-	-	-	-	-	196	195	194	-	-	-	
21	EC028	100	Ds.LOA DURI	18-Nop-08	18:45	65	82	94	44	221	220	220	220	53	53	-	-	-	200	200	202	-	-	-	-	-	201	202	202	
22	EC029	25	Ds.TENGARONG	22-Nop-08	18:40	17	14	17	15	222	215	214	214	10	42	-	-	-	200	201	203	-	-	-	-	-	198	195	198	
23	EC030	250	Ds.KUMALA	17-Okt-08	18:25	389	301	355	112	216	223	218	218	229	91	-	-	-	198	196	196	-	-	-	-	-	200	198	200	
24	EC031	160	Ds.BEBULUH	10-Nop-08	18:00	106	116	155	56	208	205	203	203	77	48	200	196	198	-	-	-	-	-	198	196	198	-	-	-	





unique capability of independently regulating the real and reactive power flows on the transmission line, while also regulating the local bus voltage.

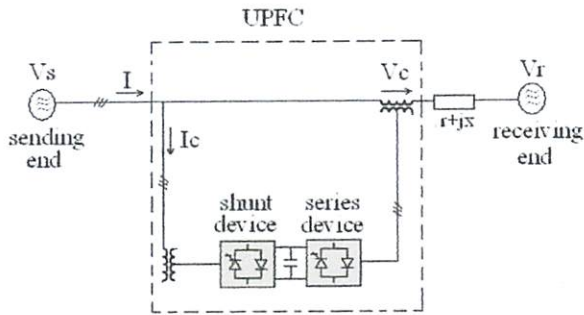


Figure-1. Schematic of UPFC.

### 3. D-Q CONTROL STRATEGY FOR UPFC

Power electronic systems have the capability of providing faster response compared to traditional mechanically based power system controls. Therefore to obtain the maximum capability out of the UPFC, a control system with an equally faster response is required. It would be advantageous, if the time-varying equations can be transformed to a time invariant set. This would result in the simplification of the calculations both for steady and transient conditions especially when we are considering a huge power system. R.H.PARK introduced the d-q transformation. This paper presents operation of UPFC using a control strategy which is based on d-q axis control theory. This d-q axis control system enables the UPFC to follow the changes in reference values like AC voltage, DC link voltage, real and reactive powers through the line. By implementing a d-q axis controller it is possible to produce a relatively fast response and to reduce the interaction between real and reactive power flow. In this control system, the transformation of a three phase system to d-q and d-q to 3-phase quantities is done according to Park's transformation, through which real and reactive power can be controlled individually, while also regulating the local bus voltage. Ooi *et al.*, [3] suggested a control system for the UPFC which is based on the principle that the real power is influenced by the phase angle whereas reactive power is dependent on the voltage magnitude. Therefore to control the real power flow in the transmission line the series UPFC controller adjusts the angle of the series compensation voltage while to regulate the reactive power flow, the amplitude of the series voltage is controlled. As was presented in [3], the real and reactive power flows in the transmission line are influenced by both the amplitude and the phase angle of the series compensating voltage. Therefore, the real power controller can significantly affect the level of reactive power flow. The reactive power controller then adjusts the series voltage magnitude to regulate the reactive power but in turn also changes the real power flow. Thus both controllers reacting to each others output. To improve the performance and to reduce the interaction between real

and reactive power control system for a UPFC based on d-q axis theory was presented by Yu *et al.*, [4 and 5]. In [5], cross coupling controller using d-q axis theory is applied to the series converter of the UPFC. In this paper, cross coupling controller using d-q axis theory is applied to the shunt controller of the UPFC.

### 4. SIMULATION SETUP

Figure-2 shows the setup of the UPFC used for simulation and analysis using PSCAD. The circuit parameters are shown in Table-1. The main circuit of the series device (SSSC) consists of a three phase PWM inverter, the ac terminals of which are connected in series to a transmission line through three single phase transformers. The shunt device (STATCOM) consists of a three phase PWM inverter, the ac terminals of which are connected in parallel with the transmission line via a three phase star-delta transformer. A transmission line of a simple power system with parameters given in Table-1 is considered. UPFC is placed in series with the transmission line at the sending end. For each of the controller, a simulation model is created which includes the required PWM, filters and digital controllers. Different types of faults were simulated and applied to the transmission line at 1.0 second and cleared at 1.05 seconds using timed fault logic.

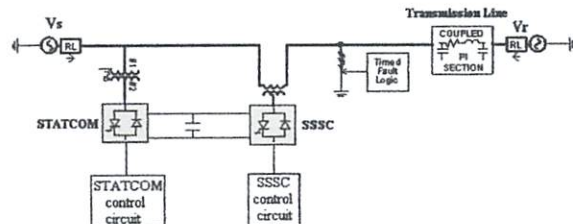


Figure-2. Setup of UPFC.

#### 4.1. Shunt inverter control circuit

Shunt inverter can be controlled in two different modes, viz. VAR control mode and Automatic voltage control mode. In var control mode, the shunt inverter control translates the var reference into a corresponding shunt current request and adjusts gating of the inverter to establish the desired current. In voltage control mode, the shunt inverter reactive current is automatically regulated to maintain the transmission line voltage at the point of connection to a reference value. As in [5], the crossing gain of a power transmission line is much larger than its direct gain. The cross-coupling controller uses the q-axis voltage  $V_q$ , to control the d-axis current  $I_d$  and the d-axis voltage  $V_d$ , to control the q-axis current  $I_q$ . This makes it possible to control both active and reactive powers independently. In this simulation, the shunt inverter operates in voltage control mode. Figure-3 shows the DC voltage control circuit. DC link voltage is measured ( $V_{dcm}$ ) and compared with the reference value ( $V_{dcref}$ ), whose error is fed to PI controller and related quadrature axis voltage,  $V_q$  is developed.  $I_d$  and  $I_q$  are obtained through Park's transformation of transmission line current.

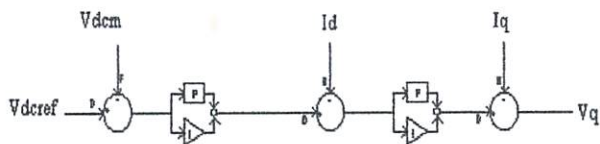


Figure-3. DC Voltage control circuit.

Similarly, AC voltage from the sending end bus feeding shunt coupling transformer is measured in p.u ( $V_{p.u}$ ) and compared with the AC voltage set point (here 1.0 p.u), whose error is fed to PI controller to generate the related direct axis voltage,  $V_d$ . Figure-4 shows the AC voltage control circuit for the shunt inverter.

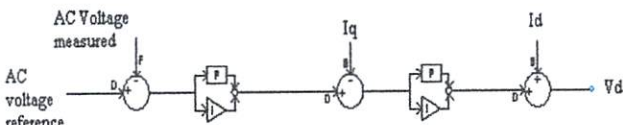


Figure-4. AC Voltage control circuit.

The generated  $V_d$  and  $V_q$  signals are used to develop firing pulses for the six GTOs in the inverter, as shown in the Figure-5, in PSCAD environment. A generalized sinusoidal pulse width modulation switching technique is used for pulse generation. H-L (high-low) logic in PSCAD is used to generate firing pulses. Two sets of signals, reference and triangular ones are needed, one set for turning-on and the other for turning-off the GTOs. Deblock option is available, which is made 0.1 seconds during this simulation.

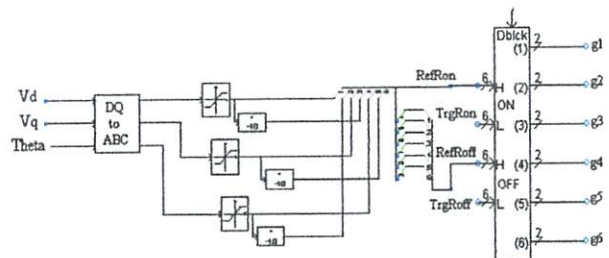


Figure-5. Circuit for pulse generation.

4.2 Series inverter control circuit

The series inverter controls the magnitude and angle of the voltage injected in series with the line. Main objective this voltage injection is to influence the power flow on the line. The actual value of the injected voltage can be obtained in several ways, viz. Direct voltage injection mode, phase angle shifter emulation mode, line impedance emulation mode and automatic powerflow control mode. In this simulation, the series inverter operates in the direct voltage injection mode. The series inverter simply injects voltage as per the theta order specified. By varying the theta order input to this controller power flow through the transmission line can be varied. Figure-6 shows the series inverter control circuit, which is an open loop phase angle

controller, generates modulation index,  $m_i$  and shift, as per the theta order specified.

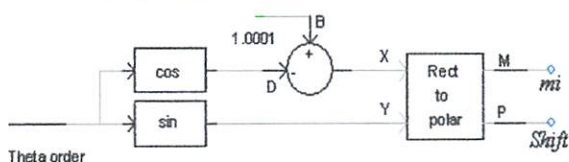


Figure-6. Series inverter open-loop phase angle controller.

The modulation index,  $m_i$  and shift signals are used to develop gate pulses as shown in Figure-7, using same H-L logic unit. Two signals are developed, one to turn on and the other to turn off the GTO.

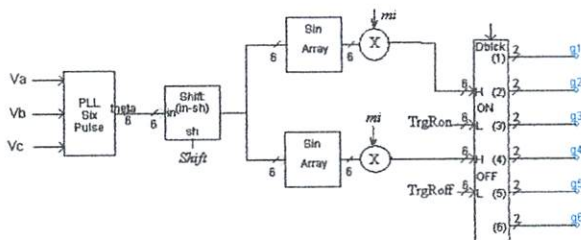


Figure-7. Circuit for pulse generation.

5. SIMULATION RESULTS

A transmission line of a simple power system with parameters given in Table-1 is simulated.

Table-1. System parameters.

Line to line voltage	230 kV
Frequency	60 Hz
Transmission rating	100 MVA
Capacitance of DC link Capacitor	2000 $\mu$ F
DC link voltage	38kV
Length of the transmission line	500 km
Resistance of the line	32 $\mu\Omega$ /m
Inductive reactance of the line	388.3 $\mu\Omega$ /m
Capacitive reactance of the line	241.1 M $\Omega$ -m

UPFC is placed in series with the transmission line at the sending end. For each of the controller, a simulation model is created which includes the required PWM, filters and digital controllers. Different types of faults were simulated and applied to the transmission line at 1.0 second and cleared at 1.05 seconds using timed fault logic. When the line is without UPFC, the fault current is about 14kA, voltage drop across the line is very high during the fault, as in [10]. When the UPFC is placed in the transmission line for the same fault, the fault current is reduced to 5kA as per the simulation results. Figure-8 shows the simulation results when L-G fault is applied to the transmission line. Figure-9 shows the simulation results when LL-G fault is applied at the sending end of the