

PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN PADA SISTEM PENYULANG PUJON GI SENGKALING DENGAN *STATIC VAR COMPENSATOR (SVC)*

Faza Azmi Hidayat.¹, Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D.², Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, ^{2,3}Dosen Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail : fazaazmi26@yahoo.com

Abstract-The load growth over the time is increasing, should be followed by enough and reliable supply of electrical power. The distribution of electrical power is a problem that often appear, because the distance from the served load is spread, away from the plant and preference the medium voltage network load is inductive. To solve the problem of voltage drop and power losses at a feeder can be done with the installation of SVC (Static VAR Compensator). Static Var Compensator (SVC) is an tool that can be used to reduce power losses, improve power flow and increase the voltage of system. In this paper, the installation of SVC simulated using ETAP software. The Simulation of SVC installation at feeder Pujon have succeded to increase the voltage. With SVC capacity $Q = 1842$ kVAR installation at bus 46, the initial condition of feeder Pujon have 26 % bus from total 101 bus with voltage below 18 kV which lowest bus voltage is $V = 0,8942$ pu. After the simulation installation SVC at bus 46 done in ETAP software, the lowest bus voltage $V = 0,8942$ can increase becomes $V = 0,9102$ and power losses decrease from $P = 354,818$ kW dan $Q = 169,936$ kVAR becomes $P = 264,54$ kW dan $Q = 101,187$ kVAR.

Keywords: Voltage drop, power losses, SVC (Static VAR Compensator).

Abstrak-Pertumbuhan beban semakin lama semakin bertambah, harus diikuti dengan penyediaan daya listrik yang cukup dan handal. Pendistribusian daya listrik merupakan suatu permasalahan yang sering muncul, karena jarak dari beban yang dilayani tersebar, jauh dari pusat pembangkit dan kecenderungan jaringan tegangan menengah bebannya bersifat induktif. Untuk mengatasi masalah susut tegangan dan susut daya pada sebuah penyulang dapat dilakukan dengan pemasangan SVC (Static VAR Compensator). Static Var Compensator (SVC) adalah suatu peralatan yang dapat digunakan untuk mengurangi rugi-rugi daya, meningkatkan aliran daya dan meningkatkan profil tegangan sistem. Pada penulisan ini, pemasangan SVC pada penyulang Pujon akan disimulasikan dengan menggunakan software ETAP. Simulasi Pemasangan SVC pada penyulang Pujon berhasil menaikkan tegangan. Dengan kapasitas SVC sebesar $Q = 1842$ kVAR yang dipasang pada bus 46, penyulang Pujon yang awalnya terdapat sekitar 26 % dari total 101 bus dengan tegangan dibawah 18 kV dimana tegangan bus terendah adalah $V = 0,8942$ pu. Setelah dilakukan simulasi pemasangan SVC pada bus 46 menggunakan software ETAP, tegangan bus terendah $V = 0,8942$ pu menjadi $V = 0,9102$ pu dan rugi-rugi daya

menurun dari $P = 354,818$ kW dan $Q = 169,936$ kVAR menjadi $P = 264,54$ kW dan $Q = 101,187$ kVAR.

Kata kunci : Susut Tegangan, Susut daya, SVC (Static VAR Compensator).

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu energi yang sangat berpengaruh bagi kehidupan orang banyak. Diperlukan sebuah sistem tenaga listrik yang baik untuk dapat terus menjamin ketersediaan energi listrik. Sistem tenaga listrik adalah salah satu dari alat-alat untuk mengubah dan memindahkan energi yang mempunyai peranan penting dalam kehidupan manusia. Dalam penyediaan energi listrik tersebut harus dapat menjamin ketersediannya dalam jumlah yang cukup, kontinyu, harga yang wajar, dan memiliki kualitas yang baik [1].

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 [2].

Sistem yang tegangannya terletak antara 20 kV dan 500 kV sering memerlukan Reaktor pada saat beban rendah dan diperlukan Kapasitor statis pada saat beban tinggi. Variasi beban yang fluktuatif selama 24 jam, memerlukan pemasangan peralatan yang dapat menanggulangi permasalahan tersebut [3].

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

Jaringan distribusi mempunyai perantara yang penting dalam suatu sistem tenaga listrik. Jaringan distribusi berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari gardu - gardu induk ke pusat - pusat beban. Saluran distribusi yang panjang akan mengakibatkan penurunan kualitas daya yang terkirim. Rugi - rugi daya dan jatuh tegangan yang terjadi pada saluran distribusi menjadi penyebab penurunan kualitas daya yang diterima konsumen. Untuk itu perlu diketahui berapa besarnya rugi - rugi daya, dan jatuh tegangan yang terjadi pada saluran distribusi dengan mengambil objek kasus sistem distribusi penyulang Pujon. Dimana pesatnya pengembangan pariwisata

yang ada dikota batu serta pembangunan tempat hiburan,hotel,tempat makan dan perumahan baru yang tentunya akan menyebabkan pertumbuhan beban jatuh tegangan dan rugi-rugi daya.Dengan pengambilan data - data arus, tegangan dan daya yang terdapat pada penyulang Pujon maka dapat dilakukan perhitungan rugi - rugi daya,dan jatuh tegangan pada saluran 20 kV sistem distribusi tersebut.

Penyulang Pujon merupakan salah satu penulang terpanjang yang berada pada Rayon Sengkaling.Panjang saluran mencapai 62,865 km dengan beban total yang dipikul $I = 5,401$ MVA.Akibat dari panjangnya saluran,terjadi penurunan tegangan (drop voltage)diujung saluran,yaitu $V = 17,884$ kV(Data PT.PLN 2016).Penurunan tegangan tersebut dibawah tegangan standart yang ditetapkan IEEE 1159-1195 dan SPLN untuk variasi tegangan yang diperbolehkan yaitu sebesar $\pm 5\%$.

II. DASAR TEORI

A. Sistem Distribusi

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari Sumber daya listrik besar (Bulk Power Source) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah sebagai 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 [3]. Pada saluran transmisi (150 kV & 70 kV), tegangan diturunkan 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 V/380 V. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan [3].

Tegangan sistem distribusi dapat dikelompokkan menjadi 2 bagian besar, yaitu distribusi primer (20 kV) dan distribusi sekunder (380/220V). Jaringan distribusi 20 kV sering disebut Distribusi Tegangan Menengah dan jaringan distribusi 380/220V disebut jaringan distribusi sekunder atau Jaringan Tegangan Rendah 380/220V [3].

B. Static Var Compensator (SVC)

Static Var Compensator adalah sumber daya reaktif yang dapat diatur besarnya dan merupakan alat yang pengembangannya termasuk mutakhir. Generator dapat pula dipakai sebagai sumber daya reaktif dengan jalan mengatur

arus penguat medan magnetnya. Apabila hanya diperlukan daya reaktif saja untuk suatu simpul dalam sistem tenaga listrik, maka penggunaan generator sebagai sumber daya reaktif tidaklah ekonomis. Sebagai sumber daya reaktif dapat dipakai:

- Kondensator sinkron.
- Kondensator statis.
- Static Var Compensator*.

Dalam pengaturan daya reaktif kadang-kadang diperlukan pengambilan daya reaktif dalam sistem. Hal ini dapat dilakukan oleh Kondensator Sinkron dengan mengecilkan arus penguat medan magnetnya. Juga dapat dilakukan dengan *Static Var Compensator* dengan jalan mengatur penyalanya. Kondensator statis hanya dapat memberikan daya reaktif kedalam sistem. Alat statis yang mengambil daya reaktif adalah Reaktor, sehingga dalam praktek banyak dipakai Reaktor apabila diperlukan pengambilan daya reaktif. Makin tinggi tegangan sistem, makin banyak daya reaktif dihasilkan oleh sistem itu sendiri sebagai akibat besarnya nilai kapasitansi isolasi. Oleh karenanya pada sistem tegangan ekstra tinggi, misalnya sistem 500 kV seringkali dipakai Reaktor. Sebaliknya pada sistem tegangan menengah misalnya sistem 20 kV dan sistem tegangan rendah, sistem tidak menghasilkan cukup daya reaktif sebagai akibat dari kecilnya nilai kapasitansi isolasi, sehingga di sini diperlukan sumber daya reaktif. Untuk keperluan itu dapat dipakai Kapasitor Statis.

Pada sistem yang teganganya terletak antara 20 kV dan 500 kV sering diperlukan Reaktor pada saat beban rendah dan diperlukan Kapasitor Statis pada saat beban tinggi. Variasi beban ini bisa berlangsung dalam 24 jam, sehingga perlu dilakukan pemasukan dan pengeluaran Reaktor dan Kapasitor silih berganti dalam 24 jam. Secara operasional hal ini bisa merepotkan dan orang cenderung untuk dapat melakukannya secara otomatis. Untuk dapat melakukannya secara otomatis, sumber daya reaktif harus dapat diatur mulai dari mengambil sampai dengan memberikan daya reaktif ke dalam sistem. sumber daya reaktif yang memenuhi syarat ini hanyalah kondensator sinkron dan *Static Var Compensator*. Kondensator Sinkron, karena dimensinya yang relatif besar dan adanya bagian yang berputar sehingga harganya menjadi mahal praktis tidak dipakai lagi, yang banyak dikembangkan sebagai sumber daya reaktif yang variabel adalah *Static Var Compensator*.

SVC banyak digunakan pada sistem tenaga untuk menjaga stabilitas tegangan dan menaikkan faktor daya [4] dengan cara menginjeksikan dan menyerap daya reaktif yang dihubungkan secara paralel dengan sistem tenaga listrik (Manju & Subbiah, 2013:190). SVC terdiri dari TCR (*Thyristor Controlled Reactor*), TCS (*Thyristor Capasitor Switched*) dan filter yang berfungsi untuk mengatasi besarnya harmonisa yang dihasilkan oleh TCR [5].

C. Bagian-bagian SVC

SVC terdiri dari empat komponen yaitu:

a. Thyristor valve tower

Thyristor valve tower adalah bagian dari *TCR* yang berfungsi untuk mengatur sudut penyulutan ketika tegangan dari transmisinya berada pada besaran kontrolnya [6].

b. Reaktor

Reaktor dapat merupakan peralatan utama atau berupa 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*) dan lain-lain. 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 peluap kapasitor (*capacitor discharge reactor*), reaktor penyaring (*filter reactor*) dan lain-lain. Aplikasi pemasangan reaktor dalam sistem tenaga listrik pada prinsipnya untuk membentuk suatu reaktansi induktif dengan tujuan tertentu. Beberapa tujuan tersebut diantaranya adalah 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*, penyeimbang beban (*load balancing*) dan *power conditioning*. Untuk mempermudah identifikasi, pada umumnya penamaan reaktor disesuaikan dengan tujuan pemasangannya atau lokasi dimana peralatan tersebut terpasang [6].

c. Kapasitor

Bank kapasitor (*capacitor banks*) adalah peralatan yang digunakan untuk memperbaiki kualitas pasokan energi listrik antara lain memperbaiki mutu tegangan di sisi beban, memperbaiki faktor daya ($\cos \phi$) dan mengurangi

rugirugi transmisi. Kekurangan dari pemakaian bank kapasitor adalah menimbulkan harmonisa pada proses *switching* dan memerlukan desain khusus PMT atau *switching controller* [6].

d. Cooling System

Cooling system dibutuhkan untuk memindah panas dari *thyristor* dan resistor pada rangkaian RC. Setiap *thyristor* mempunyai *drop* tegangan, oleh karena 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*. Di *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 regular 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 pemuaian tank harus dikontrol [6].

III. Metode Penelitian

A. Software ETAP Power Station

ETAP singkatan dari “*Electric Transient Analysis Program*” adalah program aplikasi yang digunakan untuk melakukan pengujian dan analisis sistem tenaga listrik. Pengujian dan analisis sistem tenaga listrik yang dilakukan meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi. *ETAP* dapat membantu seorang *engineer* untuk memodelkan sistem tenaga listrik ke dalam bentuk diagram satu garis (*single line diagram*) untuk berbagai keperluan analisis, seperti *load flow analysis*, hubung singkat, pengasutan motor, harmonisa, stabilitas peralihan, koordinasi proteksi dsb. 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 dimana 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 merupakan *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 *off line* 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 sistem tenaga listrik baik di sisi konsumen industri maupun untuk menganalisa performa sistem di sisi *utility*. *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 [1].

ETAP Power Station juga 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: [1]

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

B. *Optimal Capacitor Placement (OCP)*

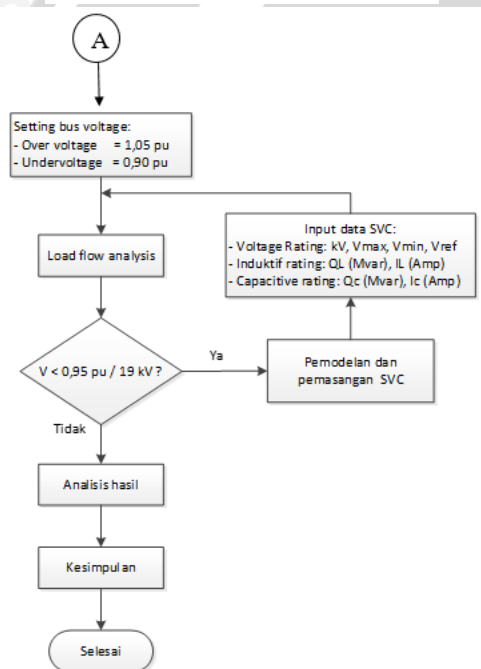
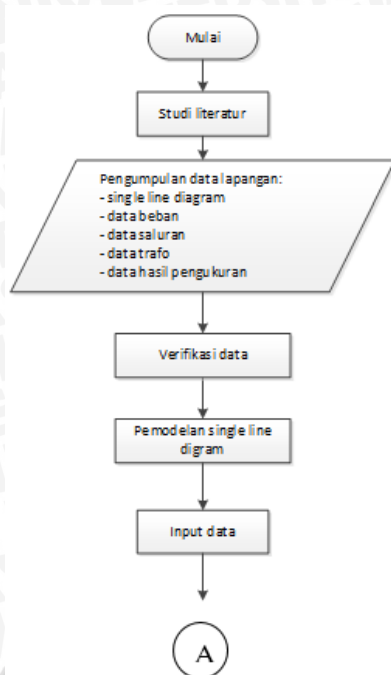
Optimal Capacitor Placement (OCP) adalah salah satu fitur yang terdapat didalam program *ETAP* yang digunakan

untuk mengoptimasi kapasitas kapasitor dan menentukan letak kapasitor yang nantinya akan dipasang pada bus yang kritis. *Optimal Capacitor Placement (OCP)* memakai metode Genetik Alogaritma, dimana teknik optimasi didasarkan teori seleksi alam .

C. Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara bertahap, alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1. 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.

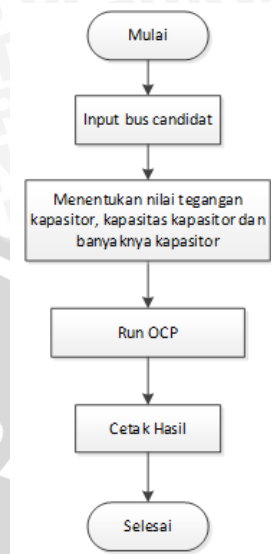
Pengumpulan data dilakukan di Gardu Induk Sengkaling dan Penyulang Pujon Rayon Sengkaling, data-data yang dikumpulkan berupa data *single line diagram*, data *power grid*, data trafo, data saluran (jenis kabel, panjang kabel, luas penampang), data beban, data pengukuran tegangan dan data pengukuran beban (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 ditetapkan yaitu tidak lebih dari 5 % dan 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 tagangan SVC, rating induktif (Q_L), rating kapasitif (Q_C) yang tepat untuk menanggulangi permasalahan tersebut menggunakan fasilitas *Optimal Capacitor Placement (OCP)* .



Gambar 3. 1 Alur penelitian

Gambar 3.2 menunjukkan alur untuk menentukan letak dan kapasitas SVC yang akan digunakan untuk memperbaiki profil tegangan. Dimulai dengan memasukkan 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. *Running OCP*, hasil *running OCP* akan

menampilkan nilai letak dan kapasitas SVC yang tepat untuk menanggulangi permasalahan penurunan tegangan.



Gambar 3. 2 Alur menentukan letak dan kapasitas SVC

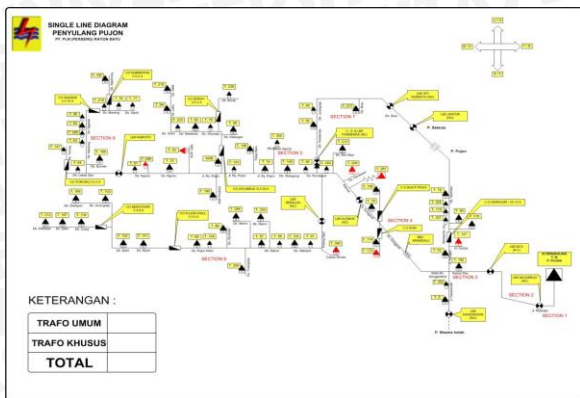
IV. HASIL DAN ANALISIS HASIL

A. Sistem Distribusi Tenaga Listrik 20kV GI Sengkaling Penyulang Pujon

Dalam perhitungan aliran daya (*loadflow*) data yang diambil dari GI Sengkaling Malang yang melayani 12 buah penyulang dengan 2 buah Trafo yang masing-masing 150/20kV-30MVA dan 150/20kV-60MVA, namun pada skripsi ini hanya menganalisa penyulang pujon saja.

Sistem distribusi radial penyulang pujon memakai tegangan 20kV dan daya 30MVA, untuk menyelesaikan perhitungan aliran daya (*loadflow*) terlebih dahulu menggambar single line diagram yang sudah ditetapkan sesuai dengan gambar 4.1 yang akan dianalisis.

Selanjutnya bus yang diklasifikasikan yaitu busbar GI sengkaling diasumsikan sebagai *slack bus*, sedangkan bus yang lain bus yang sepanjang saluran radial diasumsikan sebagai *load bus*. Dalam hal ini tidak ada bus generator karena sepanjang saluran tidak terdapat pembangkitan.



Gambar 4. 1 Single line diagram penyalang pujon

B. Data Panjang Saluran Penyulang Pujon

Penyalang Pujon memiliki potensi untuk jatuh tegangan karena memiliki saluran yang panjang dan pertumbuhan beban pada setiap tahunnya selalu meningkat. Saluran distribusi penyalang Pujon memiliki panjang total SUTM 62,865 kms dan merupakan saluran terpanjang yang berada di GI Sengkaling. Data jenis kabel dan panjang saluran didapatkan dari PLN Rayon Sengkaling.

Tabel 4. 1 Data Panjang Saluran

No	Bus		Panjang (ms)
	Dari	Ke	
1	1	2	580,3
2	2	3	1432,6
3	3	4	863,9
4	4	5	85,4
5	4	6	683,3
6	6	7	2082,8
7	7	8	154,4
8	8	9	414,5
9	9	10	896,5
10	10	11	463,5

Data panjang saluran penyalang ditunjukkan pada tabel 4.1 menggunakan tegangan 20 kV sebagai tegangan dasar dimana nantinya dibutuhkan untuk data input pada pemodelan *single line diagram* pada *software ETAP*.

C. Data Spesifikasi Saluran

Jaringan distribusi Penyalang Pujon menggunakan kabel saluran udara dengan spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 4. 2 Data Spesifikasi Kabel Saluran

Jenis Konduktor	Penampang nominal (mm ²)	Impedansi saluran (Ω/km)
AAAC	150	0.2162+j0.3305
AAAC	120	0.2688+j0.3376
AAAC	70	0.4608+j0.3572
AAAC	50	0.6452+j0.3678
AAAC	35	0.9217+j0.3790

Tabel 4.2 menunjukkan jenis kabel saluran yang dipakai oleh penyalang pujon dengan spesifikasinya yang nantinya akan dibutuhkan untuk input data pada pemodelan *single line diagram* pada *software ETAP*.

D. Perhitungan Impedansi Saluran

Dari data spesifikasi kabel saluran pada tabel 4.1, diketahui penyalang pujon menggunakan jenis kabel AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) dengan penampang nominal 150 mm² dan impedansi saluran 0,2162+j0,3305 (Ω/km). Berikut contoh perhitungan impedansi saluran yang dilakukan pada bus 1 ke bus 2

Diketahui jarak dari bus 1 ke bus 2 = 580,3 m

$$= 580 \times 10^{-3} = 0,5803 \text{ km}$$

Untuk mencari R

$$R = 0,5803 \times 0,2162 = 0,1255 \text{ Ω/km}$$

Untuk mencari X

$$X = 0,5803 \times 0,3305 = 0,1918 \text{ Ω/km}$$

Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Impedansi Saluran

No	Bus		Panjang	Impedansi Saluran	
	Dari	Ke		R (ohm)	X (ohm)
1	1	2	580,3	0,1255	0,1918
2	2	3	1432,6	0,3097	0,4735
3	3	4	863,9	0,1868	0,2855
4	4	5	85,4	0,0185	0,0282
5	4	6	683,3	0,1477	0,2258
6	6	7	2082,8	0,4503	0,6884
7	7	8	154,4	0,0334	0,051
8	8	9	414,5	0,0896	0,137
9	9	10	896,5	0,1938	0,2963
10	10	11	463,5	0,1002	0,1532

Pada Tabel 4.3 menunjukkan hasil perhitungan dengan cara yang sama pada contoh diatas untuk mengetahui impedansi pada setiap saluran yang nantinya data tersebut dimasukkan sebagai input data.

E. Perhitungan Pembebanan Sistem 20 kV Penyalang Pujon

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. Pada tahap ini rugi-rugi yang terjadi pada trafo distribusi diabaikan. Mengingat bahwa tidak dilakukan pengukuran faktor daya pada jaringan, maka pada perhitungan ini diasumsikan harga faktor daya sebesar 0,86. Dibawah ini diberikan contoh perhitungan pembebanan pada bus 2.

$$\begin{aligned} \text{Kapasitas Trafo} &= 160 \text{ kVA} \\ \text{Beban gardu} &= 31 \% \\ \text{Pembebanan} &= 160 \times 31 \% \\ &= 49 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Pembebanan

NO	GARDU	ALAMAT	DAYA TRAFO (KVA)	DAYA PENGK (KVA)	DAYA PENGUKURAN (%)
1	9	Jl. Hasanudin	250	187	75
2	16	Songgoriti	200	116	58
3	19	Jl. Raya Pujon	250	123	49
4	25	Jl. Trunojoyo	75	30	40
5	30	Ds. Songgoriti	160	0	0
6	31	Jl. Sudiro	100	32	32
7	32	Jl. Indragiri	200	96	48
8	33	Ngroto pujan	250	151	60
9	36	Ds. Pandesari	100	60	60
10	46	Ds. Sumberejo	200	162	81
11	57	DK. Sebaluh	150	99	66
12	58	Dk. Pandemas	100	57	57
13	59	DK. MARON	160	90	56
14	60	DK. JURANGREJO	160	127	79
15	61	Dk. Ngroto	160	111	69

Tabel 4.4 menunjukkan daya pengukuran beban pada setiap gardu pada penyulang Pujon, dimana daya pengukuran tersebut akan dipakai sebagai input data untuk me dan pada tabel terdapat hasil perhitungan dengan cara yang sama seperti pada contoh diatas

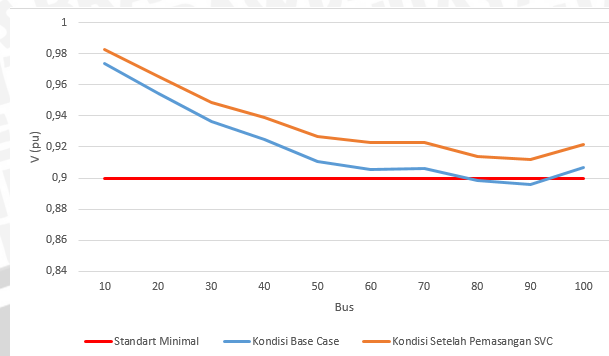
F. Analisis Aliran Daya Pada GI Sengkaling

Untuk menganalisis aliran daya terlebih dahulu dilakukan pemodelan single line diagram kemudian data panjang, data luas penampang, data beban yang sudah didapatkan dimasukkan sebagai input data untuk menganalisis aliran daya (loadflow) dengan menggunakan *software ETAP power station* dengan tujuan untuk mengetahui keadaan sistem yaitu tegangan pada masing-masing bus.

G. Hasil Simulasi dan Analisis

Hasil analisis penentuan letak dan kapasitas SVC menyimpulkan bahwa, terdapat 2 kandidat bus untuk menanggulangi permasalahan penurunan tegangan (*under voltage*) di bus-bus yang kritis pada Penyulang Pujon dengan kapasitas sebesar $Q = 1842$ kVAR pada bus 46 dan $Q = 1476$ kVAR pada bus 74 yang nantinya akan disimulasikan satu persatu untuk memperoleh hasil yang paling optimal.

Setelah dilakukan simulasi maka pemasangan SVC yang paling optimal apabila SVC diletakkan pada bus 46 dengan $Q = 1842$ kVAR. Tegangan yang terdapat di Penyulang Pujon semua meningkat dan rugi-rugi daya saluran menurun. Tegangan yang awalnya $V = 0,8942$ pu menjadi $V = 0,9102$ pu. Perubahan besarnya aliran daya reaktif menghasilkan penurunan rugi-rugi saluran dari $P = 354,818$ kW dan $Q = 169,936$ kVAR menjadi $P = 264,54$ kW dan $Q = 101,187$ kVAR. Perubahan besarnya aliran daya reaktif juga berpengaruh pada nilai tegangan pada setiap bus. Bus-bus yang nilai tegangan semula dibawah $V = 0,9$ pu setelah dipasang SVC mengalami kenaikan di atas $V = 0,9$ pu.



Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

Pada Gambar 4.2 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.



Gambar 4.3 Diagram Perbandingan rugi-rugi daya

Pada gambar 4.3 menunjukkan terjadinya penurunan rugi rugi aktif sebesar $P = 354,818 - 169,936 = 184,882$ dan penurunan daya reaktif sebesar $Q = 264,54 - 101,187 = 163,353$. Perubahan besarnya aliran daya reaktif juga berpengaruh pada nilai tegangan pada setiap bus.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis dan simulasi pemasangan SVC pada Penyulang Pujon Rayon Sengkaling, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Pemasangan SVC pada bus-bus yang mengalami gangguan dapat menaikkan profil tegangan diatas nilai tegangan standar yang tentukan.
- Penempatan dan kapasitas SVC yang tepat untuk memperbaiki profil tegangan yaitu pada bus 46 sebesar 1843 kVAR.

- c. Pemasangan SVC dapat mengurangi nilai rugi-rugi saluran dari $P = 354,818 \text{ kW}$ dan $Q = 169,936 \text{ kVAR}$ menjadi $P = 264,54 \text{ kW}$ dan $Q = 101,187 \text{ kVAR}$. Perubahan besarnya aliran daya reaktif juga berpengaruh pada nilai tegangan pada setiap bus

B. Saran

Berikut adalah beberapa hal yang perlu disarankan untuk keperluan penelitian dan pengembangan lebih lanjut sebagai berikut:

- a. Data yang digunakan untuk melakukan penelitian sebaiknya data terbaru / *up to date*.
- b. Memperhitungkan aspek ekonomis pemasangan SVC.
- c. Menggunakan metode optimasi, seperti *Particle Swarm Optimization (PSO)* atau metode optimasi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Stevenson, Jr., & William D. 1990. Analisis Sistem Tenaga Listrik. Jakarta Selatan: Balai Penerbit & Humas.
- [2] Erviana, M dkk. (2012). Optimasi Penempatan Dan Kapasitas Kapasitor Bank Pada Sistem Distribusi Untuk Mereduksi Rugi Daya Menggunakan Particle Swarm Optimization. Semarang: Universitas Diponegoro.
- [3] Djiteng, M. (1990). Operasi Sistem Tenaga Listrik. Jakarta Selatan: Balai Penerbit & Humas.
- [4] Zhong, Q.C. (2012). Active Capacitors: Concept and Implementation. International Electrical of Electronic engineering.
- [5] Dinakaran, C., & Balasundaram, G. (2013). Optimum Location of Static Var Compensator (SVC). Indian Journal of Research, 2(8).
- [6] PT.PLN. (2014). Buku Pedoman Pemeliharaan Kompensasi Daya Reaktif Statik (SVC). Kebayoran Baru Jakarta Selatan.