

**DESAIN DAN ANALISIS PENGGUNAAN STATIC VAR  
COMPENSATOR (SVC) UNTUK PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN  
DENGAN ADANYA INJEKSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
MIKRO HIDRO (PLTMH) 15 kVA PADA SISTEM DISTRIBUSI  
SISTEM PENYULANG PUJON-MALANG**

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**TUMPAK SAMOSIR  
NIM. 145060301111081**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG**

**2021**



LEMBAR PENGESAHAN

DESAIN DAN ANALISIS PENGGUNAAN *STATIC VAR COMPENSATOR* (SVC)  
UNTUK PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN DENGAN ADANYA INJEKSI  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO (PLTMH) 15 KVA PADA  
SISTEM DISTRIBUSI SISTEM PENYULANG PUJON-MALANG  
**SKRIPSI**

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



**TUMPAK SAMOSIR**

**NIM. 145060301111081**

Skripsi ini telah disetujui oleh dosen pembimbing  
Pada tanggal 27 Juli 2021

Dosen Pembimbing I

Prof. Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPU.  
NIP. 19730520 200801 1 013

Dosen Pembimbing II

Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc., IPM  
NIP. 19680122 1995 2 001



Mengetahui,  
Jurusan Teknik Elektro

  
Azka Muslim, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 1974 1203 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI

DESAIN DAN ANALISIS PENGGUNAAN *STATIC VAR COMPENSATOR* (SVC) UNTUK PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN DENGAN ADANYA INJEKSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO (PLTMH) 15 kVA PADA SISTEM DISTRIBUSI SISTEM PENYULANG PUJON-MALANG

Nama Mahasiswa : TUMPAK SAMOSIR  
NIM : 145060301111081  
Program Studi : TEKNIK ELEKTRO  
Konsentrasi : TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

DOSEN PEMBIMBING

Pembimbing I : Prof. Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPU



Pembimbing II : Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc., IPM



TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji I : Dr. Tri Nurwati, S.T., M.T.

 disetujui tanggal 27 Juli 2021

Dosen Penguji II : Ir. Soeprapto, M.T.

 disetujui tanggal 27 Juli 2021

Tanggal Ujian : 22 Juli 2021

SK Penguji : No. 1254 Tahun 2021



**PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 27 Juli 2021

**Mahasiswa,**

**TUMPAK SAMOSIR**

**NIM. 145060301111081**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:  
Ayahanda dan Ibunda tercinta  
Abang, Kakak dan Adik tersayang*



## RINGKASAN

**Tumpak Samosir**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2021, **Desain dan Analisis Penggunaan *Static VAR Compensator (SVC)* untuk Perbaikan Profil Tegangan dengan Adanya Injeksi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) 15 kVA pada Sistem Distribusi Sistem Penyulang Pujon-Malang**, Dosen Pembimbing: Prof. Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPU dan Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

Sistem tenaga listrik adalah sebuah jaringan terinterkoneksi yang berfungsi untuk mendistribusikan listrik dari pembangkit ke pengguna. Penyulang pujon merupakan penyulang tipe radial yang mendapat suplai daya energi listrik dari gardu induk Sengkaling, Malang. Pendistribusian daya listrik sering menjadi masalah karena karena jarak yang dilayani tersebar, jauh dari pusat pembangkit dan kecenderungan jaringan tegangan menengah bebannya bersifat induktif.

Makalah ini mengangkat studi perbaikan kualitas tegangan dan rugi-rugi daya pada penyulang Pujon Malang. Penyulang pujon bersifat radial murni yang terbentang sepanjang 56,397 km. Adapun alternatif solusi yang ditawarkan untuk mengatasi permasalahan diatas dapat dilakukan dengan melakukan Injeksi Pembangkit terdistribusi dengan memanfaatkan potensi pembangkit terdistribusi. Sistem pembangkit terdistribusi ini pada umumnya berbasis energi baru dan terbarukan (EBT) yang dikembangkan sekarang ini tidak saja untuk skala unit pembangkit dengan daya yang besar tetapi dengan daya berskala kecil tetapi diharapkan dapat masif dari segi jumlah. Pembangkit tersebar ini bisa berupa Pembangkit Listrik Tenaga Mini/Mikro-hydro (PLTMH). Untuk mengatasi masalah tegangan turun dan rugi-rugi daya pada sebuah penyulang dapat dilakukan dengan pemasangan *Static VAR Compensator(SVC)*.

*SVC* merupakan peralatan yang digunakan untuk mengurangi rugi-rugi daya, meningkatkan aliran daya dan meningkatkan profil tegangan suatu sistem. Pemasangan *svc* pada penyulang Pujon akan disimulasikan dengan menggunakan software etap. Simulasi Pemasangan *SVC* dengan adanya injeksi PLTMH (pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro) berhasil menaikkan tegangan pada penyulang Pujon. Dengan kapasitas *SVC* sebesar  $Q = 1329$  KVAR pada bus 92 dan  $Q = 1664$  KVAR pada bus 107, penyulang Pujon yang awalnya terdapat sekitar 66 % dari total 118 bus dengan tegangan dibawah 18 kV dimana tegangan bus terendah adalah  $V = 0,8872$  pu. Setelah dilakukan simulasi pemasangan *SVC* pada bus 92 dan 107 menggunakan software *ETAP*, tegangan bus terendah  $V = 0,8872$  pu menjadi  $V = 0,9115$  pu dan Rugi-rugi daya aktif dan reaktifnya sebelum dilakukan pemasangan *SVC*  $P = 414,7$  kW dan  $Q = 244,6$  kVAR menjadi  $P = 350,7$  kW dan  $Q = 201,0$  kVAR.

**Kata kunci:** *Pembangkit Terdistribusi, Lose Tegangan , rugi-rugi daya, PLTMH, Static VAR Compensator.*



## SUMMARY

Tumpak Samosir, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, July 2021, Design and Analysis of the Use of Static VAR Compensator (SVC) for Improvement of Voltage Profile with the Injection of 15 kVA Micro Hydro Power Plant (PLTMH) in the Pujon-Malang Feeder Distribution System, Advisor Lecture: Prof. Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPU and Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.*

*The electric power system is an interconnected network that functions to distribute electricity from generators to users. The Pujon feeder is a radial type feeder that is supplied with electrical energy from the Sengkaling substation, Malang. The distribution of electric power is often a problem because of the scattered distances, far from the generating center and the tendency of the medium voltage network to be inductive.*

*This paper raises the study of improving the quality of voltage and power losses in the Pujon Malang feeder. The Pujon feeder is purely radial and spans 56,397 km. The alternative solutions offered to overcome the above problems can be done by doing a distributed Generator Injection by utilizing the potential of distributed generation. Distributed power generation systems are generally based on new and renewable energy (NRE), which are currently being developed not only for large-scale power generation but with small broadcast power, but are expected to be massive from the total number. This scattered power plant can be in the form of a Mini/Micro-hydro Power Plant (PLTMH). To overcome the problem of voltage and power losses in a feeder can be done by installing Static VAR Compensator (SVC).*

*SVC is a tool used to reduce power losses, increase power flow and improve the voltage profile of a system. The installation of SVC on the Pujon feeder will be simulated using the etap software. Simulation Installation of SVC with the injection of PLTMH (Microhydro Power Plant) increases the voltage on the Pujon feeder. With an SVC capacity of  $Q = 1329$  KVAR on bus 92 and  $Q = 1664$  KVAR on bus 107, the Pujon feeder which was originally located around 66% of the total 118 buses with voltage below 18 kV where the lowest bus voltage was  $V = 0.8872$  pu. After installing SVC on buses 92 and 107 using ETAP software, the lowest bus voltage  $V = 0.8872$  pu becomes  $V = 0.9115$  pu and the active and reactive power losses before installing SVC  $P = 414.7$  kW and  $Q = 244.6$  kVAR becomes  $P = 350.7$  kW and  $Q = 201.0$  kVAR.*

**Keywords:** *Distributed Generator, Voltage drop, power losses, PLTMH, Static VAR Compensator*



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... 5

DAFTAR ISI ..... III

DAFTAR GAMBAR ..... V

DAFTAR LAMPIRAN ..... VIII

BAB 1 PENDAHULUAN ..... 1

    1.1 LATAR BELAKANG ..... 1

    1.2 RUMUSAN MASALAH ..... 2

    1.3 BATASAN MASALAH ..... 2

    1.4 TUJUAN PENELITIAN ..... 2

    1.5 MANFAAT PENELITIAN ..... 3

    1.6 SISTEMATIKA PENULISAN ..... 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA ..... 4

    2.1 SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK ..... 4

        2.1.1 Jaringan Distribusi Tegangan Menengah (JTM) ..... 5

        2.1.2 Jaringan Tegangan Rendah (JTR) ..... 8

    2.2 ALIRAN DAYA ..... 9

    2.3 DAYA PADA SISTEM TENAGA LISTRIK ..... 12

    2.4 FAKTOR DAYA (*POWER FACTOR*) ..... 12

    2.5 *FACTS (FLEXIBLE ALTERNATING CURRENT TRANSMISSION SYSTEM)* ..... 13

    2.6 STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) ..... 14

    2.7 SISTEM PENGONTROLAN STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) ..... 15

    2.8 SKEMA DAN MODEL STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) ..... 16

    2.9 KARAKTERISTIK TEGANGAN DAN ARUS SVC ..... 17

    2.10 PENENTUAN KAPASITAS SVC (*STATIC VAR COMPENSATOR*) ..... 20

    2.11 BAGIAN-BAGIAN SVC ..... 21

    2.12 PROFIL TEGANGAN ..... 24

    2.13 PEMBANGKIT TERDISTRIBUSI (*DISTRIBUTED GENERATION*) ..... 25

    2.14 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO ..... 25

BAB III METODE PENELITIAN ..... 26

    3.1. ETAP POWER STATION ..... 26



3.2 TAHAPAN PENELITIAN.....	27
3.3 DIAGRAM ALIR PENELITIAN.....	29
3.4 SKENARIO KONDISI SISTEM.....	30
3.4.1 Kondisi 1 Eksisting Sistem pada Penyulang Pujon.....	30
3.4.2 Kondisi penambahan pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH).....	31
3.4.3 Kondisi 3 penambahan Static VAR Compensator (SVC) di penyulang Pujon.....	32
3.4.4 Menentukan Kapasitas Kapasitor dengan OCP ( <i>Optimal Capacitor Placement</i> )...34	
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>35</b>
4.1 GAMBARAN UMUM GARDU INDUK SENGKALING PENYULANG PUJON MALANG.....	35
4.2 SISTEM DISTRIBUSI 20 kV PENYULANG PUJON MALANG.....	37
4.3 DATA PEMBANGKITAN TERDISTRIBUSI.....	43
4.3.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH).....	43
4.4 ANALISIS ALIRAN DAYA PADA GI SENGKALING PENYULANG PUJON.....	45
4.5 ANALISIS PROFIL TEGANGAN PADA SISTEM 20kV DALAM KONDISI EKSISTING.....	47
4.6 HASIL SIMULASI <i>LOAD FLOW</i> SISTEM PENYULANG PUJON.....	49
4.6.1 Simulasi kondisi 1 (Eksisting).....	50
4.6.2 Simulasi Kondisi 2 (Eksisting Dan Injeksi PLTMH).....	51
4.6.3 Menghitung Kapasitas Static VAR Compensator (SVC).....	52
4.6.4 Simulasi Kondisi 3 (Eksisting dan Injeksi PLTMH Dengan Pemasangan SVC).....	53
<b>BAB 5 PENUTUP.....</b>	<b>60</b>
5.1 KESIMPULAN.....	60
5.2 SARAN.....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>61</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>62</b>



**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2. 1 Sistem penyaluran tenaga listrik..... 5

Gambar 2.2 Konfigurasi jaringan radial ..... 6

Gambar 2. 3 Konfigurasi jaringan hantar penghubung..... 6

Gambar 2. 4 Konfigurasi bagian jaringan lingkaran (loop)..... 7

Gambar 2. 5 Konfigurasi jaringan spindel..... 8

Gambar 2. 6 Konfigurasi jaringan sistem gugus atau kluster..... 8

Gambar 2. 7 Hubungan tegangan menengah ke tegangan rendah dan pelanggan..... 9

Gambar 2. 8 Segitiga daya ..... 13

Gambar 2. 9 Skema Single Line Diagram dan Diagram Block Sistem Kontrol SVC..... 15

Gambar 2. 10 Skema *Static VAR Compensator* (SVC)..... 16

Gambar 2. 11 Model *Static VAR Compensator* (SVC)..... 17

Gambar 2. 12 Karakteristik V-I dari SVC ..... 18

Gambar 2. 13 Rangkaian Ekuivalen SVC..... 19

Gambar 2. 14 Rangkaian ekuivalen suatu jaringan yang telah dipasang SVC ..... 19

Gambar 2. 15 Reactor..... 22

Gambar 2. 16 Kapasitor Bank..... 23

Gambar 2. 17 Cooling System..... 24

Gambar 3. 1 Single line diagram penyulang Pujon ..... 28

Gambar 3.2 Diagram alir penelitian..... 29

Gambar 3.3 Diagram alir kondisi eksisting Penyulang Pujon ..... 30

Gambar 3. 4 Diagram sistem grid pembangkit listrik tenaga mikrohidro..... 31

Gambar 3. 5 Kondisi 2 penambahan PLTMH di Penyulang Pujon..... 32

Gambar 3. 6 Kondisi 3 penambahan SVC pada penyulang Pujon..... 33

Gambar 3.7 Alur menentukan letak dan kapasitas SVC..... 34

Gambar 4.1 Single line diagram GI Sengkaling ..... 36

Gambar 4.2. Single line diagram penyulang Pujon ..... 43

Gambar 4.3 Sistem Pujon dengan penambahan pembangkit tersebar PLTMH pada *software* ETAP 19.01..... 45

Gambar 4.4 Pemodelan single line diagram penyulang pujon di *software* ETAP ..... 46

Gambar 4. 5 Grafik tegangan dalam kondisi eksisting..... 50

Gambar 4.6 Grafik perbandingan profil tegangan dalam grafik hasil untuk kondisi 2 ..... 51

Gambar 4.7 Hasil simulasi OCP pada bus 92..... 53

Gambar 4.8 Hasil Simulasi OCP pada Bus 107..... 54





Gambar 4. 9 Hasil Simulasi Penempatan SVC pada Software ETAP.....55

Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC.....58

Gambar 4. 11 Diagram Perbandingan Rugi-Rugi Daya Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC.....59



**DAFTAR TABEL**

Tabel 4.1 Penyulang GI Sengkaling dan Kapasitas Beban Terpasang ..... 35

Tabel 4.2 Data Spesifikasi dan Jumlah Gardu Distribusi Penyulang Pujon ..... 36

Tabel 4.3 Data Spesifikasi Transformator 3 Penyulang Pujon Gardu Induk Sengkaling ..... 37

Tabel 4.4 Data Pembebanan Transformator ..... 38

Tabel 4.5 Data Saluran Penyulang Pujon ..... 39

Tabel 4.6 Data Spesifikasi Generator PLTMH Bendosari ..... 44

Tabel 4.7 Profil Tegangan kondisi Eksisting ..... 47

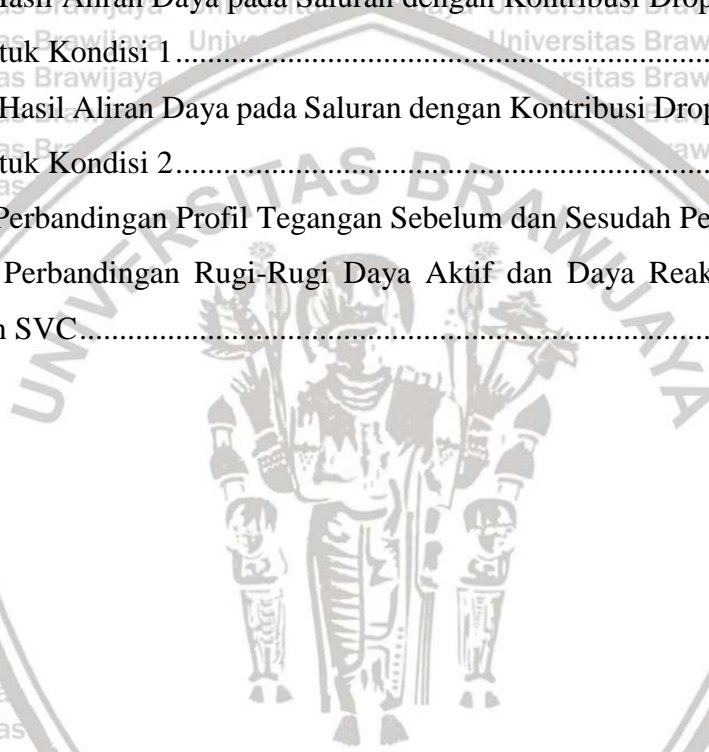
Tabel 4.8 Kondisi sistem yang akan disimulasikan di ETAP ..... 49

Tabel 4. 9 Hasil Aliran Daya pada Saluran dengan Kontribusi Drop Tegangan dan Rugi Daya Terbesar untuk Kondisi 1 ..... 50

Tabel 4. 10 Hasil Aliran Daya pada Saluran dengan Kontribusi Drop Tegangan dan Rugi Daya Terbesar untuk Kondisi 2 ..... 51

Tabel 4.11 Perbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC ..... 55

Tabel 4.12 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Aktif dan Daya Reaktif Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC ..... 58





**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1 Profil Tegangan Pada Sistem 20 kV Dalam Kondisi Eksisting ..... 63

Lampiran 2 Nilai Tegangan, Daya Aktif, dan Daya Reaktif Tiap Bus Simulasi Kondisi 1 (Eksisting)..... 65

Lampiran 3 Profil Tegangan Pada Sistem 20 kV Dalam Kondisi Injeksi PLTMH..... 68

Lampiran 4 Nilai Tegangan, Daya Aktif, dan Daya Reaktif Tiap Bus Simulasi Kondisi injeksi PLTMH ..... 71

Lampiran 5 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Aktif dan Daya Reaktif Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC..... 74

Lampiran 6 Tabel rugi-rugi daya aktif dan reaktif sebelum dan sesudah pemasangan SVC .77



## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan salah satu sumber kebutuhan yang harus terpenuhi dan berpengaruh bagi kehidupan orang banyak. Oleh sebab itu diperlukan sebuah sistem tenaga listrik yang stabil untuk dapat terus menjamin ketersediaan energi listrik. Sistem tenaga listrik adalah sebuah jaringan terinterkoneksi yang berfungsi untuk mendistribusikan listrik dari pembangkit ke pengguna. Penyediaan energi listrik harus dapat menjamin ketersediannya dalam jumlah yang cukup, berkesinambungan, harga yang wajar, dan memiliki kualitas yang baik.

Pertumbuhan beban dari waktu ke waktu semakin bertambah, harus diikuti dengan penyediaan daya listrik yang cukup dan handal. Pendistribusian daya listrik merupakan suatu permasalahan yang sering timbul, karena jarak dari beban yang dilayani tersebar, jauh dari pusat pembangkit dan kecenderungan jaringan tegangan menengah bebannya bersifat induktif (Ervina dkk, 2012:1)

Sistem yang tegangannya diantara 20 kV dan 500 kV sering memerlukan reaktor pada saat beban rendah dan untuk itu diperlukan kapasitor statis pada saat beban tinggi. Variasi beban yang fluktuatif yang terjadi selama 24 jam, memerlukan pemasangan peralatan yang dapat menanggulangi permasalahan tersebut (Djiteng, 1990).

SVC (*Static VAR Compensator*) merupakan salah satu peralatan kompensasi yang dapat menyerap dan menghasilkan daya reaktif melalui kontrol sudut penyalan (*firing angle*) *thyristor* (Manju & Subbiah, 2013:190). Pada tahun 2012 Kour dan Brar dalam penelitiannya menyatakan bahwa SVC (*Static VAR Compensator*) merupakan suatu peralatan yang dapat digunakan untuk mengurangi rugi-rugi daya, meningkatkan aliran daya serta meningkatkan profil tegangan sistem.

PT. PLN (Persero) sebagai pemasok energi listrik di Indonesia harus berupaya maksimal dalam pelayanan energi listrik kepada pelanggan atau konsumen. Meningkatkan kemampuan transmisi daya, meningkatkan stabilitas sistem dan ketersediaan sistem, meningkatkan faktor daya dan mengurangi susut pada saluran transmisi. Usaha untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif pada sistem serta menjaga kestabilan sistem merupakan salah satu upaya yang bisa dilakukan PT. PLN (Persero). Pada penelitian ini, objek penelitian yang dipilih yaitu penyulang Pujon-Malang yang merupakan salah satu penyulang di wilayah kota Batu yang mendapatkan suplai daya energi listrik dari Gardu Induk Sengkaling



yang dikelola oleh PT. PLN APP Malang yang berada dibawah wewenang PT. PLN P3B Region Jawa Timur dan Bali serta dibawah wewenang PT. PLN P3B Pusat.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh pemasangan *Static VAR Compensator* (SVC) terhadap rugi-rugi daya di penyulang Pujon?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan *Static VAR Compensator* (SVC) untuk perbaikan profil tegangan dengan adanya injeksi pembangkit listrik berbasis energi baru dan terbarukan pada sistem distribusi sistem penyulang Pujon-Malang?
3. Berapa nilai kapasitas *Static Var Compensator* (SVC) agar penurunan tegangan dapat diatasi di penyulang Pujon?

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk memperjelas dan menghindari meluasnya masalah, maka dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian yang akan diteliti yaitu penyulang Pujon yang masuk wilayah Rayon Batu Area Pelayanan Jaringan Malang PT. PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur.
2. Data yang digunakan merupakan data sekunder dari PT. PLN Rayon Sengkaling yakni Gardu Induk (G.I) Sengkaling dan Penyulang Pujon.
3. Tidak membahas aspek ekonomis dari pemasangan SVC.
4. Pemodelan sistem daya dan simulasi dilakukan dengan *software ETAP Power Station*.

19.01.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tugas akhir ini memiliki beberapa tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh pemasangan *Static VAR Compensator* (SVC) terhadap rugi-rugi daya di penyulang Pujon-Malang.
2. mengetahui pengaruh penggunaan *Static VAR Compensator* (SVC) untuk perbaikan profil tegangan dengan adanya injeksi pembangkit listrik berbasis energi baru dan terbarukan pada sistem distribusi sistem penyulang Pujon-Malang
3. mengetahui nilai kapasitas *Static Var Compensator* (SVC) agar penurunan tegangan dapat diatasi.



## 1.5 Manfaat Penelitian

Dalam tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat yaitu mengetahui secara simulasi perubahan aliran daya yang terjadi pada saluran, profil tegangan dan penurunan rugi-rugi daya sebagai akibat dari pemasangan SVC pada jaringan distribusi 20 kV. Oleh sebab itu, dapat diaplikasikan pada jaringan-jaringan distribusi primer. Secara khusus jaringan distribusi primer yang terinterkoneksi dengan PLTMH Bendosari guna memperoleh kualitas yang lebih andal.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan penelitian ini terdiri dari lima bab, yaitu:

**BAB I :** Merupakan bab pendahuluan yang berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penulisan, manfaat penulisan dan sistematika penulisan.

**BAB II :** Merupakan bab tinjauan pustaka yang memuat kumpulan landasan-landasan teori yang mendukung penelitian seperti teori tentang *Flexible alternating current transmission system* (FACTS), static VAR compensator (SVC), Profil Tegangan, sistem distribusi, aliran daya.

**BAB III :** Merupakan Merupakan bab metode penelitian yang berisi proses atau alur penelitian ini dikerjakan mulai dari studi literatur, pengumpulan data sampai pada analisis pembahasan dan penarikan kesimpulan.

**BAB IV :** Merupakan bab analisis dan pembahasan yang memuat hasil perhitungan dan analisis dari data yang sudah dikumpulkan selama proses penelitian.

**BAB V :** Merupakan bab penutup yang berisi kesimpulan hasil penelitian dan saran dari penulis.



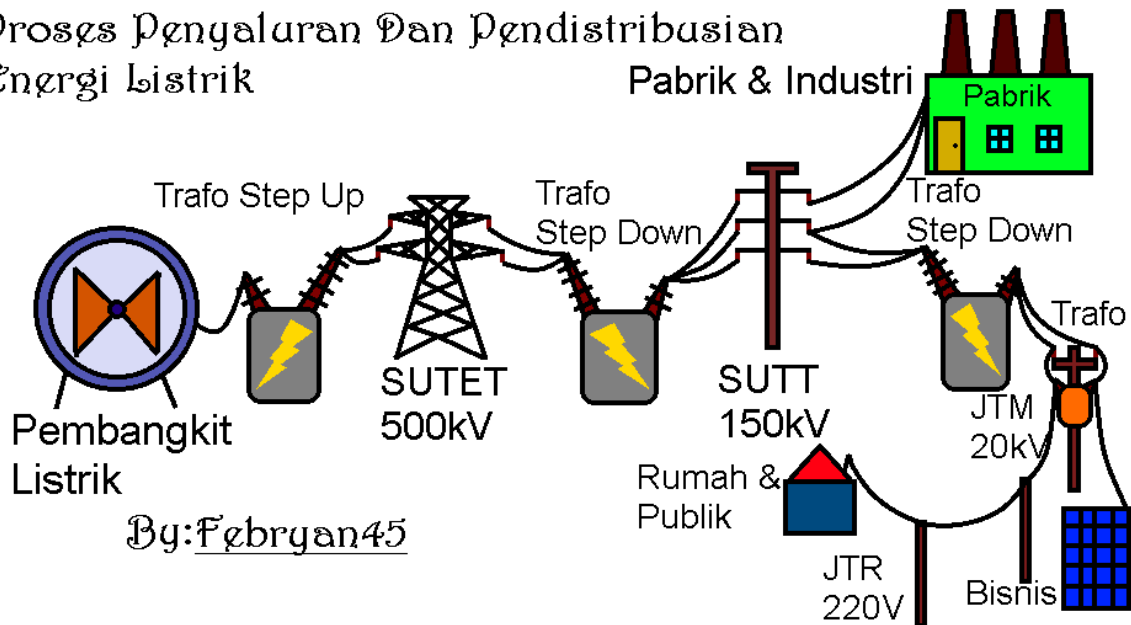
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Distribusi Tenaga Listrik merupakan tahap akhir dalam pengiriman tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar sampai ke pelanggan. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan dilakukan untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi. Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen.

Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan trafo-trafo *step-up*. Dikarenakan nilai tegangan yang sangat tinggi menjadi tidak cocok dengan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka, pada daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo-trafo *step-down*. Akibatnya, bila ditinjau nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber hingga titik beban, terdapat bagian-bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda (Suhadi, 2008).

# Proses Pengaluran Dan Pendistribusian Energi Listrik



By: Februan45

Gambar 2. 1 Sistem penyaluran tenaga listrik.

Sumber: ([https://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Proses\\_Penyaluran\\_Dan\\_Pendistribusian\\_Energi\\_Listrik.png](https://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Proses_Penyaluran_Dan_Pendistribusian_Energi_Listrik.png))

Jaringan distribusi listrik ini terdiri dari pusat pengatur dan penyaluran yang mengatur serta membagi besarnya beban yang akan dipakai dan disalurkan ke pelanggan. Sistem proteksi yang memadai diperlukan untuk menunjang pendistribusian energi listrik kepada pelanggan. Sistem proteksi ini berfungsi untuk mengamankan bagian yang mengalami gangguan dari kerusakan. Peralatan proteksi berfungsi untuk mendeteksi tempat terjadinya gangguan dan juga memutuskan untuk memisahkan bagian jaringan yang terjadi gangguan dengan jaringan yang masih normal.

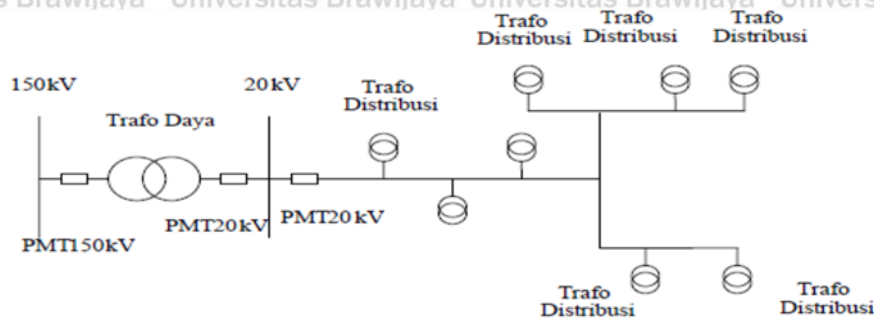
## 2.1.1 Jaringan Distribusi Tegangan Menengah (JTM)

Jaringan tegangan menengah sering disebut juga jaringan primer distribusi merupakan suatu bagian daripada sistem tenaga listrik antara gardu induk dan gardu distribusi. Jaringan ini dapat dikelompokkan menjadi 5 bagian, yaitu jaringan radial, jaringan hantaran penghubung (*tie line*), jaringan lingkaran (*loop*), jaringan spindel dan sistem gugus (*kluster*).

### A. Jaringan Radial

Adalah jaringan distribusi primer yang sederhana dan murah. Pada jaringan ini arus yang paling besar adalah arus yang paling dekat pada gardu induk.





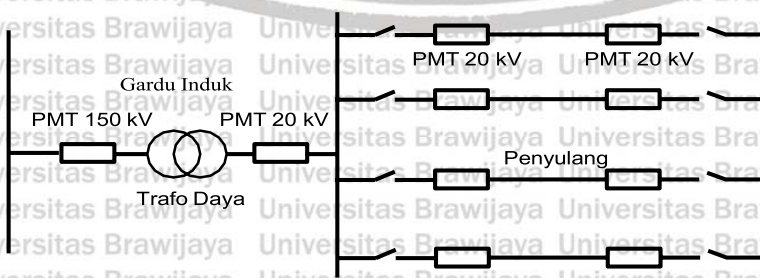
Gambar 2.2 Konfigurasi jaringan radial

Sumber: (Tanjung Abrar, 2012)

Konfigurasi jaringan radial dipasang gardu-gardu distribusi untuk pelanggan. Gardu distribusi adalah tempat dimana trafo untuk konsumen dipasang. Bisa dalam bangunan beton atau diletakkan diatas tiang. Keuntungan dari sistem ini adalah sistem ini tidak rumit dan lebih murah dibandingkan sistem yang lainnya. Namun keandalan sistem ini lebih rendah dibandingkan dengan sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam (Tanjung Abrar, 2012).

B. Jaringan Hantaran Penghubung ( Tie Line)

Sistem distribusi ini digunakan untuk pelanggan penting yang tidak boleh padam seperti bandar udara, rumah sakit, kantor pemerintahan, industri, dan lain-lain. Sistem ini memiliki minimal 2 penyulang sekaligus dengan tambahan Automatic Change Over Switch / automatic transfer switch setiap penyulang terkoneksi ke gardu pelanggan khusus tersebut sehingga bila satu penyulang mengalami gangguan maka pasokan listrik akan dipindah ke penyulang lain.

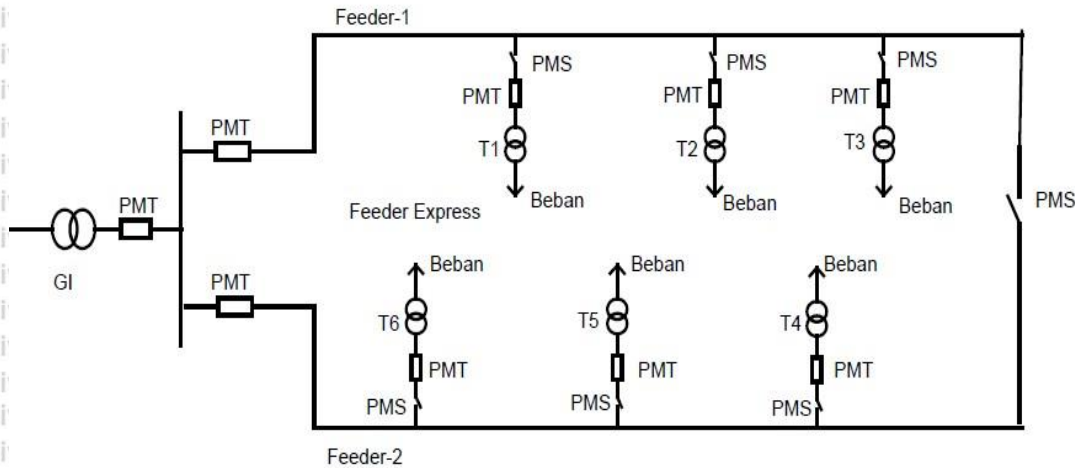


Gambar 2.3 Konfigurasi jaringan hantar penghubung

Sumber: (Sukmawidjaja Maula, 2008)

C. Jaringan Lingkar ( Loop)

Pada jaringan menengah struktur lingkaran (*Loop*) dimungkinkan pemasokannya dari beberapa gardu induk sehingga tingkat keandalannya relatif baik. Pada bagian tengah pada rangkaian dipasang sebuah pemisah saluran (PMS) yang gunanya untuk mengambil alih fungsi penyaluran pada satu sisi penyulang apabila salah satu lainnya mengalami gangguan (Tanjung Abrar, 2008).



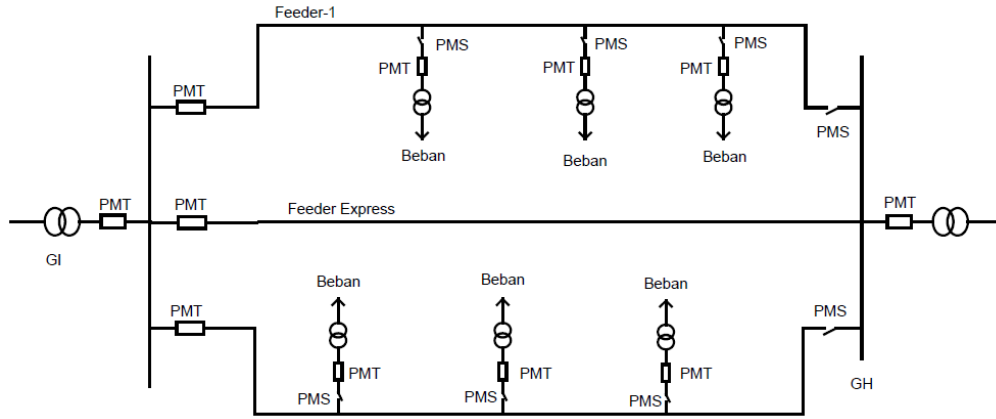
Gambar 2. 4 Konfigurasi bagian jaringan lingkaran (*loop*)

Sumber: (Tanjung Abrar, 2012)

#### D. Jaringan Spindel

Jaringan spindel yang ditunjukkan pada gambar 2.5 merupakan suatu pola kombinasi dari pola radial dan *loop*. Spindel terdiri dari beberapa penyulang (*feeder*) yang tegangannya diberikan dari gardu induk dan berakhir di Gardu Hubung (GH). Pada sebuah spindel biasanya terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan (*express*) yang akan dihubungkan melalui gardu hubung. Pola Spindel biasanya digunakan pada jaringan tegangan menengah (JTM) yang menggunakan kabel tanah/saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM). Namun pada pengoperasiannya, sistem Spindel berfungsi sebagai sistem Radial. Di dalam sebuah penyulang aktif terdiri dari gardu distribusi yang berfungsi untuk mendistribusikan tegangan kepada konsumen baik konsumen tegangan rendah (TR) atau tegangan menengah (TM).

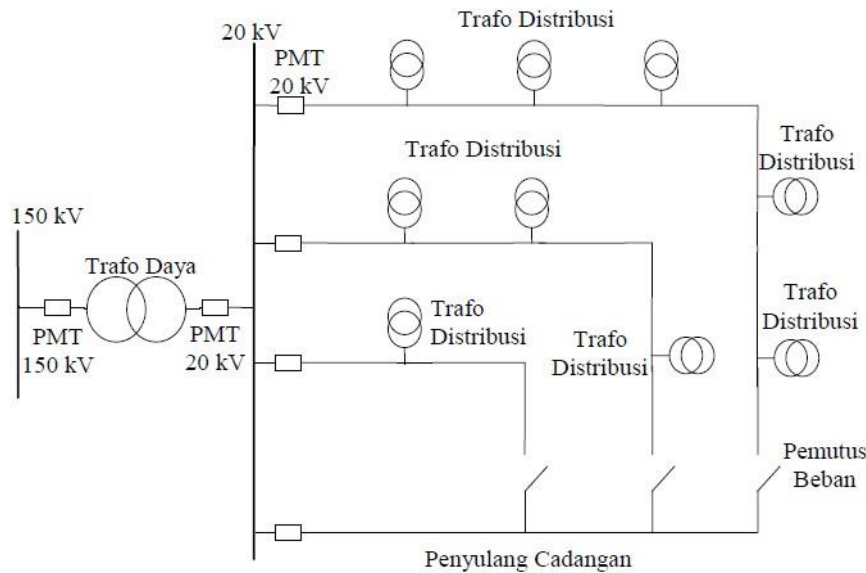




Gambar 2. 5 Konfigurasi jaringan spindel

E. Sistem Gugus atau Sistem Kluster

Konfigurasi Gugus seperti pada Gambar 2.6 banyak digunakan untuk kota besar yang memiliki kerapatan beban yang tinggi. Dalam sistem ini terdapat saklar pemutus beban, dan penyulang cadangan. penyulang ini berfungsi bila ada gangguan yang terjadi pada salah satu penyulang konsumen maka penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai ke konsumen.

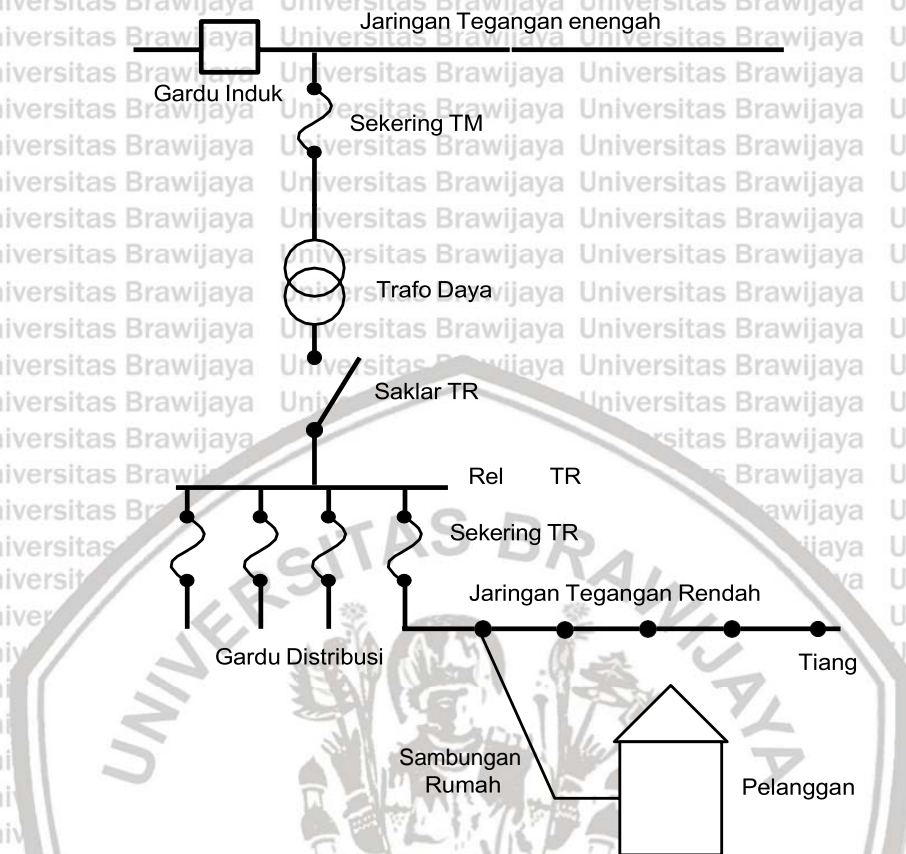


Gambar 2. 6 Konfigurasi jaringan sistem gugus atau kluster

2.1.2 Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

Jaringan tegangan sekunder seperti pada Gambar 2.7 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen. Jaringan tegangan rendah ini merupakan bagian yang langsung berhubungan

dengan konsumen, jadi sistem ini selain berfungsi menerima daya listrik dari Pujon daya (trafo distribusi), juga akan mengirimkan serta mendistribusikan daya ke konsumen.



Gambar 2. 7 Hubungan tegangan menengah ke tegangan rendah dan pelanggan

Sumber: (Djiteng,1990:3)

## 2.2 Aliran Daya

Sistem tenaga listrik terdiri dari banyak bus. Untuk menyelesaikan aliran daya di sistem tenaga listrik salah satunya menggunakan metode Newton Rhapson. Pada metode ini sistem dibagi sehingga memiliki tiga kelompok bus, yaitu bus generator, referensi, dan beban. Perhitungan dengan metode Newton Rhapson merupakan cara yang relevan untuk penghitungan aliran daya pada sistem yang terdiri dari banyak bus karena memiliki kecepatan dalam mengkalkulasi (Saadat, 1999). Perhitungan persamaan ini menggunakan matriks admitansi bus yang dirumuskan sebagai berikut:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \dots\dots\dots(2.1)$$

Arus yang mengalir pada sistem berbentuk bilangan kompleks sehingga persamaan di atas dapat dinyatakan dalam bentuk polar, yaitu:



$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots \dots \dots (2.2)$$

Daya nyata dan reaktif di bus i adalah:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan (2-2) ke persamaan (2-3) didapatkan:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle - \delta_i \dots \dots \dots (2.4)$$

Pemisahan antara nilai rill dan imajiner dilakukan sehingga hasilnya:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots \dots \dots (2.5)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan menggunakan metode iterasi dan menyelesaikan dengan matriks, maka kedua persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.7)$$

Pada persamaan tersebut bus pertama dianggap sebagai bus referensi. Penggunaan matriks Jacobian dapat digunakan untuk merepresentasikan persamaan (2-7) sehingga dihasilkan:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V|^{(k)} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.8)$$

Elemen matriks Jacobian dapat dicari dengan:

Elemen diagonal dan off-diagonal dari J<sub>1</sub>

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots \dots \dots (2.9)$$

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial \delta_j} = - |V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \dots \dots \dots (2.10)$$

Elemen diagonal dan off-diagonal dari J<sub>2</sub>

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial |V_i|} = 2|V_i^{(k)}||Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j^{(k)}||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots (2.11)$$

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial |V_j|} = |V_i^{(k)}||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \dots (2.12)$$

Elemen J<sub>3</sub>

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i^{(k)}||V_j^{(k)}||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots (2.13)$$

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_j} = -|V_i^{(k)}||V_j^{(k)}||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \dots (2.14)$$

Elemen J<sub>4</sub>

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial |V_i|} = -2|V_i^{(k)}||Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j^{(k)}||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \dots (2.15)$$

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial |V_j|} = -|V_i^{(k)}||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \dots (2.16)$$

Perhitungan akan selesai ketika hasil perhitungan  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  antara nilai spesifikasi dan perhitungan memiliki selisih yang sangat kecil.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i,spec} - P_{i,calc} \dots (2.17)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_{i,spec} - Q_{i,calc} \dots (2.18)$$

Selanjutnya, nilai  $\Delta \delta_i^{(k)}$  dan  $\Delta |V_i^{(k)}|$  dapat dicari dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V|^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \dots (2.19)$$

Untuk mendapatkan nilai  $\delta_i^{(k)}$  dan  $|V_i^{(k)}|$  yang baru menggunakan persamaan:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \dots (2.20)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \dots (2.21)$$

Selanjutnya proses iterasi kembali lagi ke proses awal dan hal ini terus diulang sampai nilai  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  atau semua nilai  $\Delta \delta_i^{(k)}$  dan  $\Delta |V_i^{(k)}|$  lebih kecil dari suatu indeks ketepatan yang telah dipilih.



### 2.3 Daya pada Sistem Tenaga Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam rangkaian listrik. Dengan satuan watt atau Joule per detik dalam SI, daya listrik menjadi besaran terukur adanya produksi energi listrik oleh pembangkit, maupun adanya penyerapan energi listrik oleh beban listrik. Dalam sistem listrik arus bolak-balik (AC) tiga fasa, ada tiga jenis daya, yaitu:

a. Daya aktif (*active power*) merupakan daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah Watt. Secara umum daya aktif dinyatakan oleh persamaan:

$$P_{1Fasa} = V_f \cdot I_f \cos \varphi \dots\dots\dots (2.22)$$

$$P_{3Fasa} = \sqrt{3} V_L \cdot I_L \cos \varphi \dots\dots\dots (2.23)$$

Dimana:  $V_L$  = tegangan antar fasa (Volt).  $I_L$  = arus antar fasa (Amper).

$V_f$  = tegangan fasa netral (Volt).  $I_f$  = arus fasa netral (Amper).

$P$  = daya aktif (Watt).

b. Daya reaktif (*reactive power*) merupakan daya yang dibutuhkan untuk membangkitkan medan magnet di kumparan-kumparan beban induktif. Secara umum daya reaktif dinyatakan oleh persamaan:

$$Q_{1Fasa} = V_f \cdot I_f \sin \varphi \dots\dots\dots (2.24)$$

$$Q_{3Fasa} = \sqrt{3} V_L \cdot I_L \sin \varphi \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana:  $V_L$  = tegangan antar fasa (Volt).  $I_L$  = arus antar fasa (Amper).

$V_f$  = tegangan fasa netral (Volt).  $I_f$  = arus fasa netral (Amper).

$Q$  = daya reaktif (Watt)

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

Secara umum daya semu dinyatakan oleh persamaan:

$$S = P + jQ \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana:  $P$  = daya aktif (Watt).  $Q$  = daya reaktif (VAR).

$S$  = daya semu (VA).

### 2.4 Faktor daya (*power factor*)

Didefinisikan sebagai perbandingan antara daya nyata (P) dan daya semu (S), dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$\text{Faktor daya} = \frac{\text{Daya Nyata (W)}}{\text{Daya Semu (VA)}}$$



Gambar 2. 8 Segitiga daya

Dari persamaan dituliskan menjadi:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{P+jQ} = \frac{W}{VA}$$

$$W = VA \cos \varphi$$

$$VAR = VA \sin \varphi = W \tan \varphi \dots\dots\dots (2.27)$$

$$\tan \varphi = \frac{VAR}{W}$$

- Dimana:
- $\cos \varphi$  = faktor daya.
  - P = daya nyata (Watt).
  - S = daya semu (VA).
  - Q = daya reaktif (VAR).

**2.5 FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System)**

FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) merupakan kumpulan peralatan yang dibuat dari komponen elektronik *solid state* untuk pengaturan atau pengendalian transmisi daya listrik secara fleksibel. Peralatan FACTS digunakan untuk dapat menggantikan peralatan kendali daya listrik mekanik yang dipasang pada jaringan transmisi listrik seperti pemutus rangkaian (*circuit breakers*), perubah tegangan variabel (*transformer tap changers*), kapasitor *shunt* (*shunt capacitor switches*) dan lainnya. FACTS dalam pengembangannya sangat berhubungan dengan pengkajian aplikasi Thyristor untuk elektronika daya. Dengan pemanfaatan peralatan kendali elektronika daya tersebut, FACTS akan sangat diminati karena menyediakan banyak kelebihan dibandingkan dengan peralatan kendali mekanik. FACTS dapat mengubah arah atau jalur daya listrik dalam waktu kurang dari satu *cycle*. Dengan kecepatan reaksi yang tinggi ini berarti FACTS dapat juga menyediakan fungsi lainnya yang tidak mungkin didapatkan pada alat kendali mekanik,



seperti untuk mengatasi gangguan peralihan (*transient disturbance*) pada sistem jaringan transmisi.

peralatan kendali mekanik pada umumnya menjadi aus (*wear out*) sehingga penggunaannya pun dibatasi. contohnya transformer yang dipakai untuk mengkompensasi beban yang berubah (*shifting load*) hanya dibatasi kurang dari 12 kali perubahan pada tap nya dan memakan waktu lebih dari satu menit (*banyak cycle*) untuk setiap perubahan.

FACTS mampu melakukan fungsi yang sama dengan kecepatan 2 kali perubahan dalam satu *cycle*. FACTS dapat memanfaatkan jaringan transmisi daya listrik secara fleksibel pada tingkat yang dekat dengan batas panas (*thermal limit*) transmisi secara aman dengan menghindari kemungkinan terjadinya kelebihan beban (*overloading*). FACTS akan menghemat banyak biaya untuk penambahan penyediaan daya listrik karena menghindari pembangunan jaringan transmisi baru. Keuntungan pengoperasian jaringan transmisi pada batas panas ini adalah dengan dapat diturunkannya *generation reserve margin* yang biasanya disediakan untuk keperluan cadangan (*backup*). Dengan peralatan FACTS, *generation reserve margin* dapat dikurangi dari 18% menjadi kurang dari 15%. Selisih dari penurunan tersebut berarti peningkatan efisiensi penggunaan daya listrik yang disediakan oleh generator dan penambahan penyediaan kebutuhan daya listrik.

## 2.6 Static VAR Compensator (SVC)

*Static VAR Compensator* (SVC) adalah sumber daya reaktif yang dapat diatur besarnya dan merupakan alat yang pengembangannya mutakhir. Perangkat SVC mengatur tegangan pada masing-masing terminal dengan mengatur jumlah daya reaktif yang diinjeksikan atau diserap dari sistem daya. Saat tegangan sistem rendah, SVC membangkitkan daya reaktif (SVC Kapasitif). Saat tegangan sistem tinggi, SVC menyerap daya reaktif (SVC Induktif). Pengaturan daya reaktif ini dilakukan dengan *switching* bank kapasitor dan bank induktor 3 fasa yang terhubung pada sisi sekunder transformator. Kondisi *on* dan *off* kapasitor bank diatur oleh *thyristor switch* (*Thyristor Switched Capacitor or TSC*). Kondisi *on* dan *off* reaktor diatur oleh *Thyristor Switch Reactor (TSR)* atau *Thyristor Controlled Reactor (TCR)*.

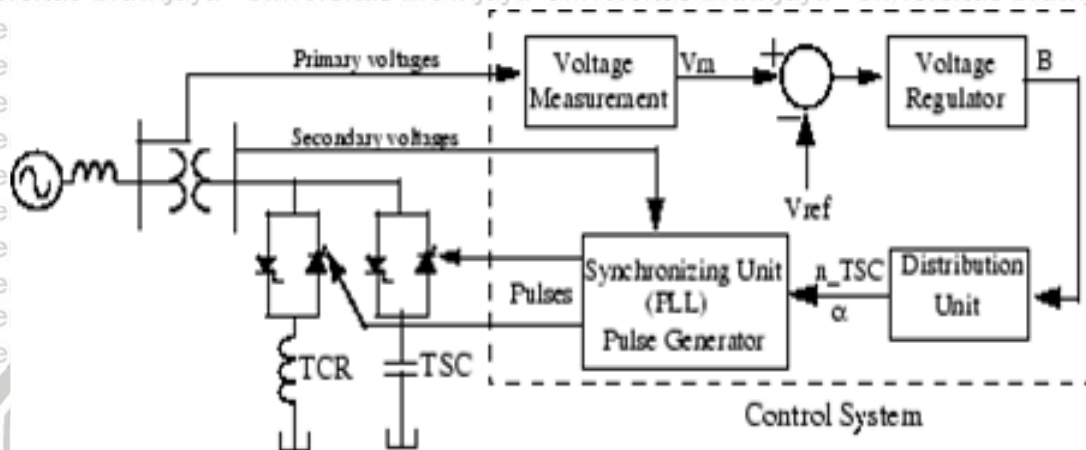
*Static VAR Compensator* (SVC) menyediakan kompensasi *fast-acting reactive power* pada jaringan transmisi listrik tegangan tinggi. SVC merupakan bagian dari sistem peralatan AC transmisi yang fleksibel, pengatur tegangan dan penstabil sistem. Istilah "*static*" berarti bahwa pada saat beroperasi atau melakukan perubahan kompensasi tidak ada bagian SVC yang bergerak, karena proses kompensasi sepenuhnya dikontrol oleh sistem elektronika daya. Kebutuhan daya reaktif pada sistem dapat dipasok oleh unit pembangkit, sistem



transmisi, reaktor dan kapasitor. kebutuhan daya reaktif pada sistem transmisi bervariasi disebabkan oleh perubahan beban, komposisi unit pembangkit yang beroperasi, perubahan konfigurasi jaringan. hal ini berdampak pada bervariasinya level tegangan yang paling besar, maka diperlukan sistem kompensasi daya reaktif yang dapat mengikuti perubahan tegangan.

### 2.7 Sistem pengontrolan Static VAR Compensator (SVC)

Sistem pengontrolan dan operasi dari perangkat elektronika daya SVC diterangkan dalam diagram blok dibawah ini :



Gambar 2. 9 Skema Single Line Diagram dan Diagram Block Sistem Kontrol SVC

SVC terhubung paralel dengan sistem penyaluran (transmisi) namun perangkat SVC tidak langsung terkoneksi dengan tegangan transmisi (tegangan tinggi) melainkan tegangan lebih dulu diturunkan ke level yang lebih rendah. Hal ini bertujuan untuk mengurangi ukuran dan komponen SVC yang akan dipasang. Karena untuk memikul tegangan sistem yang tinggi diperlukan sistem isolasi dan konduktor yang lebih besar sehingga diperlukan biaya yang lebih besar pula. Oleh karena itu, diperlukan trafo sebagai penurun tegangan. Jadi untuk menghemat biaya para pengguna tidak perlu membeli trafo untuk mengkonversi level tegangan dikarenakan tegangan sistem menengah masih berada pada nilai toleransi peralatan-peralatan SVC. Sehingga perangkat SCV masih mampu untuk memikul tegangan sistem tersebut secara langsung.

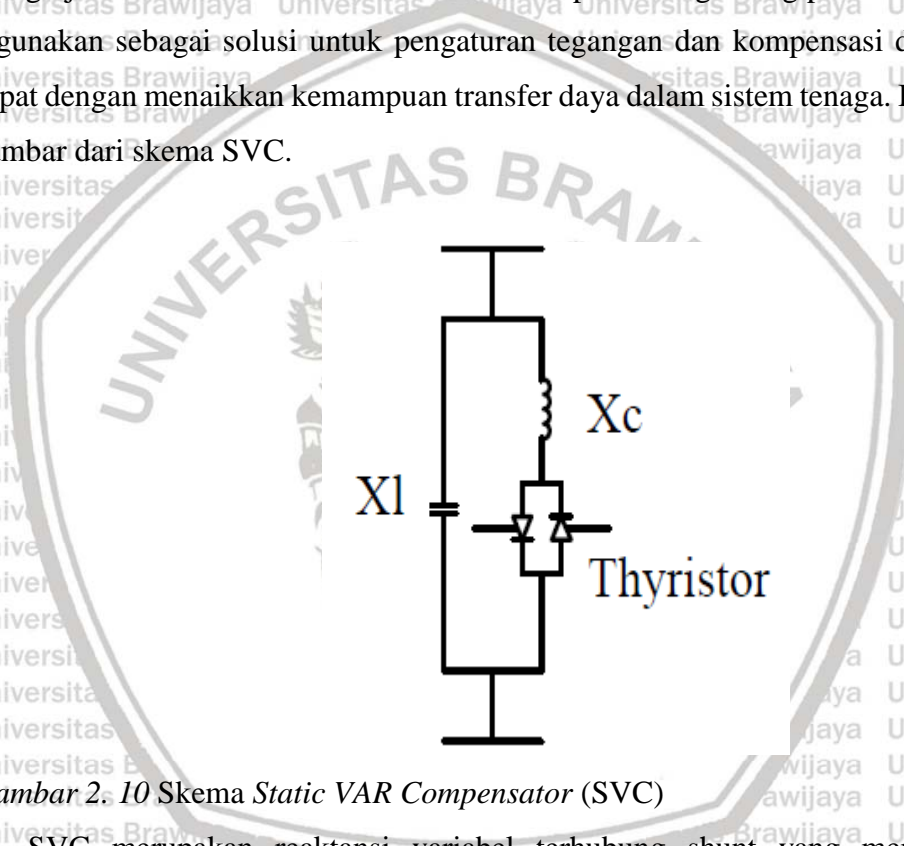
Didalam single line diagram dari sistem kontrol SVC dijelaskan input tegangan dari sistem diukur dengan trafo penurun tegangan yang diukur pada sisi primer dan sisi sekunder trafo. Hasil pengukuran akan dimasukkan ke voltage measurement pada SVC. Hasil pembacaan akan dibandingkan antara  $V_{measurement}$  dengan nilai  $V_{ref}$  (tegangan referensi) pada *voltage regulator*, dimana nilai  $V_{ref}=1$ . Apabila nilai  $V_{mean}$  dan  $V_{ref}$  tidak sama dengan 1, atau terjadi selisih nilai kedua unit maka SVC akan bekerja (operasi). *Distribution unit* akan mengirimkan nilai sudut penyalan untuk selanjutnya disinkronisasi nilai sekunder



dan primer tegangan. Kemudian *synchronizing unit* akan membangkitkan pulse generator ke thyristor, yang berfungsi mengirimkan sinyal pulsa ke thyristor untuk bekerja mengoperasikan bank kapasitor atau induktor, dan SVC akan bekerja menginjeksikan/menyerap daya reaktif terhadap sistem.

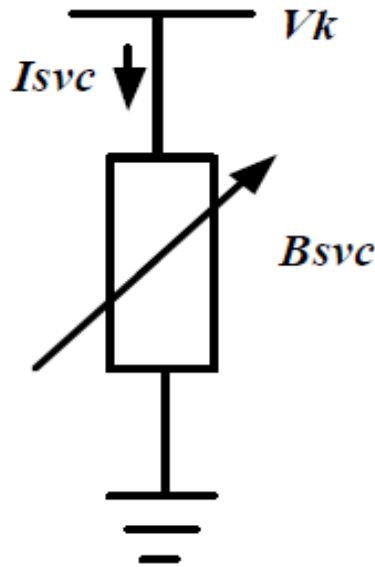
### 2.8 Skema dan Model Static VAR Compensator (SVC)

SVC adalah suatu konsep baru yang terpadu berdasarkan *switching* elektronika daya dan pengendali dinamis untuk meningkatkan pemanfaatan sistem dan kapasitas transfer daya seperti stabilitas, keamanan, keandalan dan kualitas daya sistem interkoneksi AC. SVC akan menginjeksi arus induktif atau menarik arus kapasitif tergantung pada keadaan. SVC sudah digunakan sebagai solusi untuk pengaturan tegangan dan kompensasi daya reaktif secara cepat dengan menaikkan kemampuan transfer daya dalam sistem tenaga. Berikut merupakan gambar dari skema SVC.



Gambar 2. 10 Skema Static VAR Compensator (SVC)

SVC merupakan reaktansi variabel terhubung shunt yang membangkitkan atau menyerap daya reaktif untuk mengatur besar tegangan pada titik koneksi. SVC dipersiapkan untuk menyediakan daya reaktif dan pengaturan tegangan dengan cepat yang mana biasanya terhubung dengan bus yang memikul beban besar. Berikut ini merupakan model SVC.



Gambar 2. 11 Model Static VAR Compensator (SVC)

Dari Gambar 2.11 di atas, arus yang ditarik oleh SVC dapat dituliskan dengan persamaan:

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_k \dots\dots\dots(2.28)$$

Di mana:  $V_k$  = tegangan terminal pada bus k

$B_{SVC}$  = suseptansi SVC

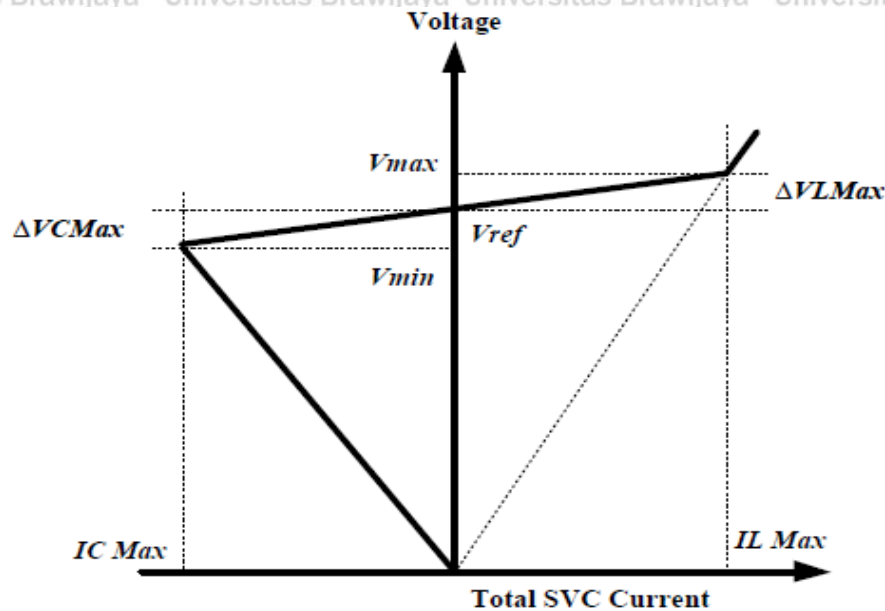
Sedangkan daya reaktif yang diinjeksi pada bus k adalah:

$$Q_k = -V_k^2 B_{SVC} \dots\dots\dots(2.29)$$

### 2.9 Karakteristik Tegangan dan Arus SVC

SVC memiliki karakteristik tegangan terminal dan arus yang dapat ditunjukkan pada gambar berikut:





Gambar 2. 12 Karakteristik V-I dari SVC

Slope dari kurva V-I pada gambar di atas adalah:

$$\text{Slope} = \frac{\Delta V_{LCmax}}{I_{Cmax}} = \frac{\Delta V_{LMmax}}{I_{Lmax}} \quad (2.30)$$

Dari kurva tersebut dapat dilihat bahwa  $V_{ref}$  merupakan tegangan SVC ketika  $I_{svc} = 0$ .  $V_{ref}$  tegangan referensi di mana SVC tidak menyerap atau menginjeksi daya reaktif. Dalam prakteknya, tegangan referensi memiliki toleransi  $\pm 10\%$ . SVC mengakibatkan dampak berupa adanya respon terhadap variasi tegangan, sehingga tegangan terminal  $V_T$  dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_T = V_{ref} + X_{svc} I_{svc} \quad (2.31)$$

$$V_{min} = \frac{V_{ref}}{1 + X_{svc} B_{max}} \quad (2.32)$$

$$V_{max} = \frac{V_{ref}}{1 + X_{svc} B_{min}} \quad (2.33)$$

Dimana,  $V_T$  = Tegangan terminal SVC ( $V_{svc}$ )

$X_{svc}$  = Slope reaktansi

$I_{svc}$  = Arus simpul SVC

$B_{max} = B_c$

$B_{min} = B_c - B_L$

Dari gambar 6 tersebut, dapat dilihat ada tiga daerah operasi SVC :

a. Control Region

$$V_{min} < V_{svc} < V_{max}, \quad I_{Cmax} < I_{svc} < I_{Lmax}$$

b. *Capasitive limit*

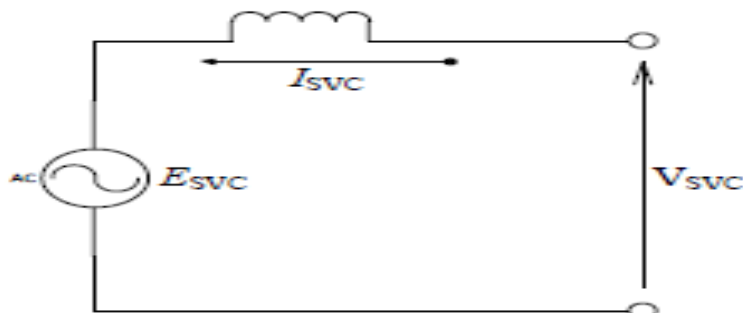
$$V_{svc} < V_{max}, B_{svc} = B_c$$

c. *Inductive limit*

$$V_{svc} > V_{max}, B_{svc} = -(B_L - B_c)$$

Dimana,  $B_L = \frac{1}{X_L} = \max[B_{TCR}]$

Ketiga daerah operasi SVC tersebut dapat dimodelkan rangkaian ekivalennya seperti gambar berikut ini:



Gambar 2. 13 Rangkaian Ekivalen SVC

Parameter-parameter pada rangkaian di atas tergantung pada daerah operasi SVC, yang dapat dituliskan sebagai berikut:

persamaan (i) :  $\hat{E}_{svc} = V_{ref} \angle \phi_{svc}, X_{svc} = K \dots \dots \dots (2.34)$

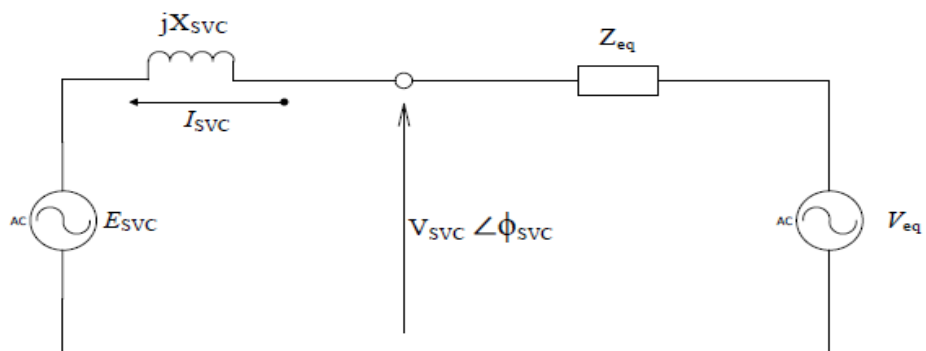
Dimana: K merupakan karakteristik kontrol dalam *kontrol region*

$\phi_{svc}$  merupakan sudut tegangan bus SVC

persamaan (ii):  $\hat{E}_{svc} = 0; X_{svc} = -\frac{1}{B_c} \dots \dots \dots (2.35)$

persamaan (iii):  $\hat{E}_{svc} = 0; X_{svc} = \frac{1}{B_L - B_c} \dots \dots \dots (2.36)$

Sedangkan rangkaian ekivalen dari suatu SVC yang telah dipasang pada jaringan listrik dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2. 14 Rangkaian ekivalen suatu jaringan yang telah dipasang SVC



Dari Gambar 2.8 dapat dihitung arus SVC sebagai:

$$\hat{I}_{SVC} = \frac{V_{eq} - \hat{E}_{SVC}}{Z_{eq} + jX_{SVC}} \dots \dots \dots (2.37)$$

Sedangkan besar tegangan terminal SVC adalah:

$$V_s = |V_{SVC}| \\ = |\hat{E}_{SVC} + j\hat{I}_{SVC}X_{SVC}| \dots \dots \dots (2.38)$$

Dari persamaan 2.35 dan 2.36, tegangan SVC dapat ditulis menjadi:

$$V_{SVC} = (1 - \hat{A}) V_{eq} + \hat{A} \hat{E}_{SVC} \dots \dots \dots (2.39)$$

Dimana:  $\hat{A} = \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + jX_{SVC}} = A \angle \dots \dots \dots (2.40)$

SVC dapat dengan cepat memberikan *supply* daya reaktif yang diperlukan dari sistem sehingga besarnya tegangan pada gardu induk dapat dipertahankan sesuai dengan standar yang diizinkan. Kestabilan tegangan pada gardu induk akan meningkatkan kualitas tegangan yang sampai ke konsumen, mengurangi *losses* dan meningkatkan kemampuan penghantar untuk mengalirkan arus.

**2.10 Penentuan Kapasitas SVC (Static Var Compensator)**

Bus yang terpilih sebagai tempat penempatan SVC (*Static Var Compensator*) adalah bus yang memiliki profil tegangan dibawah tegangan yang diizinkan, yaitu turun melebihi 10% dari tegangan nominal. Hal ini dilakukan agar mendapatkan tegangan pada ujung beban sama dengan ujung sumber atau  $V_R = V_S$ . Bila nilai daya aktif pada ujung beban mendekati 1 ( $pf=1$ ) dan  $V_R = V_S$  maka dapat dicari nilai  $\delta$ , dengan rumus berikut:

$$PR = \frac{|VR|=|Vs|}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A|}{|B|} |V|^2 \cos(\beta - \alpha) \dots \dots \dots (2.41)$$

Kapasitas kapasitor (QR) dapat dihitung dengan persamaan:

$$PR = \frac{|VR|=|Vs|}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A|}{|B|} |V|^2 \cos(\beta - \alpha) \dots \dots \dots (2.42)$$

Berdasarkan faktor daya yang diketahui dan faktor daya yang diinginkan, maka besar dari Q (daya reaktif) dapat diperoleh dengan persamaan:

kVAR sebelum SVC (*Static Var Compensator*):

$$Q1 = P \tan \theta_1 \dots \dots \dots (2.43)$$

kVAR yang diinginkan berdasarkan PF=0.999

$$Q2 = P \tan \theta_2 \dots \dots \dots (2.44)$$



Berdasarkan persamaan (2.43) dan (2.44) maka dapat disempurnakan nilai  $Q$  dengan persamaan (2.45) dibawah berikut:

$$Q = Q_1 - Q_2 \dots \dots \dots (2.45)$$

Dimana,  $Q_1 = \text{kVAR}$  sebelum SVC

$$Q_2 = \text{kVAR yang diinginkan berdasarkan PF}=0.999$$

### 2.11 Bagian-bagian SVC

SVC terdiri dari empat komponen yaitu:

#### A. Thyristor valve tower

Thyristor valve tower merupakan bagian dari TCR yang berfungsi untuk mengatur sudut penyulutan ketika tegangan dari transmisinya berada pada besaran kontrolnya.



Gambar 2.13 Thyristor valve tower

Sumber : (PT. PLN, 2014 :6)

#### B. Reaktor

Reaktor adalah peralatan yang terintegrasi pada suatu sistem distribusi maupun transmisi. Reaktor merupakan peralatan utama jika pemasangannya tidak menjadi bagian dari peralatan lainnya, misalnya reaktor pembatas arus (*current limiting reactors*), reaktor paralel (*shunt reactor/steady-state reactive compensation*). Reaktor merupakan peralatan



terintegrasi jika reaktor tersebut merupakan bagian dari suatu peralatan dengan unjuk kerja tertentu, misalnya reaktor surja hubung kapasitor paralel (*shunt-capacitor-switching reactor*), reaktor peluah kapasitor (*capacitor discharge reactor*), reaktor penyaring (*filter reactor*). Aplikasi pemasangan reaktor dalam sistem tenaga listrik pada prinsipnya untuk membentuk suatu reaktansi induktif dengan tujuan membatasi arus gangguan (*fault-current limiting*), membatasi arus magnetisasi (*inrush-current limiting*) pada motor dan kapasitor, menyaring harmonisa (*harmonic filtering*), mengkompensasi VAR (*var compensation*), mengurangi arus ripple (*reduction of ripple currents*), mencegah masuknya daya pembawa signal (*blocking of power-line carrier*), pentanahan titik netral (*neutral grounding-reactor*), peredam surja transient (*damping of switching transient*), pengurang flicker (*flicker reduction*) pada aplikasi tanur listrik, *circuit detuning*, menyeimbang beban (*load balancing*) dan *power conditioning*. Untuk mempermudah identifikasi, pada umumnya penamaan reaktor disesuaikan dengan tujuan pemasangannya atau lokasi dimana peralatan tersebut terpasang (PT. PLN, 2014:7).



Gambar 2. 15 Reactor

Sumber : (PT. PLN, 2014 :7)

### C. Kapasitor

*Capasitor Bank* merupakan peralatan listrik yang mempunyai sifat kapasitif yang terdiri sekumpulan beberapa kapasitor yang disambung secara paralel untuk mendapatkan kapasitas kapasitif tertentu. Besaran parameter yang sering dipakai adalah KVAR (Kilovolt ampere reaktif) meskipun pada kapasitor sendiri tercantum besaran kapasitansi yaitu Farad atau microfarad.





Gambar 2. 16 Kapasitor Bank

Fungsi utama dari kapasitor bank yaitu sebagai penyeimbang beban induktif, Seperti yang kita ketahui beban listrik terdiri dari beban reaktif (R), induktif (L) dan kapasitif(C).Dimana peralatan listrik yang sering digunakan dan dijumpai memiliki karakteristik induktif, sehingga untuk menyeimbangkan karakteristik beban tersebut perlu digunakan kapasitor yang berperan sebagai beban kapasitif. Dengan kata lain, Kapasitor Bank merupakan komponen yang berfungsi untuk menghasilkan daya reaktif untuk mengkompensasi kebutuhan daya reaktif pada beban.

Berikut ini adalah beberapa kegunaan dari kapasitor bank:

1. Memperbaiki Power Factor (faktor daya)
2. Menyuply daya reaktif sehingga mamaksimalkan penggunaan daya kompleks (KVA)
3. Mengurangi jatuh tegangan (Voltage drop)
4. Menghindari kelebihan beban transformer
5. Memberikan tambahan daya tersedia
7. Menghemat daya / efesiensi
8. mengawetkan instalasi & Peralatan Listrik
9. Kapasitor bank juga mengurangi rugi – rugi lainnya pada instalasi listrik

#### D. Cooling System

Cooling system diperlukan agar dapat memindah panas dari *thyristor* dan resistor pada rangkaian RC. Setiap *thyristor* mempunyai *drop* tegangan, oleh sebab itu diperlukan pendingin untuk menghilangkan panas dalam jumlah besar 95% panas yang dihasilkan dihilangkan oleh *cooling system*, sisanya 5% menyebar ke udara. Proses kerja



*cooling system* yaitu air yang dingin dipompa menuju *valve tower* ketika terjadi panas tinggi, dari *valve tower*, air panas mengalir ke *dry type heat exchanger* yang dipasang pada bagian atas *container*, pada *heat exchanger*, air akan menjadi dingin karena dikipas. Setelah keluar dari *heat exchanger* air yang telah dingin tadi kembali ke pompa dan proses tersebut akan terjadi lagi. *Cooling system* membutuhkan pemeliharaan reguler untuk menjaga agar tidak terjadi masalah. Seminggu sekali visual dan *audible inspection* harus dilakukan (dengan menggunakan lembar pemeliharaan). Harus diperiksa telah terjadi kebocoran atau tidak (air pada lantai) pada *cooling system* tersebut. Level air pada pemuain tank harus dikontrol (PT. PLN, 2014:8).



Gambar 2. 17 Cooling System

Sumber: (PT. PLN, 2014:8)

## 2.12 Profil Tegangan

Perbaikan profil tegangan untuk pengurangan susut energi (*losses*) pada suatu sistem tenaga listrik dimaksudkan untuk meningkatkan *performance* dari sistem tersebut. Semakin baik profil tegangan pada suatu sistem, maka susut energi (*losses*) yang terjadi pada sistem tersebut akan semakin kecil. Profil tegangan berada pada batas minimal dari standar yang diijinkan sangat mengganggu dan merugikan konsumen. Bila suatu jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban, maka akan mengalir arus reaktif pada jaringan, yang berakibat pada penurunan faktor daya, peningkatan rugi-rugi jaringan, penurunan tegangan khususnya pada ujung saluran, dan regulasi tegangan yang memburuk. Hal ini akan menimbulkan kerugian baik pada produsen dalam hal ini adalah PLN sebagai penyedia listrik maupun konsumen (pemakai listrik).



**2.13 Pembangkit Terdistribusi (*Distributed Generation*)**

Pembangkit terdistribusi merupakan sistem pembangkitan listrik dari banyak sumber-sumber energi kecil. Kelebihan sistem ini dibanding sistem kelistrikan yang terpusat adalah dapat beroperasi secara independen, tidak memerlukan tempat pengoperasian yang besar dan rumit, jaringan transmisi pendek dan dapat menggunakan sumber energi pembangkitan yang sesuai dengan kawasan yang akan dialiri listrik. Pembangkitan terdistribusi dapat mengurangi rugi-rugi energi pada transmisi listrik karena pemasangannya dekat dengan pengguna dan dapat mengurangi jumlah aliran daya yang di suplai.

**2.14 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro**

Pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) merupakan energi baru terbarukan pembangkit listrik berskala kecil yang menggunakan energi air sebagai penggeraknya dengan cara memanfaatkan tinggi terjun air dan jumlah debit air dari aliran air yang tersedia oleh alam maupun buatan, seperti saluran irigasi, sungai, atau air terjun. Pembangkit listrik tenaga mikrohidro yang memanfaatkan kondisi energi air sebagai sumber daya bergantung pada kapasitas aliran maupun ketinggian tertentu dari air. Semakin besar kapasitas aliran maupun ketinggian dari air maka semakin besar energi yang dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit listrik tenaga mikrohidro bekerja dengan cara memanfaatkan semaksimal mungkin energi potensial air. Energi ini secara perlahan diubah menjadi energi mekanik untuk memutar sudut-sudut turbin. Energi mekanis dari putaran turbin akhirnya diubah menjadi energi listrik melalui putaran generator.

Untuk menghitung daya mekanik yang dibangkitkan oleh turbin adalah :

$$P = 9,8 \eta H Q \dots\dots\dots(8.47)$$

Keterangan:

P = Daya terbangkitkan (kW)

$\eta$  = Efisiensi turbin generator

H = Tinggi terjun air (m)

Q = Debit air (m<sup>3</sup>/detik).





## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1. ETAP Power Station

*ETAP* (*Electric Transient Analysis Program*) merupakan program aplikasi yang digunakan untuk melakukan analisis dan pengujian sistem tenaga listrik. Analisis dan pengujian sistem tenaga listrik yang dilakukan seperti sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi. *ETAP* sangat membantu seorang insyur untuk memodelkan sistem tenaga listrik ke dalam bentuk diagram satu garis (*single line diagram*) untuk keperluan analisis, seperti *load flow analysis*, hubung singkat, pengasutan motor, harmonisa, stabilitas peralihan, koordinasi proteksi dan lain-lain. Standar yang digunakan untuk memodelkan komponen-komponen sistem tenaga listrik mengacu pada dua standar internasional, yaitu standar *IEC* (*International Electrotechnical Commission*) dan standar *ANSI* (*American National Standards Institute*). Pemodelan komponen-komponen sistem tenaga listrik dapat diedit langsung dari diagram satu garis yang mana kelengkapan data tiap-tiap komponen tenaga listrik yang dimodelkan mempengaruhi hasil analisis yang dilakukan, semakin lengkap data yang dimasukkan semakin valid hasil yang akan diperoleh.

*ETAP* adalah *software full* grafis yang dapat digunakan sebagai alat analisis untuk mendesain dan menguji kondisi sistem tenaga listrik yang ada. *ETAP* dapat digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga listrik secara *offline* dalam bentuk modul simulasi, monitoring data operasi secara *real time*, simulasi *system real time*, optimasi, manajemen energi sistem dan simulasi *intelligent load shedding*. *ETAP* didesain untuk dapat menangani berbagai kondisi dan topologi system tenaga listrik baik di sisi konsumen industri maupun untuk menganalisa performa sistem di sisi utilitas. *Software* ini dilengkapi dengan fasilitas untuk menunjang simulasi seperti jaringan AC dan DC (*AC and DC networks*), desain jaringan kabel (*cable raceways*), *grid* pentanahan (*ground grid*), *GIS*, desain panel, *arc-flash*, koordinasi peralatan proteksi (*protective device coordination/selectivity*), dan AC/DC control sistem diagram. (D.William, and Jr.Stevenson 1990)

*ETAP Power Station* menyediakan fasilitas *Library* yang akan mempermudah desain suatu sistem kelistrikan. *Library* ini dapat diedit atau dapat ditambahkan dengan informasi peralatan. *Software* ini bekerja berdasarkan plant (*project*). Setiap plant harus menyediakan modelling peralatan dan alat-alat pendukung yang berhubungan dengan analisis yang akan dilakukan. Misalnya generator, data beban, data saluran, dll. Sebuah plant terdiri dari sub-sistem kelistrikan yang membutuhkan sekumpulan komponen elektrik yang khusus dan



saling berhubungan. Dalam *Power Station*, setiap *plant* harus menyediakan data *base* untuk keperluan itu.

*ETAP Power Station* dapat digunakan untuk menggambarkan *single line* diagram secara grafis dan mengadakan beberapa analisis/studi yakni *Load Flow* (aliran daya), *Short Circuit* (hubung singkat), motor *starting*, harmonisa, *transient stability*, *protective device coordination*, dan *Optimal Capacitor Placement*. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan *ETAP Power Station* adalah: (D.William, and Jr.Stevenson 1990)

1. *One Line Diagram*, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehinggamembentuk suatu sistem kelistrikan.
2. *Library*, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail/lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisis.
3. Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar *IEC* atau *ANSI*, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai.
4. *Study Case*, berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisis.
5. Kelengkapan data dari setiap elemen/komponen/peralatan listrik pada sistem yang akan dianalisis akan sangat membantu hasil simulasi/analisis dapat mendekati keadaan operasional sebenarnya.

### 3.2 Tahapan Penelitian

Tahapan pertama dalam pelaksanaan penelitian adalah dengan mengambil data yang diperlukan beserta diagram satu garis jaringan distribusi 20 kV dari Gardu Induk sistem kelistrikan Pujon Malang. Penelitian ini dilakukan secara bertahap, tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 13. Penelitian dimulai dengan studi literatur baik jurnal maupun buku tentang sistem dan keandalan jaringan distribusi 20 kV, yang mencakup sistem jaringan distribusi, karakteristik jaringan distribusi, klasifikasi jaringan distribusi, macam-macam daya dan faktor-faktor yang mempengaruhi rugi-rugi tegangan pada penyulang.

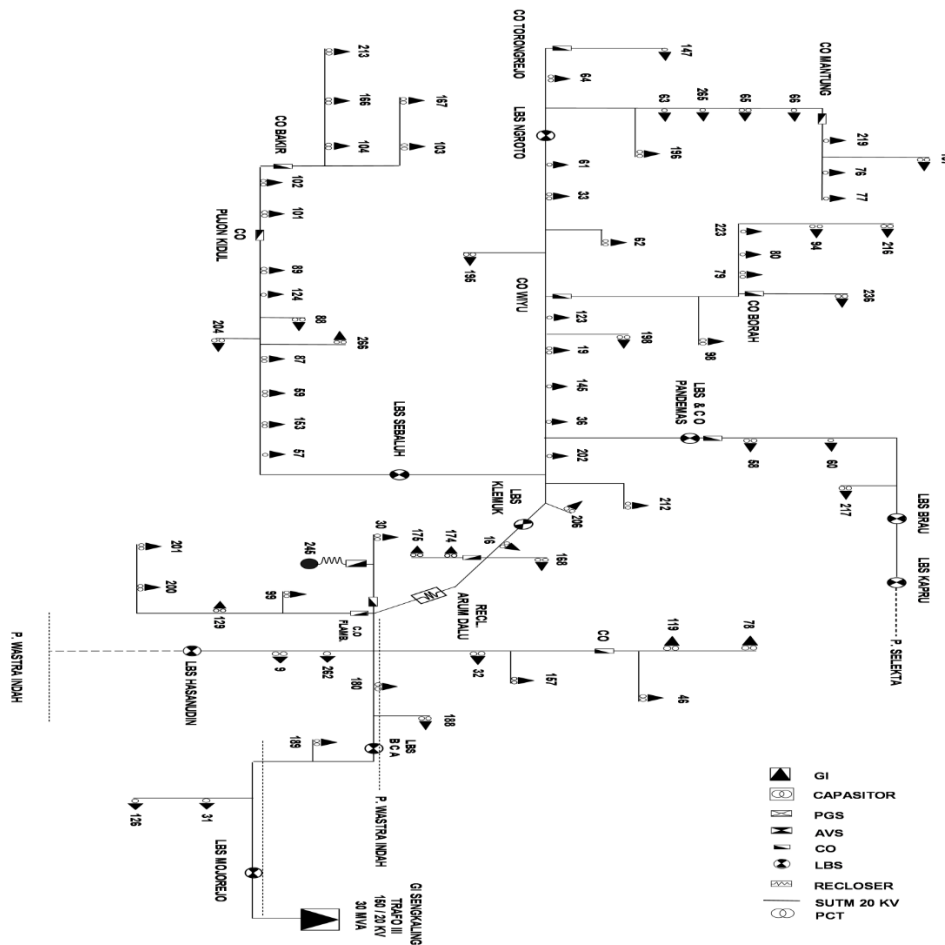
Pengumpulan data dilakukan di Gardu Induk Sengkaling dan Penyulang Pujon Rayon Sengkaling, data-data yang dikumpulkan berupa data *single line diagram*, data *power grid*, data trafo, data saluran (jenis kabel, panjang kabel, luas penampang), data beban, data pengukuran tegangan dan data pengukuran beban (data sekunder). Kemudian dilakukan verifikasi data, analisis aliran daya (*load flow analysis*) yang bertujuan untuk



mengetahui karakteristik sistem kelistrikan Penyulang Pujon, setelah diketahui karakteristik sistem kelistrikan apabila terjadi penurunan tegangan di bawah batas yang diatur dalam permen ESDM no. 3 Tahun 2007 bahwa tegangan minimal setiap bus pada jaringan 20 kV adalah tidak lebih dari 5% atau tidak kurang dari 10% ( $V = 1,05 pu$  atau  $V = 21 kV$  untuk tegangan naik dan  $V = 0,9 pu$  atau  $V = 18 kV$  untuk tegangan turun).

Selanjutnya dilakukan pemodelan dan pemasangan *Static Var Compensator (SVC)*. Perhitungan rating kapasitas SVC meliputi rating tegangan SVC, rating induktif ( $Q_L$ ), rating kapasitif ( $Q_C$ ) yang tepat untuk menanggulangi permasalahan tersebut menggunakan fasilitas *Optimal Capacitor Placement (OCP)*.

Adapun Single line diagram GI Sengkaling dapat diperoleh dari data PLN (Persero), yaitu:

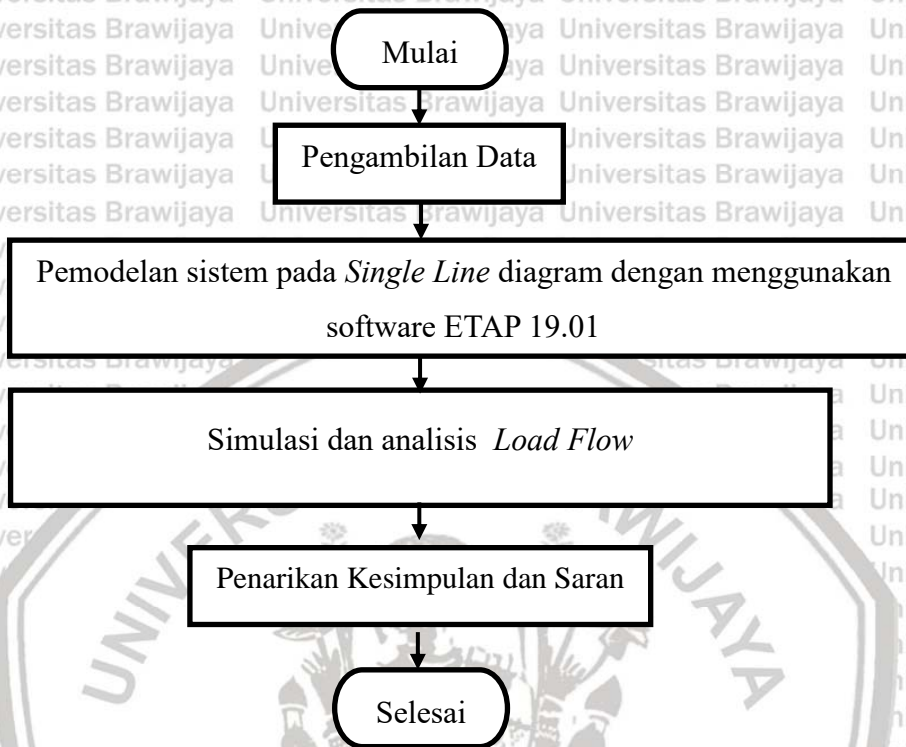


Gambar 3. 1 Single line diagram penyulang Pujon

Sumber: (PT. PLN APJ Malang)

### 3.3 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.2 berupa diagram alir.



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

Tahap pertama yang dilakukan adalah pengambilan data, data tersebut meliputi:

1. Single line diagram GI Sengkaling penyulang Pujon
2. Data-data panjang setiap saluran penyulang Pujon
3. Kapasitas transformator daya di GI Sengkaling
4. Data pembebanan transformator daya
5. Spesifikasi pembangkit tersebar
6. Daya pembangkit tersebar

Tahap selanjutnya adalah memodelkan *single diagram* penyulang Pujon dan memasukkan data-data yang didapat pada *software* ETAP 19.01. Tahap selanjutnya melakukan simulasi *load flow* untuk mendapatkan profil tegangan tiap bus, aliran daya pada tiap bus dan aliran daya pada tiap saluran yang akan dijadikan acuan pada analisis pada kondisi eksisting dan kondisi setelah ditambahkan pembangkit tersebar sesuai dengan kondisi yang sudah ditentukan. Tahap selanjutnya melakukan simulasi dan analisis pemasangan *Static VAR Compensator (SVC)*. Data yang dianalisis adalah penurunan



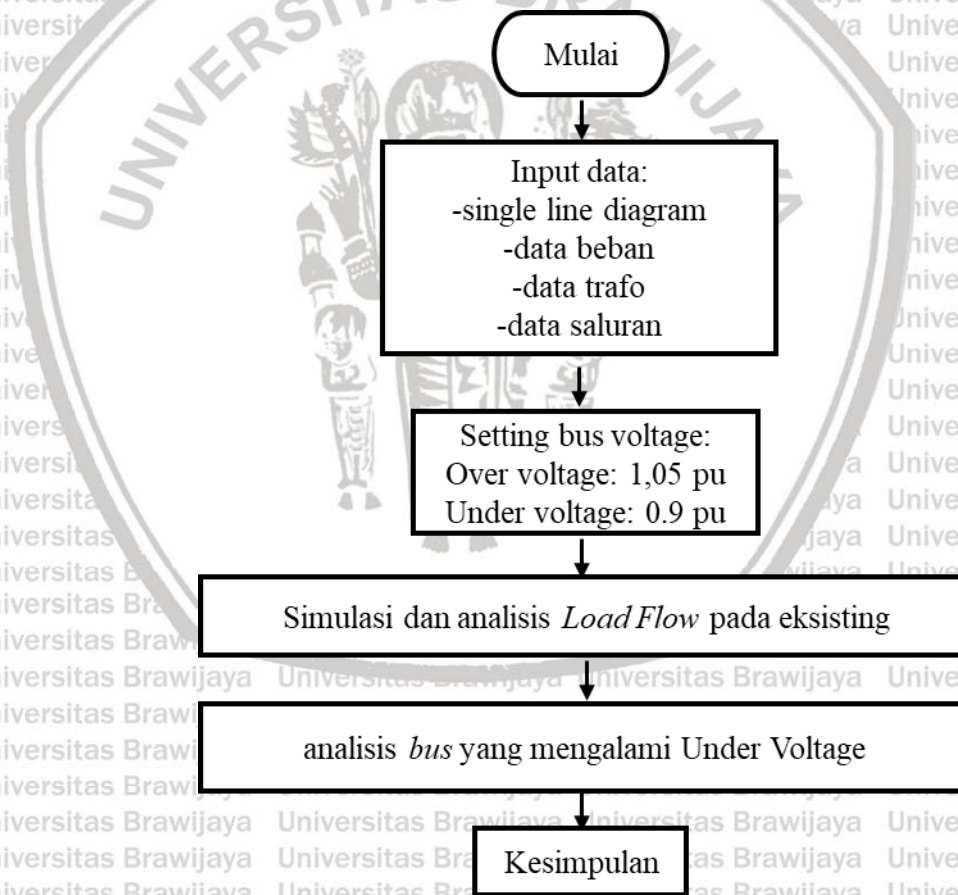
tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem yang nantinya dijadikan referensi untuk bisa mendapatkan sistem yang sesuai dengan standar. Tahap selanjutnya memberikan kesimpulan tentang penurunan tegangan akibat gangguan yang terjadi pada penyulang Pujon serta memberikan rekomendasi untuk mengatasi gangguan yang terjadi agar sistem dapat mempertahankan kestabilannya.

### 3.4 Skenario Kondisi Sistem

Pada skenario sistem ini akan dijelaskan langkah-langkah yang akan dilakukan pada simulasi penelitian ini setelah dilakukannya injeksi pembangkit terdistribusi dan penambahan SVC pada penyulang Pujon.

#### 3.4.1 Kondisi 1 Eksisting Sistem pada Penyulang Pujon

Langkah-langkah yang digunakan pada kondisi eksisting pada penyulang Pujon ditunjukkan pada Gambar 3.3 berupa diagram alir.



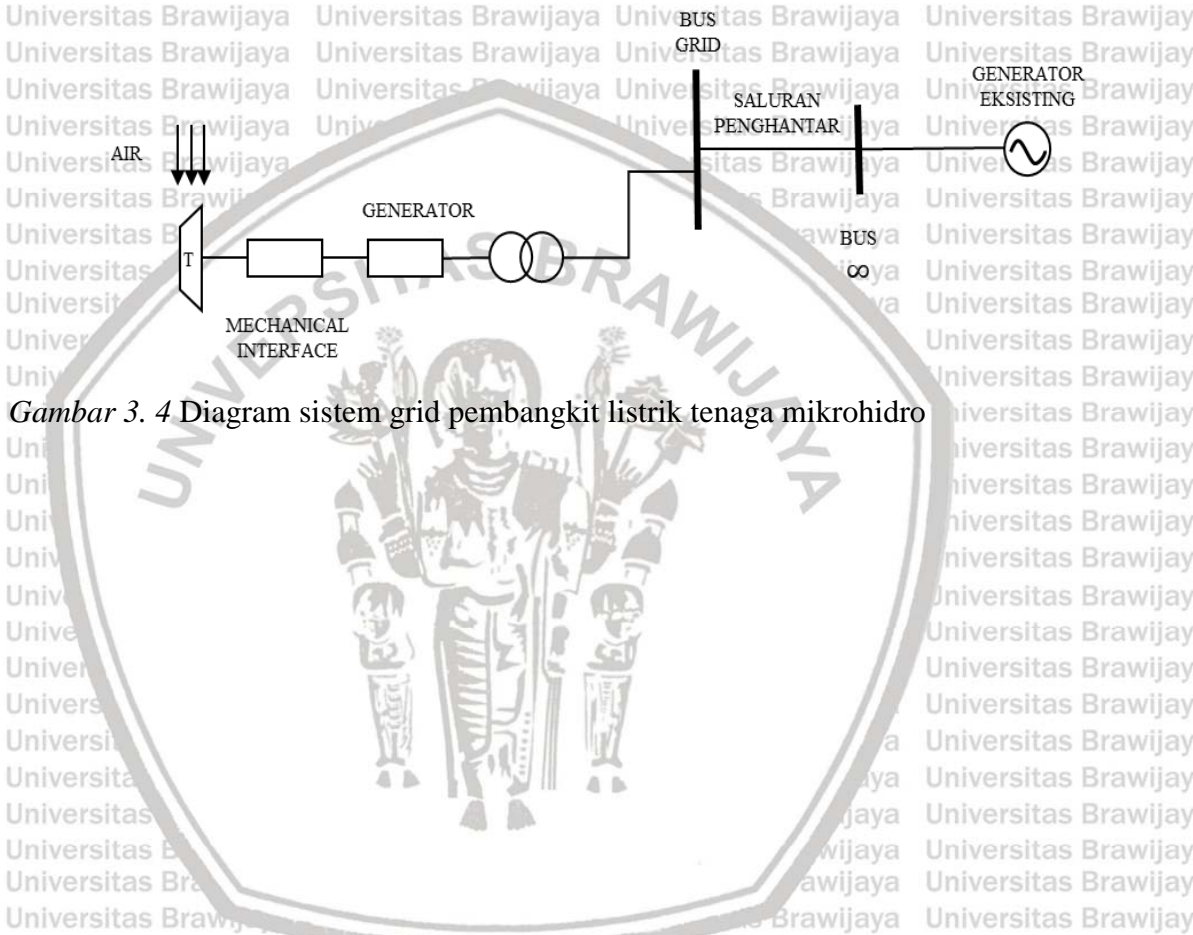
Gambar 3.3 Diagram alir kondisi eksisting Penyulang Pujon

Tahap pertama yang dilakukan yaitu simulasi dan analisis *load flow* pada *software* ETAP 19.01 pada kondisi eksisting. Tahap selanjutnya melakukan simulasi dan analisis bus yang

mengalami *under voltage* pada sistem. Tahap selanjutnya memberikan kesimpulan akibat penurunan tegangan yang terjadi pada kondisi 1 eksisting penyulang Pujon.

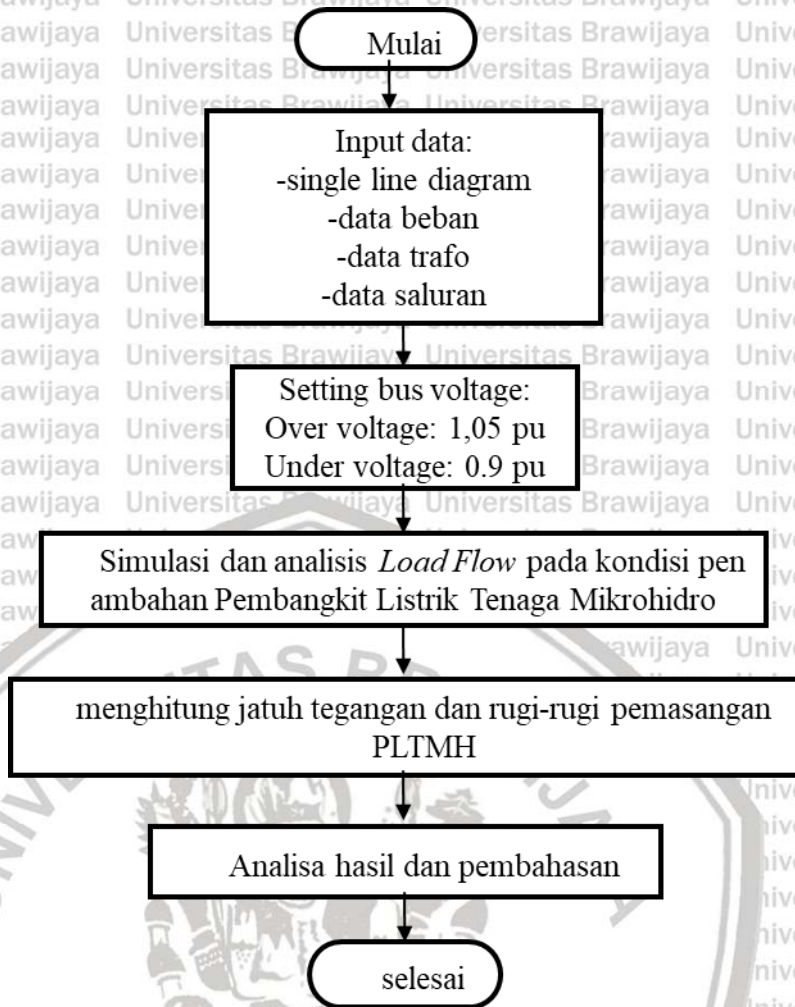
### 3.4.2 Kondisi penambahan pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH)

Gambar 3.4 menunjukkan bahwa saluran sistem grid diberi penambahan pembangkit tersebar tenaga mikrohidro. Sistem yang sudah ditambahkan pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) dapat diketahui jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi tenaga listrik.



Gambar 3. 4 Diagram sistem grid pembangkit listrik tenaga mikrohidro



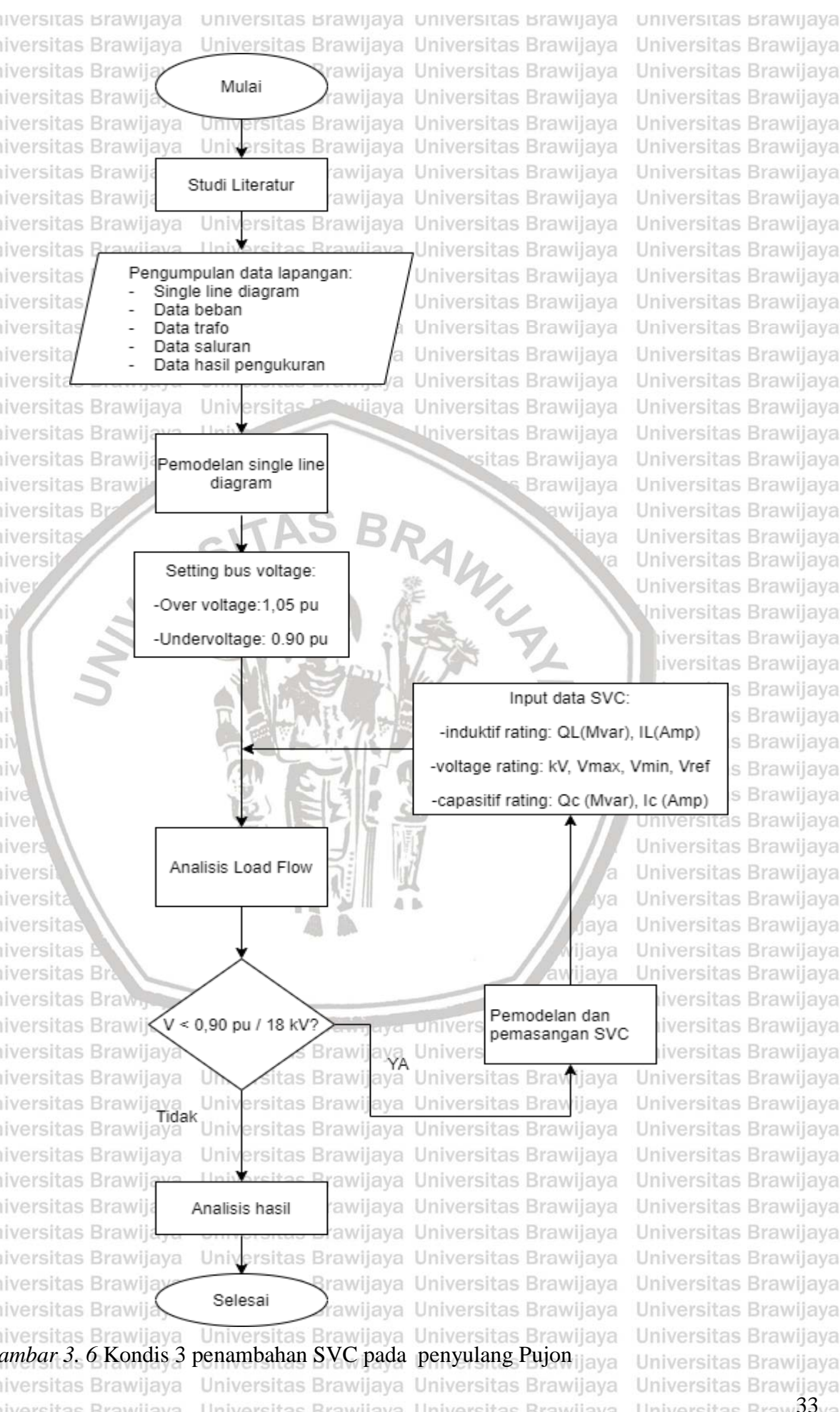


Gambar 3. 5 Kondisi 2 penambahan PLTMH di Penyulang Pujon

Tahap pertama yang dilakukan simulasi dan analisis *load flow* pada *software* ETAP 19.01 setelah ditambahkan PLTMH. Tahap selanjutnya melakukan analisis penurunan tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem. Tahap selanjutnya memberikan kesimpulan akibat gangguan yang terjadi pada penyulang Pujon.

### 3.4.3 Kondisi 3 penambahan Static VAR Compensator (SVC) di penyulang Pujon

bagan alir tahapan pelaksanaan penelitian terhadap penggunaan (pemasangan) SVC pada aliran daya jaringan distribusi 20 kV dapat dilihat seperti gambar berikut:

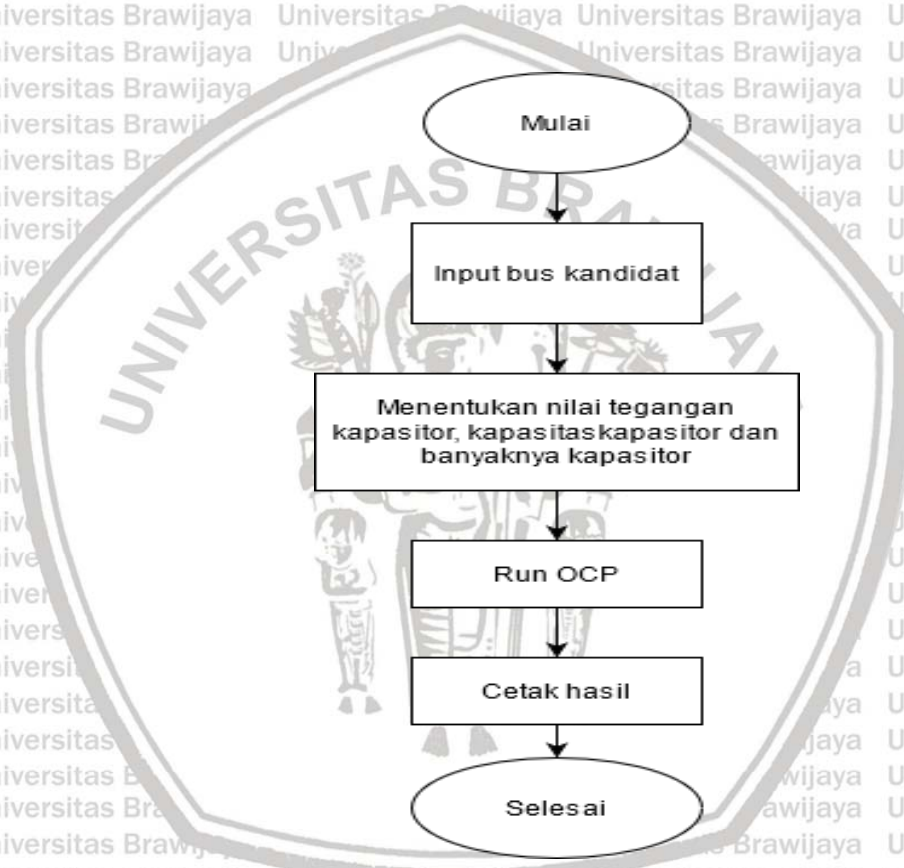


Gambar 3. 6 Kondisi 3 penambahan SVC pada penyulang Pujon



### 3.4.4 Menentukan Kapasitas Kapasitor dengan OCP (*Optimal Capasitor Placement*)

Tugas Akhir dilaksanakan dengan studi kasus pada jaringan distribusi 20 kV penyulang Pujon Gardu Induk Sengkaling yang terhubung dengan PLTMH Bendosari. Gambar 3.7 menunjukkan alur untuk menentukan letak dan kapasitas SVC yang akan digunakan untuk memperbaiki profil tegangan. Dimulai dengan memasukan bus-bus *candidat*. Bus *candidat* adalah bus-bus yang mengalami penurunan tegangan dibawah standar yang diijinkan. Selanjutnya, menentukan nilai maksimal tegangan kapasitor, kapasitas kapasitor dan jumlah (*bank*) kapasitor. Jalankan *OCP*, hasil menjalankan *OCP* akan menampilkan nilai letak dan kapasitas SVC yang tepat untuk menanggulangi permasalahan penurunan tegangan.



Gambar 3.7 Alur menentukan letak dan kapasitas SVC

**BAB IV**

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**4.1 Gambaran Umum Gardu Induk Sengkaling Penyulang Pujon Malang**

Pada penelitian ini, objek yang dipilih adalah penyulang Pujon yang berada di wilayah Kota Batu yang dilayani oleh APJ (Area Pelayanan Jaringan) Malang Raya yang memiliki sistem jaringan terdiri dari 11 GI (Gardu Induk) dan 74 penyulang. Penyulang Pujon merupakan salah satu penyulang yang mendapatkan suplai daya energi listrik dari GI Sengkaling yang berada di wilayah Malang. GI Sengkaling dikelola oleh PT. PLN APP Malang yang berada dibawah wewenang PT. PLN P3B Region Jawa Timur dan Bali serta dibawah wewenang PT. PLN P3B Pusat.

GI sengkaling disuplai oleh 2 sumber jaringan SUTT 150 kV yang keduanya terinterkoneksi dengan GI Kebonagung yang ditunjukkan pada gambar 4.1. GI Sengkaling melayani 8 penyulang yang terdiri dari penyulang Junrejo, Pujon, Wastra Indah, Karangploso, Seleкта, Batu, Tegalgondo, dan Dinoyo. Penyulang pada GI Sengkaling dibagi menjadi dua transformator. Transformator 150/20 kV 30 MVA dengan pembatas arus beban sebesar 866 Ampere yang melayani 4 penyulang yaitu: penyulang Junrejo, Pujon, Karangploso, dan Wastra Indah. Transformator 150/20 kV 60 MVA dengan pembatas arus beban sebesar 1732 Ampere yang melayani 4 penyulang juga yaitu: penyulang Seleкта, Batu, Tegalgondo, dan penyulang Dinoyo. Menunjukkan penyulang GI Sengkaling dan kapasitas beban yang ditanggung oleh masing-masing penyulang.

*Tabel 4.1 Penyulang GI Sengkaling dan Kapasitas Beban Terpasang*

<b>Trafo 150/20kV 30MVA</b>		<b>Trafo 150/20kV 60MVA</b>	
<b>Penyulang</b>	<b>Ampere</b>	<b>Penyulang</b>	<b>Ampere</b>
Junrejo	300	Seleкта	320
Pujon	300	Batu	320
Karangploso	300	Tegalgondo	320
Wastra Indah	300	Dinoyo	320

Sumber: PT. PLN (Persero) APJ Malang

Penyulang Pujon disuplai oleh transformator 3 pada Gardu Induk Sengkaling dengan spesifikasi 150/20 kV 30 MVA dan dengan total pembatas arus beban sebesar 866 Ampere.

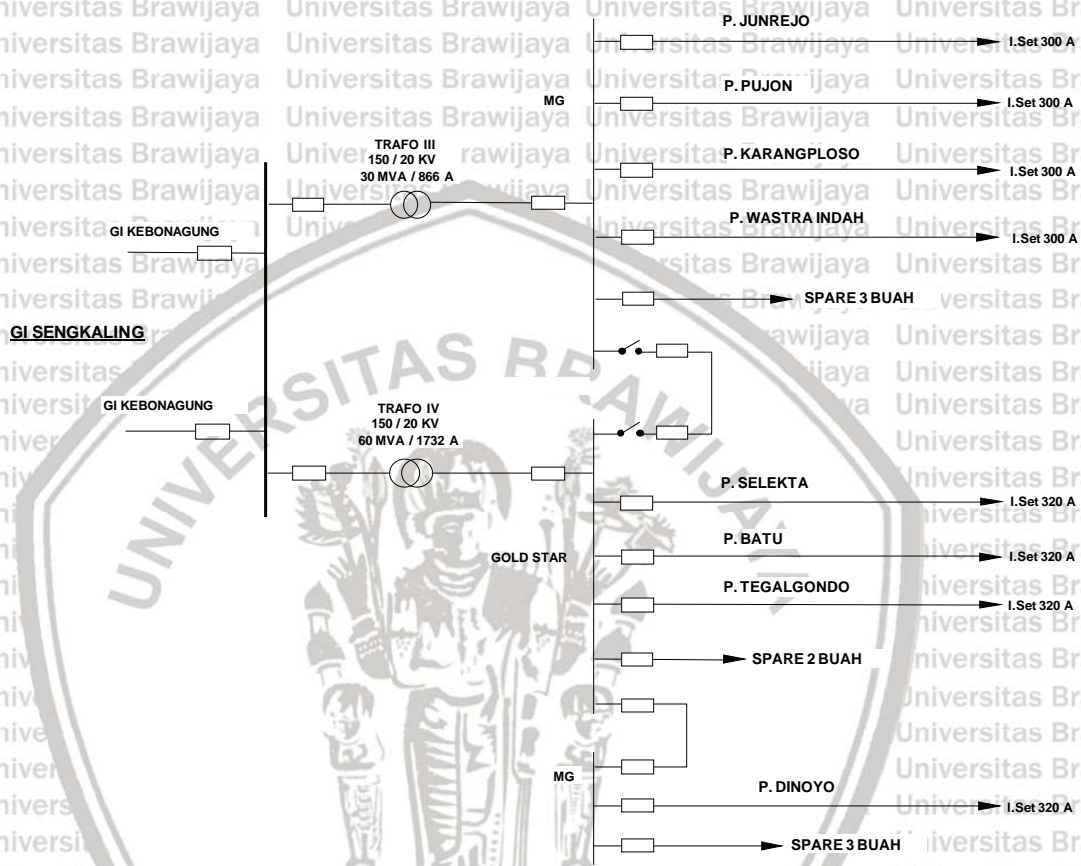
Penyulang Pujon beroperasi pada tegangan menengah 20 kV. Panjang total penyulang Pujon



yaitu 56,397 km. Sistem pembangkit listrik mikrohidro dalam penelitian ini akan dihubungkan pada jala-jala distribusi 20 kV yang mempunyai jarak paling dekat dengan lokasi penelitian.

Jala-jala sistem distribusi tersebut adalah penyulang Pujon.

berisi data spesifikasi dan jumlah gardu distribusi penyulang Pujon dan tabel.



Gambar 4.1 Single line diagram GI Sengkaling

Sumber: PT. PLN (Persero) APJ Malang

Tabel 4.2 Data Spesifikasi dan Jumlah Gardu Distribusi Penyulang Pujon

Spesifikasi Penyulang		Jumlah Gardu Distribusi			
Panjang total saluran TM(km)	56,397	250 kVA	4	100 kVA	18
Jumlah tiang TM	1312	200 kVA	9	75 kVA	3
Section	8	160 kVA	20	50 kVA	9
Jumlah Transformator distribusi	107	150 kVA	5	25 kVA	2
Jumlah jurusan	158				
Kapasitas total (kVA)	11.335	Jumlah Total			70

Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang

Penyulang Pujon mendapatkan suplai daya dari Transformator 3 pada gardu induk Sengkaling. Transformator 3 sendiri selain menyuplai penyulang Pujon juga menyuplai penyulang Junrejo, Karangploso dan Wastra Indah. Tabel 4.3 berisi data spesifikasi dari Trarnformator 3 Penyulang Pujon pada GI Sengkaling

Tabel 4.3 Data Spesifikasi Transformator 3 Penyulang Pujon Gardu Induk Sengkaling

Transformator	
Merk	Merlin Gerlin
No. Transformator	3
Tegangan Primer (kV)	150
Tegangan Sekunder (kV)	20
Daya (MVA)	30

Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang

Transformator tenaga yang digunakan untuk menyuplai penyulang Pujon yaitu Tranformator III Merlin Gerlin, yang mempunyai nilai tegangan primer 150 kV, tegangan sekunder 20 kV, serta mempunyai daya sebesar 30 MVA. Yang kita butuhkan yaitu nilai impedansi sumber pada sisi sekunder transformator, namun sebelum itu terlebih dahulu harus dihitung nilai impedansi sumber pada sisi primer transformator. Dari data yang didapatkan, diketahui nilai arus hubung singkat yang ada di bus primer transformator yaitu sebesar 2.529,43 MVA.

#### 4.2 Sistem Distribusi 20 kV Penyulang Pujon Malang

GI Sengkaling mempunyai dua sel yang masing-masing dipasang trafo 150/20 kV berkapasitas 30 MVA dan 60 MVA. Penyulang Pujon adalah salah satu penyulang di GI sengkaling. Penyulang Pujon disuplai dari trafo 150/20 kV 30 MVA dengan kapasitas beban terpasang 300 Ampere. Gardu distribusi 20/0,38 kV yang terpasang pada penyulang Pujon berjumlah 70 unit masing-masing berkapasitas antara 25 kVA hingga 250 kVA. Kapasitas daya terpasang beban gardu distribusi dapat dilihat pada tabel 4.4.

Saluran distribusi yang ada di penyulang Pujon menggunakan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM). Jenis saluran yang digunakan pada penyulang Pujon ditunjukkan pada tabel 4.5. Pada saluran distribusi penyulang Pujon terdapat 118 bus dengan total panjang saluran sejauh 56,397 km. Single line diagram saluran distribusi penyulang Pujon dapat dilihat pada gambar 4.1.

Pembebanan diperoleh dengan mengambil data dari masing-masing trafo distribusi pada lampiran, dimana besarnya beban pada masing-masing fasa diasumsikan seimbang. Jika



besarnya pembebanan adalah nol, maka pada bus tidak terdapat trafo distribusi tetapi hanya merupakan simpul.

Tabel 4.4 Data Pembebanan Transformator

No	Kode Gardu	Daya Trafo (kVA)	Rating/Limit (kVA)
1	D0031	75	38
2	D0126	150	84
3	D0189	160	84
4	D0188	250	168
5	D0180	200	104
6	D0262	100	47
7	D0009	250	198
8	D0032	200	87
9	D0157	200	99
10	D0046	200	170
11	D0119	150	84
12	D0078	160	156
13	D0099	250	203
14	D0129	160	152
15	D0200	50	7
16	D0201	100	32
17	D0030	160	67
18	D0174	160	74
19	D0175	100	17
20	D0168	25	6
21	D0016	200	131
22	D0206	200	75
23	D0212	100	79
24	D0057	150	117
25	D0153	160	100
26	D0059	160	97
27	D0087	100	40
28	D0266	200	59
29	D0204	50	12
30	D0088	100	26
31	D0124	50	32
32	D0089	160	130
33	D0101	100	47
34	D0102	160	107
35	D0104	100	64
36	D0166	50	26
37	D0213	100	50
38	D0103	100	54
39	D0167	50	19
40	D0202	100	73
41	D0058	100	53
42	D0060	160	120
43	D0217	50	29
44	D0036	75	65
45	D0145	160	113

No	Kode Gardu	Daya Trafo (kVA)	Rating/Limit (kVA)
46	D0019	160	184
47	D0198	160	132
48	D0123	150	67
49	D0098	160	94
50	D0236	160	7
51	D0079	200	160
52	D0080	150	86
53	D0223	50	33
54	D0094	100	65
55	D0216	160	100
56	D0195	160	100
57	D0062	200	126
58	D0033	250	165
59	D0061	160	116
60	D0196	50	24
61	D0063	100	60
62	D0265	100	74
63	D0065	160	123
64	D0066	100	67
65	D0219	100	61
66	D0197	25	18
67	D0076	75	42
68	D0077	160	109
69	D0064	100	51
70	D0147	50	34

Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang

Dari data spesifikasi kabel saluran pada tabel 4.5, diketahui penyulang pujan menggunakan jenis kabel AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) dengan penampang nominal  $150 \text{ mm}^2$  dan impedansi saluran dan impedansi saluran  $0,957477 + j0,545815 (\Omega/\text{km})$ .

Berikut contoh perhitungan impedansi saluran yang dilakukan pada bus 1 ke bus 2.

Diketahui jarak dari bus 1 ke bus 2 = 1,4840 km.

Untuk mencari R

$$R = 1,4840 \times 0,957477 = 1,4208958 \Omega/\text{km}.$$

Untuk mencari X

$$X = 1,4840 \times 0,545815 = 0,8099894 \Omega/\text{km}.$$

Tabel 4.5 Data Saluran Penyulang Pujan

ID	Dari	Ke	Jenis Penghantar	Jarak Saluran (km)	R (ohm)	jX (ohm)
1	BUS1	BUS2	AAAC 50	1,4840	0,957477	0,545815
2	BUS2	BUS3	AAAC 50	5,3190	3,431819	1,956328
3	BUS3	BUS4	AAAC 50	0,2900	0,187108	0,106662
4	BUS4	BUS5	AAAC 50	0,1370	0,088392	0,050389
5	BUS5	BUS6	AAAC 50	0,4890	0,315503	0,179854



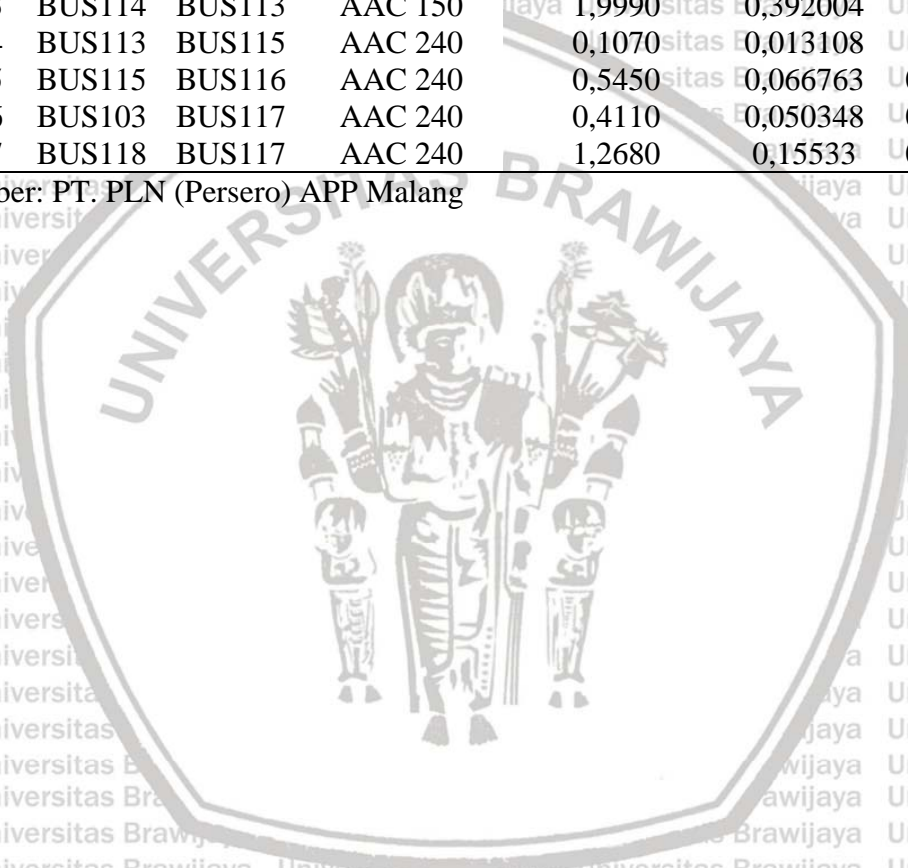
ID	Dari	Ke	Jenis Penghantar	Jarak Saluran (km)	R (ohm)	jX (ohm)
6	BUS6	BUS7	AAAC 50	0,1220	0,078714	0,044872
7	BUS7	BUS8	AAAC 50	0,2550	0,164526	0,093789
8	BUS8	BUS9	AAAC 50	0,3020	0,19485	0,111076
9	BUS9	BUS10	AAAC 50	0,3270	0,21098	0,120271
10	BUS9	BUS11	AAAC 50	0,5130	0,330988	0,188681
11	BUS11	BUS12	AAAC 50	0,6900	0,445188	0,253782
12	BUS12	BUS13	AAAC 50	0,0680	0,043874	0,02501
13	BUS13	BUS14	AAAC 70	0,0680	0,031334	0,02429
14	BUS14	BUS15	AAAC 70	0,3270	0,150682	0,116804
15	BUS15	BUS16	AAAC 70	0,1410	0,064973	0,050365
16	BUS17	BUS12	AAAC 70	0,0530	0,024422	0,018932
17	BUS18	BUS17	AAAC 70	0,0530	0,024422	0,018932
18	BUS19	BUS18	AAAC 70	0,1500	0,06912	0,05358
19	BUS20	BUS19	AAAC 70	0,1500	0,06912	0,05358
20	BUS21	BUS19	AAAC 70	0,5090	0,234547	0,181815
21	BUS22	BUS21	AAAC 70	0,1260	0,058061	0,045007
22	BUS23	BUS21	AAAC 70	0,3010	0,138701	0,107517
23	BUS24	BUS23	AAAC 70	0,3010	0,138701	0,107517
24	BUS25	BUS24	AAAC 70	0,7240	0,333619	0,258613
25	BUS12	BUS26	AAAC 70	0,2050	0,094464	0,073226
26	BUS26	BUS27	AAAC 70	0,3320	0,152986	0,11859
27	BUS28	BUS27	AAAC 70	0,2130	0,09815	0,076084
28	BUS27	BUS29	AAAC 70	0,2760	0,127181	0,098587
29	BUS29	BUS30	AAAC 70	0,4000	0,18432	0,14288
30	BUS30	BUS31	AAAC 70	0,2230	0,102758	0,079656
31	BUS32	BUS26	AAAC 70	0,7480	0,344678	0,267186
32	BUS32	BUS33	AAAC 70	0,2920	0,134554	0,104302
33	BUS34	BUS26	AAAC 70	0,4000	0,18432	0,14288
34	BUS34	BUS35	AAAC 70	0,4500	0,20736	0,16074
35	BUS35	BUS36	AAAC 70	0,5420	0,249754	0,193602
36	BUS36	BUS37	AAAC 70	0,1150	0,052992	0,041078
37	BUS38	BUS35	AAAC 70	0,3580	0,164966	0,127878
38	BUS35	BUS39	AAAC 70	0,3270	0,150682	0,116804
39	BUS40	BUS39	AAAC 70	0,8460	0,389837	0,302191
40	BUS41	BUS40	AAAC 70	0,2970	0,136858	0,106088
41	BUS40	BUS42	AAAC 70	0,2170	0,099994	0,077512
42	BUS42	BUS43	AAAC 70	0,2170	0,099994	0,077512
43	BUS43	BUS44	AAAC 70	0,4340	0,199987	0,155025
44	BUS43	BUS45	AAAC 70	0,2960	0,136397	0,105731
45	BUS45	BUS46	AAAC 70	0,4710	0,217037	0,168241
46	BUS46	BUS47	AAAC 70	0,3410	0,157133	0,121805
47	BUS47	BUS48	AAAC 70	0,9470	0,436378	0,338268
48	BUS48	BUS49	AAAC 70	0,2850	0,131328	0,101802
49	BUS49	BUS50	AAAC 70	0,2850	0,131328	0,101802
50	BUS50	BUS51	AAAC 70	0,4000	0,18432	0,14288
51	BUS52	BUS51	AAAC 70	0,4430	0,204134	0,15824
52	BUS51	BUS53	AAAC 70	0,8060	0,371405	0,287903
53	BUS51	BUS54	AAAC 70	0,1570	0,072346	0,05608

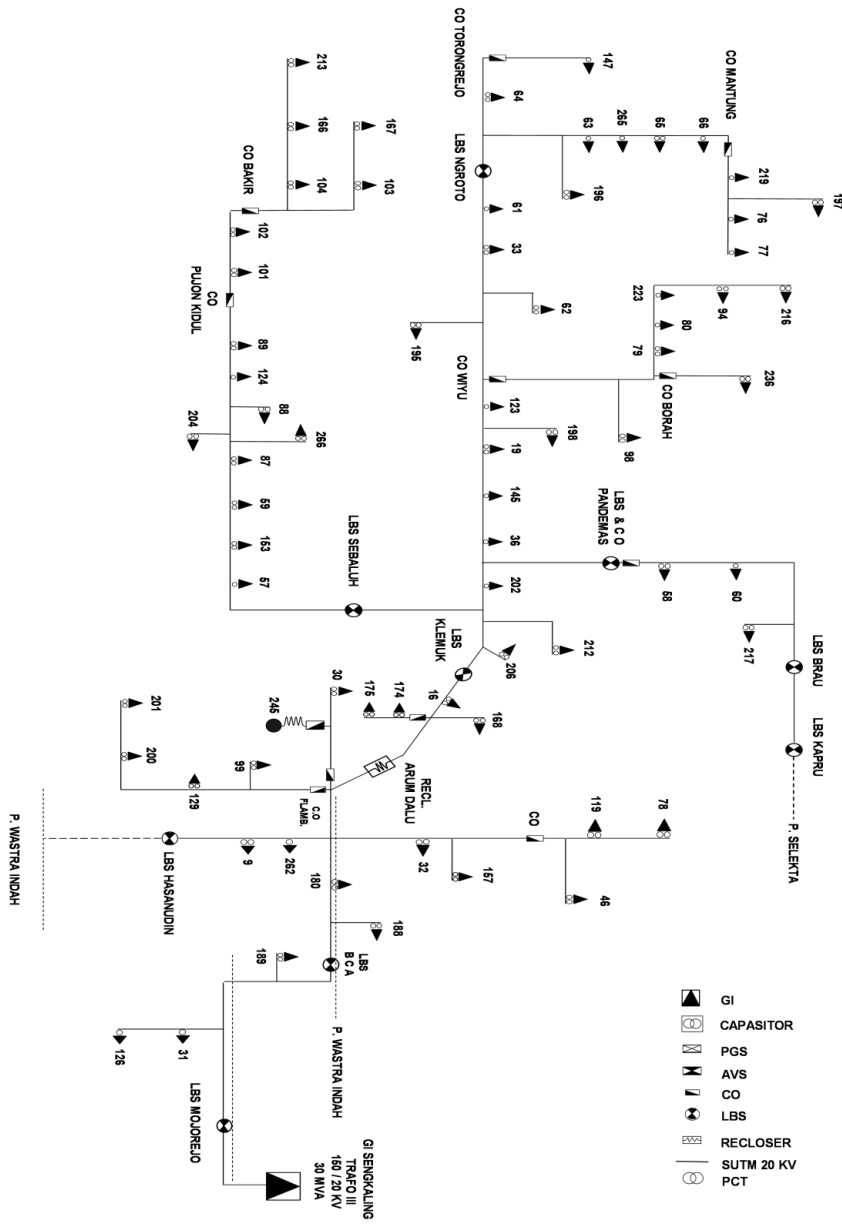
ID	Dari	Ke	Jenis Penghantar	Jarak Saluran (km)	R (ohm)	jX (ohm)
54	BUS54	BUS55	AAAC 70	0,1370	0,06313	0,048936
55	BUS54	BUS56	AAAC 70	0,4550	0,209664	0,162526
56	BUS56	BUS57	AAAC 70	0,4660	0,214733	0,166455
57	BUS57	BUS58	AAAC 70	1,6910	0,779213	0,604025
58	BUS58	BUS59	AAAC 70	0,5410	0,249293	0,193245
59	BUS59	BUS60	AAAC 70	0,5410	0,249293	0,193245
60	BUS60	BUS61	AAAC 70	1,2010	0,553421	0,428997
61	BUS62	BUS61	AAAC 70	1,3230	0,609638	0,472576
62	BUS63	BUS62	AAAC 70	1,2810	0,590285	0,457573
63	BUS64	BUS63	AAAC 70	0,7690	0,354355	0,274687
64	BUS65	BUS61	AAAC 70	0,4910	0,226253	0,175385
65	BUS65	BUS66	AAAC 70	0,9090	0,418867	0,324695
66	BUS43	BUS67	AAAC 70	0,1940	0,089395	0,069297
67	BUS67	BUS68	AAAC 70	0,1540	0,070963	0,055009
68	BUS69	BUS68	AAAC 70	0,4090	0,188467	0,146095
69	BUS70	BUS69	AAAC 70	0,2860	0,131789	0,102159
70	BUS71	BUS70	AAAC 70	0,9150	0,421632	0,326838
71	BUS72	BUS71	AAAC 70	0,7270	0,335002	0,259684
72	BUS72	BUS73	AAAC 70	0,1430	0,065894	0,05108
73	BUS72	BUS74	AAAC 70	0,1450	0,066816	0,051794
74	BUS68	BUS75	AAAC 70	0,0940	0,043315	0,033577
75	BUS75	BUS76	AAAC 70	0,0940	0,043315	0,033577
76	BUS76	BUS77	AAAC 70	0,9490	0,437299	0,338983
77	BUS77	BUS78	AAAC 70	0,5910	0,272333	0,211105
78	BUS78	BUS79	AAAC 70	0,0510	0,023501	0,018217
79	BUS79	BUS80	AAAC 70	0,0510	0,023501	0,018217
80	BUS80	BUS81	AAAC 70	0,2680	0,123494	0,09573
81	BUS80	BUS82	AAAC 70	0,2040	0,094003	0,072869
82	BUS82	BUS83	AAAC 70	0,1400	0,064512	0,050008
83	BUS84	BUS83	AAAC 70	0,8340	0,384307	0,297905
84	BUS85	BUS84	AAAC 70	0,8340	0,384307	0,297905
85	BUS85	BUS86	AAAC 70	0,3900	0,179712	0,139308
86	BUS87	BUS85	AAAC 70	0,3980	0,183398	0,142166
87	BUS88	BUS87	AAAC 120	1,7860	0,480077	0,602954
88	BUS87	BUS89	AAAC 150	0,1150	0,024863	0,038008
89	BUS89	BUS90	AAAC 150	0,2340	0,050591	0,077337
90	BUS90	BUS91	AAAC 150	0,2340	0,050591	0,077337
91	BUS91	BUS92	AAAC 150	0,8890	0,192202	0,293815
92	BUS92	BUS93	AAAC 150	0,9130	0,197391	0,301747
93	BUS94	BUS93	AAAC 150	0,5740	0,124099	0,189707
94	BUS83	BUS95	AAAC 150	0,0570	0,012323	0,018839
95	BUS95	BUS96	AAAC 150	0,2730	0,059023	0,090227
96	BUS95	BUS97	AAAC 150	0,0270	0,005837	0,008924
97	BUS98	BUS97	AAAC 150	0,0660	0,014269	0,021813
98	BUS97	BUS99	AAAC 150	0,1030	0,022269	0,034042
99	BUS99	BUS100	AAAC 150	0,1030	0,022269	0,034042
100	BUS100	BUS101	AAAC 150	0,6520	0,140962	0,215486
101	BUS101	BUS102	AAAC 150	0,1220	0,026376	0,040321



ID	Dari	Ke	Jenis Penghantar	Jarak Saluran (km)	R (ohm)	jX (ohm)
102	BUS102	BUS103	AAAC 150	0,6030	0,130369	0,199292
103	BUS103	BUS104	AAAC 150	0,1920	0,041511	0,063456
104	BUS104	BUS105	AAAC 150	0,1680	0,036322	0,055524
105	BUS106	BUS104	AAAC 150	0,1800	0,038916	0,059495
106	BUS107	BUS106	AAAC 150	1,1920	0,257711	0,393956
107	BUS108	BUS107	AAAC 150	0,1460	0,031565	0,048253
108	BUS109	BUS108	AAAC 150	0,1460	0,031565	0,048253
109	BUS110	BUS109	AAAC 150	0,2550	0,055131	0,084278
110	BUS111	BUS110	AAAC 150	0,5000	0,108111	0,165255
111	BUS112	BUS111	AAAC 150	0,5000	0,108111	0,165255
112	BUS112	BUS113	AAAC 150	0,1390	0,030052	0,045945
113	BUS114	BUS113	AAC 150	1,9990	0,392004	0,660675
114	BUS113	BUS115	AAC 240	0,1070	0,013108	0,033785
115	BUS115	BUS116	AAC 240	0,5450	0,066763	0,172057
116	BUS103	BUS117	AAC 240	0,4110	0,050348	0,129753
117	BUS118	BUS117	AAC 240	1,2680	0,155331	0,400308

Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang





Gambar 4.2 Single line diagram penyulang Pujon

Sumber: PT. PLN APJ Malang

### 4.3 Data Pembangkitan terdistribusi

Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan data pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Penempatan pembangkit terdistribusi yaitu PLTMH (pembangkit listrik tenaga mikrohidro) berada pada bus 57.

#### 4.3.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) pada penelitian ini menggunakan salah satu PLTMH yang sudah dibangun oleh Universitas Brawijaya yang berada di Desa Bendosari, Kecamatan Pujon, Kabupaten Malang. PLTMH diletakkan pada bus 57 di lokasi terjauh dari



GI Sengkaling. Sistem tegangan pada PLTMH adalah 380 V dan selanjutnya akan dinaikkan menjadi 20 kV dengan transformator step-up 0,38/20 kV. Tabel 4.6 berisi data spesifikasi generator pada PLTMH Bendosari.

Tabel 4.6 Data Spesifikasi Generator PLTMH Bendosari

<b>Generator Sinkron</b>	3 Fasa	50 Hz	15 kVA
	380/220 V	1500 rpm	p.f. 0,85 – 0,90

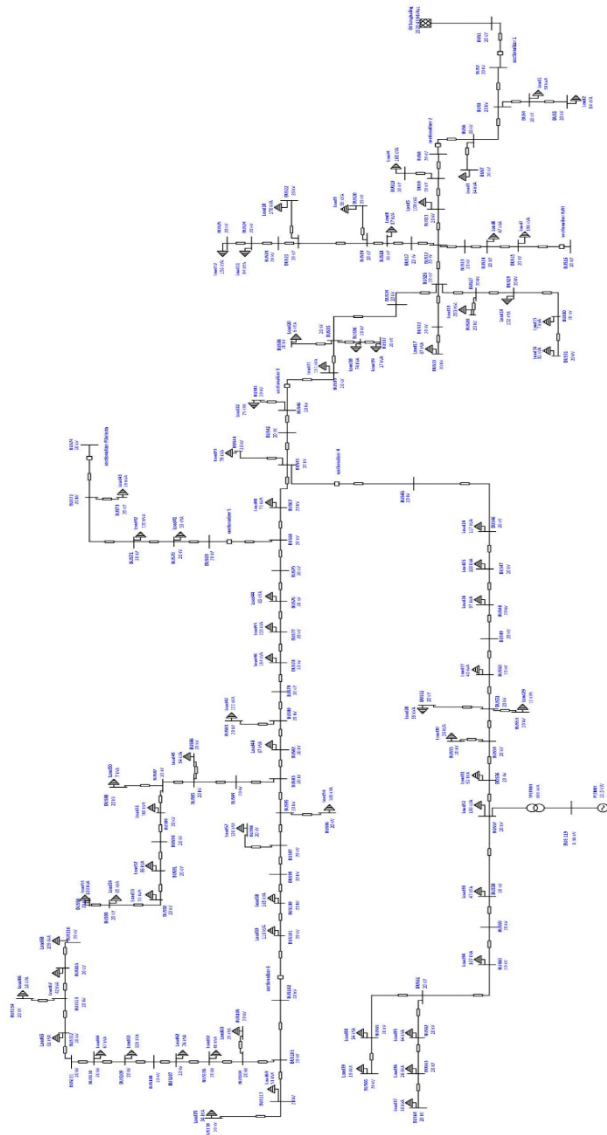
Sumber: Adiatma (2015, p.38)

Dari penelitian tersebut diketahui bahwa daya yang dikeluarkan oleh generator PLTMH Bendosari tersebut sebesar 8,7 kW. Generator tersebut memiliki *power factor* sebesar 0,9 sehingga untuk menghitung nilai daya semu (S) dan daya reaktif (Q) dari genartor tersebut dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{P_{out}}{0,9} & Q &= S \times \sin[\cos^{-1}(0,9)] \\
 S &= \frac{8.700}{0,9} & Q &= 9666,66 \times \sin(25,84^{\circ}) \\
 S &= 9666,66 \text{ VA} & Q &= 9666,66 \times 0,436 \\
 & & Q &= 4214,66 \text{ VAR}
 \end{aligned}$$

Jadi, generator PLTMH Bendosari tersebut mempunyai nilai daya semu (S) sebesar 9.666,66 VA dan daya reaktif (Q) sebesar 4.214,99 VAR.

One-Line Diagram - OLVI (Edit Mode)



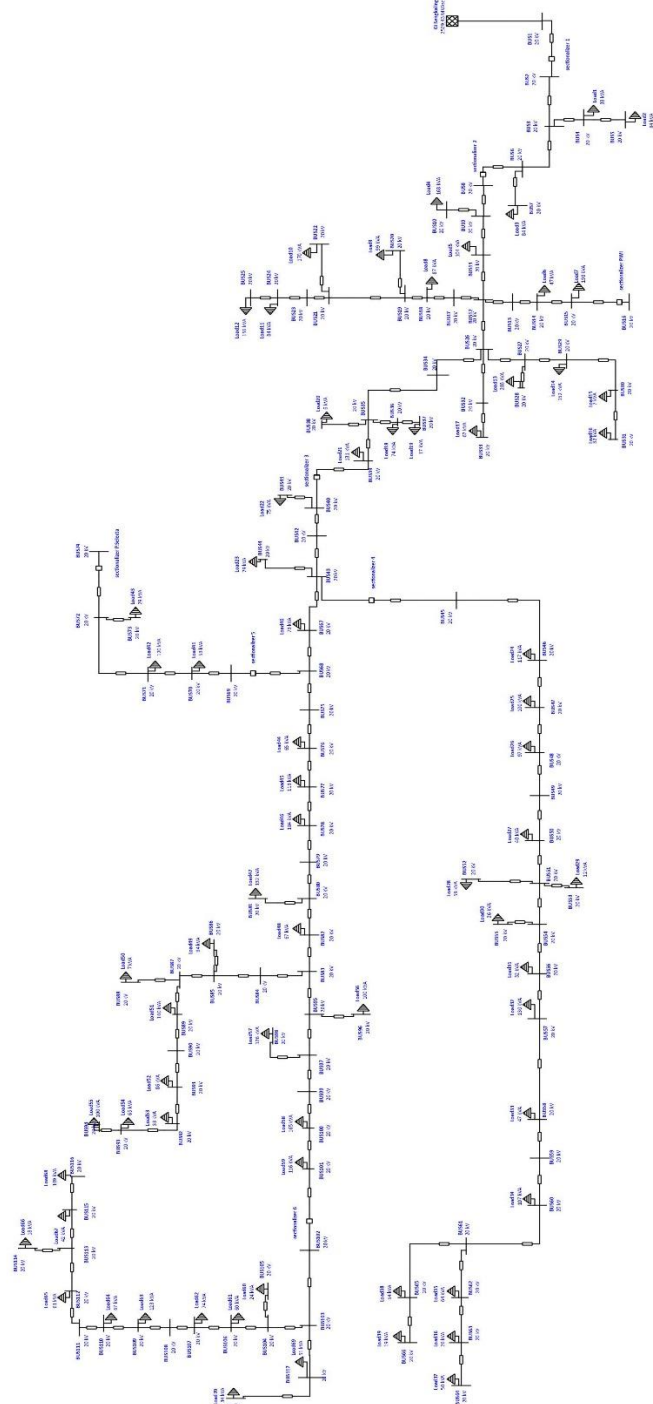
Gambar 4.3 Sistem Pujon dengan penambahan pembangkit tersebar PLTMH pada software ETAP 19.01

#### 4.4 Analisis Aliran Daya Pada GI Sengkaling Penyulang Pujon

Untuk menganalisis aliran daya terlebih dahulu dilakukan pemodelan single line diagram seperti pada Gambar 4.4. Setelah data panjang saluran, data luas penampang, data impedansi dan data beban yang sudah didapat dimasukkan sebagai input data untuk menganalisis aliran daya (load flow) dengan menggunakan software ETAP power station. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik sistem pada GI Sengkaling Penyulang Pujon yaitu tegangan pada masing-masing bus dan besar rugi-rugi dayanya. Setelah diketahui karakteristik penyulang pujon pada kondisi eksisting (kondisi sebelum pemasangan SVC) maka kita dapat mengetahui bus mana saja yang nantinya mengalami masalah jatuh tegangan.



One-Line Diagram - OLV1 (Edit Mode)



Gambar 4.4 Pemodelan single line diagram penyalang pujan di software ETAP

Gambar 4.4 adalah pemodelan single line diagram yang telah dibuat pada *software ETAP*. Pemodelan *single line diagram* yang diinjeksikan dengan energi baru dan terbarukan yaitu PLTMH tersebut nantinya akan membantu untuk mengetahui karakteristik penyalang pujan.

#### 4.5 Analisis Profil Tegangan Pada Sistem 20kV Dalam Kondisi Eksisting

Level tegangan pada setiap bus sudah diatur dalam permen ESDM no. 3 Tahun 2007 bahwa tegangan minimal setiap bus pada jaringan 20 kV adalah 18 kV atau 0,9 pu. Dimana level tegangan tersebut dipakai sebagai standart minimal pada penelitian ini.

Tabel 4.7 Profil Tegangan kondisi Eksisting

BUS ID	Tegangan kondisi eksisting	
	Pu	kV
38	0,9049	18,1
39	0,9032	18,06
40	0,8989	17,98
41	0,8989	17,98
42	0,8978	17,96
43	0,8968	17,94
44	0,8967	17,93
45	0,8964	17,93
46	0,8957	17,91
47	0,8953	17,91
48	0,8943	17,89
49	0,8941	17,88
50	0,8938	17,88
51	0,8935	17,87
52	0,8935	17,87
53	0,8935	17,87
54	0,8934	17,87
55	0,8934	17,87
56	0,8931	17,86
57	0,8927	17,85
58	0,8919	17,84
59	0,8917	17,83
60	0,8914	17,83
61	0,8911	17,82
62	0,8908	17,82
63	0,8907	17,81
64	0,8904	17,81
65	0,8910	17,82
66	0,8910	17,82
67	0,8961	17,92
68	0,8955	17,91
69	0,8954	17,91
70	0,8953	17,91
71	0,8952	17,90
72	0,8951	17,90
73	0,8951	17,90





BUS ID	Tegangan kondisi eksisting	
	Pu	kV
74	0,8951	17,90
75	0,8952	17,90
76	0,8949	17,90
77	0,8921	17,84
78	0,8903	17,81
79	0,8902	17,80
80	0,8901	17,80
81	0,8900	17,80
82	0,8896	17,79
83	0,8892	17,78
84	0,8886	17,77
85	0,8880	17,76
86	0,8879	17,76
87	0,8877	17,75
88	0,8877	17,75
89	0,8877	17,75
90	0,8876	17,75
91	0,8876	17,75
92	0,8874	17,75
93	0,8873	17,75
94	0,8872	17,74
95	0,8892	17,78
96	0,8892	17,78
97	0,8891	17,78
98	0,8891	17,78
99	0,8891	17,78
100	0,8890	17,78
101	0,8885	17,77
102	0,8885	17,77
103	0,8881	17,76
104	0,8880	17,76
105	0,8880	17,76
106	0,8879	17,76
107	0,8874	17,75
108	0,8874	17,75
109	0,8873	17,75
110	0,8872	17,74
111	0,8871	17,74
112	0,8870	17,74
113	0,8870	17,74
114	0,8870	17,74
115	0,8870	17,74
116	0,8870	17,74
117	0,8881	17,76

BUS ID	Tegangan kondisi eksisting	
	Pu	kV
118	0,8881	17,76

Tabel 4.7 menunjukkan hasil studi aliran daya menggunakan metode *Newton Raphson* pada kondisi eksisting, dimana pada bus 40 s.d bus 118 mengalami penurunan tegangan (kondisi tegangan kritis) atau kondisi dibawah level tegangan yang ditentukan dalam penelitian ini, yaitu 18 kV atau 0,9 pu. Setelah dilakukan *load flow* pada *software ETAP 19.01*, diketahui bus-bus yang mengalami penurunan tegangan, maka data hasil *load flow* tersebut akan digunakan sebagai data masukan dalam menentukan letak dan lokasi penempatan *Static Var Compensator (SVC)* dengan menggunakan fasilitas yang dimiliki oleh *software ETAP* yaitu *Optimal Placement Capacitor (OCP)*. *OCP* akan membantu untuk mengetahui dimana letak pemasangan *SVC* dan besar kapasitas yang dibutuhkan untuk menanggulangi jatuh tegangan pada penyulang Pujon. Masukkan bus-bus yang kritis menjadi kandidat untuk input *OCP*. Setelah itu melakukan *running* fitur *OCP* tersebut, kemudian setelah *running OCP* selesai, maka *OCP* akan menunjukkan bus mana yang bisa digunakan untuk memperbaiki sistem dan besar kapasitasnya akan tertera pada bus tersebut yang bisa kita lihat pada Pemodelan *Single Line Diagram* yang telah dibuat. Untuk kondisi tegangan dalam kondisi eksisting akan ditampilkan dilampiran 1.

#### 4.6 Hasil Simulasi Load Flow Sistem Penyulang Pujon

Simulasi *load flow* atau aliran daya dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis pengaruh penambahan pembangkit tersebar. Simulasi aliran daya ini berdasarkan data-data yang telah dibahas sebelumnya meliputi data pembangkit, data saluran, dan data beban. Simulasi akan dilakukan pada kondisi 1 sebelum ditambahkan pembangkit terdistribusi pada sistem atau pada eksisting. Kondisi 2 setelah penambahan PLTMH. Kondisi 3 setelah penambahan *SVC (Static VAR Compensator)*. Tiga kondisi sistem inilah yang akan dianalisis pada simulasi *load flow* seperti pada Tabel 4.8.

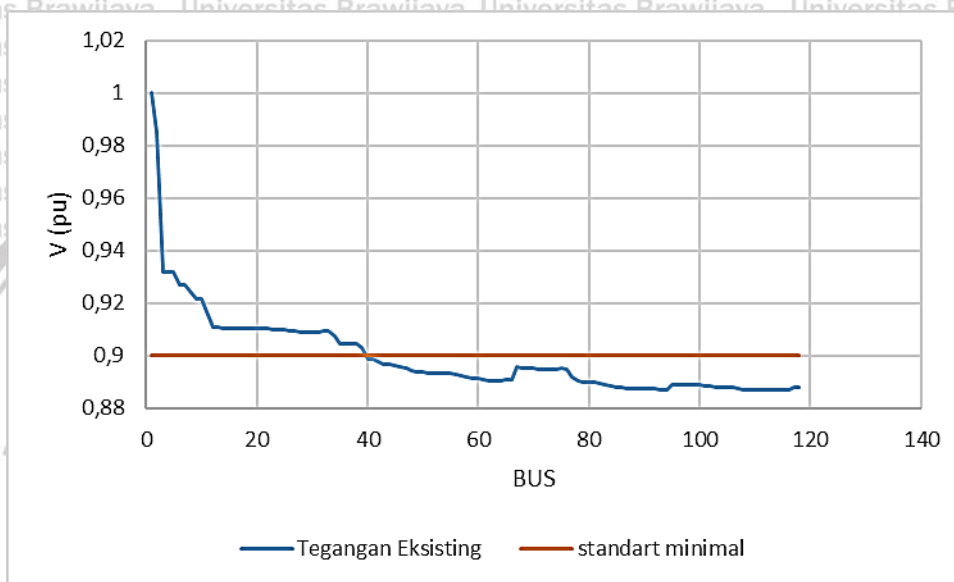
Tabel 4.8 Kondisi sistem yang akan disimulasikan di ETAP

Kondisi	Sistem
1	Eksisting
2	Eksisting dan injeksi PLTMH



#### 4.6.1 Simulasi kondisi 1 (Eksisting)

Dari gambar 4.5 dapat terlihat penurunan tegangan bus semakin jauh dari sumber semakin mengalami penurunan yang besar yang terlihat jelas pada grafik. Terlihat mulai dari bus 40 tegangan mulai jatuh hingga beberapa bus setelahnya berada pada kondisi tegangan dibawah 0,9 pu atau berada dibawah standart minimal tegangan yang sudah ditentukan dalam penelitian ini (18 kV atau 0,9 pu).



Gambar 4. 5 Grafik tegangan dalam kondisi eksisting

Pada simulasi kondisi 1 ini pembangkitan hanya pada GI Sengkaling sebagai slack bus (*swing*), untuk bus 1 sebagai referensi dengan tegangan  $1\angle 0^\circ$  p.u., hasil simulasi aliran daya pada kondisi 1 meliputi nilai tegangan, daya aktif, dan daya reaktif tiap bus yang ditampilkan pada lampiran 2. Grafik profil tegangan pada tiap bus akan ditampilkan pada Gambar 4.5.

Sedangkan untuk aliran daya dan rugi-rugi daya pada saluran akan ditampilkan pada lampiran

1.

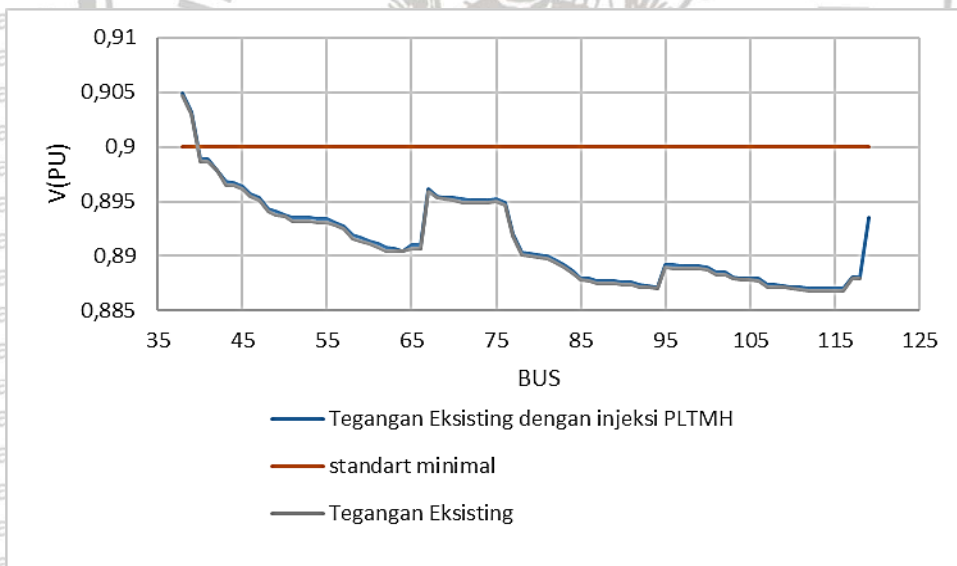
Tabel 4. 9 Hasil Aliran Daya pada Saluran dengan Kontribusi Drop Tegangan dan Rugi Daya Terbesar untuk Kondisi 1

No Saluran	From Bus	To Bus	MW Flow	MVAR Flow	% Voltage Drop	kW Losses	kVAR Losses
1	BUS1	BUS2	4,26	2,624	1,49	61,73	41,86
2	BUS2	BUS3	4,038	2,474	5,33	221,4	150,6
5	BUS3	BUS6	3,929	2,405	0,48	19,47	13,25
10	BUS9	BUS11	3,706	2,265	0,48	18,57	12,6
11	BUS11	BUS12	3,608	2,203	0,63	23,98	16,25

Hasil analisis aliran daya pada saluran dengan kontribusi *drop* tegangan dan rugi daya terbesar untuk kondisi 1 (eksisting, PLN) diberikan pada Tabel 4.9. Tiga saluran yang menyumbangkan *drop* tegangan terbesar adalah saluran 2 (BUS2-BUS3) 5,33%, saluran 1 (BUS1-BUS2) 1,49%, dan saluran 11 (BUS11-BUS12) 0,63%. Lima saluran dengan kontribusi rugi daya terbesar adalah sebagai berikut: saluran 2 (BUS2-BUS3) 221,4 kW + j 150,6 kVAR, saluran 1 (BUS1-BUS2) 61,73 kW + j 41,86 kVAR, saluran 11 (BUS11-BUS12) 23,98 kW + j 16,25 kVAR, saluran 5 (BUS3-BUS6) 19,47 kW + j 13,25 kVAR, saluran 10 (BUS9-BUS11) 18,57 kW + j 12,6 kVAR.

#### 4.6.2 Simulasi Kondisi 2 (Eksisting Dan Injeksi PLTMH)

Pada simulasi kondisi ini terdapat PLTMH sebagai *voltage control* yang disambungkan pada bus 57 pada sistem distribusi 20 kV. Hasil simulasi aliran daya pada kondisi ini meliputi nilai tegangan, daya aktif, dan daya reaktif tiap bus yang ditampilkan pada lampiran 4. Perbandingan profil tegangan pada tiap bus antara kondisi 1 dan 2 akan ditampilkan pada gambar 4.6 sedangkan untuk aliran daya dan rugi-rugi daya pada saluran akan ditampilkan pada lampiran 3.



Gambar 4.6 Grafik perbandingan profil tegangan dalam grafik hasil untuk kondisi 2

Tabel 4. 10 Hasil Aliran Daya pada Saluran dengan Kontribusi Drop Tegangan dan Rugi Daya Terbesar untuk Kondisi 2

No Saluran	From Bus	To Bus	MW Flow	MVAR Flow	% Voltage Drop	kW Losses	kVAR Losses
1	BUS1	BUS2	4,252	2,615	1,48	61,43	41,65
2	BUS2	BUS3	4,031	2,465	5,32	220,4	149,8
5	BUS3	BUS6	3,922	2,396	0,48	19,38	13,18
10	BUS9	BUS11	3,699	2,257	0,48	18,47	12,53
11	BUS11	BUS12	3,601	2,194	0,63	23,85	16,16



Hasil analisis aliran daya pada gambar 4.6 terlihat level tegangan pada kondisi 2 walaupun terjadi perbaikan namun hampir tidak berpengaruh pada sistem distribusi dikarenakan suplai daya dari PLTMH sangat kecil. Hasil analisis aliran daya pada saluran dengan kontribusi *drop* tegangan dan rugi daya terbesar untuk kondisi 2 (Eksisting + PLTMH) diberikan pada Tabel 4.10. Tiga saluran yang menyumbang *drop* tegangan terbesar adalah saluran 2 (BUS2-BUS3) 5,32%, saluran 1 (BUS1-BUS2) 1,48%, dan saluran 11 (BUS11-BUS12) 0,63%. Lima saluran dengan kontribusi rugi daya terbesar adalah sebagai berikut: saluran 2 (BUS2-BUS3) 220,4 kW + j 149,8 kVAR, saluran 1 (BUS1-BUS2) 61,43 kW + j 41,65 kVAR, saluran 11 (BUS11-BUS12) 23,85 kW + j 16,16 kVAR, saluran 5 (BUS3-BUS6) 19,38 kW + j 13,18 kVAR, saluran 10 (BUS9-BUS11) 18,47 kW + j 12,53 kVAR.

#### 4.6.3 Menghitung Kapasitas Static VAR Compensator (SVC)

Berdasarkan faktor daya yang diketahui dan faktor daya yang diinginkan, maka besar dari Q (daya reaktif) dapat diperoleh dengan persamaan:

kVAR sebelum SVC (Static Var Compensator):

$$Q_1 = P \tan \theta_1 \dots\dots\dots(4.1)$$

kVAR yang diinginkan berdasarkan PF=0.999

$$Q_2 = P \tan \theta_2 \dots\dots\dots(4.2)$$

Berdasarkan persamaan (2.43) dan (2.44) maka dapat disempurnakan nilai Q dengan persamaan (2.45) dibawah berikut:

$$Q = Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots(4.3)$$

Dimana,  $Q_1 =$  kVAR sebelum SVC

$Q_2 =$  kVAR yang diinginkan berdasarkan PF=0.999

Diketahui:

$$\cos \theta_1 = 0,8, \cos \theta_2 = 0,999$$

Daya total = 4322 kW

Jawab:

$$Q_1 = P \tan \theta_1$$

$$Q_2 = P \tan \theta_2$$

$$Q_1 = 4322 \text{ kW} \times \tan (\arccos 0,8)$$

$$Q_2 = 4322 \text{ kW} \times \tan (\arccos 0,999)$$

$$Q_1 = 4322 \text{ kW} \times \tan (36,4)$$

$$Q_2 = 4322 \text{ kW} \times \tan (2,562558733)$$

$$Q_1 = 4322 \text{ kW} \times 0,737273$$

$$Q_2 = 4322 \text{ kW} \times 0,04475493274$$

$$Q_1 = 3186,4959 \text{ kVAR}$$

$$Q_2 = 193,4308193 \text{ kVAR}$$

Maka,

$$Q_c = Q_1 = Q_2$$

$$Q_c = 3186,4959 \text{ kVAR} - 193,4308193 \text{ kVAR}$$

$$Q_c = 2993,065081 \text{ kVAR}$$

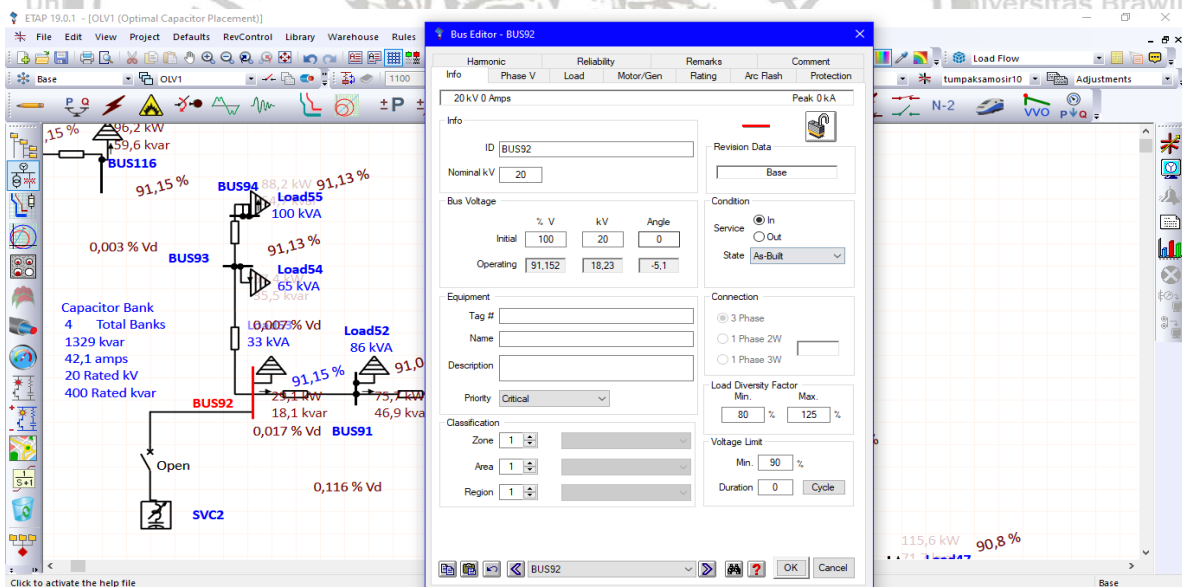
Dari hasil perhitungan didapatkan nilai daya reaktifnya sebesar 2993,065081 kVAR. Daya ini akan diinjeksikan ke dalam sistem supaya tegangan profilnya meningkat.

#### 4.6.4 Simulasi Kondisi 3 (Eksisting dan Injeksi PLTMH Dengan Pemasangan SVC)

Pada simulasi kondisi ini terdapat PLTMH sebagai *voltage control* yang disambungkan bus 57 dan SVC yang dihubungkan pada bus 92 dan bus 107 pada sistem distribusi 20 kV.

Hasil analisis untuk penentuan letak dan kapasitas SVC menggunakan OCP menyimpulkan bahwa, untuk menanggulangi permasalahan penurunan tegangan (*under voltage*) di bus-bus yang kritis pada Penyulang Pujon terdapat 2 kandidat *capacitor* dengan kapasitas sebesar  $Q =$

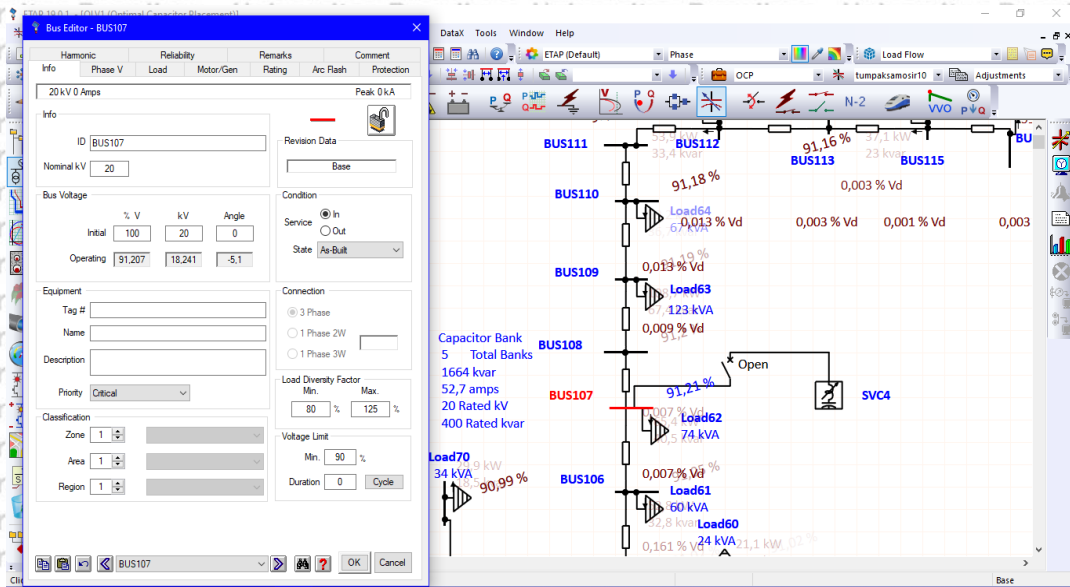
1329 KVAR pada bus 92 dan  $Q = 1664$  KVAR pada bus 107 dengan jumlah total 2993 kVAR yang akan disimulasikan satu-persatu untuk mendapatkan besar kapasitas SVC dan letak SVC yang sangat optimal. Hasil simulasi aliran daya pada kondisi 3 meliputi nilai tegangan, daya aktif, dan daya reaktif tiap bus yang ditampilkan pada lampiran 4.



Gambar 4.7 Hasil simulasi OCP pada bus 92

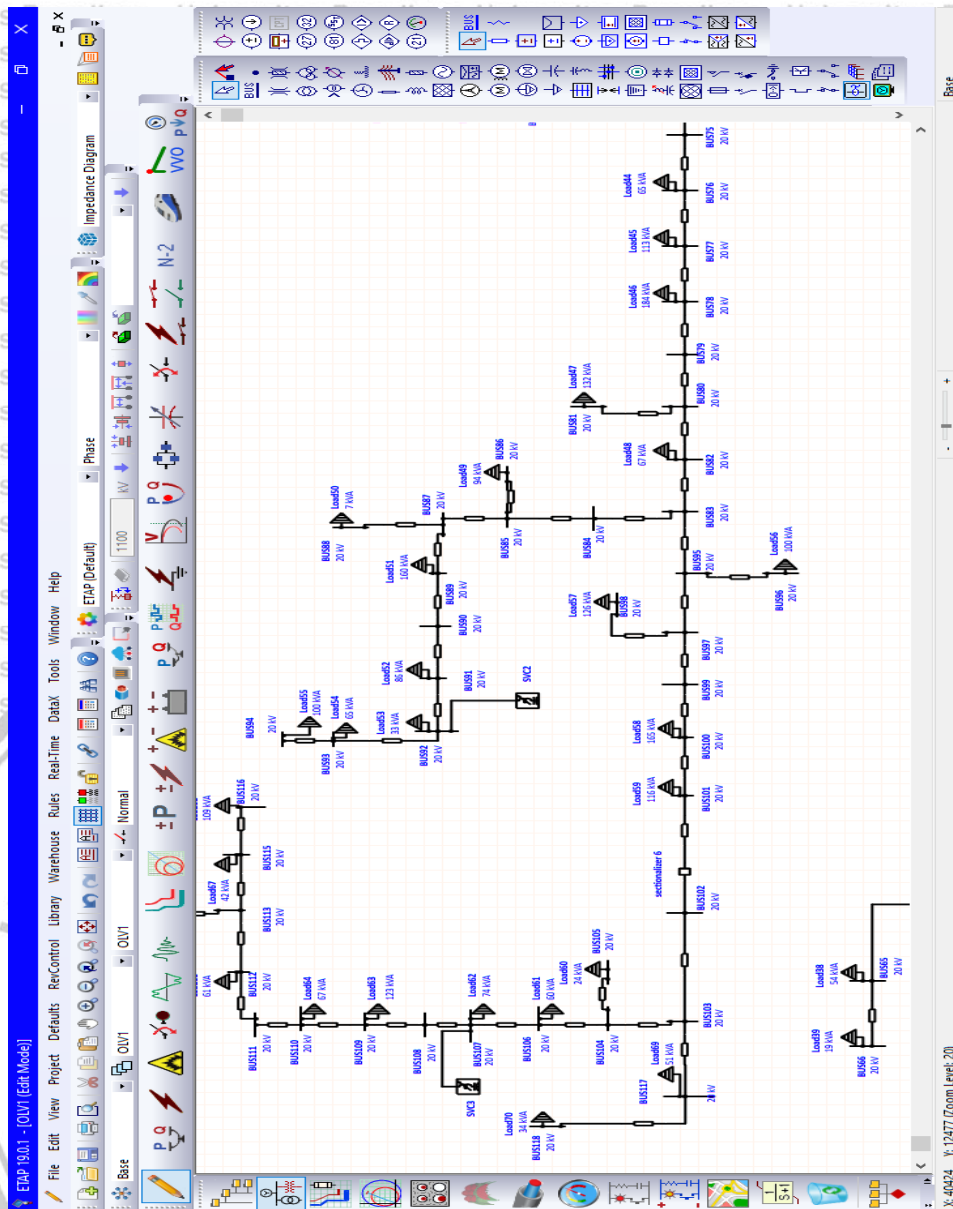
Gambar 4.7 menunjukkan hasil simulasi OCP dengan kapasitas  $Q = 1329$  kVAR pada bus 92. Dimana tegangan pada bus 92 yang awalnya  $V = 0,8872$  pu, setelah dilakukan pemasangan SVC meningkat menjadi  $V = 0,9115$  pu. Rugi-rugi daya aktif dan reaktifnya sebelum dilakukan pemasangan SVC  $P = 414,7$  kW dan  $Q = 244,6$  kVAR menjadi  $P = 350,7$  kW dan  $Q = 201,0$  kVAR.





Gambar 4.8 Hasil Simulasi OCP pada Bus 107

Gambar 4.8 menunjukkan hasil simulasi *OCP (Optimal Capacitor Placement)* dengan besar kapasitas  $Q = 1664$  kVAR pada bus 107. Dimana tegangan pada bus 107 yang awalnya  $V = 0,8872$  pu, setelah dilakukan pemasangan SVC meningkat menjadi  $V = 0,91207$  pu. Rugi daya aktif dan reaktifnya sebelum dilakukan pemasangan SVC  $P = 414,7$  kW dan  $Q = 244,6$  kVAR menjadi  $P = 350,7$  kW dan  $Q = 201,0$  kVAR.



Gambar 4. 9 Hasil Simulasi Penempatan SVC pada Software ETAP

Gambar 4.9 menunjukkan tempat peletakkan SVC pada pemodelan *single line* diagram pada software ETAP dimana setelah dilakukan simulasi pemasangan SVC pada bus 92 dengan data  $Q = 1329$  kVAR dan bus 107 dengan data  $Q = 1664$  kVAR, maka diperoleh hasil yang sangat optimal apabila SVC dipasang pada bus 92 dan bus untuk mengatasi masalah jatuh tegangan yang berada pada Penyulang Pujon Malang.

Tabel 4.11 Perbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

Bus ID	Tegangan eksisting dengan injeksi PLTMH		Tegangan sesudah pemasangan SVC	
	Pu	kV	pu	kV
38	0,9049	18,1	0,9135	18,27
39	0,9032	18,06	0,9125	18,25



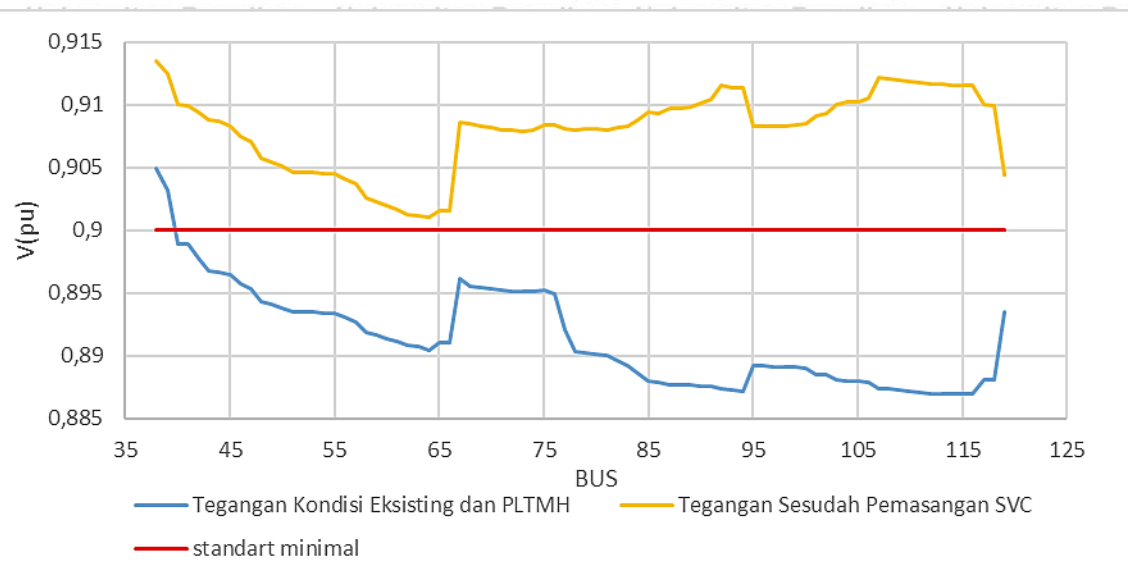
40	0,8989	17,98	0,91	18,2
41	0,8989	17,98	0,9099	18,18
42	0,8978	17,96	0,9094	18,19
43	0,8968	17,94	0,9088	18,18
44	0,8967	17,93	0,9087	18,17
45	0,8964	17,93	0,9083	18,17
46	0,8957	17,91	0,9075	18,15
47	0,8953	17,91	0,907	18,14
48	0,8943	17,89	0,9057	18,11
49	0,8941	17,88	0,9054	18,11
50	0,8938	17,88	0,9051	18,1
51	0,8935	17,87	0,9046	18,09
52	0,8935	17,87	0,9046	18,09
53	0,8935	17,87	0,9046	18,09
54	0,8934	17,87	0,9045	18,09
55	0,8934	17,87	0,9045	18,09
56	0,8931	17,86	0,9041	18,08
57	0,8927	17,85	0,9037	18,07
58	0,8919	17,84	0,9026	18,05
59	0,8917	17,83	0,9023	18,05
60	0,8914	17,83	0,902	18,04
61	0,8911	17,82	0,9016	18,03
62	0,8908	17,82	0,9012	18,02
63	0,8907	17,81	0,9011	18,02
64	0,8904	17,81	0,901	18,02
65	0,891	17,82	0,9015	18,03
66	0,891	17,82	0,9015	18,03
67	0,8961	17,92	0,9086	18,17
68	0,8955	17,91	0,9085	18,17
69	0,8954	17,91	0,9083	18,17
70	0,8953	17,91	0,9082	18,16
71	0,8952	17,9	0,908	18,16
72	0,8951	17,9	0,908	18,16
73	0,8951	17,9	0,9079	18,16
74	0,8951	17,9	0,908	18,16
75	0,8952	17,9	0,9084	18,17
76	0,8949	17,9	0,9084	18,17
77	0,8921	17,84	0,9081	18,16
78	0,8903	17,81	0,908	18,16
79	0,8902	17,8	0,9081	18,16
80	0,8901	17,8	0,9081	18,16
81	0,89	17,8	0,908	18,16
82	0,8896	17,79	0,9082	18,16
83	0,8892	17,78	0,9083	18,17
84	0,8886	17,77	0,9088	18,18



85	0,888	17,76	0,9094	18,19
86	0,8879	17,76	0,9093	18,19
87	0,8877	17,75	0,9097	18,19
88	0,8877	17,75	0,9097	18,19
89	0,8877	17,75	0,9098	18,2
90	0,8876	17,75	0,9101	18,2
91	0,8876	17,75	0,9104	18,21
92	0,8874	17,75	0,9115	18,23
93	0,8873	17,75	0,9113	18,23
94	0,8872	17,74	0,9113	18,23
95	0,8892	17,78	0,9083	18,17
96	0,8892	17,78	0,9083	18,17
97	0,8891	17,78	0,9083	18,17
98	0,8891	17,78	0,9083	18,17
99	0,8891	17,78	0,9084	18,17
100	0,889	17,78	0,9085	18,17
101	0,8885	17,77	0,9091	18,18
102	0,8885	17,77	0,9093	18,19
103	0,8881	17,76	0,91	18,2
104	0,888	17,76	0,9102	18,2
105	0,888	17,76	0,9102	18,2
106	0,8879	17,76	0,9105	18,21
107	0,8874	17,75	0,9121	18,24
108	0,8874	17,75	0,912	18,24
109	0,8873	17,75	0,9119	18,24
110	0,8872	17,74	0,9118	18,24
111	0,8871	17,74	0,9117	18,23
112	0,887	17,74	0,9116	18,23
113	0,887	17,74	0,9116	18,23
114	0,887	17,74	0,9115	18,23
115	0,887	17,74	0,9115	18,23
116	0,887	17,74	0,9115	18,23
117	0,8881	17,76	0,91	18,2
118	0,8881	17,76	0,9099	18,2
119	0,8935	0,34	0,9044	0,344

Pada Tabel 4.11 Tegangan dibeberapa bus awalnya berada dalam kondisi kritis (dibawah standard minimal tegangan yang ditetapkan dalam penelitian ini yaitu 0,9 pu) mengalami kenaikan atau perbaikan setelah pemasangan SVC. Tegangan yang awalnya  $V = 0,8989$  pu naik menjadi  $V = 0,91$  pu. Tabel 4.11 selengkapnya dapat dilihat dilampiran 5.





Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

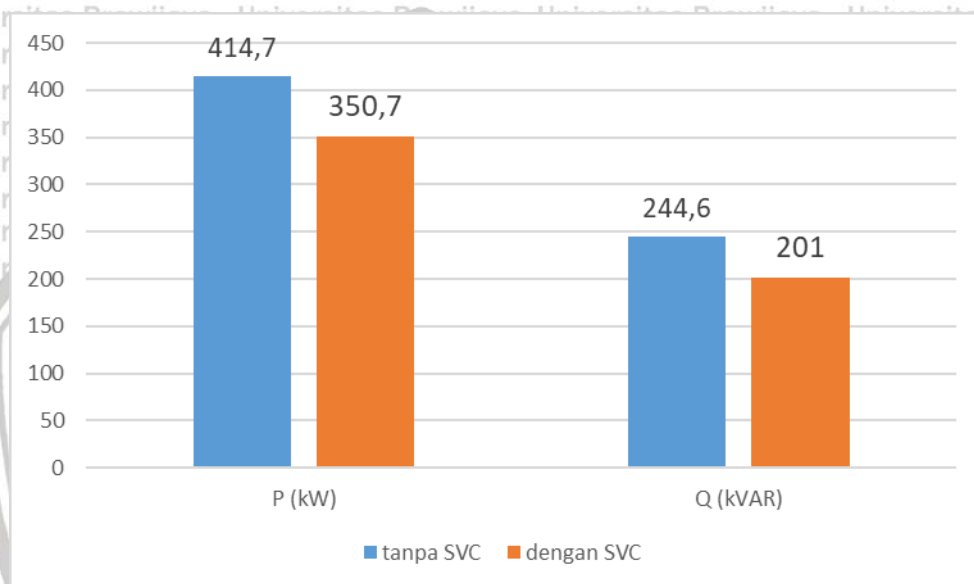
Pada Gambar 4.10 terlihat perbandingan sebelum pemasangan SVC dan sesudah pemasangan SVC. Setelah dipasang SVC, semua nilai tegangan meningkat. Bus-bus yang awalnya berada pada kondisinya kritis atau dibawah 0,9 pu (standart minimal tegangan yang telah ditetapkan) meningkat. Dari grafik diatas dapat terlihat bahwa pemasangan SVC sangat berpengaruh untuk mengatasi jatuh tegangan.

Tabel 4.12 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Aktif dan Daya Reaktif Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

No	BUS		Rugi-rugi daya aktif (kW)		Rugi-rugi daya reaktif (kVAR)	
	dari	ke	tanpa SVC	dengan SVC	tanpa SVC	dengan SVC
1	BUS1	BUS2	61,43	49,2	41,65	33
2	BUS2	BUS3	220,4	176,3	150	118,5
3	BUS3	BUS4	0,006	0	-0,3	-0,3
4	BUS4	BUS5	0,0014	0	-0,148	-0,2
5	BUS3	BUS6	19,38	15,5	13,18	10,4
6	BUS6	BUS7	0,0012	0	-0,1	-0,1
7	BUS6	BUS8	9,79	7,8	6,66	5,3
8	BUS8	BUS9	11,6	9,3	7,88	6,2
9	BUS9	BUS10	0,0126	0	-0,339	-0,4
10	BUS9	BUS11	18,47	14,8	12,53	9,9
11	BUS11	BUS12	23,85	19,2	16,16	12,8
12	BUS12	BUS13	0,0054	0	-0,1	-0,1
13	BUS13	BUS14	0,0039	0	-0,1	-0,1
14	BUS14	BUS15	0,0122	0	-0,342	-0,4
15	BUS15	BUS16	0	0	-0,152	-0,2
16	BUS17	BUS12	0,0179	0	-0,1	-0,1
17	BUS18	BUS17	0,0179	0	0	0

18	BUS19	BUS18	0,0368	0	-0,1	-0,1
19	BUS20	BUS19	0,0014	0	-0,161	-0,2
20	BUS21	BUS19	0,1	0,1	-0,471	-0,5

Setelah dilakukan pemasangan SVC terjadi penurunan rugi-rugi daya aktif maupun daya reaktif seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.10. Perubahan besarnya aliran daya reaktif menghasilkan penurunan rugi-rugi saluran dari  $P = 414,7$  kW dan  $Q = 244,6$  kVAR menjadi  $P = 350,7$  kW dan  $Q = 201,0$  kVAR. Bus-bus yang nilai tegangan semula dibawah  $V = 18$  kV setelah dipasang SVC mengalami kenaikan di atas  $V = 18$  kV. Tabel 4.10 selengkapnya dapat dilihat dilampiran 5.



Gambar 4. 11 Diagram Perbandingan Rugi-Rugi Daya Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

Pada gambar 4.11 menunjukkan terjadinya penurunan rugi rugi aktif sebesar  $P = 414,7 - 350,7 = 64,00$  kW dan penurunan daya reaktif sebesar  $Q = 244,6 - 201,0 = 43,60$  kVAR. Perubahan besarnya aliran daya reaktif juga berpengaruh pada nilai tegangan pada setiap bus.



## BAB 5 PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi sistem distribusi Penyulang Pujon Malang pada saat dilakukan penambahan pembangkit terdistribusi, yaitu PLTMH mengalami perbaikan pada level tegangan walaupun tidak signifikan, hal itu dapat ditunjukkan pada simulasi *load flow* pada kondisi 2 (penambahan PLTMH), tegangan bus 116 yang memiliki nilai paling rendah yaitu 17,74 kV sedangkan pada kondisi 2 tegangan bus 116 meningkat menjadi 17,745 kV.
2. Pemasangan SVC pada bus-bus yang mengalami gangguan dapat menaikkan profil tegangan diatas nilai tegangan standar yang ditentukan.
3. Penempatan dan kapasitas SVC yang tepat untuk memperbaiki profil tegangan, yaitu pada bus 92 sebesar 1329 kVAR dan bus 107 sebesar 1664 kVAR.
4. Pemasangan SVC dapat mengurangi nilai rugi-rugi saluran dari dari  $P = 414,7$  kW dan  $Q = 244,6$  kVAR menjadi  $P = 350,7$  kW dan  $Q = 201$  kVAR. Perubahan besarnya aliran daya reaktif juga berpengaruh pada nilai tegangan pada setiap bus.

### 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian dan kajian lebih lanjut yaitu:

1. Diperlukannya penelitian lebih lanjut tentang analisis ekonomis pada sistem untuk mengetahui untung dan rugi pada sistem.
2. Kajian selanjutnya bisa menggunakan model *SVC Thyristor Switched Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (TSC-TCR)*.
3. Memperhitungkan aspek ekonomis pemasangan SVC.



## DAFTAR PUSTAKA

- IJETR. (2014). *Power device implementation & Analysis in ETAP*. ISSN: 2321-0869, Vol.2, Issue.5, May 2014.
- IJETR. (2012). *Efficiency improvement of Nigeria 330KV network using Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) devices*.ISSN: 2231-1963, July 2012.
- Djiteng, M. (1990). *Operasi Sistem Tenaga listrik*. Jakarta Selatan: Balai Penerbit & Humas.
- Erviana, M dkk. (2012). *Optimasi Penempatan Dan Kapasitas Kapasitor Bank Pada Sistem Distribusi Untuk Mereduksi Rugi Daya Menggunakan Particle Swarm Optimization*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Liliana & I. Syahputra. (2014). *Penempatan SVC (Static VAR Compensator)*. J. Sains teknol. dan Ind.,vol.12.no.2,pp. 55-60.
- Saadat, Hadi. (1999). *Power System Analysis*. Singapore: McGraw-Hill.
- PT. PLN. (2014). *Buku Pedoman Pemeliharaan Kompensasi Daya Reaktif Static (SVC)*. Kebayoran Baru Jakarta Selatan.
- Marsudi, Djiteng. (1990). *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Balai Penerbit & Humas  
ISTN.
- Sukmadjaja, Maula. 2008. *Perhitungan Profil Tegangan Pada Sistem Distribusi Menggunakan Matrix Admitansi dan Matrix Impedansi Bus*. JETri. Volume 7. Nomor 2.
- Manju, P., & Subbiah, V. (2013). *Static VAR Compensator: Effect of Fuzzy Controller*. International Journal of Electrical Engineering, 189-196.
- Hidayat, Faza Azmi. (2017). *Perbaikan Profil Tegangan Pada Sistem Penyulang Pujon GI Sengkaling Dengan Static VAR Compensator (SVC)*. Skripsi. Malang: Universitas Brawijaya.
- Abdurrohim, Mohammad Salman. *Strategi Operasi Islanding Sistem Distribusi Dengan Hybrid Pembangkit Tersebar Mikrohidro Dan Surya Pada Penyulang Pujon*. Skripsi. Malang: Universitas Brawijaya.
- Dhuha, Syamsu. (2017). *Kajian Peningkatan Keandalan Sistem Distribusi dengan Relokasi Sectionalizer pada Penyulang Pujon dengan Pembangkit Terdistribusi*. Skripsi. Malang: Universitas Brawijaya.





# LAMPIRAN



Lampiran 1 Profil Tegangan Pada Sistem 20 kV Dalam Kondisi Eksisting

BUS ID	Tegangan kondisi eksisting	
	pu	kV
1	1	20
2	0,9851	19,7
3	0,9319	18,64
4	0,9318	18,64
5	0,9318	18,64
6	0,9271	18,54
7	0,927	18,54
8	0,9246	18,49
9	0,9217	18,43
10	0,9216	18,43
11	0,9169	18,34
12	0,9106	18,21
13	0,9106	18,21
14	0,9105	18,21
15	0,9104	18,21
16	0,9104	18,21
17	0,9105	18,21
18	0,9105	18,21
19	0,9104	18,21
20	0,9104	18,21
21	0,9101	18,2
22	0,9101	18,2
23	0,91	18,2
24	0,9099	18,2
25	0,9097	18,19
26	0,9093	18,19
27	0,9092	18,18
28	0,9091	18,18
29	0,9091	18,18
30	0,9091	18,18
31	0,909	18,18
32	0,9093	18,19
33	0,9092	18,18
34	0,9072	18,14
35	0,9047	18,09
36	0,9047	18,09
37	0,9047	18,09
38	0,9047	18,09
39	0,903	18,06
40	0,8987	17,98





41	0,8987	17,98
42	0,8978	17,96
43	0,8965	17,94
44	0,8965	17,93
45	0,8961	17,93
46	0,8955	17,91
47	0,8951	17,91
48	0,8941	17,89
49	0,8938	17,88
50	0,8936	17,88
51	0,8932	17,87
52	0,8932	17,87
53	0,8932	17,87
54	0,8931	17,87
55	0,8931	17,87
56	0,8928	17,86
57	0,8925	17,85
58	0,8916	17,84
59	0,8914	17,83
60	0,8911	17,83
61	0,8908	17,82
62	0,8905	17,82
63	0,8904	17,81
64	0,8904	17,81
65	0,8907	17,82
66	0,8907	17,82
67	0,8959	17,92
68	0,8953	17,91
69	0,8952	17,91
70	0,8951	17,91
71	0,8949	17,9
72	0,8949	17,9
73	0,8949	17,9
74	0,8949	17,9
75	0,895	17,9
76	0,8947	17,9
77	0,8918	17,84
78	0,8901	17,81
79	0,89	17,8
80	0,8899	17,8
81	0,8898	17,8
82	0,8894	17,79
83	0,889	17,78
84	0,8884	17,77
85	0,8878	17,76

86	0,8877	17,76
87	0,8875	17,75
88	0,8875	17,75
89	0,8875	17,75
90	0,8874	17,75
91	0,8874	17,75
92	0,8872	17,75
93	0,8871	17,75
94	0,887	17,74
95	0,889	17,78
96	0,8889	17,78
97	0,8889	17,78
98	0,8889	17,78
99	0,8889	17,78
100	0,8888	17,78
101	0,8883	17,77
102	0,8883	17,77
103	0,8879	17,76
104	0,8878	17,76
105	0,8878	17,76
106	0,8877	17,76
107	0,8872	17,75
108	0,8871	17,75
109	0,8871	17,75
110	0,887	17,74
111	0,8869	17,74
112	0,8868	17,74
113	0,8868	17,74
114	0,8868	17,74
115	0,8868	17,74
116	0,8868	17,74
117	0,8879	17,76
118	0,8879	17,76

Lampiran 2 Nilai Tegangan, Daya Aktif, dan Daya Reaktif Tiap Bus Simulasi Kondisi 1 (Eksisting)

Bus ID	Voltage (p.u.)	MW Loading	MVAR Loading
BUS1	1	4,322	2,666
BUS2	0,9851	4,26	2,624
BUS3	0,9319	4,038	2,474
BUS4	0,9318	0,09	0,0556
BUS5	0,9318	0,062	0,0384
BUS6	0,9271	3,929	2,405



Bus ID	Voltage (p.u.)	MW Loading	MVAR Loading
BUS7	0,927	0,061	0,038
BUS8	0,9246	3,858	2,36
BUS9	0,9217	3,846	2,353
BUS10	0,9216	0,121	0,0752
BUS11	0,9169	3,706	2,265
BUS12	0,9106	3,608	2,203
BUS13	0,9106	0,173	0,106
BUS14	0,9105	0,173	0,106
BUS15	0,9104	0,14	0,0865
BUS16	0,9104	0	0
BUS17	0,9105	0,42	0,257
BUS18	0,9105	0,42	0,257
BUS19	0,9104	0,358	0,219
BUS20	0,9104	0,07	0,0432
BUS21	0,9101	0,289	0,177
BUS22	0,9101	0,12	0,0742
BUS23	0,91	0,169	0,103
BUS24	0,9099	0,169	0,104
BUS25	0,9097	0,11	0,068
BUS26	0,9093	3,012	1,836
BUS27	0,9092	0,277	0,17
BUS28	0,9091	0,143	0,0884
BUS29	0,9091	0,134	0,0825
BUS30	0,9091	0,027	0,0167
BUS31	0,909	0,023	0,0139
BUS32	0,9093	0,047	0,0289
BUS33	0,9092	0,047	0,0292
BUS34	0,9072	2,682	1,633
BUS35	0,9047	2,676	1,627
BUS36	0,9047	0,063	0,0391
BUS37	0,9047	0,012	0,0073
BUS38	0,9047	0,004	0,0026
BUS39	0,903	2,604	1,583
BUS40	0,8987	2,503	1,518
BUS41	0,8987	0,052	0,0319
BUS42	0,8976	2,449	1,484
BUS43	0,8965	2,447	1,481
BUS44	0,8965	0,054	0,0334
BUS45	0,8961	0,666	0,399
BUS46	0,8955	0,666	0,399
BUS47	0,8951	0,586	0,35



<b>Bus ID</b>	<b>Voltage (p.u.)</b>	<b>MW Loading</b>	<b>MVAR Loading</b>
BUS48	0,8941	0,517	0,308
BUS49	0,8938	0,451	0,268
BUS50	0,8936	0,451	0,268
BUS51	0,8932	0,424	0,251
BUS52	0,8932	0,04	0,0248
BUS53	0,8932	0,008	0,005
BUS54	0,8931	0,375	0,223
BUS55	0,8931	0,018	0,0109
BUS56	0,8928	0,358	0,212
BUS57	0,8925	0,336	0,199
BUS58	0,8916	0,248	0,146
BUS59	0,8914	0,216	0,127
BUS60	0,8911	0,216	0,128
BUS61	0,8908	0,144	0,0841
BUS62	0,8905	0,094	0,0564
BUS63	0,8904	0,051	0,0309
BUS64	0,8904	0,034	0,0209
BUS65	0,8907	0,049	0,0296
BUS66	0,8907	0,013	0,0079
BUS67	0,8959	1,725	1,049
BUS68	0,8953	1,675	1,017
BUS69	0,8952	0,138	0,083
BUS70	0,8951	0,138	0,0832
BUS71	0,8949	0,101	0,0618
BUS72	0,8949	0,02	0,0121
BUS73	0,8949	0,02	0,0122
BUS74	0,8949	0	0
BUS75	0,895	1,537	0,934
BUS76	0,8947	1,536	0,934
BUS77	0,8918	1,488	0,903
BUS78	0,8901	1,409	0,854
BUS79	0,89	1,285	0,777
BUS80	0,8899	1,285	0,777
BUS81	0,8898	0,089	0,0551
BUS82	0,8894	1,195	0,722
BUS83	0,889	1,15	0,694
BUS84	0,8884	0,365	0,22
BUS85	0,8878	0,365	0,22
BUS86	0,8877	0,063	0,039
BUS87	0,8875	0,302	0,182
BUS88	0,8875	0,005	0,0029



Bus ID	Voltage (p.u.)	MW Loading	MVAR Loading
BUS89	0,8875	0,297	0,181
BUS90	0,8874	0,19	0,115
BUS91	0,8874	0,19	0,115
BUS92	0,8872	0,132	0,0805
BUS93	0,8871	0,11	0,0678
BUS94	0,887	0,067	0,0414
BUS95	0,889	0,785	0,475
BUS96	0,8889	0,067	0,0416
BUS97	0,8889	0,717	0,434
BUS98	0,8889	0,085	0,0525
BUS99	0,8889	0,633	0,381
BUS100	0,8888	0,633	0,381
BUS101	0,8883	0,522	0,313
BUS102	0,8883	0,444	0,265
BUS103	0,8879	0,444	0,266
BUS104	0,8878	0,387	0,233
BUS105	0,8878	0,016	0,01
BUS106	0,8877	0,371	0,223
BUS107	0,8872	0,33	0,199
BUS108	0,8871	0,281	0,169
BUS109	0,8871	0,281	0,169
BUS110	0,887	0,199	0,118
BUS111	0,8869	0,154	0,091
BUS112	0,8868	0,154	0,0915
BUS113	0,8868	0,113	0,0664
BUS114	0,8868	0,012	0,0075
BUS115	0,8868	0,101	0,0618
BUS116	0,8868	0,073	0,0452
BUS117	0,8879	0,057	0,0335
BUS118	0,8879	0,023	0,0141

Lampiran 3 Profil Tegangan Pada Sistem 20 kV Dalam Kondisi Injeksi PLTMH

Bus ID	Tegangan Eksisting dengan Injeksi PLTMH	
	pu	kV
1	1	20
2	0,9852	19,7
3	0,932	18,64
4	0,932	18,64
5	0,9319	18,64
6	0,9272	18,54



7	0,9272	18,54
8	0,9248	18,49
9	0,9219	18,43
10	0,9218	18,43
11	0,9171	18,34
12	0,9108	18,21
13	0,9108	18,21
14	0,9108	18,21
15	0,9107	18,21
16	0,9107	18,21
17	0,9108	18,21
18	0,9107	18,21
19	0,9106	18,21
20	0,9106	18,21
21	0,9103	18,2
22	0,9103	18,2
23	0,9102	18,2
24	0,9101	18,2
25	0,91	18,19
26	0,9096	18,19
27	0,9094	18,18
28	0,9093	18,18
29	0,9093	18,18
30	0,9093	18,18
31	0,9093	18,18
32	0,9095	18,19
33	0,9095	18,18
34	0,9074	18,14
35	0,905	18,09
36	0,9049	18,09
37	0,9049	18,09
38	0,9049	18,1
39	0,9032	18,06
40	0,8989	17,98
41	0,8989	17,98
42	0,8978	17,96
43	0,8968	17,94
44	0,8967	17,93
45	0,8964	17,93
46	0,8957	17,91
47	0,8953	17,91
48	0,8943	17,89
49	0,8941	17,88
50	0,8938	17,88
51	0,8935	17,87



52	0,8935	17,87
53	0,8935	17,87
54	0,8934	17,87
55	0,8934	17,87
56	0,8931	17,86
57	0,8927	17,85
58	0,8919	17,84
59	0,8917	17,83
60	0,8914	17,83
61	0,8911	17,82
62	0,8908	17,82
63	0,8907	17,81
64	0,8904	17,81
65	0,891	17,82
66	0,891	17,82
67	0,8961	17,92
68	0,8955	17,91
69	0,8954	17,91
70	0,8953	17,91
71	0,8952	17,9
72	0,8951	17,9
73	0,8951	17,9
74	0,8951	17,9
75	0,8952	17,9
76	0,8949	17,9
77	0,8921	17,84
78	0,8903	17,81
79	0,8902	17,8
80	0,8901	17,8
81	0,89	17,8
82	0,8896	17,79
83	0,8892	17,78
84	0,8886	17,77
85	0,888	17,76
86	0,8879	17,76
87	0,8877	17,75
88	0,8877	17,75
89	0,8877	17,75
90	0,8876	17,75
91	0,8876	17,75
92	0,8874	17,75
93	0,8873	17,75
94	0,8872	17,74
95	0,8892	17,78
96	0,8892	17,78

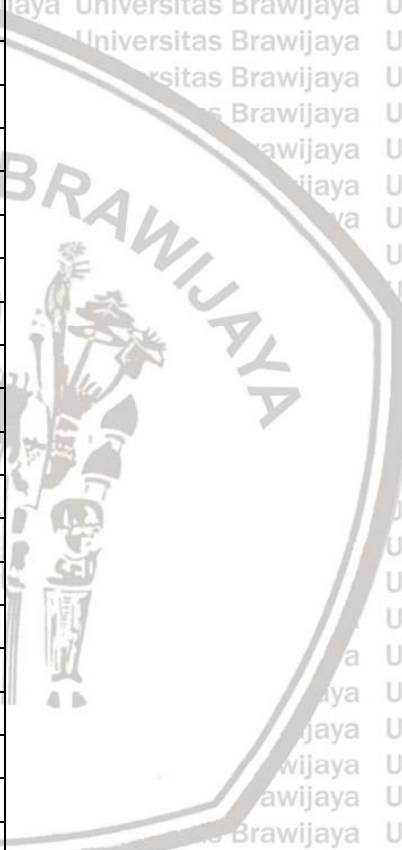
97	0,8891	17,78
98	0,8891	17,78
99	0,8891	17,78
100	0,889	17,78
101	0,8885	17,77
102	0,8885	17,77
103	0,8881	17,76
104	0,888	17,76
105	0,888	17,76
106	0,8879	17,76
107	0,8874	17,75
108	0,8874	17,75
109	0,8873	17,75
110	0,8872	17,74
111	0,8871	17,74
112	0,887	17,74
113	0,887	17,74
114	0,887	17,74
115	0,887	17,74
116	0,887	17,74
117	0,8881	17,76
118	0,8881	17,76
119	0,8935	0,34

Lampiran 4 Nilai Tegangan, Daya Aktif, dan Daya Reaktif Tiap Bus Simulasi Kondisi injeksi PLTMH

Bus ID	Voltage (p.u.)	MW Loading	MVAR Loading
BUS1	1	4,313	2,656
BUS2	0,9852	4,252	2,615
BUS3	0,932	4,031	2,465
BUS4	0,932	0,0901	0,0557
BUS5	0,9319	0,062	0,0384
BUS6	0,9272	3,922	2,396
BUS7	0,9272	0,0614	0,038
BUS8	0,9248	3,851	2,352
BUS9	0,9219	3,839	2,344
BUS10	0,9218	0,121	0,0752
BUS11	0,9171	3,699	2,257
BUS12	0,9108	3,601	2,194
BUS13	0,9108	0,173	0,106
BUS14	0,9108	0,173	0,107
BUS15	0,9107	0,14	0,0865

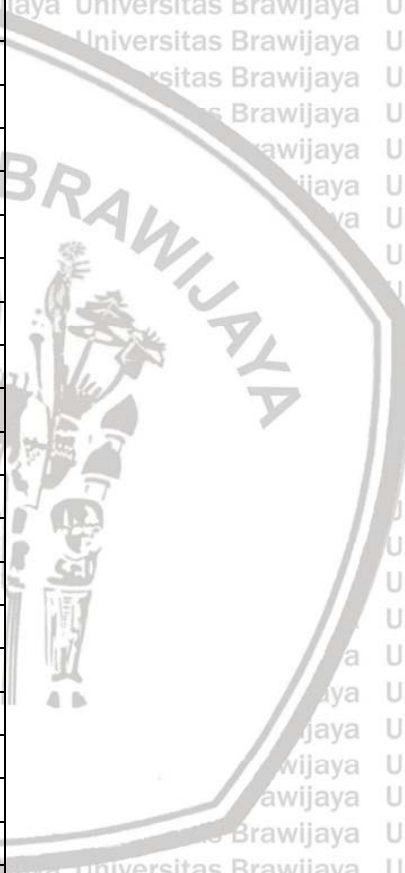


Bus ID	Voltage (p.u.)	MW Loading	MVAR Loading
BUS16	0,9107	0	0
BUS17	0,9108	0,42	0,257
BUS18	0,9107	0,42	0,257
BUS19	0,9106	0,359	0,22
BUS20	0,9106	0,0698	0,0432
BUS21	0,9103	0,289	0,177
BUS22	0,9103	0,12	0,0742
BUS23	0,9102	0,169	0,103
BUS24	0,9101	0,169	0,104
BUS25	0,91	0,11	0,068
BUS26	0,9096	3,005	1,827
BUS27	0,9094	0,277	0,17
BUS28	0,9093	0,143	0,0884
BUS29	0,9093	0,134	0,0825
BUS30	0,9093	0,0274	0,0167
BUS31	0,9093	0,0225	0,0139
BUS32	0,9095	0,0471	0,0289
BUS33	0,9095	0,0471	0,0292
BUS34	0,9074	2,675	1,624
BUS35	0,905	2,669	1,619
BUS36	0,9049	0,0633	0,0391
BUS37	0,9049	0,0118	0,0073
BUS38	0,905	0,0042	0,0026
BUS39	0,9033	2,597	1,574
BUS40	0,899	2,496	1,509
BUS41	0,8989	0,0515	0,0319
BUS42	0,8979	2,442	1,475
BUS43	0,8968	2,44	1,473
BUS44	0,8968	0,054	0,0335
BUS45	0,8964	0,658	0,39
BUS46	0,8958	0,657	0,39
BUS47	0,8954	0,577	0,341
BUS48	0,8944	0,509	0,299
BUS49	0,8942	0,443	0,258
BUS50	0,8939	0,443	0,258
BUS51	0,8936	0,415	0,242
BUS52	0,8936	0,04	0,0248
BUS53	0,8936	0,0081	0,005
BUS54	0,8935	0,367	0,213
BUS55	0,8935	0,0176	0,0109
BUS56	0,8932	0,349	0,203





Bus ID	Voltage (p.u.)	MW Loading	MVAR Loading
BUS57	0,8928	0,336	0,199
BUS58	0,892	0,248	0,146
BUS59	0,8918	0,216	0,127
BUS60	0,8915	0,216	0,128
BUS61	0,8912	0,144	0,0842
BUS62	0,8909	0,0944	0,0564
BUS63	0,8908	0,0513	0,031
BUS64	0,8907	0,0337	0,0209
BUS65	0,8911	0,0493	0,0296
BUS66	0,8911	0,0128	0,0079
BUS67	0,8961	1,726	1,049
BUS68	0,8956	1,676	1,018
BUS69	0,8955	0,138	0,083
BUS70	0,8954	0,138	0,0833
BUS71	0,8952	0,102	0,0618
BUS72	0,8952	0,0198	0,0121
BUS73	0,8952	0,0198	0,0122
BUS74	0,8952	0	0
BUS75	0,8953	1,538	0,935
BUS76	0,895	1,537	0,934
BUS77	0,8921	1,489	0,904
BUS78	0,8904	1,41	0,855
BUS79	0,8903	1,286	0,778
BUS80	0,8901	1,286	0,778
BUS81	0,8901	0,0889	0,0551
BUS82	0,8896	1,196	0,723
BUS83	0,8893	1,151	0,695
BUS84	0,8887	0,365	0,22
BUS85	0,8881	0,365	0,22
BUS86	0,888	0,063	0,039
BUS87	0,8878	0,302	0,182
BUS88	0,8878	0,0047	0,0029
BUS89	0,8878	0,297	0,181
BUS90	0,8877	0,19	0,115
BUS91	0,8877	0,19	0,115
BUS92	0,8875	0,133	0,0805
BUS93	0,8874	0,11	0,0678
BUS94	0,8873	0,0669	0,0415
BUS95	0,8893	0,785	0,475
BUS96	0,8892	0,0672	0,0417
BUS97	0,8892	0,718	0,434





Bus ID	Voltage (p.u.)	MW Loading	MVAR Loading
BUS98	0,8892	0,0847	0,0525
BUS99	0,8891	0,633	0,382
BUS100	0,8891	0,633	0,382
BUS101	0,8886	0,522	0,313
BUS102	0,8885	0,444	0,265
BUS103	0,8882	0,444	0,266
BUS104	0,8881	0,387	0,233
BUS105	0,8881	0,0161	0,01
BUS106	0,888	0,371	0,223
BUS107	0,8875	0,331	0,199
BUS108	0,8874	0,281	0,169
BUS109	0,8874	0,281	0,169
BUS110	0,8873	0,199	0,118
BUS111	0,8872	0,154	0,091
BUS112	0,8871	0,154	0,0916
BUS113	0,8871	0,113	0,0664
BUS114	0,8871	0,012	0,0075
BUS115	0,8871	0,101	0,0618
BUS116	0,887	0,0729	0,0452
BUS117	0,8882	0,057	0,0335
BUS118	0,8881	0,0228	0,0141
BUS119	0,8935	0,0087	0,0042

Lampiran 5 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Aktif dan Daya Reaktif Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

Bus ID	Tegangan Eksisting dengan Injeksi PLTMH		Tegangan sesudah pemasangan SVC	
	pu	kV	pu	kV
1	1	20	1	20
2	0,9852	19,7	0,986	19,72
3	0,932	18,64	0,9363	18,71
4	0,932	18,64	0,9363	18,73
5	0,9319	18,64	0,9363	18,72
6	0,9272	18,54	0,932	18,64
7	0,9272	18,54	0,9319	18,64
8	0,9248	18,49	0,9297	18,59
9	0,9219	18,43	0,9271	18,54
10	0,9218	18,43	0,927	18,54
11	0,9171	18,34	0,9228	18,46
12	0,9108	18,21	0,9172	18,34
13	0,9108	18,21	0,9172	18,34
14	0,9108	18,21	0,9172	18,34

15	0,9107	18,21	0,9172	18,34
16	0,9107	18,21	0,9172	18,34
17	0,9108	18,21	0,9172	18,34
18	0,9107	18,21	0,9171	18,34
19	0,9106	18,21	0,917	18,34
20	0,9106	18,21	0,917	18,34
21	0,9103	18,2	0,9166	18,33
22	0,9103	18,2	0,9166	18,33
23	0,9102	18,2	0,9165	18,33
24	0,9101	18,2	0,9164	18,33
25	0,91	18,19	0,9162	18,22
26	0,9096	18,19	0,9164	18,33
27	0,9094	18,18	0,9161	18,32
28	0,9093	18,18	0,9161	18,32
29	0,9093	18,18	0,916	18,32
30	0,9093	18,18	0,916	18,32
31	0,9093	18,18	0,916	18,32
32	0,9095	18,19	0,9163	18,33
33	0,9095	18,18	0,9163	18,33
34	0,9074	18,14	0,915	18,3
35	0,905	18,09	0,9135	18,27
36	0,9049	18,09	0,9143	18,27
37	0,9049	18,09	0,9143	18,27
38	0,9049	18,1	0,9135	18,27
39	0,9032	18,06	0,9125	18,25
40	0,8989	17,98	0,91	18,2
41	0,8989	17,98	0,9099	18,18
42	0,8978	17,96	0,9094	18,19
43	0,8968	17,94	0,9088	18,18
44	0,8967	17,93	0,9087	18,17
45	0,8964	17,93	0,9083	18,17
46	0,8957	17,91	0,9075	18,15
47	0,8953	17,91	0,907	18,14
48	0,8943	17,89	0,9057	18,11
49	0,8941	17,88	0,9054	18,11
50	0,8938	17,88	0,9051	18,1
51	0,8935	17,87	0,9046	18,09
52	0,8935	17,87	0,9046	18,09
53	0,8935	17,87	0,9046	18,09
54	0,8934	17,87	0,9045	18,09
55	0,8934	17,87	0,9045	18,09
56	0,8931	17,86	0,9041	18,08
57	0,8927	17,85	0,9037	18,07
58	0,8919	17,84	0,9026	18,05
59	0,8917	17,83	0,9023	18,05





60	0,8914	17,83	0,902	18,04
61	0,8911	17,82	0,9016	18,03
62	0,8908	17,82	0,9012	18,02
63	0,8907	17,81	0,9011	18,02
64	0,8904	17,81	0,901	18,02
65	0,891	17,82	0,9015	18,03
66	0,891	17,82	0,9015	18,03
67	0,8961	17,92	0,9086	18,17
68	0,8955	17,91	0,9085	18,17
69	0,8954	17,91	0,9083	18,17
70	0,8953	17,91	0,9082	18,16
71	0,8952	17,9	0,908	18,16
72	0,8951	17,9	0,908	18,16
73	0,8951	17,9	0,9079	18,16
74	0,8951	17,9	0,908	18,16
75	0,8952	17,9	0,9084	18,17
76	0,8949	17,9	0,9084	18,17
77	0,8921	17,84	0,9081	18,16
78	0,8903	17,81	0,908	18,16
79	0,8902	17,8	0,9081	18,16
80	0,8901	17,8	0,9081	18,16
81	0,89	17,8	0,908	18,16
82	0,8896	17,79	0,9082	18,16
83	0,8892	17,78	0,9083	18,17
84	0,8886	17,77	0,9088	18,18
85	0,888	17,76	0,9094	18,19
86	0,8879	17,76	0,9093	18,19
87	0,8877	17,75	0,9097	18,19
88	0,8877	17,75	0,9097	18,19
89	0,8877	17,75	0,9098	18,2
90	0,8876	17,75	0,9101	18,2
91	0,8876	17,75	0,9104	18,21
92	0,8874	17,75	0,9115	18,23
93	0,8873	17,75	0,9113	18,23
94	0,8872	17,74	0,9113	18,23
95	0,8892	17,78	0,9083	18,17
96	0,8892	17,78	0,9083	18,17
97	0,8891	17,78	0,9083	18,17
98	0,8891	17,78	0,9083	18,17
99	0,8891	17,78	0,9084	18,17
100	0,889	17,78	0,9085	18,17
101	0,8885	17,77	0,9091	18,18
102	0,8885	17,77	0,9093	18,19
103	0,8881	17,76	0,91	18,2
104	0,888	17,76	0,9102	18,2



105	0,888	17,76	0,9102	18,2
106	0,8879	17,76	0,9105	18,21
107	0,8874	17,75	0,9121	18,24
108	0,8874	17,75	0,912	18,24
109	0,8873	17,75	0,9119	18,24
110	0,8872	17,74	0,9118	18,24
111	0,8871	17,74	0,9117	18,23
112	0,887	17,74	0,9116	18,23
113	0,887	17,74	0,9116	18,23
114	0,887	17,74	0,9115	18,23
115	0,887	17,74	0,9115	18,23
116	0,887	17,74	0,9115	18,23
117	0,8881	17,76	0,91	18,2
118	0,8881	17,76	0,9099	18,2
119	0,8935	0,34	0,9044	0,344

Lampiran 6 Tabel rugi-rugi daya aktif dan reaktif sebelum dan sesudah pemasangan SVC

No	BUS		Rugi-rugi daya aktif (kW)		Rugi-rugi daya reaktif (kVAR)	
	dari	ke	tanpa SVC	dengan SVC	tanpa SVC	dengan SVC
1	BUS1	BUS2	61,43	49,2	41,65	33
2	BUS2	BUS3	220,4	176,3	150	118,5
3	BUS3	BUS4	0,006	0	-0,3	-0,3
4	BUS4	BUS5	0,0014	0	-0,148	-0,2
5	BUS3	BUS6	19,38	15,5	13,18	10,4
6	BUS6	BUS7	0,0012	0	-0,1	-0,1
7	BUS6	BUS8	9,79	7,8	6,66	5,3
8	BUS8	BUS9	11,6	9,3	7,88	6,2
9	BUS9	BUS10	0,0126	0	-0,339	-0,4
10	BUS9	BUS11	18,47	14,8	12,53	9,9
11	BUS11	BUS12	23,85	19,2	16,16	12,8
12	BUS12	BUS13	0,0054	0	-0,1	-0,1
13	BUS13	BUS14	0,0039	0	-0,1	-0,1
14	BUS14	BUS15	0,0122	0	-0,342	-0,4
15	BUS15	BUS16	0	0	-0,152	-0,2
16	BUS17	BUS12	0,0179	0	-0,1	-0,1
17	BUS18	BUS17	0,0179	0	0	0
18	BUS19	BUS18	0,0368	0	-0,1	-0,1
19	BUS20	BUS19	0,0014	0	-0,161	-0,2
20	BUS21	BUS19	0,1	0,1	-0,471	-0,5
21	BUS22	BUS21	0	0	-0,2	-0,2
22	BUS23	BUS21	0	0	-0,3	-0,3
23	BUS24	BUS23	0	0	-0,3	-0,3
24	BUS25	BUS24	0	0	-1,1	-1,2



25	BUS12	BUS26	3,5	3	3,2	2,6
26	BUS26	BUS27	0	0,1	-0,3	-0,3
27	BUS28	BUS27	0	0	-0,2	-0,2
28	BUS27	BUS29	0	0	-0,3	-0,3
29	BUS29	BUS30	0	0	-0,4	-0,5
30	BUS30	BUS31	0	0	-0,2	-0,3
31	BUS32	BUS26	0	0	-0,8	-0,8
32	BUS32	BUS33	0	0	-0,3	-0,3
33	BUS34	BUS26	5,5	4,8	4,9	4,2
34	BUS34	BUS35	6,2	5,4	5,5	4,7
35	BUS35	BUS36	0	0	-0,6	-0,6
36	BUS36	BUS37	0	0	-0,1	-0,1
37	BUS38	BUS35	0	0	-0,4	-0,4
38	BUS35	BUS39	4,3	3,8	3,8	3,3
39	BUS40	BUS39	10,3	9,3	9,1	8,1
40	BUS41	BUS40	0	0	-0,3	-0,3
41	BUS40	BUS42	2,5	2,3	2,2	2
42	BUS42	BUS43	2,5	2,3	2,2	2
43	BUS43	BUS44	0	0	-0,5	-0,5
44	BUS43	BUS45	0,2	0,3	-0,1	-0,1
45	BUS45	BUS46	0,4	0,4	-0,1	-0,1
46	BUS46	BUS47	0,2	0,2	-0,1	-0,2
47	BUS47	BUS48	0,5	0,5	-0,5	-0,6
48	BUS48	BUS49	0,1	0,1	-0,2	-0,2
49	BUS49	BUS50	0,1	0,1	-0,2	-0,2
50	BUS50	BUS51	0,1	0,1	-0,3	-0,3
51	BUS52	BUS51	0	0	-0,5	-0,5
52	BUS51	BUS53	0	0	-0,8	-0,9
53	BUS51	BUS54	0	0	-0,1	-0,1
54	BUS54	BUS55	0	0	-0,1	-0,2
55	BUS54	BUS56	0,1	0,1	-0,4	-0,4
56	BUS56	BUS57	0,1	0,1	-0,4	-0,4
57	BUS57	BUS58	0,2	0,2	-1,6	-1,7
58	BUS58	BUS59	0	0,1	-0,5	-0,5
59	BUS59	BUS60	0	0	-0,5	-0,5
60	BUS60	BUS61	0	0,1	-1,2	-1,3
61	BUS62	BUS61	0	0	-1,3	-1,4
62	BUS63	BUS62	0	0	-1,3	-1,4
63	BUS64	BUS63	0	0	-0,6	-0,8
64	BUS65	BUS61	0	0	-0,5	-0,5
65	BUS65	BUS66	0	0	-0,9	-1
66	BUS43	BUS67	1,1	1,5	0,9	1,2
67	BUS67	BUS68	0,8	1,1	0,7	0,9
68	BUS69	BUS68	0	0	-0,4	-0,4
69	BUS70	BUS69	0	0	-0,3	-0,3



70	BUS71	BUS70	0	0	-0,9	-1
71	BUS72	BUS71	0	0	-0,8	-0,8
72	BUS72	BUS73	0	0	-0,1	-0,2
73	BUS72	BUS74	0	0	-0,2	-0,2
74	BUS68	BUS75	0,4	0,7	0,3	0,5
75	BUS75	BUS76	0,4	0,7	0,3	0,5
76	BUS76	BUS77	4,2	6,6	3	5,4
77	BUS77	BUS78	2,3	4	1,6	3,3
78	BUS78	BUS79	0,2	0,3	0,1	0,3
79	BUS79	BUS80	0,2	0,3	0,1	0,3
80	BUS80	BUS81	0	0	-0,3	-0,3
81	BUS80	BUS82	0,6	1,4	0,4	1,1
82	BUS82	BUS83	0,4	0,9	0,2	0,7
83	BUS84	BUS83	0,2	1,1	-0,6	0,1
84	BUS85	BUS84	0,2	1,1	-0,6	0,1
85	BUS85	BUS86	0	0	-0,4	-0,4
86	BUS87	BUS85	0,1	0,5	-0,3	0,1
87	BUS88	BUS87	0	0	-1,9	-2,1
88	BUS87	BUS89	0	0,1	-0,1	0
89	BUS89	BUS90	0	0,2	-0,2	0
90	BUS90	BUS91	0	0,2	-0,2	0
91	BUS91	BUS92	0	0,6	-1	0,2
92	BUS92	BUS93	0	0	-1	-1,1
93	BUS94	BUS93	0	0	-6	0,7
94	BUS83	BUS95	0	0,1	0	0
95	BUS95	BUS96	0	0	-0,3	-0,3
96	BUS95	BUS97	0	0	0	0
97	BUS98	BUS97	0	0	-0,1	-0,1
98	BUS97	BUS99	0	0,1	0	0,1
99	BUS99	BUS100	0	0,1	0	0,1
100	BUS100	BUS101	0,2	0,6	-0,4	0,4
101	BUS101	BUS102	0	0,1	-0,1	0,1
102	BUS102	BUS103	0	0,6	-0,5	0,4
103	BUS103	BUS104	0	0,2	-0,2	0,1
104	BUS104	BUS105	0	0	-0,2	-0,2
105	BUS106	BUS104	0	0,2	-0,2	0,1
106	BUS107	BUS106	0,1	1,2	-1,1	0,9
107	BUS108	BUS107	0	0	-0,1	-0,2
108	BUS109	BUS108	0	0	-0,1	-0,3
109	BUS110	BUS109	0	0	-0,3	-0,3
110	BUS111	BUS110	0	0	-0,5	-0,6
111	BUS112	BUS111	0	0	-0,5	-0,6
112	BUS112	BUS113	0	0	-0,1	-0,2
113	BUS114	BUS113	0	0	-2,7	-3
114	BUS113	BUS115	0	0	-0,2	-0,2



115	BUS115	BUS116	0	0	-0,8	-0,9
116	BUS103	BUS117	0	0	-0,6	-0,6
117	BUS117	BUS118	0	0	-1,8	-2
118	TPLTMH		0	0	0	0
<b>Total</b>			<b>414,7</b>	<b>350,7</b>	<b>244,6</b>	<b>201</b>

