

LEMBAR PERSETUJUAN

**OPTIMASIPENEMPATAN UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC)UNTUK
MEREDUKSI RUGI-RUGI SALURAN DI GARDU INDUK PROBOLINGGO**

SKRIPSI

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

Disusun oleh :

SAHRU ROCHMADONA

NIM : 11.12.028


Disetujui oleh,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Ir. H. Taufik Hidayat, MT

NIP. Y.1018700151

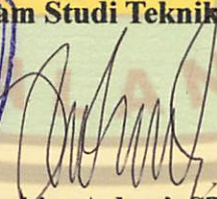

Ir. Choirul saleh, MT

NIP.Y. 1018800190

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro S-1




M. Ibrahim Ashari, ST. MT

NIP. P. 1030100358

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
2015**

Optimasi Penempatan Unified Power Flow Control (UPFC) Untuk Mereduksi Rugi-Rugi Saluran Di Gardu Induk Probolinggo

**Sahru Rochmadona
(1112028)**

**Dosen Pembimbing: Ir. H. Taufik Hidayat, MT
Ir. Choirul saleh, MT**

Jurusan Teknik Elektro S-1, Konsentrasi Teknik Energi Listrik S-1
Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang
Jl. Raya Karanglo Km Malang

Abstrak

Dalam beberapa tahun terakhir, kebutuhan sistem tenaga listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan laju pertumbuhan ekonomi, pertumbuhan penduduk dan industri. Sehingga muncul suatu alternatif untuk memaksimalkan pemanfaatan saluran transmisi, yaitu dengan menggunakan peralatan Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS). Dari beberapa type peralatan FACTS device, UPFC merupakan peralatan FACTS terkini yang telah digunakan dalam sistem tenaga. UPFC menggabungkan antara STATCOM dan SSSC, sehingga UPFC memiliki keunggulan dari STATCOM dan SSSC. UPFC merupakan peralatan serbaguna, dikarenakan dapat mengontrol tegangan dan aliran daya untuk operasi sistem yang optimal. Simulasi diterapkan pada sistem kelistrikan GI Probolinggo Sistem 20 kv. Berdasarkan hasil pengujian sistem Unified Power Flow Controller (UPFC) yang dilakukan, penempatan yang optimal pada penyulang sukapura. Yang mana setelah pemasangan Unified Power Flow Controller (UPFC) dapat meningkatkan profil tegangan dan dapat mengurangi rugi-rugi saluran, dari 0,9299 pu, 0,253 MW dan 0,443 Mvar menjadi 0,9878 pu, 0,309 MW dan 0,538 Mvar

Kata kunci: Rugi-rugi Saluran dan UPFC

KATA PENGANTAR

Puji Syukur Kehadirat Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya, sehingga kami selaku penyusun dapat menyelesaikan Laporan Skripsi ini yang berjudul **“Optimasi Penempatan Unified power Flow Control (UPFC) Untuk Mereduksi Rugi-rugi Saluran di Gardu Induk Probolinggo”** dapat terselesaikan.

Adapun maksud dan tujuan dari penulisan laporan ini merupakan salah satu syarat untuk dapat menyelesaikan studi dan mendapatkan gelar Sarjana Program Studi Teknik Elektro S-1 Konsentrasi Teknik Energi Listrik ITN Malang, Ucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan pada:

1. Bapak Dr. Ir. Lalu Mulyadi, MT selaku Rektor Institut Teknologi Nasional Malang.
2. Bapak Ir. H. Anang Subardi, MT selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Nasional Malang.
3. Bapak M. Ibrahim Ashari, ST, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1 Institut Teknologi Nasional Malang.
4. Bapak Dr. Eng I Komang Somawirata, ST, MT selaku Sekertaris Jurusan Teknik Elektro S-1 Institut Teknologi Nasional Malang.
5. Bapak Ir. H. Taufik Hidayat, MT selaku Dosen Pembimbing 1.
6. Bapak Ir. Choirul Saleh, MT selaku Dosen Pembimbing 2.
7. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir Abraham Lomi, MSEE. selaku Kepala Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Elektrik
8. Kedua orang tua dan teman-teman yang turut memberi dukungan terhadap penyelesaian skripsi.

Penulis menyadari bahwa masih banyaknya kekurangan yang terdapat pada skripsi ini, oleh karena itu penulis berharap para pembaca dapat memberikan kritik dan saran yang membangun agar skripsi ini menjadi lebih sempurna.

Malang, 7 September 2015

Penyusun

Daftar isi

Lembar Persetujuan.....	ii
Abstrak.....	iii
Kata Pengantar.....	iv
Daftar Isi.....	v
Daftar Gambar.....	viii
Daftar Tabel.....	viii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	2
BAB II	3
KAJIAN PUSTAKA	3
2.1 Pemodelan Sistem Tenaga Listrik	3
2.2 Aliran Daya (Load Flow).....	5
2.3 Faktor Daya.....	6
2.4 Rugi-Rugi Saluran.....	7
2.4.1 Rugi-Rugi Daya.....	8
2.4.2 Voltage Drop	9
2.5 <i>Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) Devices</i>	10
2.5.1 <i>Unified Power Flow Controller(UPFC)[</i>	11
2.5.2 Prinsip Kerja <i>Unified Power Flow Controller(UPFC</i>	11
BAB III.....	13
3.2 <i>Software PSCAD/EMTDCV.4.2 Power Simulation</i>	13
3.4 Simulasi pada <i>Software PSCAD/EMTDCV.4.2 Power Simulation</i>	15

3.5 Flowchart.....	16
BAB IV.....	18
DATA DAN ANALISIS HASIL.....	17
4.1 DATA PT.PLN (PERSERO) GARDU INDUK PROBOLINNGO	17
4.2 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Sistem 20 kV GI Probolinggo Dalam <i>Software PSCAD Power Simulasion</i>	19
4.3 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare	22
4.4 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Pelabuan....	24
4.7 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Eratex	32
4.8 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bentar	34
4.9 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Banjar Sawah.....	37
4.10 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 1.....	39
4.11 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Togas.....	42
4.12 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sukapura.....	44
4.13 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare 2	46

4.14 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bromo	49
4.15 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Beberan.....	51
4.16 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Malasan... ..	53
4.17 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI .	56
4.18 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan	58
4.19 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 2.....	61
4.20 Analisis Perbandingan Kondisi Sebelum Dan Sesudah Pemasangan UPFC	63
BAB V	68
KESIMPULAN DAN SARAN.....	68
5.1. Kesimpulan	68
5.2 Saran.....	68
Daftar Pustaka.....	69
LAMPIRAN	70

Daftar Gambar

Gambar 2.1 Rangkaian ekivalen saluran transmisi pendek.....	4
Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen saluran transmisi menengah dan panjang.....	4
Gambar 2.3 segi tiga daya.....	7
Gambar 2.4 <i>Unified Power Flow Controller</i>	12
Gambar 3.1 Tampilan utama <i>software</i> PSCAD/EMTDC.....	14
Gambar 3.2 Tampilan <i>master library</i> pada <i>software</i> PSCAD/EMTDC.....	15
Gambar 3.3 Flowchart.....	17
Gambar 4.1 <i>Single Line</i> Gardu Induk Probolinggo Dalam <i>PSCAD</i>	21
Gambar 4.2 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare.....	23
Gambar 4.3 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Pelabuan.....	25
Gambar 4.4 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sumber.....	28
Gambar 4.5 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Leces.....	30
Gambar 4.6 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Eratex.....	33
Gambar 4.7 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bentar.....	35
Gambar 4.8 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Banjar Sawah.....	38
Gambar 4.9 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 1.....	40
Gambar 4.10 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Togas.....	43
Gambar 4.11 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sukapura.....	45
Gambar 4.12 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare 2.....	48
Gambar 4.13 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bromo.....	50
Gambar 4.14 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Beberan.....	53

Gambar 4.15 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Malasan.....	55
Gambar 4.16 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI.....	58
Gambar 4.17 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan.....	60
Gambar 4.18 <i>Single Line</i> Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 2.....	63
Gambar 4.20 Grafik Profil Tegangan Sebelum Dan Sesudah Pemasangan UPFC...	68
Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Daya P(MW) Sebelum Dan Sesudah Pemasangan UPFC.....	69
Gambar 4.22 Grafik Perbandingan Daya Qloss(Mvar)Sebelum Dan Sesudah Pemasangan UPFC.....	69

Daftar Tabel

Tabel 4.1 Data Trafo Gardu Induk Probolinggo.....	18
Tabel 4.2 Data Saluran.....	18
Tabel 4.3 Data Beban Penyulang GI Probolinggo Januari 2015.....	19
Tabel 4.4 Perhitungan Daya Setiap Penyulang Trafo 1.....	19
Tabel 4.5 Perhitungan Daya Setiap Penyulang Trafo 2.....	20
Tabel 4.6 Perhitungan Daya Setiap Penyulang Trafo 3.....	20
Tabel 4.7 Profil Tegangan Sebelum Menggunakan UPFC.....	21
Tabel 4.8 Rugi-rugi daya (MW) Sebelum Menggunakan UPFC.....	22
Tabel 4.9 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare.....	23
Tabel 4.10 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare.....	24
Tabel 4.11 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Pelabuhan.....	26
Tabel 4.12. Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Pelabuhan.....	27
Tabel 4.13 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sumber.....	28
Tabel 4.14. Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sumber.....	29
Tabel 4.15 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Leces.....	31
Tabel 4.16. Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Leces.....	32
Tabel 4.17 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Eratex.....	33
Tabel 4.18. Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Eratex.....	33
Tabel 4.19 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bentar.....	36
Tabel 4.20 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bentar.....	36
Tabel 4.21 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Banjar Sawah.....	38
Tabel 4.22 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Banjar Sawah.....	39
Tabel 4.23 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 1.....	41

Tabel 4.24 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 1.....	41
Tabel 4.25 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Togas.....	43
Tabel 4.26 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Togas	44
Tabel 4.27 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sukapura.....	46
Tabel 4.28 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI Sukapura.....	46
Tabel 4.29 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare 2.....	48
Tabel 4.30 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare 2.....	49
Tabel 4.31 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bromo.....	51
Tabel 4.32 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bromo.....	51
Tabel 4.33 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Beberan.....	53
Tabel 4.34 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Beberan.....	54
Tabel 4.35 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Malasan.....	56
Tabel 4.36 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Malasan.....	56
Tabel 4.37 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Penyulang KTI.....	58
Tabel 4.38 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI.....	58
Tabel 4.39 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan.....	61
Tabel 4.40. Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan.....	61
Tabel 4.41 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 2...63	
Tabel 4.19 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan.....	64

Tabel 4.43 Profil Tegangan Sebelum Dan Sesudah Pemasangan UPFC.....	65
Tabel 4.44 Perbandingan Daya (MW) Setelah Dan Sebelum Pemasangan UPFC.....	66
Tabel 4.45 Perbandingan Daya Q (Mvar) Setelah Dan Sebelum Pemasangan UPFC.....	67

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, kebutuhan sistem tenaga listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan laju pertumbuhan ekonomi, pertumbuhan penduduk dan industri. Dalam hal ini pengembangan dan pembangunan pembangkit-pembangkit baru serta saluran transmisi sangat diperlukan untuk memenuhi kebutuhan beban yang terus meningkat. Berdasarkan standart PLN, nilai tegangan yang diizinkan pada suatu sistem tenaga listrik berkisar antara 0,95 sampai 1,05pu dari tegangan nominalnya. Selain biaya yang sangat mahal, proses pembangunan saluran transmisi baru juga memerlukan waktu yang sangat lama^[1]. Sehingga muncul suatu alternatif untuk memaksimalkan pemanfaatan saluran transmisi, yaitu dengan menggunakan peralatan *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS).^[2]

Konsep FACTS device diperkenalkan oleh *Electric Power Research Institute* (EPRI) pada akhir tahun 1980. Dimana peralatan FACTS device ini dapat meningkatkan kapasitas sistem tenaga listrik dan mengontrol aliran daya (*load flow*) secara flexibel^[3]. Disisi lain FACTS device juga dapat mengurangi biaya pembangkit energi listrik dan meningkatkan kestabilan tegangan.

Dari beberapa type peralatan FACTS *device*, UPFC merupakan peralatan FACTS terkini yang telah digunakan dalam sistem tenaga. UPFC menggabungkan antara STATCOM dan SSSC, sehingga UPFC memiliki keunggulan dari STATCOM dan SSSC. UPFC merupakan peralatan serbaguna, dikarenakan dapat mengontrol tegangan dan aliran daya untuk operasi sistem yang optimal.^[1]

1.2 Rumusan Masalah

Sesuai dengan latar belakang dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara menempatkan UPFC pada saluran.
2. Berapa besar perbaikan kualitas system dengan menggunakan UPFC dibandingkan dengan atau tanpa menggunakan UPFC.

1.3 Tujuan Penelitian

- a. Menempatkan UPFC pada saluran, agar dapat mereduksi rugi-rugi saluran untuk operasi sistem yang optimal.
- b. Mengetahui perbaikan kualitas system dengan menggunakan UPFC, dibandingkan dengan atau tanpa menggunakan UPFC

1.4 Batasan Masalah

Supaya tidak terjadi penyimpangan antara maksud dan tujuan dalam penyusunan skripsi ini, maka penulis memberikan batasan masalah sebagai berikut:

- a. Sistem dalam keadaan normal.
- b. Peralatan control yang digunakan dalam simulasi adalah *Unified Power Flow Controller* (UPFC).

1.5 Metodologi

- a. Studi pustaka (library research)

Studi Pustaka yaitu dengan mengumpulkan buku-buku, dokumen, jurnal-jurnal yang berhubungan dengan masalah yang dibahas.

- b. Pengambilan data

Sebelum melakukan simulasi, dilakukan pengambilan data pada daerah yang akan dilakukan studi kasus.

- c. Pengolahan data

Pada tahap ini dilakukan pengolahan data yang telah diperoleh apabila data yang diperoleh belum sesuai dengan data yang digunakan untuk simulasi.

- d. Simulasi

Melakukan simulasi dengan bantuan software PSCAD.

- e. Penarikan kesimpulan setelah melakukan analisa dari hasil.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Pemodelan Sistem Tenaga Listrik

Pemodelan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai suatu sistem jaringan yang terdiri dari komponen-komponen atau alat listrik seperti : generator, transformator, saluran transmisi, dan beban yang saling berhubungan serta membentuk suatu sistem.

a. Pemodelan Generator^[9]

Generator dimodelkan dengan sumber daya aktif (MW) tertentu dan tegangan terminal yang konstan jika limit pembangkitan daya reaktif tidak dilanggar. Pada bus referensi (*slack bus*), generator dinyatakan dengan tegangan dan sudut fasa yang tetap. Yang mana secara matematis persamaan daya aktif dan daya reaktif pada generator dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P_g = \frac{V_t E_q}{X_d} \sin \delta + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

$$Q_g = \frac{V_t E_q}{X_d} \cos \delta - V_t^2 \left(\frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

- Dimana : P_g dan Q_g = Daya aktif dan reaktif yang dihantarkan terminal Generator
 V_t = Tegangan terminal generator
 δ = Sudut fasa generator
 E_q = Tegangan internal generator
 X_d dan X_q = Reaktansi sinkron

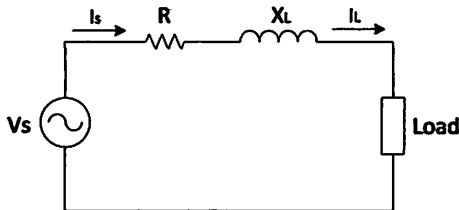
b. Pemodelan Transformator Daya^[10]

Pada trafo daya, arus melalui reaktansi magnetisasi (X_m) dan rugi inti besi (R_m) jauh lebih kecil dibandingkan dengan arus beban, sehingga kata lain sirkuit eksitasi pada trafo daya dapat diabaikan, sehingga dimodelkan sebagai impedansi Z . Dalam suatu sistem tenaga seiring diinginkan tegangan berada dalam batas-batas tertentu. Untuk itu diperlukan suatu transformator dengan posisi tap dapat diubah. Transformator oto dan transformator dua belitan (*two winding transformer*). Agar pengaturan tegangan dapat lebih baik biasanya pengaturan posisi tap dilakukan di sisi tegangan tinggi.

c. Pemodelan Saluran Transmisi^{[9][10]}

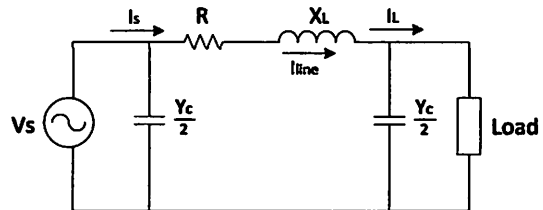
Saluran transmisi di representasikan sesuai dengan kelas transmisi. Representasi saluran transmisi berdasarkan jarak terbagi atas 3 bagian, yaitu :

1. Transmisi pendek ($l < 80$ km / 50 mil)
2. Transmisi menengah (80 km / 50 mil $< l < 240$ km / 150 mil)
3. Transmisi panjang ($l > 240$ km / 150 mil)



Gambar 2.1

Rangkaian ekivalen saluran transmisi pendek (<https://impedansi-saluran-transmisi>)



Gambar 2.2

Rangkaian ekivalen saluran transmisi menengah dan panjang (<https://impedansi-saluran-transmisi>)

Pada saluran transmisi pendek, memiliki panjang saluran kurang dari 80 km (50 mil) yang diasumsikan bahwa nilai kapasitansi dapat diabaikan dan hanya memperhitungkan nilai resistansi (R) dan reaktansi induktif (X_L). Dengan diasumsikan dalam kondisi yang seimbang (balanced), saluran transmisi dapat di tunjukkan dengan menggunakan rangkaian ekivalen satu fasa dengan nilai resistansi (R) dan reaktansi induktif (X_L) yang dihubungkan seri (series impedance), yang mana dapat dilihat pada gambar 2.2. Sedangkan pada saluran transmisi menengah, saluran transmisi memiliki panjang antara 80 km (50 mil) dan 240 km (150 mil). Pada saluran transmisi menengah, nilai kapasitansi penghantar tidak dapat diabaikan sehingga penghantar dapat dimodelkan dengan menggunakan rangkaian ekivalen satu fasa dalam bentuk nominal π yang dapat dilihat pada gambar 2.3. Namun untuk saluran transmisi panjang, nilai kapasitansi dan impedansi penghantar diasumsikan terdapat pada sepanjang penghantar hingga batas yang tak terhingga.

d. Pemodelan Beban^[10]

Dalam sistem tenaga, ada dua macam pemodelan beban yaitu beban statis dan beban dinamis.

1. Model Beban Statis

Model beban statis adalah model yang mempresentasikan daya aktif dan reaktif sebagai fungsi dari tegangan bus dan frekuensi. Respons beban statis terhadap perubahan

tegangan dan frekuensi tercapai dengan cepat, sehingga cenderung kondisinya dalam keadaan lunak. Model beban statis biasanya digunakan untuk komponen seperti beban resistif dan beban penerangan, dan juga kadang-kadang digunakan untuk pendekatan terhadap komponen dinamis.

2. Model Beban Dinamis

Model beban dinamis adalah model yang merepresentasikan daya aktif dan reaktif mengikuti dinamika variabel sistem, sehingga kondisinya bisa berubah-ubah setiap saat. Persamaan defferensial biasanya digunakan untuk memperesentasikan model seperti ini.

2.2 Aliran Daya (Load Flow) ^[11]

Aliran daya atau disebut *loaf flow* merupakan studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya atau tegangan sistem dalam kondisi operasi tunak (*stedy state*). Studi aliran daya juga memberikan informasi guna mengevaluasi unjuk kerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkit maupun pembebanan.

Studi aliran daya merupakan studi yang paling penting dalam perencanaan dan desain perluasan sistem tenaga listrik serta menentukan operasi terbaik pada jaringan yang sudah ada. Studi aliran daya sangat diperlukan dalam perencanaan serta pengembangan sistem dimasa-masa yang akan datang. Karena seiring dengan bertambahnya konsumen akan kebutuhan tenaga listrik, maka akan selalu terjadi perubahan beban, perubahan unit-unit pembangkit, dan perubahan saluran transmisi. Didalam studi aliran daya, bus-bus terbagi menjadi 3 bagian, yaitu *Slack bus* atau *swing bus* atau bus referensi, *Voltage controller bus* atau bus generator (PV), dan *Load bus* atau bus beban (PQ), yang mana dapat didefinisikan sebagai berikut :

a) *Slack bus* (Bus referensi)

Pada bus ini, rating tegangan $|v|$ dan sudut fasa tegangan δ sudah ditentukan besarnya sementara daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) didapatkan dari perhitungan. Biasanya nilai $|v|$ adalah 1 pu, sedangkan sudut fasa tegangan bernilai nol, karena fasor tegangan dari bus dipakai sebagai referensi.

b) *Voltage controller bus* (Bus generator)

Pada bus ini hanya terdapat daya pembangkit dimana $|v|$ diatur menggunakan regulator tegangan (AVR) dan P diatur dengan govenor. Sehingga untuk bus ini P dan $|v|$

diketahui. Sementara daya reaktif (Q) dan sudut fasa (δ) didapatkan dari hasil perhitungan.

c) *Load bus* (Bus beban)

Pada bus ini hanya terdapat kebutuhan daya untuk memenuhi kebutuhan beban yang mana daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) sudah diketahui, sementara nilai tegangan $|v|$ dan sudut fasa (δ) berubah-ubah menurut kebutuhan beban. Oleh karena itu, nilai tegangan $|v|$ dan sudut fasa (δ) harus ditentukan berdasarkan hasil perhitungan.

2.3 Faktor Daya^[8]

Faktor daya listrik adalah perbandingan antara daya aktif dengan daya buta.

1. Daya aktif (P)

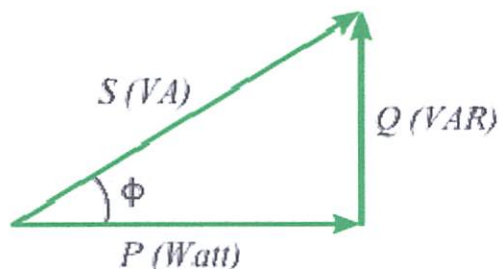
Daya aktif (P) adalah daya yang timbul akibat mengalirnya arus listrik melalui hambatan / *resistor* seperti lampu pijar, elemen pemanas atau heater. Daya ini dipergunakan untuk melakukan kerja atau dengan kata lain daya yang benar-benar digunakan sesuai dengan kebutuhan tenaga listrik. Satuan dari daya aktif ini adalah Watt atau kilo Watt.

2. Daya reaktif (Q)

a. Daya reaktif induktif adalah daya yang timbul akibat mengalirnya arus listrik melalui kumparan-kumparan kawat seperti pada motor-motor listrik, transformer, balast pada lampu neon dll.

b. Daya *reaktif kapasitif* adalah daya yang timbul akibat mengalirnya arus listrik pada sebuah kapasitor. Satuan dari daya *reaktif* ini adalah *volt ampere reaktif* (VAR) atau kilo *volt ampere reaktif* ($KVAR$).

3. Daya buta (S) adalah hasil perkalian antara arus dan tegangan listrik pada suatu beban.



Gambar 2.3 Segi Tiga Daya

$$S = V \cdot I \dots\dots\dots(2.4)$$

$$P = V \cdot I \cos \phi \dots\dots\dots(2.5)$$

$$Q = V \cdot I \sin \phi \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

S = Daya Total (VA) P = DayaAktif (Watt)

Q = DayaReaktif (Var) V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere) ϕ = Sudutdaya

Hubungan antara ketiga daya listrik tersebut, secara matematika dapat dinyatakan sebagai berikut.

2.4 Rugi-Rugi Saluran^[4]

Daya listrik yang dikirim dan disalurkan dari gardu induk/trafo distribusi ke pemakai mengalami rugi tegangan dan rugi daya, ini disebabkan karena saluran distribusi mempunyai tahanan, induktansi, dan kapasitas. Karena saluran distribusi *primer* ataupun *sekunder* berjarak pendek maka kapasitas dapat diabaikan, dengan demikian dapat dibuat rangkaian *ekivalen* dari saluran distribusi.

Kerugian akibat pelembekan, pelembekan logam berpengaruh terhadap sedikit pada semua suhu dan merupakan fungsi suhu dan waktu. Bersamaan dengan penurunan batas tegangan. Pelembekan yang terlihat dan kerugian tegangan tarik tidak berpengaruh jika penghantar dalam batas yang dianjurkan. Pada keadaan tertentu harga – harga pada suatu tingkat umur yang ditaksir dapat ditentukan. Untuk para ahli perlu mengetahui hubungan antara suhu kerja, waktu suhu kerja dan penurunan kekuatan penghantaryang bersangkutan.

Kerugian akibat panas, jika suatu penghantar dialiri arus listrik secara terus – menerus maka akan menimbulkan panas, panas ini timbul akibat energi listrik yang mengalir pada penghantar tersebut. Semakin lama arus tersebut mengalir maka semakin panas penghantar tersebut dan semakin banyak energi listrik yang hilang karena energi tersebut berubah menjadi panas. Hal inilah yang merugikan karena jika energi itu hilang maka tegangan pada ujung penghantar tersebut akan berkurang. semakin banyak energi yang menjadi panas maka semakin banyak tegangan yang menghilang.

Kerugian akibat Jarak, jarak sangat berpengaruh pada keandalan jaringan karena semakin jauh atau semakin panjang penghantar listrik tersebut maka akan banyak tegangan listrik yang menghilang karena penghantar itu sendiri memiliki hambatan atau

tahanan, jadi karena jarak penghantar sangat jauh dari sumber atau pembangkit maka nilai hambatan penghantar itu sendiri akan mengurangi tagangan yang mengalir pada penghantar tersebut.

Luas penampang kawat (penghantar), Arus listrik yang mengalir dalam penghantar selalu mengalami tahanan dari penghantar itu sendiri, besarnya tahanan tergantung bahannya.

Tegangan juga sangat berpengaruh terhadap rugi-rugi daya, semakin besar tegangan pada suatu saluran, maka semakin kecil arus pada saluran tersebut. Sedangkan arus adalah salah satu faktor yang mempengaruhi besar kecilnya rugi- rugi daya pada suatu saluran.

2.4.1 Rugi-Rugi Daya^[6]

Rugi-rugi daya merupakan daya yang hilang dalam penyaluran daya listrik dari sumber daya listrik utama ke suatu beban seperti ke rumah-rumah, ke gedung-gedung, dan lain sebagainya. Dalam setiap penyaluran daya listrik ke beban pasti terdapat rugi-rugi daya yang diakibatkan oleh faktor-faktor tertentu seperti jarak saluran listrik ke beban yang terlalu jauh, yang juga akan berakibat bertambah besarnya tahanan saluran kabel yang digunakan.

Besarnya rugi-rugi daya pada jaringan tiga fasa adalah sebagai berikut :

$$P_{\text{loss}} = 3 \times I^2 \times R \times L \dots\dots\dots(2.7)$$

$$P_{\text{loss}} = (P^2 \times R \times L) / (V^2 \times (\text{Cos } \emptyset)^2) \dots\dots\dots(2.8)$$

Dengan

$$I = P / (\sqrt{3} \times V \times \text{Cos } \emptyset) \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana

$$P_{\text{loss}} = 3 \times I^2 \times R \times L \dots\dots\dots(2.10)$$

$$P_{\text{loss}} = (3 \times (P)^2 \times R \times L) / ((\sqrt{3})^2 \times (V)^2 \times (\text{Cos } \emptyset)^2) \dots\dots\dots(2.11)$$

$$P_{\text{loss}} = (3 \times P^2 \times R \times L) / (3 \times V^2 \times (\text{Cos } \emptyset)^2) \dots\dots\dots(2.12)$$

$$P_{\text{loss}} = (P^2 \times R \times L) / (V^2 \times (\text{Cos } \emptyset)^2) \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

P_{loss} = Rugi-rugi daya (*Watt*)

P = Daya yang disalurkan (*Watt*)

V = Tegangan kerja sistem (*Volt*)

- I = Arus yang disalurkan (*Amper*)
 R = Tahanan Saluran (*Ohm/ meter*)
 L = Panjang Saluran (meter)
 Cos Ø = Faktor Daya

2.4.2 Voltage Drop^[5]

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran *Volt*. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah *induktansi* dan *kapasitansinya* diperhitungkan karena nilainya cukup berarti.

Sesuai dengan standar tegangan yang ditentukan oleh PLN (SPLN), perancangan jaringan dibuat agar jatuh tegangan di ujung diterima 10%. Tegangan jatuh pada jaringan disebabkan adanya rugi tegangan akibat hambatan listrik (R) dan *reaktansi* (X). Jatuh tegangan *phasor* V_d pada suatu penghantar yang mempunyai *impedansi* (Z) dan membawa arus (I) dapat dijabarkan dengan rumus :

$$V_d = I \cdot Z \dots \dots \dots (2.14)$$

Dalam pembahasan ini yang dimaksudkan dengan jatuh tegangan (ΔV) adalah selisih antara tegangan kirim (V_k) dengan tegangan terima (V_T), maka jatuh tegangan dapat didefinisikan adalah :

$$\Delta V = (V_k) - (V_T) \dots \dots \dots (2.15)$$

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Tegangan jatuh relatif dinamakan regulasi tegangan V_R (*voltage regulation*) dan dinyatakan oleh rumus :

$$\Delta V = V_s - V_r \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana :

V_s = tegangan pada pangkal pengiriman

V_r = tegangan pada ujung penerimaan

Untuk menghitung jatuh tegangan, diperhitungkan reaktansinya, maupun faktor dayanya yang tidak sama dengan satu, maka berikut ini akan diuraikan cara perhitungannya. Dalam penyederhanaan perhitungan, diasumsikan beban-bebannya merupakan beban fasa tiga yang seimbang dan faktor dayanya ($\cos \phi$) antara 0,6 s/d 0,85. tegangan dapat dihitung berdasarkan rumus pendekatan hubungan sebagai berikut

$$(\Delta V) = I (R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi) L \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana :

I = Arus beban (Ampere)

R = Tahanan rangkaian (Ohm)

X = Reaktansi rangkaian (Ohm)

2.5 Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) Devices^[12]

FACTS *devices* merupakan perangkat control elektronik terpadu yang mengontrol variabel-variabel saluran transmisi seperti impedansi saluran, tegangan system dan sudut tegangan secara cepat dan efektif. Dengan demikian FACTS *devices* juga sangat berperan untuk menjaga operasi system tenaga listrik yang optimal.

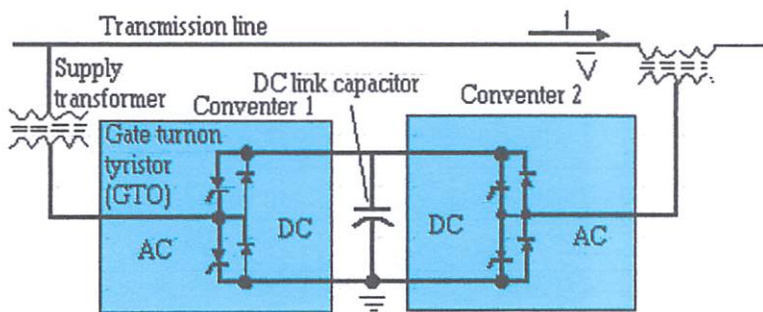
Peralatan FACTS *devices* sudah banyak digunakan pada system tenaga modern untuk menangani masalah penyaluran daya dimana sebagai peralatan elektronika daya terpadu, FACTS *devices* sangat mungkin diaplikasikan pada saluran transmisi untuk meningkatkan kemampuan penyaluran daya saluran. Dengan biaya investasi yang relatif dan waktu pemasangan yang cepat dibanding dengan membangun saluran transmisi baru, menyebabkan aplikasi peralatan FACTS *devices* banyak menjadi pertimbangan utama oleh perusahaan penyedia listrik. Selain pertimbangan biaya investasi, penggunaan FACTS *devices* juga didasarkan pada kemampuannya untuk meningkatkan kestabilan transmisi tenaga listrik, memperbaiki profil tegangan dan keseimbangan daya reaktif serta memperbaiki pembagian beban pada saluran paralel.

FACTS *devices* mempunyai kemampuan untuk menjadikan suatu system tenaga listrik dapat beroperasi dengan cara lebih fleksibel, aman, dan ekonomis. Pola pembangkitan tenaga listrik yang mengarah pada pembebanan saluran yang terlampaui berat, akan mengakibatkan rugi-rugi saluran yang lebih tinggi, dan memperlemah

keamanan serta stabilitas dari system tenaga listrik tersebut. Dalam kondisi demikian, FACTS *devices* biasa digunakan untuk meningkatkan kemampuan sistem, dengan cara mengontrol aliran daya pada saluran transmisi. Di antara beberapa jenis FACTS *devices* salah satunya adalah *Unified Power Flow Controller (UPFC)* yang berfungsi mengatur aliran daya reaktif kesistem untuk memperbaiki profil tegangan, sehingga drop tegangan pada system dapat ditekan sekecil mungkin.

2.5.1 *Unified Power Flow Controller(UPFC)*^[1]

UPFC merupakan peralatan FACTS terkini yang telah diimplementasikan dalam sistem tenaga. UPFC menggabungkan antara STATCOM dan SSSC, sehingga UPFC memiliki keunggulan dari STATCOM dan SSSC. Diantara peralatan FACTS, UPFC merupakan peralatan serbaguna, dikarenakan dapat mengontrol tegangan suatu bus dan aliran daya untuk operasi sistem. Sifat serbaguna ini dikarenakan terdapat dua *switching converter* yang terdapat pada UPFC.



Gambar 2.4 *Unified Power Flow Controller* ([https:// Flexible AC Transmission Systems](https://flexibleactransmission.com) :*Modelling and Control*)

2.5.2 Prinsip Kerja *Unified Power Flow Controller(UPFC)*^[2]

UPFC menggunakan dua buah *converter* bersumber tegangan yang beroperasi dari sebuah *DC link capacitor*. Tegangan injeksi ini dapat dianggap sebagai sumber tegangan AC. Arus yang mengalir melalui sumber tegangan ini akan menghasilkan pertukaran daya reaktif antara sumber tegangan tersebut dengan sistem AC. Daya reaktif yang ditukar pada terminal AC yaitu diubah menjadi daya DC. Daya DC ini muncul di DC link sebagai permintaan daya. Daya reaktif yang dipertukarkan di terminal AC dibangkitkan secara internal oleh *converter*.

Dua *converter* tersebut terhubung shunt dan series. Inverter 1 (terhubung shunt dengan sistem AC melalui transformer kopling) digunakan untuk menyediakan daya aktif inverter 2 pada terminal DC link. Inverter 2 (terhubung series dengan sistem AC) berfungsi untuk membangkitkan atau menyerap daya reaktif pada terminal AC.

Sehingga dengan control yang tepat converter ini dapat menyediakan kompensasi daya reaktif untuk saluran dan melaksanakan pengaturan secara tak langsung pada terminal input UPFC.

BAB III

METODELOGI PENELITIAN

3.1. Metode yang digunakan

Dalam analisis penempatan dan penentuan kapasitas optimal *unified power flow control* (UPFC) untuk memperbaiki profil tegangan dan penurunan rugi-rugi daya, penelitian ini menggunakan standart *IEEE* sebagai titik acuan dalam proses pelaksanaan dan pengerjaannya. Pengujian dan penelitian ini dimulai dengan survey data yang diperoleh dari PT. PLN (PERSERO) GARDU INDUK PROBOLINNGO. Data tersebut diambil pada tanggal 1 Mei 2015. Dengan data yang diperoleh maka dapat dilakukan simulasi menggunakan *Software PSCAD/EMTDCV 4.2 Power Simulation*. Simulasi yang dapat dilakukan berupa aliran daya atau *Load Flow*, yang mana untuk mengetahui profil tegangan, daya aktif, daya reaktif dan rugi-rugi yang terjadi pada sistem GARDU INDUK PROBOLINNGO. Setelah melakukan studi aliran daya maka dapat diketahui kondisi-kondisi bus atau penyulang yang mengalami penurunan tegangan (*under voltage*). Apabila terdapat kondisi-kondisi bus yang mengalami penurunan tegangan dibawah margin yang diijinkan ($0,95 < V_{pu} < 1,05$) maka dapat dilakukan perbaikan profil tegangan dengan menentukan penempatan *unified power flow control* (UPFC).

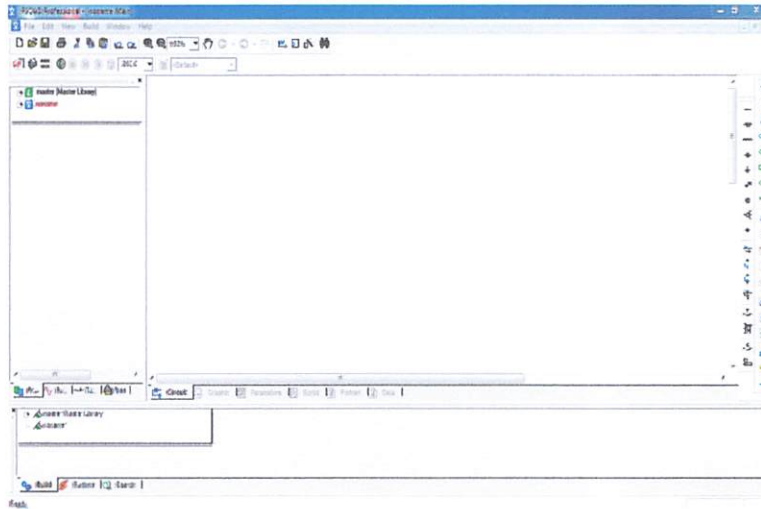
3.2 *Software PSCAD/EMTDCV.4.2 Power Simulation*

Software PSCAD/EMTDC (power system computer audit design) adalah *graphical user interface* yang sangat baik dan fleksibel. *Software PSCAD/EMTDC* memungkinkan pengguna menggambar mengkonstruksi sebuah rangkaian, menjalankan sebuah simulasi, analisa hasil dan manajemen data terintegrasi secara lengkap. Penggambaran, pengontrolan dan pengukuran juga tersedia, jadi pengguna dapat mengubah parameter sistem, menjalankan simulasi dan melihat hasil secara langsung.

Dibawah ini adalah model umum yang terdapat di dalam studi sistem menggunakan *software PSCAD/EMTDC*:

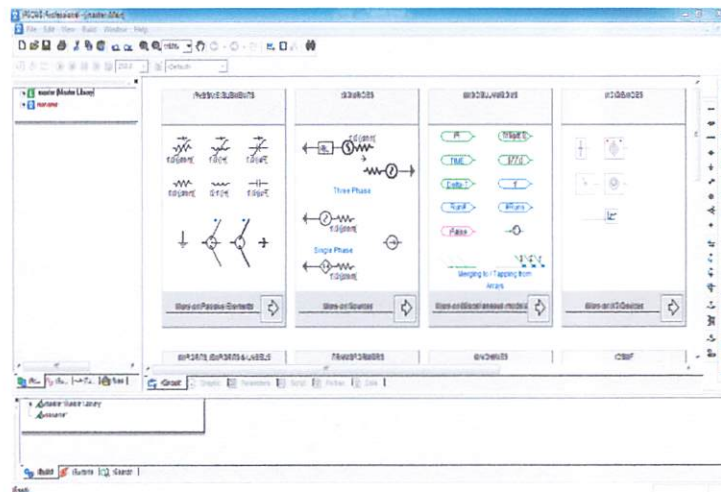
- *Resistors, inductors, capacitors.*
- *Mutually coupled windings, such as transformers.*
- *Frequency dependent transmission lines and cables (including the most accurate time domain line model in the world).*
- *Current and voltage sources.*
- *Switches and breakers.*
- *Protection and relaying.*

- *Diodes, thyristors, GTO, IGBT.*
- *Analog and digital control functions.*
- *AC and DC machines, exciters, governors, stabilizers and inertial models.*
- *Meters and measuring functions.*
- *Generic DC and AC controls.*
- *HVDC, SVC, and other FACTS controllers.*
- *Wind source, turbines and governor.*



Gambar 3.1

Tampilan utama software PSCAD/EMTDC



Gambar 3.2

Tampilan master library pada software PSCAD/EMTDC

3.3. Metode Aliran Daya (*Loadflow*)

Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya dengan membentuk persamaan aljabar non linier, maka perhitungan aliran daya dapat ditentukan dengan melakukan perbandingan antara perubahan tegangan pada sudut tegangan $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta|V_i^{(k)}|$ dengan perubahan daya aktif ($\Delta P_i^{(k)}$) dan daya reaktif ($\Delta Q_i^{(k)}$). Secara matematis persamaan aliran daya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.18)$$

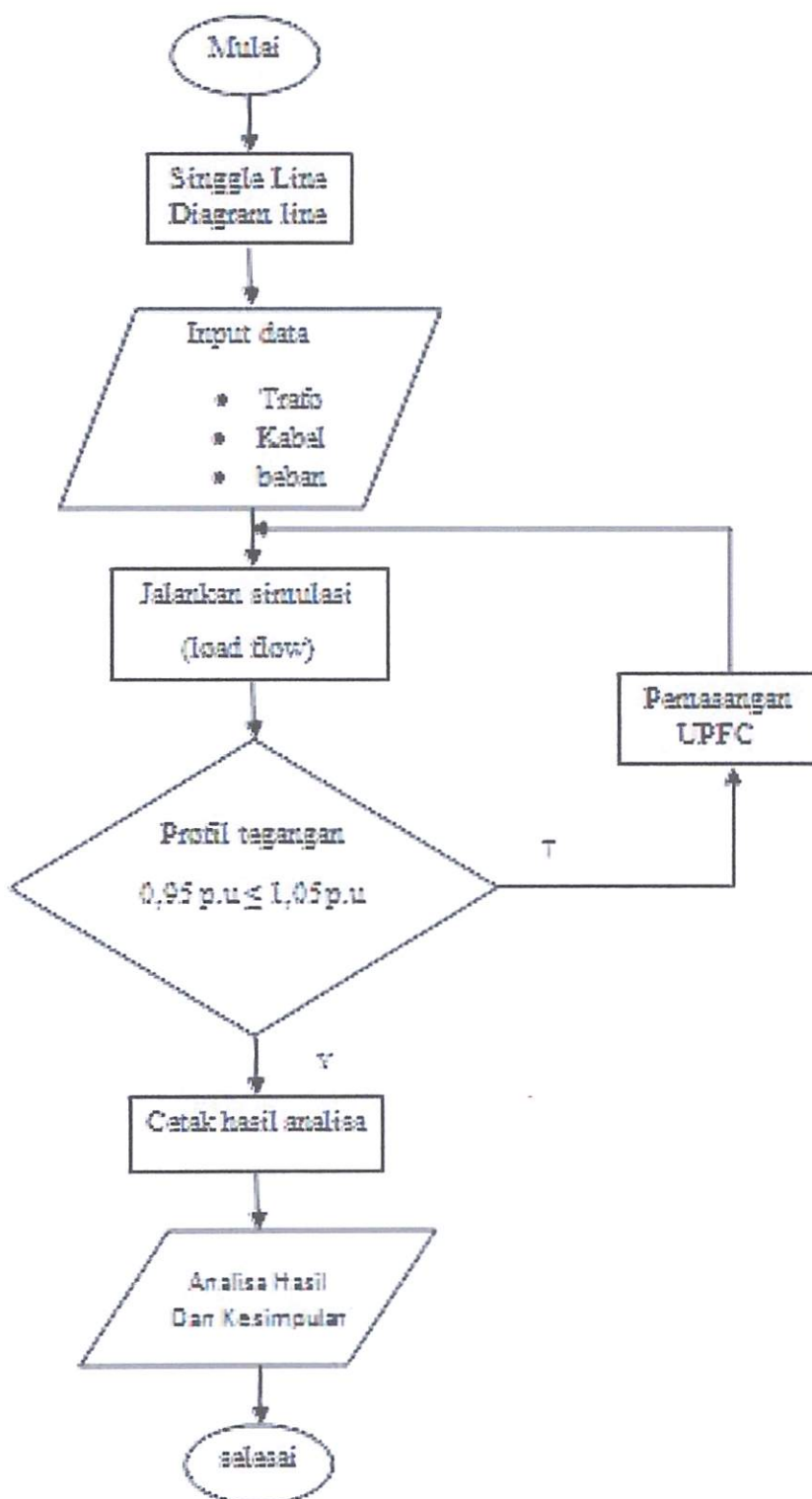
Dimana : ΔP adalah Nilai daya aktif (MW)

ΔQ adalah Nilai daya reaktif (Mvar)

3.4 Simulasi pada *Software PSCAD/EMTDCV.4.2 Power Simulation*

1. Mulai
2. Menggambar *single line*
3. Input data : Trafo, data saluran, data beban.
4. Menjalankan simulasi aliran daya (*Load Flow*).
5. Mengecek apakah tegangan pada sistem telah pada batasan yang ditentukan yaitu $0,95 \text{ p.u} \leq V \leq 1,05 \text{ p.u}$
 - a. "Ya" : Cek hasil simulasi dan analisis data
 - b. "Tidak" : Lakukan proses simulasi dengan pemasangan UPFC.
6. Setelah proses simulasi *Load Flow* selesai dan tegangan telah pada batasan yang ditentukan, kemudian cetak hasil simulasi dan analisis data.
7. Selesai.

3.5 Flowchart



Gambar 3.3 Flowchart

BAB IV

DATA DAN ANALISIS HASIL

4.1 DATA PT.PLN (PERSERO) GARDU INDUK PROBOLINGGO

Pada bab ini akan membahas tentang proses pengolahan data lapangan sebagai inputan, dimana data tersebut diperoleh dari survei data PT.PLN (Persero) Gardu Induk Probolinggo.

Proses pengolahan data lapangan agar parameter yang digunakan dalam menganalisis performansi sistem tenaga listrik dapat dapat dilakukan. Data lapangan disini meliputi data peralatan yang ada di Gardu Induk Probolinggo, data trafo, saluran dan beban. Sedangkan data yang dianalisis pada skripsi ini pada bulan Mei 2015.

Tabel 4.1 Data Trafo Gardu Induk Probolinggo

No	Trafo	(MVA)	Teg (KV)	Z (%)
1	POUWELS-ORF	35	150/20	10,32
2	SHANDONG-SFZ11	60	150/20	12,22
3	XIAN-SFZ	50	150/20	12,17

Tabel 4.2 Data Saluran

No	Dari	Ke	Jarak (km)	Jenis Konduktor
1	GI Probolinggo	Penyulang Spare	77,5	A3CS 3 X 110 mm
2	GI Probolinggo	Penyulang Pelabuan	12,91	A3CS 3 X 110 mm
3	GI Probolinggo	Penyulang Sumber	105,74	A3CS 3 X 110 mm
4	GI Probolinggo	Penyulang Leces	26,12	A3CS 3 X 110 mm
5	GI Probolinggo	Penyulang Eratek	4,13	A3CS 3 X 110 mm
6	GI Probolinggo	Penyulang Bentar	33,86	A3CS 3 X 110 mm
7	GI Probolinggo	Penyulang Banjar Sawah	73,29	A3CS 3 X 110 mm
8	GI Probolinggo	Penyulang Kti Pb1	5,04	A3CS 3 X 110 mm
9	GI Probolinggo	Penyulang Togas	65,18	A3CS 3 X 110 mm
10	GI Probolinggo	Penyulang sukapura	149,59	A3CS 3 X 110 mm
11	GI Probolinggo	Penyulang Spare 2	7,54	A3CS 3 X 110 mm
12	GI Probolinggo	Penyulang Bromo	32,04	A3CS 3 X 110 mm
13	GI Probolinggo	Penyulang Beberan	9,52	A3CS 3 X 110 mm
14	GI Probolinggo	Penyulang Malasan	69,87	A3CS 3 X 110 mm

15	GI Probolinggo	Penyulang KTI	3,45	A3CS 3 X 110 mm
16	GI Probolinggo	Penyulang Panjaitan	31,02	A3CS 3 X 110 mm
17	GI Probolinggo	Penyulang KTI PB 2	5,04	A3CS 3 X 110 mm

Tabel 4.3 Data Beban Penyulang GI Probolinggo Januari 2015

No	Penyulang	Teg (kv)	Beban Puncak Penyulang (Amp)
1	Penyulang Spare	20	190
2	Penyulang Pelabuan	20	91
3	Penyulang Sumber	20	133
4	Penyulang Leces	20	86
5	Penyulang Eratek	20	22
6	Penyulang Bentar	20	165
7	Penyulang Banjar Sawah	20	124
8	Penyulang Kti Pb1	20	150
9	Penyulang Togas	20	230
10	Penyulang sukapura	20	32
11	Penyulang Spare 2	20	174
12	Penyulang Bromo	20	191
13	Penyulang Beberan	20	97
14	Penyulang Malasan	20	82
15	Penyulang KTI	20	162
16	Penyulang Panjaitan	20	124
17	Penyulang KTI PB 2	20	176

Tabel 4.4 Perhitungan Daya Setiap Penyulang Trafo 1

NO	Trafo 1	Teg	Beban Puncak Penyulang	P	Q
		kv	Amp	MW	MVAR
1	Penyulang Spare	20	190	5,59	3,42
2	Penyulang Pelabuan	20	91	2,67	1,63
3	Penyulang Sumber	20	133	3,91	2,39
4	Penyulang Leces	20	86	2,53	1,54
5	Penyulang Eratek	20	22	0,64	0,39

Tabel 4.5 Perhitungan Daya Setiap Penyulang Trafo 2

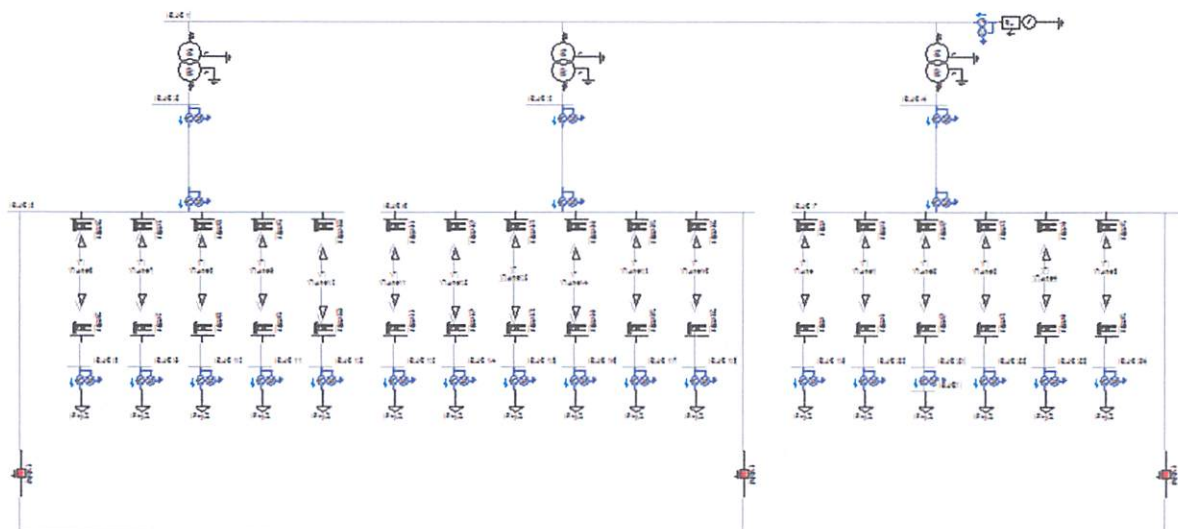
NO	Trafo 2	Teg	Beban Puncak Penyulang	P	Q
		Kv	Amp	MW	MVAR
1	Penyulang Bentar	20	165	4,85	2,97
2	Penyulang Banjar Sawah	20	124	3,65	2,23
3	Penyulang Kti Pb1	20	150	4,41	2,70
4	Penyulang Togas	20	230	6,77	4,14
5	Penyulang sukapura	20	32	0,94	0,57
6	Penyulang Spare 2	20	174	4,32	3,13

Tabel 4.6 Perhitungan Daya Setiap Penyulang Trafo 3

NO	Trafo 3	Teg	Beban Puncak Penyulang	P	Q
		kv	Amp	MW	MVAR
1	Penyulang Bromo	20	191	5,64	3,44
2	Penyulang Beberan	20	97	2,85	1,74
3	Penyulang Malasan	20	82	2,41	1,47
4	Penyulang KTI	20	162	4,77	2,91
5	Penyulang Panjaitan	20	124	3,65	2,23
6	Penyulang KTI PB 2	20	176	5,18	3,17

4.2 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Sistem 20 kV GI Probolinggo Dalam *Software PSCAD Power Simulasian*

Pada simulasi akan dilakukan pengambilan data saat menggunakan UPFC dan tanpa menggunakan UPFC. Setelah itu hasil keluaran akan dianalisa dan dapat dilihat seberapa besar kemampuan UPFC dalam *mereduksi* rugi-rugi saluran pada sistem. Untuk mensimulasikan sistem dalam *software PSCAD Power Simulasian* maka terlebih dahulu digambarkan *single linesistem* jaringan Gardu Induk Probolinggo.



Gambar 4.1 *Single Line* Gardu Induk Probolinggo dalam PSCAD

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo, dapat diketahui bahwa pada sistem 20 kV GI Probolinggo terdapat bus yang mengalami kondisi *drop voltage* atau dibawah 0,95 p.u., yang mana dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.7 Profil Tegangan Sebelum Menggunakan UPFC

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,994
6	Bus 6	0,993
7	Bus 7	0,994
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9778
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9609
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9504
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9796
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9908
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9678
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,958
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9788
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9862

17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9299
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9814
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9806
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9605
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9817
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9817
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9829
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9793

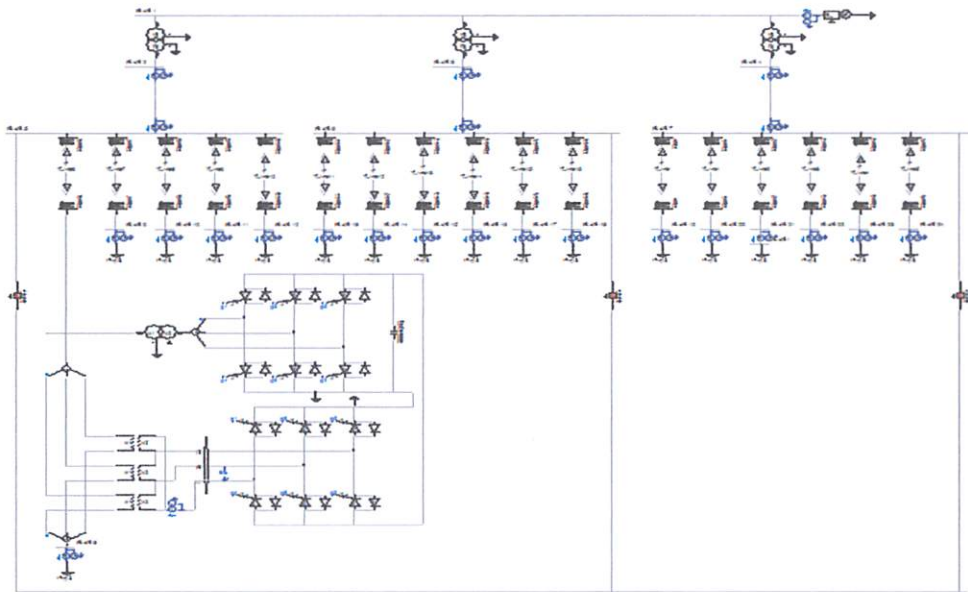
Tabel 4.8 Rugi-rugi daya (MW) Sebelum Menggunakan UPFC

No	Dari	Ke	P _{Loss} (MW)	Q _{loss} (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,01
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	2,952	6,566
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,033	0,066
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	1,483	2,189
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,206	0,458
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,023	0,051
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	1,284	1,489
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,742	1,484
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	1,39	1,489
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,452	1,004
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,254	0,443
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	1,168	1,547
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,624	1,127
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,344	0,108
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,19	0,332
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,556	1,718
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,225	0,431

23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,135	0,266
----	-------	---------------------	-------	-------

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada, penyulang sukapura (0,9399pu).

4.3 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan GarduInduk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare



Gambar 4.2 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare.

Tabel 4.9 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,996
5	Bus 5	0,995
6	Bus 6	0,993
7	Bus 7	0,993
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9605

9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9817
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9817
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9829
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9793
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9678
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9499
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9814
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9806
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9388
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9862
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9796
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9908
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9678
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9378
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9609
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9504

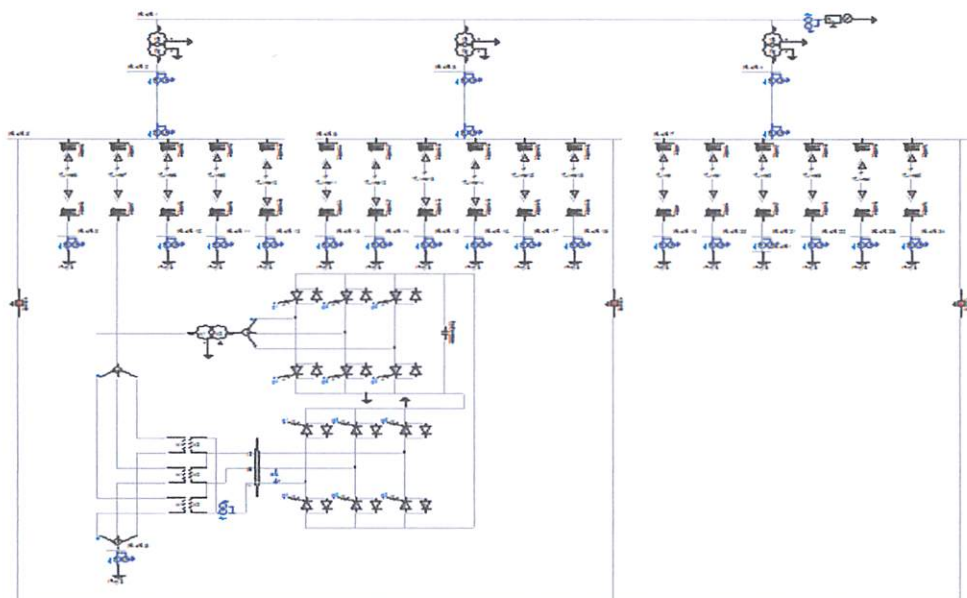
Tabel 4.10. Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,004	0,007
2	Bus 1	Bus 3	0,008	0,013
3	Bus 1	Bus 4	0,003	0,008
4	Bus 2	Bus 5	0,017	0,031
5	Bus 3	Bus 6	0,014	0,019
6	Bus 4	Bus 7	0,019	0,03
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,346	1,218
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,015	0,031
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	1,242	1,833
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,08	0,177
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,071	0,159
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	1,988	1,316
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	1,724	1,292
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	1,675	3,543

15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,372	0,826
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,309	0,538
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,86	1,139
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,509	0,917
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	5,12	11,386
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,276	0,481
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	2,93	3,88
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,283	0,543
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,108	0,213

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Banjar Sawah (0,9499 pu), Penyulang sukapura(0,9499 pu), Penyulang KTI (0,9378 pu).

4.4 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Pelabuhan



Gambar 4.3 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo dengan menggunakan UPFC pada Penyulang Pelabuhan

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Pelabuhan.

Tabel 4.11 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Pelabuan

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,996
4	Bus 4	0,994
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9806
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9605
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9817
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9817
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9276
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9609
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9489
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9796
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9908
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9829
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9793
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9678
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,94
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9788
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9862
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9759
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9814

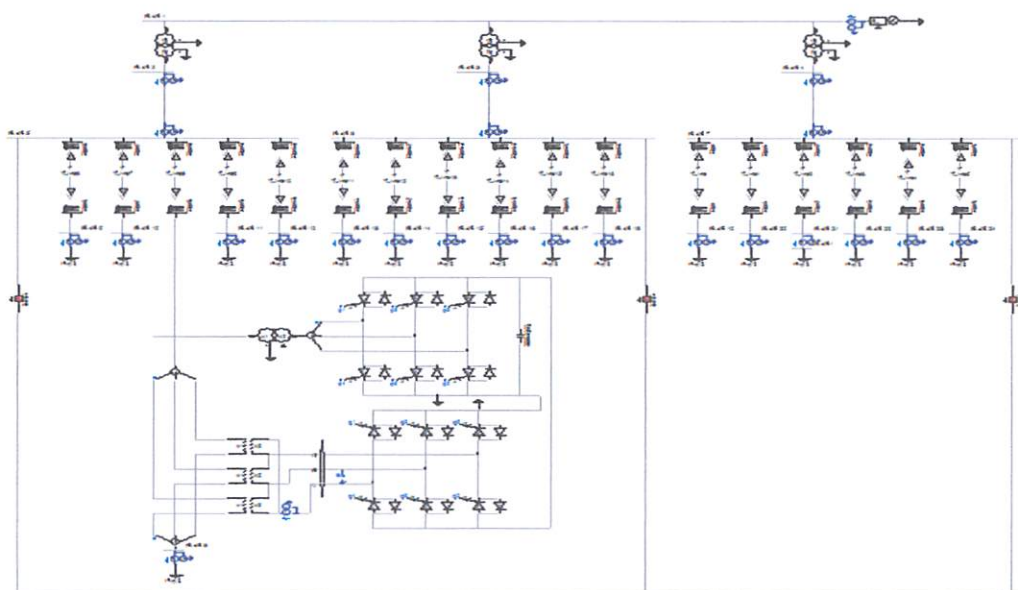
Tabel 4.12.Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Pelabuan

No	Dari	Ke	P _{Loss} (MW)	Q _{loss} (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,01
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021

5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,624	0,031
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,344	0,833
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,19	0,177
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	1,056	1,159
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,225	1,547
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,135	1,127
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,08	0,051
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,071	16,2
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	1,388	1,484
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,724	1,489
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	2,675	1,004
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,372	0,443
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,276	1,547
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	2,93	2,189
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,283	0,458
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,108	0,051
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,283	1,602

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Eratek (0,9276 pu), Penyulang Banjar Sawah (0,9489 pu), Penyulang Beberan (0,94pu).

4.5 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sumber



Gambar 4.4 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sumber

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sumber.

Tabel 4.13 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sumber

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,996
3	Bus 3	0,999
4	Bus 4	0,991
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9461
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9609
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9804
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9796

12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9908
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9678
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9398
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9609
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9389
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9796
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9908
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9678
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9765
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9788
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9862
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9829
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9793

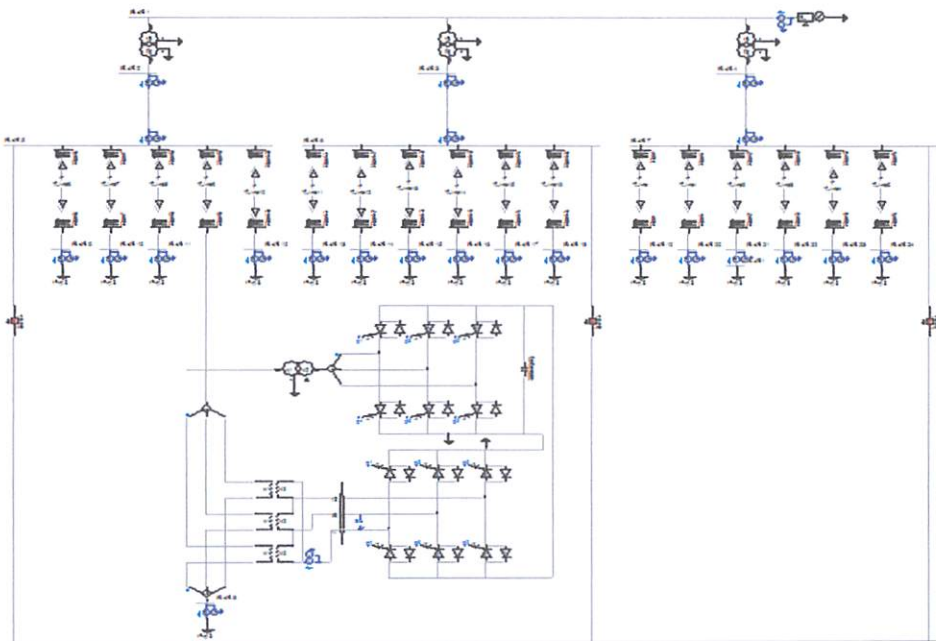
Tabel 4.14. Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sumber

No	Dari	Ke	P _{Loss} (MW)	Q _{Loss} (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,01
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,309	0,031
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,86	1,833
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,509	0,177
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,112	0,159
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,276	1,547
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,934	1,127
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,08	0,051
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,023	16,2
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	1,284	1,484
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,742	0,489
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,979	1,004

18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,452	0,443
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,015	1,547
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	1,242	2,189
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,08	0,458
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,071	0,051
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,988	1,206

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Spare (0,9461 pu), Penyulang Banjar Sawah (0,9398 pu), Penyulang Togas (0,9389pu).

4.6 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Leces



Gambar 4.5 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Leces

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Leces.

Tabel 4.15 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Leces

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,998
3	Bus 3	0,995
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9817
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9829
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9793
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9848
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9788
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9562
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9778
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9609
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9804
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9496
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9908
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9699
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9814
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9806
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9796
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9308
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9678

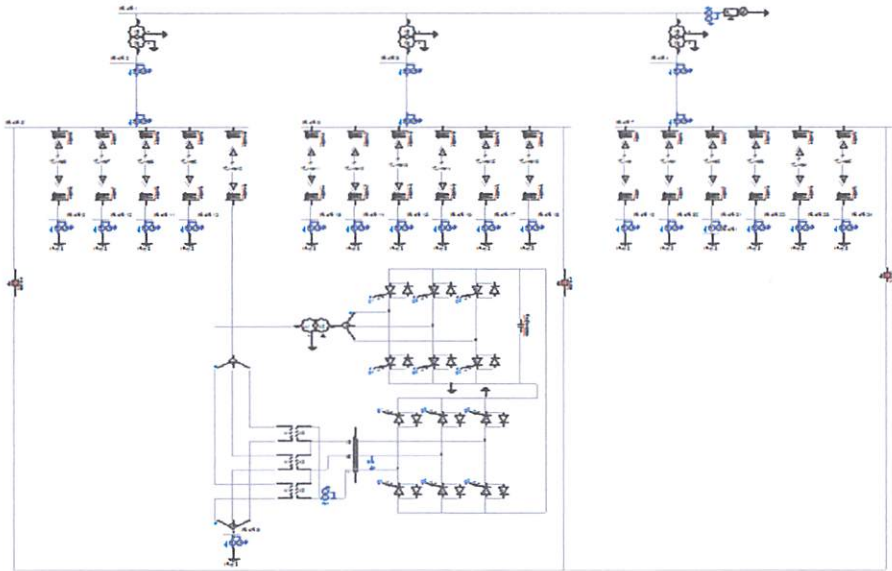
Tabel 4.16. Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Leces

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,008	0,007
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,001
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021

5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,206	0,066
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,023	2,189
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,284	0,458
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	1,742	1,951
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,08	1,547
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,071	1,127
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,988	1,543
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,724	0,826
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	1,075	1,159
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,254	1,316
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	1,483	2,292
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,206	3,543
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,023	0,826
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,284	0,538
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,742	1,004
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,139	0,443
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,452	1,547

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang sukapura (0,9496 pu), Penyulang Panjaitan (0,9308 pu).

4.7 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Eratex



Gambar 4.6 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Eratex

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Eratex.

Tabel 4.17 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Eratex

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9796
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9908
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9678
11	Bus 11 (P.Leces)	0,948
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9878

13	Bus 13 (P.Bentar)	0,948
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9788
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9862
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9399
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9814
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9814
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9806
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9605
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9817
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9617
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9829
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9793

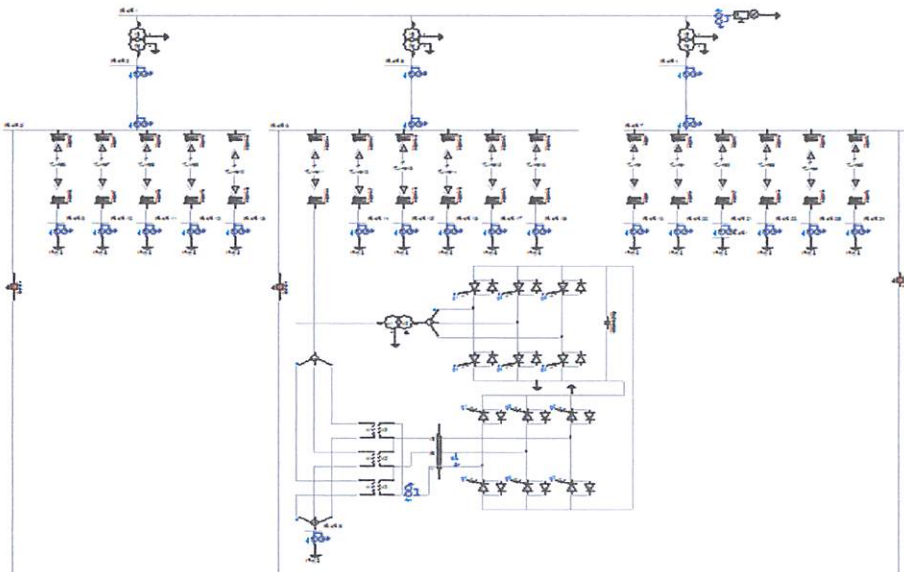
Tabel 4.18. Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Eratex

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,003
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,023	0,066
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	1,284	2,189
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,284	0,458
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	2,742	3,484
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,015	4,489
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	1,242	1,004
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,08	0,443
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,071	1,547
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,988	1,127
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	1,168	5,108
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,624	0,826
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,344	0,538

19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,309	1,139
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,206	0,917
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,023	6,386
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,284	0,458
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,452	0,951

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Leces (0,948 pu), Penyulang Bentar (0,9308 pu), Penyulang Togas (0,9399).

4.8 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bentar



Gambar 4.7 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bentar

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Bentar

Tabel 4.19 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bentar

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,996

4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9399
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9814
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9806
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9605
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9478
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9609
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9804
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9788
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9862
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9289
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9814
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9806
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9605
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9817
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9854
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9627
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,8571

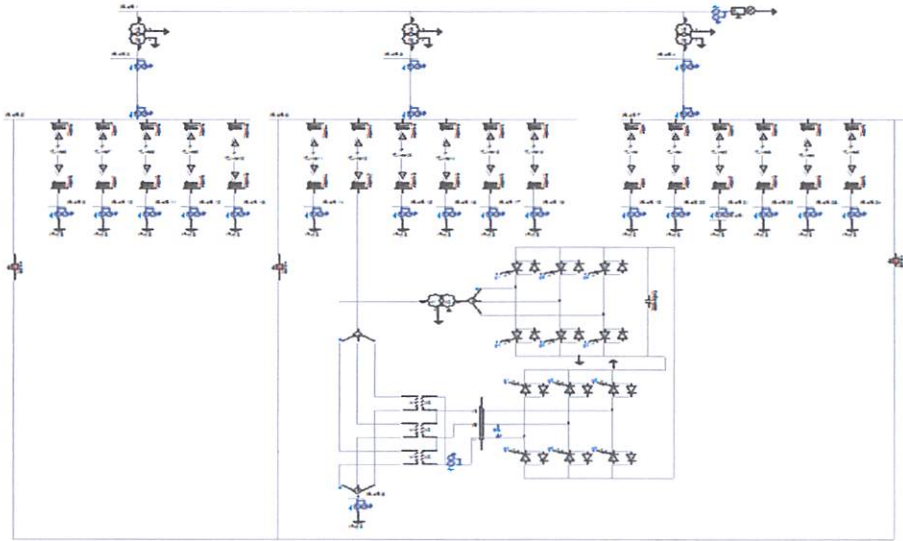
Tabel 4.20 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bentar

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,001
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	1,168	2,292
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,624	3,543
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	1,344	0,826

10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,19	3,484
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,556	1,489
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	1,242	1,004
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,08	0,443
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	1,724	1,547
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,675	1,127
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,372	5,108
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,309	0,826
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,86	0,538
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,309	1,139
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,206	0,481
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,023	3,88
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,284	0,543
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,452	0,213

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Spare (0,9399 pu), Penyulang sukapura (0,9289 pu).

4.9 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Banjar Sawah



Gambar 4.8 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Banjar Sawah

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Banjar Sawah

Tabel 4.21 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Banjar Sawah

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9796
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9908
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9678
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9488
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9678

13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9788
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9862
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9399
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9793
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9814
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9806
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9605
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9817
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9677
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9829
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9793
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9593

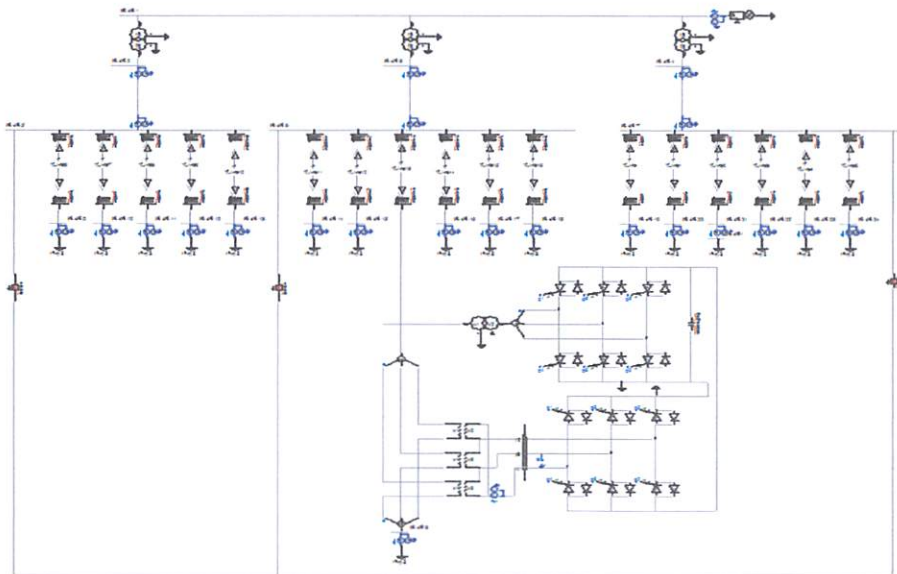
Tabel 4.22 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Banjar Sawah

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,007
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,001
3	Bus 1	Bus 4	0,006	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,624	0,031
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,344	0,833
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,19	0,177
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,556	0,759
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,225	1,547
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,135	1,127
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,08	0,051
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,071	16,2
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,988	1,484
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	1,324	1,489
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,675	1,004

18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,372	0,443
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,276	1,547
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	1,093	1,189
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,283	0,458
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,108	0,051
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,283	1,259

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Leces (0,9488 pu), Penyulang Leces (0,9399 pu).

4.10 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 1



Gambar 4.9 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 1

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 1.

Tabel 4.23 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 1

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9504
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9396
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9908
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9678
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,958
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9788
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9848
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9862
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9788
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9462
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9699
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9878
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9609
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9304
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9896
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9708
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9778

Tabel 4.24 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB

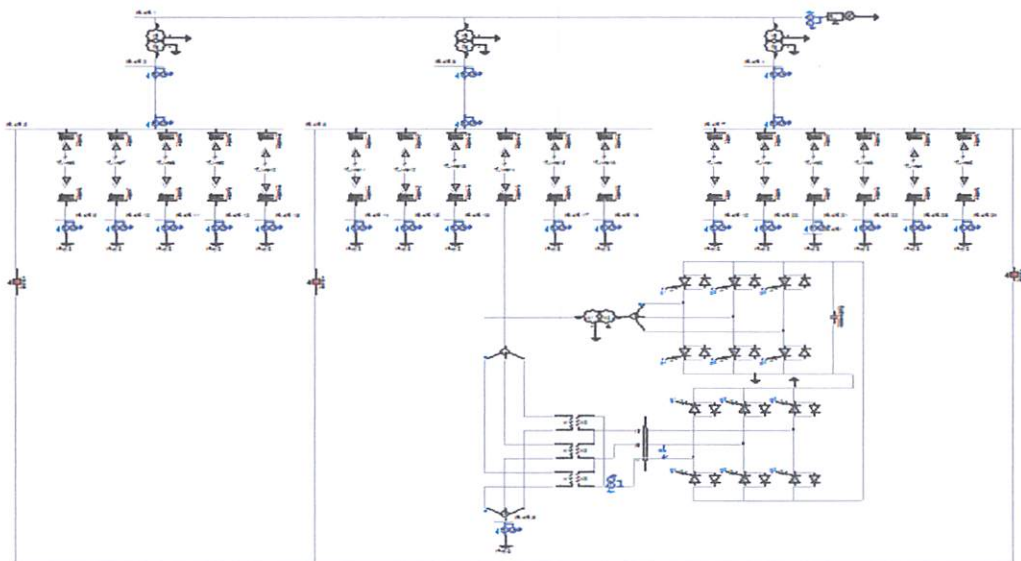
1

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,01
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006

4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,242	1,189
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,108	0,458
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,171	0,051
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,988	1,316
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,225	1,547
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	1,168	1,004
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,624	0,443
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,344	1,547
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,988	1,484
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	1,124	1,292
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	1,075	1,543
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,372	0,826
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,276	1,547
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,175	0,481
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,372	3,88
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,309	0,543
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	1,932	2,484

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Pelabuan (0,9396 pu), Penyulang sukapura (0,9462 pu). Penyulang Malasan (0,9304 pu).

4.11 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Togas



Gambar 4.10 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Togas

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Togas.

Tabel 4.25 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Togas

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9614
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9806
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9405
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9817
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9608

13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9673
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9482
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9788
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9862
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9862
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9699
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9708
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9678
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,958
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9788
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9862
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9399

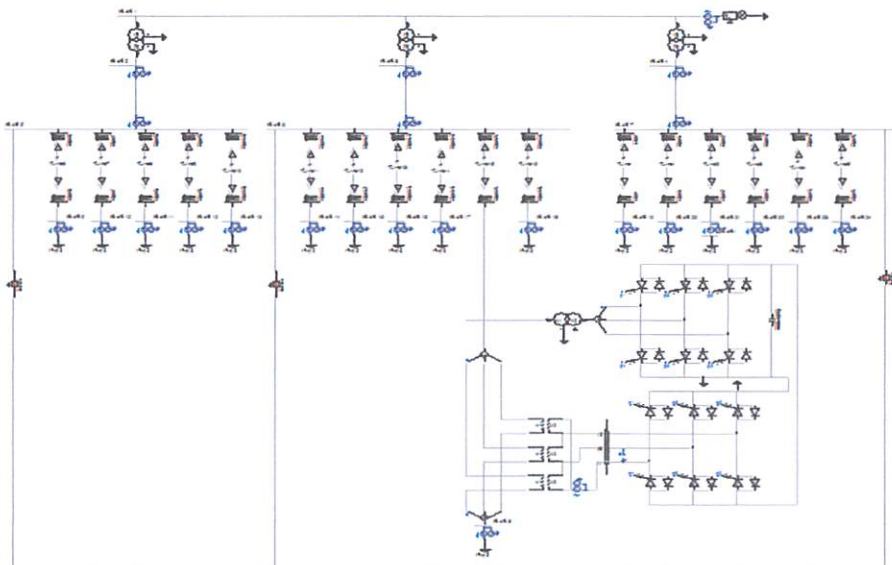
Tabel 4.26 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Togas

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,01
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,742	0,988
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	1,139	1,386
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,452	0,481
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	2,988	2,189
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,86	0,458
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,509	1,004
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,127	0,443
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,923	1,547
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	1,284	1,484
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,724	1,292
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	2,675	1,489
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,372	1,139

19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,276	0,917
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	2,675	1,386
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	1,093	1,848
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,283	0,543
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,108	0,433

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Sumber (0,9405 pu), Penyulang Banjar Sawah (0,9482 pu). Penyulang KTI PB 2 (0,9399 pu).

4.12 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sukapura



Gambar 4.11 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sukapura

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Sukapura.

Tabel 4.27 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Sukapura

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998

4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9788
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9862
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9774
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9814
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9806
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9605
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9817
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9806
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9605
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9878
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9609
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9804
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9796
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9508
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9678
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,968
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9599

Tabel 4.28 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI
Sukapura

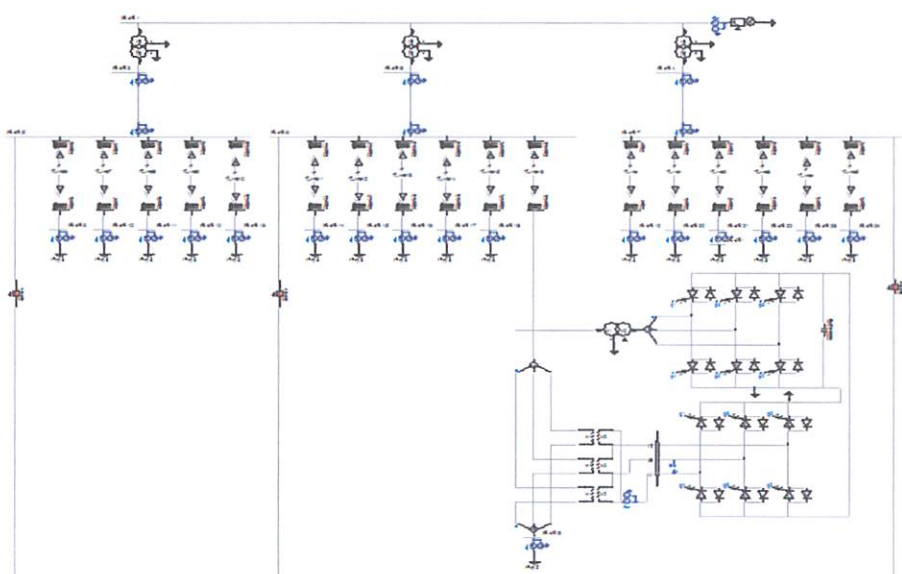
No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,005	0,001
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,346	1,218
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,015	0,031

9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,242	1,833
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,058	0,177
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,171	0,159
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,988	1,316
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,724	1,292
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,675	1,543
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,372	0,826
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,309	0,538
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,856	1,139
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,509	0,917
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,121	1,386
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,276	0,481
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,493	0,878
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,283	0,543
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,108	0,213

Dari hasil pemasangan UPFC pada penyulang Sukapura tidak terdapat penurunan tegangan.

4.13 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare 2

2



Gambar 4.12 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare 2

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare 2.

Tabel 4.29 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare 2

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9814
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9706
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9605
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9817
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9817
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9829
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9793
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9609
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9314
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9478
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9609
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9504
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9796
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9908
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9678
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,968
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9899

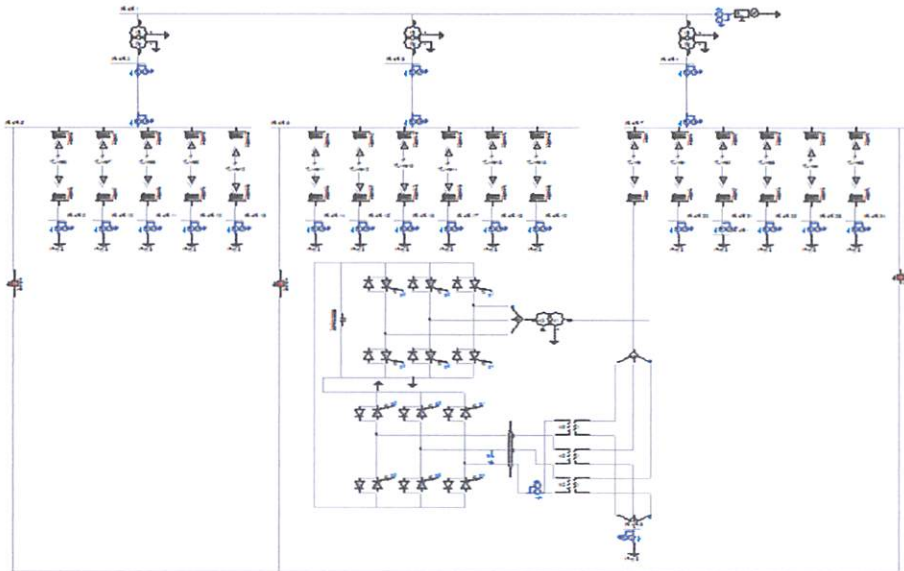
Tabel 4.30 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Spare 2

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,005	0,004

3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	1,168	2,346
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,624	2,292
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,344	3,543
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	1,242	0,826
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,309	1,489
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,866	1,004
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	1,724	2,292
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	1,483	1,543
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,206	0,826
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,923	0,538
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,988	1,332
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,324	0,871
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	1,121	1,386
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,276	0,481
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	1,121	1,386
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,276	0,481
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,913	1,188

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Togas (0,9314 pu), Penyulang Sukapura (0,9478 pu).

4.14 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bromo



Gambar 4.13 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bromo

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Bromo.

Tabel 4.31 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bromo

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9862
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9554
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9814
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9806
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9605

13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9908
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9678
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9482
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9788
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9862
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9468
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9814
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9609
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9504
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9796
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9508
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9678

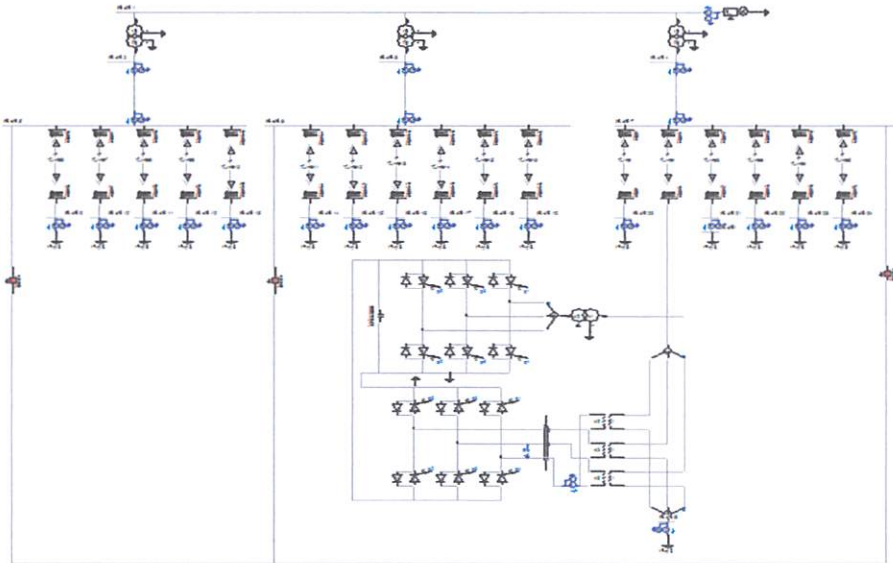
Tabel 4.32 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Bromo

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,01
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,675	1,189
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,372	0,458
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,19	0,951
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	1,556	1,952
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,452	1,489
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,254	0,826
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	1,724	1,952
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,866	1,484
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,509	1,489
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,923	1,952
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,923	1,952
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,988	1,484

19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	1,724	1,489
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,675	1,004
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,952	1,188
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,433	0,481
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,483	0,836

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada, Penyulang Kti Pb1 (0,9482 pu) Penyulang Spare 2 (0,9468 pu).

4.15 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Beberan



Gambar 4.14 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Beberan

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Beberan.

Tabel 4.33 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Beberan

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998

4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9604
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9796
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9408
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9678
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9581
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9788
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9862
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9862
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9553
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9414
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9806
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9605
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9417
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9618
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9529
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9708
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9568

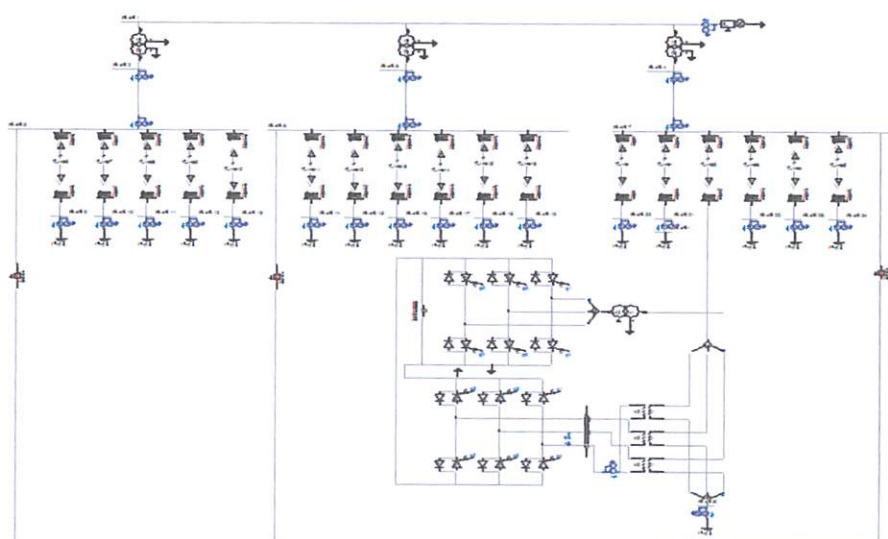
Tabel 4.34 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Beberan

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,004	0,001
3	Bus 1	Bus 4	0,006	0,004
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,346	1,218
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,015	0,189
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,242	0,458

10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,708	0,951
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,724	1,543
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,675	0,826
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,344	0,952
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,195	2,484
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,254	1,489
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,923	0,917
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,556	1,386
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,225	0,481
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	1,724	1,489
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,675	1,833
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,866	0,177
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,509	0,159
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,121	0,359

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Sumber (0,9408 pu), Penyulang Sukapura (0,9414 pu) .

4.16 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Malasan



Gambar 4.15 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Malasan

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Malasan.

Tabel 4.35 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Malasan

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9862
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9699
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9459
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9814
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9806
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9605
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9817
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9829
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9814
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9462
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9599
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9814
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9808
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9678
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,978
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9587
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9818

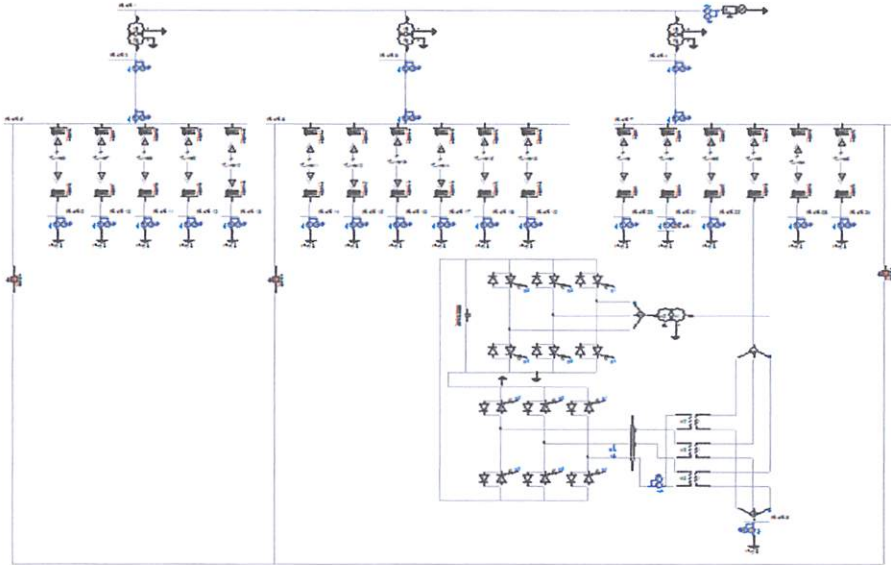
Tabel 4.36 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Malasan

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,01

3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,346	0,566
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,015	0,646
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,242	1,189
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,708	0,458
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,171	0,951
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,738	0,952
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	1,724	2,484
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,675	1,489
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,372	1,004
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,309	0,443
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,866	1,547
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,509	1,127
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,121	1,108
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,276	0,332
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,934	1,371
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,283	0,431
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,108	0,266

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Sumber (0,9459 pu), Penyulang Sukapura (0,9462 pu) .

4.17 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI



Gambar 4.16 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI.

Tabel 4.37 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Penyulang KTI

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9817
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9829
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9793
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9788
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9862

13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9399
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9314
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9829
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9814
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9788
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9862
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,964
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9814
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9806
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9605
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9714
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9578

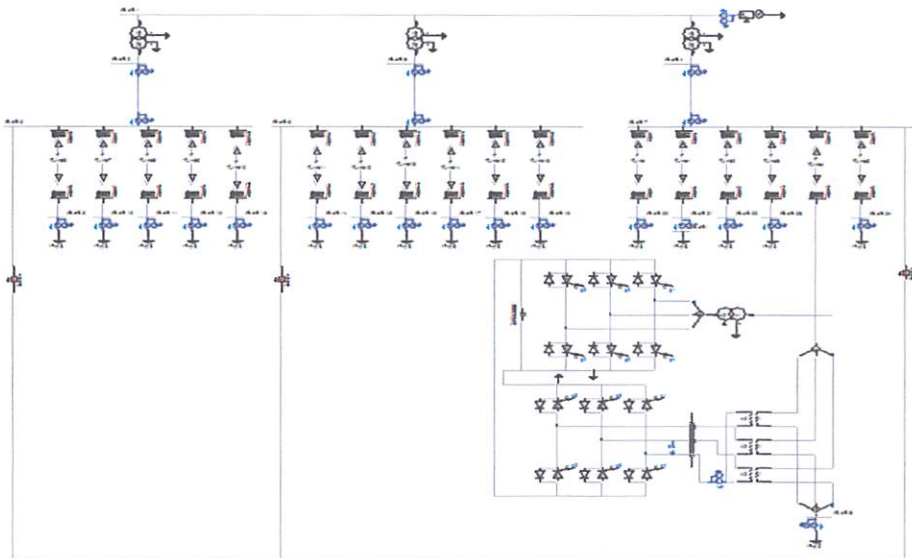
Tabel 4.38 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,01
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,433	0,951
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,452	1,952
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,254	2,484
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,708	1,489
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,171	1,004
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,624	1,952
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,344	1,386
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,195	0,481
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,372	0,788
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,309	0,443
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	0,866	1,547
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,509	0,826

19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	1,121	0,538
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,276	1,139
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	1,121	1,471
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,276	0,431
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	1,724	0,266

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Banjar Sawah (0,9314 pu), Penyulang Bromo (0,9364 pu) .

4.18 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan



Gambar 4.17 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan.

Tabel 4.39 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998

4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9605
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9817
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9672
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9829
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9793
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9814
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9806
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9605
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9817
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9392
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9788
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9862
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9458
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9814
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9605
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9507
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9748

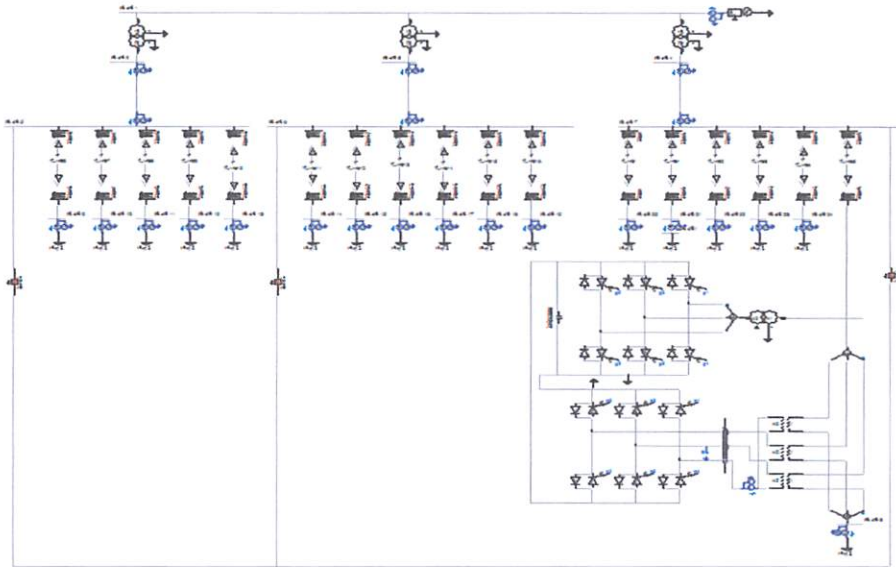
Tabel 4.40. Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan

No	Dari	Ke	PLoss (MW)	Qloss (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,004	0,003
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	2,952	3,566
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,433	0,646

9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,483	1,189
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,206	0,458
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,923	0,951
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	1,284	1,952
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	1,742	2,484
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	1,39	1,489
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,452	1,004
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,254	0,443
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	1,168	1,547
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,624	1,127
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,344	1,108
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,195	0,332
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	3,556	4,71
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,225	0,431
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,135	0,266

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Sukapura (0,9392pu), Penyulang Beberan (0,9458 pu) .

4.19 Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 2



Gambar 4.18 *Single Line* Sistem Kelistrikan Gardu Induk Probolinggo Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 2

Dari hasil perhitungan aliran daya (*loadflow*) pada sistem 20 kV GI Probolinggo dengan menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 2.

Tabel 4.41 Profil Tegangan Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang KTI PB 2

No	Bus	Voltage (p.u.)
1	Bus 1	1
2	Bus 2	0,997
3	Bus 3	0,998
4	Bus 4	0,993
5	Bus 5	0,9806
6	Bus 6	0,9605
7	Bus 7	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9678
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9481
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9796
11	Bus 11 (P.Leces)	0,9908
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9678
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9357

14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,9788
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9605
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9817
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9378
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9609
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9404
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9796
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9608
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9805
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9717
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9788

Tabel 4.19 Rugi-rugi daya (MW) Dengan Menggunakan UPFC Pada Penyulang Panjaitan

No	Dari	Ke	P _{Loss} (MW)	Q _{loss} (Mvar)
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,01
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,372	0,826
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,309	0,538
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	0,866	1,139
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,509	0,917
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	1,121	1,386
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	0,276	1,316
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,963	1,043
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,283	1,489
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	1,952	2,004
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,433	0,443
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	1,483	1,724
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,206	0,458
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,923	0,951

20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	1,284	1,952
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	1,742	1,871
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	1,391	2,431
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,936	1,266

Pada bus yang berwarna merah diatas merupakan bus yang mengalami pelanggaran tegangan yang sudah ditentukan, yaitu pada Penyulang Pelabuan (0,9481 pu), Penyulang Bentar (0,9357 pu) . Penyulang Sukapura (0,9378 pu), Penyulang Bromo (0,9404 pu).

Dari hasil perhitungan *loadflow*, diketahui terjadi pelanggaran tegangan diluar margin yang diizinkan yaitu 0,95 p.u. sampai 1,05 p.u. Maka dapat dilakukan perbandingan profil tegangan pada sistem 20 kV GI Probolinggo sebelum dan sesudah pemasangan UPFC.

4.20 Analisis Perbandingan Kondisi Sebelum Dan Sesudah Pemasangan UPFC

Untuk mengetahui perubahan level tegangan dalam kondisi sebelum dan sesudah pemasangan UPFC, maka pada Tabel 4.19, 4.20, 4.21 dan Gambar 4.39, 4.40, 4.41 dapat memberikan gambaran bahwa adanya perbedaan yang sangat berpengaruh terhadap kenaikan level tegangan, serta dapat mengurangi rugi-rugi daya pada sistem GI Probolinggo.

Tabel 4.43 Profil Tegangan Sebelum Dan Sesudah Pemasangan UPFC

No	Bus	Voltage (p.u.) Sebelum Pemasangan UPFC	Voltage (p.u.) Sesudah Pemasangan UPFC
1	Bus 1	1	1
2	Bus 2	0,989	0,997
3	Bus 3	0,996	0,998
4	Bus 4	0,993	0,997
5	Bus 5	0,994	0,993
6	Bus 6	0,963	0,983
7	Bus 7	0,994	0,9817
8	Bus 8 (P .Spare)	0,9778	0,9788
9	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,9609	0,9862
10	Bus 10 (P.Sumber)	0,9504	0,9774

11	Bus 11 (P.Leces)	0,9796	0,9814
12	Bus 12 (P.Eratek)	0,9908	0,9806
13	Bus 13 (P.Bentar)	0,9678	0,9605
14	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,958	0,9817
15	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	0,9788	0,9806
16	Bus 16 (P.Togas)	0,9862	0,9605
17	Bus 17 (P.Sukapura)	0,9299	0,9878
18	Bus 18 (P.Spare 2)	0,9814	0,9609
19	Bus 19 (P.Bromo)	0,9806	0,9804
20	Bus 20 (P.Beberan)	0,9605	0,9796
21	Bus 21 (P.Malasan)	0,9817	0,9508
22	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,9817	0,9678
23	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,9829	0,968
24	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,9793	0,9599

Tabel 4.44 Perbandingan Daya (MW) Setelah Dan Sebelum Pemasangan UPFC

No	Dari	Ke	P _{Loss} (MW) Sebelum Pemasangan UPFC	P _{Loss} (MW) Sesudah Pemasangan UPFC
1	Bus 1	Bus 2	0,005	0,005
2	Bus 1	Bus 3	0,006	0,006
3	Bus 1	Bus 4	0,005	0,005
4	Bus 2	Bus 5	0,013	0,013
5	Bus 3	Bus 6	0,012	0,012
6	Bus 4	Bus 7	0,009	0,009
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,952	0,346
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,033	0,015
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	1,483	0,242
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,206	0,08
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,023	0,171
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	1,284	0,988
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	0,742	0,724

14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	1,39	0,675
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	0,452	0,372
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,254	0,309
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	1,168	0,856
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	0,624	0,509
19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,344	0,121
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,19	0,276
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	0,556	0,493
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,225	0,283
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,135	0,108

Tabel 4.45 Perbandingan Daya Q (Mvar) Setelah Dan Sebelum Pemasangan UPFC

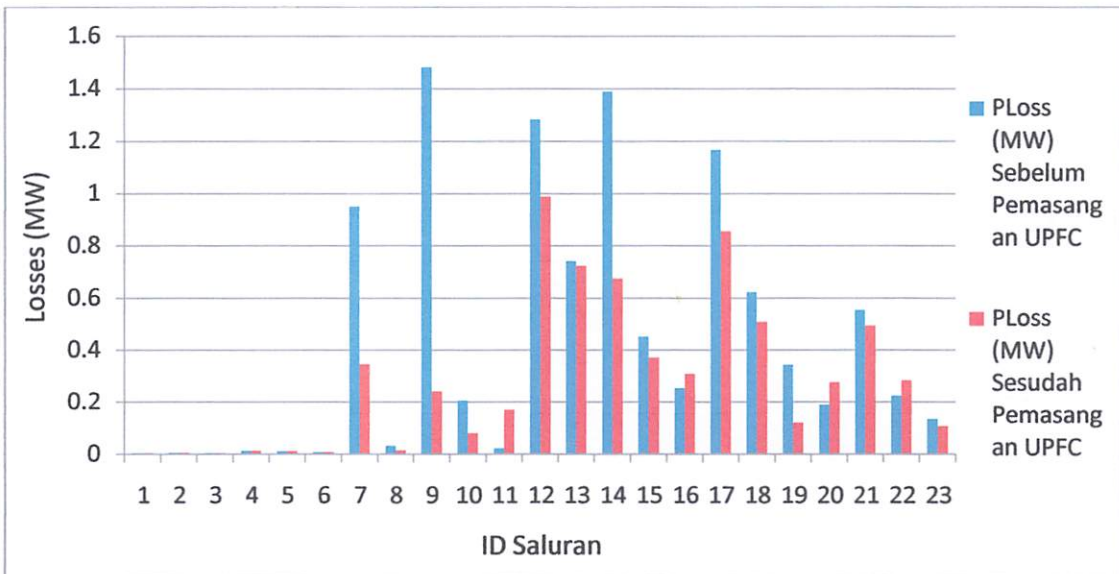
No	Dari	Ke	Qloss (Mvar) Sebelum Pemasangan UPFC	Qloss (Mvar) Sesudah Pemasangan UPFC
1	Bus 1	Bus 2	0,009	0,009
2	Bus 1	Bus 3	0,01	0,01
3	Bus 1	Bus 4	0,006	0,006
4	Bus 2	Bus 5	0,021	0,021
5	Bus 3	Bus 6	0,028	0,028
6	Bus 4	Bus 7	0,013	0,013
7	Bus 5	Bus 8 (P .Spare)	0,566	1,218
8	Bus 5	Bus 9 (P.Pelabuan)	0,066	0,031
9	Bus 5	Bus 10 (P.Sumber)	2,189	1,833
10	Bus 5	Bus 11 (P.Leces)	0,458	0,177
11	Bus 5	Bus 12 (P.Eratek)	0,051	0,159
12	Bus 6	Bus 13 (P.Bentar)	1,489	1,316
13	Bus 6	Bus 14 (P.Banjar Sawah)	1,484	1,292
14	Bus 6	Bus 15 (P.Kti Pb 1)	1,489	1,543
15	Bus 6	Bus 16 (P.Togas)	1,004	0,826
16	Bus 6	Bus 17 (P.Sukapura)	0,443	0,538
17	Bus 6	Bus 18 (P.Spare 2)	1,547	1,139
18	Bus 7	Bus 19 (P.Bromo)	1,127	0,917

19	Bus 7	Bus 20 (P.Beberan)	0,108	1,386
20	Bus 7	Bus 21 (P.Malasan)	0,332	0,481
21	Bus 7	Bus 22 (P.Kti Pb1)	1,718	0,878
22	Bus 7	Bus 23 (P.Panjaitan)	0,431	0,543
23	Bus 7	Bus 24 (P.KTI Pb 2)	0,266	0,213

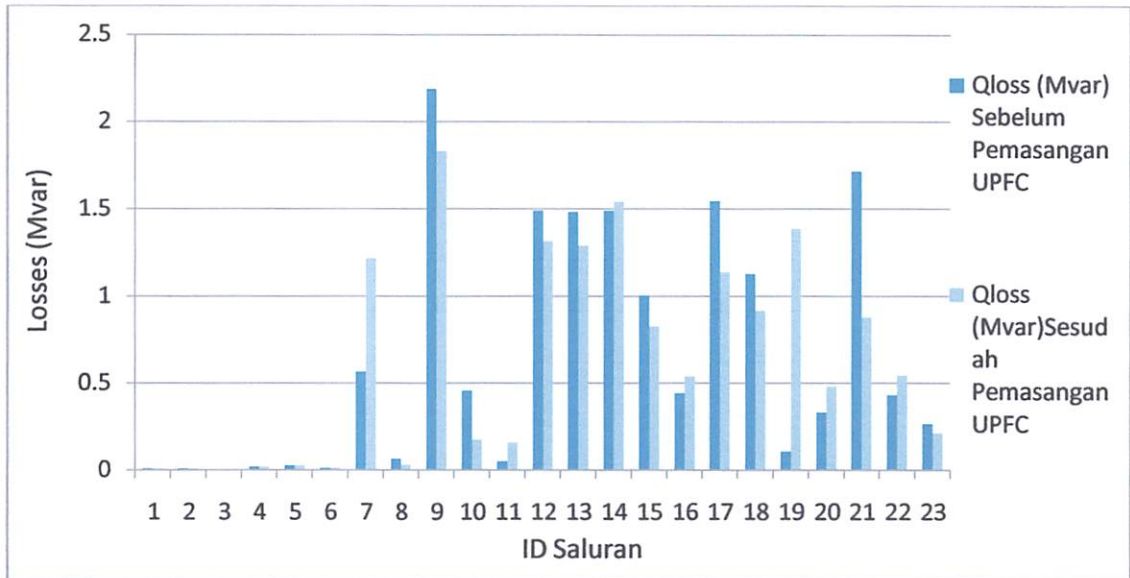
Penempatan optimal UPFC terdapat pada Penyulang Sukapura. Hal ini dapat dibuktikan berdasarkan perubahan level tegangan dan rugi-rugi daya setelah dilakukan pemasangan UPFC.



Gambar 4.20 Grafik Profil Tegangan Sebelum Dan Sesudah Pemasangan UPFC



Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Daya P(MW) Sebelum Dan Sesudah Pemasangan UPFC



Gambar 4.22 Grafik Perbandingan Daya Qloss(Mvar)Sebelum Dan Sesudah Pemasangan UPFC

Penempatan optimal UPFC terdapat pada Penyulang sukapura. Hal ini dapat dibuktikan berdasarkan perubahan level tegangan dan rugi-rugi daya setelah dilakukan pemasangan UPFC. Dari hasil analisa, dapat diketahui bahwa setelah pemasangan UPFC dapat meningkatkan profil tegangan pada GI Probolinggo (penyulang Sukapura) yang sebelumnya dalam kondisi *drop voltage* 0,95 p.u sampai 1,05 p.u, serta dapat mengurangi rugi-rugi saluran, dari 0,9299 pu, 0,253 MW dan 0,443 Mvar menjadi 0,9878 pu, 0,309 MW dan 0,538 Mvar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dengan diperolehnya hasil analisis penempatan dan kapasitas optimal *Unified Power Flow Controller* (UPFC) maka dapat ditarik kesimpulan yaitu :

1. Berdasarkan hasil pengujian sistem *Unified Power Flow Controller* (UPFC) yang dilakukan, penempatan yang optimal pada penyulang Sukapura. Dimana setelah pemasangan *Unified Power Flow Controller* (UPFC) dapat meningkatkan profil tegangan dan dapat mengurangi rugi-rugi saluran, dari 0,9299 pu, 0,253 MW dan 0,443 Mvar menjadi 0,9878 pu, 0,309 MW dan 0,538 Mvar.

5.2 Saran

1. Perlunya peningkatan kualitas daya elektrik seperti yang dijabarkan dalam skripsi ini. Yaitu penggunaan UPFC (*Unified Power Flow Controller*) untuk meningkatkan performa sistem agar kualitas tegangan yang digunakan oleh masyarakat terjamin keandalannya.
2. Penggunaan UPFC (*Unified Power Flow Controller*) akan lebih optimal bila digunakan dalam sistem transmisi yang menggunakan banyak bus.

Daftar Pustaka

1. Arthit Sode, Nadarajah Mithulananthan, "Static Voltage Stability Margin Enhancement Using STATCOM, TCSC and SSSC", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China*, 2005.
2. Zhang Xiao-Ping, Bikash Pal, and Christian Rehtanz, "FACTS Devices And Applications," in *Flexible AC Transmission Systems :Modelling and Control* , First Edition ed. New York: Sprienger,2006,
3. *(PT.PLN (Persero),2010: hal 20)*.
4. Erviana, Mira. 2012. *Optimasi Penempatan Kapasitor Bank Pada Sistem Distribusi Untuk Mereduksi Rugi Daya* Universitas Diponegoro: Semarang.
5. *apbi-icma org*
6. *digdyo.blogspot.com*
7. <https://kurniawanpramana.wordpress.com/2012/03/15/impedansi-saluran-transmisi/>
8. <https://ugmmagatrika.wordpress.com/2014/04/26/pengenalan-stat-keamanan-operasi-sistem-tenaga-listrik-kontingensi-menggunakan-indeks-performa/>
9. Yamayee, Z.A. and Bala, J.L. Jr., *Electromechanical Energy Devices and Power Systems*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1994.
10. Kundur, Prabha. 1994. "*Power System Stability and Control*". Mc Graw-Hill Inc.
11. Cekdin Cekmas. 2007. "*Sistem Tenaga Listrik*". Andi : Yogyakarta.
Hal 4-11
12. Acha Enrique, Fuerte Claudio R, Ambriz Hugo, Angeles Cesar. 2004. "*FACTS-Modelling and Simulation in Power Networks*". John Wiley & Sons, Ltd. England

LAMPIRAN



PERMOHONAN PERSETUJUAN SKRIPSI

Yang Bertanda Tangan Dibawah Ini:

Nama : Sahrus Rachmadana
 NIM : 1117028
 Semester : V
 Fakultas : Teknologi Industri
 Jurusan : Teknik Elektro S-I
 Konsentrasi : TEKNIK ENERGI LISTRIK
TEKNIK ELEKTRONIKA
TEKNIK KOMPUTER DAN INFORMATIKA
TEKNIK KOMPUTER
TEKNIK TELEKOMUNIKASI
 Alamat : Pengoroso

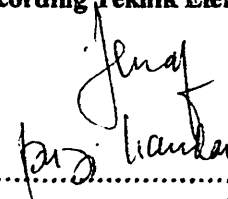
Dengan ini kami mengajukan permohonan untuk mendapatkan persetujuan untuk membuat SKRIPSI Tingkat Sarjana. Untuk melengkapi permohonan tersenut, bersama ini kami lampirkan persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi.

Adapun persyaratan- persyaratan pengambilan SKRIPSI adalah sebagai berikut:

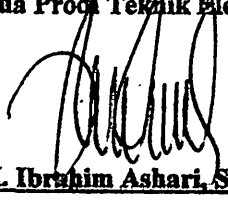
1. Telah melaksanakan semua praktikum sesuai dengan konsentrasinya (.....)
2. Telah lulus dan menyerahkan laporan Praktek Kerja (.....)
3. Telah lulus seluruh mata kuliah keahlian (MKB) sesuai konsentrasinya (.....)
4. Telah menempuh matakuliah > 134 sks dengan IPK > 2 dan tidak ada nilai E (.....)
5. Telah mengikuti secara aktif kegiatan seminar Skripsi yang diadakan Jurusan (.....)
6. Memenuhi persyaratan administrasi (.....)

Demikian permohonan ini untuk mendapatkan penyelesaian lebih lanjut dan atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Telah diteliti kebenarannya data tersebut diatas
 Recording Teknik Elektro S-I



 (.....M. Ibrahim Ashari.....)

Disetujui
 Ketua Prodi Teknik Elektro S-I

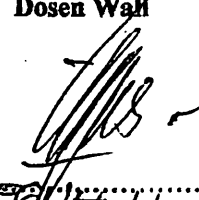

M. Ibrahim Ashari, ST, MT
 NIP. P. 1030100358

Malang,.....201

Pemohon


 (.....Sahrus Rachmadana.....)

Mengetahui
 Dosen Wali


 (.....FEDUT. H......)



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

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

RSERO) MALANG
AGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015-Malang, 65115
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Nomor Surat : ITN-173/EL-FTI/2015 Tanggal, 28 Mei 2015
Lampiran : -
Perihal : BIMBINGAN SKRIPSI

Kepada : Yth. Bapak/Ibu Ir. Taufik Hidayat, MT
Dosen Teknik Elektro S-1
ITN MALANG

Dengan Hormat

Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Proposal Skripsi untuk mahasiswa :

Nama : SAHRU RGCHIMADONA
Nim : 1112028
Fakultas : Teknologi Industri
Program Studi : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

Maka dengan ini pembimbingan tersebut kami serahkan sepenuhnya kepada Saudara/i selama masa waktu :

“Semester Genap Tahun Akademik Genap 2014 - 2015”

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



Mengetahui.

Program Studi Teknik Elektro S-1

M. Ibrahim Ashari, ST, MT
NIP.P. 1030100358



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

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

ITN (INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL) MALANG
FACULTY OF MALANG

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

Nomor Surat : ITN-173/EL-FTI/2015

Tanggal, 28 Mei 2015

Lampiran : -

Perihal : Bimbingan Skripsi

Kepada : Yth. Bapak/Ibu Ir. Choirul Saleh, MT
Dosen Teknik Elektro S-1
ITN MALANG

Dengan Hormat

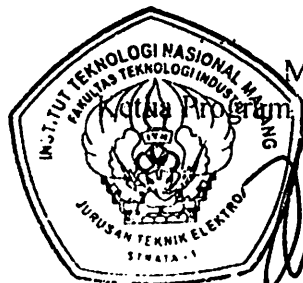
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Proposal Skripsi untuk mahasiswa :

Nama : SAHRU ROCHMADONA
Nim : 1112028
Fakultas : Teknologi Industri
Program Studi : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

Maka dengan ini pembimbingan tersebut kami serahkan sepenuhnya kepada Saudara/i selama masa waktu :

“ Semester Genap Tahun Akademik Genap 2014 - 2015 “

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



Mengetahui
Ketua Program Studi Teknik Elektro S-1

M. Ibrahim Ashari, ST, MT
NIP.P. 1030100358



MONITORING BIMBINGAN SKRIPSI SEMESTER GANJIL TAHUN AKADEMIK 2014-2015

Nama Mahasiswa : Sahru Rochmadona
NIM : 11.12.028
Nama Pembimbing : Ir.H.Taufik Hidayat, MT
Judul Skripsi : OPTIMASI PENEMPATAN UNIFIED POWER
FLOW CONTROLLER (UPFC) UNTUK MERIDUKSI
RUGI-RUGI SALURAN

Minggu Ke-	Hari, Tanggal	Waktu Bimbingan	Materi Bimbingan	Paraf
1				
2				
3	Rabu 10 Juni 2014	14 ⁰⁰ - 17 ⁴⁵	- Data yang digunakan di saluran transmisi GIZ keraksaan - GI profilnya	AK
4	Jumat 12 Juni 2014	13 ⁴⁵ - 15 ⁰⁰	- Ishtlah Asing di cetak miring - Tambah Teori Surge Saluran Transmisi, rugi saluran	AK
5				
6				
7				

Malang,

Pembimbing I

Ir.H.Taufik Hidayat, MT
NIP.Y 1018700015



MONITORING BIMBINGAN SKRIPSI SEMESTER GANJIL TAHUN AKADEMIK 2014-2015

Nama Mahasiswa : Sahru Rochmadona
NIM : 11.12.028
Nama Pembimbing : Ir. Choirul Saleh, MT
Judul Skripsi : Optimasi Penempatan Unified Power Flow Controler (UPFC)
Untuk Mereduksi Rugi Rugi Saluran

Minggu Ke-	Hari, Tanggal	Waktu Bimbingan	Materi Bimbingan	Paraf
8				
9			pelaksanaan skripsi dan pembuatan judul	<i>CS</i>
10				
11				
12				
13				
14				

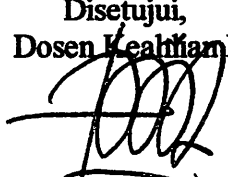

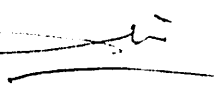



Malang,

Pembimbing

Ir. Choirul Saleh, MT
NIP. Y. 1018800190



BERITA ACARA SEMINAR PROPOSAL SKRIPSI
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

1.	Nim	: 1112028		
2.	Nama	: SAHRU ROCHMADONA		
3.	Konsentrasi Jurusan	: Teknik Energi Listrik		
4.	Jadwal Pelaksanaan:	Waktu	Tempat	
	14 April 2015	09:00	III.1.5	
5.	Judul proposal yang diseminarkan Mahasiswa	OPTIMASI PENEMPATAN UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC) UNTUK MEREDUKSI RUGI-RUGI SALURAN		
6.	Perubahan judul yang diusulkan oleh Kelompok Dosen Keahlian			
7.	Catatan :			
8.	Catatan :			
	Persetujuan judul Skripsi			
	Disetujui, Dosen Keahlian I	Disetujui, Dosen Keahlian II	Disetujui, Dosen Keahlian III	
	 (.....)	 (.....)	 (.....)	
	Mengetahui, Ketua Program Studi Teknik Elektro S-1	Disetujui, Calon Dosen Pembimbing ybs		
 M. Ibrahim Ashari, ST, MT NIP. P 1030100358	Pembimbing I	Pembimbing II		
	 (.....)	 (.....)		



PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

PT. BNI (PERSERO) MALANG
BANK NIAGA MALANG

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

BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

1. Nama : SAHRU ROCHMADONA
2. NIM : 1112028
3. Jurusan : TEKNIK ELEKTRO S-1
4. Konsentrasi : TEKNIK ENERGI LISTRIK
5. Judul Skripsi : **OPTIMASI PENEMPATAN UNIFIED POWER FLOW CONTROL (UPFC) UNTUK MEREDUKSI RUGI-RUGI SALURAN DI GARDU INDUK PROBOLINGGO**

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

- Hari : Rabu
Tanggal : 19 Agustus 2015
Dengan Nilai :

Panitia Ujian Skripsi

Ketua Majelis Penguji

(M. Ibrahim Ashari, ST. MT.)

NIP.P.1030100358

Sekretaris Majelis Penguji

(Dr. Eng. I Komang Somawirata, ST. MT.)

NIP. P. 1030100361

Anggota Penguji

Penguji I

(Ir. Eko Nurcahyo, MT)

NIP. Y. 1028700172

Penguji II

(Dr. Eng. Ir. I Made Wartana, MT)

NIP. Y. 19610531992021001

SURAT PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : SAHRU ROCHMADONA
NIM : 1112028
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang saya buat adalah hasil karya sendiri, tidak merupakan plagiasi dari karya orang lain. Dalam skripsi ini tidak memuat karya orang lain, kecuali dicantumkan sumbernya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dan apabila dikemudian hari ada pelanggaran atas surat pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksinya.

Malang, September 2015



Sahru Rochmadona

NIM : 1112028

Formulir Perbaikan Ujian Skripsi

1. Pelaksanaan Ujian Skripsi Jenjang Strata 1 Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi T. Energi Listrik, /
Elektronika, / T. Komputer, / T. Telekomunikasi, Maka Perlu Adanya Perbaikan Skripsi Untuk Mahasiswa:

: SAHRA R

: 412028

Perbaikan Meliputi :


1. Menilai tabel untuk UVPK untuk PSCAD.

2. Menambahkan cover untuk pengantar & penutup.

3. Menambahkan line BI pada bab yang menggunakan PSCAD.

4. Menambahkan PSCAD yang telah selesai (top solution) sebelum dan sesudah

Malang, ... 18 - 08 - 2015


(.....)



PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

Dari hasil ujian skripsi Jurusan Teknik Elektro jenjang strata satu (S-1) yang diselenggarakan pada :

Hari/Tanggal : Selasa, 18 Agustus 2015

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

Nama : SAHRU ROCHMADONA
NIM : 1112028
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
Judul Skripsi : **OPTIMASI PENEMPATAN *UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER* (UPFC) UNTUK MEREDUKSI RUGI-RUGI SALURAN DI GARDU INDUK PROBOLINGGO**

No	Materi Perbaikan	Ket
1.	Perbaiki tabel	Erf
2.	Perbandingan eror	Erf
3.	Single line GI Probolinggo menggunakan PSCAD	Erf
4	Hitung menggunakan PSCAD rugi-rugi (stiap saluran) sebelum dan sesudah	Erf

Dosen Penguji I

Ir. Eko Nurcahyo, MT
NIP. Y. 1028700172

Dosen Pembimbing I

Ir. H. Taufik Hidayat, MT
NIP. Y. 1018700151

Dosen Pembimbing II

Ir. Choirul Saleh, MT
NIP. Y. 1018800190

МИБ А ТӨБӨСӨТӨТ
И ТӨБӨСӨТӨТ

[Handwritten signature]
Түбө башкаруусу

МИБ А ТӨБӨСӨТӨТ
И ТӨБӨСӨТӨТ

[Handwritten signature]
Түбө башкаруусу

МИБ А ТӨБӨСӨТӨТ
И ТӨБӨСӨТӨТ

[Handwritten signature]
Түбө башкаруусу

1	Өрөөнүн түбө башкаруусу	1
2	Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу	1
3	Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу	1
4	Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу	1
5	Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу	1

ИЖМАТ

ИЖМАТ - бул жердеги бардык иштерди түбө башкаруусуна тапшырып берүүгө болот.

- Түбө башкаруусу : Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу
- Түбө башкаруусу : Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу
- Түбө башкаруусу : Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу
- Түбө башкаруусу : Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу
- Түбө башкаруусу : Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу

Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу

Түбө башкаруусу : Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу

Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу

Түбө башкаруусунун түбө башкаруусу (2-1) түбө башкаруусу

ИЖМАТ



ИЖМАТ - бул жердеги бардык иштерди түбө башкаруусуна тапшырып берүүгө болот.

Formulir Perbaikan Ujian Skripsi

Penyelaksanaan Ujian Skripsi Jenjang Strata 1 Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi T.Energi Listrik, /
Elektronika, /T. Komputer, / T.Telekomunikasi, Maka Perlu Adanya Perbaikan Skripsi Untuk Mahasiswa:

Nama : Sahw Rochmadana .
NPM : 11.12.028

Topik yang Meliputi :

1. Metodologi penelitian

2. % buku di setiap bab

a. Cara perhitungan dan sistem yg akan diuji

b. Hitung LP pada kondisi elemen km setelah
penyusunan UPPC

c. Hitung LP setelah penyusunan UPPC pd
setiap saluran dan GI kebalik

d. Tentukan pada tegangan yg memenuhi load

e. dan pada e dan men total ngi kebalik
dan pmi e

Malang,.....20

(.....)



PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

Dari hasil ujian skripsi Jurusan Teknik Elektro jenjang strata satu (S-1) yang diselenggarakan pada :

Hari/Tanggal : Selasa, 18 Agustus 2015

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

Nama : SAHRU ROCHMADONA
NIM : 1112028
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
Judul Skripsi : **OPTIMASI PENEMPATAN *UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER* (UPFC) UNTUK MEREDUKSI RUGI-RUGI SALURAN DI GARDU INDUK PROBOLINGGO**

No	Materi Perbaikan	Ket
1.	Metodologi di sempurnakan	
2.	Hitung LR pada kondisi sebelum dan setelah pemasangan UPFC	
3.	Hitung LR setelah pemasangan UPFC pada stiap saluran dari GI Probolinggo	
4	Tentukan letak pemasangan UPFC untuk mereduksi rugi-rugi saluran	

Dosen Penguji II

Dr. Eng. Ir. I Made Wartana, MT.
NIP. 19610531992021001

Dosen Pembimbing I

Ir. H. Taufik Hidayat, MT
NIP. Y.1018700151

Dosen Pembimbing II

Ir. Choirul saleh, MT
NIP.Y. 1018800190



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

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

: BNI (PERSERO) MALANG
BANK NIAGA MALANG

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

Nomor : ITN-125/EL-FTI/2015
Lampiran : -
Perihal : Survey Pengambilan Data Skripsi

20 April 2015

Kepada : Yth. Pimpinan PT. PLN P3B Jawa Bali APP Probolinggo
di – Probolinggo

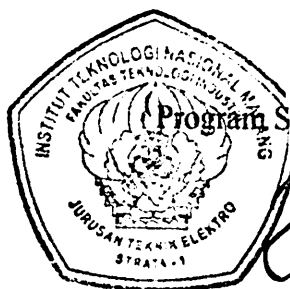
Dengan hormat,

Bersama ini kami mohon kebijaksanaan Bapak/Ibu agar mahasiswa kami dari Program Studi Teknik Elektro S-1, Konsentrasi Energi Listrik, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang dapat diijinkan untuk melakukan survey dalam rangka pengambilan data skripsi, mulai tanggal 21 April 2015 sampai dengan 21 Mei 2015.

Mahasiswa tersebut adalah:

No	Nama	NIM
1.	Sahru Rochmadona	1112028
2.		
3.		
4.		

Demikian atas perhatian dan kebijaksanaannya kami ucapkan terima kasih.



Ketua
Program Studi Teknik Elektro S-1

M. Ibrahim Ashari, ST, MT
NIP.P. 1030100358

PT. PLN (PERSERO)

**PENYALURAN DAN PUSAT PENGATUR BEBAN JAWA BALI
AREA PELAKSANA PEMELIHARAAN PROBOLINGGO**

roaminoto No. 947 Probolinggo 67213

n : (0335) 424933

Facsimile : (0335) 421643

Nomor : 0052/SPM.04.09 /APP PBLG/2015
Surat Sdr. No : ITN-125/EL-FTI/2015
Perihal : Survey Pengambilan Data Skripsi

27 APR 2015

Kepada Yth.

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
MALANG
FAKULTAS TEKNIK INDUSTRI
JURUSAN ENERGI LISTRIK
DI
MALANG

Menunjuk surat Saudara nomor : ITN-125/EL-FTI/2015 tanggal 20 April 2015 perihal tersebut diatas, dengan ini diberitahukan bahwa Kami ijinkan Mahasiswa Saudara yang bernama :

N A M A

N.I.M

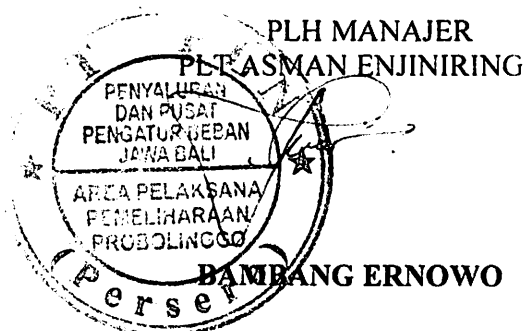
• **SAHRU ROCHMADONA**

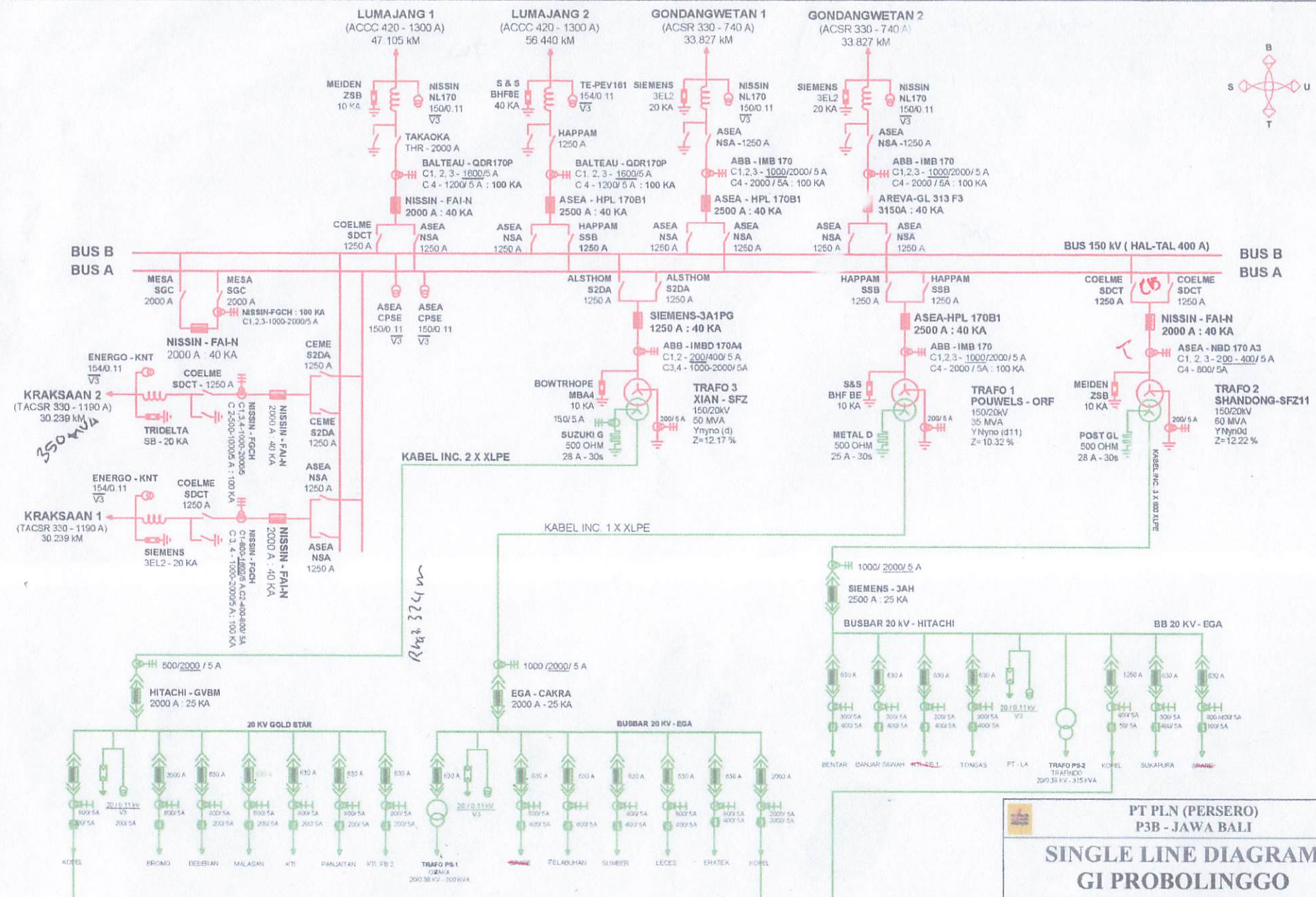
1112028

Untuk melakukan Pengambilan Data di PT PLN (Persero) P3B Jawa Bali APP Probolinggo GI Probolinggo pada tanggal 21 April s/d 21 Mei 2015, dengan persyaratan sebagai berikut :

1. Mahasiswa tersebut diatas supaya mengisi dan menandatangani Surat Pernyataan 1 (Satu) lembar bermaterai Rp. 6.000,-
2. Mahasiswa yang bersangkutan agar mematuhi peraturan/ ketentuan yang berlaku di PT PLN (Persero) sehingga faktor-faktor kerahasiaan harus benar – benar diutamakan.
3. Semua biaya perjalanan, penginapan, makan dan lain sebagainya tidak menjadi tanggungan PT PLN (Persero) P3B Jawa Bali APP Probolinggo.
4. Buku Laporan Kerja Praktek Mahasiswa tersebut agar dikirimkan kepada PT PLN (Persero) P3B Jawa Bali APP Probolinggo 1 (Satu) buah.
5. Untuk informasi lebih lanjut dapat menghubungi PT PLN (Persero) P3B Jawa Bali APP Probolinggo Cq ASMAN ADMUM.

Demikian kami sampaikan, untuk menjadi perhatian dan atas kerja samanya diucapkan terima kasih.





PT PLN (PERSERO)
P3B - JAWA BALI

SINGLE LINE DIAGRAM

GI PROBOLINGGO

Drafter	Diperiksa	Disetujui	Tanggal Revisi
---------	-----------	-----------	----------------

GARDU INDUK	PELAYANG		RAYON	PANJANG JTM (kms)	GARDU DIST	PANJANG JTR (kms)	BEBAN PUNCAK PENYULANG (A)	TEGANGAN UJUNG TM (KV)	PELANGGAN TM		AVR	CAPASITOR TM	LBS AIR BREAK		LBS MOTORIZED		RECLOSE		M/CB	
	NO	NAMA							CUBICLE	GD KONVEN			BAIK	RUSAK	BAIK	RUSAK	BAIK	RUSAK	BAIK	RUSAK
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
PROBOLINGGO	1	Pelabuan	Probolinggo	12.916	33	16,91	91	19,50	1	5			6		1					1
PROBOLINGGO	2	Sumber	Probolinggo	105.746	75	172,78	133	18,50		1			8		1		1			1
PROBOLINGGO	3	Lece	Probolinggo	26.124	34	28,96	86	19,60	1				5							
PROBOLINGGO	4	Eratex	Probolinggo	4.132	1	-	22	19,80	1				1							
PROBOLINGGO	5	Tongas	Probolinggo	65.182	91	115,32	230	18,00	1	6			11		1		1			
PROBOLINGGO	6	KTI Particel Board 1	Probolinggo	5.041	75	-	0 150	19,90	1				1							
PROBOLINGGO	7	Banjar sawah	Probolinggo	73.293	61	155,87	124	18,00	1				5		1		1			1
PROBOLINGGO	8	Bentar	Probolinggo	33.863	1	51,82	165	19,10		1			7							1
PROBOLINGGO	9	Bromo	Probolinggo	27.192	100	27,64	191	19,00		2							2			1
PROBOLINGGO	10	Beberan	Probolinggo	9.520	25	11,50	97	19,20	2	5			6				1			
PROBOLINGGO	11	Malasan	Probolinggo	69.874	67	97,39	82	18,50	1	1			8				1			
PROBOLINGGO	12	K T I	Probolinggo	3.451	3	0,01	160	19,50	2				2							
PROBOLINGGO	13	Panjaitan	Probolinggo	31.022	86	52,12	124	19,00		2			7		1		1			
PROBOLINGGO	14	KTI Particel Board 2	Probolinggo	5.042	0	-	176	19,90		0			1							
PROBOLINGGO	15	Sukapura	Probolinggo	149.594	35	256,55	32	19,00		1			12		1		1			
JUMLAH				621.992,00	687,00	986,85	1.715,48		11	24	-	-	80	-	6	-	5	-	-	5

Biografi Penulis



Nama lengkap penulis yaitu Sahru Rochmadona lahir pada tanggal 24 Maret 1992 di kota Ponorogo, Jawa Timur. Merupakan anak ke-3 dari 3 bersaudara dari pasangan Bapak Samuri dan Ibu Katuni (Alm). Penulis berkebangsaan Indonesia dan beragama Islam. Kini penulis bertempat tinggal di Jl,Parang klitik No 26 Kecamatan Babadan Ponorogo, Provinsi Jawa Timur.

Adapun riwayat pendidikan penulis, yaitu pada tahun 1999 lulus dari TK Ma'rif Patian Wetan Ponorogo. Kemudian melanjutkan di MI Ma'rif Patian Wetan Ponorogo dan lulus pada tahun 2005. Tahun 2008 lulus dari SMP Ma'rif Patian Wetan Ponorogo dan melanjutkan pendidikan ke SMK Bakti Ponorogo lulus tahun 2011. Setelah itu kuliah di Institut Teknologi Nasional Malang Jurusan Teknik Elektro S-1. Pada awal tahun 2015 semester Genap (8), penulis telah menyelesaikan skripsi yang berjudul "*Optimasi Penempatan UPFC (Unified Power Flow Control) Untuk Mereduksi Rugi-Rugi Saluran Di Gardu Induk Probolinggo*".

Minimization of Losses in Distribution Systems for the Improvement of Power Quality by Using UPFC

M.Manasa¹, N.Narendar Reddy²

^{1,2}Sri Venkateshwara Engineering College, Suryapet, J.N.T.U Hyderabad, India.

Abstract—Minimization of line losses and the improvement of power quality in distribution system are the most challenging problems, particularly when it is not economic to upgrade the entire feeder systems. This paper presents a new method to achieve the line loss minimum condition and improve power quality in radial and loop distribution system by using Unified Power Flow Controllers (UPFC), one of the most important FACTS devices. For regulating voltage using PWM controllers and to minimize losses in distribution systems. First, the line loss minimum conditions in distribution systems are present then load voltage regulation is applied under line minimum condition to improve the power quality. Reference voltage of the controlled node is determined based on the assumptions that this voltage can subsequently improve all node voltages to be with in the permissible range.

Keywords—Loop distribution system, series compensation, unified power flow controller (UPFC), power quality, voltage regulation, line loss minimization.

I. INTRODUCTION

Now-a-days there are different power quality issues and power problems each of which might have varying and diverse causes. Among all power quality issues, voltage drop is the most severe one that can lead to tremendous losses to the customers. Therefore, voltage is one of the most important elements of the electric power quality. If the Power Quality of the network is good, then any loads connected to it will run satisfactory and efficiently. If the Power Quality of the network is bad, then loads connected to it will fail or will have a reduced lifetime, and the efficiency of the electrical installation will reduce.

Flexible AC transmission systems (FACTS) controllers have been mainly used for solving various power system steady state control problems. However, recent studies reveal that FACTS controllers to improve the power quality and to minimize losses. The concept of Flexible AC Transmission System (FACTS) was introduced as a family of power electronic equipments which have emerged for controlling and optimizing flow of electrical power in the distribution lines. In addition, many papers considering loss reduction and improvement of power quality in distribution systems, using FACTS devices, have been published. Most of them used STATCOM, shunt active filter, series-shunt power converter, and BTB converter to regulate and balance load voltages and to reduce line loss by reactive power injection. However, these literatures did not consider minimization of line loss and improving power quality.

This paper presents minimum conditions for the losses in distribution systems and experimentally achieved them by using unified power flow controllers (UPFC). Among the FACTS components, Unified Power Flow Controller (UPFC) is the most complete. It is able to control independently the throughput active and reactive powers. The UPFC is capable to act over three basic electrical system parameters: line voltage, line impedance, and phase angle, which determine the power. There are three basic types of distribution system designs: Radial, Loop, or Network. The Radial distribution system is the cheapest to build, and is widely used in sparsely populated areas. A radial system has only one power source for a group of customers. A power failure, short-circuit, or a downed power line would interrupt power in the entire line which must be fixed before power can be restored.

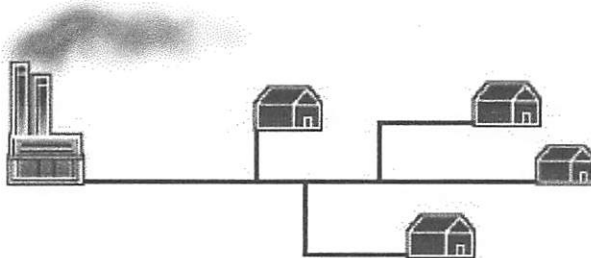


Fig.1 Radial distribution system

A loop system, as the name implies, loops through the service area and returns to the original point. The loop is usually tied into an alternate power source. By placing switches in strategic locations, the utility can supply power to the customer from either direction. If one source of power fails, switches are thrown (automatically or manually), and power can

be fed to customers from the other source. The loop system provides better continuity of service than the radial system, with only short interruptions for switching. In the event of power failures due to faults on the line, the utility has only to find the fault and switch around it to restore service. The fault itself can then be repaired with a minimum of customer interruptions. The loop system is more expensive than the radial because more switches and conductors are required, but the resultant improved system reliability is often worth the price.

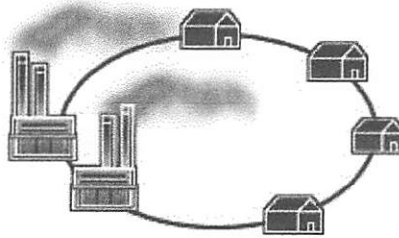


Fig.2 loop distribution system

Network systems are the most complicated and are interlocking loop systems. A given customer can be supplied from two, three, four, or more different power supplies. Obviously, the big advantage of such a system is added reliability. However, it is also the most expensive. For this reason it is usually used only in congested, high load density municipal or downtown areas.

II. UNIFIED POWER FLOW (UPFC) CONCEPT

The UPFC configuration is shown in fig3.

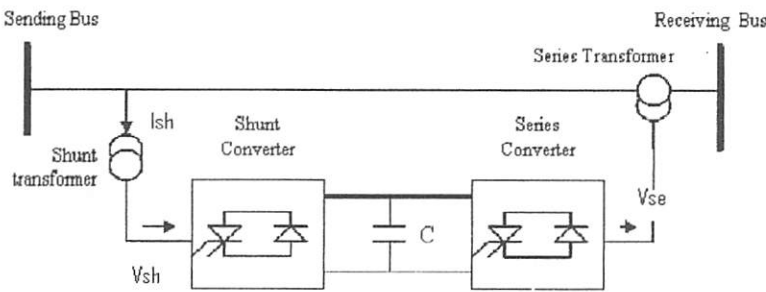


Fig.3 Basic Structure of an UPFC

It can be seen that the UPFC consists of a series and a shunt converter is connected back-to-back through a common dc link. The shunt converter is connected also in parallel with the line transmission by transformer, allows controls the UPFC bus Voltage/shunt reactive power and the dc capacitor voltage

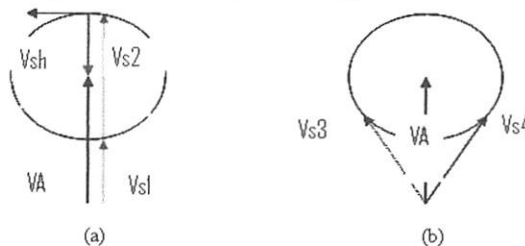


Fig.4. Power exchange of the Shunt Converter

Figure 4(a) shows the exchange of the reactive power between the UPFC and the electrical system. The shunt converter generates a voltage V_{s1} in phase with V_A but with variable magnitude. If $V_s = V_{s1}$. The UPFC injects some reactive power, if $V_s = V_{s2}$ the UPFC absorbs some reactive power and no reactive power is exchanged for $V_s = V_A$. In order to compensate the series converter losses, figure 3b shows very clearly. That the active power is exchanged between UPFC and the electrical system. The Voltage generated by shunt converter is no it in phase with the voltage of the system but of the same magnitude. Whereas the series converter of the UPFC controls the transmission line real/reactive power flows by injecting a series voltage of adjustable magnitude and phase angle. The UPFC can provide multiple power flow control functions by adding the injected voltage phasor with appropriate magnitude V_{sc} and phase angle \angle to the sending-end-voltage phasor.

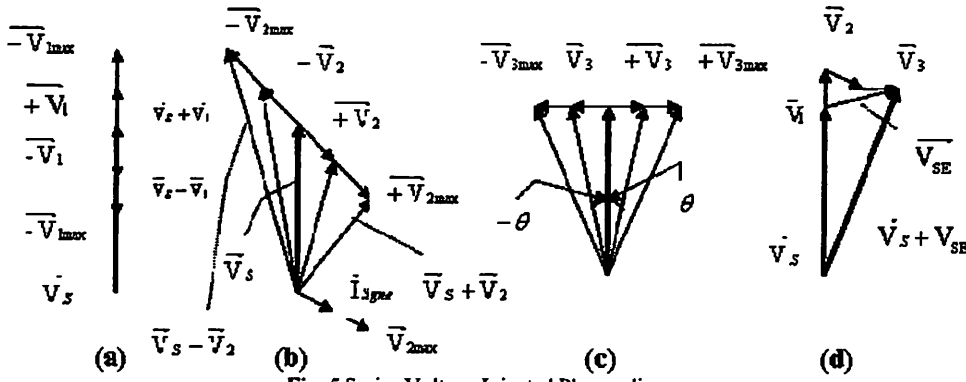


Fig. 5 Series Voltage Injected Phasor diagrams.

As illustrated in figure 4, by the appropriate choice (control) of phasor V_{se} , the three customary power flow control functions:

- 1) Voltage regulation
- 2) Series reactive compensation.
- 3) Phase Shift.

Simultaneous control of terminal voltage, line impedance and phase angle allows the UPFC to perform multifunctional power flow control.

III. MINIMIZATION CONDITIONS FOR LINE LOSS

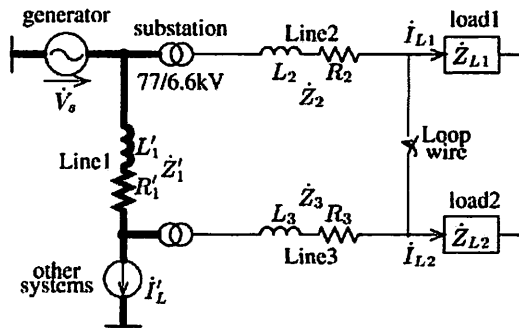


Fig. 6 Model of distribution system.

Fig. 6 shows a simple model of the distribution system. In this model, impedances of lines 1, 2, and 3 are $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$, $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$, and $Z_3 = R_3 + j\omega L_3$, respectively. The load impedances are Z_{L1} and Z_{L2} . The other systems, connected to this system, are represented by a current source. The system is reconfigured to be loop system by connecting the adjacent ends of line 2 and line 3, using loop wire. The load currents I_{L1} and I_{L2} and the other systems current I_L are assumed to be constant. Also, the line currents I_{oi} ($i=1, 2, 3$, and 4) flow in each line in the same direction (counter clockwise). According to the line currents and the system parameters, the total line loss P_l in the loop system can be formulated as follows:

$$\begin{aligned}
 P_l &= \sum_{i=1}^3 R_i |I_{oi}|^2 \\
 &= R_{loop} \left| I_{o1} - \frac{R_2 I_{L1} + R_2 I_{L2} + (R_2 + R_3) I_L}{R_{loop}} \right|^2 \\
 &\quad - \frac{|R_2 I_{L1} + R_2 I_{L2} + (R_2 + R_3) I_L|^2}{R_{loop}} \\
 &\quad + R_2 |I_{L1} + I_{L2} + I_L|^2 + R_3 |I_L|^2 \quad (1)
 \end{aligned}$$

where

$$R_{loop} = \sum_{i=1}^3 R_i. \quad (2)$$

Since the second, third, and fourth parts in (1) are constants, because the currents I_{L1} , I_{L2} , and I_L are assumed to be constants, the first part is the only part that can be used to obtain the line loss minimum conditions. These conditions can

be obtained by equating the first part in (1) with zero. In this case, the total line loss P_{\min} in loop system can be formulated as follows:

$$P_{\min} = \sum_{i=1}^3 R_i |i_{m_i}|^2 \quad (3)$$

Where i_{m_i} ($i = 1, 2,$ and 3) is the line current that flows in the loop lines in case of line loss minimization. The loss minimum line currents can be formulated as follows:

$$\left. \begin{aligned} i_{m1} &= \frac{R_2 \dot{I}_{L1} + R_2 \dot{I}_{L2} + (R_2 + R_3) \dot{I}_L}{R_{\text{loop}}} \\ i_{m2} &= -\frac{(R_1 + R_3) \dot{I}_{L1} + (R_1 + R_3) \dot{I}_{L2} + R_1 \dot{I}_L}{R_{\text{loop}}} \\ i_{m3} &= \frac{R_2 \dot{I}_{L1} + R_2 \dot{I}_{L2} - R_1 \dot{I}_L}{R_{\text{loop}}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

The difference between the currents i_{0i} and i_{m_i} is defined as the loop current i_{loop} that circulates in loop system in the same direction, and can be formulated as follows:

$$i_{\text{loop}} = i_{0i} - i_{m_i} = -\frac{\sum_{i=1}^3 j\omega L_i \dot{I}_{0i}}{R_{\text{loop}}} \quad (5)$$

The line loss minimum conditions in loop systems can be realized by eliminating the loop current i_{loop} from the system, which can be achieved if any of the following conditions, is realized:

$$\frac{R_1}{L_1} = \frac{R_2}{L_2} = \frac{R_3}{L_3} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^3 j\omega L_i \dot{I}_{0i} = 0. \quad (7)$$

IV. IMPROVEMENT OF POWER QUALITY UNDER LINE LOSS MINIMUM CONDITION

To improve the power quality voltage regulation is the main important one. Load voltage regulation problems in distribution systems are commonly solved by using STATCOM, which has the ability to control voltage magnitude by compensating reactive power. However, STATCOM cannot control the line loss in loop distribution systems. On the other hand, series compensators, such as UPFC, have the ability to regulate load voltage, to minimize line loss and improve power quality simultaneously in the radial and loop distribution system. The main object of this paper is to minimize the total line loss and to regulate the load voltages in loop distribution system, simultaneously. The line loss minimum conditions can be achieved if the loop current is eliminated from the loop system. Under this condition, the load voltages can be controlled in order to keep it within the permissible voltage range, $\pm 5\%$ of the nominal source voltage. Fig. 7 shows a simple model of the loop distribution system that is used to simplify the idea of power quality under line loss minimum condition. In this model, V_s , V_l , and V_r are assumed to be source voltage, load 1 voltage, and (loads 2 and 3) voltage, respectively. The series voltage source V_c is assumed to be a controlled series voltage that is used to regulate the load voltages. The controlled series voltage V_c is inserted to the loop system by the UPFC series converter. Therefore, the voltage V_c is assumed to be controlled in both voltage magnitude and phase angle.

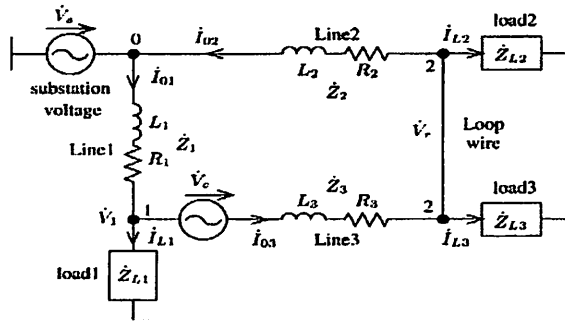


Fig. 7 Model of loop distribution system with series voltage source.

A. Before Installing the Controlled Series Voltage V_c

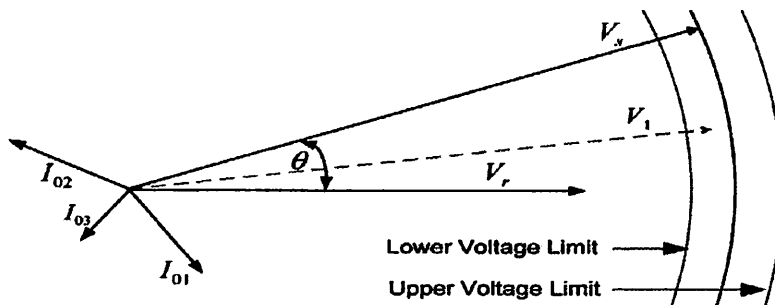
Fig. 8(a) shows the phasor diagram of the line currents and node voltages in the loop system shown in Fig. 7. The permissible voltage range is defined by the lower and upper voltage limits. It is cleared that the node 2 voltage V_r is less than the lower voltage limit and lags behind the source voltage V_s by the angle θ . Therefore, series compensation can be used to control node 2 voltage in order to regulate all node voltages to be within the permissible voltage limit.

B. After Installing the Controlled Series Voltage V_c

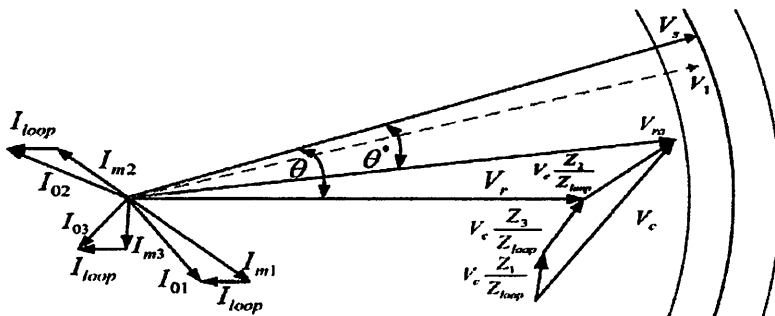
Installing a series voltage source in a loop distribution system affects the power flow and hence changes all the node voltages. Based on the superposition theorem, the change in node 1 and node 2 voltages due to the installation of the controlled series voltage V_c in the loop system shown in Fig. 3 can be formulated as follows:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \hat{V}_1 &= -\hat{V}_c \frac{\hat{Z}_1}{\hat{Z}_{loop}} \\ \Delta \hat{V}_r &= \hat{V}_c \frac{\hat{Z}_2}{\hat{Z}_{loop}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

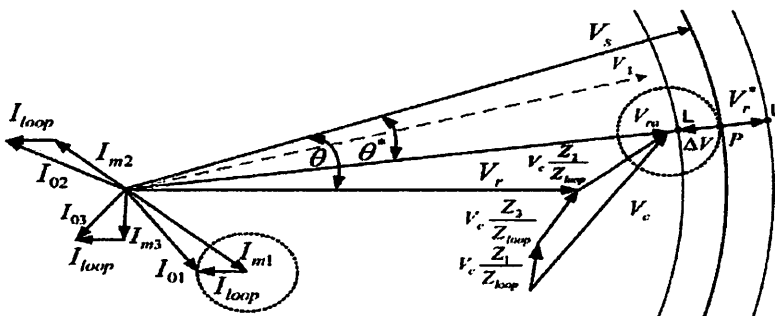
where V_c is the series injected voltage, and Z_{loop} is the summation of the loop impedances. Fig.8(b) and (c) shows the phasor diagrams of all line currents and node voltages after installing the controlled series voltage V_c . The phasor diagrams are drawn based on the change in each node voltage due to the installation of V_c . The value of the controlled series voltage V_c is determined according to its function in the loop distribution system, and the change in each node voltage can be calculated based on (8).



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Phasor diagram of the loop distribution system. (a) Before installing V_c . (b) After installing V_c to achieve line loss minimization. (c) After installing V_c to achieve voltage regulation under line loss minimization.

Since the controlled series voltage V_c realize its function by controlling the node 2 voltage, the phasor lines, representing the change in each node voltage, are drawn to show the overall change related to node 2 voltage. Also, the line currents I_{ij} and their components (I_{mi} and I_{loop}) are drawn in the phasor diagrams based on (4) and (5). The focus of the phasor diagrams, shown in Fig. 8(b) and (c), is the relation between the change in the node 2 voltage and the loop current. In the system shown in Fig. 7, if the controlled series voltage V_c is installed to achieve loss minimum condition, node 2 voltage changes to be V_{ra} , which is still less than the lower voltage limit and lags behind source voltage V_s by the angle θ^* , as shown in Fig. 4(b). In this case, node 2 voltage can be formulated as follows

$$\dot{V}_{ra} = \dot{V}_r + \dot{V}_c \frac{\dot{Z}_2}{Z_{loop}} \quad (9)$$

where V_r is the load voltage before installing V_c , and V_{ra} is the load voltage after installing V_c . Inserting a controlled series voltage in loop system to achieve line loss minimization affects all voltages in the system. However, Fig. 8(b) shows that this method cannot guarantee all node voltages to be within the permissible voltage range.

Fig. 4(c) shows the phasor diagram of the distribution system, shown in Fig. 3, with the effect of using V_c to achieve load voltage regulation under line loss minimum condition. Based on the loop current, total power loss shown in (1) can be formulated as follows:

$$P_l = \sum_{i=1}^3 R_i |\dot{I}_{oi}|^2 = \sum_{i=1}^3 R_i |\dot{I}_{mi}|^2 + R_{loop} |\dot{I}_{loop}|^2. \quad (10)$$

Equation (10) shows that any circle centered by the current I_{mi} , due to the change in loop current, has constant power loss. The change in loop current will change the node 2 voltage by ΔV , as shown in Fig. 8(c). The resultant node 2 voltage can be formulated as follows:

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_r' &= \dot{V}_{ra} + \Delta \dot{V} \\ \Delta \dot{V} &= \dot{Z}_2 \dot{I}_{loop} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Equation (11) shows that changing the loop current to draw a circle around its center I_{mi} causes the node 2 voltage to draw a similar circle around its center V_{ra} that also has constant power loss. In case of line loss minimization, the loop current is zero and hence the radius of both circles is zero. As the loop current increases, the radius of these circles and hence total line loss increase, too. The tangential point, point (P), between the circle centered by V_{ra} and the circle of source voltage loci, represents the point, at which node 2 voltage equals in magnitude to source voltage under loss minimum condition. In general, controlling node 2 voltage to be lag behind V_s by the angle θ^* , means controlling the voltage under line loss minimum condition. However, controlling the node 2 voltage to be equal in magnitude to source voltage under line loss minimum condition cannot guarantee all node voltages to be within the permissible voltage range. According to (8), the change in node 2 voltage causes an opposite change in the node 1 voltage, that may cause the node 1 voltage to be less than the lower voltage limit.

In this paper, the reference magnitude of node 2 voltage is controlled to be in between points L and U, as shown in Fig. 8(c), in order to achieve all node voltages within the permissible voltage range under line loss minimum condition. The reference magnitude will start at point (p), then changes toward point (L) or (U) according to the voltage at node 1 in order to realize all node voltages in between the permissible voltage limit.

V. PROPOSED CONTROL SCHEME

The proposed control scheme has been developed to meet the following objectives, simultaneously: 1) minimize total power loss in loop distribution systems; and 2) regulate all node voltages to be within permissible voltage range to improve power quality.

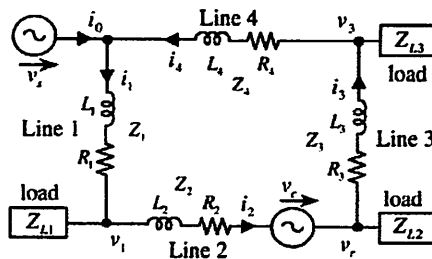


Fig.9 Model of the system in case study.

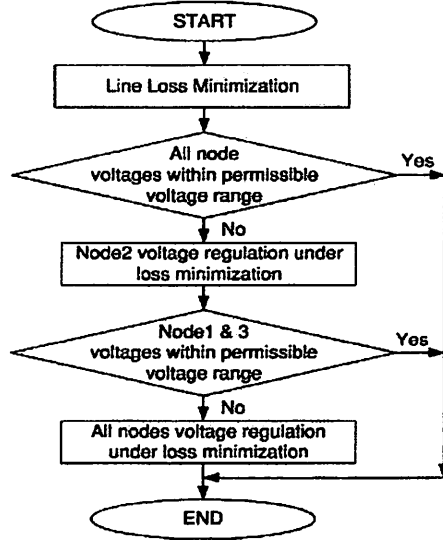


Fig.10 Control steps of UPFC series converter.

Fig. 9 shows the loop distribution system model controlled by the UPFC. In this model, the UPFC series converter is represented by series voltage source connected at line 2, whereas the shunt converter is disregarded because its current is not as large as the distribution line current. The distribution system model has three line nodes that their voltages can be controlled by the UPFC. Fig. 10 shows the control flow chart of the UPFC series converter. First, the reference voltage of the UPFC series converter is calculated based on the line loss minimum condition. If any node voltage is outside the permissible voltage limit, UPFC will control the node 2 voltage to be equal in magnitude to the source voltage under line loss minimization. In this case, if the voltage at nodes 1 or 3 is still out of the limit, node 2 voltage magnitude will be controlled in order to keep them within the limit. In all cases, the reference angle of node 2 voltage is θ^* to control the node voltages under loss minimization.

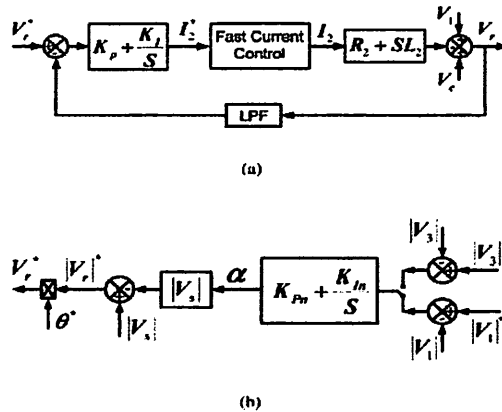


Fig. 11. Control scheme of UPFC series converter. (a) Main block control circuit. (b) Node voltage limit control.

Fig. 11 shows the proposed control block diagram of the UPFC series converter to achieve all nodes voltage regulation under line loss minimization by controlling node 2 voltage. The difference between reference and actual node 2 voltage is controlled by using proportional-integral (PI) controller to obtain the reference current of the UPFC line (line 2), which is used to calculate the reference voltage of UPFC series converter V_c . The parameters in control block diagram are transformed from three-phase axis to the $p-q$ axes using Park-Clarke transformation. Also, the control technique used in this paper does not require any data about the loads because in practical distribution systems, loads are continuously varying. In order to achieve line loss minimization in the loop system, node 2 reference voltage can be formulated as follows:

$$\hat{V}_r^* = \|V_{ra}\| \angle \theta^* \tag{12}$$

Reference voltage for loss minimization can be calculated by using the line currents that flow in loop lines under loss minimum condition (I_{mi} , ($i = 1, 2, 3,$ and 4)) and the line parameters. In order to calculate these currents, first the UPFC circulating current, I_{UPFC} , is calculated as follows:

$$\dot{I}_{UPFC} = \left| \frac{\dot{V}_c}{Z_{loop}} \right. \quad (13)$$

The line currents that flow in the loop system lines before installing UPFC (I_{0i} , [$i = 1, 2, 3, \text{ and } 4$]) can be estimated by subtracting the UPFC circulating current, as shown in (13), from the loop system line currents as follows:

$$\dot{I}_{0i} = \dot{I}_i - \dot{I}_{UPFC} \quad (14)$$

By using the currents I_{0i} , shown in (14), the loop current can be calculated as in (5). The line currents that flow in loop lines under loss minimum condition [I_{mi} , ($i = 1, 2, 3, \text{ and } 4$)] can be calculated as follows:

$$\dot{I}_{mi} = \dot{I}_{0i} - \dot{I}_{loop} \quad (15)$$

By using the currents I_{mi} , shown in (15), and the line parameters, the load voltage V_{ra} , and hence, the phase shift angle θ^* can be calculated from the p - q axes components of V_{ra} as follows:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ra} &= \dot{V}_s - \dot{Z}_1 \dot{I}_{m1} + \dot{V}_c - \dot{Z}_2 \dot{I}_{m2} \\ &= \dot{V}_s + \dot{Z}_4 \dot{I}_{m4} + \dot{Z}_3 \dot{I}_{m3} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\theta^* = \tan^{-1} \left(\frac{V_{raq}}{V_{rap}} \right) \quad (17)$$

If the series injected voltage, for line loss minimization, cannot guarantee all node voltages to be within the permissible voltage limit, node 2 voltage magnitude should be controlled in order to achieve all node voltages within the limit. First, node 2 reference voltage is controlled to be equal in magnitude to source voltage and lag behind it by the angle θ^* as follows

$$\dot{V}_r^* = |V_s| \angle \theta^* \quad (18)$$

$$V_c^* = (V_r^* - V_r) \frac{Z_{loop}}{Z_3 + Z_4} \quad (19)$$

$$I_{UPFC} = \frac{V_c^*}{Z_{loop}} \quad (20)$$

In the node 2 voltage before installing UPFC, V_r , is calculated using line currents [I_{0i} , ($i = 1, 2, 3, \text{ and } 4$)], shown in (14). The estimated currents that flow in the loop system lines in case of controlling node 2 voltage, as in (18), are calculated by adding the circulating current shown in to the line currents [I_{0i} , ($i = 1, 2, 3, \text{ and } 4$)], and the resultant line currents are used to calculate the estimated voltages at nodes 1 and 3. If the series injected voltage still cannot guarantee voltages at nodes 1 and 3 to be within the permissible voltage limit, an additional block diagram can be used in order to keep all node voltages within the limit, as shown in Fig. 7(b). The inputs of this additional block diagram can be node-1 or node-3 voltage, depending on which one of them is out of the limit. The reference values of nodes 1 and 3 voltages can be the lower or the upper voltage limits according to the value of node voltage. In this case, node 2 reference voltage can be formulated as follows:

$$V_r^* = |V_s| (1 - \alpha) \angle \theta^* \quad (21)$$

where α is the voltage limit controller.

VI. EXPERIMENTAL SYSTEM CONFIGURATION

A. Distribution System Configuration

In order to demonstrate the effectiveness of using UPFC to realize all nodes voltage regulation and total line loss minimization in the loop distribution systems simultaneously, a simple laboratory model of the distribution system is used. Fig. 12 shows the 230-V, 6-kVA laboratory model including the distribution system and the UPFC. The distribution system consists of four sets of three-phase lines, lines 1, 2, 3 and 4. First, the system works as two radial feeders which are fed from the same voltage source. Then, by using the loop wire to connect nodes $V2a$ and $V2b$ in parallel, the system is reconfigured to work as loop system with same line parameters. Installing loop wire makes the two node voltages $V2a$ and $V2b$ as one, known as V_r . The parameters of the whole system are listed in Table I.

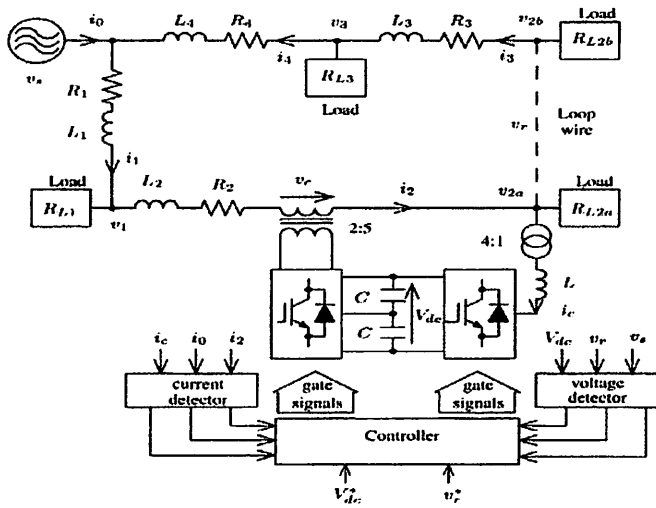


Fig.12 Experimental system configuration.

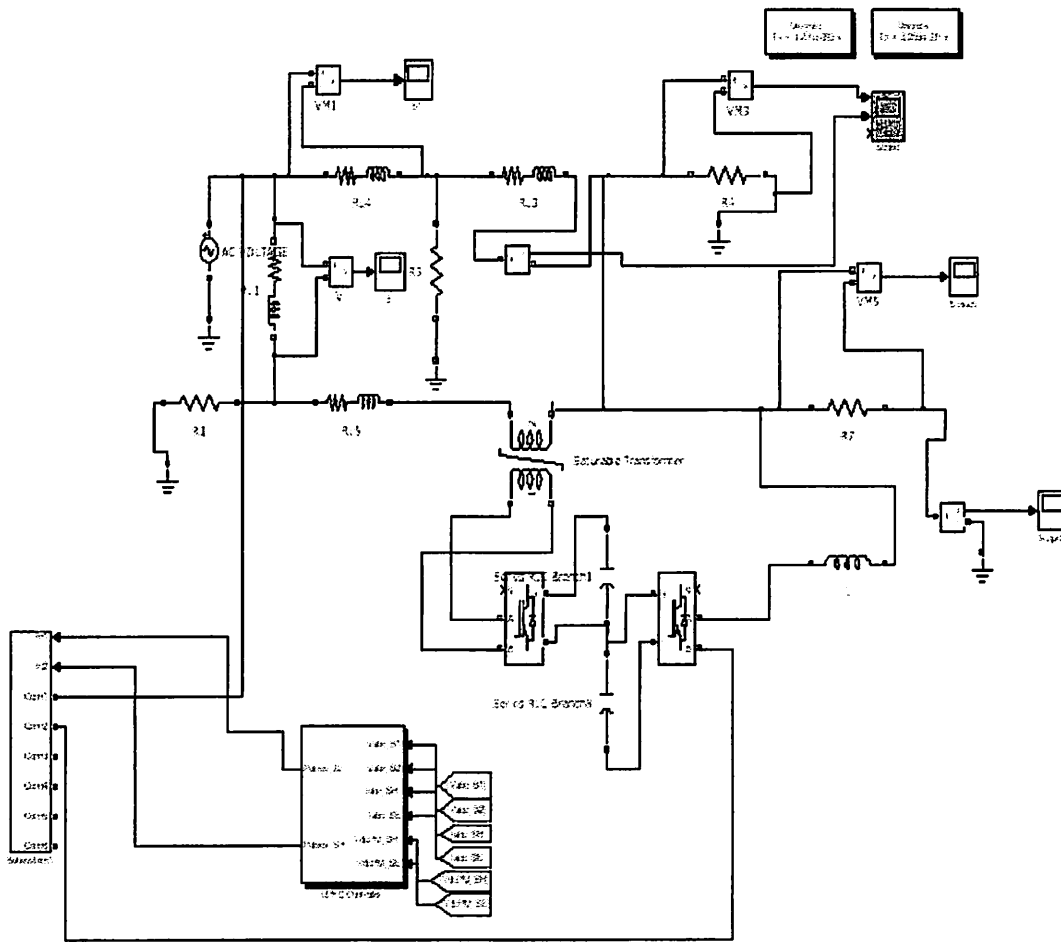


Fig.13 Simulation model

TABLE I : SYSTEM PARAMETERS (200 V-6 KVA BASE)

Source voltage v_s	203 V, 60 Hz
Load R_{L1}	30 Ω (0.22 p.u.)
R_{L2a}	80 Ω (0.08 p.u.)
R_{L2b}	26.7 Ω (0.25 p.u.)
R_{L3}	60 Ω (0.11 p.u.)
Line 1 L_1	6.0 mH (0.34 p.u.)
R_1	0.6 Ω (0.09 p.u.)
Line 2 L_2	6.0 mH (0.34 p.u.)
R_2	0.8 Ω (0.12 p.u.)
Line 3 L_3	6.0 mH (0.34 p.u.)
R_3	1.2 Ω (0.18 p.u.)
Line 4 L_4	6.0 mH (0.34 p.u.)
R_4	1.2 Ω (0.18 p.u.)
Capacitor C	3000 μ F
Input L of shunt conv.	2.0 mH
DC link voltage V_{dc}	100 V
Switching time T_s	204 μ s
Main PI gains K_p, K_I	10 A/V, 20 A/V.sec
Voltage limit PI gains K_{pn}, K_{In}	0.2 A/V, 0.3 A/V.sec

B. UPFC Circuit Configuration

Fig. 14 shows the configuration of UPFC used in the experimental system. It consists of combined series and shunt converters connected BTB to each other through a common dc-link capacitors. The series converter, which acts as a controllable voltage source v_c , is used to inject a controlled voltage in series with the distribution line, and thereby to force the power flow to a desired value. The shunt converter, which acts as a controllable current source i_c , is used to regulate the dc-link voltage by adjusting the amount of active power drawn from the distribution line to meet the real power needed by the series converter. In addition, the shunt converter has the capability of controlling reactive power.

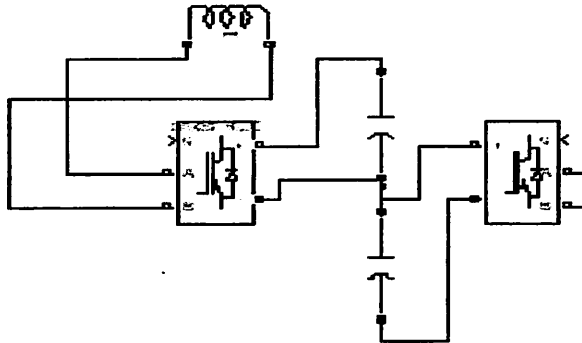


Fig.14 Simulation model for UPFC

TABLE II : EXPERIMENTAL RESULTS BEFORE AND AFTER INSTALLING UPFC

	Before UPFC		After UPFC		
	Radial	Loop	Case (1)	Case (2)	Case (3)
I_1 [A]	5.25	6.19	7.24	8.01	7.79
I_2	1.43	2.43	3.38	4.15	3.84
I_3	3.88	3.16	2.08	2.05	1.89
I_4	5.76	4.92	3.87	3.53	3.53
I_{loop}	0.0	1.13	0.04	1.32	0.85
V_s [V]	203.0	203.0	203.0	203.0	203.0
V_1	196.6	193.5	193.9	187.6	190.1
V_{2a}	194.7	187.5	189.1	200.2	196.5
V_{2b}	180.3	187.5	189.1	200.2	196.5
V_3	188.9	192.5	193.6	198.6	197.2
V_c [V]	0.0	0.0	11.5	18.5	15.2
P_{loss} [W]	228.3	206.2	191.2	216.8	202.3

The UPFC series and shunt converters, shown in Fig. 8, have been built as a three-phase pulse width modulation (PWM) converter with insulated gate bipolar transistor (IGBT) SKM100GB124D as the power device. The DSP TMS320VC33 is selected as the controller for both converters. The shunt converter is connected in parallel with the distribution line via a three-phase transformer. The series converter, multilevel converter, consists of three single-phase H-bridge converters. The ac terminals of each H-bridge converter are connected in series with the distribution line through a single-phase transformer. The switching and sampling frequencies for series and shunt converters are 2.45 and 4.9 kHz, respectively. The main function of the UPFC series converter is to realize all nodes voltage regulation and line loss minimization in the loop distribution system, simultaneously. Controlling the loop system by using UPFC requires detecting all line currents flowing in the loop lines, which in practical distribution system seems to be difficult. In the authors have proposed a new method for estimating all line currents and voltages in four lines loop system, and applied this method to achieve total line loss minimization. In this method, the detected signals are UPFC line current I_2 and node voltage V_r , in addition to the main source voltage V_s and its injected current I_0 . The currents i_c , i_0 , and i_2 are detected by using normal current sensors. Also, the voltages V_{dc} , V_r , and V_s are detected by using normal voltage sensors. The outputs of the current and voltage sensors are connected to the AD converters in order to use in the DSP controller.

VII. EXPERIMENTAL RESULT

The laboratory model of radial and loop distribution system shown in Fig. 8 is carried out before and after installing UPFC. In each case, line currents, all node voltages, and power loss in each line are measured and listed in Table II for comparison. All line currents, voltages, and total power loss, shown in Table II, are measured by using the Digital Power Meters (Yokogawa WT1600) that are simultaneously connected in the sending and receiving ends of each line in the experimental system. The power loss in each line is calculated from the difference between the sending and receiving powers

A. Before Installing UPFC

The laboratory model shown in Fig. 12 is carried out first as two radial feeders fed from the same voltage source. Then, the system works as loop by connecting nodes V_{2a} and V_{2b} in parallel using loop wire. Installing loop wire makes the two node voltages V_{2a} and V_{2b} as one, known as V_r . Table II shows the experimental results of all line currents, loop current, all node voltages, and total line loss in the radial and loop configurations. In the radial configuration, node voltages V_3 and V_{2b} are less than the lower voltage limit (190 V). Although reconfiguring the system to work as loop one enhances the loop wire voltage V_r , it is still less than the lower voltage limit.

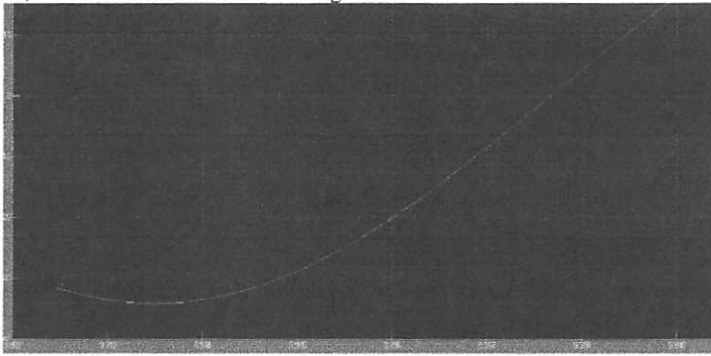


Fig. 15 experimental wave before installing upfc for loop system

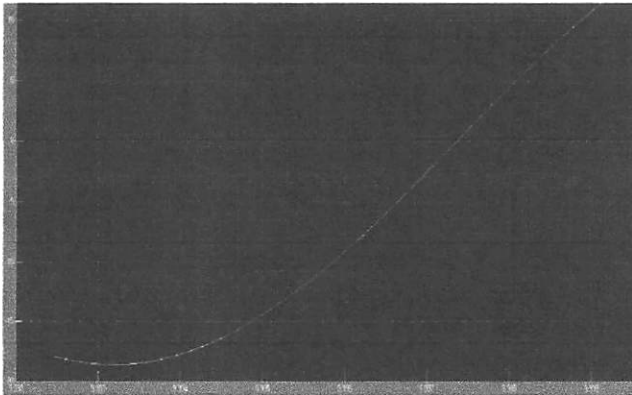


Fig. 16 experimental wave before installing upfc for radial system

B. After Installing UPFC

Experimental system shown in Fig. 8 is carried out as loop distribution system after installing UPFC. First, UPFC is used to achieve line loss minimum condition. Then, UPFC is used to regulate node 2 voltage to be equal in magnitude to

the nominal voltage under line loss minimum condition. Finally, UPFC is used to regulate all node voltages to be within permissible voltage range, $200 \pm 5\%$, under line loss minimum condition. In each case, the line currents, node voltages, and total line loss are measured and listed in Table II for comparison.

- i) **Line Loss Minimization:** UPFC is installed in the loop system to achieve line loss minimum condition by controlling node 2 voltage to be as shown in (12). Table II shows the experimental results of all line currents, loop current i_{loop} , all node voltages, UPFC series converter voltage v_c , and total line loss. Fig. 9 shows the experimental waveforms of loop current, UPFC series converter voltage, reference and actual node 2 voltage in the $p-q$ axes, reference and actual line 2 current in the $p-q$ axes, reference and actual phase shift angle between the source and node 2 voltages, and rms line voltage of each node in the loop system before and after installing UPFC. Experimental results show that UPFC eliminates the loop current from loop system, and hence minimize the total line loss by 7.3%. However, the node 2 voltage is still less than the lower voltage limit.
- ii) **Node Voltage Equal in Magnitude to Nominal Source Voltage Under Loss Minimization:** UPFC is installed in the loop system to regulate node 2 voltage to be equal in magnitude to the nominal source voltage (200 V) under line loss minimum condition by controlling node 2 voltage to be as shown in (18). Table II and Fig. 10 show the experimental results in the loop system before and after installing UPFC. Experimental results show that the UPFC regulates the node 2 voltage to be equal in magnitude to the nominal source voltage. However, the total line loss increases by 5.1%, and the node 1 voltage decreases and becomes less than the lower voltage limit.
- iii) **All Nodes Voltage Regulation under Loss Minimization to improve power quality:** UPFC is installed in the loop system to achieve all node voltages to be within the permissible voltage limit under line loss minimum condition by controlling node 2 voltage to be as shown in (21). In this case, controlling the system to be under loss minimum condition is achieved by controlling node 2 voltage to be lag behind source voltage by the angle θ^* . Also, the reference magnitude of node 2 voltage is controlled in order to achieve all node voltages to be within the limit. Table II and Fig. 11 show the experimental results of loop system before and after installing UPFC. It is cleared that after installing UPFC, the reference and actual values agree well with each other. According to the control flow chart shown in Fig. 6, the UPFC starts with controlling node 2 voltage to achieve line loss minimization, and the estimated values have been used to check if the voltage at each node is within the permissible voltage limit or not. Fig. 12 shows the estimated and actual voltages of all nodes in case of controlling node 2 voltage to achieve line loss minimum condition. Since the estimated values of node 2 voltage, in case of loss minimization, is less than the lower voltage limit, the reference magnitude of node 2 voltage is changed to be equal to the nominal source voltage magnitude (200 V). In this case, estimated values have been used to check if node 1 and node 3 voltages are within the limit or not.

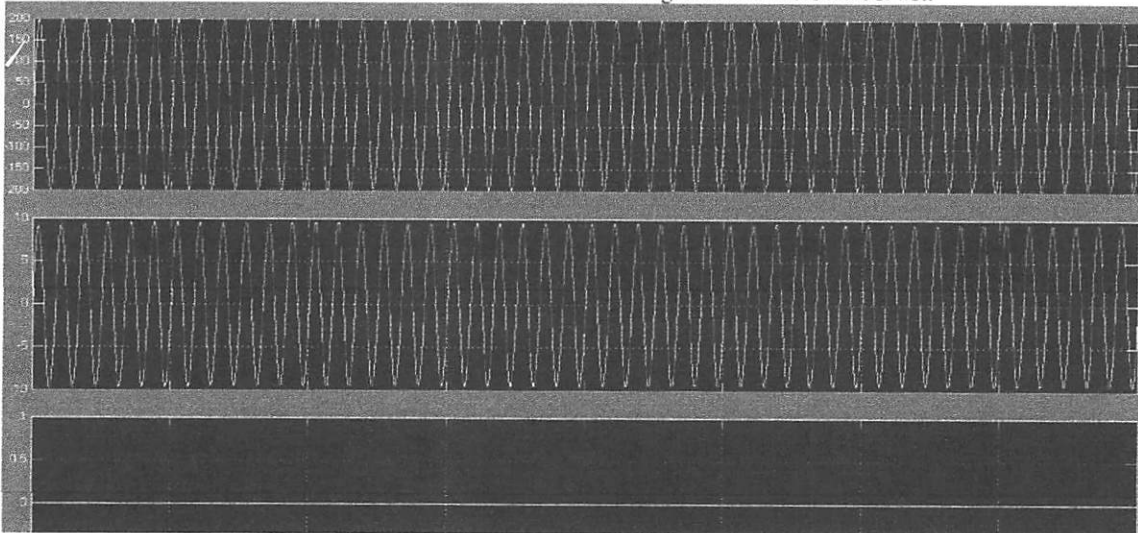


Fig. 17 experimental wave after installing upfc for loop system

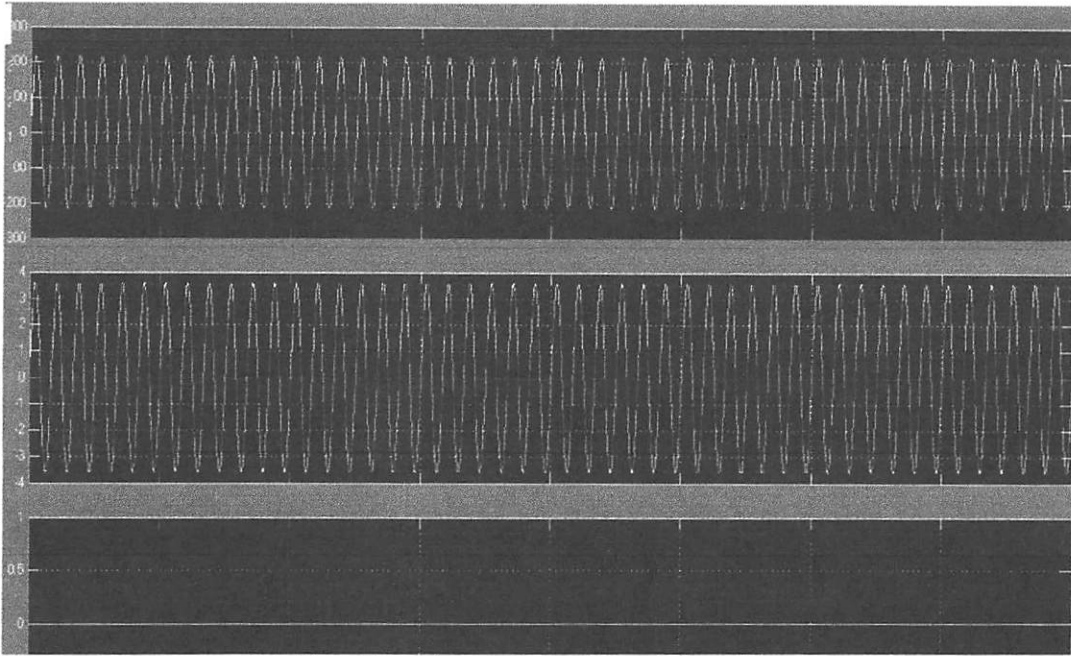


Fig. 18 experimental wave after installing upfc for radial system

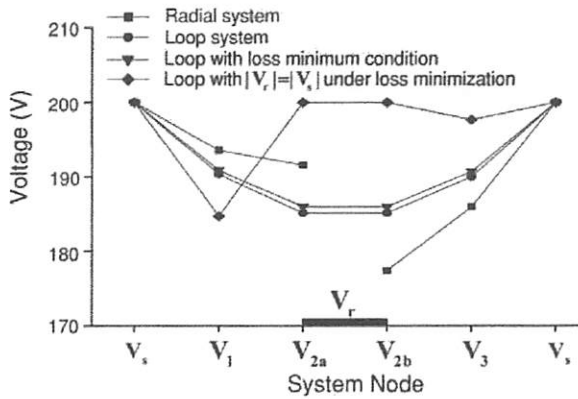


Fig. 19 Calculated node voltages before and after installing UPFC.

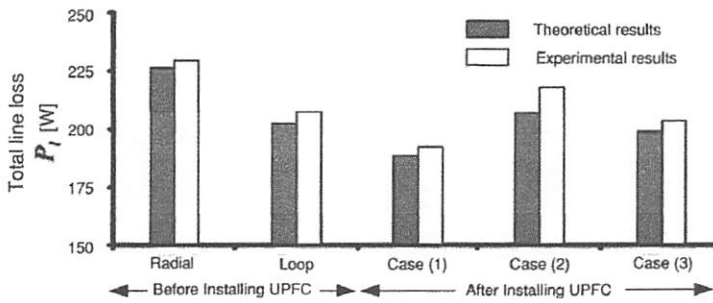


Fig.19 Total line loss.

Fig. 15 shows a comparison between theoretical and experimental results of total line loss in radial system, loop system without UPFC, and loop system with UPFC that is used to achieve line loss minimum condition, to achieve load voltage equal in magnitude to the nominal source voltage, and to achieve all node voltages to be within the permissible voltage limit under loss minimization. Also, Fig. 16 shows the rms line-to-line node voltages in each case. It is cleared that only in the last case, all node voltages are within the permissible voltage limit under loss minimization.

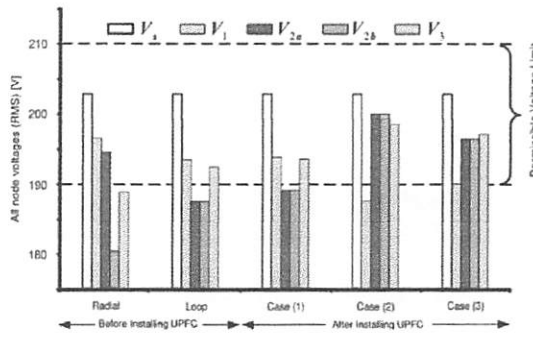


Fig. 20 RMS line-to-line node voltages.

VIII. CONCLUSION

This paper has presented the line loss minimum conditions and the control schemes of UPFC for the improvement of power quality. Regulating node voltage under line loss minimization has been achieved by controlling the phase angle of the controlled voltage. Installing UPFC to minimize the total line losses or to regulate the load voltage to be equal in magnitude to the nominal source voltage under loss minimization. Node voltage estimation has been proposed and the estimated voltages at each node agree well with their actual values. Experimental results prove that the UPFC has a great capability to regulate all node voltages to be within the permissible voltage range under line loss minimum condition and it will improve the power quality in distribution system.

REFERENCES

- [1]. H. Fujita, H. Akagi, and Y. Watanabe, "Dynamic control and performance of a unified power flow controller for stabilizing an ac transmission system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 4, pp. 1013–1020, Jul. 2006
- [2]. S. Hosseini and M. Banaci, "Performance of active power line conditioner for loss reduction in the power distribution system," in *Proc. IEEE Region 10 Conf., TENCON*, 2004, vol. 4, pp. 97–100.
- [3]. Y.-R. Mohamed and E. El-Saadany, "A control method of grid-connected PWM voltage source inverters to mitigate fast voltage disturbances," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 489–491, Feb. 2009
- [4]. R. Simanjorang, Y. Miura, and T. Ise, "Distributed-series compensator for controlling voltage in distribution line with clustered distributed generations," *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, pp. 404–415, Apr. 2009.
- [5]. R. Simanjorang, Y. Miura, and T. Ise, "A series type BTB converter for controlling voltage profile in loop distribution system with distributed generations," *IEEJ Trans. Power Energy*, vol. 128, no. 5, pp. 769–778, May 2008.
- [6]. N. Okada, "Verification of control method for a loop distribution system using loop power flow controller," in *Proc. IEEE Power Syst. Conf. Expo. (PSCE) 2006*, pp. 2116–2123.
- [7]. L. Gyugyi, "Unified power flow control concept for flexible AC transmission systems generation," in *proc. Transmission distribution conf.* vol 139, July 2003, pp.323-331.
- [8]. L. Gyugyi, "Converter-Based FACTS Controllers," in the institution of electrical engineers (IEE), Savoy place, London 1998.
- [9]. M. F. Faisal, "Power quality management program: TNB's Experience," Distribution Engineering Department, TNB, 2005.
- [10]. A. Felce, G. Matas, Y. D. Silva, "Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors," Inelectra S.A.C.A. Caracas, Venezuela, 2004.

Full Length Research Paper

Modeling and simulation of UPFC using PSCAD/EMTDC

Pramod Kumar Gouda¹, Ashwin K. Sahoo^{2*} and P. K. Hota³

¹Department of Electrical Engineering, A. M. S. College of Engineering, Chennai, India.

²Department of Electrical Engineering, S. S. N. College of Engineering, Chennai, India.

³Department of Electrical Engineering, VSSUT, Burla, Sambalpur, Odisha, India.

Accepted 3 August, 2012

This paper proposes to model and simulate a unified power flow controller (UPFC) in power system computer aided design and electromagnetic transient direct current (PSCAD/EMTDC) environment. The series converter of the UPFC controls the transmission line real/reactive power flow and the shunt converter of the UPFC controls the UPFC bus voltage/shunt reactive power and the DC link capacitor voltage. The real power demand of the series converter is supplied by the shunt converter of the UPFC via the DC link capacitor. The control of transmission line reactive power flow leads to excessive voltage excursion of the UPFC bus voltage. In this proposed work, we have considered two system cases. The first case is to cause a sudden increase in the system load. The second case is to introduce a transient fault in the system. In both cases, excessive bus voltage excursions occur. A UPFC is modeled and designed to reduce these bus voltage excursions, and also proper coordination between the series and shunt converter controllers of the UPFC is maintained to limit the collapse of DC capacitor voltage. PSCAD/EMTDC software is utilized to design and simulate the model.

Key words: Unified power flow controller (UPFC), coordinated control, proportional integral (PI), power system computer aided design and electromagnetic transient direct current (PSCAD/EMTDC).

INTRODUCTION

The technology of power system utilities around the world has rapidly evolved with considerable changes in the technology along with improvements in power system structures and operation. The ongoing expansions and growth in the technology, demand more optimal and profitable operation of a power system. In the present scenario, most of the power systems in the developing countries with large interconnected networks share the generation reserves to increase the reliability of the power system. However, the increasing complexities of large interconnected networks had fluctuations in the reliability of power supply, which resulted in system instability, difficult to control the power flow and security problems that resulted large number blackouts in different parts of the world. The reasons behind the stated fault sequences may be due to the systematical errors in planning and operation, weak interconnection of the power system, lack of maintenance or due to overload of

the network. In order to overcome these consequences and to provide the desired power flow along with system stability and reliability, installations of new transmission lines are required. However, installation of new transmission lines with the large interconnected power system are limited to some of the factors like economic cost, environment related issues. These complexities in installing new transmission lines in a power system challenges the power engineers to research on the ways to increase the power flow with the existing transmission line without reduction in system stability and security (Hingorani and Gyugyi, 2000; Mohan Mathur and Rajiv, 2002; Acha et al., 2002).

Gyugyi (1992) proposed the unified power flow controller (UPFC). It is the most versatile and complex power electronic device introduced to control the power flow and voltage in the power systems. It is designed by combining the features of FACTS controllers - static synchronous series compensator (SSSC) and static synchronous compensator (STATCOM). It has the ability to control active and reactive power flow of a transmission line simultaneously in addition to controlling

*Corresponding author. E-mail: ashwinsahoo@ssn.edu.in.

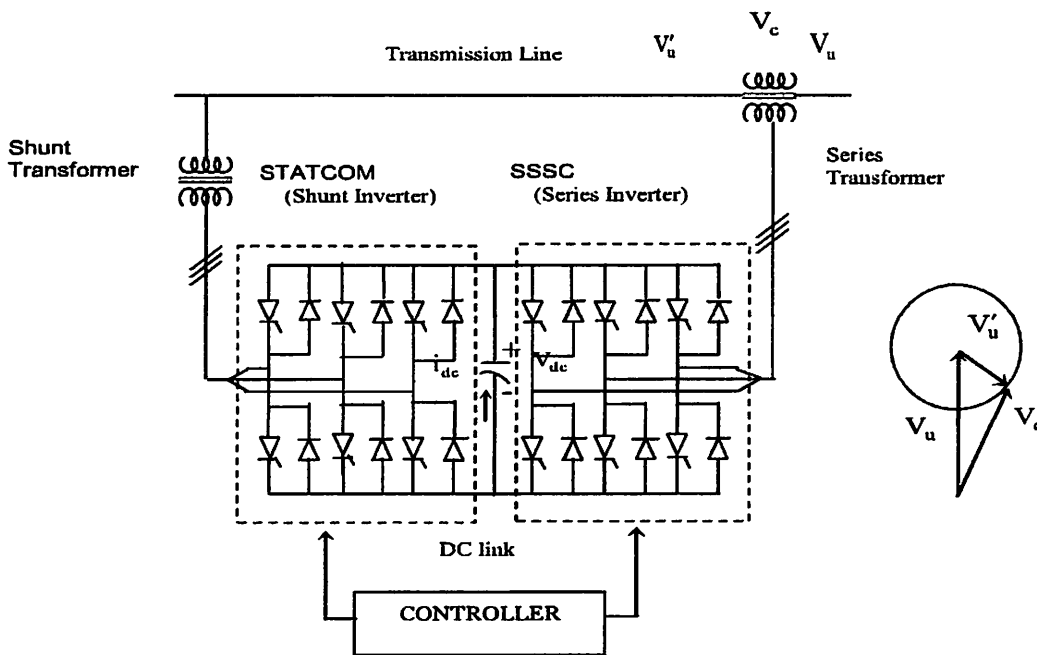


Figure 1. Basic circuit configuration of the UPFC.

transmission parameters (voltage, impedance and angle) affecting the power flow in a transmission line. The basic control for the UPFC is such that the series converter of the UPFC controls the transmission real or reactive power flow and the shunt converter of the UPFC controls the UPFC bus voltage/shunt reactive power and the DC link capacitor voltage.

Several articles are reported on UPFC for different applications, namely improvement in transient stability and damping of rotor swing. Padiyar and Kulkurni (1998) proposed a control strategy for the UPFC for real power control by reactive voltage injection and indirect reactive power flow control by control of voltage at the ports of the UPFC. The controllers are designed independently and use locally available measurement. Padiyar and Padiyar (2005) proposed a method that uses the solution of a constrained optimization problem to determine the voltage and current injected by the UPFC, so as to maximize or minimize the power flow in the line in which it is located at each step. Kannan et al. (2004) proposed a cascaded proportional integral (PI) controller design to limit excessive voltage excursions during reactive power transfers.

In steady state, the real power demand of the series converter is supplied by the shunt converter of the UPFC. To avoid instability/loss of DC link capacitor voltage during transient conditions, a real power coordination controller was designed. Also, the need for reactive power coordination controller for UPFC arises from the fact that excessive bus voltage (the bus to which the series converter is connected) excursions occur during

reactive power transfers. Here, the UPFC is modeled and designed to reduce these bus voltage excursions and also proper coordination between the series and shunt converter controllers of the UPFC is maintained to limit the collapse of DC capacitor voltage. The simulation results for a case study indicate that this is a viable control scheme, while this paper gives basic strategy and design consideration, further refinement is possible in the context of the recent advances in control strategy.

In this paper, first, the modeling of synchronous generator along with automatic voltage regulator (AVR), power system stabilizer (PSS) and modeling of UPFC were derived. Subsequently, the coordinated control schemes of UPFC were designed in PSCAD/EMTDC environment (Introduction to PSCAD/EMTDC, 2000) and simulation results are discussed under different loading and transient disturbance condition.

BASIC CIRCUIT CONFIGURATION OF UPFC

The principal function of the UPFC is to control the flow of real and reactive power by injecting a voltage in series with the transmission line. The UPFC consists of two solid-state voltage inverters (VSIs) connected by a common DC link that includes a storage capacitor shown in Figure 1.

The first inverter (shunt inverter) known as a STATCOM injects an almost sinusoidal current of variable magnitude at the point of connection. The second inverter (series inverter), known as SSSC provides the main functionality

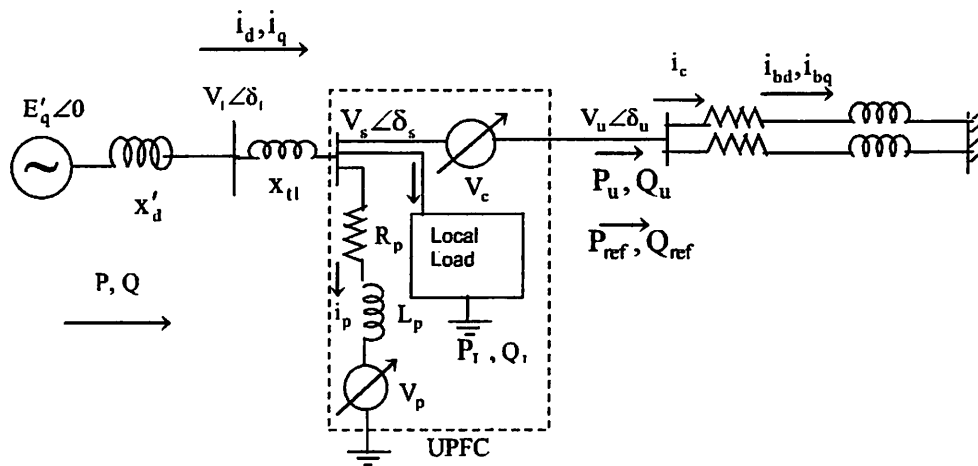


Figure 2. One-line circuit diagram model of UPFC installed in a power system.

the UPFC by injecting an alternating current (AC) voltage V_c , with a controllable magnitude ($0 \leq V_c \leq V_c^{\max}$) and phase angle ($\geq 0^\circ, \leq 360^\circ$). Thus, the complete configuration operates as an ideal AC to AC power converter in which real power can flow freely in either direction between the AC terminals of the two inverters. The phasor diagram in Figure 1 shows that the UPFC is able to inject a controlled series voltage V_c into the transmission line. Thus, the magnitude and angle between the sending and receiving end of the transmission line are modulated resulting in power flow control in the transmission line. Therefore, the active power controller can significantly affect the level of active power flow and vice versa. In order to improve dynamic performance and reduce the interaction between the active and reactive power control, the wattmeter decoupled control algorithm was proposed. In addition, each inverter can independently modulate active power at its own AC output terminal (Sharma and Jagtap, 2010).

MATHEMATICAL MODEL OF UPFC

A single machine infinite bus power system is considered in this work. The mathematical models for the system components along with their control systems are described as follows:

Synchronous generator modeling

The synchronous generator is described by a third-order nonlinear mathematical model given by Equations 1 to 3.

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{M} [P_m - E'_q i_q - (x_q - x'_d) i_d i_q] \quad (2)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d) i_d] \quad (3)$$

Where $\Delta\delta = \delta - \delta_0$ and $\Delta\omega = \omega - \omega_0$.

Dynamical modeling of UPFC

Figure 2 shows the equivalent circuit model of a power system equipped with a UPFC. The series and shunt VSIs are represented by controllable voltage sources V_c and V_p , respectively. R_p and L_p represent the resistance and leakage reactance of the shunt transformer.

The dynamic model of UPFC is derived by performing standard d-q transformation of the current through the shunt transformer and series transformer and is presented in Equations 4 to 7.

Shunt inverter

$$\frac{di_{pd}}{dt} = -\frac{R_p}{L_p} i_{pd} + \omega i_{pq} + \frac{1}{L_p} (V_{sd} - V_{pd}) \quad (4)$$

$$\frac{di_{pq}}{dt} = -\frac{R_p}{L_p} i_{pq} - \omega i_{pd} + \frac{1}{L_p} (V_{sq} - V_{pq}) \quad (5)$$

Series inverter

$$\frac{d i_{bd}}{dt} = -\frac{W_b r_c}{X_c} i_{bd} + \omega i_{bq} + \frac{W_b}{X_c} (V_{ud} - V_b \sin \delta) \quad (6)$$

$$\frac{d i_{bq}}{dt} = \frac{W_b r_c}{X_c} i_{bq} - \omega i_{bd} + \frac{W_b}{X_c} (V_{uq} - V_b \cos \delta) \quad (7)$$

where ω is the angular frequency of the voltages and currents.

For fast voltage control, the net input power should simultaneously meet the charging rate of the capacitor energy. Thus, by applying power balance conditions, we have Equation 8.

$$-P_u = V_{sd} (i_{pd} + i_{bd}) + V_{sq} (i_{pq} + i_{bq}) - (V_{ud} i_{bd} + V_{uq} i_{bq})$$

$$V_{dc} i_{dc}$$

$$V_{dc} \left[C \frac{dV_{dc}}{dt} + g_{cp} V_{dc} \right] \quad (8)$$

Thus, Equation 8 can be rearranged and written as given in Equation 9.

$$i_{dc} = -\frac{g_{cp} \omega}{b_{cp}} V_{dc} + \frac{1}{CV_{dc}} \left[V_{sd} i_{pd} + V_{sq} i_{pq} + (V_{ud} - V_{ud}) i_{bd} + (V_{uq} - V_{uq}) i_{bq} \right] \quad (9)$$

COORDINATED CONTROL STRATEGY FOR UPFC

Proper coordination between the series and shunt inverter control system in the UPFC has to be established. If proper coordination is not established, it could lead to collapse of the DC link capacitor voltage. The voltage level of the DC link capacitor is maintained by the shunt converter. Real power demanded by the series converter is also supplied by the shunt converter through the DC link capacitor. During sudden changes in the system such as system load or transient faults, there will be a reduction in the bus voltages. Regulation of the bus voltages can be done by appropriate reactive power transfers. During such reactive power transfers, proper coordination has to be maintained in the UPFC to avoid collapse of DC link capacitor voltage. Thus, proper coordination of real and reactive power in the UPFC has to be maintained. In this paper, a simultaneous control of UPFC controllers is done to enable appropriate coordination in the UPFC thereby enabling bus voltage regulation and avoidance of DC capacitor voltage collapse. Therefore, in the PI control scheme, the control strategies for both the inverters are addressed

separately. The modeling and control design are carried out in the standard synchronous d-q frame (Juan et al., 2005).

Series inverter control

An appropriate series voltage (both magnitude and phase) should be injected for obtaining the commanded active and reactive power flow in the transmission line, that is, (P_u, Q_u) . The current references are computed from the desired power references and are given by Equations 10 and 11.

$$i_{cd}^{ref} = \frac{P_{ref} V_{ud} - Q_{ref} V_{uq}}{V_u^2} \quad (10)$$

$$i_{cq}^{ref} = \frac{P_{ref} V_{uq} - Q_{ref} V_{ud}}{V_u^2} \quad (11)$$

The power flow control is then realized by using appropriately designed controllers to force the line currents to track their respective reference values. Conventionally, two separate PI controllers are used for this purpose. These controllers output the amount of series injected voltages (V_{cd}, V_{cq}) .

Shunt inverter control

As mentioned earlier, the conventional control strategy for this inverter concerns with the control of AC-bus and DC-link voltage. The dual control objectives are met by generating appropriate current reference (for d- and q-axis) and then, by regulating those currents. PI controllers are conventionally employed for both the tasks, while attempting to decouple the d- and q-axis current regulators.

The inverter current (i_p) is split into real (in phase with ac-bus voltage) and reactive components. The reference value for the real current is decided so that the capacitor voltage is regulated by power balance. The reference for reactive component is determined by AC-bus voltage regulator. As per the strategy, the original currents in d-q frame (i_{pd}, i_{pq}) are now transformed into another frame, $d'-q'$ frame, where d' -axis coincides with the ac-bus voltage (V_s), as shown in Figure 3. Thus, in $d'-q'$ frame, the currents $i_{pd'}$ and $i_{pq'}$ represent the real and reactive currents and are given by Equations 12 and 13.

$$i_{pd'} = i_{pd} \cos \delta_s + i_{pq} \sin \delta_s \quad (12)$$

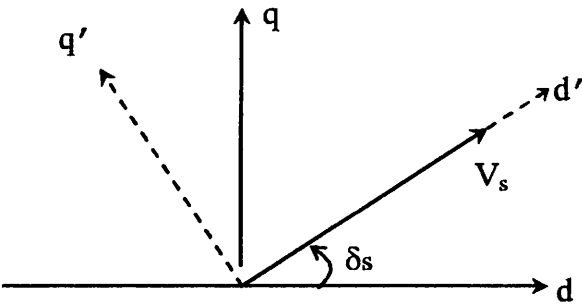


Figure 3. Phasor diagram showing d-q and d'-q' frame.

$$i_{pd'} = i_{pq} \cos \delta_s - i_{pq} \sin \delta_s \tag{13}$$

For current control, the same procedure has been adopted by re-expressing the differential equations as given in Equations 14 to 18.

$$\frac{di_{pd'}}{dt} = -\frac{R_p}{L_p} i_{pd'} + \omega i_{pq} + \frac{1}{L_p} (V_s - V_{pd'}) \tag{14}$$

$$\frac{di_{q'}}{dt} = -\omega i_{pd'} - \frac{R_p}{L_p} i_{q'} + \frac{1}{L_p} (-V_{pq'}) \tag{15}$$

where

$$V_{pd'} = V_{pd} \cos \delta_s + V_{pq} \sin \delta_s \tag{16}$$

$$V_{q'} = V_{pq} \cos \delta_s - V_{pd} \sin \delta_s \tag{17}$$

and

$$\omega = \omega_0 + \frac{d\delta_s}{dt} \tag{18}$$

The VSI voltages are controlled as given in Equations 19 and 20.

$$V_{q'} = -(\omega L_p i_{pd'} + L_p u_{q'}) \tag{19}$$

$$V_{d'} = \omega L_p i_{q'} + V_s - L_p u_{d'} \tag{20}$$

Substituting the above expressions for $V_{pd'}$ and $V_{q'}$ in Equations 14 and 15, the following sets of decoupled equations are obtained.

$$\frac{di_{pd'}}{dt} = -\frac{R_p}{L_p} i_{pd'} + u_{d'} \tag{21}$$

$$\frac{di_{q'}}{dt} = -\frac{R_p}{L_p} i_{q'} + u_{q'} \tag{22}$$

Conventionally, the control signals $u_{d'}$ and $u_{q'}$ are determined by linear PI controllers.

In this study, the stated design was used for demonstration of UPFC control scheme. This approach led to good control as illustrated by the simulation results shown in later section.

CIRCUIT DESCRIPTION AND PROBLEM STATEMENT

In order to illustrate the design and implementation of the UPFC, a single phase circuit where the UPFC is connected between the source and the load is selected as shown in Figure 4. It consists of a 3-phase source connected to Bus1. Loads 1 and 2 are connected to Bus 2. There are two transmission lines connecting Buses 1 and 2. The shunt converter of the UPFC is connected to Bus 1 through a shunt coupling transformer. The series converter of the UPFC is connected to transmission Line 2 through a series coupling transformer. Controllers are designed to co-ordinate real and reactive power transfer in the UPFC and thereby to efficiently operate the UPFC. Load 1 is permanently connected to the system Bus 2. Load 2 is connected to Bus 2 only at a specific time interval. Due to the sudden increase in the system load, there is a drop in the bus voltages. Also, a transient 3-phase fault is introduced into the system at a specific time. Due to the sudden transient fault, there is a drop in the bus voltages. UPFC should be operated in such a manner to compensate the drop in the bus voltage by generating the required amount of reactive power and supplying it to its connected bus. Also, the collapse of the DC capacitor voltage has to be avoided. The electromagnetic transient modeling of UPFC for the test case study using PSCAD/EMTDC is shown in Figure 5.

CONTROLLER CIRCUIT

The controller circuit provides detailed description regarding the generation of firing pulses for both shunt and series converter under various operating conditions. The methodology by which proper co-ordination is maintained between the shunt and series converter is also discussed. The associated control schemes are shown in Figures 6 and 7.

Shunt converter controller

Shunt converter controller circuit describes the technique by which the angle order is generated based on changes in parameters of the main circuit. Utilizing this angle, the

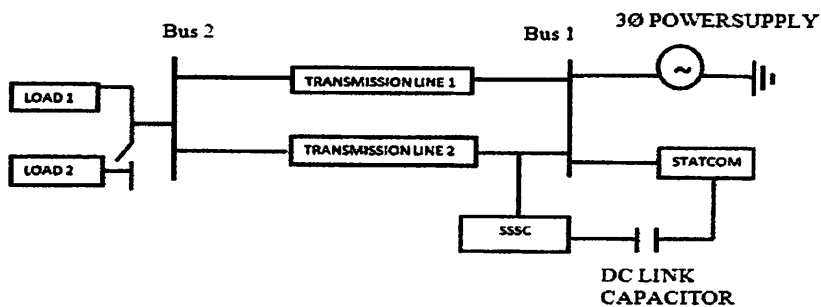


Figure 4. Basic block diagram of the circuit

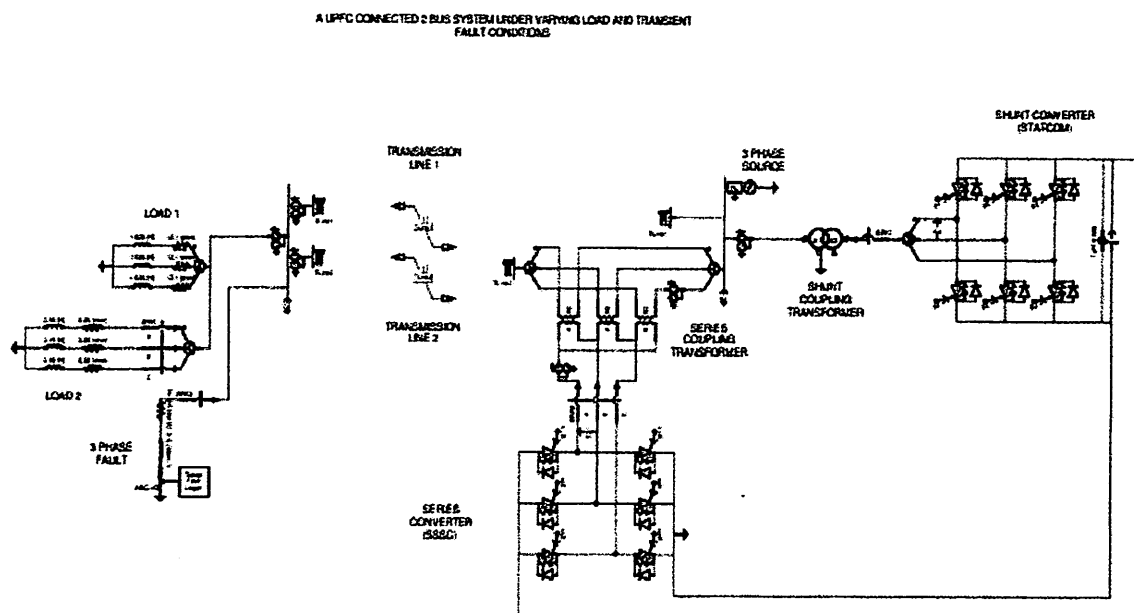


Figure 5. Electromagnetic transient modeling using PSCAD/EMTDC.

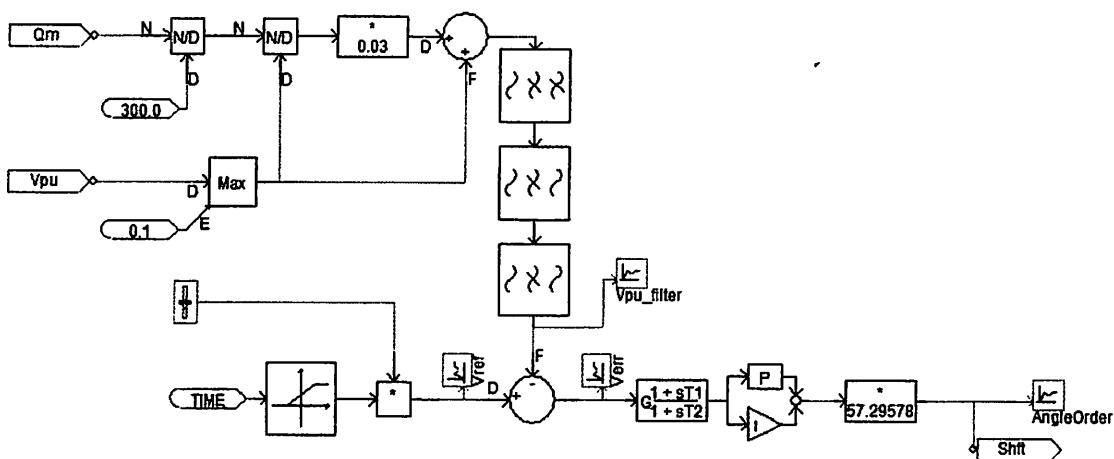


Figure 6. Circuit for generating angle order.

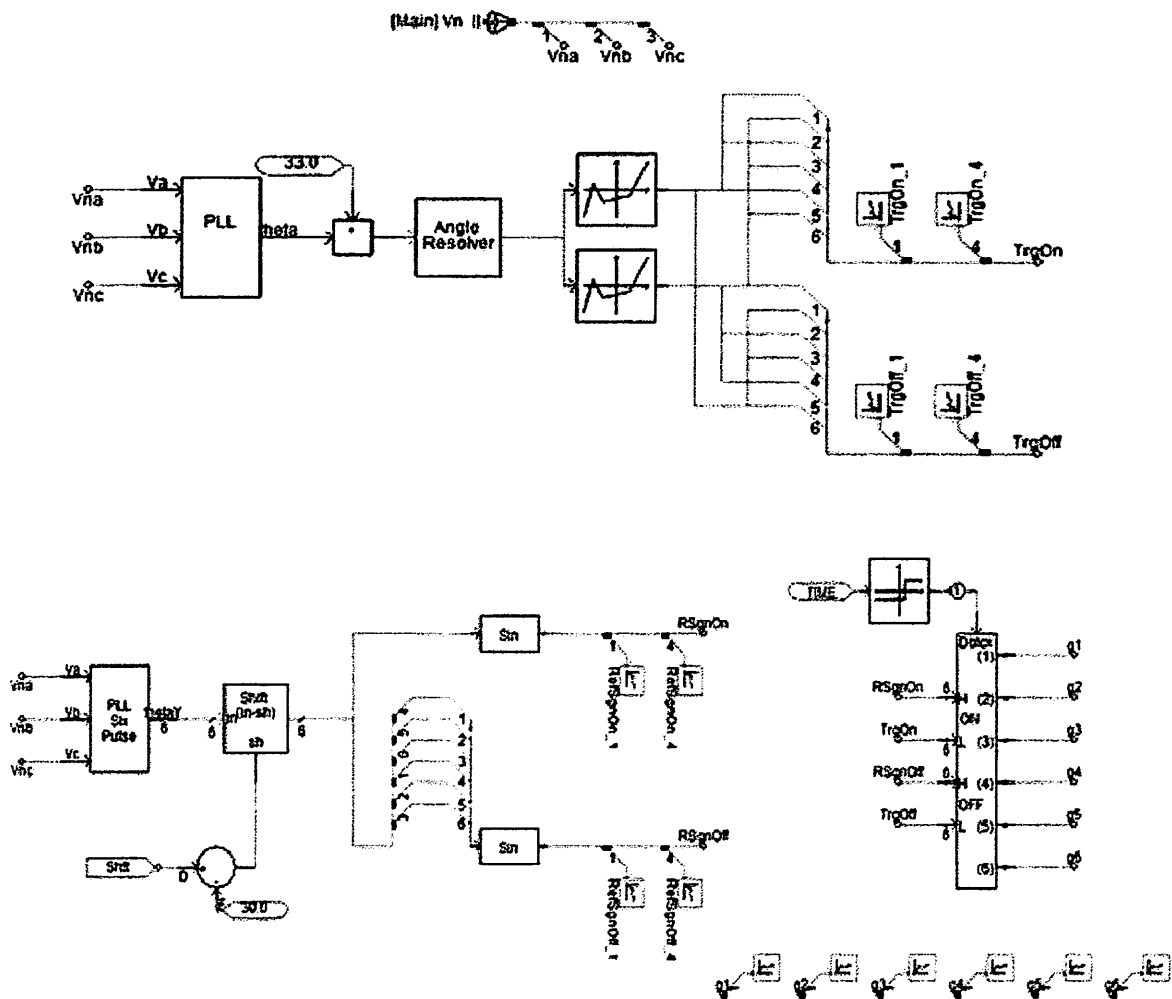


Figure 7. Control circuit for generating pulses.

ler required firing signals for the shunt converter is generated. Measured reactive power and root mean square (RMS) voltage (in per unit) is given as the input. The measured active power is divided with the rated reactive power of the circuit. This output is divided with the measured RMS voltage (in per unit). After allowing a drop of about 3% the output of this block is summed up again with the measured RMS voltage. This summed output is passed through filters. The reference voltage (in per unit), is summed with the output signal of the filters. This is given as input to the PI controller. The output of PI controller is angle order. It represents the required shift between system voltage and voltage generated by shunt converter (ATCOM). This shift determines the direction and amount of power flow. Manual tuning of the proportional and integral gain of the PI controller is done. The output angle order is converted to degrees.

Firing signals are generated by pulse width modulation technique. The instantaneous voltage measured is split into its 3-phase components. This is given as input to the 3-phase PI controlled phase locked loop. It generates a ramp signal that is synchronized in phase to the input voltage signal. This is then multiplied with a real constant to obtain the necessary carrier frequency. From this triangular waveforms synchronized with system AC voltage are generated. Now sinusoidal waveforms synchronized with system AC voltage and shifted by the angle order are to be generated. Again, the instantaneous voltage split into its 3-phase components is given as input to the 3-phase PI controlled phase locked loop. The generated signal that is synchronized in phase to the input voltage signal is shifted by the obtained angle order. Then, this output signal is sent to the sinusoidal function block to generate the required sinusoidal waveforms. The generated triangular and

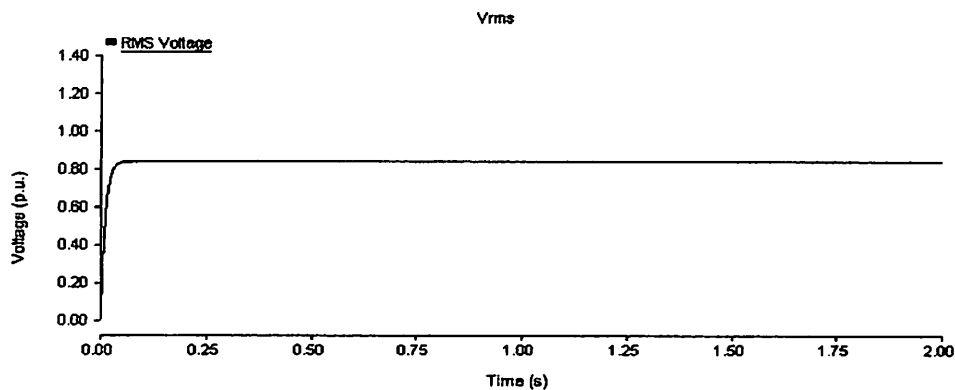


Figure 8. RMS line voltage during normal condition.

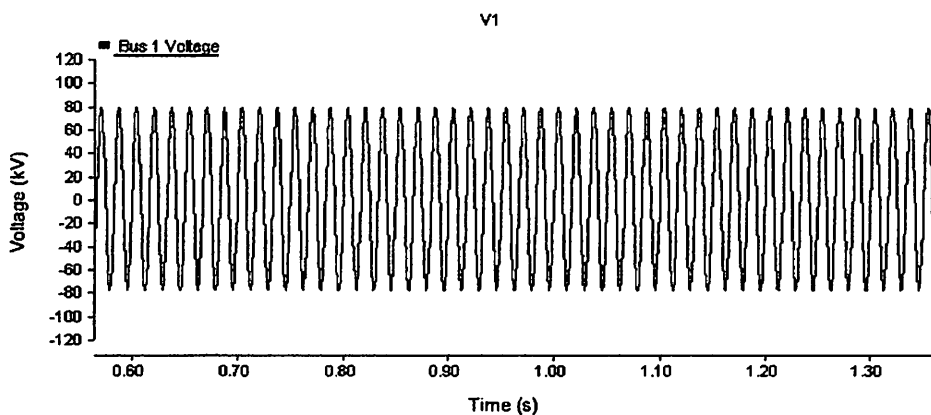


Figure 9. Bus 1 voltage waveform during normal condition.

sinusoidal waveforms are sent to the interpolated firing angle generation block. Two sets of input signals (reference and triangular ones) are needed; one set for turning on and the second one (a negation of the first set signals) for turning off. Firing pulses are generated using comparison of sinusoidal signals to triangular signals. The output signals generated are of two elements. The first element determines the firing signals which indicate the gate turn-off (GTOs) to turn-on and turn-off. The second element determines the exact moment of switching which is used by interpolation procedure for switching between time steps.

Series converter controller

The controller circuit for the series converter is similar to that of the shunt converter. But here the input values for the generation of angle order are the measured real power and the RMS value of voltage. The generated angle order represents the required shift between system voltage and voltage generated by series converter

(SSSC). If the voltage generated by the series converter is in phase with the line current, it exchanges a real power and if the voltage generated by the series converter is in quadrature with line current, it exchanges a reactive power.

TEST CASES AND SIMULATION RESULTS

Five cases were considered to examine the validity of the proposed model. In all the cases, Load 1 is always connected to the system.

Case A

There is no change in load; UPFC is not connected to the system; no transient fault is included in the system. The line voltage, the RMS voltage at Buses 1 and 2 are shown in Figures 8, 9 and 10, respectively under normal operating condition and Table 1 shows the corresponding values.

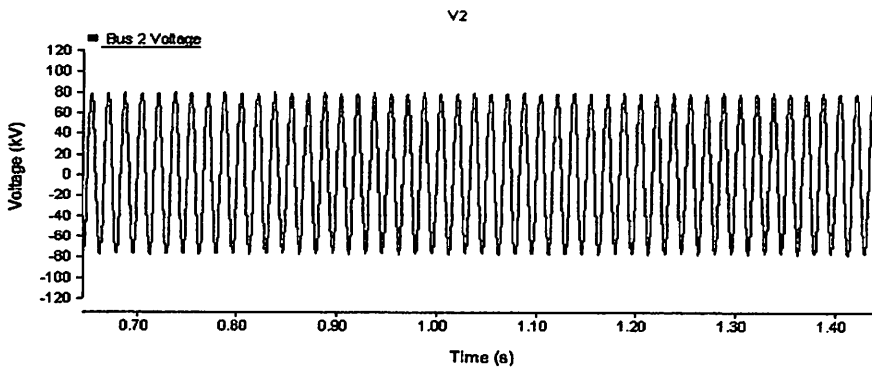


Figure 10. Bus 2 voltage waveform during normal condition.

Table 1. Voltages during increased load and UPFC disconnected condition.

Normal load (only Load 1)			Increased load (Loads 1 and 2) (Time interval of 0.5 to 1 s)		
RMS voltage (pu)	Bus 1 voltage (kV)	Bus 2 voltage (kV)	RMS voltage (pu)	Bus 1 voltage (kV)	Bus 2 voltage (kV)
0.833	95.53	93.08	0.603	68.58	61.23

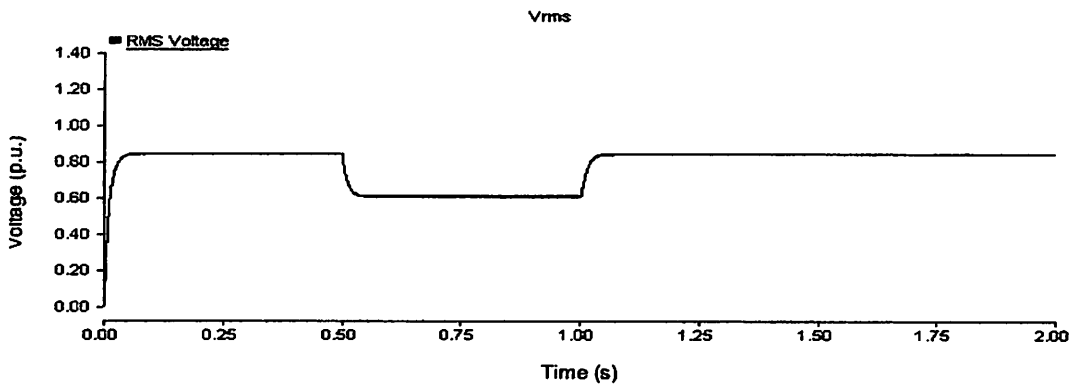


Figure 11. RMS line voltage during increased load.

Case B
 There is an increase in system load during the time interval of 0.5 to 1 s; the UPFC is not connected to the system; no transient fault is included. Under this condition, the voltage at the line and bus point drops by 23% as shown in Figures 11, 12 and 13. Voltage drops as much as 23%, giving a V_{rms} value equal to 0.603 p.u. as shown in Table 1.

Case C
 There is an increase in system load during the time interval of 0.5 to 1 s; the UPFC is connected to the system; no transient fault is included in the system.

From Figures 14, 15 and 16, it is shown that when the UPFC is connected in the system, voltage regulation is done during sudden increased system load conditions. This can be observed from the increase in reactive power during the time interval of 0.5 to 1 s as shown in Figure 17. The normal level of RMS voltage (p.u.) is improved up to a value of 0.976 p.u. from a value of 0.833 p.u. (Case B) as shown in Table 2. So the UPFC improves the initial voltage profile, regulates the voltage during increased system load conditions and the DC capacitor voltage collapse is also avoided (Figure 18).

Case D
 There is no increase in system load; the UPFC is not

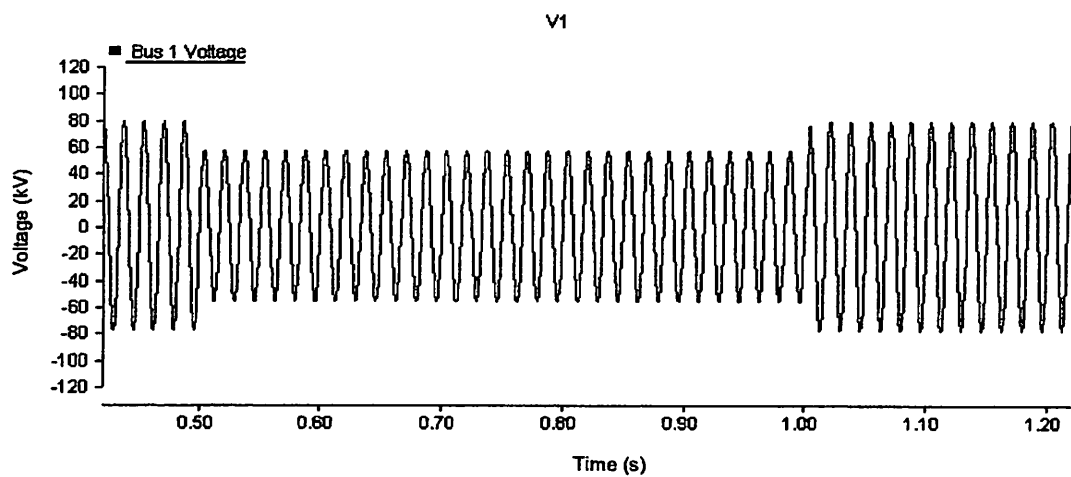


Figure 12. Bus 1 voltage waveform during increased load.

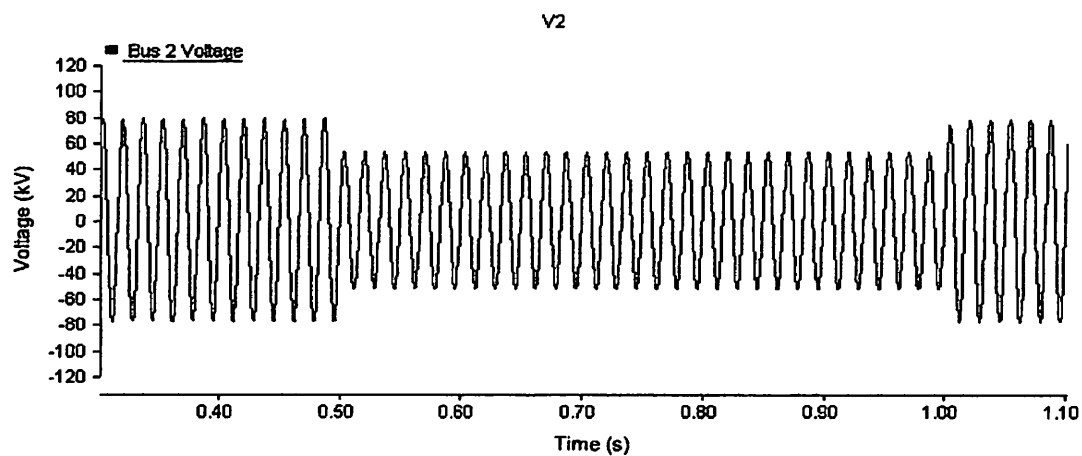


Figure 13. Bus 2 voltage waveform during increased load.

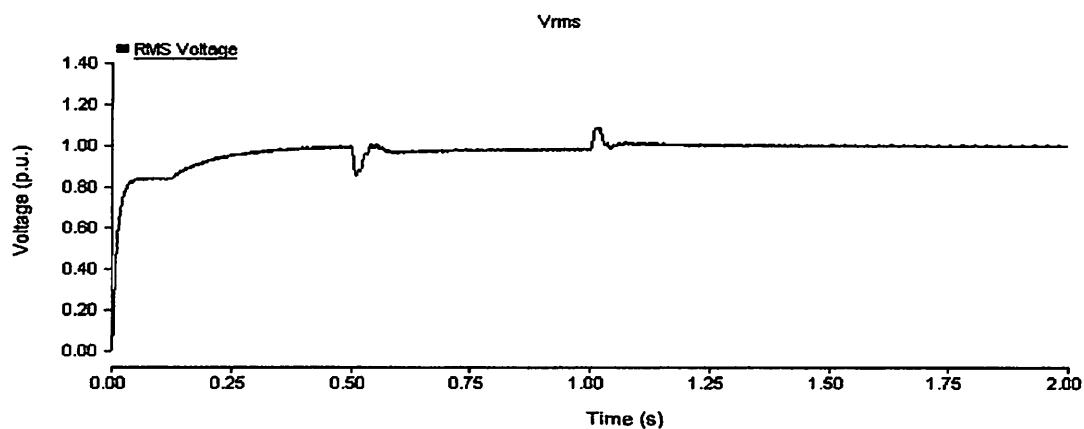


Figure 14. RMS line voltage during increased load and UPFC connected condition.

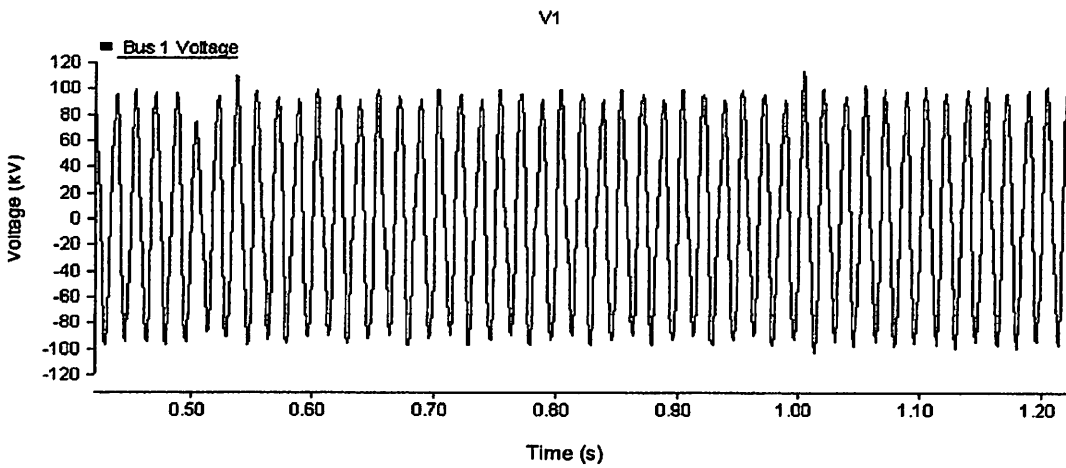


Figure 15. Bus 1 voltage waveform during increased load and UPFC connected condition.

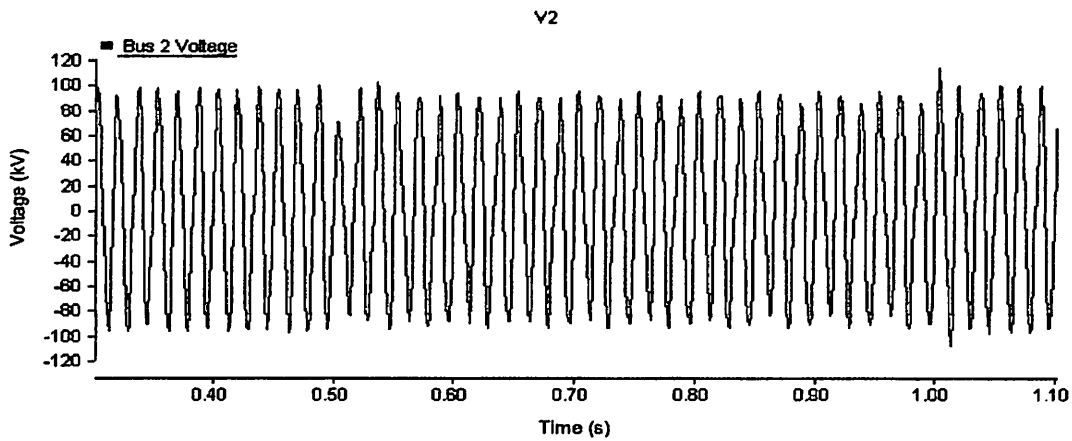


Figure 16. Bus 2 voltage waveform during increased load and UPFC connected condition.

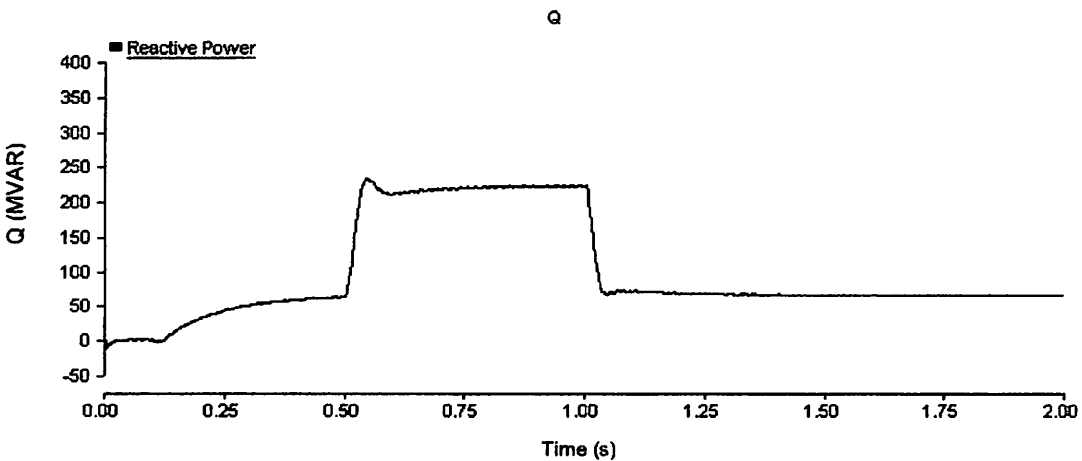


Figure 17. Reactive power waveform during increased load and UPFC connected condition.

Table 2. Voltages during increased load and UPFC connected condition.

Normal load (Only load 1)			Increased load (Loads 1 and 2) (Time interval of 0.5 to 1 s)		
RMS voltage (pu)	Bus 1 voltage (kV)	Bus 2 voltage (kV)	RMS voltage (pu)	Bus 1 voltage (kV)	Bus 2 voltage (kV)
0.976	112.65	111.45	0.974	107.7	104.10

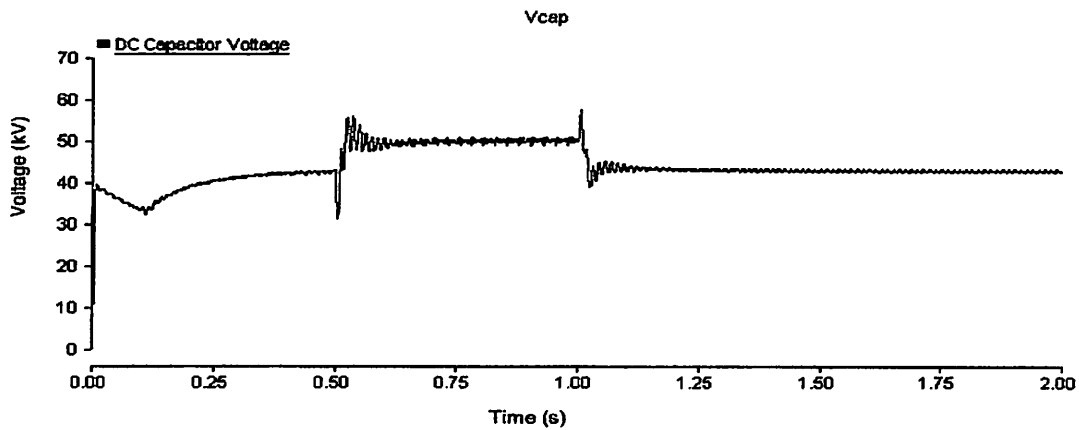


Figure 18. DC capacitor voltage waveform during increased load and UPFC connected condition.

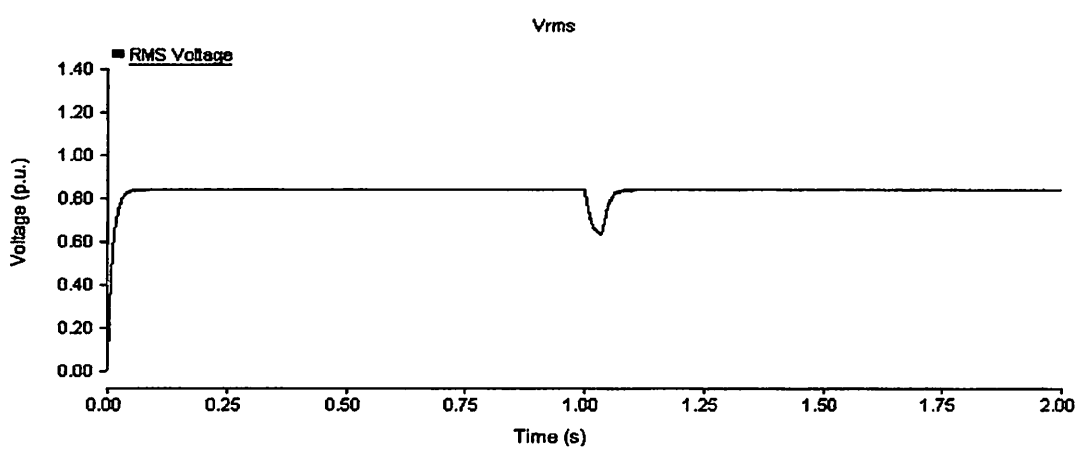


Figure 19. RMS line voltage when transient fault is applied.

connected to the system; a 3-phase transient fault is included during the time interval of 1 to 1.035 s. From Figures 19, 20 and 21, and Table 3, we get to know that during transient fault conditions the RMS voltage and the two bus voltages are reduced.

Case E

There is no increase in system load; the UPFC is connected to the system; a 3-phase transient fault is

included during the time interval of 1 to 1.035 s. From Figures 22, 23 and 24, and Table 4, it is clear that when the UPFC is connected in the system, voltage regulation is done during transient fault conditions. So the UPFC improves the initial voltage profile, regulates the voltage during transient fault conditions. The DC capacitor voltage collapse is also avoided, as evident from Figure 25. The increased in reactive power support by the UPFC during transient fault is shown in Figure 26. All voltage signals of Buses 1 and 2 voltages displayed in the cases are RMS value of phase A to ground

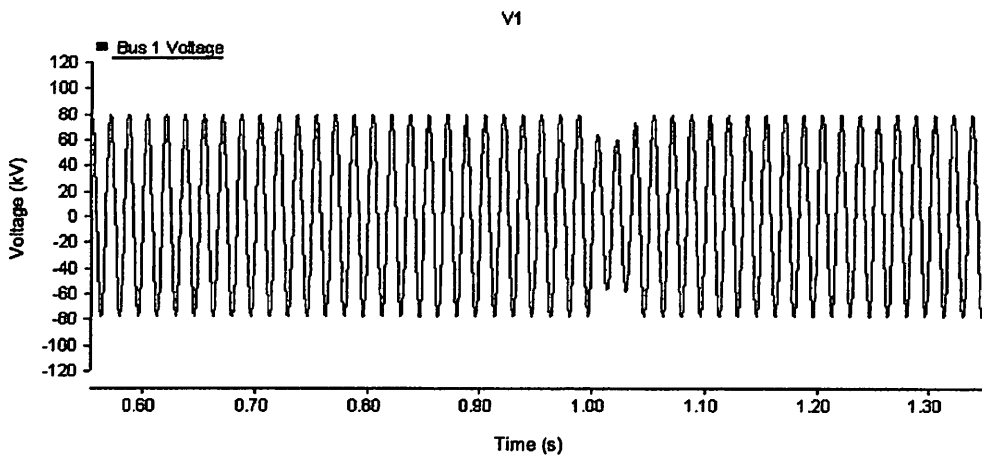


Figure 20. Bus 1 voltage waveform when transient fault is applied.

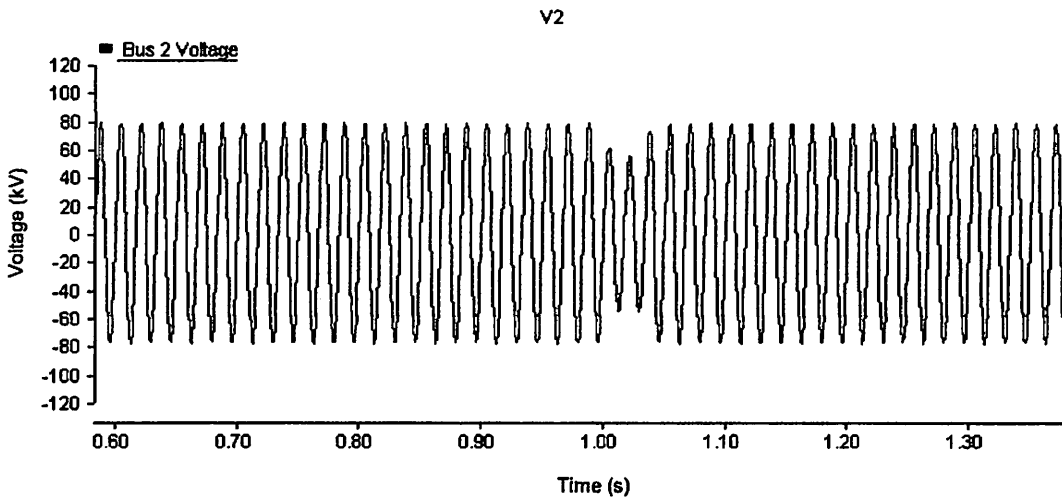


Figure 21. Bus 2 voltage waveform when transient fault is applied.

Table 3. Voltages during transient fault and UPFC disconnected condition.

Without fault			With fault (During 1 to 1.035 s)		
RMS voltage (pu)	Bus 1 voltage (kV)	Bus 2 voltage (kV)	RMS voltage (pu)	Bus 1 voltage (kV)	Bus 2 voltage (kV)
0.861	95.53	93.08	0.622	70	66

voltage signals.

Conclusion

Due to the sudden increase in the system load or due to certain transient faults, there is a drop in the bus

voltages. To regulate the bus voltages, the UPFC is operated in voltage control mode. In this case, the RMS value of voltage (in per unit) is measured simultaneously. When there is a drop in the RMS value of voltage, the UPFC detects it. The necessary firing signals are given to the converters by the controllers. The shunt converter generates or absorbs the necessary amount of reactive

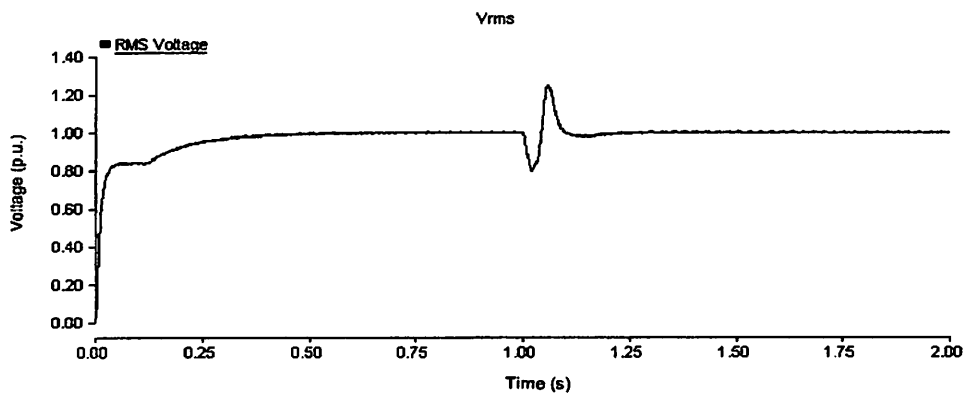


Figure 22. RMS voltage waveform when transient fault is applied and UPFC is connected.

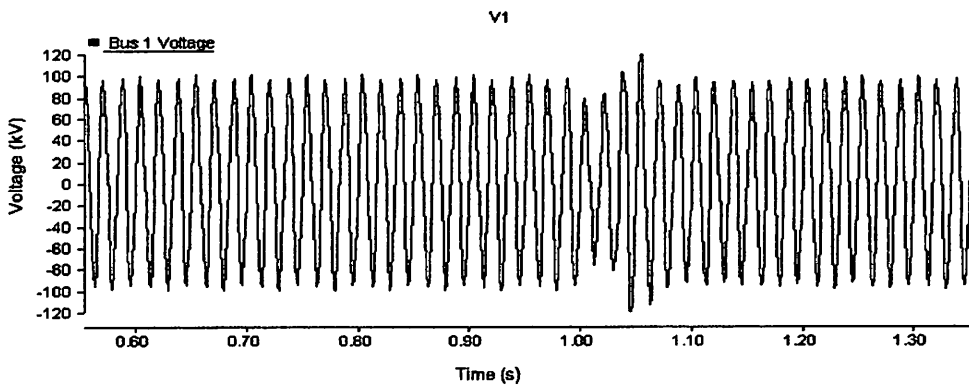


Figure 23. Bus 1 voltage waveform when transient fault is applied and UPFC is connected.

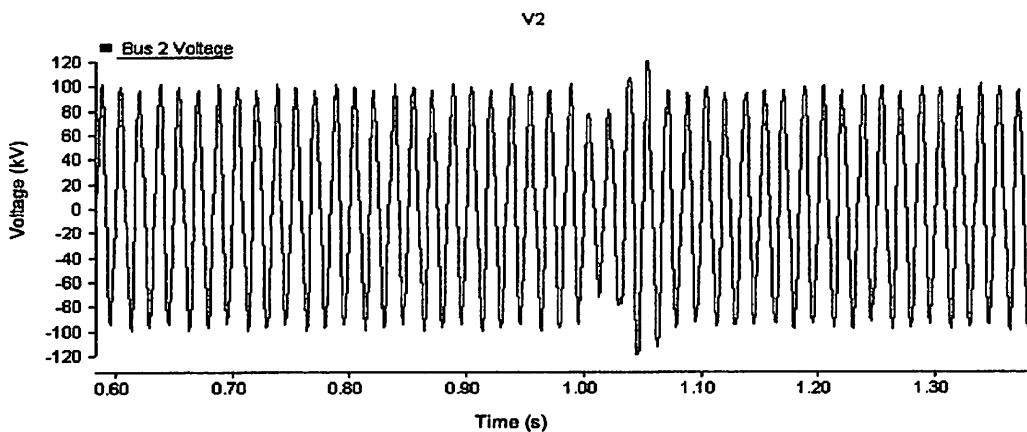


Figure 24. Bus 2 voltage waveform when transient fault is applied and UPFC is connected.

power to regulate the bus voltages. Also, during this operation the collapse of the DC capacitor voltage is avoided. This is done through simultaneous control of the

shunt and series converter controllers, through which proper real and reactive power coordination in the UPFC is maintained.

Table 4. Voltages during transient fault and UPFC connected condition.

Without fault			With fault (During 1 to 1.035 s)		
MS voltage (pu)	Bus 1 voltage (kV)	Bus 2 Voltage (kV)	RMS voltage (pu)	Bus 1 voltage (kV)	Bus 2 voltage (kV)
0.991	113.9	111.05	0.97	110	107.7

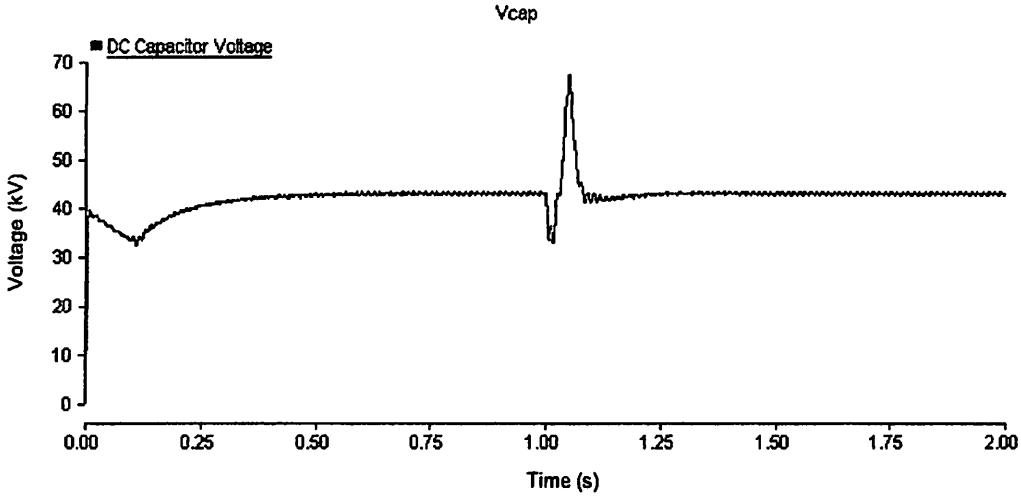


Figure 25. DC capacitor voltage waveform when transient fault is applied and UPFC is connected.

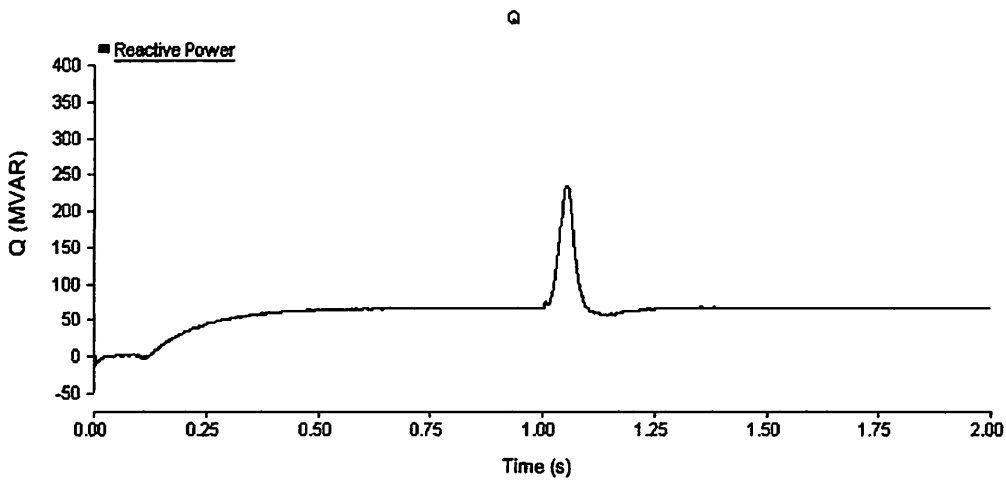


Figure 26. Reactive power waveform when transient fault is applied and UPFC connected condition.

REFERENCES

Agelidis VG, Lara OA, Miller THE (2002). Power Electronic Control in Electrical Systems. New. Pow. Eng. Series. First Edition.
 Gyugyi L (1992). Unified Power Flow Control Concept for FACTS. IEE
 Con. Proc. Gen. Trans. Distr. 139(4):323-331.
 Igarani NG, Gyugyi L (2000). Understanding FACTS: Concept and Technology of Flexible AC Transmission System. IEEE Press.

Introduction to PSCAD / EMTDC (2000). Manitoba HVDC Research Centre.
 Juan D, José R, Ricardo D (2005). Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review. Proc. IEEE. 93(12):2144-2164.
 Kannan S, Jayaram S, Salama M (2004). Real and reactive power coordination for a unified power flow controller. IEEE Trans. Pow. Syst. 19(3):1454-1461.

shna S, Padiyar KR (2005). Discrete control of unified power flow controller for stability improvement. *Electric Pow. Sys. Res.* 75(2):178-89.

han Mathur TR, Rajiv KV (2002). Thyristor based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems. First Edition, a John Wiley & Sons, Inc. Publication.

diyar KR, Kulkurni AM (1998). Control design and simulation of a unified power flow controller. *IEEE Trans. Pow. Deliv.* 13(4):1348-1354.

Sharma NK, Jagtap PP (2010). Modelling and application of Unified Power Flow Controller (UPFC). *IEEE Third Int. Con. Emerging Trends Eng. Technol.* 93(12):2144-2164.