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

# ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* (STATCOM) BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROLLER* (FLC) PADA SALURAN TRANSMISI 150KV UPT.MALANG

## SKRIPSI

***Disusun Oleh :***

**MAKIK MINDIANTONO**
**NIM : 05.12.023**

**Agustus 2010**

# LEMBAR PERSETUJUAN

## ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* (*STATCOM*) BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROLLER* (*FLC*) PADA SALURAN TRANSMISI 150KV UPT.MALANG

MILIK
PERPUSTAKAAN
ITN MALANG

## SKRIPSI

*Disusun dan Diajukan Untuk*

*Memenuhi Persyaratan Guna Memperoleh Gelar Sarjana Teknik*

*Pada Bidang Studi Teknik Energi Listrik Strata Satu (S-1)*

**Disusun Oleh :**

**MAKIK MINDIANTONO**

**05.12.023**

**Diperiksa dan disetujui,**

**Dosen Pembimbing I**

**Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT**

**NIP.Y. 1018800189**

**Diperiksa dan disetujui,**

**Dosen Pembimbing II**

**Ir. H. Taufik Hidayat, MT**

**NIP.Y. 1018700151**

**Mengetahui,**

**Ketua Jurusan Teknik Elektro**

**Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT**

**NIP.Y. 1018800189**

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

# ABSTRAKSI

## ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* (STATCOM) BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROLLER* (FLC) PADA SALURAN TRANSMISI 150 Kv UPT. MALANG

(Makik Mindiantono, Nim 05.12.023, Teknik Elektro/Teknik Energi Listrik S-1)
(Dosen Pembimbing : Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT – Ir.H.Taufik Hidayat, MT)

Saat ini, pada sistem jaringan transmisi 150kV UPT Malang, didalam memenuhi kebutuhan daya reaktif untuk memperbaiki profil tegangan, masih menggunakan *Static Capasitor* dimana mempunyai beberapa kelemahan yakni hanya berfungsi pada waktu beban puncak dan tidak optimal dalam memenuhi kebutuhan daya reaktif bilamana dalam sistem terjadi perubahan beban yang signifikan. Untuk itu sebagai studi aplikasi digunakan upaya untuk mengatur daya reaktif menggunakan *STATCOM* berbasiskan *Fuzzy Logic Control* (FLC) menggantikan *Static Capasitor* yang terpasang guna memperbaiki profil tegangan dengan respon sistem yang lebih baik antara ambang batas maksimum dan ambang batas minimum.

Pada skripsi ini *Fuzzy Logic Control* (*FLC*) dirancang dan digunakan untuk menggantikan konventional *Proporsional-Integeral* (*PI*) kontrol pada regulator tegangan *STATCOM* sebagai kontrol aliran daya reaktif. Hasil simulasi dan analisa pada saluran transmisi 150kV UPT.Malang dilakukan dengan menggunakan *software Simulink MATLAB versi 7.0.4*

Hasil simulasi dan analisis menunjukkan bahwa terjadi perbaikan profil tegangan dan respon sistem pada saluran transmisi 150kV UPT Malang yakni, yang semula profil tegangan tanpa kompensator sebesar 0.92177 pu (131.16kV), dengan kapasitor sebesar 0.93403 pu(134.2kV), dengan *STATCOM* (*PI*) sebesar 0.98915pu (148,4kV), kemudian semakin meningkat menjadi 0.99143 pu (148,7kV) dengan *STATCOM* (*FLC*), yang diikuti prosentase kenaikan tegangan sampai dengan 7.64%. Sama halnya dengan kondisi respon sistem yang diperbaiki oleh sistem kontrolnya yakni dengan *STATCOM* (*FLC*), pencapaian harga puncak (*overshoot*) lebih minimum mencapai 1.02pu yang semula dengan *STATCOM* (*PI Controller*) terjadi *overshoot* sampai mencapai harga puncak 1.1 pu kemudian dengan menggunakan *STATCOM* (*FLC*) kecepatan menuju ke kondisi mantap mencapai 0.21 detik yang semula dengan *STATCOM* (*PI*), kecepatan menuju ke kondisi mantap lebih lama mencapai 0.3 detik serta masih terdapat osilasi pada sistem bila dibandingkan dengan *STATCOM* (*FLC*).

**Kata Kunci**: Kompensasi Daya Reaktif, *Static Synchronous Compensator* (*STATCOM*), *Fuzzy Logic Controller* (*FLC*)

# ABSTRAKSI

(Maskit Mindianiono, Nim 05.12.023, Teknik Elektro, Teknik Energi Listrik S-1)
(Dosen Pembimbing : Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT. / Ir. H. Taufik Hidayat, MT)

Saat ini, pada sistem pembangkit transmisi 150kV UPT Malang, didalam mengontrol kebutuhan daya reaktif untuk mempertahankan profil tegangan, masih menggunakan Automatic Voltage dimana mengharuskan beberapa kelonialan yakni harus bertemu pada waktu beban puncak dan tidak optimal dalam mengontrol kebutuhan daya reaktif bilamana dalam sistem terjadi perubahan beban yang signifikan. Untuk itu sebagai studi aplikasi digunakan upaya untuk mengatur daya reaktif menggunakan SVC (Static Var Compensator) dengan Logic Control (PI C) menggantikan Automatic Voltage yang terpasang guna mempertahankan profil tegangan dengan respon sistem yang lebih baik antara ambang batas maksimum dan ambang batas minimum.

Pada skripsi ini Static Logic Control (SVC) berperang dan digunakan untuk menggantikan konvensional Automatic Voltage Control (AVC) kontrol pada regulator tegangan SVC (SVC) sebagai kontrol aliran daya reaktif. Hasil simulasi dan analisa pada saluran transmisi 150kV UPT Malang dihidupkan dengan menggunakan software Simulink MATLAB versi 7.0.4.

Hasil simulasi dan analisa menunjukkan bahwa tegangan profil pembangkit dan respon sistem pada saluran transmisi 150kV UPT Malang sebagai yang semula profil tegangan rata-rata komponennya adalah 0.92177 pu (138,16 kV), daerah kapasitor sebesar 0.93109 pu(139,2kV), dengan SVC (AVC) sebesar 0.98015pu (118,41kV). kemudian semakin meningkat menjadi 0.99163 pu (118,7kV) dengan SVC (AVC). yang difungsikan perancang kemudian tegangan sampai dengan 1.0 s/d 1.05pu. Sama halnya dengan kondisi respon sistem yang diperbaiki oleh sistem kontroler yakni dengan SVC (AVC). pencapaian harga pada tegangan 1.0pu (150kV) lebih minimum mencapai 1.02pu yang semula dengan SVC (AVC) tegangan mencapai 1.04pu (156kV). Kecepatan mencapai harga puncak 1 pu kemudian dengan menggunakan SVC (AVC) kecepatan mencapai 0.21 detik yang semula dengan SVC (AVC) kecepatan mencapai 0.2 detik sesuai dengan standar kondisi idaman lebih lama mencapai 0.3 detik sesuai standar tersebut sudah lebih baik dibandingkan dengan SVC (AVC).

Kata Kunci: Kompensasi Daya Reaktif, Static Synchronous Compensator (SVC), Automatic Voltage Control (AVC)

# KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamiin, segala puji hanya bagi Allah SWT karena atas anugerah, rahmat dan hidayahnya-Nya, saya selaku penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul :

**ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* (*STATCOM*) BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROLLER* (*FLC*) PADA SALURAN TRANSMISI 150KV UPT MALANG**

Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 di Jurusan Teknik Elektro ITN Malang dan juga diharapkan dapat menambah wawasan dalam mengatasi permasalahan kontrol Tegangan pada Saluran Transmisi.

Dengan selesainya penyusunan laporan Skripsi ini, saya mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

- Bapak Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT dan Bapak Ir.H.Taufik Hidayat, MT selaku dosen pembimbing atas perhatian dan bimbingan yang telah diberikan. (Bapak adalah Inspirasi Saya).
- Para guru dan dosen terutama Bapak Awan Krismanto ST,MT selaku "pembimbing ke 3" skripsi yang telah datang jauh-jauh dari Jepang untuk membantu saya serta keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITN Malang
- Orang tua tercinta (Hermin P & Hadi P),adikku tersayang Desi P, teman-teman kos Gembrung dan seluruh asisten lab.TDDE terutama Kepala Lab.TDDE (Ibu Irrine Budi S, ST,MT), serta rekan-rekan seangkatan senasib seperjuangan:"Kalian adalah Motivator dan*bikin* hidup lebih hidup

- Seluruh pihak yang telah membantu saya dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan Skripsi yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu.

Tentunya masih banyak kekurangan pada Skripsi ini, karena itu saya mengharapkan masukan yang membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik

Demikianlah kata pengantar dari saya, semoga Skripsi ini dapat memberi suatu kontribusi positif bagi kita semua.

Malang, Agustus 2010

Penulis

# DAFTAR ISI

**LEMBAR PERSETUJUAN** ..... i
**ABSTRAKSI** ..... ii
**KATA PENGANTAR** ..... iii
**DAFTAR ISI** ..... v
**DAFTAR GAMBAR** ..... ix
**DAFTAR TABEL** ..... xiii

**BAB I PENDAHULUAN** ..... 1

1.1. Latar Belakang ..... 1

1.2. Rumusan Masalah ..... 2

1.3. Tujuan Penelitian ..... 3

1.4. Batasan Masalah ..... 3

1.5. Metode Penelitian ..... 4

1.6. Sistematika Penulisan ..... 5

1.7. Relevansi ..... 6

**BAB II LANDASAN TEORI** ..... 8

2.1. Saluran Transmisi Tenaga Listrik (STTL) ..... 8

2.2. Konsep Daya Arus Bolak-Balik ..... 9

2.3. Daya reaktif dan Faktor daya ..... 11

2.4. Jatuh Tegangan (*Voltage Drop*) ..... 12

2.5 Pengaturan Tegangan ..... 13

2.6. Perbaikan Faktor Daya dan Kenaikan Kapasitas ..... 13

2.7. Prinsip Dasar dari Kompensasi Daya Dalam Sistem Transmisi ..... 15

2.8. Kompensasi Reaktif Saluran Transmisi ..... 18

2.8.1. Kompensasi Seri ..... 18

2.8.2. Kompensasi Paralel ..... 19

2.9. *Flexible AC Transmission System* ( FACTS ) ..... 22

2.10. Kompensasi Reaktif Shunt Terkontrol ..... 23

2.10.1. *Static Var Compensator* (SVC) ..... 23

2.10.2 *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) ..... 24

2.11. Inverter ..... 27

2.11.1. Inverter 3 fasa ..... 28

2.11.2. Kontrol Tegangan dari Inverter ..... 29

2.12 Prinsip-Prinsip Pengendalian Proses ..... 31

2.12.1. Prinsip Kerja Pengendali ..... 31

2.12.2. Pengendali Proportional ( *Proportional Controller* ) ..... 32

2.12.3 Pengendali Integral (*Integral Controller* ) ..... 34

2.12.4 Pengendali Proportional – Integral (*PI Controller*) ..... 36

2.13. Teori Fuzzy ..... 37

2.13.1. Penulisan Himpunan Pada Fuzzy ..... 38

2.13.2 Operasi Pada Himpunan Fuzzy ..... 39

2.13.3 Fungsi Keanggotaan ..... 40

2.13.4 Desain Kontroller Secara Verbal ..... 42

2.13.5 Sistem Inferensi Fuzzy Metode Mamdani ..... 45

2.13.6. Struktur Kontrol Logika Fuzzy ..... 49

**BAB III PRINSIP KERJA DAN PEMODELAN *STATCOM* DENGAN *FUZZY LOGIC CONTROLLER* (FLC) ..... 50**

3.1. Pemodelan Sistem ..... 50

3.2. Prinsip Kerja *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) ..... 51

3.3. Pemodelan STATCOM ..... 55

3.3.1. *Voltage Source Inverter* (VSI) ..... 55

3.3.2. Konfigurasi Rangkaian Kontrol STATCOM ..... 57

3.3.3 Regulator Tegangan dan Arus ..... 59

3.3.3.1. *AC Voltage Regulator* ..... 62

3.3.3.2. *Current Regulator* ..... 62

3.4. Pemodelan *Fuzzy Logic Controller* pada STATCOM ..... 63

3.4.1. Prosedur Pengontrolan dengan *Fuzzy Logic Controller* ..... 64

3.4.1.1. Menentukan Kuantitasi Variabel Masukan dan Keluaran ..... 65

3.4.1.2. Menentukan *Rule Base* ..... 66

3.4.1.3. Menentukan *Membership Function* ..... 67

3.4.2. Proses *Fuzzyfikasi* ..... 70

3.4.3. Proses *Inference* ..... 70

3.4.4 Proses *Defuzzyfikasi* ..... 71

3.5 *Flowchart* Simulasi Sistem ..... 74

3.6 *Flowchart Fuzzy Logic Controller* untuk Rangkaian STATCOM ..... 75

**BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS ..... 76**

4.1. Nilai-nilai Parameter Yang Digunakan Untuk Simulasi ..... 76

4.1.1. Data Bus Saluran Transmisi 150kV UPT.Malang ..... 76

4.1.2. Data Penyaluran dan Pembebanan Saluran Transmisi 150 kV UPT.Malang ..... 77

4.1.2.1. Data Impedansi Penghantar ..... 78

4.1.2.2 Data Pembebanan ..... 80
4.1.3 Data Kapasitor Statis Terpasang ..... 81
4.2. Simulai Sistem ..... 82
4.2.1. Simulasi Sistem Tanpa Beban ..... 83
4.2.2. Simulasi Sistem Dengan Pembebanan dan Tanpa Kompensator ..... 84
4.2.3. Simulasi Sistem Menggunakan Kompensasi Kapasitor ..... 87
4.2.4 Simulasi Sistem Dengan STATCOM (*PI Controller*) ..... 90
4.2.5. Simulasi Sistem Dengan STATCOM (FLC) ..... 94
4.3 Analisa Hasil Simulasi ..... 98
4.3.1. Analisa Hasil Simulasi Pada Kondisi Sistem dengan Pembebanan dan Tanpa Kompensator ..... 98
4.3.2. Analisa Hasil Simulasi Pada Kondisi Sistem dengan Kompensasi Kapasitor ..... 101
4.3.3. Analisa Hasil Simulasi Pada Kondisi Sistem dengan Kompensasi STATCOM (*PI Controller*) ..... 105
4.3.4. Analisa Hasil Simulasi Pada Kondisi Sistem dengan Kompensasi STATCOM (FLC) ..... 109
**BAB V PENUTUP ..... 113**
5.1. Kesimpulan ..... 113
5.2. Saran ..... 114

**DAFTAR PUSTAKA** ..... 115
**DAFTAR RIWAYAT HIDUP** ..... 116
**LAMPIRAN**

# DAFTAR GAMBAR


Gambar 2.1 Rangkaian Setara Saluran Transmisi Pendek ..... 8

Gambar 2.2 Segitiga Daya ..... 11

Gambar 2.3 Representasi *Voltage Drop* Pada Saluran Transmisi Pendek ..... 12

Gambar 2.4 Perbaikan Faktor Daya ..... 14

Gambar 2.5 Saluran Transmisi Sederhana dan Diagram Fasor ..... 16

Gambar 2.6 Kurva Daya Aktif dan Daya Reaktif sebagai fungsi sudut δ ..... 17

Gambar 2.7 Rangkaian ekuivalen dari saluran transmisi pendek dan Diagram fasor setelah dikompensasi seri ..... 18

Gambar 2.8 Rangkaian ekuivalen dari saluran transmisi pendek dan Diagram fasor sebelum dan setelah dikompensasi Paralel ..... 20

Gambar 2.9 Diagram Skematic SVC : TCR dan TSC ..... 24

Gambar 2.10 Diagram Skematik dari VSI STATCOM ..... 25

Gambar 2.11 Inverter Tiga Fasa Tiga Lengan ..... 29

Gambar 2.12 *Single Pulse Width Modulation* (*Single – PWM*) ..... 30

Gambar 2.13 Kontroller dan Diagram Kotaknya ..... 32

Gambar 2.14 Diagram Blok Kontroller Proportional ..... 33

Gambar 2.15 Respon Sebuah Pengendali Proportional ..... 34

Gambar 2.16 Blok Diagram Kontroller Integral ..... 36

Gambar 2.17 Diagram Kotak Pengendali PI ..... 36

Gambar 2.18 Hubungan Input-Output Pengendali PI dalam Fungsi Waktu ..... 37

Gambar 2.19 Fungsi S ..... 41

Gambar 2.20 Fungsi π ..... 41

Gambar 2.21 Fungsi segitiga ..... 42

Gambar 2.22 Kurva Output Plant terhadap Input Unit Step ..... 42

Gambar 2.23 Struktur Dasar *Fuzzy Logic Controller* ..... 49

Gambar 3.1 Pemodelan Sistem Saluran Transmisi dan STATCOM Secara Umum Pada *Simulink MATLAB* ..... 50

Gambar 3.2 Diagram Dasar STATCOM ..... 52

Gambar 3.3 Mode Operasi dari STATCOM ..... 53

Gambar 3.4 Prinsip Dasar STATCOM ..... 54

Gambar 3.5 Pemodelan STATCOM Pada *Simulink MATLAB* ..... 55

Gambar 3.6 Rangkaian *Voltage Source Inverter* 3 fasa ..... 56

Gambar 3.7 Pemodelan Rangkaian *Voltage Source Inverter* 3 fasa Pada *Simulink MATLAB* ..... 56

Gambar 3.8 Skema Rangkaian Kontrol STATCOM ..... 57

Gambar 3.9 Pemodelan Rangkaian Kontrol STATCOM Pada *Simulink MATLAB* ..... 59

Gambar 3.10 Rangkaian Konversi 3 fasa Vabc – Vdq0 ..... 61

Gambar 3.11 PI Kontrol untuk Regulator Tegangan AC ..... 62

Gambar 3.12 PI Kontrol untuk Regulator Arus AC ..... 62

Gambar 3.13 Kontrol *Fuzzy Logic* untuk Regulator Tegangan AC ..... 63

Gambar 3.14 Pemodelan *Fuzzy Logic Controller* Tiap fasa ..... 65

Gambar 3.15 Tampilan *Window Fuzzy Inference System* ..... 68

Gambar 3.16 *Membership function Error* ..... 68

Gambar 3.17 *Membership function Delta Error* ..... 69

Gambar 3.18 *Membership function* Signal Kontrol ..... 70

Gambar 3.19 *Flowchart* Kerja dari Simulasi Sistem Dengan *STATCOM* ..... 74

Gambar 3.12 *Flowchart* dari Prosedur Kerja Pemasangan Sistem *Fuzzy Logic Control* (FLC) pada Rangkaian Kontrol STATCOM..... 75

Gambar 4.1 *Single-Line Diagram* Saluran Transmisi 150kV UPT Malang.... 77

Gambar 4.2 Pemodelan Sistem Saluran Transmisi 150kV UPT.Malang Tanpa Beban pada Lembar kerja *Simulink Matlab* ..... 83

Gambar 4.3 Respon Tegangan Rms (pu) Sistem Tanpa Beban..... 84

Gambar 4.4 Pemodelan Sistem Saluran Transmisi 150kV UPT.Malang dengan Pembebanan dan Tanpa Kompensator Pada lembar kerja *Simulink Matlab* ..... 85

Gambar 4.5 Respon Tegangan Rms (Pu) Sebelum dikompensasi..... 86

Gambar 4.6 Gelombang Tegangan Sebelum Dikompensasi..... 87

Gambar 4.7 Pemodelan Sistem Saluran Transmisi 150kV UPT. Malang dengan Kapasitor Static pada *Simulink Matlab*..... 88

Gambar 4.8 Respon Tegangan Rms Bus (Pu) Dengan Kapasitor..... 89

Gambar 4.9 Gelombang Tegangan Dengan Kapasitor..... 90

Gambar 4.10 Pemodelan Sistem Saluran Transmisi 150kV UPT.Malang dengan STATCOM pada *Simulink Matlab* ..... 91

Gambar 4.11 *Setting* Konstanta Parameter Kontrol STATCOM pada Lembar Kerja *Simulink* Matlab..... 92

Gambar 4.12 Respon Tegangan Rms Bus (Pu) saat dikompensasi dengan Pemasangangan STATCOM (*PI Controller*)..... 93

Gambar 4.13 Gelombang Tegangan Bus dengan STATCOM (*PI Controller*). 94

Gambar 4.14 Tampilan Perubahan Sistem Kontrol PI ke FLC pada Lembar Kerja *Simulink Matlab* ..... 96

Gambar 4.15 Respon Tegangan Rms Bus (Pu) saat dikompensasi dengan Pemasangan STATCOM (*Fuzzy Logic Controller*)..... 97

Gambar 4.16 Gelombang Tegangan Bus Dengan STATCOM (FLC)..... 97

Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Persentase Kenaikan Tegangan antara Kapasitor, Dengan STATCOM (PI Controller), maupun Dengan STATCOM (FLC) .....112

# DAFTAR TABEL


Tabel 2.1 Verbalisasi Basis Aturan Pada Kontroller Logika Fuzzy Static..... 44

Tabel 2.2 Basis Aturan dari MacVicar-Whelan..... 45

Tabel 3.1 *Rule Base* untuk Signal Kontrol dengan Dua Masukan Error dan Delta Error ..... 67

Tabel 4.1 Data Saluran Saluran Transmisi 150 kV UPT.Malang..... 77

Tabel 4.2 Data Impedansi Penghantar Pada Saluran Transmisi 150kV UPT.Malang ..... 78

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Impedansi Penghantar (Per-Unit) Saluran Transmisi 150kV UPT.Malang..... 80

Tabel 4.4 Data Pembebanan Saluran Transmisi 150kV UPT.Malang..... 81

Tabel 4.5 Data Kapasitor Static GI.KebonAgung UPT.Malang..... 81

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Saat Terjadi *Drop Voltage* Akibar Penambahan Beban Pada t=0.45 detik Tanpa Kompensasi..... 99

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Nilai Persentase Drop Tegangan Tanpa Kompesator Pada Saluran Transmisi 150kV UPT,Malang.....100

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Saat Terjadi *Drop Voltage* Setelah diKompensasi Kapasitor Akibat Penambahan Beban Pada t=0.45 detik.....103

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Nilai Persentase Kenaikan Tegangan (%*Voltage Rise*) Dengan Kapasitor pada Saluran Transmisi .....104

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Saat Terjadi *Drop Voltage* Setelah diKompensasi STATCOM (*PI Controller*) Akibat Penambahan Beban Pada t=0.45 detik ..... 106

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Nilai Persentase Kenaikan Tegangan (*%Voltage Rise*) Dengan STATCOM (*PI Controller*) pada Saluran Transmisi 150kV UPT.Malang ..... 107

Tabel 4.12 Perbandingan Harga Puncak, Waktu Mantap dan Osilasi untuk masing-masing Kontroller ..... 110

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Saat Terjadi *Drop Voltage* Setelah diKompensasi STATCOM (*FLC*) Akibat Penambahan Beban Pada t=0.45 detik ..... 110

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kontrol daya reaktif telah menjadi isu penting dalam proses penyaluran daya listrik karena dalam sistem jaringan transmisi dan distribusi beban banyak mengkonsumsi daya reaktif (motor induksi). Untuk sistem konventional menggunakan *static capasitor* (*capasitor bank*) berfungsi memberikan daya reaktif ke sistem. Kompensasi daya reaktif yang diberikan oleh *static capasitor* ini nantinya akan mengakibatkan drop tegangan saluran transmisi menjadi turun dan mampu memperbaiki faktor daya pada sistem jaringan transmisi. Kontrol daya reaktif menggunakan sistem traditional seperti kapasitor dan induktor yang dihubungkan ke bus dilakukan melalui *switch* mekanik mempunyai kelemahan yakni prosesnya lambat dan kurang teliti sehingga apabila terjadi perubahan beban pada sistem tranmisi maka kompensasi dengan kapasitor tidak mampu mengikuti perubahan yang terjadi.

Untuk saat ini, pada sistem transmisi 150kV UPT.Malang khususnya pada wilayah G.I Kebon Agung, ternyata dalam memenuhi kebutuhan daya reaktif masih menggunakan *static capasitor* sebagai kompensasi kapasitif yang berfungsi hanya pada waktu beban puncak, sedangkan untuk memperoleh profil tegangan yang optimal, kebutuhan injeksi kapasitif pada sistem transmisi 150kV Malang tidak hanya pada waktu beban puncak. Dalam hal ini penerapan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) yang merupakan peralatan kompensasi daya reaktif dari *Flexible AC Transmission System* (FACTS) sebagai pengganti

*static capasitor* yang terpasang, dipilih dalam studi ini karena mempunyai konfigurasi yang sama yakni terhubung secara paralel dengan sistem transmisi AC.

Kontroler konvensional seperti PI (*Proportional-Integral*) didesain untuk mengontrol STATCOM. Akan tetapi, faktanya didalam suatu sistem jaringan tenaga listrik, kondisi pengoperasian sistem selalu berubah berturut-turut seperti saluran dan beban yang diswitch on/off kan. Oleh karena itu suatu pendekatan kontrol konvensional yang berdasar pada model jaringan dari sistem, tidak dapat berfungsi secara optimal jika perubahan parameter pada sistem tenaga terjadi dengan cepat[2]. Hal ini mendorong untuk mengangkat permasalahan dengan menggunakan suatu metode pengontrolan berbasis kontroler cerdas dengan menggantikan kontroller konventional yang ada yakni dengan *Fuzzy logic control* ( FLC ) sebagai elemen kontrol/kendali dari STATCOM.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, Penerapan STATCOM sebagai pengganti *static capasitor* berbasis *Fuzzy logic control* (FLC), diharapkan menjadi solusi kebutuhan daya reaktif pada sistem, maka rumusan masalah yang akan dibahas dalam skripsi ini adalah "Bagaimana STATCOM berbasiskan kontrol logika fuzzy, mampu untuk menaikkan tegangan bus melalui kompensasi daya reaktif yang diberikan sehingga nantinya profil tegangan serta respon sistem dari saluran transmisi 150kV menjadi lebih baik.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penulisan skripsi ini adalah :

1. Mengetahui kondisi profil tegangan pada saluran transmisi 150kV UPT Malang sebelum dan sesudah dipasang kompensator dengan sistem kontrol yang berbeda
2. Mengetahui hasil respon sistem dari unjuk kerja sistem kontrol dengan menggunakan STATCOM berbasis FLC sebagai pengganti dari sistem konventional PI kontrol.

## 1.4 Batasan Masalah

Agar permasalahan mengarah sesuai dengan tujuan, maka pembahasan skripsi ini dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut :

1. Jaringan yang dianalisa adalah pada saluran transmisi 150 kV UPT.Malang pada kondisi bus terburuk
2. Studi dilakukan pada saat beban puncak
3. Mekanisme kerja dari *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) didalam mengatasi permasalahan drop tegangan pada saluran transmisi 150 kV UPT Malang serta unjuk kerja sistem kontrol yang berbasiskan logika fuzzy (FLC) dari STATCOM
4. FLC sebagai pengganti konventional PI pada sistem kontrol STATCOM digunakan hanya untuk menaikkan tegangan akibat penambahan beban sekaligus meredam adanya *overshoot* serta osilasi yang ditimbulkan

5. Perhitungan dan simulasi dilakukan dengan menggunakan *Software MATLAB /SIMULINK*
6. Tidak membahas masalah harmonisa.
7. Tidak membahas masalah proteksi.

## 1.4 Metodologi Penelitian

Metodologi untuk merealisasikan tujuan penyusunan Skripsi ini, penulis melakukan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

   Yaitu kajian pustaka berupa pengumpulan dan pembahasan referensi yang berkaitan dengan pokok pembahasan masalah ini, sehingga membantu dalam memahami dasar-dasar mengenai komponen STATCOM beserta kontroler cerdas berbasis logika fuzzy yang digunakan dalam sistem transmisi tenaga listrik dan membantu dalam memahami prinsip dan karakteristik setiap parameter elektronika daya yang digunakan.
2. Studi lapangan

   Melakukan *survey* pengumpulan data saluran transmisi wilayah UPT.Malang, juga besar dan jumlah *static capasitor* yang terpasang
3. Mendesain STATCOM yang akan disimulasikan untuk diimplementasikan pada saluran transmisi tenaga listrik yang digunakan dalam skripsi ini

4. Melakukan Simulasi pada sistem yang telah ditentukan sebelum dan setelah dipasang STATCOM
5. Membandingkan profil tegangan sistem sebelum dan setelah dipasang STATCOM baik menggunakan kontrol *Proporsional-Integral* (PI) maupun *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada STATCOM
6. Membuat analisa mengenai performansi saluran transmisi berdasarkan teori dan simulasi yang telah ditentukan dalam menggunakan perangkat kompensator daya yakni *static capasitor* yang telah terpasang maupun STATCOM sebagai kajian akademik serta sistem kontrolnya berbasiskan *Fuzzy logic Controller* (FLC) sebagai elemen kontrol pengganti dari konventional PI kontroller dalam perbaikan profil tegangan serta respon sistem pada saluran transmisi 150kV UPT.Malang
7. Mengambil kesimpulan dari hasil simulasi dan analisa.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Pembahasan dalam skripsi ini akan diuraikan dalam 5 bab, yang penjelasannya adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi penguraian tentang Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan Penelitian, Batasan Masalah, Metodologi Penelitian dan Sistematika pembahasan yang akan dipaparkan dalam skripsi ini.

BAB II : LANDASAN TEORI

Berisi tentang penjelasan teori singkat sistem transmisi tenaga listrik secara umum, teori konsep daya arus bolak-balik, teori sistem hantaran daya listrik, kompensasi dengan kapasitor shunt, tentang *Static Synchronous Compensator* (STATCOM), sekilas tentang teori Fuzzy dan PI

BAB III : PRINSIP KERJA DAN PEMODELAN STATCOM DENGAN *FUZZY LOGIC CONTROL* ( FLC )

Berisi tentang penguraian prinsip kerja dan pemodelan STATCOM dengan FLC.

BAB IV : ANALISA DAN SIMULASI HASIL

Menguraikan tentang hasil simulasi dan menganalisa hasil simulasi

BAB V : KESIMPULAN

Merupakan bab terakhir yang memuat inti sari dari hasil pembahasan analisa dari hasil simulasi program *MATLAB SIMULINK* yang berisikan kesimpulan

## 1.7 Relevansi

Dengan menggunakan teknologi baru untuk mengatasi setiap permasalahan kondisi kualitas tegangan yang buruk maupun kebutuhan akan daya reaktif, baik pada saluran transmisi maupun distribusi, dalam hal ini *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) sebagai alternatif pengganti kompensator konventional yang ada seperti kapasitor diharapkan mampu

memberikan kontinuitas maupun keandalan serta kepuasan bagi konsumen terhadap penyaluran tenaga listrik. Hal ini mengkin dengan adanya keunggulan yang ditawarkan oleh STATCOM. Perkembangan penduduk yang saat ini terus meningkat yang diikuti pula dengan perkembangan bebannya mengharuskan suatu kompensator mampu mengatasi setiap permasalahan yang ada dengan respon sistem yang cepat. *Fuzzy logic control* yang merupakan terobosan baru dari perkembangan teknologi ilmu kecerdasan buatan (*Artificial Intelegent*) didesain sebagai kontroller dari STATCOM untuk mengatasi setiap permasalahan kondisi tegangan yang diikuti dengan perubahan beban yang cepat. Meskipun saat ini penerapan kontroller cerdas seperti FLC masih dalam batas skala laboratorium dan masih dalam tahap simulasi pengembangan, namun dengan semakin majunya ilmu pengetahuan dan teknologi dari waktu ke waktu diharapkan nantinya dapat dijadikan pembelajaran ataupun penelitian yang lebih lanjut khususnya pada saluran transmisi 150 kV UPT. Malang untuk dapat mengoptimalkan kualitas tenaga listriknya dengan menjaga tegangan pada kondisi normal dan dalam respon sistem yang lebih baik agar kebutuhan konsumen terhadap profil tegangan yang optimal dapat tercapai.

# BAB II

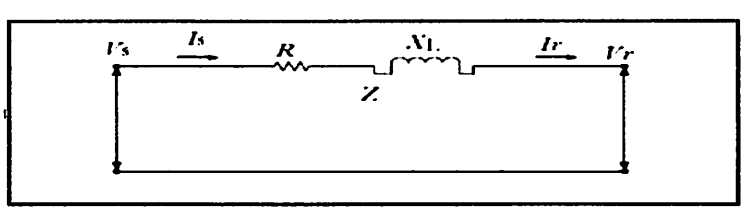
## LANDASAN TEORI

### 2.1 Saluran Transmisi Tenaga Listrik ( STTL )[7].

Saluran transmisi direpresentasikan sesuai dengan kelas transmisi. Representasi saluran transmisi berdasarkan jarak terbagi atas 3 kelas yaitu :

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

Sebenarnya klasifikasi tersebut sangat kabur dan sangat relatif. Klasifikasi STTL harus didasarkan pula atas besar-kecilnya kapasitansi antar fasa atau kapasitansi fasa ke tanah. Dalam hal ini pembagian kelas saluran transmisi berhubungan dengan besarnya kapasitansi saluran ke tanah. Kapasitansi ke tanah merupakan fungsi jarak dari saluran transmisi. Untuk saluran transmisi pendek maka besarnya kapasitansi ke tanah dapat diabaikan. Untuk saluran menengah besarnya harga kapasitansi tidak diabaikan, namun belum terlalu besar sehingga kapasitansi ke tanah dapat dianggap terpusat (*lumped capacitance*). Untuk transmisi panjang maka besarnya harga kapasitansi tidak dapat dianggap terpusat melainkan terbagi merata disepanjang saluran. Pada saluran transmisi pendek kapasitansi saluran diabaikan sehingga rangkaian pengganti saluran hanya terdiri dari R dan XL.




Gambar 2.1. Rangkaian Setara Saluran Transmisi Pendek

Dimana: Vs = tegangan pada ujung kirim atau ujung generator.

Is = arus pada ujung kirim atau ujung generator

Vr = tegangan pada ujung terima atau ujung beban

Ir = arus pada ujung terima atau ujung beban

Z = impedansi saluran

Hubungan antara tegangan dan arus sebagai berikut:

$V_s = V_r + ZI_r$ . ..... (2.1)

$I_r = I_s$ .. ..... (2.2)

Ada juga klasifikasi sistem transmisi berdasarkan tegangan kerja. Makin tinggi tegangan kerja, kemungkinan timbulnya korona juga makin besar. Korona ini akan memperbesar kapasitansi sehingga akan memperbesar arus bocornya pula. Pada transmisi tegangan rendah berkapasitas arus tinggi, akan terjadi *drop* tegangan di jaringan transmisi yang disebabkan oleh rugi-rugi jaringan transmisi. Namun pada transmisi tegangan tinggi dan ekstra tinggi (kapasitas arus rendah) kondisi yang berbeda terjadi. Pada transmisi tegangan tinggi, drop tegangan akan sedikit terkompensasi karena pembangkitan daya reaktif yang disebabkan efek kapasitansi kabel transmisi. Tetapi pada transmisi tegangan ekstra tinggi, efek kapasitansi kabel transmisi lebih dominan terhadap rugi-rugi kabel transmisi yang menyebabkan tegangan akan selalu naik pada sisi penerima.

## 2.2 Konsep Daya Arus Bolak-Balik[10]

Pada daya listrik arus bolak-balik merupakan hasil perkalian antara tegangan sesaat dengan arus sesaat. Daya ini merupakan daya sesaat yang

besarnya akan berubah sesuai dengan perubahan nilai tegangan dan arus. Secara umum daya sesaat dapat ditulis :

$$P(t) = V(t) \times I(t) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.3)$$

Dengan :

P(t) = Daya Sesaat (Watt)

V(t) = Tegangan Sesaat ( Volt )

I (t) = Arus Sesaat ( Ampere )

Pada listrik arus bolak-balik (AC) baik yang berasal dari generator maupun transformator akan ditemukan 2 macam beban , yaitu beban resistif dan beban induktif. Pada beban resistif, daya yang dikonsumsi hanya daya aktif, sedangkan pada beban induktif mengkonsumsi daya aktif dan daya reaktif.

Pemakaian daya listrik oleh suatu beban akan bersifat :

- Daya sesaat, dimana merupakan hasil kali perkalian antara tegangan sesaat yang melintasi beban dengan arus sesaat yang melaluinya.
- Daya aktif, dimana merupakan daya nyata yang dihasilkan suatu jaringan sistem tenaga listrik, Secara umum daya nyata dinyatakan dalam persamaan :

$$P = |V||I| \cos \theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.4)$$

- Daya reaktif, dimana merupakan daya yang timbul karena adanya pembentukan medan magnet pada beban-beban induktif dalam satuan VAR atau Kvar(Kilo Volt Ampere Reaktif). Daya reaktif dinyatakan dalam persamaan :

$$Q = |V||I| \sin \theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.5)$$

➢ Daya semu merupakan penjumlahan secara vektoris antara daya aktif dan daya reaktif yang memiliki satuan (VA). Daya semu dinyatakan dalam persamaan :

$$S = P + jQ \quad \text{..... (2.6)}$$

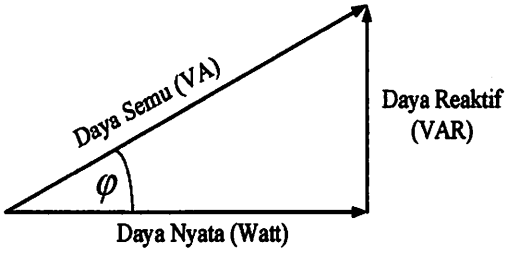
## 2.3 Daya Reaktif dan Faktor Daya

Setiap pemakaian daya reaktif akan menyebabkan turunnya faktor daya yang kemudian memburuknya unjuk kerja peralatan sistem pada umumnya, baik dari segi teknik operasional maupun segi ekonomi.

Faktor daya adalah perbandingan antara daya nyata dan daya semu.

$$\text{Faktor Daya} = \frac{Daya\ Nyata\ (kW)}{Daya\ Semu\ (kVA)} \quad \text{..... (2.7)}$$

Daya semu sendiri dibentuk oleh 2 komponen, daya aktif (W) dan daya reaktif (VAR). Hubungan ini dapat digambarkan sebagai berikut:




Gambar 2.2 Segitiga Daya

$$\text{Faktor daya} = \frac{P}{S} = \frac{VICos\varphi}{VI} = Cos\varphi \quad \text{..... (2.8)}$$

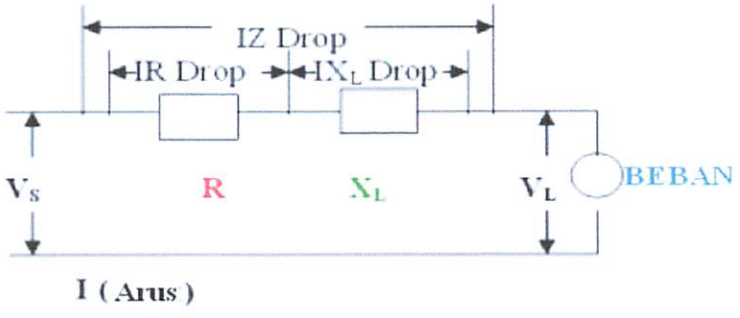
Dimana : P = daya aktif (Watt) $\varphi$ = sudut fasa

Q = daya reaktif (VAR)

S = daya semu (VA)

## 2.4 Jatuh Tegangan (*Voltage Drop*)[12]

Secara sederhana, *drop* tegangan diakibatkan oleh impedansi didalam saluran. Impedansi terdiri dari resistansi dan reaktansi. Resistansi(R) membentuk *IR drop* dan reaktansi($X_L$) membentuk *$IX_L$ drop*. Kombinasi dari kedua drop tersebut diketahui sebagai impedansi drop atau *IZ drop*.




Gambar 2.3 Representasi *Voltage Drop* Pada Saluran Transmisi Pendek

Dari Gambar diatas dapat ditulis persamaan matematis untuk penurunan tegangan pada saluran transmisi pendek sebagai berikut ;

$$V_{drop} = IR + IX_L$$
$$= I(R+X_L)$$
$$= IZ \text{ volt} \quad \text{..... (2.9)}$$

Penurunan tegangan bervariasi dari 10% sampai 100% dari tegangan nominalnya, dengan periode dari satu menit sampai beberapa detik. Penurunan tegangan pada saluran transmisi pendek tegangan tinggi tergantung pada tahanan(R), reaktansi($X_L$) ,panjang saluran dan pembebanan dalam sistem. Jika jumlah daya yang diserap oleh pembebanan besar maka menghasilkan arus yang terambil (I) juga besar sehingga penurunan tegangan juga besar.

## 2.5 Pengaturan Tegangan[12]

Meskipun telah ditetapkan didalam PUIL 1987 bahwa drop tegangan yang dapat ditoleransi pada saluran udara tegangan menengah (SUTM) adalah sebesar 5%, pada kenyataannya nilai tersebut amat sulit untuk diwujudkan. Hal ini karena drop tegangan terjadi disemua bagian sistem dan akan berubah dengan adanya perubahan beban. PLN dan konsumen akan sangat dirugikan dengan adanya kondisi tersebut Untuk itulah, penggunaan kapasitor sebagai pengatur tegangan sistem dapat dilakukan dengan megurangi drop tegangan dan rugi-rugi di jaringan tanpa menggunakan AVR (Automatic Voltage Regulator) yang secara ekonomis instalasi dan pemeliharaannya lebih mahal.

Harga pengaturan tegangan untuk tiap-tiap beban dengan bermacam-macam faktor daya dapat diperoleh dengan menggunakan rumus prosentase drop tegangan seperti dibawah ini.

$$\% \text{ drop} = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \text{ x } 100\% \quad \text{..... (2.10)}$$

Dengan :

$V_1$ = tegangan *line to line* ($V_{L\text{-}L}$) kV tanpa beban (*no-load*)

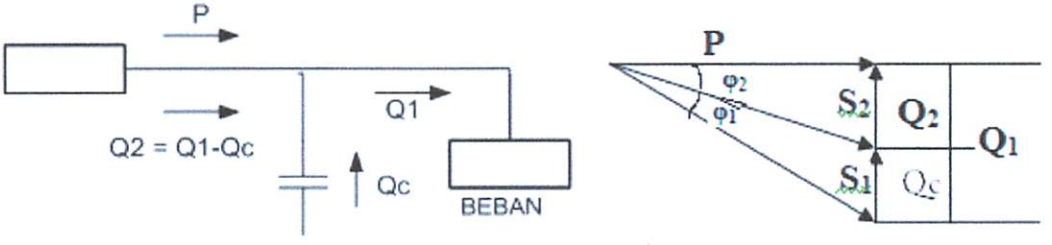
$V_2$ = tegangan *line to line* ($V_{L\text{-}L}$ ) kV bus saat pembebanan (*full load*)

Harga diatas berlaku untuk drop tegangan pada sistem tiga fasa

## 2.6 Perbaikan Faktor Daya dan Kenaikan Kapasitas

Manfaat terbesar yang diperoleh dari perbaikan faktor daya adalah pengurangan daya reaktif induktif dalam sistem. Hal ini menghasilkan pengurangan biaya, pemakaian daya yang lebih rendah, kenaikan kapasitas sistem,

perbaikan tegangan, dan pengurangan *losses* dalam sistem. Satu-satunya jalan untuk memperbaiki faktor daya adalah mengurangi daya reaktif induktif jaringan. Jika komponen reaktif dapat dikurangi, maka total arus akan berkurang, sedangkan komponen daya aktif tidak berubah maka faktor daya akan lebih besar sebagai akibat dari berkurangnya daya reaktif. Faktor daya akan mencapai 100% jika komponen daya reaktif sama dengan nol. Dengan menambahkan kapasitor, daya reaktif Q induktif akan berkurang. Gambar 2.4 menunjukkan perbaikan faktor daya pada sistem, kapasitor mensuplai daya reaktif ke beban.




Gambar 2.4 Perbaikan Faktor Daya

Diasumsikan bahwa beban disuplai oleh daya nyata P, daya reaktif Q dan daya semu S, pada faktor daya tertinggal (lagging) $\text{Cos}\varphi_1$

$$\text{Cos}\varphi_1 = \frac{P}{S_1} \qquad \text{..... (2.11)}$$

Jika suatu kapasitor dipasang $Q_C$ (VAR) dipasang pada sisi beban, faktor daya dapat diperbaiki dari $\text{Cos}\varphi_1$ menjadi $\text{Cos}\varphi_2$,dimana

$$\text{Cos}\varphi_1 = \frac{P}{S_1}$$

$$= \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}}$$

$$\text{Cos}\varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2+(Q_1-Q_C)^2}} \quad \text{.....(2.12)}$$

Sehingga daya semu ($S_1$)dan daya reaktif berkurang dari $S_1$ ( VA) ke $S_2$(VA) dan $Q_1$ (VAR) ke $Q_2$ sehingga kapasitas beban akan meningkat.

Cara menentukan besaran nilai kapasitor pada suatu sistem dengan menggunakan kapasitor *shunt* adalah

$$C = \frac{1}{2\pi \times (f) \times X_c} \quad \text{.....(2.13)}$$

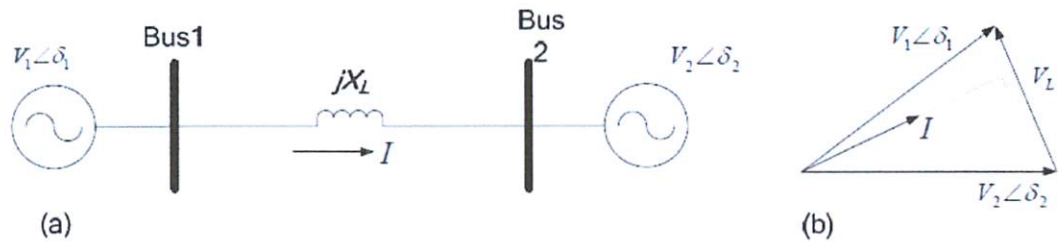
Sedangkan untuk menghitung nilai $X_c$ adalah

$$C = Xc = \frac{(kV)^2}{jQc} = \cdots \Omega \quad \text{.....(2.14)}$$

Dalam perbaikan faktor daya untuk kenaikan profil tegangan pada sistem tenaga listrik Indonesia mengacu pada ketentuan dari PT.PLN (PERSERO). Batas ambang atas tegangan untuk sistem transmisi 150kV adalah +5%, yaitu 157,5 kV, sedangkan batas ambang bawah tegangan untuk sistem transmisi 150kV adalah -10% yaitu 135kV.[6]

## 2.7 Prinsip Dasar dari Kompensasi Daya Dalam Sistem Transmisi[11]

Gambar 2.5(a) menunjukkan model dari suatu sistem transmisi secara umum. 2 bus jaringan sistem tenaga listrik terhubung melalui saluran transmisi yang mana diasumsikan tidak ada rugi-rugi tahanan dan direpresentasikan melalui reaktansi induktif saluran($X_L$) . $V_1 < \delta_1$ dan $V_2 < \delta_2$ merepresentasikan tegangan fasor dari 2 bus jaringan sistem tenaga listrik dengan sudut antara keduanya $\delta = \delta_1 - \delta_2$. Fasor diagram ditunjukkan pada gambar 2.5 (b)




Gambar 2.5 (a) Saluran Transmisi Sederhana (b) Diagram Fasor

*Magnitude* dari arus dalam saluran transmisi diatas diberikan persamaan :

$$I = \frac{V_L}{X_L} = \frac{|V_1 < \delta_1 - V_2 < \delta_2|}{X_L} \quad \text{..... (2.15)}$$

Komponen aktif dan reaktif dari arus yang mengalir pada bus 1 yakni

$$Id_1 = \frac{V_2 \sin \delta}{X_T} \quad , \quad Iq_1 = \frac{V_1 - V_2 \cos \delta}{X_T} \quad \text{..... (2.16)}$$

Daya aktif dan daya reaktif pada bus 1 yakni

$$P_1 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_T} = P_{maks} \text{Sin } \delta \; ; \; Q_1 = \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \delta)}{X_T} \quad \text{..... (2.17)}$$

Sama halnya, komponen aktif dan reaktif dari arus yang mengalir pada bus 2

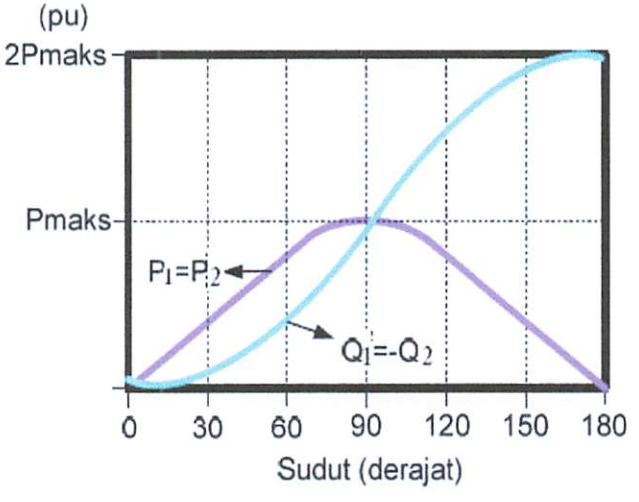
$$Id_2 = \frac{V_1 \sin \delta}{X_T} \quad , \quad Iq_2 = \frac{V_2 - V_1 \cos \delta}{X_T} \quad \text{..... (2.18)}$$

Dengan cara yang sama daya aktif dan daya reaktif pada bus 2

$$P_2 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_T} = P_1 \quad ; \quad Q_2 = \frac{V_2 (V_2 - V_1 \cos \delta)}{X_T} \quad \text{..... (2.19)}$$

Persamaan (2.15) sampai (2.19) mengindikasikan bahwa aliran arus atau daya aktif dan daya reaktif dapat diregulasi atau diatur melalui pengontrolan tegangan,

sudut fasa dan impedansi saluran dari sistem transmisi tersebut. $P_1$ dan $P_2$ sama besar karena pada saluran transmisi sederhana ini tahanan saluran $R_{sal} = 0$, sehingga sistem tidak memiliki rugi-rugi tahanan (*resistanly lossless transmission line*). Jika $V_1$ dan $V_2$ dibuat konstan dan $\delta$ diubah-ubah besarnya, maka dapat dibuat kurva aliran daya sebagai fungsi sudut seperti gambar 2.6. jika sudut daya terus diperbesar mulai dari nol, maka daya aktif yang disalurkan melalui saluran juga akan naik sampai $\delta=90^0$ dan Aliran daya aktif akan mencapai maksimum. Setelah titik ini, pertambahan sudut daya akan menyebabkan kemampuan aliran daya saluran turun. Harga P dan Q juga tergantung pada besarnya $X_L$. Pada gambar 2.6 dibawah ini terlihat bahwa kebutuhan daya reaktif juga menjadi besar untuk sudut daya yang besar. Jika diasumsikan $V_1=V_2$, pada sudut daya $90^0$, besarnya daya reaktif yang harus disediakan adalah sebesar $P_{maks}$



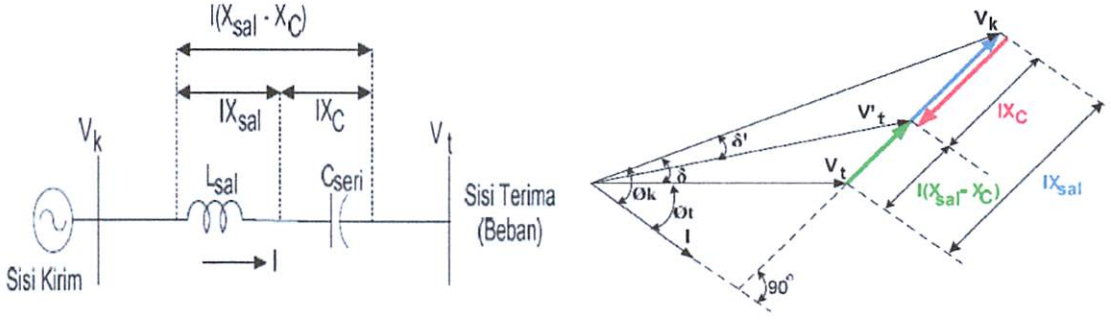

Gambar 2.6 Kurva Daya Aktif dan Daya Reaktif sebagai Fungsi Sudut $\delta$

## 2.8 Kompensasi Reaktif Saluran Transmisi[6]

Secara umum kemampuan kerja saluran transmisi, terutama dari yang pendek, menengah, dan panjang, dapat diperbaiki melalui suatu perangkat kompensasi. Kompensasi reaktif dibutuhkan pada saluran transmisi terutama dimaksudkan untuk mengontrol tegangan kerja disetiap titik disepanjang saluran, menaikkan batas stabilitas statis saluran dan untuk menaikkan kapasitas penyaluran. Dalam hal ini kompensasi reaktif dibagi dalam 2 kelompok yaitu kompensasi reaktif jenis seri dan *shunt* (parallel)[7].

### 2.8.1 Kompensasi Seri [7]

Kompensasi seri dilakukan dengan memasang kapasitor secara seri disalah satu atau kedua ujung STTL, atau di tengah STTL. Pemasangan di tengah saluran akan memakan biaya lebih mahal karena membangun gardu khusus baru. Prinsip utamanya adalah mengurangi reaktansi ekivalen saluran (*Xsal*) dengan memasukkan reaktansi kapasitif kapasitor secara seri ke STTL.




(a) (b)

Gambar 2.7 Rangkaian Ekuivalen dari Saluran (a) dan Diagram Fasor (b) setelah Dikompensasi Seri

Perbaikan regulasi tegangan terlihat pada gambar 2.7, yaitu dengan berkurangnya jatuh tegangan di STTL ($\Delta V$) :

$\Delta V = Vk - Vt = (I)(X\,sal) \longrightarrow$ sebelum dikompensasiseri.....(2.20)

$\Delta V' = Vk - Vt' = I\,X_{sal} - XC \longrightarrow$ setelah dikompensasi seri.....(2.21)

Maka, bisa diperoleh persamaan tegangan (berdasarkan Gambar 2.7(a) dan 2.7 (b) yaitu :

$Vk = Vt + j(I)(X\,sal) \longrightarrow$ sebelum dikompensasi seri.....(2.22)

$Vk = Vt + j(I)\,(X_{sal} - XC') \longrightarrow$ setelah dikompensasi seri.....(2.23)

***Leading Power Factor***[7]

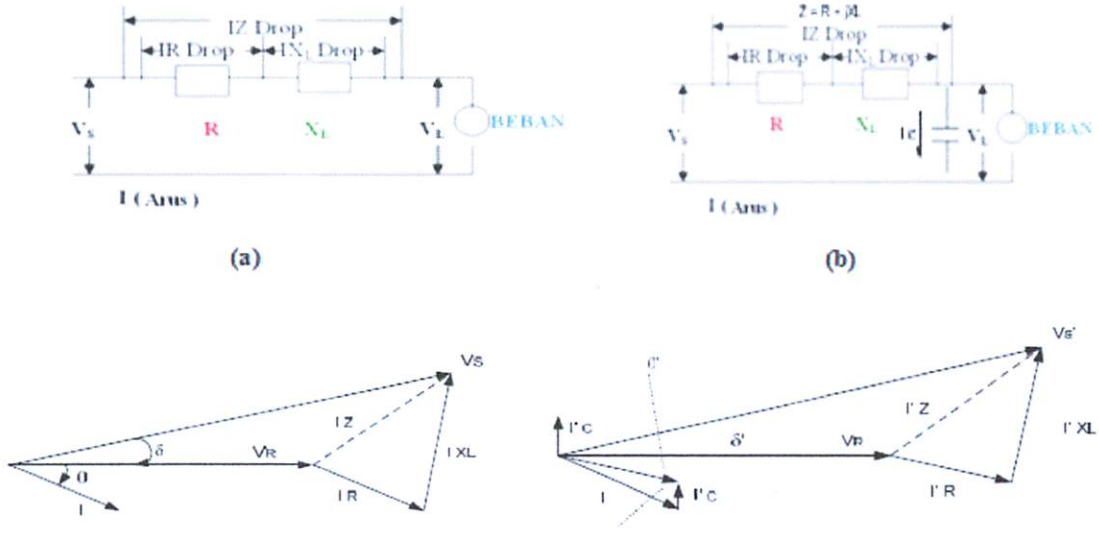
Untuk menurunkan drop tegangan antara sisi kirim dan sisi terima dengan menggunakan kapasitor seri, arus beban harus memiliki faktor daya lagging. tegangan sisi terima berkurang sebagai akibat dari dipasangnya kapasitor seri. jadi drop tegangan yang terjadi pada arus dengan faktor daya leading malah bertambah besar dengan adanya kapasitor seri.

### 2.8.2 Kompensasi *Shunt* / parallel[7]

Kompensasi *shunt* pada saluran transmisi dapat direpresentasikan oleh kapasitor *shunt* dan reaktor *shunt* sebagai sumber daya reaktif. Kompensasi *shunt* merupakan penempatan kapasitor maupun reaktor secara *shunt* antara masing-masing saluran dan netral untuk mengurangi sebagian atau menghilangkan sama sekali susseptansi *shunt* saluran tegangan tinggi, yang terutama penting pada keadaan beban yang ringan dimana tegangan ujung penerima dapat menjadi sangat tinggi, jika tidak dilakukan kompensasi. Sehingga kompensasi diperlukan

untuk menjaga agar tegangan tidak melebihi atau berkurang dalam batas-batas yang diijinkan. Untuk mengatasi kondisi demikian maka dipasang kapasitor *shunt* yang dapat menyuplai daya reaktif atau arus reaktif dengan tujuan untuk melawan komponen arus yang *out of phase* (lagging) pada beban induktif dengan menimbulkan arus leading. Pemasangan kapasitor paralel menyebabkan magnitude arus berkurang, faktor daya menjadi lebih besar dan drop tegangan antara sisi kirim dan terima juga dapat dikurangi. Kapasitor paralel tidak berpengaruh pada titik diluar titik pemasangannya.

Pada kondisi kebutuhan daya nyata dan reaktif sangat kecil maka pengaruh dari kapasitansi saluran akan menyebabkan naiknya tegangan di sisi penerima melewati batas yang diizinkan. Pemasangan reaktor *shunt* akan menyerap pelepasan muatan dari kapasitansi saluran sehingga tegangan turun kembali.




Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen dari saluran, Diagram Vector pada rangkaian pada Faktor Daya Lagging, Tanpa Kapasitor *Shunt* (a) dan dengan Kapasitor *Shunt*(b) [7]

Drop tegangan pada feeder (transmisi pendek) dengan faktor daya lagging dapat dinyatakan

$$\Delta V = I_R + IX_L \quad \text{.....(2.24)}$$

Pada saat kapasitor dipasang paralel pada sisi tegangan terima ($V_T$), besar Drop tegangan dapat dinyatakan

$$\Delta V = I_R R + I_X X_L - I_C X_L$$

$$= I_R R + (I_X - I_C) X_L \quad \text{..... (2.25)}$$

Dimana Ic = komponen reaktif dari arus leading terhadap tegangan sebesar $90^{0.}$

Untuk suatu sistem transmisi tegangan tinggi yang mempunyai beban dengan besar bervariasi, pemasangan sejumlah kapasitor dengan kapasitas tertentu yang berdasarkan pada besarnya daya reaktif induktif sistem tidak berfungsi secara optimal dalam sistem bila terjadi perubahan yang cepat dan siginifikan. Hal ini dilihat pada sistem saat terjadi beban puncak, kapasitor tersebut akan membangkitkan daya reaktif kapasitif (Kvar yang lagging) dengan besarnya harga kVar maksimum, sehingga apabila pada sistem besarnya beban induktif itu berada pada titik terendah, maka akan terjadi kelebihan daya reaktif kapasitif dengan faktor daya menjadi leading, sehingga kapasitor harus terlepas karena tidak diperlukan lagi oleh sistem[10]. Oleh karenanya untuk mendapatkan tingkatan tegangan yang opimal, diperlukan suatu kompensasi reaktif yang terkontrol dimana mampu bekerja secara kontinu tanpa harus terpengaruh adanya perubahan beban.

## 2.9 *Flexible AC Transmission System* ( FACTS )[3].

Menurut **IEEE,** FACTS dan FACTS kontroller didefinisikan yaitu:

- FACTS merupakan suatu sistem transmisi AC berbasis elektronika daya dan beberapa perangkat statik yang mana memberikan satu atau lebih parameter sistem transmisi untuk memperbaiki kemampuan pengontrolan dan meningkatkan kemampuan penyaluran daya.
- FACTS kontroller merupakan suatu sistem kontrol pada FACTS berbasis elektronika daya dan beberapa perangkat statik yang mana memberikan kontrol satu atau lebih parameter sistem transmisi AC serta berfungsi sebagai kompensasi reaktif terkontrol baik secara shunt, seri ataupun gabungan dari keduanya pada sistem transmisi AC.

Sebagai teknologi pada sistem transmisi daya, FACTS dan FACTS kontroller tidak hanya memberikan keuntungan yang sama seperti kompensator konventional dengan *switch* yang dikontrol secara mekanik dalam keadaan tunak tetapi juga memperbaiki unjuk kerja dinamik dan transient dari sistem tenaga listrik. *Switch* berbasis elektronika daya dari FACTS biasanya dapat dioperasikan secara kontinu dan waktu pen*switch*ingan lebih pendek daripada konventional *switch* mekanik.

FACTS kontroler sebagai kompensasi reaktif pada saluran transmisi mempunyai banyak konfigurasi. Secara umum FACTS kontroller dapat dikategorikan kedalam kontroller yang terhubung secara *shunt*, seri ataupun gabungan dari keduanya. Dan dalam pembahasan skripsi ini hanya akan

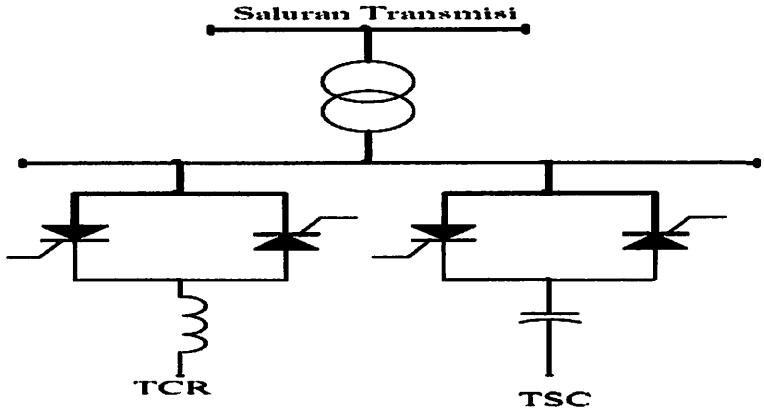
dijelaskan mengenai FACTS sebagai kompensasi reaktif terkontrol yang terhubung secara *shunt.*

## 2.10 Kompensasi Reaktif Shunt Terkontrol[10]

Perangkat FACTS (*Flexible AC Transmissions System*) terhubung secara paralel dengan sistem tenaga dan mempunyai keandalan untuk mengontrol tegangan pada titik percabangan (*point of common coupling (PCC)*) pada jaringan sistem tenaga. SVC dan STATCOM merupakan suatu perangkat kompensasi reaktif *shunt* terkontrol yang paling umum digunakan untuk mengontrol tegangan ataupun aliran daya reaktif pada sistem tenaga listrik.

### 2.10.1 *Static Var Compensator* ( SVC)[10]

*Static Var Compensator* (SVC) merupakan kompenen penting dalam pengontrolan tegangan pada sistem daya. *Static Var Compensator* (SVC) merupakan pembangkit atau penyerap statis yang terhubung *shunt* dimana keluarannya bervariasi, sehingga dapat mengatur parameter spesifik dari *power system.* SVC terdiri dari peralatan penyerap dan peralatan pengontrol yang sesuai.yakni *Thyristhor-Controlled-Reactor* (TCR) dan *Thyristor-Switched-Capastor* (TSC). Gambar 2.9 dibawah ini menunjukkan diagram skematik dari SVC



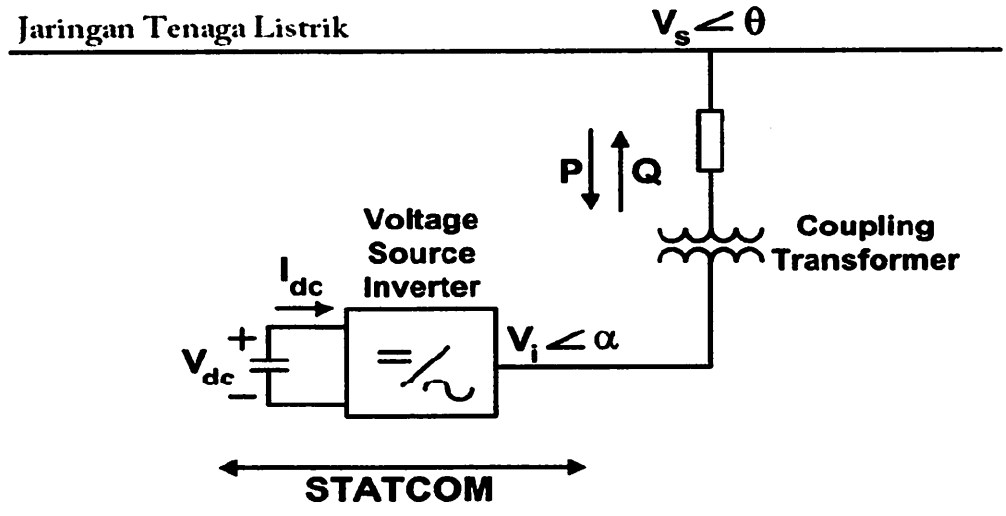

Gambar 2.9 Skematik Diagram dari SVC : TCR dan TSC

TCR merupakan reaktor yang terkontrol yang dihubungkan secara paralel melalui 2 buah thyristor yang dipasang saling anti parallel yang berfungsi mengatur besarnya arus yang lewat di induktor ( dengan kendali sudut fasa). Sedangkan TSC konfigurasinya sama dengan TCR, akan tetapi reaktornya ditempatkan melalui kapasitor. Dengan kombinasi dari komponen SVC tersebut maka SVC dapat memberikan keluaran yang bervariasi dalam hal menyerap atau membangkitkan daya reaktif dari atau ke saluran transmisi tenaga listrik.

### 2.10.2 *Static Synchronous Compensator* (STATCOM)[3].

Pada dasarnya STATCOM merupakan suatu perangkat FACTS berbasis pada inverter AC/DC yang terhubung pada jaringan tenaga listrik secara paralel. Inverter pada STATCOM terdiri dari 2 jenis yaitu *Voltage Source Inverter* (VSI) dan *Current Source Inverter* (CSI). VSI topologinya lebih dominan dalam pengontrolan daya reaktif yang saat ini telah banyak dipakai dalam kontrol daya reaktif pada sistem transmisi.

VSI STATCOM merupakan inverter yang terhubung pada sistem tenaga listrik melalui transformator baik step-up maupun step-down. Gambar 2.10 berikut ini menunjukkan skematik diagram dari VSI STATCOM yang terhubung pada jaringan sistem tenaga listrik.




Gambar 2.10 Diagram Skematik dari VSI STATCOM

Melalui pengontrolan magnitude dan sudut dari tegangan keluaran STATCOM ($V_i$) seperti $V_i < \alpha$, STATCOM dapat mengontrol pertukaran daya aktif dan reaktif dengan sistem tenaga. Pertukaran daya reaktif antara sistem AC dengan STATCOM diatur dengan cara mengubah-ubah harga komponen fundamental dari inverter diatas atau dibawah dari sistem AC. Kontrol dari kompensator dilakukan dengan perubahan sudut penyalaan dari perangkat semikonduktor, sehingga harga fundamental dari tegangan yang dihasilkan dari inverter dipaksa untuk tertinggal atau mendahului tegangan sistem AC beberapa derajat. Hal ini yang menyebabkan daya aktif mengalir keluar atau kedalam inverter, mengubah tegangan dari kapasitor dan tegangan terminal dari inverter sehingga resultan dari

daya reaktif juga berubah. Jika kompensator hanya menyuplai daya reaktif, daya aktif yang dihasilkan oleh kapasitor DC adalah nol. Oleh karena itu kapasitor tidak berubah tegangannya atau dengan kata lain kapasitor tidak berperan dalam pembangkitan daya reaktif.

$$P = \frac{V_i V_S}{X_{Tr}} \sin(\alpha - \theta) \quad \text{.....(2.26)}$$

$$Q = \frac{V_i\,(V_i - V_S Cos(\alpha - \theta))}{X_{Tr}} \quad \text{..... (2.27)}$$

Dimana :

P : daya aktif

Q : daya reaktif

$V_i$ : Tegangan inverter line to line

$V_s$ : Tegangan sumber line to line

$X_{Tr}$ : reaktansi bocor yang terhubung dengan transformator gandeng (*coupling transformer*).

Saat *steady-state* tegangan Inverter $V_i$ yang dibangkitkan VSI sefasa dengan Vs ( $\alpha = 0$ ), maka hanya mengalir daya reaktif ( P=0 ). Aliran daya reaktif dapat ditentukan melalui *magnitude* dari keluaran tegangan inverter. Untuk nilai tegangan inverter ($V_i$) lebih besar dari dari tegangan sumber ($V_s$), STATCOM beroperasi dalam mode kapasitif dan menginjeksi daya reaktif kedalam jaringan dan jika nilai $V_i$ lebih kecil daripada $V_s$, STATCOM beroperasi dalam mode induktif dan menyerap daya reaktif dari jaringan.

Jumlah daya reaktif yang diserap atau disuplai sama dengan perbedaan kedua tegangan. Jika STATCOM terdapat penyimpan energi ( *energy storage*) pada sisi

DC maka STATCOM menyuplai daya aktif pada sistem. Hal ini dapat dilakukan dengan mengatur sudut fasa dari STATCOM dan sistem AC.

Beberapa aplikasi dari STATCOM adalah :

- Untuk meregulasi dan mengontrol tegangan
- Mengurangi *temporary overvoltage*
- Meningkatkan kapasitas penyaluran daya pada kondisi tunak
- Meningkatkan stabilitas transient
- Mengurangi fliker
- Meningkatkan kualitas daya

## 2.11 Inverter[4].

Konverter DC to AC secara umum lebih dikenal dengan nama inverter, memiliki fungsi mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output AC dengan besar magnitudo dan frekuensi yang diinginkan. Tegangan output bisa dibuat tetap atau variable, pada frekuensi tetap atau frekuensi yang bisa diubah. Besarnya output tegangan yang diinginkan dapat dicapai dengan 2 cara yaitu cara pertama dengan merubah besarnya tegangan input DC sedangkan gain dari inverter dijaga konstan, dan cara kedua adalah jika tegangan input DC tetap, gain dari inverter yang diubah-ubah. *Inverter gain* didefinisikan sebagai ratio antara tegangan output AC dengan tegangan input DC.

Untuk inverter yang ideal bentuk sinyal outputnya berupa sinusoidal. Namun pada praktiknya, output dari inverter berbentuk nonsinusoidal dan mengandung harmonisa. Untuk pemakaian dengan peralatan semikonduktor

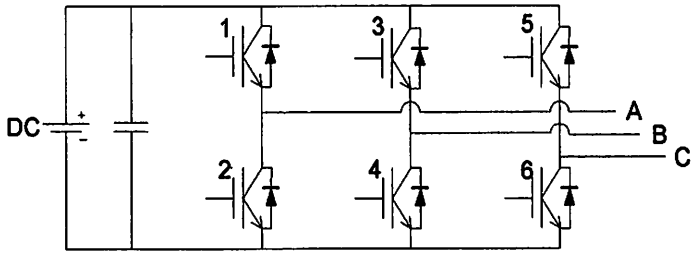
kecepatan tinggi kandungan harmonisanya bisa dikurangi dengan teknik switching tertentu.

Secara umum inverter dibagi menjadi dua bagian yaitu: inverter satu fasa dan inverter tiga fasa. Peralatan elektronika daya yang dipakai untuk inverter, antara lain: *Bipolar Junction Transistors* ($BJT_s$), *Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors* (MOSFET), *Insulated-Gate Bipolar Transistor* (IGBT), *Metal Oxide Semiconductor-Controlled Thyristors* ($MCT_s$), *Static Induction Transistors* ($SIT_s$), *Gate-Turn-Off Thyristors* ($GTO_s$). Pemakaian peralatan tersebut dipilih didasarkan pada jenis penerapannya. Inverter biasanya memakai sinyal kontrol PWM untuk menghasilkan tegangan output AC. Inverter dikatakan sumber tegangan (*Voltage fed Inverter)* jika tegangan inputnya dibuat konstan.dan dikatakan sumber arus (*Current Fed Inverter)* jika arus inputnya dijaga konstan. Jika tegangan inputnya merupakan tegangan terkendali atau tegangan inputnya merupakan tegangan yang bisa diatur, maka inverter ini bisa disebut *variable DC linked inverter.*

### 2.11.1 Inverter 3 fasa[4].

Inverter sumber tegangan (VSI) 3 fasa adalah peralatan elektronik yang berfungsi untuk mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) 3 fasa. Rangkaian dasar inverter tiga fasa dengan tiga lengan ditunjukkan seperti pada Gambar 2.11. Saklar-saklar pada gambar tersebut bekerja sedemikian rupa, sehingga bentuk tegangan keluaran (A, B, dan C) membentuk tegangan 3 fasa. Kedudukan saklar-saklar yang berpasangan (1 dan 2, 3 dan 4, 5 dan 6) diatur sedemikian hingga setiap pasang tidak pernah bersama-sama ON

ataupun sama-sama OFF. Artinya jika saklar 1 dalam keadaan ON, maka saklar 2 berada dalam keadaan OFF atau sebaliknya. Demikian pula untuk pasangan 3 - 4 dan 5 - 6.




Gambar 2.11 Inverter Tiga Fase Tiga Lengan

### 2.11.2 Kontrol Tegangan Dari Inverter

Ada banyak macam teknik pengaturan gain inverter. Metode pengaturan gain paling effisiensi adalah dengan metode PWM (Pulse Width Modulation).

Teknik kendali PWM banyak dipakai di industri-industri terutama sebagai penggerak mesin-mesin listrik. Namun pada skripsi ini PWM akan diterapkan pada jaringan sistem tenaga listrik. Prinsip dasar PWM adalah membandingkan gelombang pembawa (*carrier*) dengan gelombang acuan (*reference*). Jenis-jenis kendali PWM berikut ini mengacu pada aplikasinya di inverter 1-fasa (1/2 jembatan) yang juga bisa dianalogikan untuk aplikasi di jaringan sistem tenaga, antara lain :

a. *Single-pulse Width Modulation* (*Single-PWM* )

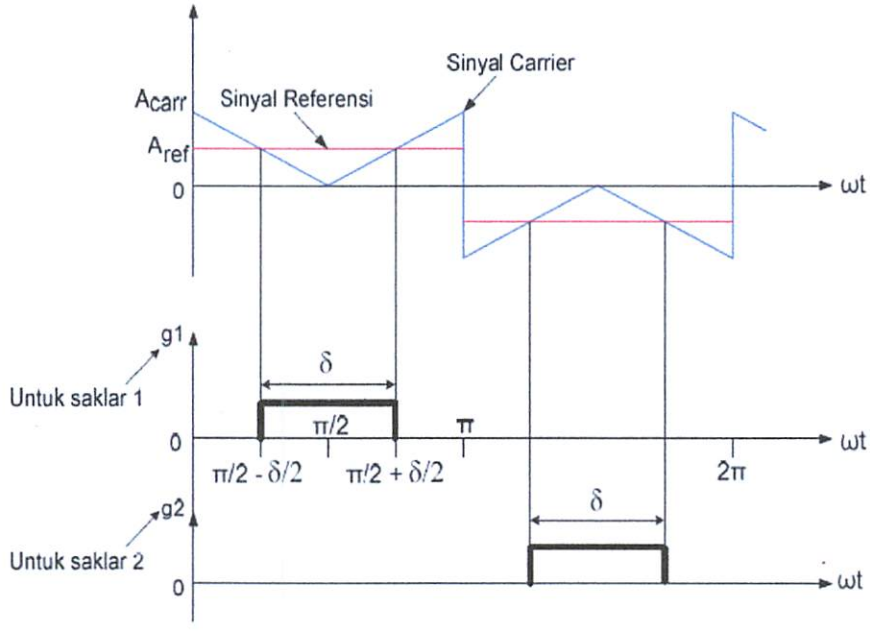
b. *Multi-Pulse Width Modulation* ( *Multi-PWM* )

c. *Sinusoidal-Pulse Width Modulation* ( *Sinusoidal-PWM* )

d. *Modified-Pulse Width Modulation* ( *Modified-PWM* )

Untuk lebih mudah pemahaman akan proses terbentuknya pulsa kontrol gate inverter maka dibawah ini diberi contoh salah satu teknik dari metode PWM yaitu teknik *Single Pulse Width Modulation (Single-PWM)*

Untuk kontrol single-PWM, hanya ada satu pulsa tiap satu siklus (per $^1/_2$ periode) dan lebar pulsa diubah-ubah untuk mengontrol tegangan output inverter. Gambar 2.12 menunjukan pembangkit sinyal penyulutan ( meng-ON-kan dna meng-OFF-kan saklar daya) untuk dua buah saklar daya. Sinyal penyulutan dibangkitkan dengan cara membandingkan sinyal referensi (dengan amplitudo $A_{ref}$) dengan gelombang segitiga (dengan ampllitudo $A_{carr}$). Frekuensi gelombang segitiga menentukan frekuensi fundamental tegangan keluaran inverter. Dengan mengubah-ubah $A_{ref}$ dari 0 sampai $A_{carr}$, maka lebar pulsa ($\delta$) dapat diubah dari $0^0$ – $180^0$. Perbandingan $A_{ref}$ terhadap $A_{carr}$ merupakan variabel kendali dan disebut sebagai *duty cycle* (indeks modulasi)




Gambar 2.12 *Single Pulse Width Modulation* ( *Single – PWM* )

## 2.12 Prinsip-Prinsip Pengendalian Proses

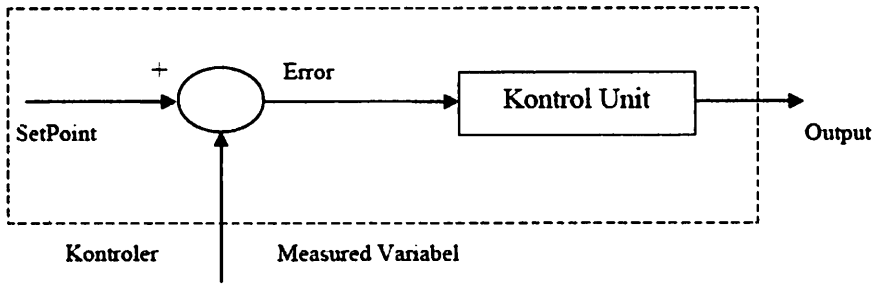
Dalam pengendali proses, operator mengerjakan empat langkah sebagai berikut: *Mengukur, Membandingkankan, Menghitung dan Mengoreksi.* Keempat langkah yang dilakukan operator itu, seluruhnya dapat dikerjakan oleh instrumentasi. Manusia kemudian sama sekali tidak menentukan keempat langkah tadi. Operator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

### 2.12.1 Prinsip Kerja Pengendali

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

Pembandingan itu sendiri dilakukan dengan mengurangi besarnya *set point* dengan besaran *measurement varibel*, yang hasilnya adalah besaran yang disebut *error*. Karena *set point* bisa lebih besar atau lebih kecil dari *measurement variable*, nilai *error* bisa positif dan bisa juga negatif. Jadi *error* adalah input unit kontrol dan *manipulated variable* adalah output unit kontrol. Besarnya

*manipulated variable* dihitung berdasarkan *error* dan *transfer function* unit kontrol. Bentuk *transfer function* dari unit kontrol terhitung pada "mode" yang ada dikontroler.



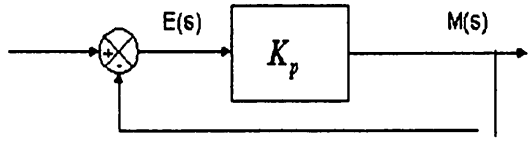

Gambar 2.13 Kontroler dan Diagram Kotaknya

### 2.12.2 Pengendali Proporsional (*Proporsional Controller*)

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

Kontroler proporsional memiliki keluaran yang sebanding / proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya). Secara lebih sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran kontroler proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukan. Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya. Gambar 2.14 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran *setting*, besaran

*actual* dengan besaran keluaran kontroler proporsional. Sinyal kesalahan *(error)* merupakan selisih antara besaran *setting* dengan besaran aktualnya. Selisih ini akan mempengaruhi kontroler, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat pencapaian harga *setting*) atau negative (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan).




Gambar 2.14 Diagram Blok Kontroler Proporsional

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

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

$$PB = \frac{1}{K_p} x100\% \qquad \text{.....(2.29)}$$

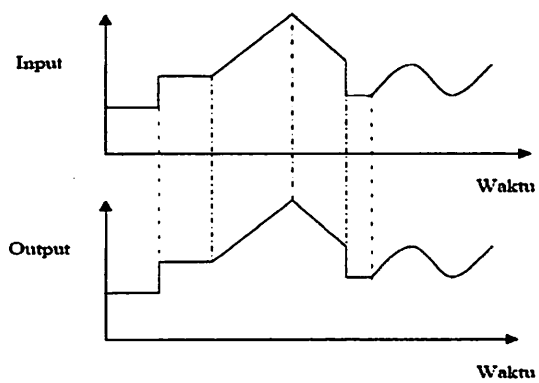
Dimana:

PB = Proporsional Band

$K_P$ = Konstanta Proporsional

Walaupun hubungan input-output unit kontrol proporsional bukan merupakan fungsi waktu, untuk bahan perbandingan dengan unit kontrol lain, ada baiknya kalau hubungan itu dinyatakan dalam bentuk kurva fungsi waktu. Dari gambar 2.14 jelas terlihat bahwa output selalu mengikuti input secara proporsional. Naik turunnya input diikuti secara langsung oleh output, dan

besarnya selalu sama dengan input kali gain. Karena unit kontrol proporsional ini bukan fungsi waktu, dinamik gain pengendali ini sama dengan *steady state* gainnya. Dengan kata lain, besarnya gain tidak tergantung pada besarnya frekuensi loop.




Gambar 2.15 Response Sebuah Pengendali Proporsional

### 2.12.3 Pengendali Integral (*Integrator Controller*)

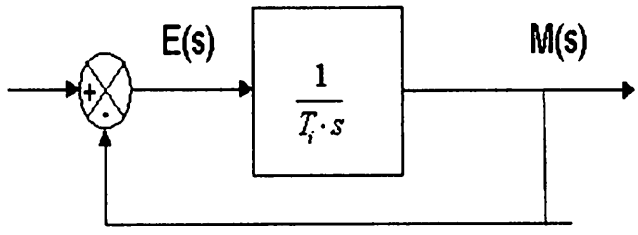
Setelah pengendali proporsional diketahui *"gagal"* mengendalikan sistem secara sempurna dalam arti masih adanya *offset*. Dikarenakan sifat dasar pengendali proporsional yang masih memerlukan *error* untuk menghasilkan *output*. Oleh karena itu, untuk menghilangkan *offset*, diperlukan pengendali lain yang dapat menghasilkan *output* walaupun sudah tidak ada *input* lagi. Sifat unit inilah yang dimiliki oleh pengendali integral. Sayangnya, kemampuan pengendali integral menghilangkan *offset* tidak disertai kemampuan bereaksi secara cepat.Karena lambatnya reaksi tersebut maka pengendali integral biasanya dipakai dalam kombinasi dengan pengendali proporsional. Kedua pengendali tersebut dipasang secara paralel sehingga kelebihan kedua pengendali dapat dimanfaatkan secara serempak.

Kalau diteliti dengan seksama, *offset* dapat terjadi di sistem pengendali proporsional, karena pengendali proporsional selalu membutuhkan *error* (dalam hal ini *input* ke *unit control*) untuk menghasilkan suatu *output*. Kalau tidak ada *error*, *output* yang keluar dari pengendali proporsional hanyalah bias yang biasanya disetel 50%.

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

Kontroler integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol. Kalau sebuah plant tidak memiliki unsur *integrator* (1/s), kontroler proporsional tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan mantapnya nol. Dengan kontroler integral, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai kesalahan keadaan mantapnya nol. Kontroler integral memiliki karakteristik seperti halnya sebuah integral. Keluaran kontroler sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Keluaran kontroler ini merupakan jumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Kalau sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan.

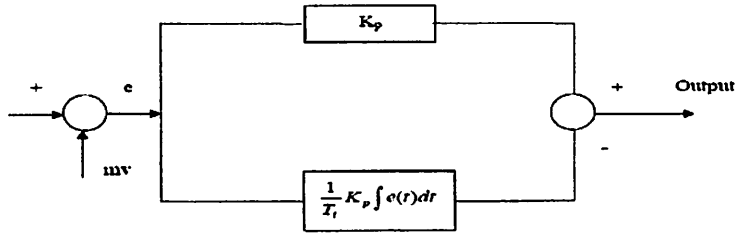
Gambar 2.16 menunjukkan blok diagram antara kesalahan dengan keluaran suatu kontroler integral.




Gambar 2.16 Blok Diagram Kontroler Integral

### 2.12.4 Pengendali Proporsional Integral (*PI Controller*)

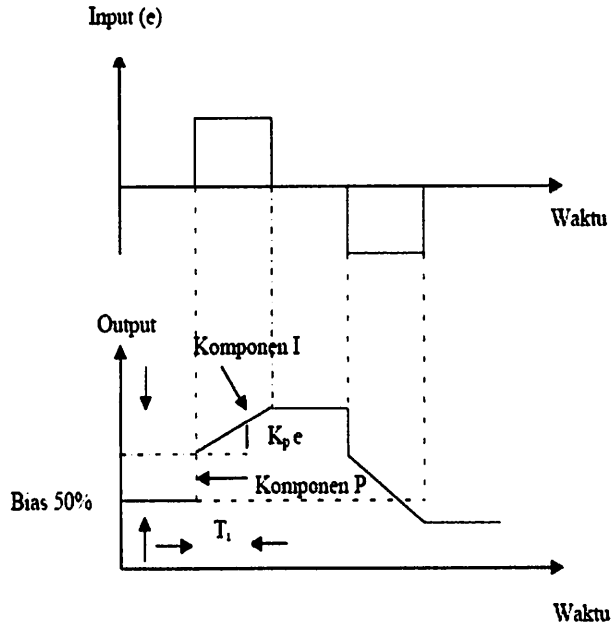
Karena sifatnya yang tidak mengeluarkan *output* sebelum selang waktu tertentu, pengendali integral jadi memperlambat respon, walaupun *offset* hilang. Oleh karenanya. untuk memperbaiki lambatnya respon, umumnya pengendali integral dipasang paralel dengan pengendali proporsional seperti gambar 2.17 Gabungan kedua pengendali tersebut lazim disebut dengan pengendali PI atau PI kontroler, dan pengendali dikatakan punya dua mode, yaitu P dan I.




Gambar 2.17 Diagram Kotak Pengendali PI

Contoh pengendali proporsional - integral yang mudah ditemui dalam kehidupan sehari-hari adalah pengisian tangki penampung air di kloset. Hal yang perlu diperhatikan pada contoh ini adalah bahwa kontrol unit bekerja secara proporsional. Artinya, koreksi dalam hal ini buka tutupnya *control valve* akan

selalu sebanding dengan ketinggian level. *Set point* dalam hal ini adalah sama dengan ketinggian level maksimum.




Gambar 2.18 Hubungan Input-Output Pengendali PI dalam Fungsi Waktu

## 2.13 Teori Fuzzy[5].

Teori fuzzy pertama kali dikenalkan oleh Lotfi Zadeh pada tahun 1965 di California. Dimana kini fuzzy banyak digunakan untuk berbagai macam penelitian. Teori fuzzy dikembangkan untuk mengatasi kekurangan yang dipunyai oleh teori boolean.

Pada teori boolean hanya dikenal dua keadaan yaitu 0 dan 1, besar dan kecil, panjang atau pendek. Sehingga hanya dapat diketahui nilai ekstrim dari suatu keadaan. Padahal terkadang dibutuhkan suatu keadaan yang betul-betul merepresentasikan keadaan yang sebenarnya. Teori fuzzy dapat memberikan

solusi dari masalah ini. Teori fuzzy mendefinisikan keadaan dalam himpunan yang kontinyu antara 0 dan 1.

*Fuzzy Logic Controller* secara leksikal berarti samar-samar atau kabur. Dalam teknik pengontrolan disebut logic kabur yang mewakili pola pikir manusia yang serba tidak pasti. Artinya ketidaktepatan dalam menilai suatu fenomena alam dipakai dalam logika fuzzy. Misalnya kita dapat menilai cuaca di suatu daerah adalah dingin, sangat dingin, dingin sedang, hangat, panas, dan panas sekali. Variabel-variabel numerik yang biasa digunakan dalam teknik pengontrolan ini dikonversi kedalam variabel linguistik.

Sistem yang kompleks biasanya memiliki model matematika yang rumit. Dengan memakai logika yang konvensional misalnya, untuk teknik respon frekuensi atau *state space*, keberadaan model matematik adalah mutlak artinya bila model matematiknya tidak diketahui maka perancangan model sistem kontrolnya mustahi dapat dilakukan. FLC dapat mengatasi dinamika proses yang sangat kompleks dan penuh ketidakpresisian. Hal ini karena kemampuannya mengubah informasi numerik dari variabel yang diukur menjadi informasi linguistik. Jadi kelebihan kontroler ini adalah kita tidak perlu mencari model matematik perilaku sistem.

### 2.13.1 Penulisan Himpunan Pada Fuzzy.

Misalkan X merupakan semesta dengan anggota yang berhingga X, dinotasikan dengan $X = \{x\}$, maka himpunan fuzzy A dapat didefinisikan sebagai sekumpulan pasangan yang dapat diurutkan sebagai berikut:

$$A = \{X,\mu A(X)\};\ x \varepsilon X \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.30)$$

$\mu A(X)$ menyatakan keanggotaan X dalam A yang harganya terletak antara interval [0,1]. Tingkat keanggotaan penuh (*full membership*) adalah 1, tingkat 0 menyatakan tanpa keanggotaan (*non membership*), sedangkan tingkat antara 0 sampai 1 menyatakan kekaburan antara keanggotaan penuh dan tanpa keanggotaan.

Tingkat keanggotaan inilah yang biasanya disebut tingkat logika fuzzy. Himpunan fuzzy pada semesta pembicara X yang anggotanya berhingga, $X = \{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n\}$ dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$A = \mu_1(x_1)/(x_1) + \mu_2(x_2)/(x_2) + \ldots + \mu_n(x)/(x)$$

$$= \sum \mu(x_i)/(x_I) \quad \ldots\ldots (2.31)$$

Tanda ` + `digunakan untuk menyatakan operasi gabungan atau *union*. Tanda ` / ` digunakan untuk menghubungkan anggota dengan nilai keanggotaannya.

Jika x menyatakan semesta pembicaraan yang anggotanya tak berhingga (kontinyu) maka himpunan fuzzy dinyatakan dalam bentuk :

$$A = \int \frac{\mu_A(x)}{x} \quad \ldots\ldots (2.32)$$

### 2.13.2 Operasi Pada Himpunan Fuzzy[5].

Beberapa operasi dasar yang diberlakukan pada himpunan fuzzy A dan B dari semesta X dengan tingkat keanggotaan $\mu_A(x)$dan $\mu_B(x)$ untuk $x \varepsilon X$ adalah sebagai berikut :

1. Dua himpunan fuzzy A dan B dikatakan sama (A = B) jika keduanya memiliki semesta yang sama dengan fungsi keanggotaan yang sama. Hal ini dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{\mu(x_A)}{x} = \frac{\mu_B(x)}{x} \; ; x \epsilon X \quad \ldots\ldots(2.33)$$

$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$ ; untuk semua x ε X

ini dinyatakan dengan operasi `*OR*` dalam logika fuzzy.

2. Irisan dari himpunan *fuzzy* A dan B (A ∩ B) dinyatakan dengan :

   $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ ; untuk semua x ε X........................ (2.34)

   Ini dinyatakan dengan operasi `*AND*` dalam logika fuzzy.

3. Komplemen himpunan fuzzy A dinotasikan dengan A, didefinisikan:

   $\mu_A(x) = (1 - \mu_A(x))$ ; untuk semua x ε X ...........................................(2.35)

   Ini dinyatakan dengan operasi `*NOT*` dalam logika fuzzy.

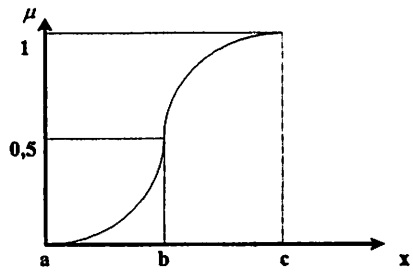
### 2.13.3 Fungsi Keanggotaan.

Untuk menyatakan antara sebuah input dengan sebuah himpunan fuzzy, digunakan fungsi keanggotaan (*membership function*). Ada beberapa jenis fungsi keanggotaan, antara lain:

- **Fungsi S**

  Fungsi ini didefinisikan dengan :

$$
\begin{aligned}
S(x;a;b;c) &= 0 && ; x \leq a \\
&= 2((x-a)/(c-a))^2 && ; a \leq x \leq b \\
&= 1-2((x-c)/(c-a)) && ; b \leq x \leq c \\
&= 1 && ; x \leq c \quad \ldots\ldots (2.36)
\end{aligned}
$$



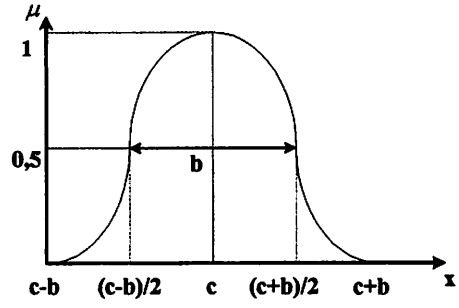

Gambar 2.19 Fungsi S

- **Fungsi π**

Fungsi ini hampir sama dengan fungsi S. Fungsi π didefinisikan dengan:

$$\pi(x;a,b,c) = S(x;\ c-b,\ c-b/2,\ c) \qquad ;\ x \leq c$$

$$= 1-S(x;c,\ c+b/2,\ c+b\ ) \qquad ;\ x \geq c \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (2.37)$$




Gambar 2.20 Fungsi π

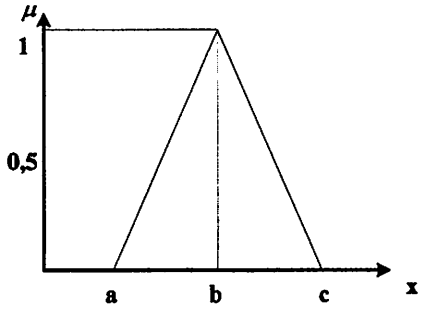
- **Fungsi Segitiga**

$$T(x;a,b,c) = 0 \qquad ;\ x \leq a$$

$$= (x-a)/(b-a) \qquad ;\ a \leq x \leq b$$

$$= (c-x)/(c-b) \qquad ;\ b \leq x \leq c$$

$$= 0 \qquad ;x \leq c \qquad \ldots\ldots \quad (2.38)$$

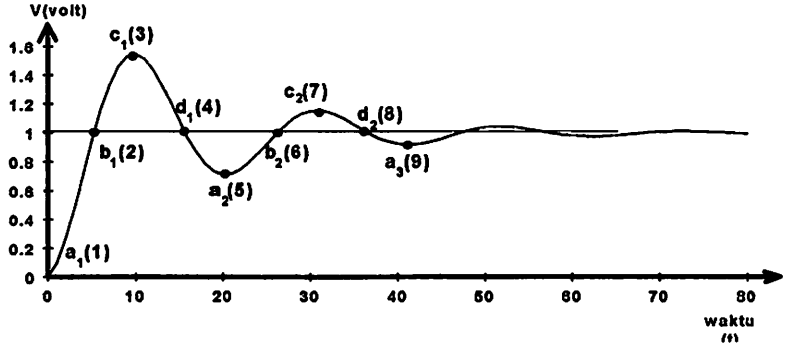



Gambar 2.21 Fungsi Segitiga

Dari ketiga bentuk tersebut yang paling banyak digunakan adalah bentuk *tringular* (segitiga). Hal ini karena bentuk *tringular* hanya menggunakan garis lurus untuk mendapatkan nilai kwantitasi atau invers dari nilai kwantitasi dengan menentukan nilai pada sumbu koordinat x dan μ.

### 2.13.4 Desain Kontroler Secara Verbal.

Desain kontroler secara verbal atau berdasarkan pengetahuan operator ahli, biasanya dilakukan dengan melihat nilai-nilai perpotongan dari kurva output lingkar terbuka dari plant dengan sinyal referensi unit step, yaitu pada titik-titik seperti Gambar 2.22




Gambar 2.22. Kurva Output Plant terhadap Input Unit Step

Melalui cara ini, diharapan bahwa aksi kontrol yang dihasilkan pada sistem lingkar tertutup mempunyai respons dengan harga lewatan minimum dan waktu naik yang cepat.

Sebagai contoh, dalam desain suatu kontroler type PI, dimisalkan output kontroler **U** tergantung hanya pada error **E** dan kecepatan error (delta error) **ΔE**.

Untuk tiap semesta pembicaraan didefinisikan tujuh himpunan bagian dengan ungkapan *Positif-Big* (PB), *Positif-Medium* (PM), *Positif-Small* (PS), Zero (Z), *Negatif-Smalll* (NS), *Negatif-Medium* (NM) dan *Negatif-Big* (NB). Dengan melihat kurva respons dari plant dapatlah disusun suatu basis aturan dengan dasar pemikiran sebagai berikut:

Pada titik $a_1(1)$, **E**="PB" dan **ΔE**="Z", maka diperlukan sinyal kontrol yang besar **U** ="PB" agar respons sistem closed loop segera menuju set-point.

- Pada titik $b_1(2)$, E ="Z" dan ΔE ="NB", maka agar lewatan yang terjadi minimum, diperlukan sinyal kontrol U ="NB".
- Demikian seterusnya untuk titik maksimum, minimum dan titik potong yang lainnya, dapatlah diturunkan kaidah seperti diatas.

Dengan menggunakan kaidah diatas, dapatlah dibuat kerangka Tabel aksi kontrol melalui verbalisasi respons lingkar terbuka dari plant, yaitu seperti Tabel 2.1 dibawah.

Tabel 2.1 Verbalisasi Basis Aturan pada Kontroler Logika Fuzzy Statik

| E \ ΔE | NB | NS | NK | SN | PK | PS | PB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NB | | | | NB(3) | | | |
| NS | | | | NS(7) | | | |
| NK | | | | NK(11) | | | |
| SN | NB(2) | NS(6) | NK(10) | SN(13) | NK(12) | PS(8) | PB(4) |
| PK | | | | PK(9) | | | |
| PS | | | | PS(5) | | | |
| PB | | | | PB(1) | | | |

***Catatan:***

- Isi tabel adalah aksi kontrol yang dianjurkan oleh operator ahli.
- Angka di dalam tanda kurung menyatakan urutan kaidah kontrol yang diturunkan dari interprestasi titik kritis kurva respons plant terhadap input unit step, seperti pada Gambar 2.22. Sebagai contoh, pada titik maksimum $C_2(6)$ adalah aksi kontrol ke 6 NS(6) yang dianjurkan.

Dari tabel tersebut tampak bahwa terdapat beberapa kaidah atur yang belum terdefinisikan, yaitu hanya ada 13 kaidah atur dari 49 kaidah atur yang mungkin. Hal ini terjadi karena kurangnya informasi yang dipunyai operator dalam menurunkan kaidah atur. Akibat dari kurangnya kaidah atur ini, respons sistem dapat menjadi lambat, berisolasi ataupun lewatannya sangat besar.

MacVicar-Whelan yang meneliti masalah penyempurnaan kaidah atur pada kontroler type PI ini menemukan pola umum hubungan antara error E, perubahan error ΔE, dan aksi kontrol U. Penurunan lengkap dari kaidah atur ini disajikan dalam bentuk tabel verbalisasi yang disebut tabel MacVicar-Whelan, seperti yang tampak pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Basis Aturan dari MacVicar-Whelan

| E \ ΔE | NB | NS | NK | SN | PK | PS | PB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NB | NB | NB | NB | NB | NS | NK | SN |
| NS | NB | NB | NB | NS | NK | SN | PK |
| NK | NB | NB | NS | NK | SN | PK | PS |
| SN | NB | NS | NK | SN | NK | PS | PB |
| PK | NS | NK | SN | PK | PS | PB | PB |
| PS | NK | SN | PK | PS | PB | PB | PB |
| PB | SN | PK | PS | PB | PB | PB | PB |

Tampak bahwa tabel tersebut memberikan kaidah atur lengkap, yang secara umum dapat digunakan sebagai kaidah atur untuk kontroler fuzzy pada berbagai plant, terutama untuk plant orde dua yang stabil. Meskipun demikian tabel ini tidak dapat diberlakukan begitu saja untuk semua plant, khususnya untuk plant orde tinggi dan tidak linier yang harus memperhatikan index performansi tertentu.

### 2.13.5 Sistem Inferensi Fuzzy Metode Mamdani.

Metode mamdani sering dikenal dengan Metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Untuk mendapatkan output, diperlukan 4 tahapan:

- Pembentukan himpunan fuzzy
- Aplikasi fungsi implikasi (pada umumnya implikasi yang digunakan: metode Min)
- Komposisi aturan

ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem fuzzy, yaitu

a. Metode Max

Pada metode ini, solusi hinpunan fuzzy diperoleh dengan mengambil nilai maksimum aturan, kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah fuzzy, dan mengaplikasikannya ke output dengan menggunakan operator OR (union). Jika semua proposisi telah dievaluasi, maka output akan berisi suatu himpunan fuzzy yang merefleksikan kontribusi dari tiap-tiap proposisi. Secara umum dapat ditulis:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \max(\mu_{sf}[x_i],\mu_{kf}[x_i]) \quad \text{..... (2.39)}$$

dengan:

$\mu_{sf}[x_i]$ = nilai keanggotaan solusi fuzzy sampai aturan ke-i

$\mu_{kf}[x_i]$ = nilai keanggotaan konsekuen fuzzy aturan ke-i

b. metode additive (Sum)

pada metode ini, solusi himpunan fuzzy diperoleh dengan cara melakukan *bounded-sum* terhadap semua output daerah fuzzy. Secara umum dituliskan:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \min(1,\mu_{sf}[x_i]+\mu_{kf}[x_i]) \quad \text{..... (2.40)}$$

c. Metode Probabilistik OR(probor)

Pada metode ini, solusi himpunan fuzzy diperoleh dengan cara melakukan product terhadap semua output daerah fuzzy. Secara umum dituliskan:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \mu_{sf}[x_i]+\mu_{kf}[x_i])-(\mu_{sf}[x_i]*\mu_{kf}[xi]) \quad \text{..... (2.41)}$$

➢ Penegasan (*defuzzyfikasi)*

Defuzzifikasi adalah proses pemetaan dari daerah aksi kontrol fuzzy ter-*inference* ke daerah aksi kontrol *non-fuzzy* (*crisp).* Pada implementasi kontrol logika *fuzzy real time*, defuzzifikasi pada metode mamdani antara lain:

***a.*** *Mean of Maximum* (MOM)

MOM menghasilkan aksi kontrol yang mana merepresentasikan harga rata-rata dari semua aksi kontrol lokal yang fungsi keanggotaannya mencapai maksimum. Harga *crisp* aksi kontrol menggunakan MOM, yang dinyatakan sebagai :

$$z = \frac{\sum_{i-1}^{n} \alpha_i H_i W_i}{\sum_{i-1}^{n} \alpha_i H_i} \qquad \text{..... (2.42)}$$

dengan :

- $\alpha i$ adalah *fire strength* dari aturan ke-i.

-$Hi$ adalah harga saat fungsi keangotaan mencapai maksimum

- $z_i$ adalah harga *crisp output* dalam semesta pembicaraan.

***b.*** *Center of Area* (COA)

Defuzzifikasi COA menghasilkan pusat gravitasi dari distribusi aksi kontrol. Ini dinyatakan sebagai :

$$z^* = \frac{\sum_{k=1}^{m} Vk\mu v(Vk)}{\sum_{k=1}^{m} \mu v(Vk)} \qquad \text{..... (2.43)}$$

dengan:

$z^*$ = nilai output

$m$ = tingkat kuantisasi

$V_k$ = elemen ke-k

$\mu_v(V_k)$ = derajat keanggotaan elemen-elemen pada fuzzy set v

c .Bisektor

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain fuzzy yang memiliki nilai keanggotaan setengah dari jumlah total nilai keanggotaaan pada daerah fuzzy. Secara umum dituliskan:

$Z_p$ sedemikian hingga $\int_{\alpha}^{p} \mu(z)dz = \int_{p}^{\alpha_n} \mu(z)dz$ ..... (2.44)

*d. Largest of Maximum (LOM)*

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

*e. Smallest of Maximum (SOM)*

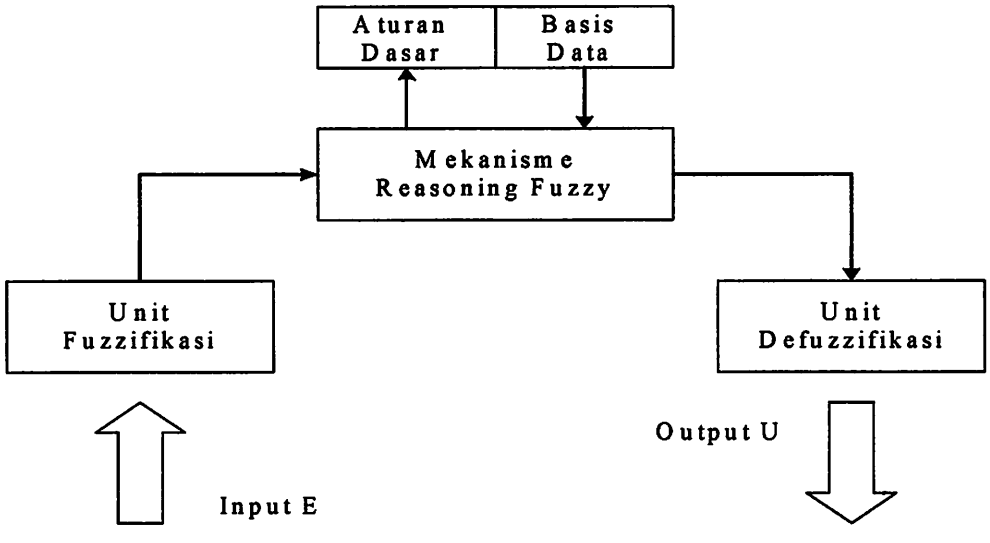
Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terkecil dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Brace dan Rut Letford, L.I Larkin dan C.C Lee menunjukkan hasil pemetaan MOM (Mean Of Maximum) mempunyai kinerja yang lebih baik pada tanggapan peralihan (respon transien), sedangkan hasil pemetaan COA (Center Of Area) mempunyai kinerja yang baik pada keadaan tunaknya (steady state). Bila menggunakan MOM *fuzzy logic controller* cocok digunakan pada sistem *multi relay le*vel

sedangkan *fuzzy logic controller* yang didasari COA umumnya mempunyai *mean square* yang lebih kecil dibandingkan dengan MOM.

### 2.13.6 Struktur Kontrol Logika Fuzzy

Secara umum kontroler logika fuzzy memiliki empat bagian pokok :

- ❖ Unit Fuzzifikasi berfungsi untuk mentransferkan sinyal masukan yang bersifat *crisp* ke besaran linguistik fuzzy dengan menggunakan mekanisme *reasoning.*
- ❖ Basis Pengetahuan berisi aturan dasar yang diperlukan untuk mencapai tujuan pengontrolan
- ❖ Mekanisme *reasoning* menjalankan bermacam operasi logika fuzzy untuk memperoleh aksi kontrol dari input yang diterima.
- ❖ Unit Defuzzifikasi berfungsi mentransformasikan aksi kontrol yang bersifat fuzzy menjadi besaran *crisp.*

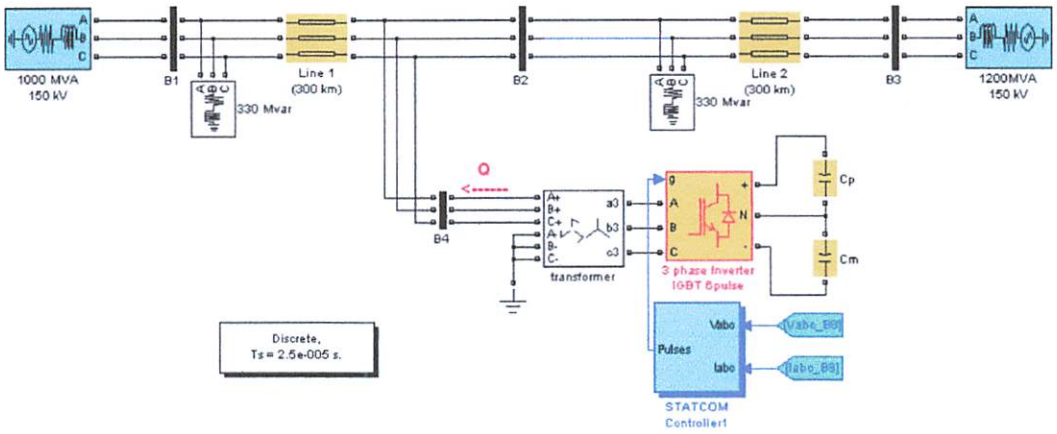



Gambar 2.23. Struktur Dasar *Fuzzy Logic Controller.*

# BAB III

## PRINSIP KERJA DAN PEMODELAN STATCOM DENGAN *FUZZY LOGIC CONTROL* ( FLC )

### 3.1 Pemodelan Sistem




Gambar 3.1 Pemodelan Sistem Saluran Transmisi dan STATCOM Secara Umum Pada *Simulink MATLAB*

Rangkaian pada Gambar 3.1 menunjukkan skema sistem transmisi dan STATCOM secara umum pada *simulink MATLAB*. Sistem 3 fasa seimbang terdiri dari 2 sumber yang menyuplai beban yang terpisahkan oleh impedansi saluran transmisi. STATCOM dipasang paralel pada bus beban yang berfungsi sebagai kompensator daya yang mana mengurangi besarnya arus yang mengalir pada saluran transmisi sehingga drop tegangan pada sistem tersebut akan berkurang.

Drop tegangan yang disimulasikan diakibatkan oleh banyaknya pembebanan pada saluran transmisi. Semakin besar jumlah daya yang diserap dari pembebanan tersebut, maka arus sumber yang mengalir pada sistem juga akan semakin besar sehingga drop tegangan yang terjadi juga akan semakin besar.

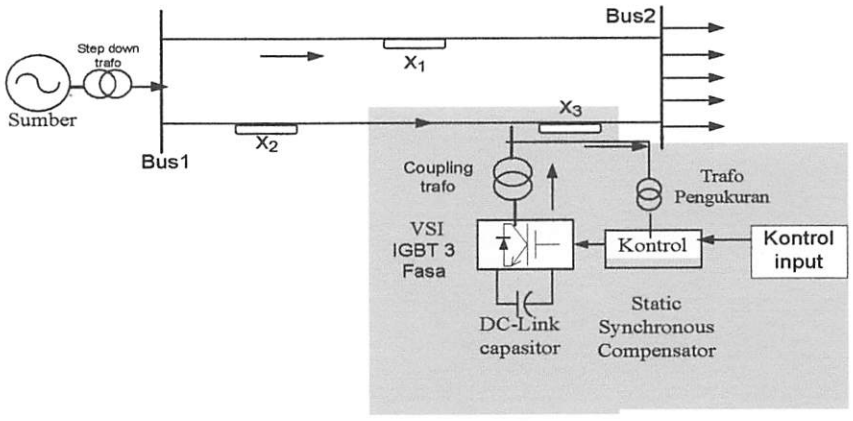
Didalam saluran transmisi persoalan tegangan sangat penting baik dalam

keadaan operasi maupun perancangannya harus selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik disaluran. Besar tegangan yang diinginkan biasanya berkisar antara -10% sampai +5% dari tegangan nominalnya[7]. Untuk menaikkan tegangan terdapat beberapa cara yang dapat dilakukan. Drop tegangan pada sistem transmisi tenaga listrik ditekan seminimal mungkin untuk menghindari dari kerusakan atau tidak bekerjanya suatu peralatan yang sensitive terhadap tegangan. Dalam hal ini, alternative yang akan digunakan untuk mengatasi masalah tersebut yakni dengan memasang STATCOM dengan harapan akan mempunyai harga solusi yang lebih efektif untuk menjaga tegangan sistem tetap konstan sesuai dengan keadaan normal, sehingga dapat membangun tingkatan kualitas tegangan yang tepat sesuai yang dibutuhkan oleh konsumen.

Adapun prinsip kerja dari STATCOM beserta sistem kontrolnya akan dijelaskan pada subbab berikut ini.

## 3.2 Prinsip Kerja *Static Synchronous Compensator* ( STATCOM)[2][6]

*Static Synchronous Compensator* atau STATCOM merupakan salah satu perangkat dari *Flexible AC Transmission System* (FACTS) yang terhubung secara *shunt* pada bus saluran transmisi .AC, pada prinsipnya bertujuan untuk mengkompensasi daya yang diserap beban sehingga meminimalkan drop tegangan yang terjadi pada saluran transmisi tenaga listrik yang dapat berakibat negative pada perangkat-perangkat yang sensitive terhadap tegangan pada sistem tersebut. STATCOM terdiri dari perangkat elektronika daya yang mampu meregulasi tegangan dengan cara membangkitkan atau menyerap daya reaktif. Gambar 3.2 menunjukkan diagram dasar dari STATCOM.

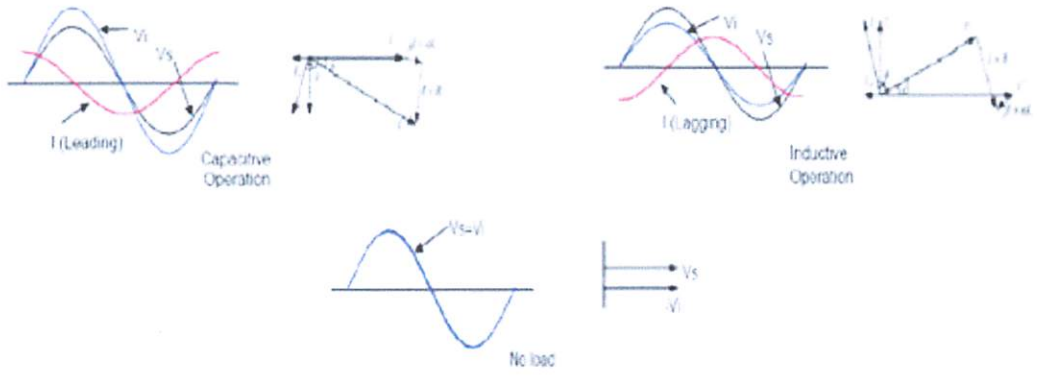



Gambar 3.2 Diagram Dasar STATCOM

Prinsip kerja STATCOM berdasarkan pada pertukaran daya reaktif antara sistem AC dengan *Voltage Source Inverter* (VSI). VSI membangkitkan sumber tegangan AC yang dapat dikontrol dibelakang reaktansi bocor transformator. Tegangan ini kemudian dibandingkan dengan tegangan AC pada sistem. Jika tegangan AC sistem lebih kecil dibanding tegangan VSI maka STATCOM bertindak seperti kapasitor dalam sistem dan menginjeksikan daya reaktif ke sistem .

STATCOM juga dapat menyerap daya reaktif dari sistem dan bertindak seperti induktor dalam sistem, jika tegangan sistem lebih tinggi daripada tegangan output inverter (VSI). Hal ini terjadi pada sistem transmisi panjang dan dipengaruhi oleh *line charging* kapasitor. Dengan penyerapan daya reaktif tersebut, maka tegangan sistem dapat dijaga konstan. Dan jika terjadi persamaan tegangan antara inverter dengan sistem AC, maka tidak terjadi pertukaran daya reaktif antara inverter dengan sistem AC. Jumlah / besarnya daya reaktif yang dibangkitkan ataupun diserap sebanding dengan perbedaan kedua tegangan.

Berikut ini merupakan beberapa mode operasi dasar dari STATCOM.

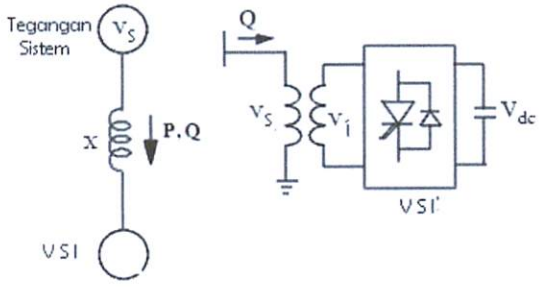



Gambar 3.3 Mode Operasi Dasar dari STATCOM[2]

Pada awalnya untuk mendapatkan jumlah/ besar daya yang diinjeksikan ke sistem, tegangan sistem pada bus yang turun dibandingkan dengan tegangan referensi. Perbandingan tegangan sistem dengan tegangan referensi merupakan sinyal error yang akan diproses dalam sistem kontrol. Output sinyal kontrol nantinya merupakan gelombang sinusoida 3 fasa yang digunakan untuk penyalaan *switch* IGBT inverter. Output inverter merupakan arus sinusoidal. Arus keluaran inverter ini akan dikontrol lagi agar sesuai dengan arus keluaran yang diharapkan. Arus keluaran inverter nantinya akan mengkompensasi besarnya daya yang diperlukan sistem untuk menaikkan tegangan bus menuju kondisi normal.

Keluaran arus dari inverter ini merupakan arus reaktif yang jumlah ataupun besarnya tergantung pada sudut penyulutan (α) thyristor, yang mana memberikan pergeseran fasa antara tegangan STATCOM ( $V_i$ ) dengan tegangan Bus (Vs). Tergantung pada sudut penyulutan ini (α), keadaan pengisian dari kapasitor DC dirubah dan kemudian amplitude dari tegangan bus STATCOM ($V_i$)

berubah. Perbedaan amplitude dari tegangan bus STATCOM dan tegangan jaringan ($V_s$) bersamaan dengan reaktansi bocor transformator ($X_r$)nya menentukan amplitude dan arus reaktif yang diinjeksikan kedalam sistem daya, sebagaimana diberikan persamaan matematis beserta gambar prinsip kerja dari STATCOM berikut ini




Gambar 3.4 Prinsip Dasar STATCOM[2][6]

$$I = \frac{V_s - V_i}{X_{Tr}} \quad \ldots\ldots (3.1)$$

$$P = \frac{V_s \times V_i}{X_{Tr}} \quad \ldots\ldots (3.2)$$

$$Q = \frac{V_i(V_i - V_s)}{X_{Tr}} \quad \ldots\ldots (3.3)$$

Dimana :

I : Injeksi Arus Reaktif

P : daya aktif

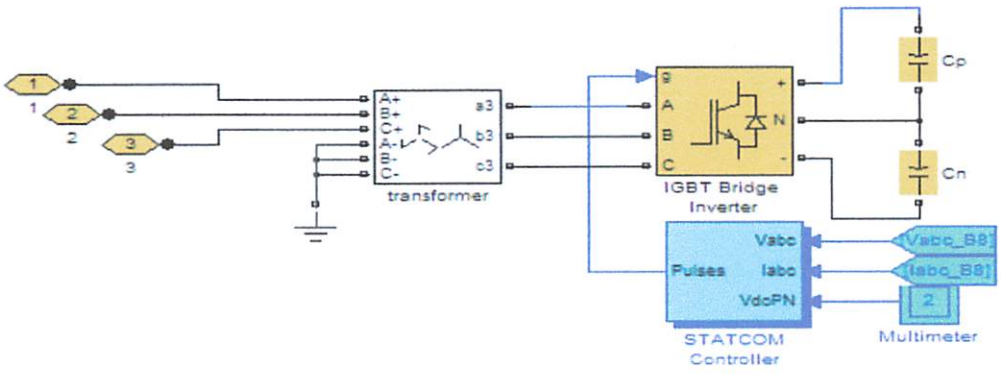
Q : daya reaktif

$V_i$ : Tegangan inverter line to line

$V_s$ : Tegangan sumber line to line

$X_{Tr}$ : reaktansi bocor yang terhubung dengan transformator gandeng (*coupling transformer*).

## 3.3 Pemodelan STATCOM




Gambar 3.5 Pemodelan STATCOM pada *Simulink MATLAB*

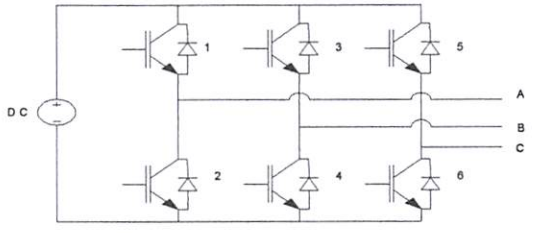
Berdasarkan konfigurasinya, STATCOM merupakan suatu sistem elektronika daya dengan sistem kontrol yang komplek mempunyai beberapa komponen penting, antara lain *Voltage Source Inverter*(VSI), kapasitor DC (*DC-Link capasitor*) dan rangkaian kontrol. Sistem kontrol pada STATCOM mampu meregulasi tegangan pada bus AC maupun tegangan pada *DC-link capasitor.*

### 3.3.1 *Voltage Source Inverter* (VSI)[4]

*Voltage Source Inverter* (VSI atau VSC) merupakan komponen utama dari STATCOM dan peralatan FACTS yang lain. Tujuan utamanya adalah membangkitkan tegangan AC dari sebuah tegangan DC dengan hasil bentuk gelombang sinusoidal, sehingga sering juga disebut DC – AC konverter atau inverter. Hal ini bisa diperoleh dengan pengaturan *switch* pada rangkaian *switch.* VSI harus mampu membangkitkan tegangan AC yang simetris dengan magnitude

VSI harus mampu membangkitkan tegangan AC yang simetris dengan magnitude dan frekuensi yang diinginkan. Frekuensi dan magnitude yang dihasilkan dapat berharga konstan (tetap) atau bervariasi sesuai dengan aplikasinya. Inverter yang paling sederhana digunakan dalam skripsi ini menghasilkan gelombang kotak karena menswitch tegangan *on-off* secara langsung.

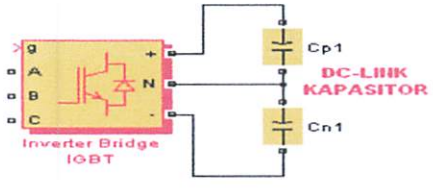
Dalam konfigurasi perancangan STATCOM ini digunakan VSI 3 fasa serta terdiri dari 2 buah alat switch seperti IGBT untuk tiap fasanya, sehingga diperlukan 6 buah IGBT untuk sistem 3 fasanya, seperti ditunjukkan pada gambar 3.6. Rangkaian inverter untuk tiap fasanya adalah sebagai berikut




Gambar 3.6 Rangkaian *Voltage Source Inverter* 3 fasa[4]

Pada pengoperasian inverter, *gate* a dan a' harus bekerja berkebalikan, agar tidak terjadi *short circuit* pada rangkaian yang akhirnya dapat merusak *switch device.* Tiap *gate* diaktifkan dengan sinyal pulsa yang dihasilkan oleh rangkaian pembangkit pulsa

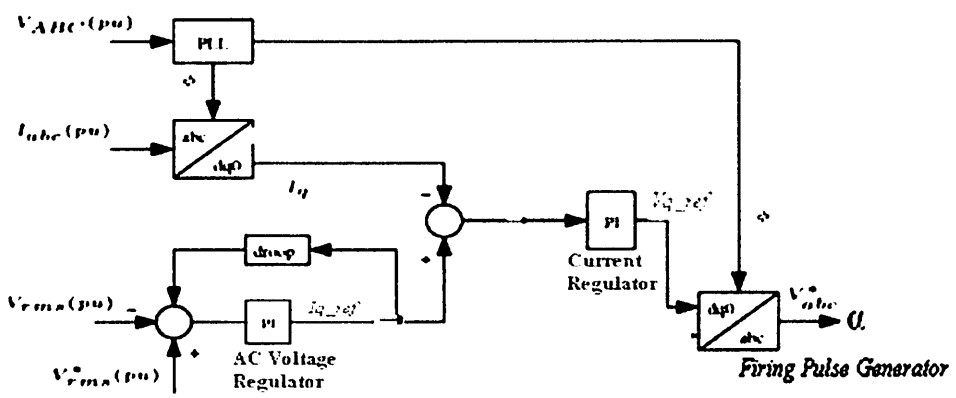
Pemodelan rangkaian Inverter 3 fasa didalam MATLAB ditunjukkan pada gambar 3.7.




Gambar 3.7 Pemodelan Rangkaian *Voltage Source Inverter* 3 fasa *Simulink Matlab 7.0.4*[6]

Kapasitor yang dihubungkan pada sisi DC dari VSI pada gambar diatas bekerja sebagai sumber tegangan DC saat *stedy state*. Tegangan Inverter mengalami pergeseran fasa dari tegangan sumber untuk mengkompensasi rugi-rugi transformator atau VSI agar kapasitor tetap terisi ( *charged* ).

### 3.3.2 Konfigurasi Rangkaian Kontrol STATCOM[11]




Gambar 3.8 Skema Rangkaian Kontrol STATCOM[11]

Sistem kontrol STATCOM berdasarkan skema diatas merupakan sistem kontrol yang komplek yang membutuhkan pengukuran nilai sesaat (*instatenous value*) dari tegangan dan arus 3 fasa atau disebut sebagai *decouple current controller* .

Fungsi utama dari sistem kontrol ini adalah untuk menaikkan atau menurunkan tegangan DC kapasitor, sehingga tegangan AC yang dibangkitkan mempunyai amplitudo yang sesuai untuk membangkitkan atau menyerap daya reaktif yang diperlukan.

Kompensasi melalui sistem kontrol ini didapatkan dengan pengontrolan komponen arus pada sistem 2 dimensi yaitu *direct-axis* dan *quadrature-axis* (dq0)

dari arus AC. Komponen dq0 tersebut diregulasi dengan menggunakan 2 buah kontroller *Proportional-Integral* (PI) yang terpisah. Harga sesaat dari referensi $I_q$ ($I_q$_ref) pada gambar 3.8 berfungsi untuk mengatur aliran daya reaktif yang didapatkan dengan pengontrolan tegangan terminal $V_{AC}$ yang terukur(Vmeas) dengan tegangan referensi(Vref).

Adapun sistem rangkaian kontrol STATCOM terdiri dari[6][11] :

- *Phase locked loop* (PLL), digunakan untuk mensinkronisasi jalur kontrol komponen urutan positif dari tegangan primer 3 fasa ( $V_1$) sehingga dapat beroperasi pada referensi transformasi abc ke dq0. Output dari PLL (sudut $\alpha=\omega t$) digunakan untuk perhitungan komponen *direct axis* dan *quadrature axis* dari arus dan tegangan AC 3 fasa.($V_d$, $V_q$, $I_d$, $I_q$)
- Sistem pengukuran, yang mengatur komponen arus d dan arus q dan tegangan urutan positif yang akan dikontrol.
- Regulasi tegangan yang dilakukan menggunakan 2 regulator PI

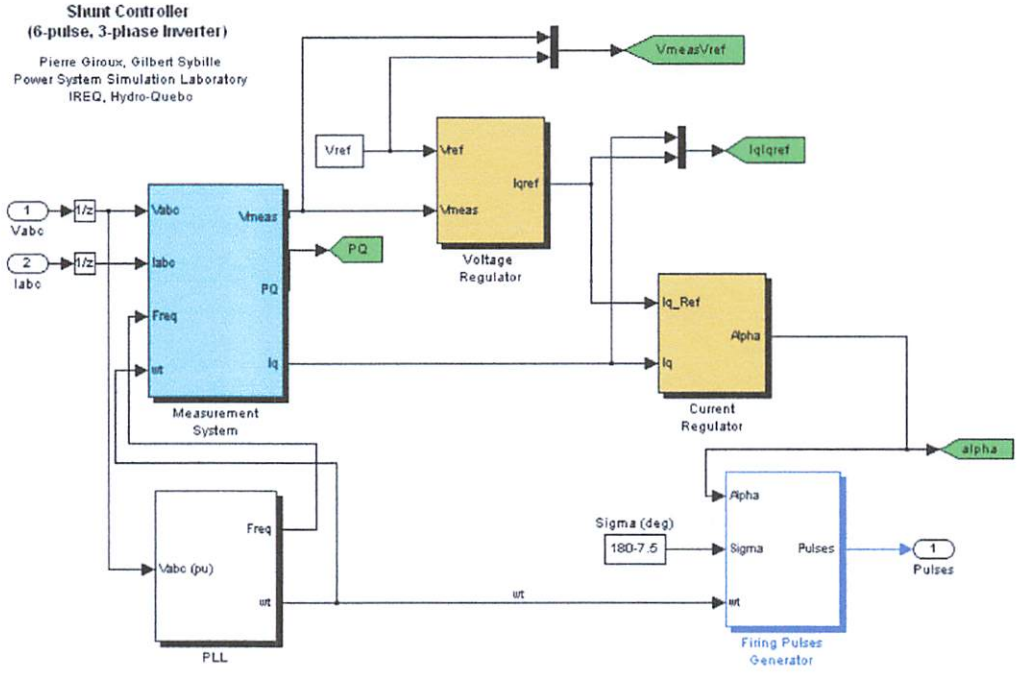
  Bagian loop terluar terdiri dari *AC Voltage Regulator*. Output dari *AC Voltage regulator* adalah arus reaktif referensi dalam kuadran q ($I_q$ref ) yang didapat dari tegangan yang terukur($V_{meas}$) dan tegangan referensi ($V_{ref}$). $I_q$ref ini kemudian digunakan oleh regulator arus ( loop Bagian dalam ). Output dari regulator arus ini adalah sudut $\alpha$ yang merupakan fasa pergeseran (*phasa shift*) dari tegangan inverter dengan tegangan sistem, Sudut ini besarnya hampir mendekati nol.

  ( Iq = arus dalam quadrature yang tugasnya mengatur aliran daya reaktif )

➢ Pembangkit sudut penyalaan (*firing pulse generator*)

Membangkitkan pulsa untuk individual inverter 6 pulsa dari output PLL (ωt) dan output regulator arus (sudut α).

Desain blok kontrol STATCOM diharapkan dapat mendeteksi besarnya tegangan drop pada saluran transmisi dan menginjeksikan arus untuk mengkompensasi daya sehingga dapat menaikkan tegangan bus sesuai dengan keadaan normal. Sistem diasumsikan seimbang dan dalam keadaan steady state.




Gambar 3.9 Pemodelan Rangkaian Kontrol STATCOM pada *Simulink MATLAB*

### 3.3.3 Regulator Tegangan dan Arus

Untuk mendapatkan parameter-parameter input regulator arus dan regulator tegangan, maka dilakukan pengukuran arus dan tegangan pada urutan positif sebagai berikut :

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad \text{..... (3.4)}$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad \text{..... (3.5)}$$

Injeksi yang tepat baik itu besar maupun waktunya, didalam meminimalisir drop tegangan diperlukannya suatu kontrol yang mampu mengatasi permasalahan tersebut sehingga didapatkan profil tegangan yang bagus dimana tegangan kembali dalam kondisi normal dan dengan respon yang cepat.

Didalam analisis penentuan drop tegangan dari sistem 3 fasa yang nantinya akan menentukan besarnya/jumlah daya reaktif yang diinjeksikan STATCOM, maka diperlukan perubahan sistem tegangan 3 dimensi abc menjadi sistem 2 dimensi *direct-quadrature* (dq). Variabel yang diatur pada perubahan tegangan ini hanya ada 2, pengaturan salah satu variabel memberikan perubahan yang sama pada tegangan 2 fasa.

Dari persamaan tegangan urutan positif diatas didapatkan nilai tegangan VdVq (tegangan dalam quadran dq) dengan transformasi abc ke dq dan nilai magnitude tegangannya (V). Dengan cara yang sama dari persamaan arus urutan positif didapatkan nilai arus IdIq (arus dalam kuadran dq)

**Transformasi dari Vabc ke Vdq0**[6]

Transformasi ini menghitung *direct axis*, *quadrature axis* dan komponen urutan nol dari sinyal (arus/tegangan ) 3 phasa. Persamaan transformasi yang digunakan yakni:

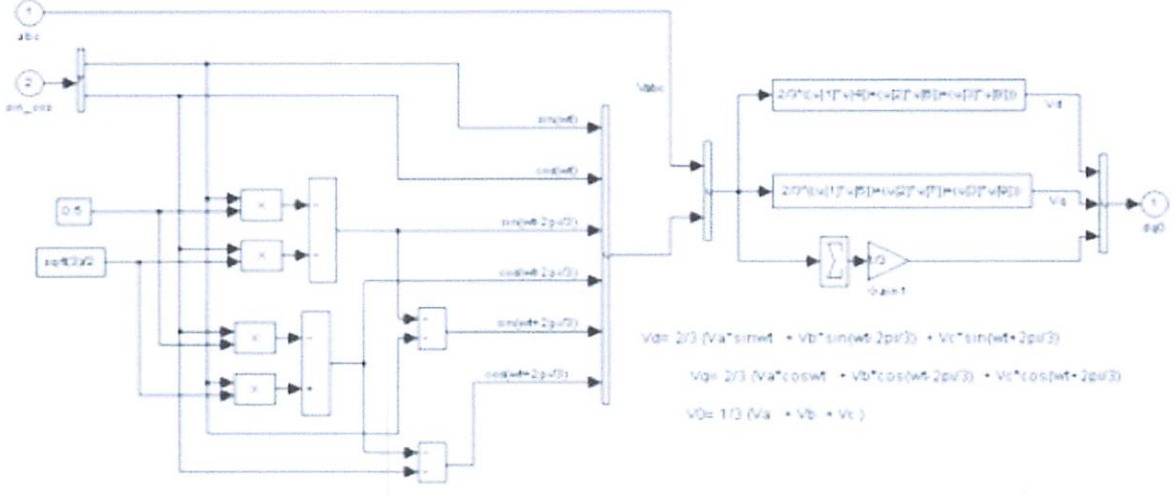
$$Vd = \frac{2}{3}\left[Va\sin(\omega t) + Vb\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + Vc\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})\right] \text{.....} \quad (3.6)$$

$$Vq=\frac{2}{3}\left[Va\cos(\omega t)+Vb\cos(\omega t-\frac{2\pi}{3})+Vc\cos(\omega t+\frac{2\pi}{3})\right]\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.7)$$

$$V_0=\frac{1}{3}(V_a+V_b+V_c) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.8)$$

Persamaan transformasi diatas berlaku juga pada arus tiga phasa yaitu dengan mengganti variable $V_a$, $V_b$, $V_c$ , $V_d$, dan $V_q$ dengan variable $I_a$,$I_b$,$I_c$, $I_d$ dan $I_q$.

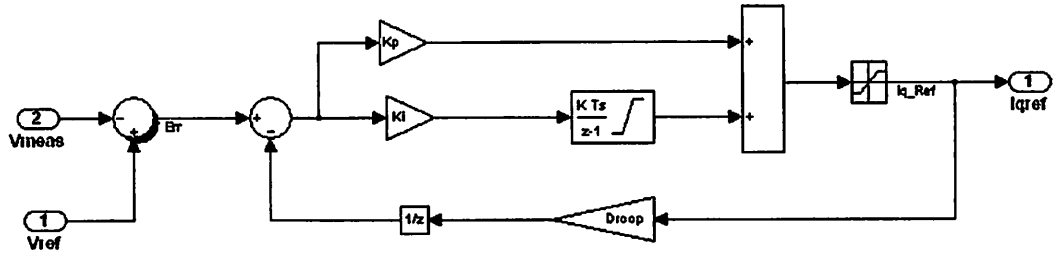
Tujuan dari transformasi ke referensi dq ini, adalah untuk memudahkan pemprosesan sinyal dimana tegangan sistem (pu) 3 phasa diubah menjadi 2 phasa Vd dan Vq. Selain itu dengan transformasi ini tidak terpengaruh oleh harmonisa sistem dan mempunyai respon yang cepat. Komparator membandingkan hasil konversi dq dari tegangan beban dan tegangan sumber/referensi. Selisih ini membentuk gelombang sinusoida yang nantinya akan diperbesar amplitudonya dan dikontrol oleh kontroller PI. Gambar 3.10 menunjukkan bentuk simulasi dari transformasi dq0 di MATLAB.



Gambar 3.10 Rangkaian Konversi 3 fasa Vabc ke Vdq0[6]

### 3.3.3.1 *AC Voltage Regulator*

Dari *measurement system* didapatkan magnitude tegangan input VSI, sebut saja Vmeas yang mana merupakan sinyal tegangan sistem pada bus yang turun. Selanjutnya Vmeas dibandingkan dengan tegangan referensi (Vref) yang besarnya sekitar 1 pu. Selisih atau perbandingan tegangan sistem dengan tegangan referensi merupakan sinyal error yang akan diproses dalam sistem kontrol sebagai berikut :



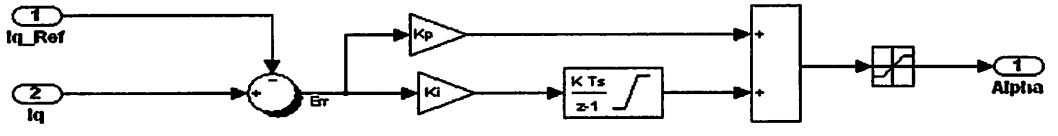

Gambar 3.11 PI Kontrol untuk Regulator Tegangan AC

Hasil perbandingan tegangan sistem dengan tegangan referensi merupakan input dari kontroller *Proportional*-Integral (PI). Kontroller ini memiliki konstanta P (Gain) dan I ( time konstan).

Dari blok diagram diatas didapatkan output Iqref yaitu arus referensi (dalam quadran q) yang tujuannya mangatur aliran daya reaktif.

### 3.3.3.2 Current Regulator

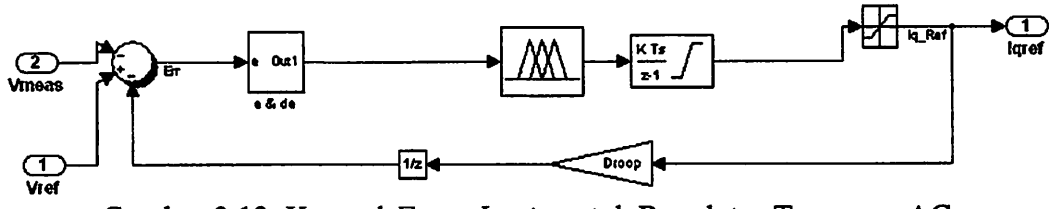
Parameter Iqref, Iq akan dibandingkan menggunakan PI kontroller pada regulator arus yang kemudian hasilnya adalah alpha (α) yang merupakan sudut fasa seperti pada gambar 3.12




Gambar 3.12 PI Kontrol untuk Regulator Arus AC

Keluaran besar/jumlah dari arus reaktif tergantung dari sudut tegangan fasa tegangan VSI(α), yang mana nantinya memberikan pergeseran fasa antara tegangan STATCOM dan tegangan bus jaringan.

## 3.4 Pemodelan *Fuzzy Logic Controller* pada STATCOM




Gambar 3.13 Kontrol *Fuzzy Logic* untuk Regulator Tegangan AC

Dalam skripsi ini *Fuzzy Logic Controller* (FLC) yang digunakan atau ditempatkan yakni sebagai pengganti PI kontroller pada *AC Voltage Regulator* STATCOM. FLC pada *AC Voltage Regulator* STATCOM ini, secara mendasar mempunyai prinsip kerja yang sama dengan PI kontroller yang digunakan pada *AC Voltage Regulator* sebelumnya. Hanya saja dalam kasus ini, tidak hanya sinyal error tegangan hasil perbandingan antara tegangan pengukuran dengan tegangan referensi saja melainkan ditambahkan dengan sinyal *delta error* (Δev). *Delta error* pada FLC ini didefinisikan sebagai selisih error sekarang dengan error sebelumnya.

- Error $= \Delta E(t) = v^{ref}(t)\text{-}vmeas(t)_1$ ..... (3.9)

- Delta error $= \Delta E(t\text{-}1) = \Delta v(t) - \Delta vmeas(t\text{-}1)$ ..... (3.10)

Dimana :

V[t] = *error* sekarang.

V[t-1] = *error* sebelumnya

Fungsi dari *delta error* ini sendiri yakni membantu suatu kontroller untuk lebih cepat dan lebih akurat dalam mengatasi permasalahan drop tegangan.

Proses pertama didalam *FLC* adalah fuzzyfikasi, setiap input *FLC* dari proses ini didapatkan nilai fungsi keanggotaan dari tiap himpunan fuzzy yang ada unutk tiap input, setelah semua input telah melalui proses fuzzyfikasi (proses fuzzyfikasi dijelaskan pada bab 2) maka untuk mengambil suatu keputusan maka dari hasil fuzzyfikasi akan dimasukkan kedalam sistem pengambil keputusan yang lebih dikenal dengan aturan-aturan dasar (*rule base*). Aturan-aturan dasar ini berisi tentang relasi-relasi yang menghubungkan antara input dan output. Setelah keputusan telah diambil maka proses selanjutnya melakukan proses defuzzyfikasi. Proses defuzzifikasi adalah proses pemetaan dari hasil aksi kontrol inferensi fuzzy. Tujuan dari defuzzifikasi adalah untuk menghasilkan aksi kontol non fuzzy (*crisp*)yang mewakili distribusi kemungkinan dari hasil kontrol inferensi fuzzy.

### 3.4.1 Prosedur Pengontrolan Dengan *Fuzzy Logic Controller.*

Pengaturan dengan menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) merupakan kumpulan aturan-aturan kontrol sebagai acuan untuk menyatakan aksi kontroler. Aturan tersebut disusun berdasarkan pengamatan atau perkiraan terhadap respon dinamik sistem. Untuk menentukan *rule base* digunakan metode pendekatan secara *linguistic*, dengan melakukan pengamatan respon terhadap masukan maka selanjutnya ditentukan *rule base* kontrol logika fuzzy yang sesuai.

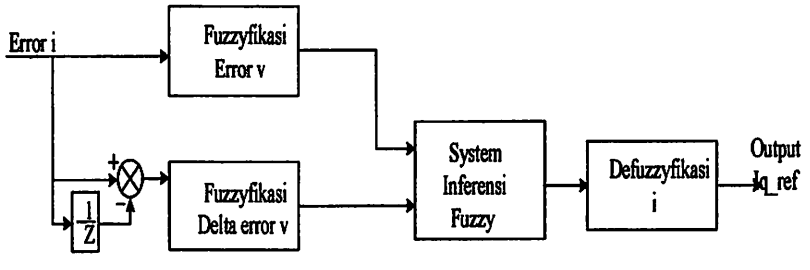
Sedangkan untuk mendesain kontrol logika fuzzy yang dilakukan adalah melalui langkah-langkah sebagai berikut :

### 3.4.1.1 Menentukan Kuantisasi Variabel Masukan dan Keluaran

Input yang digunakan dalam proses pengontrolan STATCOM pada *AC Voltage Regulator* dengan menggunakan FLC ini ada 2 macam yaitu *error* dan *delta error*. Hasil selisih tegangan pada bus yang turun dengan tegangan referensi dengan satu keluaran yaitu sinyal kontrol Iq_ref (arus referensi dalam quadan q) yang berfungsi mengatur aliran daya reaktif.

Arus kompensasi reaktif (Iq_ref) dari *AC Voltage Regulator* akan diumpan balikan ke input sistem kontrol untuk kemudian dibandingkan antara tegangan pengukuran (tegangan bus yang turun) dengan tegangan referensi sehingga kontroller berfungsi untuk memaksimalkan kebutuhan injeksi arus reaktif (Iqmax). Proses tersebut akan terus berlangsung selama sistem tersebut bekerja.

Untuk tiap fasa, masukan dari FLC adalah *error* dan *delta error*, hasil perbandingan tegangan pengukuran dengan tegangan referensi ditunjukkan pada gambar 3.14, sedangkan keluaran FLC adalah sinyal kontrol referensi arus pada kuadran q (Iq_ref) yang mengatur aliran daya reaktif, yang kemudian dikontrol lagi pada *current regulator* yang nantinya akan mengkompensasi besarnya daya yang diperlukan sistem untuk menaikkan tegangan bus menuju kondisi normal.




Gambar 3.14 Pemodelan Fuzzy Logic Controller Tiap Fasa

### 3.4.1.2 Menentukan Rule Base[5]

*Rule base* merupakan sekelompok aturan dalam fuzzy yang mengolah signal data input dan signal data output. Pada penyusunan *rule base fuzzy* akan dibuat aturan-aturan dasar untuk pengambilan keputusan pada output.

Banyaknya jumlah kelompok rule base akan dibuat sesuai dengan banyaknya signal keluarannya. Jika signal keluaran fuzzy kontroller hanya terdapat satu macam, maka akan hanya terdapat satu macam kelompok *rule base.* Terdapat dua masukan FLC tiap fasa yang dapat digunakan yaitu *error* (e) dan *delta error* (de) serta satu keluaran yaitu signal kontrol.

Kinerja yang lebih baik dapat diperoleh dengan pembagian ruang yang lebih banyak, misalnya tujuh nilai yaitu *Negatif Big* (NB), *Negatif Medium* (NM), *Negatif Small* (NS), *Zero* (Z), *Positif Small* (PS), *Positif Medium* (PM), dan *Positif Big* (PB)

Pembagian nilai dengan tujuh nilai sering digunakan pada perancangan *Fuzzy Logic Control* (FLC) karena pembagian ruang tersebut sudah dapat mewakili ruang keseluruhan dan didapat hasil yang lebih baik. Prototipe dan penyempurnaan berturut-turut ditunjukan pada Tabel 3.1. Secara langsung pembagian ruang masukan mempengaruhi jumlah aturan kontrol yang dihasilkan. Pada sistem *Multi Input Single Output* (MISO), jumlah aturan kontrol yang dihasilkan adalah 7 x 7 = 49 aturan kontrol.

Table 3.1. Rule Base untuk Signal Kontrol dengan Dua Masukan Error dan Delta Error

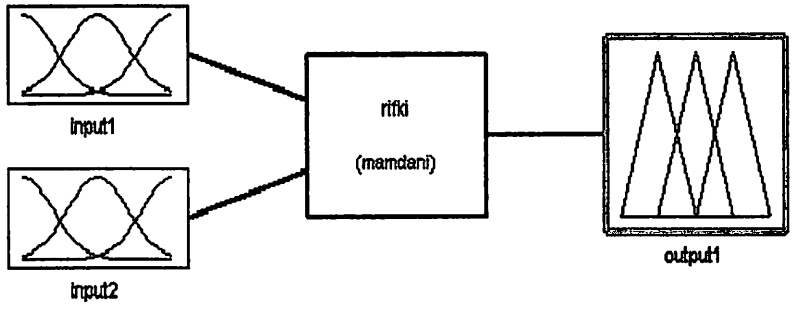
| de / e | NB | NM | NS | Z | PS | PM | PB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NB | NB | NMB | NM | NM | NS | NS | Z |
| NM | NMB | NM | NM | NS | NS | Z | PS |
| NS | NM | NM | NS | NS | Z | PS | PS |
| Z | NM | NM | NS | Z | PS | PS | PM |
| PS | NS | NS | Z | PS | PS | PM | PM |
| PM | NS | Z | PS | PS | PS | PM | PMB |
| PB | Z | PS | PS | PM | PM | PMB | PB |

### 3.4.1.3 Menentukan Membership Function

Fungsi keanggotaan (*membersip function*) menyatakan fungsi secara keseluruhan yang menyatakan derajat keanggotaan (*membership grade*) dari masing-masing variabel. Sedangkan yang dimaksud variabel disini adalah *error*, *delte error* dan signal kontrol.

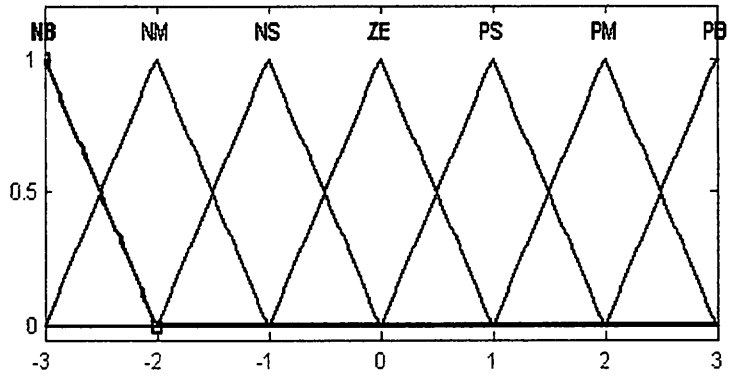
Didalam penggunaan toolbox Matlab telah tersedia toolbox untuk kontroler fuzzy. Pada Gambar 3.15 diperlihatkan tampilan window untuk pendefinisian inputan pada fuzzy kontroller yaitu *error* dan *delta error* dengan tipe fuzzy yang digunakan adalah fuzzy Mamdani dan satu keluaran yaitu signal

kontrol. Selain itu juga ditentukan untuk operasi *reasoning* yaitu *Min* untuk *And Method* dan *Max* untuk *Or Method.* Sedang untuk proses *Implication* menggunakan *Min*, *Aggregation* menggunakan *Max*, dan defuzzyfication menggunakan *Center of Area* (COA)



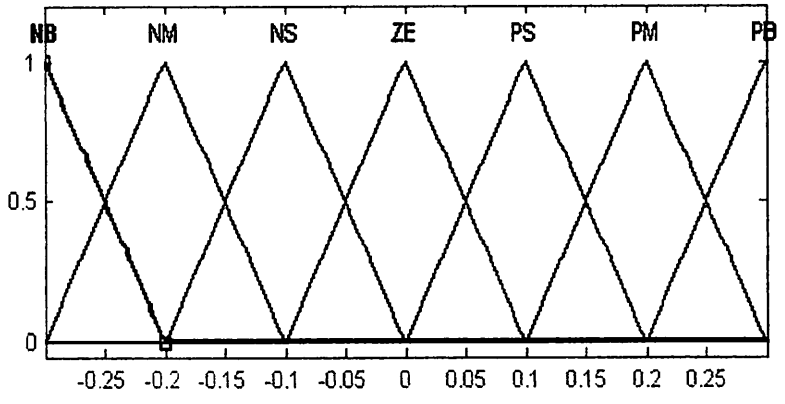

Gambar 3.15 Tampilan Window Fuzzy Inference Sistem.

Sedangkan fungsi keanggotaan (*membersip function*) yang dipakai untuk masukan *error* seperti pada Gambar 3.16 adalah fungsi segitiga yang digunakan untuk membagi daerah batas *error* yang akan difuzzifikasi untuk masukan pada *rule base* fuzzy kontroller. Pada daerah batasan ini dipakai tujuh fungsi segitiga untuk masukan yaitu *Negatif Big* (NB), *Negatif Medium* (NM), *Negatif Small* (NS), *Zero* (Z), *Positif Small* (PS), *Positif Medium* (PM), dan *Positif Big* (PB).



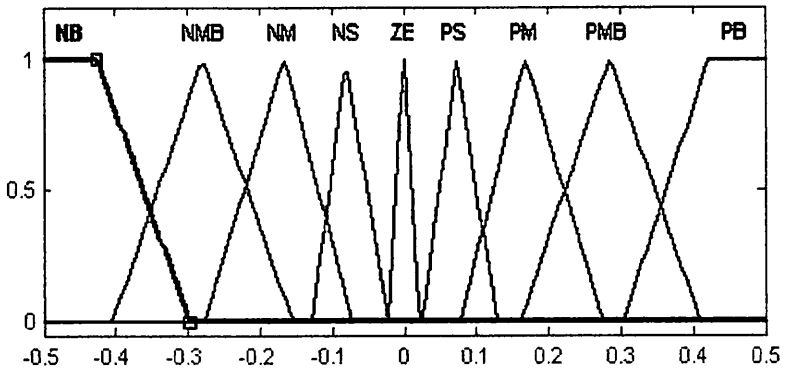

Gambar 3.16 Membership Function Error.

Fungsi keanggotaan (*membersip function*) yang dipakai untuk masukan *delta error* seperti pada Gambar 3.17 adalah fungsi segitiga yang digunakan untuk membagi daerah batas *delta error* yang akan difuzzifikasi untuk masukan pada *rule base* fuzzy kontroller. Pada daerah batasan ini dipakai tujuh fungsi segitiga untuk masukan yaitu *Negatif Big* (NB), *Negatif Medium* (NM), *Negatif Small* (NS), *Zero* (Z), *Positif Small* (PS), *Positif Medium* (PM), dan *Positif Big* (PB)




Gambar 3.17 Membership Function DeltaError

Sedangkan fungsi keanggotaan (*membersip function*) yang dipakai untuk keluaran signal kontrol seperti pada Gambar 3.18 adalah fungsi segitiga yang digunakan untuk membagi daerah batas signal kontrol yang akan didefuzzifikasi untuk keluaran pada fuzzy kontroller. Pada daerah batasan ini dipakai sembilan fungsi segitiga untuk masukan *Negatif Big* (NB), *Negatif Medium Big* (NMB), *Negatif Medium* (NM), *Negatif Small* (NS), *Zero* (Z), *Positif Small* (PS), *Positif Medium* (PM), *Positif Medium* Big (PMB), dan *Positif Big* (PB).




Gambar 3.18. Membership Function Signal Kontrol.

### 3.4.2 Proses Fuzzyfikasi

Setelah dihasilkan tingkat kuantisasi masing-masing signal *error* dan *delta error* dilanjutkan proses fuzzyfikasi yaitu proses yang mengubah data numerik menjadi data fuzzy.

Ada dua macam proses fuzzyfikasi untuk kasus ini yaitu :

1. Fuzzyfikasi *error*
2. Fuzzyfikasi *delta error*

### 3.4.6 Proses Inference

*Inference procces* merupakan proses untuk mendapatkan aksi signal keluaran (signal kontrol) dari suatu kondisi masukan (*error* dan *delta error*) dengan dasar *rule base* yang telah disusun sesuai Tabel 3.1. Dalam *toolbox* yang digunakan maka akan terdapat empat puluh sembilan aturan kontrol yang harus dimasukkan.

### 3.4.7 Proses Defuzzyfikasi

Proses defuzzifikasi merupakan proses untuk mengubah data fuzzy menjadi data numerik sebagai aksi signal keluaran. Data tersebut dihasilkan diperoleh pada proses *inference*. Dalam sistem ini karena metode untuk mambentuk *membership function* adalah metode triangular (segitiga), maka untuk menentukan sinyal aktuasi yang lebih cocok adalah menggunakan metode *Center of Area* (COA) atau metoda titik berat.

Contoh Perhitungan :

Dalam perhitungan ini penulis hanya memberikan dua contoh dalam menentukan nilai aksi kontrol dengan metode COA, seperti di bawah ini:

- Untuk *Error* = 0.5 dan *Delta Error* = 0.05

  Kedua masukan ini mempunyai variabel linguistik yang berada pada Z dan PS, dengan nilai derajat keanggotaan pada perpotongan garis tringular sebagai berikut :

  $\mu Z\ (e) = (1.2 - 0.5) / 1.2 = 0.58$

  $\mu PS\ (e) = (0.5 - 0) / 1 = 0.5$

  $\mu Z\ (de) = (0.1 - 0.05) / 0.1 = 0.05$

  $\mu PS\ (de) = (0.05 - 0) / 0.1 = 0.5$

  Kemudian berdasarkan Tabel 3.1, maka dapat disusun aturan dasar untuk kondisi ini sebagai berikut :

Jika E = Z dan dE = Z maka u =Z

Jika E = Z dan dE = PS maka u =PS

Jika E = PS dan dE = Z maka u =PS

Jika E = PS dan dE = PS maka u =PM

Karena hubungan antara E dan dE menggunakan penghubung "dan" maka pada bagian *consequence*-nya dipilih nilai minimum. Untuk mendapatkan nilai aksi kontrol (u) perlu dilakukan proses deffuzzyfikasi dengan mengunakan metode COA dengan menggunakan persamaan 2.43 diperoleh keluaran sinyal kontrol :

$$\mu(COA) = \frac{(0.5 \times 0.58) + (0.5 \times 0.5) + (0.05 \times 0.05) + (0.05 \times 0.5)}{0.58 + 0.5 + 0.05 + 0.5} = 0.348$$

Jadi sinyal kontrol (u) = 0.348

- Untuk E = -1.5 dan dE = 0.05

  Untuk E = -1.5 mempunyai variabel linguistik NM dan NS sedangkan untuk dE =0.05 mempunyai variabel linguistik Z dan PS dengan nilai derajat keanggotaan pada perpotongan garis tringular sebagai berikut

  μNM (e) = (-1 – (-1.5)) /(-1-(-2) = -0.5

  μNS (e) = (-1.5 – (-2)) / -1-(-2) = 0.5

  μZ (de) = (0.1 – 0.05) / 0.1-0 = 0.5

  μPS (de) = (0.05 – 0) / 0.1 = 0.5

Kemudian berdasarkan Tabel 3.1, maka dapat disusun aturan dasar untuk kondisi ini sebagai berikut:

Jika E = NM dan dE = Z maka u =NM

Jika E = NM dan dE = PS maka u =NS

Jika E = NS dan dE = Z maka u =NS

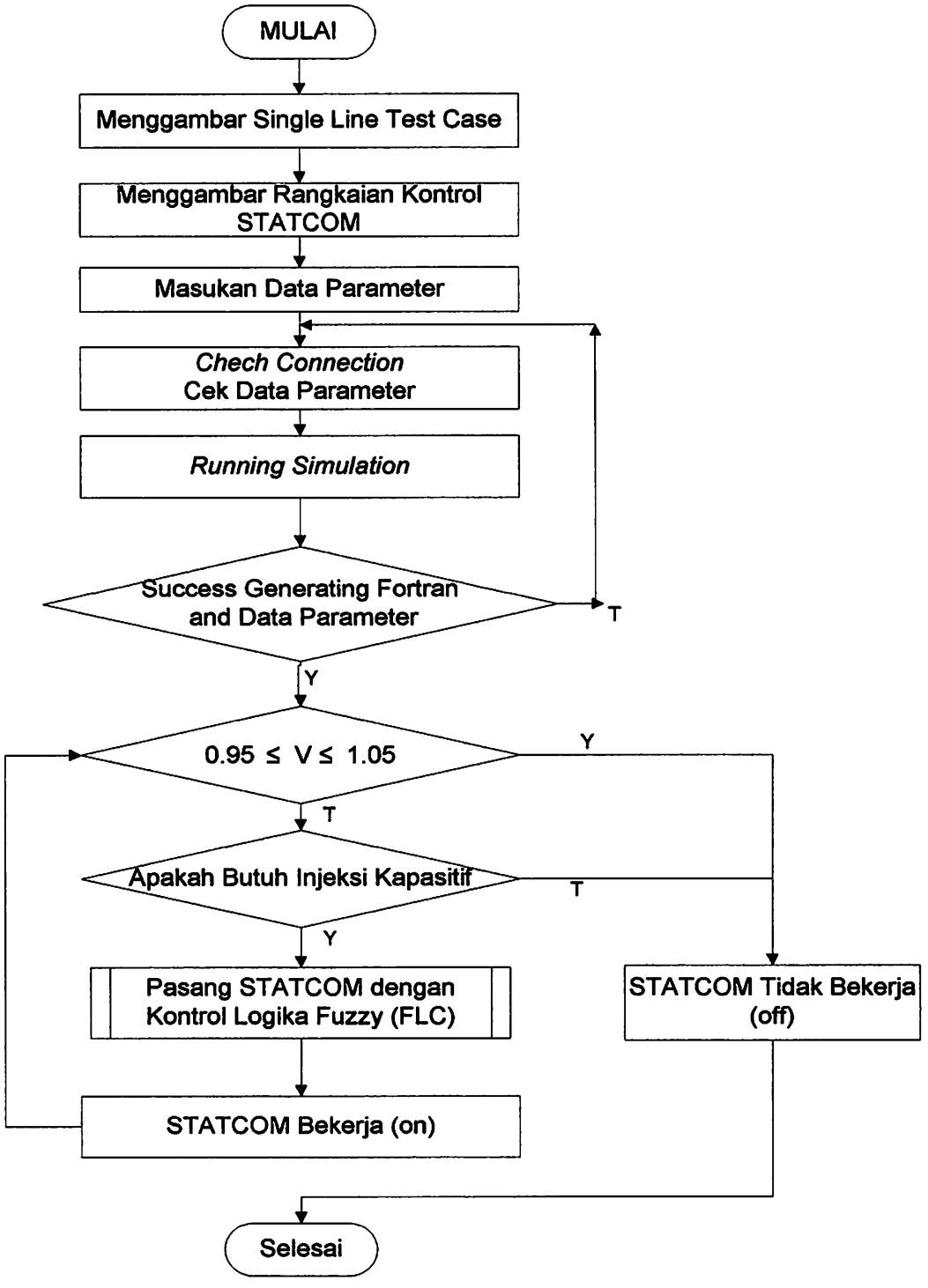
Jika E = NS dan dE = PS maka u =Z

Proses defuzzyfikasi dengan metode COA adalah sebagai berikut :

$$\mu(COA) = \frac{(\ -1.5 \times (-0.5) + (-1.5 \times 0.5) + (0.05 \times 0.5) + (0.05 \times 0.5)}{0.5 + (-0.5) + 0.5 + 0.5} = 0.05$$

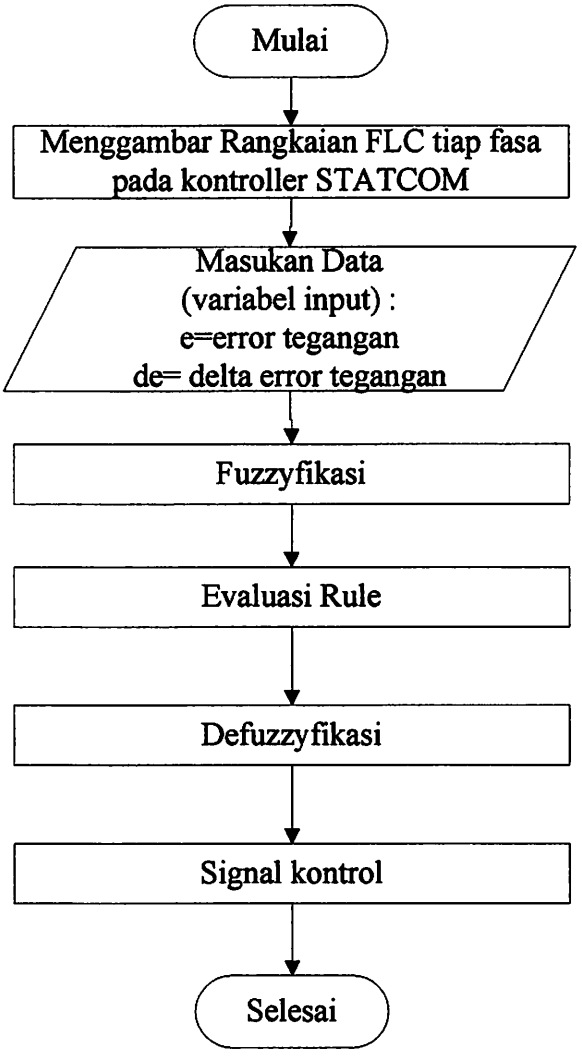
Jadi sinyal kontrol (u) = 0.05

## 3.5 *Flowchart* Simulasi Sistem




**Gambar 3.19** *Flowchart* Kerja dari Simulasi Sistem dengan *Static Synchronous Compensator*

## 3.6 *Flowchart* Fuzzy Logic Control untuk Rangkaian STATCOM




Gambar 3.20 *Flowchart* dari Prosedur Kerja Pemasangan Sistem *Fuzzy logic Control* (FLC) pada Rangkaian Kontrol STATCOM

# BAB IV

## SIMULASI DAN ANALISIS

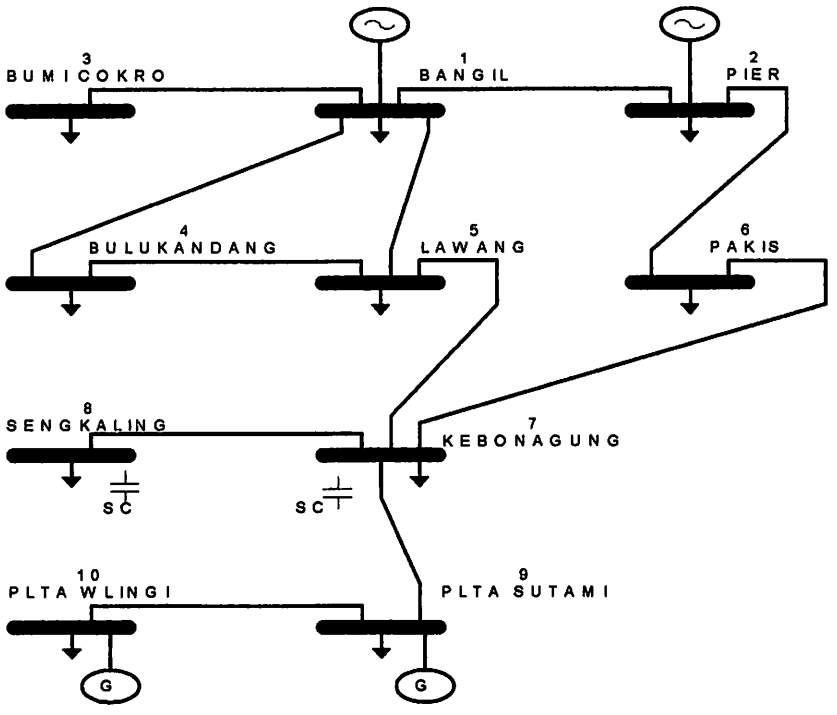
### 4.1 Nilai-nilai Parameter yang Digunakan Untuk Simulasi

Untuk melakukan simulasi pada sistem saluran transmisi 150kV UPT Malang dalam *software Simulink MATLAB* maka terlebih dahulu memproses data lapangan yang telah ada untuk diolah agar parameter yang digunakan dalam menganalisis unjuk kerja sistem saluran transmisi dapat dilakukan. Data lapangan disini meliputi:

- Data bus saluran tranmisi yang berupa tegangan dan jumlah bus serta *single line* saluran transmisi 150kV UPT Malang,
- Pembebanan dan data saluran yang menghubungkan tiap-tiap bus,
- serta kompensator terpasang yaitu kapasitor statik

#### 4.1.1 Data Bus Saluran Transmisi 150kV UPT.Malang

Pada wilayah kerja Unit Pelayanan Transmisi (UPT).Malang sistem jaringan transmisinya merupakan jaringan interkoneksi, terdiri dari 2 sumber tegangan jala-jala dan 2 generator 3 fasa sebagai penyuplai kebutuhan tenaga listrik pada wilayah tersebut, mempunyai 10 bus transmisi bertegangan 150kV, memiliki jarak antar bus kurang dari 80 km dan sistem tergolong pada saluran pendek dalam klasifikasi saluran transmisi. Adapun diagram tunggal (*single-line diagram*) SUTT 150kV wilayah kerja UPT.Malang sebagai berikut :




Gambar 4.1 Diagram Tunggal (*single-line* diagram) Saluran Transmisi 150kV Malang

### 4.1.2 Data Penyaluran dan Pembebanan Saluran Transmisi 150kV UPT Malang

Tabel 4.1 Data Saluran Transmisi 150 Kv UPT.Malang

| Jml Sirkit | Dari | Ke | No. Sirkit | Data Penghantar | | | I Nom (Amp |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Teg (kV) | Jarak (Km) | Jenis | |
| 1 | KBAGN5 | LAWNG5 | 1 | 150 | 25.805 | ACSR. AW | 740 |
| 1 | KBAGN5 | LAWNG5 | 2 | 150 | 25.805 | ACSR. AW | 740 |
| 1 | KBAGN5 | SKLING5 | 1 | 150 | 15.100 | ACSR. HAWK | 600 |
| 1 | KBAGN5 | SKLING5 | 2 | 150 | 5.100 | ACSR. HAWK | 600 |
| 1 | KBAGN5 | PAKIS5 | 1 | 150 | 12.900 | ACSR. ZEBRAHAWK | 1600 |
| 1 | KBAGN5 | PAKIS5 | 2 | 150 | 12.900 | ACSR. ZEBRAHAWK | 1600 |
| 1 | KBAGN5 | STAMI5 | 1 | 150 | 27.950 | ACSR. AW | 740 |
| 1 | KBAGN5 | STAMI5 | 2 | 150 | 27.950 | ACSR. AW | 740 |
| 1 | STAMI5 | WLNGI5 | 1 | 150 | 23.600 | ACSR | 435 |
| 1 | LAWNG5 | BNGIL5 | 1 | 150 | 34.680 | ACSR. AW | 740 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | BNGIL5 | LAWNG5 | 1 | 150 | 20.910 | ACSR. AW | 740 |
| 1 | BNGIL5 | BLKNDN5 | 1 | 150 | 27.770 | ACSR. AW | 740 |
| 1 | BNGIL5 | PIER5 | 1 | 150 | 5.150 | ACSR. ZEBRA | 1620 |
| 1 | BNGIL5 | PIER5 | 2 | 150 | 5.150 | ACSR. ZEBRA | 1620 |
| 1 | PAKIS5 | PIER5 | 1 | 150 | 52.507 | ACSR. ZEBRA | 1620 |
| 1 | PAKIS5 | PIER5 | 2 | 150 | 52.507 | ACSR. ZEBRA | 1620 |
| 1 | BNGIL5 | BCKRO5 | 1 | 150 | 6.200 | ACSR. ZEBRA | 1620 |
| 1 | BNGIL5 | BCKRO5 | 2 | 150 | 6.200 | ACSR. ZEBRA | 1620 |

### 4.1.2.1 Data Impedansi Penghantar Saluran Transmisi 150kV UPT.Malang

Tabel 4.2 Data Impedansi Penghantar Pada Saluran Transmisi 150 Kv UPT Malang

| Jml Sirkit | Dari | Ke | No. Sirkit | Data _ Penghantar | | R (ohm/km) | X (ohm/km) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Teg (kV) | Jarak (Km) | | |
| 1 | KBAGN5 | LWANG5 | 1 | 150 | 25.805 | 0.1172 | 0.4003 |
| 1 | KBAGN5 | LWANG5 | 2 | 150 | 25.805 | 0.1172 | 0.4003 |
| 1 | KBAGN5 | SKLING5 | 1 | 150 | 15.100 | 0.137 | 0.3966 |
| 1 | KBAGN5 | SKLING5 | 2 | 150 | 15.100 | 0.137 | 0.3966 |
| 1 | KBAGN5 | PAKIS5 | 1 | 150 | 12.900 | 0.0387 | 0.2807 |
| 1 | KBAGN5 | PAKIS5 | 2 | 150 | 12.900 | 0.0387 | 0.2807 |
| 1 | KBAGN5 | STAMI5 | 1 | 150 | 27.950 | 0.1172 | 0.4003 |
| 1 | KBAGN5 | STAMI5 | 2 | 150 | 27.950 | 0.1172 | 0.4003 |
| 1 | STAMI5 | WLNGI5 | 1 | 150 | 23.600 | 0.2136 | 0.408 |
| 1 | LWANG5 | BNGIL5 | 1 | 150 | 34.680 | 0.1172 | 0.4003 |
| 1 | BNGIL5 | LWANG5 | 1 | 150 | 20.910 | 0.1172 | 0.4003 |
| 1 | BNGIL5 | BLKNDN5 | 1 | 150 | 27.770 | 0.1172 | 0.4003 |
| 1 | BNGIL5 | PIER5 | 1 | 150 | 5.150 | 0.0387 | 0.2807 |
| 1 | BNGIL5 | PIER5 | 2 | 150 | 5.150 | 0.0387 | 0.2807 |
| 1 | PAKIS | PIER5 | 1 | 150 | 52.507 | 0.0387 | 0.2807 |
| 1 | PAKIS | PIER5 | 2 | 150 | 52.507 | 0.0387 | 0.2807 |
| 1 | BNGIL5 | BCKRO5 | 1 | 150 | 6.200 | 0.0387 | 0.2807 |
| 1 | BNGIL5 | BCKRO5 | 2 | 150 | 6.200 | 0.0387 | 0.2807 |

Dari tabel 4.2 diatas, data penghantar saluran antara kebonagung sampai lawang akan dipakai sebagai representasi untuk menghitung nilai impedansi saluran per-unit(pu)nya yakni menjadi :[6]

$$Z_{act} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(0.1172)^2 + (0.4003)^2} = 10.7634\ \Omega$$

$$Z_{base} = \frac{KV^2}{100MVA} = \frac{(150)^2}{100MVA} = 225\ \Omega$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{act}}{Z_{base}} = \frac{10.7634}{225} = 0.0478\ \text{pu}$$

Untuk nilai resistansi saluran dalam per-unit(pu) yang menghubungkan antara bus KebonAgung sampai bus Lawang dengan rumusan sebagai berikut[6] :

$$Ro_{pu} = \frac{R \times jarak(km)}{Z_{base}} = \frac{0.1172 \times 25.805}{225} = 0.0134\ \text{pu}$$

Untuk nilai reaktansi saluran dalam per-unit(pu) yang menghubungkan antara bus KebonAgung sampai bus lawang dengan rumusan sebagai berikut[6] :

$$Xo_{pu} = \frac{X \times jarak(km)}{Z_{base}} = \frac{0.4003 \times 25.805}{225} = 0.0459\ \text{pu}$$

Dengan cara yang sama, perhitungan nilai $R_0$ dan $X_0$ dalam per-unit untuk masing-masing data penghantar saluran transmisi pada tabel 4.2 diatas, maka hasilnya dapat ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Impedansi Penghantar (Per-Unit)Saluran Transmisi UPT.Malang

| Jml Sirkit | Dari | Ke | No. Sirkit | Data _ Penghantar | | Ro (pu) | Xo (pu) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Teg (kV) | Jarak (Km) | | |
| 1 | KBAGN5 | LWANG5 | 1 | 150 | 25.805 | 0.0134 | 0.0459 |
| 1 | KBAGN5 | LWANG5 | 2 | 150 | 25.805 | 0.0134 | 0.0459 |
| 1 | KBAGN5 | SKLING5 | 1 | 150 | 15.100 | 0.0092 | 0.0266 |
| 1 | KBAGN5 | SKLING5 | 2 | 150 | 15.100 | 0.0092 | 0.0266 |
| 1 | KBAGN5 | PAKIS5 | 1 | 150 | 12.900 | 0.0022 | 0.0161 |
| 1 | KBAGN5 | PAKIS5 | 2 | 150 | 12.900 | 0.0022 | 0.0161 |
| 1 | KBAGN5 | STAMI5 | 1 | 150 | 27.950 | 0.0146 | 0.0497 |
| 1 | KBAGN5 | STAMI5 | 2 | 150 | 27.950 | 0.0146 | 0.0497 |
| 1 | STAMI5 | WLNGI5 | 1 | 150 | 23.600 | 0.0224 | 0.0428 |
| 1 | LWANG5 | BNGIL5 | 1 | 150 | 34.680 | 0.0181 | 0.0617 |
| 1 | BNGIL5 | LWANG5 | 1 | 150 | 20.910 | 0.0181 | 0.0617 |
| 1 | BNGIL5 | BLKNDN5 | 1 | 150 | 27.770 | 0.0145 | 00494 |
| 1 | BNGIL5 | PIER5 | 1 | 150 | 5.150 | 0.0089 | 0.0064 |
| 1 | BNGIL5 | PIER5 | 2 | 150 | 5.150 | 0.0089 | 0.0064 |
| 1 | PAKIS | PIER5 | 1 | 150 | 52.507 | 0.0903 | 0.0655 |
| 1 | PAKIS | PIER5 | 2 | 150 | 52.507 | 0.0903 | 0.0655 |
| 1 | BNGIL5 | BCKRO5 | 1 | 150 | 6.200 | 0.0107 | 0.0077 |
| 1 | BNGIL5 | BCKRO5 | 2 | 150 | 6.200 | 0.0107 | 0.0077 |

### 4.1.2.2 Data Pembebanan

Data pembebanan yang digunakan diperoleh dari PT. PLN (PERSERO) P3B JAWA BALI pada beban puncak yakni pada tanggal 30 Juni 2009.

Hal ini dilakukan agar tercapai kondisi dimana sistem transmisi 150kV bekerja pada pembebanan yang maksimal, sehingga dapat diketahui unjuk kerja dari sistem transmisi tersebut.

Tabel 4.4 Data Pembebanan Saluran Transmisi 150 kV UPT.Malang

| Gardu Induk | Pembebanan | | Generator | | Injeksi |
|---|---|---|---|---|---|
| | MW | Mvar | (MW) | (Mvar) | (Mvar) |
| BANGIL (A) | 80.2 | 32.6 | - | - | - |
| BANGIL (B) | 0 | 0 | - | - | - |
| PIER | 15.6 | 4.7 | - | - | - |
| BLKNDANG | 9 | 2.8 | - | - | - |
| LAWANG | 22.7 | 7 | - | - | - |
| KBAGUNG | 122.8 | 80.2 | - | - | 25 |
| SENGKALING | 57.3 | 32.8 | - | - | 25 |
| SUTAMI | 0.15 | 0 | 75 | 32.2 | - |
| WLINGI | 69.6 | 36.4 | 20 | 5.1 | - |
| BCOKRO | 28.1 | 9.4 | - | - | - |
| PAKIS | 18.7 | 6.2 | - | - | - |

### 4.1.3 Data Kapasitor Statis Terpasang

Tabel 4.5 Data Kapasitor Statik GI. Kebonagung UPT Malang

**PT. PLN (PERSERO) P3B**
**REGION JAWA TIMUR DAN BALI**
**UPT MALANG**

| | | |
|---|---|---|
| **Gardu Induk** | : | **Kebonagung** |
| **Capasitor Bank** | | **150kV** **25Mvar** |
| | | |
| **CAPASITOR** | | |
| Merk | : | ***Cooper Power Syster*** |
| Type | : | EX - 7L |
| No. Seri | : | |
| Rated Tegangan | : | 50/125 kV |
| Cr td | : | 14.15mf |
| Cs cr | : | 14.25mf |
| S/P | : | 6 /3. |
| Jumlah | : | 48 bh |
| Keterangan | : | 1 Phasa 16 Capasitor |
| | | hubungkan seri |

## 4.2 Simulasi Sistem

Untuk memperjelas pada pembahasan berikutnya, maka akan dilakukan beberapa simulasi yang selanjutnya akan dianalisis. Simulasi nantinya akan dilakukan kedalam beberapa kasus guna mendapatkan hasil analisis yang mendalam dari kondisi sistem yang terjadi, antara lain :

- Simulasi sistem tanpa beban.
- Simulasi sistem untuk kontrol tegangan akibat penambahan beban, yang meliputi:
  a) Simulasi sistem dengan pembebanan tanpa menggunakan kompensator pada sistem transmisi 150kV UPT Malang
  b) Simulasi sistem dengan menggunakan kapasitor statik yang telah terpasang sebelumnya dengan parameter yang telah ditentukan.
  c) Simulasi sistem dengan menggunakan STATCOM sebagai pengganti kapasitor statik pada saluran transmisi 150kV Malang.
  d) Simulasi unjuk kerja STATCOM berbasis kontrol logika fuzzy (*FLC*) sebagai pengganti dari konventional PI kontrol terhadap perbaikan profil tegangan akibat adanya penambahan beban.

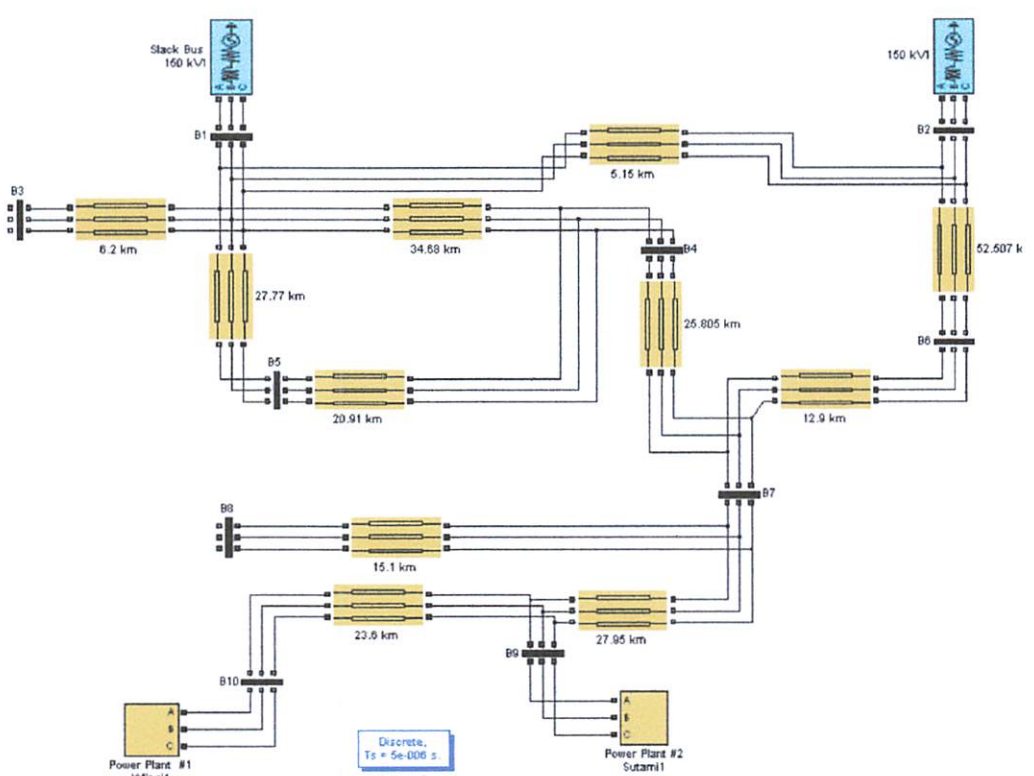
Simulasi kontrol tegangan akibat penambahan beban ini nantinya digunakan untuk melihat sejauhmana unjuk kerja dari kompensator maupun sistem kontrol terhadap perbaikan profil tegangan serta respon sistem pada saluran transmisi 150kV UPT Malang. Skenario penambahan beban nantinya akan dilakukan dengan menambahkan beban pada bus 8 (sengkaling) pada rating beban tertinggi yakni beban pada bus kebonagung. Penempatan penambahan beban dilakukan

melalui *switch on-off* menggunakan CB (*Circuit* Breaker) pada bus 8 (sengkaling) dimana bus tersebut sudah terbebani sebelumnya. Penambahan beban yang ditempatkan pada tempat tersebut nantinya akan mempunyai pengaruh yang sama terhadap kondisi sistem secara keseluruhan.

Simulasi kali ini menggunakan *software Simulink* dari *Matlab* versi 7.

### 4.2.1 Simulasi Sistem Tanpa Beban

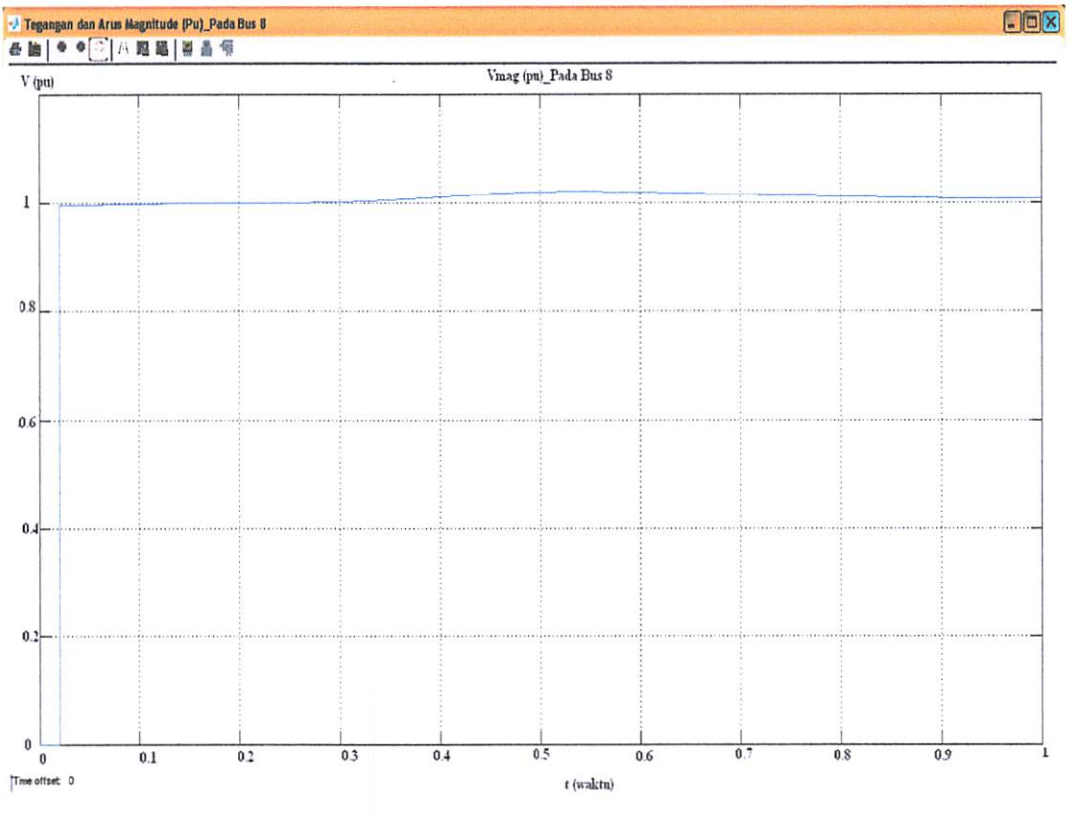
Pada simulasi awal, sistem yang digunakan adalah sistem tanpa beban. Dimana simulasi ini digunakan sebagai referensi kondisi awal dan untuk nantinya sebagai pembanding dari kondisi sistem pada simulasi berikutnya. Representasi sistem transmisi 150kV UPT Malang tanpa beban terlihat pada gambar berikut ini




Gambar 4.2 Sistem Tanpa Beban

Pada gambar 4.2 menunjukkan kondisi sistem saluran transmisi tanpa beban. Sistem saluran transmisi 150kV UPT Malang digambarkan melalui lembar kerja *Simulink MATLAB* terdiri dari 2 buah sumber tegangan 3 fasa seimbang dan Generator yang saling terinterkoneksi dan dipasang diantara 10 bus saluran transmisi yang terpisahkan oleh impedansi saluran. Impedansi saluran yang tertera pada tabel 4.3 merepresentasikan masing-masing impedansi saluran transmisi.

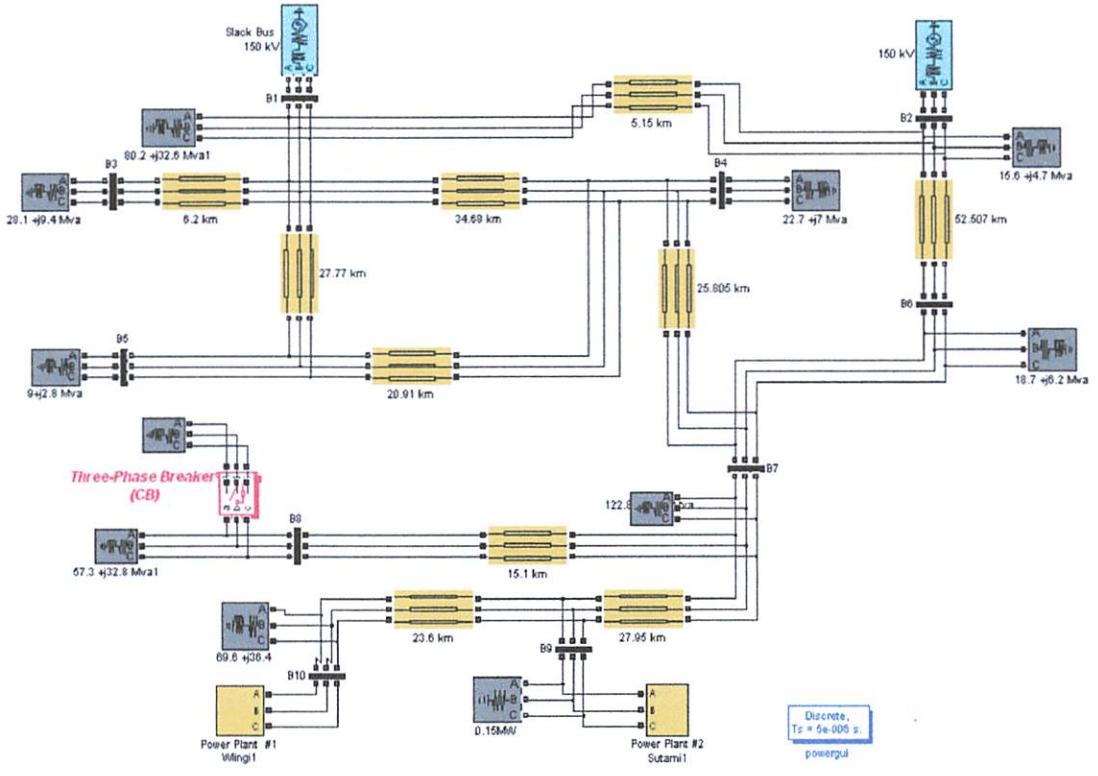
Pada gambar 4.3 dibawah ini menunjukkan kondisi respon sistem tanpa beban pada saluran transimisi 150kV UPT Malang. Tegangan pada masing-masing bus sebelum berbeban adalah 150kV atau 1 pu, karena tidak adanya pembebanan pada saluran tersebut yang mengakibatkan besarnya arus yang mengalir pada saluran sangat kecil sehingga tidak ada drop tegangan.




Gambar 4.3 Respon Tegangan Rms Sistem Tanpa Beban

### 4.2.2 Simulasi Sistem Dengan Pembebanan dan Tanpa Kompensator.

Simulasi sistem dengan pembebanan dan tanpa menggunakan kompensator, penggambaran pada lembar kerja *simulink MATLAB*, sama halnya dengan sistem tanpa beban sebelumnya, akan tetapi kemudian dilakukan pemasangan beban secara paralel pada tiap-tiap bus saluran transmisi dengan rating beban yang sesuai dengan tabel 4.4. Sistem dengan pembebanan dan tanpa kompensator dapat dilihat pada gambar berikut ini.

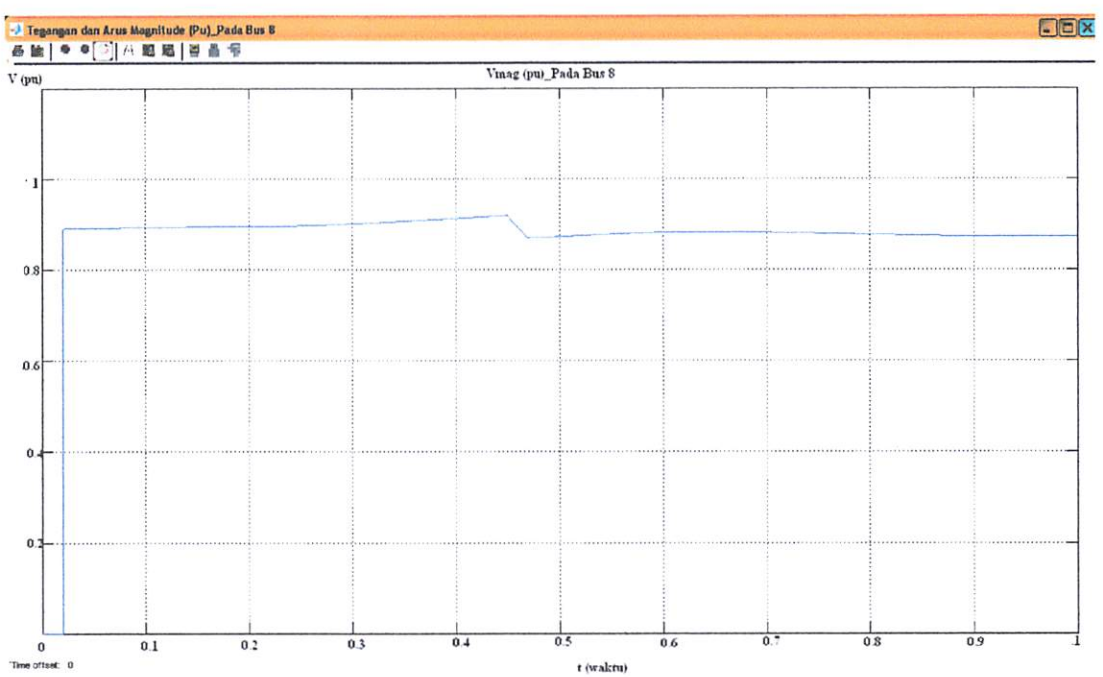



Gambar 4.4 Pemodelan Sistem Saluran Transmisi 150 Kv UPT.Malang dengan Pembebanan danTanpa Kompensator Pada *Simulink MATLAB*

Dalam mensimulasikan sistem tanpa kompensator, awalnya skenario pembebanan pada masing-masing bus saluran transmisi mengoperasikan beban yang terpasang parelel dengan rating beban yang telah tertera pada tabel 4.4 dimana akan merepresentasikan pembebanan awal saluran transmisi tersebut.

Kemudian melalui pemasangan *switch circuit breaker* pada bus 8 yang awalnya off(terbuka), penambahan beban diberikan dan dioperasikan saat t=0.45 detik dan *switch circuit breaker on* (tertutup) dimana hal ini untuk melihat seberapa besar pengaruh kondisi sistem terhadap pembebanan yang telah terpasang dan dengan ditambahkannya beban secara tiba-tiba pada saluran transmisi tersebut.

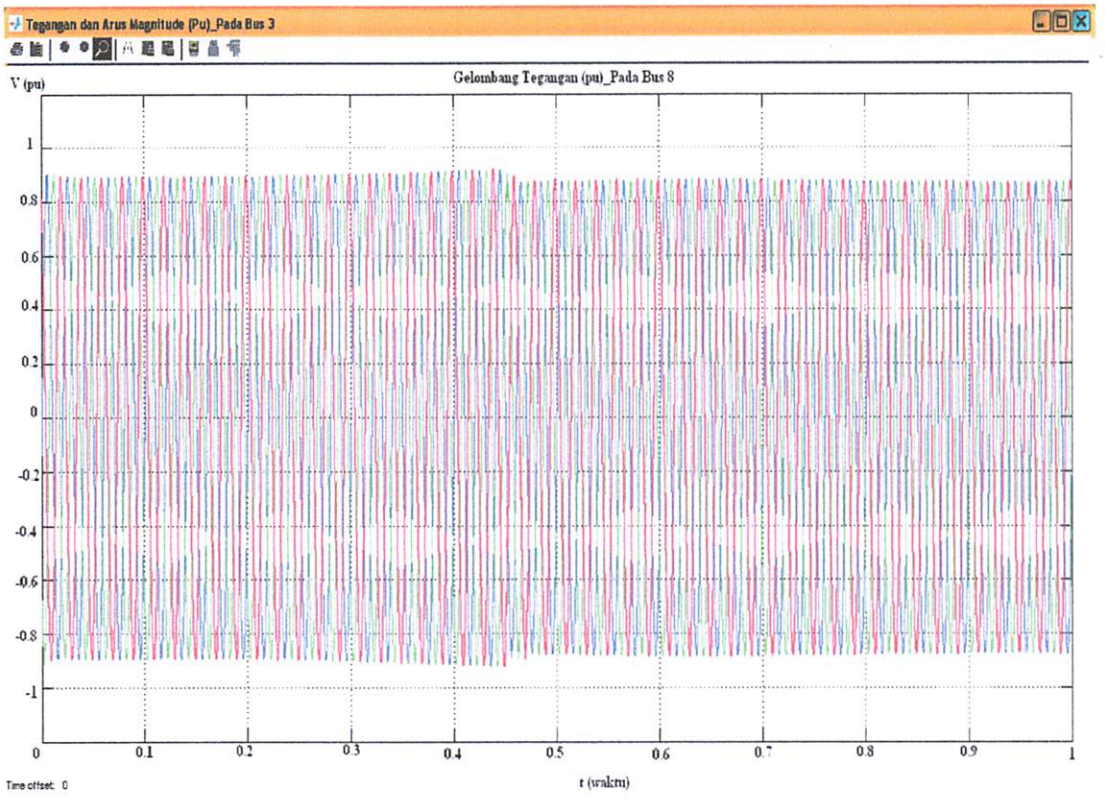
Dengan mensimulasikan sistem dengan pembebanan dan tanpa kompensator, akan didapatkan drop tegangan pada saluran. Grafik gambar 4.5 menunjukkan respon sistem kondisi tegangan pada salah satu bus akibat penambahan beban saat t=0.45 detik tanpa menggunakan kompensator pada saluran transmisi 150kV UPT Malang.




Gambar 4.5 Respon Tegangan Rms (Pu) Sebelum Dikompensasi

perubahan tegangan akan terlihat dengan adanya drop tegangan yang semakin besar. Drop tegangan ini diakibatkan oleh semakin besarnya arus yang

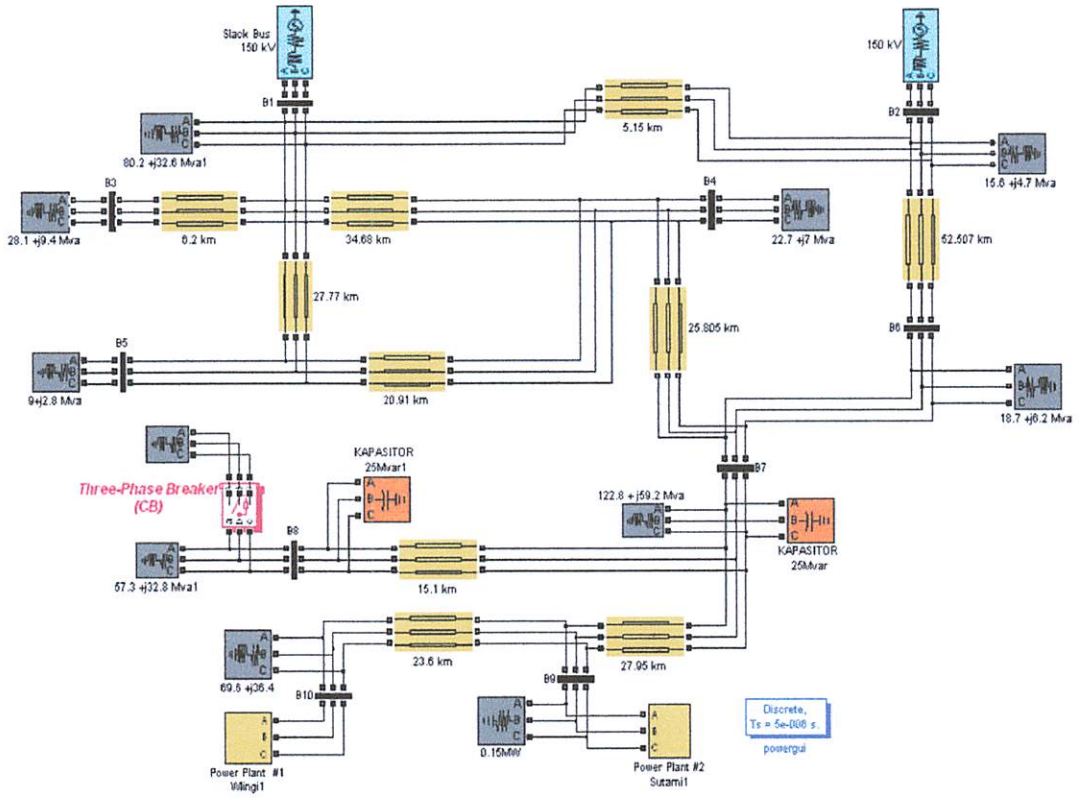
mengalir pada saluran transmisi setelah ditambahkannya beban secara tiba-tiba, sehingga drop tegangan pada saluran transmisi semakin besar. Gambar 4.6 menunjukkan gelombang tegangan sebelum dikompensasi




Gambar 4.6 Gelombang Tegangan Sebelum Dikompensasi

### 4.2.3 Simulasi Sistem Menggunakan Kompensasi Kapasitor

Simulasi sistem dilakukan dengan pemasangan kapasitor pada bus, dimana dalam hal ini kapasitor yang terpasang secara paralel pada bus saluran transmisi 150kV UPT Malang yakni pada bus 7 (KebonAgung) dan 8 (Sengkaling). Berikut merupakan representasi pemodelan simulasi sistem menggunakan kompensasi kapasitor pada lembar kerja *Simulink Matlab*

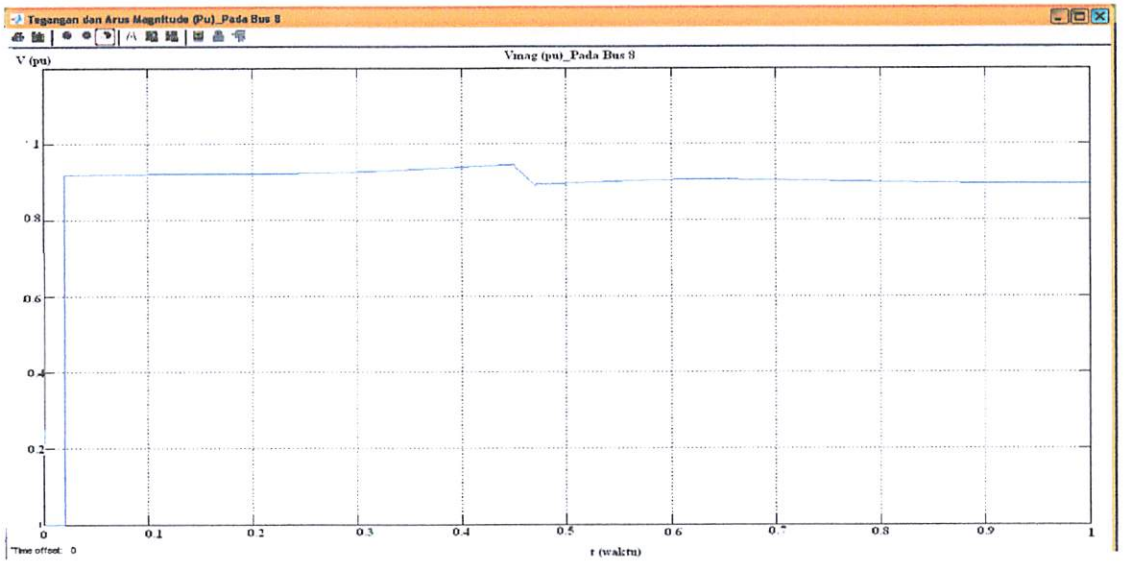



Gambar 4.7 Pemodelan Sistem Saluran Transmisi 150 kV UPT.Malang dengan Kapasitor Static pada *Simulink MATLAB*

Daya reaktif beban akan dikompensasi dengan daya reaktif dari kapasitor. Dengan adanya kompensasi daya reaktif maka daya sumber turun sehingga arus saluran turun yang mengakibatkan drop tegangan saluran juga turun. Kompensasi daya reaktif dapat mengembalikan tingkatan tegangan bus pada kondisi normal, hal ini disebabkan karena berkurangnya daya reaktif sumber yang akan mengakibatkan kecilnya arus saluran sehingga drop tegangan saluran juga akan semakin kecil.

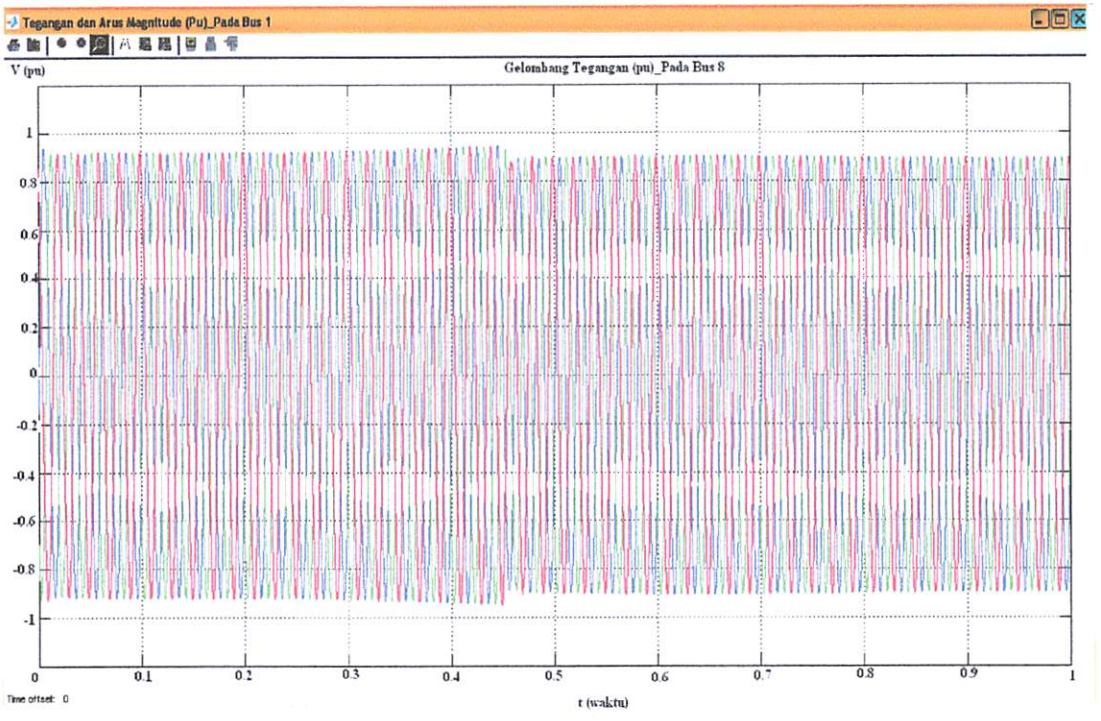
Gambar 4.8 menunjukkan respon tegangan rms bus setelah pemasangan kapasitor. Skenario pembebanan sama halnya pada simulasi tanpa beban dimana akan merepresentasikan pembebanan awal saluran transmisi tersebut. Kemudian

melalui pemasangan *switch circuit breaker* pada bus 8 yang awalnya off(terbuka), penambahan beban diberikan dan dioperasikan secara tiba-tiba saat t=0.45 detik dan *switch circuit breaker* on (tertutup), sehingga perubahan tegangan akan terlihat dengan adanya drop tegangan yang semakin besar.




Gambar 4.8 Respon Tegangan Rms Bus Dengan Kapasitor

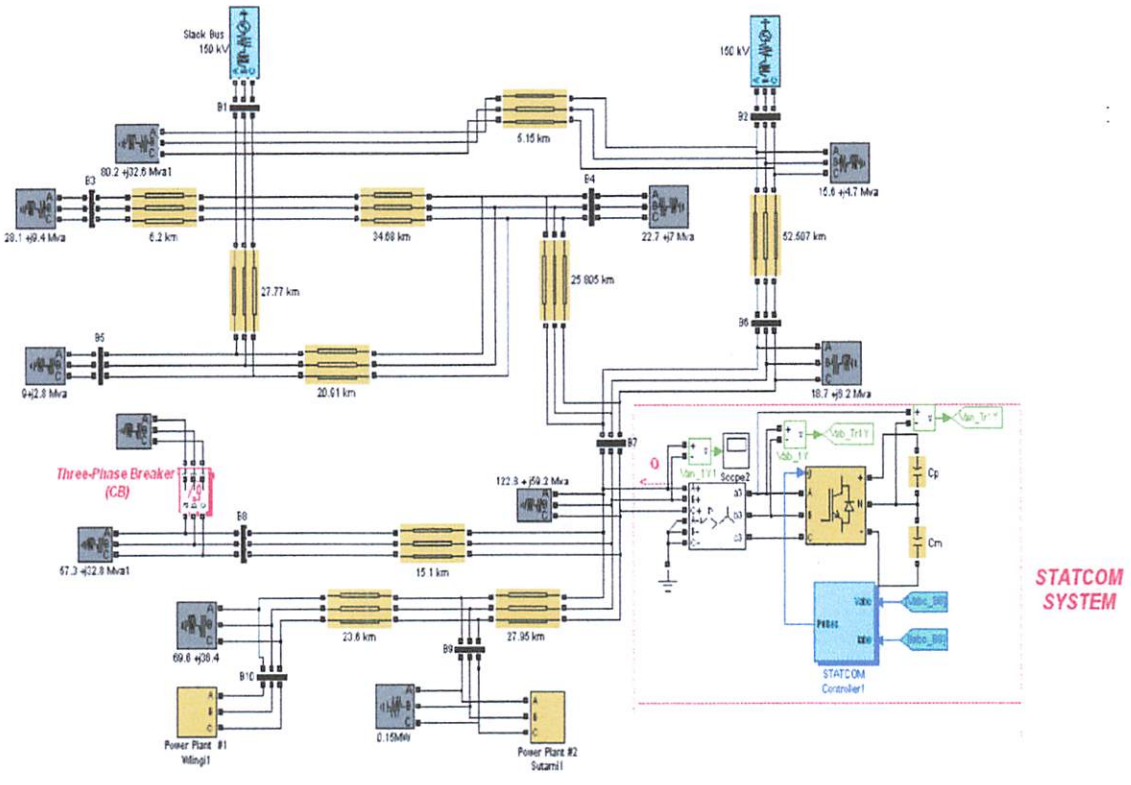
Dapat dijelaskan pada gambar diatas, kompensasi dengan kapasitor tidak dapat mengikuti adanya perubahan beban, sehingga saat penambahan beban dioperasikan maka daya yang diserap semakin besar sehingga drop tegangan bus juga semakin besar. Gambar 4.9 menunjukkan gelombang tegangan bus saat penambahan beban dioperasikan dan setelah dipasang kapasitor




Gambar 4.9 Gelombang Tegangan Dengan Kapasitor

### 4.2.4 Simulasi Sistem Dengan STATCOM (*PI controller*)

Simulasi sistem dilakukan dengan pemasangan STATCOM pada bus, ditunjukkan pada gambar 4.10, dimana dalam hal ini STATCOM terpasang secara paralel pada bus saluran transmisi 150kV UPT Malang yakni sebagai pengganti dari kapasitor statik yang terdapat pada bus KebonAgung. Hal ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar unjuk kerja dari kompensator tersebut serta bagaimana pengaruhnya terhadap kondisi sistem transmisi akibat adanya penambahan beban bila ditempatkan pada bus yang sama.

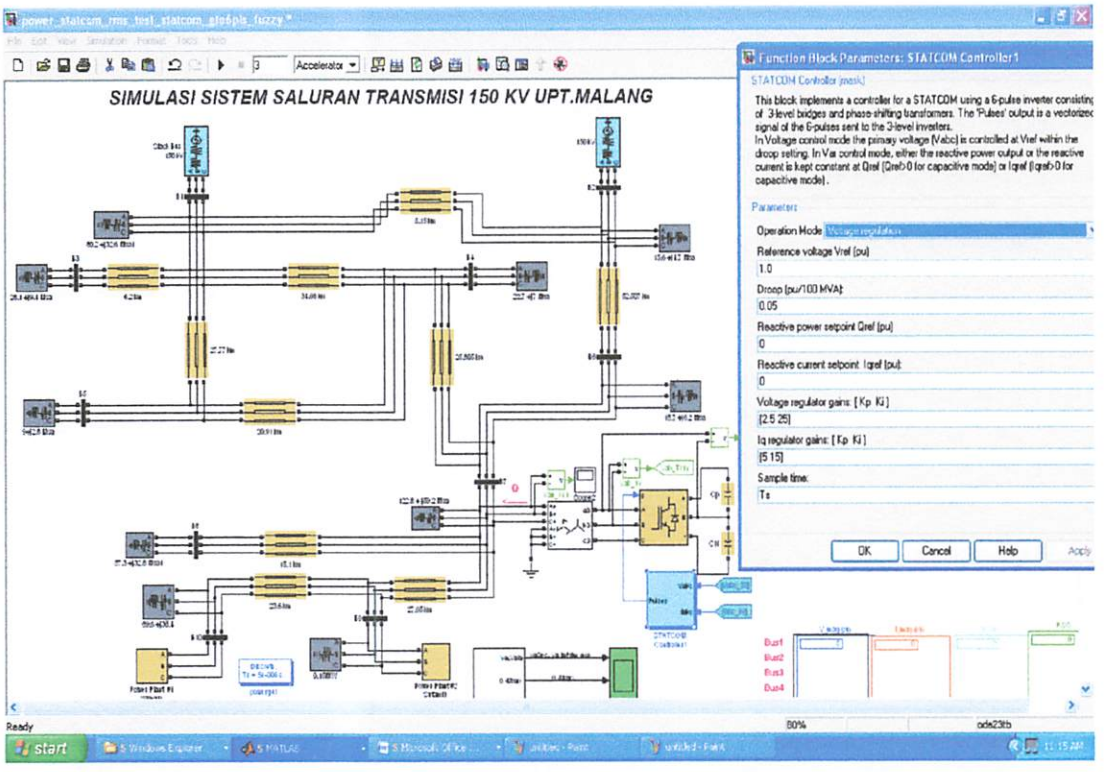



Gambar 4.10 Pemodelan Sistem Saluran Transmisi 150 kV UPT.Malang dengan STATCOM pada *Simulink MATLAB*

Dalam simulasi dengan menggunakan STATCOM, dibutuhkan adanya komponen *Power converter* dan sistem kontrol. Sistem kontrol STATCOM pada simulasi kali ini menggunakan sistem kontrol *Proporsional-Integral* (PI). Oleh karena itu, diperlukan pengaturan konstanta dari kontroller PI, sehingga nantinya dapat bekerja sebagai pendeteksi error tegangan pada sistem dan mengatur besarnya arus yang diinjeksikan ke sistem untuk perbaikan profil tegangan pada bus saluran transmisi.

Berdasar dari simulasi sistem kontrol STATCOM yang dilakukan, Pengaturan(*Setting*) parameter konstanta nilai Kp dan Ki dari *Proportional-Integral* (PI) kontrol STATCOM dilakukan melalui penyesuaian dengan cara

coba-coba (*trial and error*) sampai diperoleh pengontrol yang baik. Berikut merupakan tampilan *setting* konstanta parameter STATCOM pada lembar kerja *Simulink Matlab.*

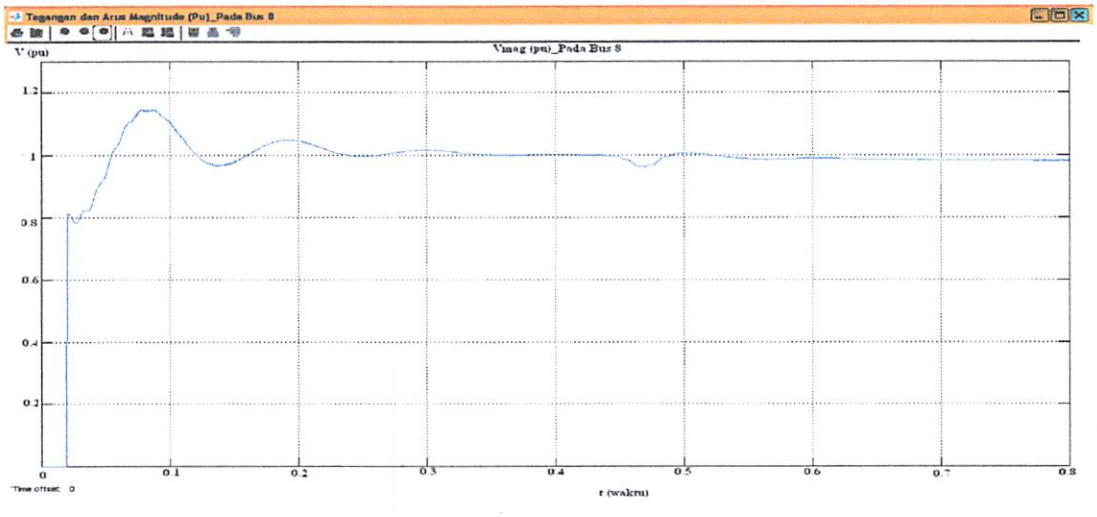



Gambar 4.11 *Setting* Konstanta Parameter Kontrol STATCOM pada Lembar Kerja *Simulink Matlab*

Didapatkan untuk masing-masing nilai Kp dan Ki baik pada regulator tegangan dan regulator arus STATCOM mempunyai karakteristik yang berbeda. Secara umum, semakin besar konstanta Ki yang diberikan, karakteristik respon semakin baik dimana waktu naik dan *settling time* semakin cepat serta kesalahan tunak (Ess) semakin kecil. Tetapi bila diperbesar terjadi *overshoot*. Perubahan nilai Kp berpengaruh pada kecepatan respon sistem dimana semakin besar Kp, respon semakin lambat dan bila diperbesar menimbulkan osilasi. Respon terbaik

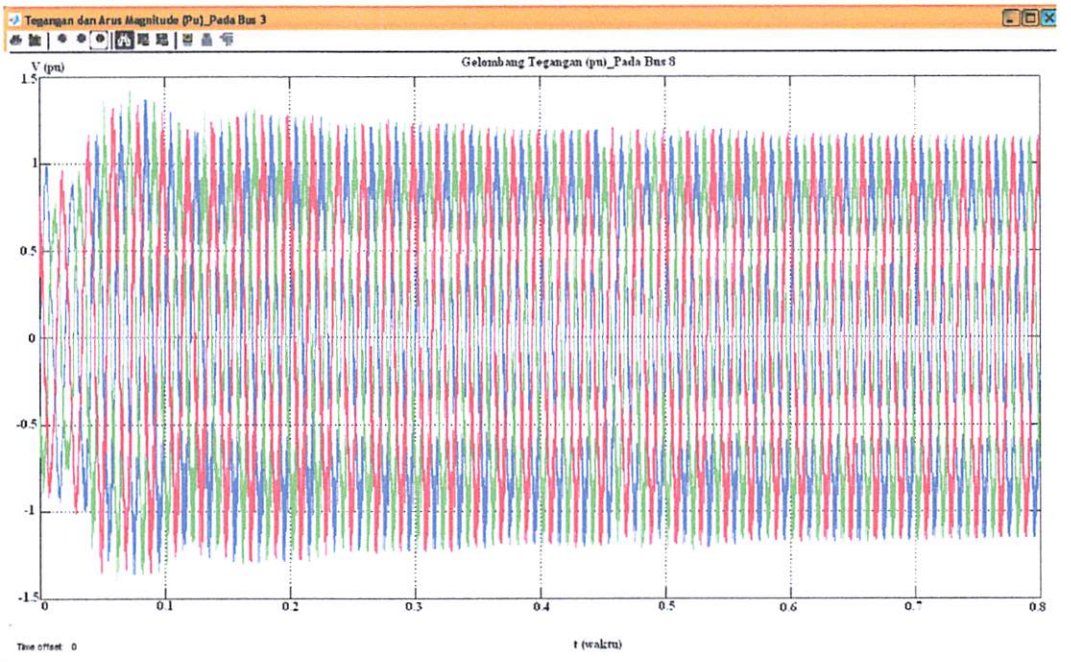
yang didapat dari setting PI Kontroller STATCOM yakni pada Regulator tegangan dengan nilai Kp=10, Ki=20 dan pada Regulator arus didapat nilai Kp=10, Ki=15.

Pada simulasi-simulasi sebelumnya tanpa menggunakan STATCOM, respon tegangan rms bus sudah tampak terlihat pada awal pembebanan dengan adanya drop tegangan pada saluran dan bahkan semakin besar dengan adanya penambahan beban yang diberikan saat *switch CB* beroperasi (on) pada t=0.45 detik. Berbeda dengan adanya pemasangan STATCOM, respon tegangan rms bus hasil simulasi setelah dikompensasi oleh STATCOM dengan PI kontroller untuk perubahan beban dapat dilihat pada gambar 4.12. besarnya drop tegangan yang disebabkan oleh besarnya pembebanan pada saluran transmisi dapat dikurangi dengan injeksi daya reaktif dari STATCOM. Perubahan beban dapat diikuti oleh perubahan daya yang diinjeksikan oleh STATCOM sehingga tegangan dapat dijaga konstan atau dalam batas keadaaan normal antara 0.95 pu sampai 1.05 pu.




Gambar 4.12 Respon Tegangan rms Bus saat dikompensasi dengan Pemasangan STATCOM (PI Kontroller) dan untuk Perubahan Beban terjadi saat t= 0.45 detik

Kompensasi dengan STATCOM dapat mengikuti adanya perubahan beban, sehingga saat penambahan beban dioperasikan maka drop tegangan dapat diminimalisir melalui injeksi daya reaktif STATCOM sehingga kenaikan tegangan bus menjadi semakin besar. Gambar 4.13 merupakan bentuk gelombang tegangan bus dengan pemasangan STATCOM pada saluran transmisi 150kV UPT Malang.




Gambar 4.13 Gelombang Tegangan Bus dengan STATCOM (PI Controller)

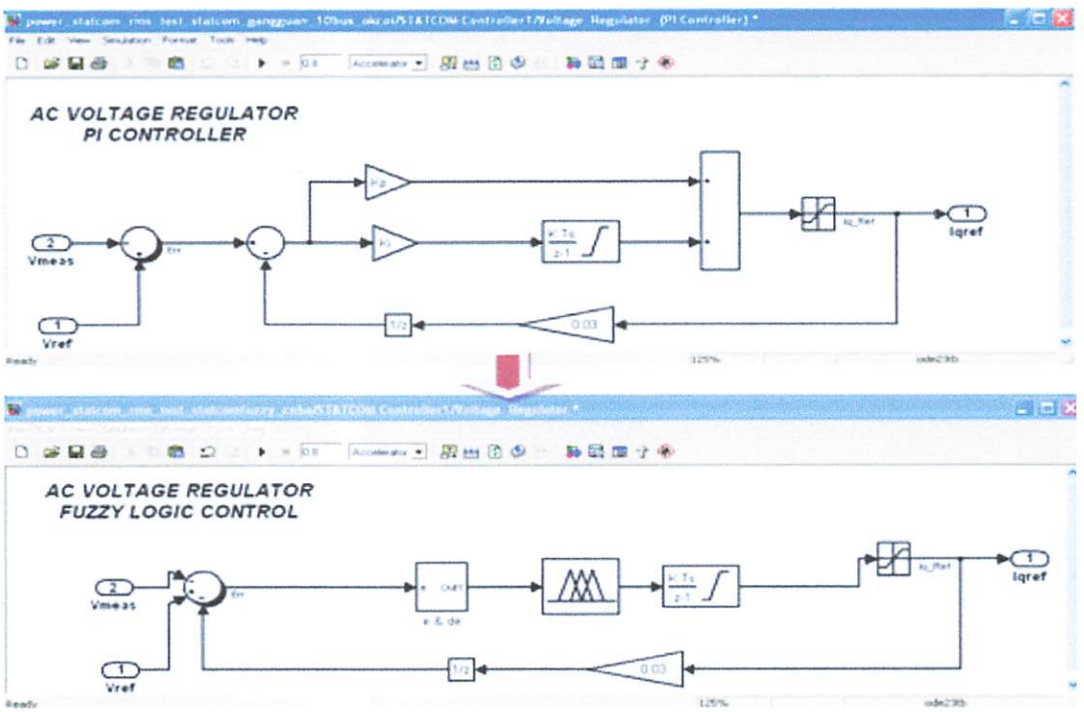
### 4.2.5 Simulasi Sistem Dengan STATCOM (*Fuzzy Logic Controller*)

Berdasarkan pada simulasi yang telah dilakukan sebelumnya yakni tampak pada grafik gambar 4.12, STATCOM dengan menggunakan PI kontroller, mampu untuk menaikkan tegangan sampai dalam batas-batas yang diijinkan akan tetapi masih terdapat beberapa kelemahan yang harus diperbaiki dalam hal respon

tegangan rms bus sistem seperti saat terjadinya *overshoot* maupun osilasi pada sistem.

Pada simulasi kali ini akan dilakukan perubahan sistem kontrol pada STATCOM dengan menggunakan *Fuzzy Logic Control* (FLC). FLC pada STATCOM ini digunakan untuk menggantikan konventional PI kontroller pada *AC Voltage Regulator* dari STATCOM. Proses perubahan pada sistem kontrol ini, mempunyai prinsip kerja dan tujuan yang sama halnya dengan konventional kontrol PI, yakni mendeteksi adanya perubahan dari tegangan sistem pada bus yang turun yang kemudian dibandingkan dengan tegangan referensi. Perbandingan tegangan sistem dengan tegangan referensi merupakan sinyal error yang akan diproses kedalam sistem kontrol, dan yang berbeda dari perubahan kontrol ini adalah ditambahkannya inputan untuk sinyal *delta error* yang berfungsi meredam adanya *overshoot* maupun osilasi pada sistem serta lebih cepat dan akurat dalam mengatasi permasalahan drop tegangan.

Berikut merupakan tampilan perubahan kontrol PI ke FLC dari *AC Voltage regulator* STATCOM pada lembar kerja *Simulink Matlab*



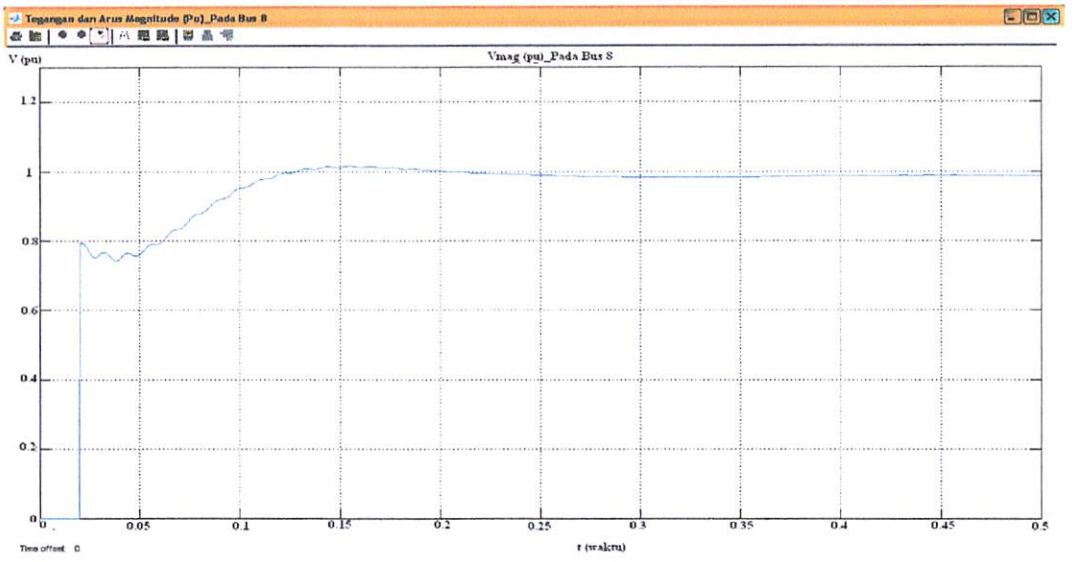

Gambar 4.14 Tampilan Perubahan Sistem Kontrol PI ke FLC pada Lembar Kerja *Simulink Matlab*

Dalam implementasi perancangan kontroller logika fuzzy pada simulasi ini, digunakan segitiga sama kaki sebagai fungsi keanggotaan dan dilakukan penyesuaian untuk penentuan tingkat kuantisasi berdasarkan range variasi masukan dan keluaran melalui cara coba-coba (*trial and error*) untuk beberapa posisi parameter dari fungsi keanggotaan sampai didapat pengontrol yang lebih baik. Secara umum semakin banyak level atau tingkat kuantisasi range variable masukan ataupun keluaran maka semakin peka kontroler terhadap perubahan masukan.

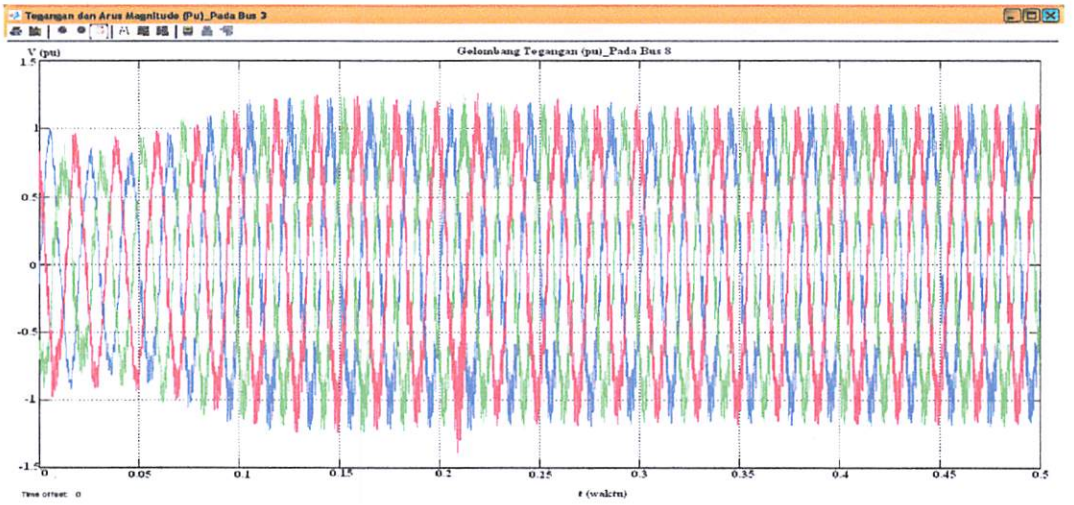
Perancangan pengontrolan fuzzy pada simulasi kali ini bertujuan agar keluaran dari hasil pengontrolan dengan PI kontroller STATCOM diperbaiki. dan dalam hal ini yang diinginkan yakni profil tegangan yang didapat akan menjadi

lebih baik serta respon keluaran akan mempunyai harga puncak (*overshoot*) yang minimum dan waktu yang diperlukan menuju ke keadaan mantap semakin cepat serta tidak terjadi osilasi (sistem stabil)

Berikut ini merupakan grafik respon tegangan sistem beserta gelombang tegangan hasil simulasi saat pemasangan STATCOM dengan *Fuzzy Logic Control* (FLC) pada saluran transmisi.




Gambar 4.15 Respon Tegangan Rms Bus saat dikompensasi dengan Pemasangan STATCOM (Fuzzy Logic Controller)




Gambar 4.16 Gelombang Tegangan Bus dengan STATCOM (*FLC*)

## 4.3 Analisa Hasil Simulasi

Dari beberapa kasus yang telah disimulasikan pada subbab sebelumnya, maka langkah berikutnya adalah menganalisis unjuk kerja sistem baik nilainya maupun grafik kondisi hasil simulasi dari masing-masing kasus untuk kemudian akan dapat diketahui bagaimana pengaruh kondisi sistem sebelum dan sesudah digunakan STATCOM berbasis *fuzzy logic control* (FLC) pada sistem transmisi 150kV UPT Malang.

### 4.3.1 Analisa Hasil Simulasi Pada Kondisi Sistem dengan Pembebanan dan Tanpa Kompensator

Analisa dilakukan dengan data dari hasil simulasi kondisi sistem dengan pembebanan dan tanpa kompensator melalui skenario pembebanan yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Respon sistem dan gelombang tegangan pada bus 8 akibat adanya penambahan beban yang disimulasikan dapat dilihat pada gambar 4.5 dan 4.6, yang terjadi adalah penurunan tegangan (*drop voltage*) pada saluran tersebut. Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada saat *switch CB off* (terbuka), operasi penambahan beban belum dioperasikan dan tegangan sudah turun dari tegangan nominal tanpa beban sampai 0.9213 pu atau 138.2 kV. Saat Setelah t=0.45 detik, *switch CB on* (tertutup), penurunan tegangan semakin besar dengan adanya penambahan beban yang dioperasikan, yakni 0.8744 pu atau 131.16kV. Penurunan tegangan pada bus ini disebabkan oleh semakin besarnya arus yang mengalir pada saluran transmisi setelah ditambahkannya beban, sehingga drop tegangan pada saluran transmisi semakin besar. Hasil perhitungan saat terjadi

*drop voltage* akibat penambahan beban pada t=0.45 detik dan tanpa kompensasi pada masing-masing bus saluran transmisi dapat ditabelkan sebagai berikut

Tabel 4.6. Hasil Perhitungan Saat Terjadi *Drop Voltage* Akibat Penambahan Beban Pada T=0.45 Detik Tanpa Kompensasi

| No. Bus | Tegangan (pu) | P(MW) | Q(MVAR) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.9454 | 315 | 88.15 |
| 2 | 0.9513 | 72.43 | 104.5 |
| 3 | 0.9486 | -25.29 | -8.461 |
| 4 | 0.9255 | 19.45 | 5.999 |
| 5 | 0.9354 | -7.877 | -2.451 |
| 6 | 0.899 | 117.4 | 60.26 |
| 7 | 0.899 | -231.8 | -118.2 |
| 8 | 0.8744 | -115.4 | -100.2 |
| 9 | 0.921 | -69.8 | -60.02 |
| 10 | 0.9181 | -12.21 | -23.73 |

Dengan memperhatikan nilai tegangan saat terjadi penambahan beban pada sistem tersebut maka sebagai representasi untuk menghitung besarnya persentase jatuh tegangan (*%voltage drop*) tanpa kompensator, dari tabel 4.6 dipakai nilai tegangan (saat *full-load*) pada bus 8 sebagai masukan serta dipakai tegangan tanpa beban sebagai referensi sebesar 1 pu sehingga persentase jatuh tegangan (*%voltage drop*) tanpa kompensator dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut[7] :

$$\%voltage\ drop = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \text{ x } 100\% \quad \text{..... (4.1)}$$

Dengan :

$V_1$ = tegangan *line to line* ($V_{L\text{-}L}$) kV tanpa beban (*no-load*)

$V_2$ = tegangan *line to line* ($V_{L\text{-}L}$) rms bus saat pembebanan (kV)

Maka :

$$\%\ voltage\ drop = \frac{1-0.8744}{1} \text{ X } 100\% = 12.56\%$$

Dengan cara yang sama, tabel 4.7 menunjukkan hasil perhitungan pada simulasi untuk perubahan beban pada masing-masing bus saluran transmisi. Persentase jatuh tegangan yang terjadi semakin besar, hal ini dapat mengakibatkan kerusakan atau tidak bekerjanya suatu peralatan yang sensitive terhadap tegangan bila tidak adanya solusi kompensasi dalam permasalahannya. Didalam saluran transmisi persoalan tegangan sangat penting baik dalam keadaan operasi maupun dalam perancangannya harus selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik disaluran. Besar tegangan yang diijinkan yakni mempunyai batas ambang atas tegangan untuk sistem transmisi 150kV adalah +5%, yaitu 157,5 kV atau 1.05 pu, sedangkan batas ambang bawah tegangan untuk sistem transmisi 150kV adalah -10% yaitu 135kV atau 0.95 pu.

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Nilai Persentase Drop Tegangan Tanpa Kompensator Pada Saluran Transmisi 150kv Malang

| No. Bus | Bus Gardu Induk | Tegangan sebelum dan saat dibebani (pu) | | Persentase drop (%) |
|---|---|---|---|---|
| | | tegangan sebelum pembebanan (pu) | tegangan (pu) saat t=1.5 s beban ditambah | |
| 1 | BANGIL | 1 | 0.9454 | 5.46 |
| 2 | PIER | 1 | 0.9513 | 4.87 |
| 3 | BCOKRO | 1 | 0.9486 | 5.14 |
| 4 | BLKNDANG | 1 | 0.9255 | 7.45 |
| 5 | LAWANG | 1 | 0.9354 | 6.46 |
| 6 | PAKIS | 1 | 0.899 | 10.1 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 7 | KBNAGUNG | 1 | 0.899 | 10.1 |
| 8 | SNGKALING | 1 | 0.8744 | 12.56 |
| 9 | SUTAMI | 1 | 0.921 | 7.9 |
| 10 | WLINGI | 1 | 0.9181 | 8.19 |

Pada tabel diatas terlihat bahwa pada bus Pakis, Kebon agung, Sengkaling, besar tegangannya dibawah atau mendekati dari batas tegangan yang diijinkan serta persentase nilai drop tegangannya lebih dari 10% .

Pada subbab berikutnya akan dibahas mengenai solusi menggunakan kompensator dalam hal ini menggunakan kapasitor statik yang telah terpasang sebelumnya pada saluran transmisi dan sebagai kajian akademik nantinya akan digunakan STATCOM sebagai pengganti dari kompensator tersebut serta unjuk kerjanya dari sistem kontrol STATCOM yakni *fuzzy logic control* didalam memperbaiki profil tegangan serta respon sistem pada saluran transmisi 150kV UPT.Malang.

### 4.3.2 Analisa Hasil Simulasi Pada Kondisi Sistem dengan Kompensasi Kapasitor

Analisa dilakukan dengan data dari hasil simulasi kondisi sistem dengan kompensasi kapasitor melalui skenario pembebanan yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Respon sistem dan gelombang tegangan pada bus 8 akibat adanya penambahan beban, dapat dilihat pada gambar 4.7 dan 4.8, yang terjadi adalah kompensasi kapasitor mampu untuk menaikkan tegangan saat sebelum penambahan beban dioperasikan akan tetapi tidak mampu mengikuti adanya perubahan beban saat penambahan beban dioperasikan sehingga terlihat penurunan tegangan pada bus saluran transmisi. Hal tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut, pada saat *switch CB off*

(terbuka), operasi penambahan beban belum dioperasikan dan tegangan mampu diperbaiki melalui kompensasi daya reaktif kapasitor menjadi 0.9467 pu atau 142 kV yang semula tanpa adanya kompensasi mencapai 0,9213 pu atau 138.2kV. Hal ini disebabkan karena berkurangnya daya reaktif sumber dengan adanya kompensasi daya reaktif dari kapasitor yang akan mengakibatkan kecilnya arus saluran sehingga drop tegangan saluran juga akan semakin kecil.

Kemudian kondisi yang berbeda terjadi saat penambahan beban dioperasikan, yakni pada t=0.45 detik, tegangan rmsnya menjadi 0.8964 pu atau 134,46 kV dimana yang semula tanpa kompensasi 0.8744 pu atau 131.16kV. Terlihat bahwa kompensasi dengan kapasitor tidak dapat mengikuti adanya perubahan beban yang terjadi secara tiba-tiba dimana kompensasi dengan kapasitor tidak mampu menaikkan tegangan sampai menuju ke keadaan normal, sehingga saat penambahan beban dioperasikan, daya sumber yang diserap beban menjadi semakin besar oleh karena kapasitas kapasitor dalam mengkompensasi daya yang diserap beban tersebut telah disesuaikan dengan kondisi beban sebelum penambahan beban dioperasikan, dengan demikian terlihat adanya penurunan tegangan pada bus saluran transmisi.

Tabel 4.8 merupakan hasil simulasi dengan pemasangan kapasitor. Kompensasi daya dengan kapasitor static, dalam prosesnya tidak mampu mengikuti adanya perubahan beban, sehingga tegangan akan berubah saat terjadi perubahan beban.

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Saat Terjadi *Drop Voltage* Setelah Kompensasi Kapasitor Akibat Penambahan Beban Pada T=0.45 Detik

| No. Bus | Injeksi Kapasitor (MVAR) | Tegangan (pu) | P(MW) | Q(MVAR) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | - | 0.9552 | 325.2 | 69.98 |
| 2 | - | 0.9572 | 79.6 | 90.02 |
| 3 | - | 0.9544 | -25.6 | -8.565 |
| 4 | - | 0.9363 | 19.91 | 6.139 |
| 5 | - | 0.944 | -8.023 | -2.496 |
| 6 | - | 0.9163 | 124.8 | 45.21 |
| 7 | 25 | 0.9163 | -246.7 | -85.54 |
| 8 | 25 | 0.8964 | -163.3 | -105.3 |
| 9 | - | 0.934 | -68.76 | -52.73 |
| 10 | - | 0.9302 | -11.71 | -21.51 |

Dengan memperhatikan nilai tegangan saat penambahan beban pada sistem tersebut maka persentase kenaikan tegangan saat dikompensasi dengan kapasitor dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut[7] :

$$\%\text{kenaikan tegangan } (\textit{voltage rise}) = \left|\frac{V_{TK}-V_{DK}}{V_{TK}}\right| \text{ x } 100\% \quad \text{..... (4.2)}$$

Dengan :

$V_{TK}$ = tegangan *line to line* ($V_{L\text{-}L}$) kV tanpa kompensasi(*full-load*)

$V_{DK}$ = tegangan *line to line* ($V_{L\text{-}L}$) kV saat dengan kompensasi(*full-load*)

Sebagai representasi untuk menghitung besarnya persentase kenaikan tegangan oleh adanya kompensasi dengan kapasitor, maka dalam hal ini dari tabel 4.6 (tanpa kompensasi) dan tabel 4.8 (dengan kompensasi kapasitor), dipakai nilai tegangan pada bus 8 untuk masukan dalam perhitungan sebagai berikut

$$\%\text{kenaikan tegangan } (\textit{voltage rise}) = \left|\frac{0.8744-0.8964}{0.8744}\right| \text{ x } 100\%$$

$$= 2.52\%$$

Dengan cara yang sama, Pada tabel 4.9 dapat dilihat hasil perhitungan pada simulasi untuk perubahan beban pada masing-masing bus saluran transmisi dengan menggunakan kapasitor.

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Nilai Persentase KenaikanTegangan(%*Voltage Rise*) Dengan Kapasitor Pada Saluran Transmisi 150kv Malang

| No. Bus | Bus Gardu Induk | Tegangan sebelum dan saat dibebani (pu) | | | Persentase kenaikan tegangan(%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Tanpa Kompensator | | Dengan Kapasitor | |
| | | tegangan sebelum pembebanan (pu) | tegangan (pu) saat t=0.45 s beban ditambah | tegangan (pu) saat t=0.45 s beban ditambah | Dengan Kapasitor |
| 1 | BANGIL | 1 | 0.9454 | 0.9552 | 1.04 |
| 2 | PIER | 1 | 0.9513 | 0.9572 | 0.62 |
| 3 | BCOKRO | 1 | 0.9486 | 0.9544 | 0.61 |
| 4 | BLKNDANG | 1 | 0.9255 | 0.9363 | 1.17 |
| 5 | LAWANG | 1 | 0.9354 | 0.944 | 0.92 |
| 6 | PAKIS | 1 | 0.899 | 0.9163 | 1.92 |
| 7 | KBNAGUNG | 1 | 0.899 | 0.9163 | 1.92 |
| 8 | SNGKALING | 1 | 0.8744 | 0.8964 | 2.52 |
| 9 | SUTAMI | 1 | 0.921 | 0.934 | 1.41 |
| 10 | WLINGI | 1 | 0.9181 | 0.9302 | 1.32 |

Persentase kenaikan tegangan saat dipasang kapasitor terlihat pada tabel diatas. Perubahan beban yang terjadi pada saluran transmisi tidak mampu diikuti oleh perubahan kompensasi daya reaktif dari kapasitor, sehingga kapasitor tidak

dapat mengembalikan tegangan bus menuju ke keadaan normal dengan diikuti persentase kenaikan tegangannya yang tidak begitu signifikan

### 4.3.2 Analisa Hasil Simulasi Pada Kondisi Sistem dengan Kompensasi STATCOM (*PI Controller*)

Analisa dilakukan dengan data dari hasil simulasi kondisi sistem dengan kompensasi STATCOM (*PI Controller*) melalui setting parameter Kp dan Ki dengan cara *trial and error* dari sistem kontrol serta skenario pembebanan yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Respon tegangan rms bus hasil simulasi setelah dikompensasi oleh STATCOM pada sistem kontrol *Proporsional-Integral* (PI) untuk perubahan beban dapat dilihat pada gambar 4.12 . Pada simulasi-simulasi sebelumnya tanpa menggunakan STATCOM, respon tegangan rms bus sudah tampak terlihat pada awal pembebanan dengan adanya drop tegangan pada saluran dan bahkan semakin besar dengan adanya penambahan beban yang diberikan saat switch CB beroperasi (on) pada t=0.45 detik. Berbeda dengan adanya pemasangan STATCOM, tegangan pada saat awal pembebanan sebelum penambahan beban adalah 0.9809 pu atau 147.14 kV. Kemudian saat penambahan beban dioperasikan pada t=0.45 s tegangan rmsnya 0.9815 pu atau 147.2kV. Kompensasi daya reaktif dapat mengembalikan tingkatan tegangan bus pada kondisi normal. Dalam hal ini STATCOM sebagai kompensator daya reaktif mampu menaikkan tegangan bus sampai batas yang diijinkan melalui injeksi daya reaktif yang diberikan.

Tabel 4.10 merupakan hasil perhitungan pada simulasi dengan pemasangan STATCOM saat terjadi *drop voltage* akibat penambahan beban,

Perubahan beban dapat diikuti dengan injeksi daya dari STATCOM sehingga tampak terlihat perubahan tegangan yang tidak terlalu signifikan dan tegangan bus mampu dijaga konstan atau dalam keadaan normal yakni antara 0.95 pu atau 135 kV sampai 1.05 pu atau 157,5 kV.

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Saat terjadi *Drop Voltage* Setelah Kompensasi STATCOM (*PI Controller*) Akibat Penambahan Beban pada t=0.45 detik

| No. Bus | Tegangan (pu) | P(MW) | Q(MVAR) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.9848 | 313 | -32.71 |
| 2 | 0.9868 | 43.31 | 19.89 |
| 3 | 0.9839 | -30.65 | -8.472 |
| 4 | 0.9866 | 23.24 | 6.391 |
| 5 | 0.9855 | -9.53 | -2.56 |
| 6 | 0.992 | 88.27 | -39.45 |
| 7 | 0.992 | -157.9 | 88.58 |
| 8 | 0.9815 | -80.17 | -48.3 |
| 9 | 0.9991 | -94.46 | -28.17 |
| 10 | 0.9993 | -30.46 | -16.82 |

Dengan memperhatikan nilai tegangan saat penambahan beban pada sistem tersebut maka persentase kenaikan tegangan saat dikompensasi dengan STATCOM (*PI Controller*) dapat dihitung dengan persamaan 4.2 diatas.

Sebagai representasi untuk menghitung besarnya persentase kenaikan tegangan oleh adanya kompensasi dengan STATCOM (*PI Controller*), maka dalam hal ini dari tabel 4.6(tanpa kompensasi) dan tabel 4.10 (dengan kompensasi STATCOM(*PI controller*)), dipakai nilai tegangan pada bus 8 untuk masukan dalam perhitungannya yakni sebagai berikut

$$\%\text{kenaikan tegangan } (\textit{voltage rise}) = \left|\frac{0.8744-0.9815}{0.8744}\right| \text{ x } 100\%$$

$$= 12.25\%$$

Dengan cara yang sama, tabel 4.11 menunjukkan hasil perhitungan prosentase kenaikan tegangan pada simulasi sistem untuk perubahan beban pada masing-masing bus saluran transmisi dengan pemasangan STATCOM (*PI Controller*) dan perbandingannya dengan kapasitor.

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Nilai Persentase KenaikanTegangan(%*Voltage Rise*) Dengan STATCOM (*PI Contrller*) Pada Saluran Transmisi 150kv Malang

| No. Bus | Bus Gardu Induk | Tegangan sebelum dan saat dibebani (pu) | | | | Persentase kenaikan tegangan (*%Voltage Rise*) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Tanpa Kompensator | | Dengan Kapasitor | Dengan STATCOM | Dengan Kapasitor | Dengan STATCOM (PI Controller) |
| | | tegangan sebelum pembebanan (pu) | tegangan (pu) saat t=0.45 s beban ditambah | tegangan (pu) saat t=0.45 s beban ditambah | tegangan (pu) saat t=0.45 s beban ditambah | | |
| 1 | BANGIL | 1 | 0.9454 | 0.9552 | 0.9848 | 1.04 | 4.17 |
| 2 | PIER | 1 | 0.9513 | 0.9572 | 0.9868 | 0.62 | 3.73 |
| 3 | BCOKRO | 1 | 0.9486 | 0.9544 | 0.9839 | 0.61 | 3.72 |
| 4 | BLKNDANG | 1 | 0.9255 | 0.9363 | 0.9866 | 1.17 | 6.60 |
| 5 | LAWANG | 1 | 0.9354 | 0.944 | 0.9855 | 0.92 | 5.36 |
| 6 | PAKIS | 1 | 0.899 | 0.9163 | 0.992 | 1.92 | 10.34 |
| 7 | KBNAGUNG | 1 | 0.899 | 0.9163 | 0.992 | 1.92 | 10.34 |
| 8 | SNGKALING | 1 | 0.8744 | 0.8964 | 0.9815 | 2.52 | 12.25 |
| 9 | SUTAMI | 1 | 0.921 | 0.934 | 0.9991 | 1.41 | 8.48 |
| 10 | WLINGI | 1 | 0.9181 | 0.9302 | 0.9993 | 1.32 | 8.48 |

Persentase kenaikan tegangan saluran meningkat saat penambahan beban dioperasikan (switch CB on) pada bus 8 (sengkaling) yaitu menjadi 12.25 % dengan kompensasi STATCOM (*PI Controller*) yang semula dengan kompensasi

kapasitor 2.52%. Perubahan beban mampu diikuti oleh perubahan kompensasi daya reaktif STATCOM, selain daripada itu STATCOM terdiri dari rangkaian sistem kontrol serta komponen elektronika daya seperti IGBT dimana bila dibandingkan dengan komponen *switch* mekanik yang terdapat pada kapasitor, IGBT memiliki beberapa keunggulan yaitu waktu penswitchingan lebih pendek serta mampu bekerja secara kontinu, sehingga saat terjadi adanya perubahan beban maka tegangan bus mampu dipertahankan konstan atau dalam keadaan normal sesuai dengan batas-batas yang diijinkan yaitu mempunyai Batas ambang atas tegangan untuk sistem transmisi 150kV adalah +5%, yaitu 157,5 kV atau 1.05 pu, sedangkan batas ambang bawah tegangan untuk sistem transmisi 150kV adalah -10% yaitu 135kV atau 0.95 pu. Drop tegangan dapat ditekan seminimal mungkin untuk menghindari kerusakan pada peralatan listrik dan menjaga kontinuitas daya pada konsumen.

Meskipun STATCOM dengan konventional PI kontrol berhasil dalam menjaga tegangan sistem tetap konstan atau dalam keadaan normal, akan tetapi STATCOM dengan PI kontroller masih mempunyai kelemahan yakni tidak mampu untuk meredam *overshoot* serta osilasi yang ditimbulkan dari kontrol itu sendiri sehingga pencapaian respon sistem yang baik tidak optimal. Dalam hal ini terlihat pada gambar 4.12, pada tingkatan *overshoot* atau pencapaian harga puncak sebesar 1.1 pu dari referensinya, serta waktu yang diperlukan menuju ke keadaan mantap sekitar 0.3 detik. Pada demikian itu akan membawa dampak yang buruk pada peralatan yang membutuhkan respon sistem yang lebih baik yakni kebutuhan

pencapaian harga puncak yang minimum serta kondisi menuju ke keadaan mantapnya cepat serta tanpa adanya osilasi.

Dari permasalahan yang tersebut diatas, maka dibutuhkan suatu solusi alternative dengan menggunakan metode pengontrolan berbasis kontroller cerdas yakni fuzzy *logic controller* (FLC) sebagai pengganti konventional PI pada sistem kontrol STATCOM. Diharapkan pada perubahan sistem kontrol tersebut mampu memperbaiki kelemahan yang ada.

### 4.3.4 Analisa Hasil Simulasi Pada Kondisi Sistem dengan Kompensasi STATCOM (*FLC*)

Dari hasil simulasi yang terlihat pada gambar 4.15, dapat diketahui bahwa respon tegangan rms bus yang didapat mempunyai harga puncak atau *overshoot* sebesar 1.02 pu yang sebelumnya adalah sampai 1.1 pu serta waktu yang diperlukan untuk menuju ke keadaan mantap sebesar 0.23 detik yang sebelumnya adalah sampai 0.3 detik. Pengaruh dari perubahan kontrol PI ke FLC mampu untuk membawa respon sistem menjadi lebih optimal dengan perbaikan yang telah didapatkan. Hal ini didasarkan atas hasil yang didapat yakni nilai *overshoot* lebih minimum, waktu untuk menuju kekondisi mantap lebih cepat serta tanpa adanya osilasi pada respon tegangan rms bus.

Berikut ini merupakan tabel 4.12 dimana merepresentasikan hasil perbandingan antara harga puncak dan waktu mantap dari masing-masing perubahan sistem kontrol.

Tabel 4.12 Perbandingan Harga Puncak, Waktu Mantap dan Osilasi untuk Masing-masing Kontroller

| Sistem Kontrol | Harga Puncak (Pu) | Waktu Mantap (detik) | Osilasi Sistem |
|---|---|---|---|
| PI Controller | 1.1 | 0.3 | Ada |
| Fuzzy logic Controller | 1.02 | 0.21 | Tidak Ada |

Pada grafik respon pada gambar 4.15, Sama halnya dengan PI kontroller, FLC pada STATCOM juga mampu untuk mempertahankan kondisi tegangan rms menuju ke keadaan normal sampai batas yang diijinkan yaitu diantara 0.95 pu atau 135 kV sampai dengan 1.05 pu atau 157.5 kV. Berikut merupakan tabel hasil perhitungan profil tegangan sistem dengan pemasangan STATCOM berbasis *Fuzzy Logic Control* (FLC)

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan saat terjadi *Drop Voltage* setelah kompensasi STATCOM (FLC)

| No. Bus | Tegangan (pu) | P(MW) | Q(MVAR) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.9853 | 345.5 | -6.364 |
| 2 | 0.9868 | 71.59 | 20.08 |
| 3 | 0.9842 | -28.69 | -11.38 |
| 4 | 0.9889 | 24.16 | 6.056 |
| 5 | 0.9869 | -9.088 | -2.696 |
| 6 | 0.9969 | 98.94 | -48.56 |
| 7 | 0.9969 | -198.6 | 115.8 |
| 8 | 0.9863 | -88.05 | -43.53 |
| 9 | 1.004 | -61.84 | -40.47 |
| 10 | 0.9975 | -7.977 | -17.52 |

Dengan cara yang sama seperti pada analisis untuk penggunaan STATCOM dengan sistem kontrol PI, maka tabel 4.14 dibawah ini menunjukkan

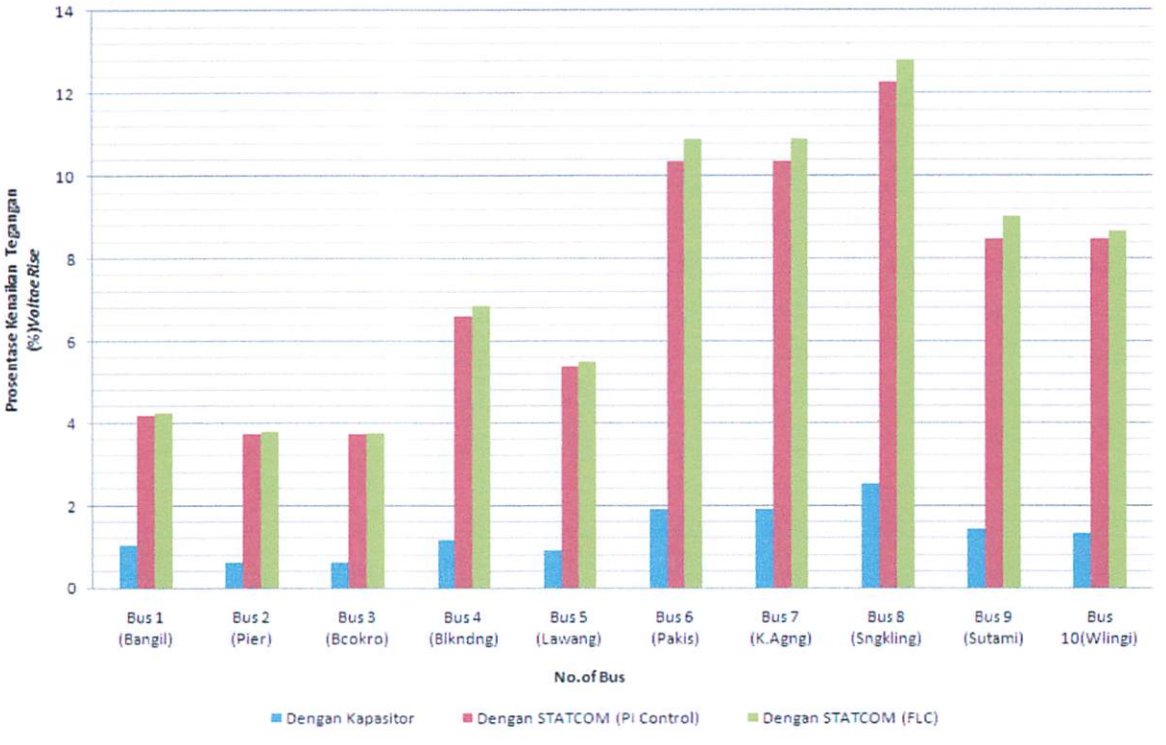
hasil perhitungan prosentase kenaikan tegangan pada simulasi sistem untuk perubahan beban pada masing-masing bus saluran transmisi dengan pemasangan STATCOM (*FLC*) dan perbandingannya dengan STATCOM (*PI Controller*) maupun dengan kapasitor.

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan Nilai Persentase KenaikanTegangan(%*Voltage Rise*) Dengan STATCOM (*PI Contrller*) Pada Saluran Transmisi 150kv Malang

| No. Bus | Bus Gardu Induk | Tegangan sebelum dan saat dibebani (pu) | | | | | Persentase kenaikan tegangan (%*Voltage Rise*) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Tanpa Kompensator | | Dengan Kapasitor | Dengan STATCOM (PI Controller) | Dengan STATCOM (FLC) | Dengan Kapasitor (%) | Dengan STATCOM (PI Controller) (%) | Dengan STATCOM (FLC) (%) |
| | | tegangan sebelum pembebanan (pu) | tegangan (pu) saat t=0.45 s beban | tegangan (pu) saat t=0.45 s beban | tegangan (pu) saat t=0.45 s beban ditambah | tegangan (pu) saat t=0.45 s beban | | | |
| 1 | BANGIL | 1 | 0.9454 | 0.9552 | 0.9848 | 0.9853 | 1.04 | 4.17 | 4.22 |
| 2 | PIER | 1 | 0.9513 | 0.9572 | 0.9868 | 0.9874 | 0.62 | 3.73 | 3.79 |
| 3 | BCOKRO | 1 | 0.9486 | 0.9544 | 0.9839 | 0.9842 | 0.61 | 3.72 | 3.75 |
| 4 | BLKNDANG | 1 | 0.9255 | 0.9363 | 0.9866 | 0.9889 | 1.17 | 6.60 | 6.85 |
| 5 | LAWANG | 1 | 0.9354 | 0.944 | 0.9855 | 0.9869 | 0.92 | 5.36 | 5.51 |
| 6 | PAKIS | 1 | 0.899 | 0.9163 | 0.992 | 0.9969 | 1.92 | 10.34 | 10.89 |
| 7 | KBNAGUNG | 1 | 0.899 | 0.9163 | 0.992 | 0.9969 | 1.92 | 10.34 | 10.89 |
| 8 | SNGKALING | 1 | 0.8744 | 0.8964 | 0.9815 | 0.9863 | 2.52 | 12.25 | 12.80 |
| 9 | SUTAMI | 1 | 0.921 | 0.934 | 0.9991 | 1.004 | 1.41 | 8.48 | 9.01 |
| 10 | WLINGI | 1 | 0.9181 | 0.9302 | 0.9993 | 0.9975 | 1.32 | 8.84 | 8.65 |
| **Total rata-rata perbaikan profil tegangan saluran transmisi 150kV UPT.Malang** | | | **0.92177** | **0.93403** | **0.98915** | **0.99143** | **1.34** | **7.38** | **7.64** |

Persentase kenaikan tegangan saluran meningkat saat penambahan beban dioperasikan (switch CB on) pada bus 8 (sengkaling) yaitu menjadi 7.64 %

dengan kompensasi STATCOM (*FLC*) yang semula dengan kompensasi STATCOM (*PI Controller*) 7.38 % maupun dengan kapasitor yang hanya mencapai 1.34%. Persentase kenaikan tegangan pada saluran transmisi lebih optimal dengan penggunaan STATCOM berbasis *Fuzzy Logic Control* (FLC) dengan menunjukkan hasil profil tegangan yang memuaskan bila dibanding dengan kedua kompensator tersebut. Pada gambar grafik 4.17 selanjutnya menunjukkan hasil simulasi sistem untuk perbandingan persentase kenaikan tegangan antara kapasitor, STATCOM dengan kontrol menggunakan PI maupun FLC.




Gambar 4.17 Grafik Persentase Kenaikan Tegangan antara Kapasitor, Dengan STATCOM (*PI Controller*) maupun Dengan STATCOM (FLC)

# BAB V

# PENUTUP

## 5.1 KESIMPULAN

Setelah dilakukan simulasi dan analisis untuk beberapa kasus yang telah dibahas pada bab sebelumnya, maka dapat diambil suatu kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada bus saluran transmisi 150kV UPT Malang, terjadi perbaikan profil tegangan yakni yang semula pada kondisi tanpa kompensator sebesar 0.92177 pu (131.16 kV), dengan kapasitor sebesar 0.93403pu (134.2kV), dengan STATCOM (*PI control*) sebesar 0.98915 pu (148,4kV) dan kemudian dengan STATCOM (FLC) menjadi semakin meningkat sampai dengan 0.99143pu (148,7kV) yang diikuti prosentase kenaikan tegangan sampai dengan 7.64%
2. Unjuk kerja dari penggunaan STATCOM berbasis *Fuzzy Logic Control* (FLC) pada bus saluran transmisi 150kV UPT Malang, mampu memberikan hasil perbaikan respon sistem yang lebih baik yakni dengan pencapaian ke keadaan respon mantap *(steady-state)* hanya membutuhkan waktu 0.21 detik yang semula dengan *PI Controller* membutuhkan waktu 0.3 detik, serta *overshoot* (harga puncak) yang muncul turun sampai dengan 1.02 pu yang semula dengan *PI Controller* mencapai 1.1 pu serta pada kondisi sistem tidak menunjukkan adanya osilasi saat menuju ke keadaan *steady-state* bila dibandingkan dengan *PI Controller*

## 5.2 Saran

1. Dalam prosedur perancangan FLC pada skripsi ini, penentuan tingkat kuantisasi berdasarkan setting range variasi masukan dan keluaran masih menggunakan cara coba-coba (*trial and error*) untuk beberapa posisi parameter dari fungsi keanggotaan sampai mendapat pengontrol yang lebih baik. Cara ini tidaklah efektif dan optimal dalam memperoleh hasil yang lebih baik Pada penelitian berikutnya cara *trial and error* tersebut dapat digantikan dengan menggunakan metode optimasi *tuning* berbasis kontroler cerdas, seperti *Genetic Algorithm*(GA), jaringan saraf tiruan (JST), dan lain-lain.
2. Untuk semakin memperdalam hasil analisa, maka dapat dilakukan simulasi unjuk kerja kompensator maupun sistem kontrol saat terjadi gangguan transient akibat hubung singkat 1 fasa ketanah, maupun antar fasa ketanah.

# DAFTAR PUSTAKA


[1] Ajami.A and Hosseini S H, "*Application of a Fuzzy Controller for Transient Stability Enhanchement of AC Transmission System by STATCOM*", SICE-ICASE International Joint Conference, October,2006.

[2] Reddy Prabhakar and Ram Sanker B.V, "*STATCOM With FLC for Damping of Oscillations of Multi Machine Power System*", Journal of Theoritical Applied Information Technology,2005

[3] Hingorani, N. G., and Gyugyi, L. 2001, Understanding FACTS: "*Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*", New York: IEEE Press.

[4] Soeprapto,"Diktat Kuliah Elektronika Daya",Teknik Elektro, Universitas Brawijaya,2004

[5] Naba,Agus "Belajar Cepat Fuzzy Logic Menggunakan MATLAB" Andi, Yogyakarta,2009.

[6] *MATLAB/Simulink/Toolboox*

[7] Stevenson Jr. William, "Analisa Sistem Tenaga" Erlangga Edisi ke 4.1996.

[8] Basri,Hasan "Sistem Distribusi Tenaga Listrik", Balai penerbit dan Humas ISTN,1990.

[9] Beiser Arthur."Schaum's Outline Series : *Theory and Problems of Basic Mathematics For Electricity And Electronics 2/ed*",Mc.Grow-Hill International Edition,1993

[10] Yongan,Deng "*Reactive Power Compensation of Transmission Line*". ACSE Journal,Volume (6),Issue (2), June,2006, Concordia University.

[11] Masand Deepika, Jain Sailendra and Agnithotri Gayatri, " *Control Strategies for Distribution Static Synchronous Compensator for Power Quality Improvement*", IETE Journals, 2009

[12] Hosea Emmy, Nugraha Adi "Optimasi Penentuan Lokasi Switched 20kV Power Capasitor pada Jaringan Distribusi 20kV Jawa Timur", Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra, 2000

# RIWAYAT HIDUP PENULIS

Penulis dilahirkan di Probolinggo, 29 Januari 1987 dan mengenyam pendidikan di SDN Tisnonegaran II Probolinggo (1996-2001), SLTPN II Probolinggo (2001-2003), SMUN II Probolinggo (2003-2005), dan diteima di jurusan Teknik Elektro-FTI ITN Malang dengan NIM 051.12.023. Penulis mengambil bidang studi Teknik Energi Listrik S-1. Selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi diantaranya, Ketua Program Mahasiswa Wirausaha (PMW) ITN Malang, Kadept Humas Korp Sukarelawam (KSR) PMI ITN Malang, Asisten Praktikum dan Koordinator Laboratorium Transmisi, Distribusi dan Daya Elektrik, dan Anggota legislative Himpunan Mahasiswa Elektro ITN Malang

# LAMPIRAN (A)

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 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

# BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI
# FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

1. Nama : Makik Mindiantono
2. NIM : 05.12.023
3. Jurusan : Teknik Elektro S-1
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
5. Judul Skripsi : ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* (*STATCOM*) BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROL* (*FLC*) PADA SALURAN TRANSMISI 150KV UPT.MALANG

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

Hari : Jum'at
Tanggal : 20 Agustus 2010
Dengan Nilai : 86.89 (A)

**Panitia Ujian Skripsi**

**Ketua Majelis Penguji**

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

**Anggota Penguji**

**Penguji I**

**( Ir.Teguh Herbasuki, MT )**
**NIP. Y. 103 8900 209**

**Penguji II**

**( Ir.Eko Nurcahyo )**
**NIP.Y.102 8700 172**

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
Jl. Raya Karanglo, Km. 2
MALANG

# PERMOHONAN PERSETUJUAN SKRIPSI

Yang betanda tangan dibawah ini :

| | |
|---|---|
| Nama | : MAKIK MINDIANTONO |
| NIM | : 05.12.023 |
| Semester | : VIII |
| Fakultas | : Teknologi Industri |
| Jurusan | : Teknik Elektro S-1 |
| Konsentrasi | : ~~TEKNIK ELEKTRONIKA~~ TEKNIK ENERGI LISTRIK ~~TEKNIK KOMPUTER DAN INFORMATIKA~~ |
| Alamat | : Jl. RAYA GEMBRUNG NO 9 MALANG |

Dengan ini kami mengajukan permohonan untuk mendapatkan persetujuan untuk membuat ***SKRIPSI Tingkat Sarjana.*** Untuk melengkapi permohonan tersebut, bersama 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 mata kuliah ≥ 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 kebenaran data tersebut diatas
Recording Teknik Elektro

(Puji Handayani)

Malang, .....2009
**Pemohon**

(MAKIK . M)

Disetujui
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
NIP. P. 1039500274

Mengetahui
Dosen Wali

(Ir. Yusuf Ismail Nakhoda MT
N.I.P.P. 101 8800 189

Catatan :
Bagi mahasiswa yang telah memenuhi persyaratan mengambil SKRIPSI agar membuat proposal dan mendapat persetujuan dari Ketua Jurusan/Sekretaris Jurusan T. Elektro S-1

1. IPK 479/137 = 3.50
2. .....
3. - 6 praktikum

Form. S-1a

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

# FORMULIR PENGAJUAN JUDUL SKRIPSI

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO/T. ENERGI LISTRIK S-1**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1. | Nama Mahasiswa : MAKIK MINDIANTONO | | | Nim : 05.12.023 |
| 2. | Waktu Pengajuan : | Tanggal | Bulan | Tahun |
| | | | | |
| 3. | Spesifikasi Judul *) | | | |
| | a. Sistem Tenaga Elektrik<br>b. Energi & Konversi Energi<br>c. Tegangan Tinggi & Pengukuran<br>d. Sistem Kendali Industri | e. Elektronika & Komponen<br>f. Elektro Digital & Komputer<br>g. Elektronika Komunikasi<br>h. Lainnya ..... | | |
| 4. | Konsultasikan judul sesuai materi bidang ilmu kepada Dosen**) :<br>Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT | Ketua Jurusan,<br>Ir. F. Yudi Limpraptono, MT<br>NIP. Y. 1039500274 | | |
| 5. | Judul yang diajukan Mahasiswa : | ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* (STATCOM) BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROL* PADA SALURAN TRANSMISI 150kV UPT. MALANG | | |
| 6. | Perubahan Judul yang Disetujui Dosen materi bidang ilmu | | | |
| 7. | ***Catatan :*** | | | |
| 8. | Persetujuan Judul Skripsi yang dikonsultasikan kepada Dosen materi bidang ilmu | Disetujui, Agustus 2009<br>Dosen | | |

**Perhatian :**

1. Formulir Pengajuan ini harap dikembalikan ke Jurusan paling lambat ***satu minggu*** setelah disetujui Kelompok Dosen Keahlian dengan dilampirkan Proposal Skripsi beserta persyaratan Skripsi sesuai **Form. S-1**.
2. *) dilingkari a, b, c, ....atau f, sesuai bidang Keahlian.
3. **) diisi oleh Jurusan.

**Form.S-2**

Ir. Yusuf Ismail N, MT
Ir. Taufik Hidayat, MT

# PROPOSAL SKRIPSI

# ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* (*STATCOM*) BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROL* PADA SALURAN TRANSMISI 150kV UPT. MALANG


*Disusun Oleh* :

**MAKIK MINDIANTONO**

**N.I.M: 05.12.023**


**Malang, Agustus 2009**
**Diperiksa dan Disetujui Oleh :**

**Ir.Yusuf Ismail Nakhoda,MT**
**NIP.P.101 8800 189**


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

**2009**

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
Jl. Bendungan Sigura-gura No.2
**MALANG**

Lampiran : 1 (satu) berkas
**Pembimbing Skripsi**

Kepada : Yth. Bapak/~~Ibu~~ Ir. Taufik Hidayat, MT
Dosen Institut Teknologi Nasional
MALANG

Yang bertanda tangan di bawah ini :

| | |
|---|---|
| Nama | : **Makik Mindiantono** |
| Nim | : **05.12.023** |
| Jurusan | : **Teknik Elektro S-1** |
| Konsentrasi | : **Teknik ~~Elektronika~~/Energi Listrik** |

Dengan ini mengajukan permohonan, Kiranya Bapak/Ibu bersedia menjadi dosen pembimbing Utama / Pendamping *), untuk penyusunan Skripsi dengan judul (Proposal terlampir) :

**ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* ( STATCOM ) BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROI* PADA SALURAN TRANSMISI 150 kV UPT.MALANG**

Adapun tugas tersebut sebagai salah satu syarat untuk menempuh Ujian Akhir Sarjana Teknik.

Demikian permohonan kami dan atas kesediaan Bapak/Ibu kami ucapkan terimah kasih.

Malang,

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
NIP. Y . 10395900274

Hormat Saya,

Makik Mindiantono
NIM. 05.12.023

*) Coret yang tidak perlu

Form S-3a

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
JL. Bendungan Sigura-gura No.2
MALANG

# PERNYATAAN KESEDIAAN DALAM PEMBIMBINGAN SKRIPSI

Sesuai permohonan dari mahasiswa/i :

Nama : Makik Mirdiantono

Nim : 05.12.023

Semester : 08 (delapan)

Jurusan : Teknik Elektro S-1

Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

Dengan ini Menyatakan bersedia/ tidak bersedia *) Membimbing Skripsi dari mahasiswa tersebut, dengan judul :

**ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* ( STATCOM ) BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROL* PADA SALURAN TRANSMISI 150kV UPT.MALANG**

Demikian Surat Pernyataan ini kami buat agar dapat dipergunakan seperlunya.

Malang, Agustus 2009

**Kami yang membuat pernyataan,**

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

Catatan :
Setelah disetujui agar formulir ini
Diserahkan mahasiswa yang bersangkutan
*Kepada Jurusan untuk diproses lebih lanjut.*
*) Coret yang tidak perlu

PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLUGI 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 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Malang, 28 September 2009

Nomor : ITN-204/I.TA/2/09
Lampiran : -
Perihal : BIMBINGAN SKRIPSI

Kepada : Yth. Sdr./i **IR, YUSUF ISMAIL NAKHODA, MT**
Dosen Institut Teknologi Nasional Malang

Dosen Pembimbing
Jurusan Teknik Elektro S-1
di
Malang

Dengan hormat
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Proposal Skripsi
Untuk Mahasiswa :

| | |
|---|---|
| Nama | : MAKIK MINDIANTONO |
| Nim | : 0512023 |
| Fakultas | : Teknologi Industri |
| Jurusan | : Teknik Elektro S-1 |
| Konsentrasi | : Teknik **Energi Listrik** |

Maka dengan ini-pembimbingan tersebut kami serahkan sepenuhnya kepada Saudara/i selama masa waktu (enam ) 6 bulan, terhitung mulai tanggal :

11 September 2009 s/d 11 Maret 2010

Sebagai satu syarat untuk menempuh ujian Sarjana Teknik,
Jurusan Teknik Elektro S-1
Demikian agar maklum dan atas perhatian serta bantuannya kami sampaikan terima kasih

Ketua Jurusan
Teknik Elektro S-1

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
Nip. Y. 1039500274

Tembusan Kepada Yth :
1. Mahasiswa Yang Bersangkutan
2. Arsip
3. Coret yang tidak perlu

Form. S 4a

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 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Malang, 28 September 2009

Nomor : ITN-205/I.TA/2/09
Lampiran : -
Perihal : BIMBINGAN SKRIPSI

Kepada : Yth. Sdr./i **IR, H. TAUFIK HIDAYAT, MT**
Dosen Institut Teknologi Nasional Malang

Dosen Pembimbing
Jurusan Teknik Elektro S-1
di
Malang

Dengan hormat
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Proposal Skripsi
Untuk Mahasiswa :

| | |
|---|---|
| Nama | : MAKIK MINDIANTONO |
| Nim | : 0512023 |
| Fakultas | : Teknologi Industri |
| Jurusan | : Teknik Elektro S-1 |
| Konsentrasi | : Teknik **Energi Listrik** |

Maka dengan ini pembimbingan tersebut kami serahkan sepenuhnya kepada Saudara/i selama masa waktu (enam ) 6 bulan, terhitung mulai tanggal :

11 September 2009 s/d 11 Maret 2010

Sebagai satu syarat untuk menempuh ujian Sarjana Teknik,
Jurusan Teknik Elektro S-1
Demikian agar maklum dan atas perhatian serta bantuannya kami sampaikan terima kasih

Ketua Jurusan
Teknik Elektro S-1

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
Nip Y. 1039500274

Tembusan Kepada Yth :
1. Mahasiswa Yang Bersangkutan
2. Arsip
3. Coret yang tidak perlu

Form. S 4a

Institut Teknologi Nasional Malang
Fakultas Teknologi Industri
Jurusan Teknik Elektro S-1

# FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

**Nama** : **MAKIK MINDIANTONO**
**Nim** : **05.12.023**
**Masa Bimbingan** : **11 MARET 2010 s/d 11 AGUSTUS 2010**
**Judul Skripsi** : **ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* (STATCOM) BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROLLER* (FLC) PADA SALURAN TRANSMISI 150KV UPT.MALANG**

| NO | Tanggal | Uraian | Paraf Pembimbing |
|---|---|---|---|
| 1 | 14 - 07 - 2010 | Bimbingan Bab I,II,III,IV & V | |
| 2 | 18 - 07 - 2010 | Bimbingan Bab III, IV | |
| 3 | 25 - 07 - 2010 | Bimbingan Perbaikan Bab III & IV | |
| 4 | 29 - 07 - 2010 | Bimbingan Perbaikan Analisa Grafik & Penambahan Kesimpulan | |
| 5 | 04 - 08 - 2010 | Bimbingan Perbaikan Bab IV dan Pengajuan Makalah Seminar | |
| 6 | 05 - 08 - 2010 | Bimbingan Perbaikan Bab V dan Perbaikan Makalah Seminar | |
| 7 | 10 - 08 - 2010 | Acc Makalah Seminar Hasil | |
| 8 | 19 - 08 - 2010 | Konsultasi seluruh Bab | |
| | | | |
| | | | |

Malang, Agustus 2010
Dosen Pembimbing I

Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT
NIP. Y. 101 8800 198

Form S-4b

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

# FORMULIR PENDAFTARAN UJIAN SKRIPSI

**DATA MAHASISWA :**

| | | |
|---|---|---|
| Nama | : | MAKIK MINDIANTONO |
| NIM | : | 05.12.023 |
| Fakultas | : | Teknologi Industri |
| Jurusan | : | Teknik Elektro S-1 |
| Konsentrasi | : | 1. Teknik Energi Listrik *) |
| | | 2. ~~Teknik Elektronika~~ *) |
| | | 3. ~~Tenik Komputer dan Informatika~~ *) |
| Alamat di Malang | : | Jl RAYA MT. HARYONO NO XI |
| Nomor Telp. Rumah / HP | : | 085736294374 |
| Masa Penulisan Skripsi | : | |
| Dosen Pembimbing | : | 1. Ir YUSUF ISMAIL NAKHODA, MT |
| | | 2. Ir H TAUFIK HIDAYAT MT |
| Judul Skripsi | : | ANALISA PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN MENGGUNAKAN STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR (STATCOM) BERBASIS FUZZY LOGIC CONTROLLER (FLC) PADA SALURAN TRANSMISI 150 KV UPT. MALANG |

**PERSYARATAN YANG HARUS DIPENUHI : **)**

| No. | Persyaratan | Paraf ***) |
|---|---|---|
| 1. | Telah mengumpulkan 140 SKS dengan IPK ≥ 2 | |
| 2. | Tidak ada Nilai E | |
| 3. | Telah menyelesaikan / mengumpulkan Laporan Praktek Kerja | |
| 4. | Telah menempuh semua praktikum yang disyaratkan Jurusan | |
| 5. | Menyerahkan Kartu Peserta Seminar Hasil | |
| 6. | Mengumpulkan fotokopi Skripsi yang telah ditandatangani Dosen Pembimbing rangkap 3 (tiga) eksemplar | |
| 7. | Menyerahkan Surat Puas Bimbingan Skripsi dari Dosen Pembimbing | |
| 8. | Telah melunasi persyaratan administrasi (kuitansi warna kuning Rp. 100.000,-) | |

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1

**Ir. F. Yudi Limpraptono, MT**
NIP. Y. 103 95 00274

Malang. _____
Mahasiswa Yang Bersangkutan

( MAKIK MINDIANTONO )

**Catatan :**

*) Coret yang tidak diperlukan.
**) Dilampirkan bukti persyaratan yang diperlukan.
***) Diparaf Sekretaris Jurusan, Recording dan Administrasi Jurusan.

**PT PLN (PERSERO)**
**PENYALURAN DAN PUSAT PENGATUR BEBAN JAWA BALI**
**REGION JAWA TIMUR & BALI**

Jalan Suningrat No. 45 Taman Sidoarjo 61257
Telepon : (031) 7882113, 7882114
Kotak Pos : 4119 SBS
Facsimile : (031) 7882578, 7881024
E-mail : region4@pln-jawa-bali.co.id
Website : www.pln-jawa-bali.co.id

Nomor : 148 /330 /RJTB/ 2009
Surat Sdr. No. :
Lampiran : 1 (satu) lembar.
Perihal : Ijin Survey

16 SEP 2009

Kepada Yth. :
DEKAN
FAKULTAS TEKNIK INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
Di

MALANG

Menunjuk surat Saudara nomor : ITN- 824/III.TA-2/2/09, tanggal : 02 September 2009, perihal : Survey, dengan ini diberitahukan bahwa kami tidak keberatan untuk memberikan ijin kepada Mahasiswa Saudara, bernama :

| NAMA | N.I.M |
|---|---|
| ➢ **Fauzi Hamzah Nasution** | **05.12.021** |
| ➢ **Makik Mindiantono** | **05.12.021** |

Untuk melakukan Survey pada PT. PLN (Persero) P3B JB Region Jawa Timur dan Bali UPT Malang GI. Blimbing, dengan persyaratan sebagai berikut :

1. Mahasiswa tersebut diatas supaya mengisi dan menanda tangani Surat Pernyataan 1 (satu) lembar bermeterai 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 JB Region Jawa Timur dan Bali.
4. Buku Laporan Kerja Praktek Mahasiswa tersebut agar dikirimkan kepada PT. PLN (Persero) P3B JB Region Jawa Timur dan Bali 1 (satu) buah.
5. Untuk informasi lebih lanjut dapat menghubungi PT. PLN (Persero) P3B JB Region Jawa Timur dan Bali Cq. Bidang SDM & ADMINISTRASI.

Demikian harap maklum dan terima kasih atas perhatian saudara.

Semua spv GI ... 150kV wil. UPT mlg. ... agar dibantu sepenuhnya ... + cari data. u/ TA.
17/9-09

PH DEPUTI MANAJER SDM & ADM
SPV ADMINISTRASI SDM

PT PLN (Persero) PENYALURAN DAN PUSAT PENGATUR BEBAN JAWA BALI REGION JAWA TIMUR & BALI

RUM HARTATIK

Tembusan :
1. MB.SDMO PT PLN (Persero) P3B JB
2. Manajer PT PLN (Persero) UPT Malang
3. Sdr. Fauzi Hamzah Nasution, Cs.

MODEL 1002

# SURAT PERNYATAAN

**Yang bertanda tangan dibawah ini, saya :**

| | | |
|---|---|---|
| Nama | : | MAKIK · MINDIANTONO |
| Pria/ Wanita | : | PRIA |
| Tempat / Tanggal lahir | : | PROBOLINGGO / 29 JANUARI 1987 · |
| Alamat / No. telepon | : | JL. ARGOPURO I/17 · RT 01 · RW 04 |
| | | 0857 36 294 374 |
| Pekerjaan | : | MAHASISWA |

**Dengan ini saya menerangkan bahwa :**

1. Saya bersedia dan setuju menanggung semua akibat yang ditimbulkan karena kesalahan maupun kelalaian saya dan semua akibat lainnya yang terjadi pada instalasi peralatan milik PLN selama melakukan Training/ Praktek Kerja/ Riset pada PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali, yang telah mendapat ijin dari PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali ;

2. Saya atas peringatan pertama akan membayar sepenuhnya, semua biaya yang langsung menimbulkan kerugian atau kecelakaan , karena kelalaian saya ;

3. Saya akan segera mematuhi semua petunjuk –petunjuk yang diberikan oleh Petugas PT PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali ;

4. Saya sanggup tidak membocorkan hal – hal yang bersifat rahasia perusahaan PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali dan bahan yang saya peroleh dalam Training/ Praktek Kerja/ Riset, dan tidak saya pergunakan untuk hal – hal yang dapat merugikan PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali

5. Saya sanggup menanggung sendiri segala sesuatu untuk keperluan Training/ Praktek Kerja/ Riset termasuk biaya perjalanan , penginapan makan dan sebagainya ;

6. Saya sanggup menyerahkan 1 (satu) buah buku laporan Training/ Praktek Kerja/ Riset kepada PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali, setelah saya presentasikan kepada Manager Bidang SDMAD PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali mengenai tugas Training/ Praktek Kerja/ Riset.

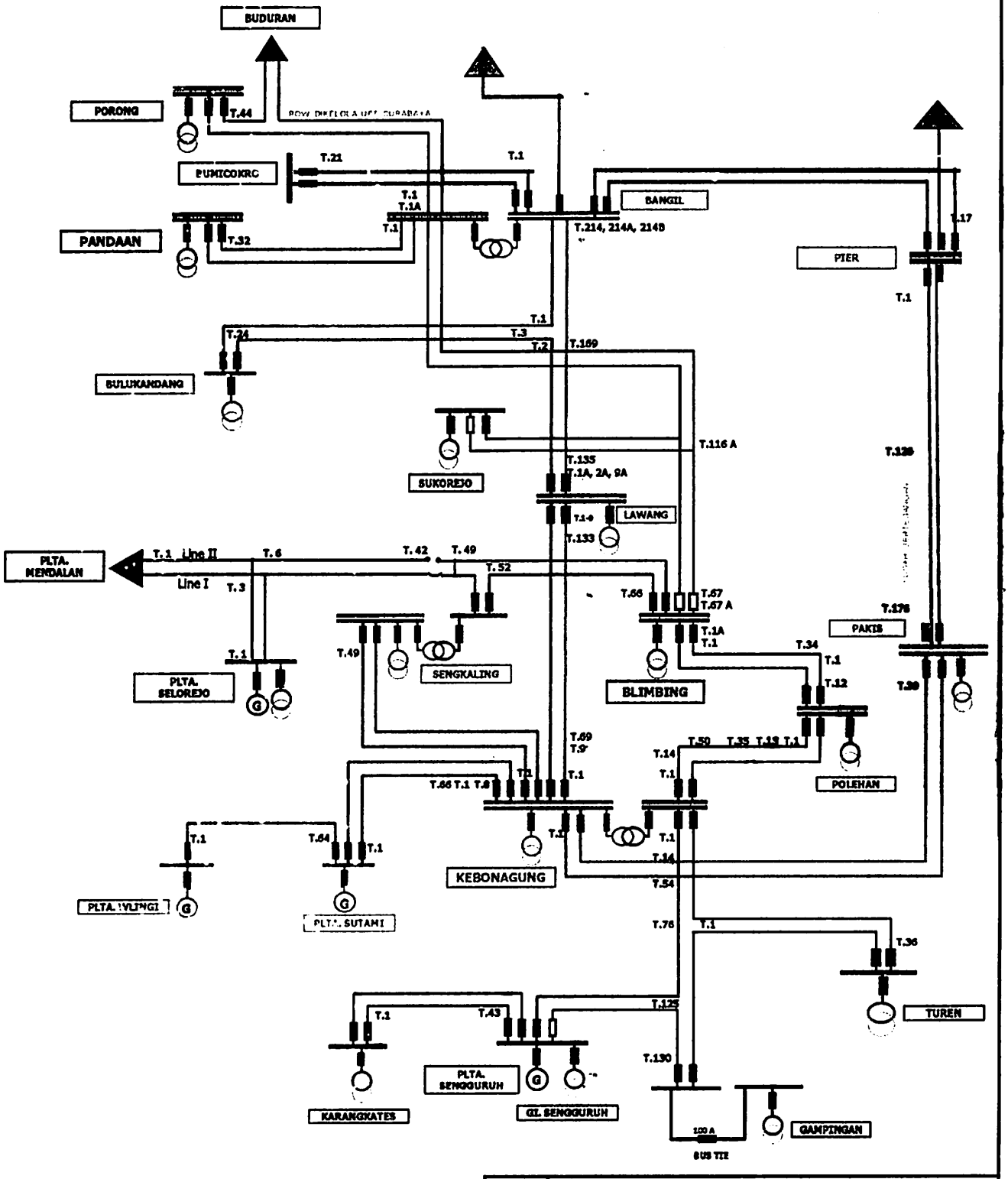
7. Saya tunduk dan akan mentaati semua peraturan yang berlaku di PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali selama Kunjungan/Training/ Praktek Kerja/ Survey Data

**Surabaya,**
**Yang membuat pernyataan**

# LAMPIRAN (B)

# DATA PETUGAS PENGAWAS HARIAN SUTT 150 & 70 kV

## WILAYAH KERJA UPT MALANG




| PT. PLN (PERSERO) P3B<br>REGION JAWA TIMUR DAN BALI<br>UNIT PELAYANAN TRANSMISI MALANG | | | |
|---|---|---|---|
| DIGAMBAR | DIPERIKSA | DISETUJUI | TANGGAL |
| | | | 10 Januari 2009 |

PT. PLN ( PERSERO ) P3B
REGION JAWA TIMUR DAN BALI
UNIT PELAYANAN TRANSMISI

## LAPORAN BEBAN PUNCAK TRFO DI GARDU INDUK
### Bulan : NOVEMBER 2008

| NO | GARDU INDUK | TRAFO | | | | ARUS Nominal (AMP) | OCR SET | | BEBAN TERTINGGI | | | | | | TEMPERATUR | | | JUMLAH OLTC | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NO | MERK | DAYA (MVA) | RATIO (kV) | | A | kV | TGL | JAM | AMP | MW | MVAR | I Nom % | OIL | WINDING LV | WINDING HV | | |
| 1 | BANGIL | I | XIAN | 60 | 150/70 | 231 | 200 | 150 | 6 | 19.00 | 162 | 38,5 | 14,5 | 70,13 | 60 | 57 | 62 | | Operasi tgl. 24-09-2008 |
| 2 | BANGIL | II | MEIDENSA | 50 | 150/70 | 193 | 200 | 150 | 8 | 20.00 | 143 | 32,2 | 14,4 | 74,09 | 62 | | 63 | | Operasi tgl. 28-11-1993 |
| 3 | BANGIL | III | UNINDO | 20 | 150/20 | 577 | 650 | 20 | 8 | 20.00 | 419 | 13,0 | 5,6 | 72,62 | 62 | | 64 | | Operasi tgl. 22-10-1992 |
| 4 | BANGIL | IV | UNINDO | 20 | 150/20 | 577 | 650 | 20 | 8 | 21.00 | 468 | 14,5 | 5,8 | 81,11 | 63 | | 64 | | Operasi tgl. 22-10-1992 |

## LAPORAN BEBAN TRAFO > 80 % I NOMINAL GARDU INDUK
### Bulan : NOVEMBER 2008

| NO | GARDU INDUK | TRAFO | | | | ARUS Nominal (AMP) | OCR SET | | BEBAN TERTINGGI | | | | | | TEMPERATUR | | | JUMLAH OLTC | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | No | MERK | DAYA (MVA) | RATIO (kV) | | A | kV | TGL | JAM | AMP | MW | MVAR | I Nom % | OIL | WINDING LV | WINDING HV | | |
| 1 | BANGIL | I | XIAN | 60 | 150/70 | 231 | 200 | 150 | | | | | | | | | | | Operasi tgl 24-09-2008 |
| 2 | BANGIL | II | MEIDENSA | 50 | 150/70 | 193 | 200 | 150 | | | | | | | | | | | Operasi tgl. 28-11-1993 |
| 3 | BANGIL | III | UNINDO | 20 | 150/20 | 577 | 650 | 20 | | | | | | | | | | | Operasi tgl. 22-10-1992 |
| 4 | BANGIL | IV | UNINDO | 20 | 150/20 | 577 | 650 | 20 | 8 | 21.00 | 468 | 14,5 | 5,8 | 81,11 | 63 | | 64 | | Operasi tgl. 22-10-1992 |

SUPERVISOR GARDU INDUK
BANGIL

MOCH. MUNIR

PT. PLN ( PERSERO ) P3B
REGION JAWA TIMUR DAN BALI
UNIT PELAYANAN TRANSMISI

## LAPORAN PENYALURAN ENERGI & BEBAN PUNCAK TRAFO
**Bulan : NOVEMBER 2008**

| No | GARDU INDUK | No. Urut | DAYA ( MVA ) | TEG ( KV ) | KWH | | | BEBAN TERTINGGI | | | | BEBAN TERTINGGI YANG PERNAH DICAPAI | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | TRAFO | PS Murni | Ke PLN Distribusi | TGL | JAM | MW | MVAR | TGL-BLN-THN | JAM | MW | MVAR |
| 1 | BANGIL | III | 20 | 150/20 | 5.990.890 | 11.989 | 5.978.901 | 08 | 20.00 | 13,0 | 5,6 | 19/11/2007 | 18.00 | 15 | 6.5 |
| 2 | BANGIL | IV | 20 | 150/20 | 7.914.000 | 18.240 | 7.895.760 | 08 | 21.00 | 14,5 | 5,8 | 23/9/2008 | 14.00 | 17,5 | 6 |
| TOTAL | | | | | 13.904.890 | 30.229 | 13.874.661 | | | | | | | | |

Keterangan :
* KWH ke PLN Distribusi = KWH Trafo - KWH PS

SUPERVISOR GARDU INDUK
BANGIL

MOCH . MUNIR

PT. PLN (PERSERO) P3B JAWA BALI
REGION JAWA TIMUR & BALI
UNIT PELAYANAN TRANSMISI MALANG

# PENYALURAN ENERGI DAN BEBAN PUNCAK
## BULAN : NOPEMBER 2008

| No | GARDU INDUK | NOMOR TRAFO | DAYA (MVA) | TEG (KV) | HASIL KWH | | | BEBAN TRAFO TERTINGGI | | | | | BEBAN PERNAH DICAPAI | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | TRAFO | PS MURNI | KE PLN DISTRIBUSI | TGL | JAM | AMP | MW | MVAR | TGL / BL / TH | JAM | AMP | MW | MVAR |
| 1 | KEBONAGUNG | IV | 60 | 150 / 20 | 16.103.940 | 19 765 | 16.084 175 | 21 | 18 00 | 944 | 30,8 | 10,8 | 05 Maret 2007 | 19 00 | 1.054 | 34,2 | 14,1 |
| 2 | KEBONAGUNG | V | 30 | 150 / 20 | 5 774.000 | 0 | 5.774 000 | 07 | 19 00 | 380 | 12 0 | 4,5 | 26 April 2007 | 19 00 | 380 | 10.5 | 4 8 |
| TOTAL | | | | | 21 877 940 | 19 765 | 21.858.175 | | | | | | | | | | |

*Keterangan*
KWH ke PLN Distribusi = KWH Trafo - KWH PS

SUPERVISOR GARDU INDUK

WAHYUDI RUSLAN .

PT. PLN (PERSERO) UBS-P3B
REGION JAWA TIMUR DAN BALI
UPT MALANG

# BEBAN TRAFO DISTRIBUSI PADA SAAT TERTINGGI GARDU INDUK

**BULAN : MEI 2009**

| GARDU INDUK | TEG. NOM. | WAKTU | | TRAFO I | | | | TRAFO II | | | | | | | | | | | | | | | | TOTAL | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ( kV ) | Tgl | Jam | kV | AMP | MW | MVAR | kV | AMP | MW | MVAR | | | | | | | | | | | | | kV | AMP | MW | MVAR |
| LAWANG | 150 | 27 | 18 | 20,4 | 600 | 18,6 | 6,5 | 20,5 | 240 | 7,6 | 2,5 | | | | | | | | | | | | | 20,5 | 840 | 26,2 | 9 |

RJTB/FML11-4012

**KETERANGAN :**

- Untuk menentukan saat terjadinya Tertinggi Gardu Induk ( Peak GI ) dicari **MW** yang paling besar
- Gardu Induk yang terpasang satu Trafo, Peak GI = Tertinggi Trafo
- Sedang untuk GI yang lebih dari satu Trafo, tanggal & jam harus sama dan dicari Total MW yang paling besar

**Malang, 1 Juni 2009**

**SUPERVISOR GI LAWANG**

**YON ISMONO**

PT. PLN ( PERSERO ) P3B
REGION JAWA TIMUR DAN BALI
UNIT PELAYANAN TRANSMISI MALANG

LAPORAN BULANAN PEMBEBANAN TRANSMISI

*BULAN AGUSTUS 2009*

| NO. | GARDU INDUK - JURUSAN | TRANSMISI TERPASANG | | | | | SETT | RATIO | BEBAN TERTINGGI | | | | | | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | TEG. (kV) | ROUTE (KM) | JENIS | MM2 / MCM | NOM. (AMP) | OCR | CT | TGL | JAM | AMP | MW | MVAR | I Nom % | |
| 1 | PAKIS - KEBONAGUNG I | 150 | 12.900 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | 30/08/2009 | 19.00 | 230 | -48 | -17 | 14.4 | Operasi Th 1996 |
| 2 | PAKIS - KEBONAGUNG II | 150 | 12.900 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | 30/08/2009 | 19.00 | 230 | -48 | -17 | 14.4 | Operasi Th 1996 |
| 3 | PAKIS - PIER I | 150 | 15.100 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | 30/08/2009 | 19.00 | 280 | -40 | -18 | 17.5 | Operasi Th 2006 |
| 4 | PAKIS - PIER I | 150 | 15.100 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | 30/08/2009 | 19.00 | 280 | -40 | -18 | 17.5 | Operasi Th 2006 |

LAPORAN BULANAN PEMBEBANAN TRANSMISI > 50 % I NOMINAL

*BULAN AGUSTUS 2009*

| NO. | GARDU INDUK - JURUSAN | TRANSMISI TERPASANG | | | | | SETT | RATIO | BEBAN TERTINGGI | | | | | | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | TEG. (kV) | ROUTE (KM) | JENIS | MM2 / MCM | NOM (AMP) | OCR | CT | TGL | JAM | AMP | MW | MVAR | I Nom % | |
| 1 | PAKIS - KEBONAGUNG I | 150 | 12.900 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | | | | | | | Operasi Th 1996 |
| 2 | PAKIS - KEBONAGUNG II | 150 | 12.900 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | | | | | | | Operasi Th 1996 |
| 3 | PAKIS - PIER I | 150 | 15.100 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | | | | | | | Operasi Th 2006 |
| 4 | PAKIS - PIER I | 150 | 15.100 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | | | | | | | Operasi Th 2006 |

*Keterangan*

SUPERVISOR GI
PAKIS

NANANG SUJIONO

PT. PLN (PERSERO) P3B JAWA BALI
REGION JAWA TIMUR & BALI
UNIT PELAYANAN TRANSMISI MALANG

## LAPORAN BULANAN PEMBEBANAN TRANSMISI
## BULAN : NOPEMBER 2008

| No. | SUTT JURUSAN | TRANSMISI TERPASANG | | | | | | | BEBAN TERTINGGI | | | | | | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | TEG (KV) | ROUTE (KM) | JENIS PHT | $MM^2$ MCM | NOM (Amp) | SETT OCR | RATIO CT | TGL | JAM | MW | Mvar | Amp | I Nom % | |
| 1 | KEBONAGUNG - LAWANG I | 150 | 25.805 | ACSRAW | 330 | 740 | 1100 | 800 | 18 | 18.00 | 49.0 | 17.0 | 230 | 31.08 | |
| 2 | KEBONAGUNG - LAWANG II | 150 | 25.805 | ACSRAW | 330 | 740 | 1100 | 800 | 18 | 18.00 | 49.0 | 17.0 | 230 | 31.08 | |
| 3 | KEBONAGUNG - SENGKL. I | 150 | 15.100 | ACSRHAWK | 477 | 600 | 750 | 1000 | 11 | 18.00 | -35.0 | -6.0 | 160 | 26.67 | |
| 4 | KEBONAGUNG - SENGKL. II | 150 | 15.100 | ACSRHAWK | 477 | 600 | 750 | 1000 | 11 | 18.00 | -35.0 | -6.0 | 160 | 26.67 | |
| 5 | KEBONAGUNG - PAKIS I | 150 | 12.900 | ACSRZEBRA | 2x435 | 1 600 | 1800 | 2000 | 30 | 19.00 | 50.0 | -20.0 | 240 | 15.00 | |
| 6 | KEBONAGUNG - PAKIS II | 150 | 12.900 | ACSRZEBRA | 2x435 | 1.600 | 1800 | 2000 | 30 | 19.00 | 50.0 | -20.0 | 240 | 15.00 | |
| 7 | KEBONAGUNG - POLEHAN I | 70 | 11.425 | ACSROSTRICH | 300 | 440 | *) | 400 | 11 | 12.00 | -28.6 | -14.3 | 280 | 63.64 | |
| 8 | KEBONAGUNG - POLEHAN II | 70 | 11.425 | ACSROSTRICH | 300 | 440 | *) | 400 | 11 | 12.00 | -28.6 | -14.3 | 280 | 63.64 | |
| 9 | KEBONAGUNG - TUREN | 70 | 27.120 | TACSR | 160 | 745 | 480 | 400 | 22 | 19.00 | -30.5 | -15.0 | 300 | 40.27 | |
| 10 | KEBONAGUNG - SENGGURUH | 70 | 25.775 | TACSR | 160 | 745 | 480 | 400 | 22 | 19.00 | -24.0 | -12.0 | 225 | 30.20 | |

## PEMBEBANAN TRANSMISI > 50 % I NOMINAL
## BULAN : NOPEMBER 2008

| No. | SUTT JURUSAN | TRANSMISI TERPASANG | | | | | | | BEBAN TERTINGGI | | | | | | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | TEG (KV) | ROUTE (KM) | JENIS PHT | $MM^2$ MCM | NOM (Amp) | SETT OCR | RATIO CT | TGL | JAM | MW | Mvar | Amp | I Nom % | |
| 1 | KEBONAGUNG - LAWANG I | 150 | 25.805 | ACSRAW | 330 | 740 | 1100 | 800 | | | | | | | |
| 2 | KEBONAGUNG - LAWANG II | 150 | 25.805 | ACSRAW | 330 | 740 | 1100 | 800 | | | | | | | |
| 3 | KEBONAGUNG - SENGKL. I | 150 | 15.100 | ACSRHAWK | 477 | 600 | 750 | 1000 | | | | | | | |
| 4 | KEBONAGUNG - SENGKL. II | 150 | 15.100 | ACSRHAWK | 477 | 600 | 750 | 1000 | | | | | | | |
| 5 | KEBONAGUNG - PAKIS I | 150 | 12.900 | ACSRZEBRA | 2x435 | 1 600 | 1800 | 2000 | | | | | | | |
| 6 | KEBONAGUNG - PAKIS II | 150 | 12.900 | ACSRZEBRA | 2x435 | 1.600 | 1800 | 2000 | | | | | | | |
| 7 | KEBONAGUNG - POLEHAN I | 70 | 11.425 | ACSROSTRICH | 300 | 440 | *) | 400 | 11 | 12.00 | -28.6 | -14.3 | 280 | 63.64 | |
| 8 | KEBONAGUNG - POLEHAN II | 70 | 11.425 | ACSROSTRICH | 300 | 440 | *) | 400 | 11 | 12.00 | -28.6 | -14.3 | 280 | 63.64 | |
| 9 | KEBONAGUNG - TUREN | 70 | 27.120 | TACSR | 160 | 745 | 480 | 400 | | | | | | | |
| 10 | KEBONAGUNG - SENGGURUH | 70 | 25.775 | TACSR | 160 | 745 | 480 | 400 | | | | | | | |

Keterangan :
*) Tidak terpasang OCR

Supervisor Gardu Induk

RJTB / FML / 11 - 2002

Wahyudi Ruslan

PT. PLN ( PERSERO ) P3B
REGION JAWA TIMUR DAN BALI
UNIT PELAYANAN TRANSMISI MALANG

LAPORAN BEBAN PUNCAK TRAFO
GARDU INDUK PAKIS
BULAN NOVEMBER 2008

| NO | GARDU INDUK | TRAFO | | | | ARUS NOM (AMP) | OCR SETT | | BEBAN TERTINGGI | | | | | | TEMPERATUR | | | JUMLAH OLTC | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NO | MERK | DAYA (MVA) | RATIO (KV) | | A | KV | TGL | JAM | AMP | MW | MVAR | I Nom % | OIL | WINDING LV | WINDING HV | | |
| 1 | PAKIS | I | TELK | 30 | 150/20 | 866 | 1000 | 20 | 21 | 19.00 | 758 | 24.2 | 8.1 | 87.53 | 50 | 62 | 62 | 138 | Operasi Tgl 27-09-1996 |

LAPORAN BEBAN TRAFO > 80 % I NOMINAL GARDU INDUK
GARDU INDUK PAKIS
BULAN NOVEMBER 2008

| NO | GARDU INDUK | TRAFO | | | | ARUS NOM (AMP) | OCR SETT | | BEBAN TERTINGGI | | | | | | TEMPERATUR | | | JUMLAH OLTC | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NO | MERK | DAYA (MVA) | RATIO (KV) | | A | KV | TGL | JAM | AMP | MW | MVAR | I Nom % | OIL | WINDING LV | WINDING HV | | |
| 1 | PAKIS | I | TELK | 30 | 150/20 | 866 | 1000 | 20 | 21 | 19.00 | 758 | 24.2 | 8.1 | 87.53 | 50 | 62 | 62 | 138 | Operasi Tgl 27-09-1996 |

SUPERVISOR GI

NANANG SUJIONO

PT. PLN ( PERSERO ) P3B
REGION JAWA TIMUR DAN BALI
UNIT PELAYANAN TRANSMISI MALANG

## LAPORAN BULANAN PEMBEBANAN TRANSMISI

*BULAN NOVEMBER 2008*

| NO. | GARDU INDUK - JURUSAN | TRANSMISI TERPASANG | | | | | SETT | RATIO | BEBAN TERTINGGI | | | | | | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | TEG. (kV) | ROUTE (KM) | JENIS | MM2 / MCM | NOM. (AMP) | OCR | CT | TGL. | JAM | AMP | MW | MVAR | I Nom % | |
| 1 | PAKIS - KEBONAGUNG I | 150 | 12.900 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | 30/11/2008 | 19.00 | 478 | -52 | -20 | 29.9 | Operasi Th 1996 |
| 2 | PAKIS - KEBONAGUNG II | 150 | 12.900 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | 30/11/2008 | 19.00 | 478 | -58 | -20 | 29.9 | Operasi Th 1996 |
| 3 | PAKIS - PIER I | 150 | 15.100 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | 30/11/2008 | 19.00 | 285 | -42 | -14 | 17.8 | Operasi Th 2006 |
| 4 | PAKIS - PIER I | 150 | 15.100 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | 30/11/2008 | 19.00 | 285 | -42 | -14 | 17.8 | Operasi Th 2006 |

## LAPORAN BULANAN PEMBEBANAN TRANSMISI > 50 % I NOMINAL

*BULAN NOVEMBER 2008*

| NO. | GARDU INDUK - JURUSAN | TRANSMISI TERPASANG | | | | | SETT | RATIO | BEBAN TERTINGGI | | | | | | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | TEG. (kV) | ROUTE (KM) | JENIS | MM2 / MCM | NOM (AMP) | OCR | CT | TGL | JAM | AMP | MW | MVAR | I Nom % | |
| 1 | PAKIS - KEBONAGUNG I | 150 | 12.900 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | | | | | | | Operasi Th 1996 |
| 2 | PAKIS - KEBONAGUNG II | 150 | 12.900 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | | | | | | | Operasi Th 1996 |
| 3 | PAKIS - PIER I | 150 | 15.100 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | | | | | | | Operasi Th 2006 |
| 4 | PAKIS - PIER I | 150 | 15.100 | ACSR.ZEBRA | 2x435 | 1600 | 1800 | 2000 | | | | | | | Operasi Th 2006 |

*Keterangan*

SUPERVISOR GI
PAKIS

NANANG SUJIONO

PT. PLN (PERSERO) P3B
REGION JAWA TIMUR DAN BALI
UPT MALANG

# DATA PERALATAN SYSTEM TENAGA ( PST )

## CAPASITOR BANK

Gardu Induk : KEBON AGUNG  Dipasang pada : 150 KV 30MVAR

*CAPASITOR*

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Merk | : | Cooper Power System |
| 2 | Type | : | EX - 7 L |
| 3 | No.Seri | : | |
| 4 | Rated Tegangan | : | 50/125 kV |
| 5 | Cr td | : | 14,15 mf |
| 6 | Co cr | : | 14,25 mf |
| 7 | S/P | : | 2.00 |
| 8 | Jumlah | : | 48 bh |
| 9 | Keterangan | : | 1 phasa 16 Capasitor dihubungkan seri |

Malang : 10 Januari 2009

SUPERVISOR

GI. Kebon Agung