

SKRIPSI

**STUDI PENEMPATAN *STATIC VAR COMPENSATOR* (SVC)
PADA SISTEM DISTRIBUSI SS4 PT. PLN ULP TONDANO**

Disusun dan diajukan oleh:

KHOIRALDIS GIANDIFATH ASSHIDDIQI

D041201062



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

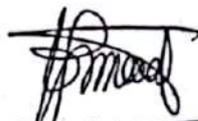
**STUDI PENEMPATAN *STATIC VAR COMPENSATOR (SVC)* PADA
SISTEM DISTRIBUSI SS4 PT. PLN ULP TONDANO**

Disusun dan diajukan oleh

**Khoiraldis Giandifath Asshiddiqi
D041201062**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 4 Desember 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama,



Dr. Ir. Zhenab Muslimin, M.T.
NIP. 196602011992022002

Ketua Program Studi,



Prof. Dr.-Ing. H. Faizal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.
NIP. 197506052002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Khoiraldis Giandifath Asshiddiqi

NIM : D041201062

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

STUDI PENEMPATAN *STATIC VAR COMPENSATOR (SVC)* PADA SISTEM DISTRIBUSI SS4 PT. PLN ULP TODANO

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 4 Desember 2024

Yang Menyatakan



Khoiraldis Giandifath Asshiddiqi

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah SWT, penulis panjatkan puji dan syukur atas segala rahmat dan hidayah yang telah dilimpahkan kepada penulis sehingga dengan izin-Nya, skripsi ini dapat dikerjakan hingga selesai. Sholawat beserta salam penulis curahkan kepada kekasih Allah SWT, yaitu Nabi Muhammad SAW yang telah menggulung tikar kejahilian dan membenteng tikar peradaban kepada umat manusia. Berkat perjuangan beliau, penulis bisa mendapatkan banyak ilmu hingga di titik ini.

Penyelesaian skripsi ini merupakan upaya penulis dalam memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini berjudul “**Studi Penempatan *Static Var Compensator* (SVC) Pada Sistem Distribusi SS4 PT. PLN ULP Tondano**”. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini mengalami berbagai hambatan. Namun, berkat kegigihan, usaha, dan doa, penulisan skripsi ini akhirnya dapat terselesaikan. Penyusunan skripsi ini juga tidak terlepas dari bantuan, doa, dorongan, semangat serta bimbingan dari berbagai pihak. Tanpa menghilangkan rasa hormat, kami ucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini, antara lain:

1. Ayahanda Andi Munzir dan Ibunda Gitmiwati selaku kedua orang tua yang tak henti-hentinya mendoakan dan memberikan dukungan baik moral maupun materil kepada penulis. Juga kepada saudara kandung penulis Kakanda Khalif Muhammad Fathan, Adinda Siti Khaulah Ariani, Ilham Ahmad Fathir, dan Abdullah Rahman.
2. Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Ibu Dr. Ir. Zaenab Muslimin, M.T. selaku dosen pembimbing, terimakasih telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, gagasan, serta ide-ide dalam penyelesaian skripsi ini.

4. Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T., IPM dan Ibu Dr. Fitriyanti Mayasari, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan masukan serta kritik dan saran guna penyempurnaan tugas akhir ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro atas segala ilmu, bantuan dan kemudahan yang diberikan selama penulis menempuh proses perkuliahan.
6. Kepada Srikandy Anugrah, terima kasih selalu hadir memberikan semangat tanpa henti, memberikan doa serta dukungan emosional yang begitu tulus. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan ini, dan semoga keberhasilan ini menjadi langkah awal dari berbagai mimpi yang ingin kita wujudkan bersama.
7. Teman-teman seperjuangan Laboratorium Riset Relay Proteksi dan Pengukuran, Ghirah Arrahman, Jasmarani, Putri Amelia, Muliati Idris, Yusril Razak Rahangiar, Muhammad Rezki, Ahmad Abdillah Iskandar, Yogi Satrya Putra. SM, Muhammad Ridha Adha, Alif Shadiq Syahnur. Terima kasih atas kebersamaan, kerja sama, dan dukungan yang diberikan.
8. Saudara Kerja Praktik Bakaru Muhammad Rizky Al Isra Ridwan dan Yogi Satrya Putra. SM, yang senantiasa menemani penulis hingga menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Kepada rekan-rekan PROCEZ20R yang sejak pertama kali masuk di Universitas Hasanuddin hingga saat ini berjuang bersama penulis untuk menuntut ilmu di kampus merah ini.
10. Rekan-rekan pengurus HME FT-UH Periode 22/23 yang telah memberikan pembelajaran selama periode kepengurusan.
11. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan tugas akhir ini

ABSTRAK

KHOIRALDIS GIANDIFATH ASSHIDDIQI. *Studi Penempatan Static Var Compensator (SVC) Pada Sistem Distribusi SS4 PT. PLN ULP Tondano* (dibimbing oleh Zaenab Muslimin)

Suatu sistem distribusi yang baik harus memiliki nilai tegangan dengan kualitas yang baik yaitu nilainya tidak melebihi batas toleransi serta rugi-rugi daya yang kecil. Beberapa faktor yang mengakibatkan terjadinya jatuh tegangan ataupun tegangan lebih antara lain faktor daya, pembebanan dan nilai impedansi sistem. Jatuh tegangan ialah suatu kondisi dimana jumlah tegangan yang disalurkan tidak sama dengan tegangan yang diterima pada sisi beban. Jatuh tegangan ini bisa diatasi dengan salah satu perangkat *Flexible AC Transmission System* (FACTS) yang efektif, yaitu *Static Var Compensator* (SVC). SVC ini berfungsi untuk mengatur aliran daya pada sistem dengan cara mengubah tegangan dengan mengompensasi daya reaktif pada sistem. Untuk menentukan kapasitas serta lokasi penempatan dari SVC digunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Untuk perhitungan kapasitas dan lokasi penempatan SVC dengan metode PSO pada bus 141 dengan kapasitas sebesar 0,27 Mvar. Hasil dari pemasangan SVC di bus 141 pada *software*, memperbaiki profil tegangan pada bus-bus dengan nilai tegangan dibawah standar, yaitu bus 72, bus 90, bus 96, bus 112, bus 115, bus 118, bus 140, dan bus 160 dengan rata-rata kenaikan tegangan sebesar 1,51%. Selain dapat memperbaiki profil tegangan, pemasangan SVC juga dapat mempengaruhi rugi-rugi daya pada sistem dengan total penurunan rugi daya sebesar 25,83%.

Kata Kunci: *Static Var Compensator* (SVC), *Particle Swarm Optimization* (PSO), Tegangan, Rugi-rugi Daya.

ABSTRACT

KHOIRALDIS GIANDIFATH ASSHIDDIQI. *Study of Static Var Compensator (SVC) Placement in SS4 Distribution System of PT. PLN ULP Tondano (supervised by Zaenab Muslimin)*

A good distribution system must have a voltage value with good quality, namely the value does not exceed the tolerance limit and small power losses. Several factors that cause voltage drops or overvoltage include power factors, loading and system impedance values. Voltage drops are a condition where the amount of voltage distributed is not the same as the voltage received on the load side. This voltage drop can be overcome with one of the effective Flexible AC Transmission System (FACTS) devices, namely the Static Var Compensator (SVC). This SVC functions to regulate the power flow in the system by changing the voltage by compensating for reactive power in the system. To determine the capacity and location of the SVC placement, the Particle Swarm Optimization (PSO) method is used. To calculate the capacity and location of the SVC placement using the PSO method on bus 141 with a capacity of 0.27 Mvar. The result of installing SVC on bus 141 in the software, improves the voltage profile on buses with voltage values below standard, namely bus 72, bus 90, bus 96, bus 112, bus 115, bus 118, bus 140, and bus 160 with an average voltage increase of 1.51%. In addition to improving the voltage profile, installing SVC can also affect power losses in the system with a total reduction in power losses of 25.83%.

Keywords: Static Var Compensator (SVC), Particle Swarm Optimization (PSO), Voltage, Power Losses.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	6
2.2 Aliran Daya Listrik (<i>Load Flow</i>).....	8
2.3 Daya Listrik	10
2.4 Rugi-Rugi Daya Listrik	12
2.5 Jatuh Tegangan (<i>Voltage Drop</i>).....	13
2.6 <i>Static Var Compensator (SVC)</i>	15
2.7 <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i>	17
2.8 Penelitian Terdahulu yang Terkait	22
BAB III METODE PENELITIAN	24
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	24
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	24
3.3 Metode Pengambilan Data.....	24
3.4 Metode Analisis Data.....	28
3.5 Diagram Alir Penelitian	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Aliran Daya Sebelum Pemasangan SVC Pada Penyulang SS4 ULP Tondano	31

4.2 Inisialisasi Parameter PSO.....	37
4.3 Penentuan Kapasitas dan Lokasi Penempatan SVC	38
4.4 Simulasi Aliran Daya Sebelum dan Setelah Pemasangan SVC.....	39
4.5 Analisis Biaya Pemasangan SVC	47
BAB V PENUTUP	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran	52
DAFTAR PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN.....	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Tipikal Bus Dari Sistem Tenaga Listrik	9
Gambar 2 Segitiga Daya dan Rumusnya	11
Gambar 3 Konfigurasi SVC	16
Gambar 4 Kurva Daya Reaktif Terhadap Tegangan Pada SVC	16
Gambar 5 <i>Flow Chart</i> Metode PSO	21
Gambar 6 <i>Single Line Diagram</i> Penyulang SS4 ULP Tondano	25
Gambar 7 Pengaturan Rating SVC pada Software ETAP 19.0.1	45
Gambar 8 Lokasi Pemasangan SVC pada Software ETAP 19.0.1	46
Gambar 9 Grafik Perbandingan Nilai Tegangan Seluruh Bus Sebelum dan Setelah Pemasangan SVC Pada Bus 141	46
Gambar 10 Grafik Perbandingan Nilai Tegangan Pada Bus Dengan Tegangan Dibawah Standar Sebelum dan Setelah Pemasangan SVC	47

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Pengukuran Gardu ULP Tondano Februari-April 2024	26
Tabel 2 Data Simulasi Aliran Daya Sebelum Pemasangan SVC	31
Tabel 3 Data Bus Tegangan Dibawah Standar	36
Tabel 4 Parameter PSO	37
Tabel 5 Data Bus Kandidat Pemasangan SVC (Sesuai Perhitungan PSO).....	38
Tabel 6 Data Simulasi Aliran Daya Sebelum dan Setelah Pemasangan SVC	39
Tabel 7 Perbandingan Nilai Tegangan sebelum dan Setelah Pemasangan SVC Pada Bus 141	44
Tabel 8 Total Nilai Investasi Pemasangan SVC Pada Bus 141	48

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem kelistrikan merupakan salah satu kebutuhan masyarakat modern untuk menunjang kelangsungan aktivitas sosial. Kebutuhan akan tenaga listrik terus bertambah seiring dengan pertumbuhan masyarakat saat ini, sehingga sistem distribusi tenaga listrik harus disesuaikan dengan kebutuhan saat ini agar pertumbuhan dapat terus berlanjut. Gangguan pada sistem tenaga listrik tidak dapat dihindari, karena jarak transmisi yang jauh dan mencakup wilayah yang luas, serta pertumbuhan masyarakat yang lebih cepat dibandingkan dengan pertumbuhan jaringan listrik saat ini, sehingga berdampak besar pada distribusi tenaga listrik. Hal ini sangat berpengaruh terhadap aliran daya pada distribusi tenaga listrik yang mengakibatkan penurunan tegangan dan kerugian daya listrik. Sistem distribusi terpaksa beroperasi pada batas stabilnya untuk mengimbangi pertumbuhan, sehingga sistem sering mengalami gangguan atau kerusakan. Namun gangguan yang diakibatkannya dapat diminimalisir dengan menerapkan konsep sistem distribusi listrik yang sesuai dengan kebutuhan, dimana pasokan listrik tidak melebihi batas termal sistem distribusi itu sendiri.

Suatu sistem distribusi yang baik harus memiliki nilai tegangan dengan kualitas yang baik yaitu nilainya tidak melebihi batas toleransi serta rugi-rugi daya yang kecil. Batas suatu toleransi yang harus diperoleh untuk suatu nilai tegangan menurut standar SPLN No.72 Tahun 1978 adalah +5% dari nilai nominalnya. Nilai tegangan yang konstan akan mengoptimalkan unjuk kerja dari peralatan listrik. Namun ada beberapa faktor yang mempengaruhi kualitas tegangan salah satunya adalah jatuh tegangan atau *Voltage Drop*. Jatuh tegangan ialah suatu kondisi dimana jumlah tegangan yang disalurkan tidak sama dengan tegangan yang diterima pada sisi beban. Kondisi tersebut dapat membuat kualitas tegangan menjadi buruk dan mengakibatkan meningkatnya arus listrik. Beberapa faktor yang mengakibatkan terjadinya jatuh tegangan ataupun tegangan lebih antara lain faktor daya, pembebanan dan nilai impedansi sistem. Dengan melakukan kompensasi daya

reaktif pada sistem sesuai dengan kebutuhan akan dapat memperbaiki jatuh tegangan maupun tegangan lebih. Terjadinya jatuh tegangan dikarenakan sistem kelebihan daya reaktif atau dapat dikatakan nilai faktor daya rendah. Maka diperlukan sebuah kompensasi daya reaktif agar dapat memperbaiki faktor daya atau mengurangi daya reaktif pada sistem.

Ketidakstabilan tegangan bisa diakibatkan karena kurangnya daya reaktif yang kemudian menghasilkan rugi-rugi daya. Rugi daya tidak dapat dihindari tapi dapat dikurangi dengan melakukan perbaikan profil tegangan dan menjaga kestabilan tegangan, maka diperlukan kompensasi daya reaktif pada saat *under voltage* dan *over voltage* sehingga dapat dilakukan peninjauan dan perhitungan daya dengan menggunakan salah satu perangkat kompensator yaitu *Static Var Compensator* (SVC). Pada penyulang SS4 terdapat beberapa bus yang nilai tegangannya dibawah standar atau kurang dari 0,95 p.u. Sehingga penelitian ini mengangkat permasalahan tersebut untuk diteliti.

Berdasarkan penjelasan sebelumnya, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penempatan *Static Var Compensator* (SVC) dengan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) sehingga dapat menjadi alternatif untuk memperbaiki kualitas tegangan dan rugi-rugi daya listrik. Penggunaan metode ini didasarkan pada keunggulannya dalam konvergensi yang cepat dan kemampuannya menemukan solusi optimum global. PSO memungkinkan penentuan lokasi dan kapasitas SVC dengan mempertimbangkan berbagai parameter sistem distribusi secara dinamis, serta memperbarui solusi secara berkala berdasarkan panduan prinsip pencarian lokal dan global. Penerapan metode ini juga didukung oleh pemodelan SVC yang mampu meningkatkan profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan distribusi. Rancangan optimasi menggunakan algoritma PSO mampu meningkatkan stabilitas tegangan dan efisiensi operasi sistem distribusi, serta membandingkan kinerja jaringan sebelum dan sesudah pemasangan SVC berdasarkan hasil simulasi. Dengan demikian, diharapkan bahwa penempatan *Static Var Compensator* (SVC) pada penyulang SS4 PT. PLN ULP Tondano akan memberikan dampak positif dalam upaya meningkatkan kualitas sistem distribusi tenaga listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang diambil pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana menentukan kapasitas dan lokasi optimal *Static Var Compensator* (SVC) pada sistem distribusi SS4 PT. PLN ULP Tondano?
2. Bagaimana pengaruh penempatan *Static Var Compensator* (SVC) dalam meningkatkan profil tegangan?
3. Bagaimana pengaruh sebelum dan setelah penempatan *Static Var Compensator* (SVC) terhadap rugi-rugi daya?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menentukan kapasitas dan lokasi *Static Var Compensator* (SVC) yang optimal pada sistem distribusi SS4 PT. PLN ULP Tondano.
2. Mengetahui pengaruh penempatan *Static Var Compensator* (SVC) dalam meningkatkan profil tegangan.
3. Mengetahui pengaruh sebelum dan setelah penempatan *Static Var Compensator* (SVC) terhadap rugi-rugi daya .

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Bagi mahasiswa, hasil penelitian ini berguna meningkatkan pengetahuan dan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya mengenai pengaruh penempatan *Static Var Compensator* pada sistem distribusi untuk meningkatkan profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya.
2. Bagi masyarakat dan pemerintah, hasil penelitian ini berguna sebagai panduan dan juga dengan penempatan *Static Var Compensator*, mampu mengurangi resiko gangguan pada jaringan sistem distribusi.
3. Bagi bidang keilmuan, penelitian ini dapat menyumbangkan pemahaman yang lebih baik tentang efek penempatan *Static Var Compensator* pada sistem

distribusi, mengisi celah pengetahuan dalam bidang teknik listrik dan teknologi energi.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada penelitian ini meliputi hal-hal sebagai berikut.

1. Penelitian ini menggunakan objek penelitian pada penyulang PT PLN ULP Tondano.
2. Penelitian ini menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam menentukan kapasitas dan lokasi penempatan *Static Var Compensator* yang optimal pada *Software* MATLAB R2023a.
3. Penelitian hanya membahas pengaruh penempatan *Static Var Compensator* terhadap profil tegangan dan menganalisis perbandingan sebelum dan setelah penempatan SVC terhadap rugi-rugi daya pada penyulang.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pemahaman terhadap penelitian ini, maka diuraikan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini memuat teori-teori relevan yang mendukung penelitian seperti sistem distribusi tenaga listrik, aliran daya (*load flow*), daya listrik, jatuh tegangan (*voltage drop*), rugi-rugi daya listrik, *Static Var Compensator* (SVC), dan *Particle Swarm Optimization* (PSO), serta penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode pengambilan data, metode analisis data, dan diagram alir penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi analisis hasil simulasi aliran daya sebelum dan setelah pemasangan *Static Var Compensator* (SVC) yang dilakukan di *software* ETAP 19.0.1, penentuan kapasitas dan lokasi penempatan SVC dengan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang dilakukan di *software* MATLAB R2023a, serta analisis ekonomi dari pemasangan SVC.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil penelitian penyelesaian studi penempatan *Static Var Compensator* (SVC) yang telah diperoleh melalui simulasi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan penyaluran energi listrik dari gardu induk ke konsumen. Terdapat 2 (dua) sistem distribusi yaitu distribusi primer dan distribusi sekunder. Distribusi primer, penyalurannya dimulai dari gardu induk (sisi sekunder trafo daya) ke gardu distribusi (sisi primer trafo distribusi) atau dari gardu induk langsung ke konsumen tegangan menengah 20 kV. Dimana tegangan tinggi terlebih dahulu diturunkan menjadi tegangan menengah sebesar 20 kV melalui transformator *step down*. Distribusi sekunder, penyalurannya dimulai dari gardu distribusi (sisi sekunder trafo distribusi) ke konsumen tegangan rendah. Energi listrik disalurkan melalui penyulang-penyulang yang berupa saluran udara ataupun saluran kabel bawah tanah. Penyulang distribusi terletak di gardu distribusi. Fungsi gardu distribusi untuk menurunkan tegangan distribusi primer menjadi tegangan rendah atau tegangan distribusi sekunder sebesar 220/380 V (Syufrijal, 2014).

Sistem pendistribusian tenaga listrik dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu sistem pendistribusian langsung dan sistem pendistribusian tak langsung. Sistem pendistribusian langsung merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan secara langsung dari Pusat Pembangkit Tenaga Listrik, dan tidak melalui jaringan transmisi terlebih dahulu. Sistem pendistribusian langsung ini digunakan jika Pusat Pembangkit Tenaga Listrik berada tidak jauh dari pusat-pusat beban, biasanya terletak daerah pelayanan beban atau dipinggiran kota. Sistem pendistribusian tak langsung merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan jika Pusat Pembangkit Tenaga Listrik jauh dari pusat-pusat beban, sehingga untuk penyaluran tenaga listrik memerlukan jaringan transmisi sebagai jaringan perantara sebelum dihubungkan dengan jaringan distribusi yang langsung menyalurkan tenaga listrik ke konsumen (Suswanto, 2009).

Dalam sistem jaringan distribusi terdapat tiga bentuk konfigurasi jaringan distribusi yang umum digunakan dalam mendistribusikan tenaga listrik (Indra et al., 2019).

1. Sistem Jaringan Distribusi *Radial*

Sistem jaringan distribusi *radial* ini adalah bentuk konfigurasi jaringan yang sangat sederhana dengan biaya yang relatif murah yang menghubungkan beban-beban ke sisi sumber tenaga listrik. Konfigurasi ini biasa dipakai untuk melayani daerah beban dengan kerapatan beban rendah dan sedang, tetapi sistem seperti ini tingkat keandalannya relatif rendah. Apabila terjadi gangguan sepanjang saluran, maka semua konsumen yang tersambung ke sistem akan terputus, atau daerah pemadaman lebih luas dibandingkan konfigurasi jaringan *loop* maupun konfigurasi jaringan *spindle*. Sistem ini mempunyai sebuah saluran yang ditarik dari suatu sumber daya atau gardu induk dan saluran dicabangkan untuk beban-beban dilayani.

2. Sistem Jaringan Distribusi *Loop*

Sistem jaringan distribusi *loop* adalah bentuk konfigurasi jaringan yang memungkinkan alternatif lain dalam pemasokan sumber energi listrik dari dua arah. Cara ini digunakan untuk mengurangi lama pemutusan daya yang disebabkan oleh gangguan dengan menyambung kedua ujung saluran, sehingga keandalan sistem ini lebih baik dari pada sistem jaringan distribusi radial. Kelemahan konfigurasi jaringan distribusi *loop* ini salah satunya adalah biaya yang lebih mahal. Sistem demikian biasanya dioperasikan secara manual dan dipakai pada jaringan-jaringan yang relatif kecil.

3. Sistem Jaringan Distribusi *Spindle*

Sistem jaringan distribusi *spindle* adalah bentuk konfigurasi yang telah dikembangkan dari bentuk konfigurasi jaringan distribusi sistem *radial* dan bentuk konfigurasi jaringan distribusi sistem *loop*. Konfigurasi jaringan *spindle* ini terdiri dari beberapa penyulang dengan sumber tegangan yang berasal dari gardu induk distribusi dan kemudian disalurkan pada sebuah gardu hubung. Pada tipe ini biasanya terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang langsung (*express feeder*) yang akan terhubung dengan gardu hubung, dimana pada kondisi normal penyulang ini tidak dialiri beban. Konfigurasi jaringan ini juga biasanya digunakan pada jaringan tegangan menengah yang menggunakan kabel tanah.

2.2 Aliran Daya Listrik (*Load Flow*)

Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif maupun daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik jaringan listrik pada keadaan operasi normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang. Aliran daya dapat mengetahui tegangan pada setiap bus yang ada dalam sistem, baik *magnitude* maupun sudut fasa tegangan, daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran yang ada dalam sistem, kondisi dari semua peralatan, apakah memenuhi batas batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya listrik yang diinginkan (Nugraha et al., 2021).

Konsep perhitungan *load flow* atau aliran daya dalam dilakukannya studi atau analisa aliran listrik adalah menghitung faktor-faktor dasar pada sistem tenaga listrik seperti, besar beda potensial (V) dan sudut fasa tegangan (δ). Perhitungan aliran daya juga menjadi salah satu proses dilakukannya perhitungan terhadap besarnya daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) di dalam setiap bagian terutama yang menjadi komponen utama dalam sistem pendistribuan daya listrik dalam sistem tenaga listrik, tak lupa juga berdasarkan dilakukannya perhitungan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) juga dapat dilakukan analisa terhadap jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem baik pembangkitan maupun beban (Faruq et al., 2021).

Perhitungan aliran daya ini mencakup perhitungan aliran dan tegangan sistem pada bus tertentu. Dalam sistem tenaga listrik, bus dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu (Saadat, 1999):

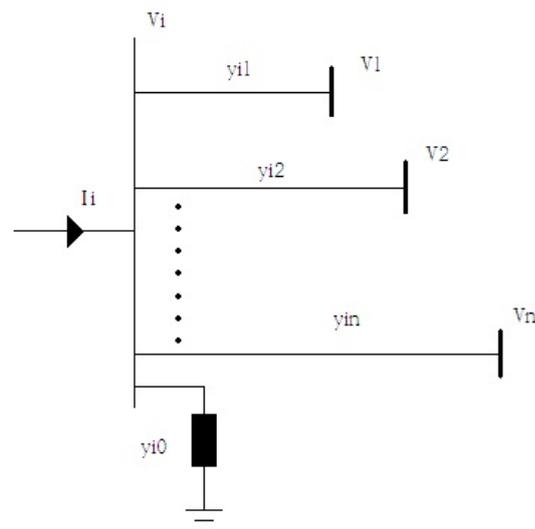
1. *Slack Bus*, ataupun sering juga disebut *Swing Bus*. Bus ini dianggap sebagai referensi dimana tegangan (V) dan sudut tegangan (δ) merupakan suatu konstanta. Bus ini mempunyai besar tegangan dan nilai sudut fasa tertentu sehingga besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah daya aktif (P) dan daya reaktif (Q).
2. *Load Bus* (PQ), yaitu bus yang terhubung dengan beban dimana pada bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui sedangkan nilai tegangan (V) dan sudut tegangan (δ) beban harus dicari melalui proses iterasi sampai tercapai nilai tertentu yang konvergen dengan toleransi ketelitian yang diinginkan.

3. *Regulated Bus* (PV), atau bus generator. Bus yang dapat mengatur atau mengontrol daya aktif (P) dan tegangan (V) sehingga *variable* tersebut dapat dianggap sebagai konstanta (PV Bus) dan *variable* yang akan dicari nilainya adalah daya reaktif (Q) dan sudut tegangan (δ).

Adapun tujuan dari studi analisa aliran daya antara lain (Husu et al., 2019).

1. Untuk mengetahui tegangan-tegangan pada setiap bus yang ada dalam sistem, baik magnitude maupun sudut fasa tegangan.
2. Untuk mengetahui daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran yang ada dalam sistem.
3. Untuk mengetahui kondisi dari semua peralatan, apakah memenuhi batas-batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya listrik yang diinginkan.
4. Untuk memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru.
5. Untuk memperoleh kondisi awal untuk studi-studi selanjutnya seperti studi hubung singkat, stabilitas, dan pembebanan ekonomis.

Pada analisis aliran daya, di dalam jaringan terdapat bus-bus yang saling terhubung dan berinterkoneksi. Gambar 1 menunjukkan salah satu jenis bentuk jaringan dalam sistem tenaga (Herawati et al., 2022).



Gambar 1. Tipikal bus dari sistem tenaga listrik

Sumber: (Haurissa, 2023)

Berdasarkan Gambar 1, sesuai dengan hukum kirchoff maka besarnya arus di jaringan dihitung menggunakan persamaan berikut (Haurissa, 2023).

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (1)$$

Atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (2)$$

Sedangkan daya aktif dan daya reaktif pada bus i dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (3)$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (4)$$

Jika disubstitusikan untuk I_i pada persamaan (2) diperoleh:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (5)$$

Penyelesaian aliran daya dapat dilakukan melalui berbagai metode seperti Gauss-Seidel, Newton-Raphson, dan Fast Decoupled. Namun, meskipun demikian, proses perhitungan manual yang rumit masih menjadi tantangan. Namun, dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, sekarang telah tersedia penggunaan software yang digunakan untuk penyelesaian aliran daya (Saefrudin, 2015).

2.3 Daya Listrik

Daya adalah Asas terjadinya energi listrik yang dengannya dapat memungkinkan muncul tenaga listrik yang dapat dipergunakan dengan Watt sebagai satuannya. Dalam sistem tenaga listrik dua arah bolak balik atau AC (*Alternating Current*), daya menggunakan konsep segitiga daya dalam pengaplikasiannya. Disebabkan dalam sistem AC tentu memiliki beberapa hal yang dapat menyebabkan tidak sesuainya jumlah daya awal. Segitiga daya terdiri atas daya aktif (P), daya reaktif (Q) dan daya semu (S) yang menjadi jumlah daya pasti dalam rangkaian AC (Faruq et al., 2021).

Daya aktif (P) adalah daya yang terpakai untuk melakukan usaha atau energi yang diperlukan oleh beban.

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (6)$$

Keterangan:

P = Daya aktif (Watt)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

Daya Reaktif (Q) adalah daya yang disuplai oleh komponen reaktif.

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (7)$$

Keterangan:

Q = Daya reaktif (VAR)

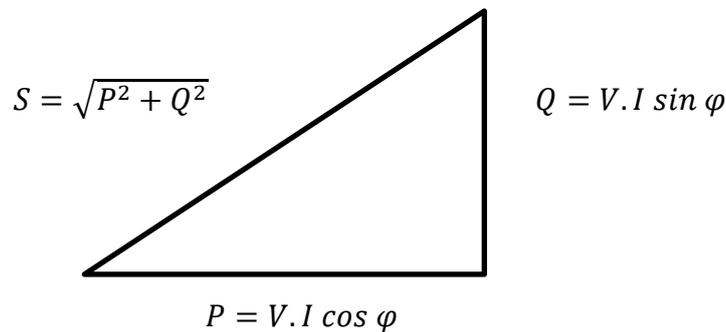
Daya semu adalah jumlah vektor dari daya reaktif (Q) dan daya aktif (P)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (8)$$

Keterangan:

S = Daya semu (VA)

Dari Persamaan (1), (2), dan (3) segitiga daya dapat di gambarkan seperti pada Gambar 2 (Whusto et al., 2019).



Gambar 2. Segitiga daya dan rumusnya

Sumber: (Whusto et al., 2019)

Kualitas Daya, sesuai dengan istilahnya yaitu sesuatu yang berkaitan dengan keandalan dalam sistem tenaga listrik, yaitu energi listrik dengan kualitas yang baik dan memenuhi kualitas yang memenuhi standar minimum dalam sistem tenaga listrik. Pada dasarnya kualitas daya adalah sesuatu yang menjadi hal penting dalam proses terjadinya operasi sistem tenaga listrik yang mana dengan kualitas daya listrik yang baik dan memenuhi standar dalam sistem tenaga listrik dapat memberikan efektifitas dan efisiensi yang signifikan baik terutama pada aspek ekonomi penggunaan daya listrik. (Faruq et al., 2021).

2.4 Rugi-Rugi Daya Listrik

Rugi-rugi daya jaringan adalah perbedaan antara energi listrik yang di salurkan dengan energi yang terpakai. Secara garis besar rugi-rugi dapat dikategorikan menjadi dua yaitu rugi-rugi teknis dan rugi-rugi non teknis. Rugi-rugi teknis adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh sifat dari material atau peralatan jaringan. Sedangkan rugi-rugi non teknis adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh kesalahan pemasangan dan kerusakan dari material atau peralatan jaringan. Ketidakseimbangan beban pada suatu sistem jaringan distribusi tenaga listrik selalu terjadi, dan penyebab ketidakseimbangan tersebut yaitu pada pengaturan beban-beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut muncul arus pada netral trafo. Arus yang mengalir pada netral trafo ini menyebabkan terjadinya rugi-rugi (*losses*), yaitu rugi-rugi akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo penyaluran energi listrik pada sistem distribusi dimana susut tegangan akan mempengaruhi penyaluran energi listrik kepada konsumen dimana jika terjadi susut tegangan pada sistem distribusi maka energi listrik yang akan disalurkan kepada konsumen akan menjadi tidak standar lagi sesuai dengan SPLN No. 72 Tahun 1987, dimana jatuh tegangan yang diperbolehkan dalam penyaluran distribusi hanya boleh sebesar 5%, untuk jaringan udara Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) sebesar 2%, oleh karena itu perlu adanya perhitungan dan penelitian untuk permasalahan jatuh tegangan, sehingga dalam penyampaian aliran listrik terhadap konsumen menjadi terpenuhi sesuai dengan standar yang telah ditetapkan (Nirwana et al., 2020).

Dalam penyalurannya, tenaga listrik mengalami rugi-rugi daya listrik yang besar karena luasnya daerah yang membutuhkan suplai tenaga listrik dari jaringan distribusi. Rugi-rugi daya listrik pada saluran distribusi dibagi menjadi 2 bagian yaitu: rugi-rugi daya aktif dan rugi-rugi daya reaktif (Syufrijal, 2014).

1. Rugi-rugi Daya Aktif

Besar rugi daya aktif ditentukan oleh kuadrat arus (I^2) dan resistansi jaringan (R) yang merupakan representasi jarak saluran. Dengan kata lain, elemen yang paling berpengaruh terhadap besarnya rugi-rugi daya aktif adalah besarnya arus dan besarnya resistansi jaringan. Resistansi jaringan akan sangat dipengaruhi oleh jarak saluran itu sendiri.

Rugi- rugi daya aktif per *phasa* dapat dirumuskan pada persamaan berikut:

$$P_{rugi-rugi (1\Phi)} = I^2 R \quad (11)$$

Keterangan:

$$P_{rugi-rugi} = \text{Rugi daya aktif (Watt)}$$

$$I = \text{Arus (A)}$$

$$R = \text{Resistansi } (\Omega)$$

Sedangkan rugi-rugi daya aktif tiga *phasa* dirumuskan pada persamaan berikut:

$$P_{rugi-rugi (3\Phi)} = 3I^2 R \quad (12)$$

2. Rugi-rugi Daya Reaktif

Besar rugi daya reaktif ditentukan oleh kuadrat arus (I^2) dan reaktansi jaringan (X) yang merupakan representasi jarak saluran. Dengan kata lain, elemen yang paling berpengaruh terhadap besarnya rugi-rugi daya reaktif adalah besarnya arus dan besarnya reaktansi jaringan. Reaktansi jaringan akan sangat dipengaruhi oleh jarak saluran itu sendiri.

Rugi-rugi daya reaktif per *phasa* dapat dirumuskan pada persamaan berikut:

$$Q_{rugi-rugi (1\Phi)} = I^2 X \quad (13)$$

Keterangan:

$$Q_{rugi-rugi} = \text{Rugi daya reaktif (VAR)}$$

$$I = \text{Arus (A)}$$

$$X = \text{Reaktansi } (\Omega)$$

Rugi-rugi daya reaktif tiga *phasa* dapat dirumuskan pada persamaan berikut:

$$Q_{rugi-rugi (3\Phi)} = 3I^2 X \quad (14)$$

Rugi-rugi daya merupakan rugi-rugi yang terjadi akibat adanya daya yang hilang pada jaringan seperti daya aktif dan daya reaktif. Semakin panjang saluran yang ada maka nilai tahanan dan reaktansi jaringan akan semakin besar, sehingga rugi-rugi bertambah besar baik itu pada rugi-rugi daya aktif maupun rugi-rugi daya reaktif (Muhtar, 2021).

2.5 Jatuh Tegangan (*Voltage Drop*)

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas

penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran Volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti. Tegangan jatuh secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Tegangan jatuh ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat.

Tegangan jatuh V pada penghantar semakin besar jika arus I di dalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar $R\ell$ semakin besar pula. Tegangan jatuh merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada di bawah tegangan nominal yang dibutuhkan. Atas dasar hal tersebut maka tegangan jatuh yang diijinkan untuk instalasi arus kuat hingga 1.000 V yang ditetapkan dalam persen dari tegangan kerjanya. (Sulasono,1993)

Besarnya jatuh tegangan dapat dihitung dengan persamaan berikut: (Darmana, 2015)

$$V_{drop} = I \times L (R \cos \theta + jX_L \sin \theta) \quad (9)$$

Dimana:

- V_{drop} = Jatuh tegangan
- I = Arus rata-rata di ujung saluran
- R = Resistansi saluran
- X = Reaktansi rangkaian
- θ = Sudut fasa antara arus dan tegangan
- L = Panjang saluran

Dalam pembahasan ini, jatuh tegangan (ΔV) didefinisikan sebagai selisih antara tegangan kirim (V_s) dan tegangan terima (V_t), dimana jatuh tegangan dapat dinyatakan dengan persamaan: (Dewi et al., 2023).

$$\Delta V = |V_s| - |V_r| \quad (10)$$

Dimana:

ΔV = Drop tegangan (Volt)

V_s = Tegangan ujung kirim (Volt)

V_r = Tegangan ujung terima (Volt)

Kemudian untuk menghitung jatuh tegangan dalam persen (%) dapat dinyatakan dengan persamaan: (Dewi et al., 2023).

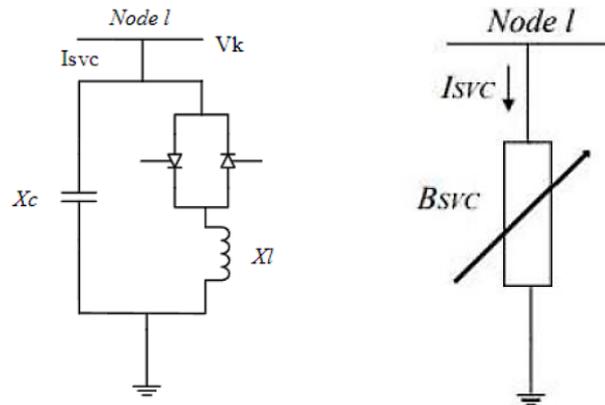
$$\Delta V\% = \frac{\Delta V}{V} \times 100\%$$

2.6 *Static Var Compensator (SVC)*

Salah satu jenis peralatan FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) yang digunakan adalah *Static Var Compensator (SVC)* yang berfungsi untuk mengatur tegangan dengan menginjeksikan atau menyerap daya reaktif pada sistem. Beberapa keuntungan dalam penggunaan SVC adalah menjaga stabilitas tegangan sistem, mengurangi rugi-rugi distribusi, dan meningkatkan kapasitas pendistribusian dan penyaluran daya listrik. Oleh sebab itu, lokasi pemasangan SVC sangat penting diperhatikan agar dapat bekerja secara efektif (Erhaneli et al., 2022).

Peralatan SVC digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif. Prinsip kerja SVC yaitu dengan cara mengatur sudut penyalan thyristor, sehingga dapat mengatur keluaran daya reaktif dari SVC. Nilai tegangan sistem merupakan input bagi pengendali, yang kemudian akan mengatur sudut penyalan thyristor. Dengan demikian SVC akan memberikan kompensasi daya reaktif yang sesuai dengan kebutuhan sistem (Nugraha et al., 2021)

SVC mengatur tegangan pada busnya dengan mengontrol jumlah daya reaktif yang diinjeksikan atau diserap dari sistem tenaga. Ketika tegangan sistem rendah, SVC menyuntikkan daya reaktif (mode kapasitif) dan ketika tegangan tinggi, SVC menyerap daya reaktif (mode induktif) seperti pada Gambar 3. (Rahmansyah et al., 2022).



(a) Sudut Penyalan

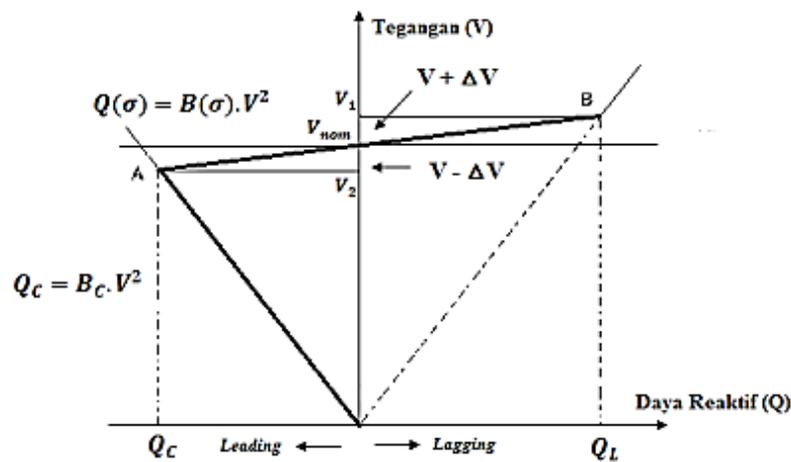
(b) Total Suseptansi

Gambar 3. Konfigurasi SVC; (a) Model Sudut Penyalan, (b) Model Total Suseptansi

Sumber: (Rahmansyah et al., 2022)

Static Var Compensator (SVC) terdiri dari kapasitor, reaktor, dan thyristor yang bertindak sebagai sakelar. Thyristor yang berfungsi sebagai saklar yang diatur waktunya untuk membuka dan menutup dengan mengontrol sudut penyalan melalui tegangan kisi.

Kurva daya reaktif yang dihasilkan SVC dari tegangan bus yang dipasang SVC ditunjukkan pada Gambar 4. (Yunus et al., 2019):



Gambar 4. Kurva Daya Reaktif Terhadap Tegangan pada SVC.

Sumber: (Yunus et al., 2019)

Dimana:

Q_c = Daya reaktif kapasitif (VAR)

Q_1 = Daya Reaktif Induktif (VAR)

V = Tegangan (V)

V_1 = Tegangan Mula-mula (V)

V_2 = Tegangan Akhir (V)

ΔV = Perubahan Tegangan (V)

B = Suseptansi (Siemens)

Berdasarkan Gambar 4, ada 3 area kerja dari SVC diantaranya yaitu (Yunus et al., 2019):

1. Area kerja pertama terletak di antara V_1 dan V_2 . Di area ini, SVC bersifat kapasitif atau induktif. Daya reaktif yang dihasilkan berubah-ubah sesuai kebutuhan sistem.
2. Area kerja kedua, bila tegangan bus melebihi V_1 . Pada area ini SVC mempunyai karakteristik induktif. Daya reaktif yang dihasilkan berubah-ubah sesuai kebutuhan sistem.
3. Area kerja ketiga bila tegangan kurang dari V_2 . Di area ini, SVC hanya berfungsi sebagai kapasitor tetap (*fixed capacitor*).

2.7 Particle Swarm Optimization (PSO)

Menurut Hu, 2005. Particle Swarm Optimization (PSO) adalah sebuah teknik *stochastic optimization* berdasarkan populasi (ikan, lebah, burung dll), dikemukakan oleh Russell C. Eberhart dan James Kennedy di tahun 1995 yang terinspirasi oleh perilaku sosial dari pergerakan burung atau ikan. PSO bersimulasi dengan perilaku dari sekawanan burung seperti skenario berikut: ada sekelompok burung yang secara acak mencari makanan di suatu daerah, dimana hanya ada satu potong makanan di daerah yang dicari. Semua burung tidak tahu seberapa jauh

keberadaan makanan tersebut. Maka strategi yang paling baik untuk menemukan makanan adalah mengikuti burung yang berada paling dekat dengan makanan. PSO mengadopsi skenario tersebut dan menerapkannya untuk memecahkan masalah optimasi (Nugraha et al., 2021).

Algoritma ini memadukan pendekatan pencarian lokal dan global. *Particle Swarm Optimization* dirancang untuk mengatasi masalah-masalah kompleks dengan membentuk populasi partikel yang posisinya diatur secara acak pada awalnya. Setiap partikel berperan sebagai solusi potensial untuk masalah yang sedang dipecahkan. Selanjutnya, algoritma ini akan mengevaluasi nilai kecocokan (*fitness*) dari tiap partikel, yang menunjukkan sejauh mana partikel tersebut berhasil dalam menyelesaikan masalah. (Putra et al., 2023)

Selama proses optimisasi, partikel-partikel tersebut memperbarui kecepatan (*velocity*) dan posisi mereka berdasarkan pengalaman pribadi serta pengetahuan bersama seluruh kelompok (*swarm*). Dengan memadukan informasi personal dan sosial, partikel-partikel ini dipandu menuju wilayah-wilayah yang menjanjikan dalam ruang pencarian. Perilaku kolaboratif ini memungkinkan kelompok tersebut untuk menjelajahi berbagai wilayah dan memanfaatkan area-area yang menunjukkan potensi untuk mencapai solusi yang lebih baik. Berikut merupakan tahapan dari algoritma *Particle Swarm Optimization* (Putra et al., 2023).

1. *Particle Swarm Optimization Initalitation.*

Pada tahap inisialisasi, partikel-partikel akan diberikan posisi awal secara acak berdasarkan distribusi dalam ruang pencarian (*search space*). Terdapat beberapa parameter yang harus ditentukan pada tahap ini, seperti jumlah partikel yang akan digunakan, koefisien kognitif, koefisien sosial, batasan nilai maksimum dan minimum untuk bobot inersia, serta posisi dan kecepatan awal setiap partikel. Inisialisasi pada masing-masing patikel menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Posisi Partikel} = \text{Batas Bawah} + (\text{Batas Atas} - \text{Batas Bawah}) \times \text{rand}(1, \text{Jumlah Partikel}) \quad (15)$$

Untuk inisialisasi kecepatan partikel dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut.

$$V_{min} = 0$$

$$V_{max} = \frac{1}{2} (\text{Batas atas} - \text{Batas Bawah}) \quad (16)$$

$$V_{partikel} = (V_{max} - V_{min}) * \text{rand}(1, \text{Jumlah Partikel}) + V_{min}$$

2. *Fitness Evaluation*

Proses *fitness evaluation* merupakan langkah yang dilakukan untuk mengevaluasi nilai kecocokan (*fitness*) dari setiap partikel secara individual. Pada tahap ini, nilai *fitness* diukur berdasarkan kriteria yang telah ditentukan terkait dengan masalah yang sedang diselesaikan. Evaluasi ini bertujuan untuk menentukan sejauh mana masing-masing partikel berhasil dalam memecahkan masalah atau mencapai tujuan yang diinginkan.

3. *Update Individual and Global Best Data*

Pada tahap ini, dilakukan perbandingan antara nilai *fitness* yang baru saja dihitung dengan nilai *fitness* sebelumnya. Selain itu, dilakukan pembaruan nilai *Pbest* (*personal best*) dan *Gbest* (*global best*) sesuai dengan nilai *fitness* yang baru. Jika nilai *fitness* yang baru ditemukan lebih kecil dari pada sebelumnya, maka *Pbest* dan *Gbest* akan diperbarui dengan nilai *fitness* tersebut. Sebaliknya, jika nilai *fitness* yang baru ditemukan lebih besar dari sebelumnya, maka iterasi akan dilanjutkan tanpa melakukan perubahan pada *Pbest* dan *Gbest*. Dalam konteks PSO, *Pbest* mengacu pada nilai *fitness* terbaik yang pernah dicapai oleh setiap partikel secara individu. *Pbest* menunjukkan kualitas solusi terbaik yang telah ditemukan oleh partikel itu sendiri sepanjang iterasi. Sementara itu, *Gbest* merujuk pada nilai *fitness* terbaik yang dicapai oleh seluruh populasi partikel. *Gbest* merupakan solusi terbaik yang ditemukan secara global oleh seluruh partikel dalam populasi.

4. *Memperbarui Kecepatan dan Posisi Setiap Partikel*

Tahapan ini dilakukan dengan menggunakan persamaan (17) dan (18) berikut:

$$V_{i+1} = WV_i + C_1 r_1 (LB_i - X_i) + C_2 r_2 (GB - X_i) \quad (17)$$

$$X_{i+1} = X_i + tv_{i+1} \quad (118)$$

Keterangan :

V_i = Kecepatan partikel i

C_1 = Faktor pembelajaran kognitif

C_2 = Faktor pembelajaran sosial

r_1 dan r_2 = Nomor distribusi acak

LB_i = Posisi terbaik partikel lokal i

GB = Posisi terbaik partikel global

X_i = Posisi partikel ke- i

X_{i+1} = Posisi partikel iterasi selanjutnya

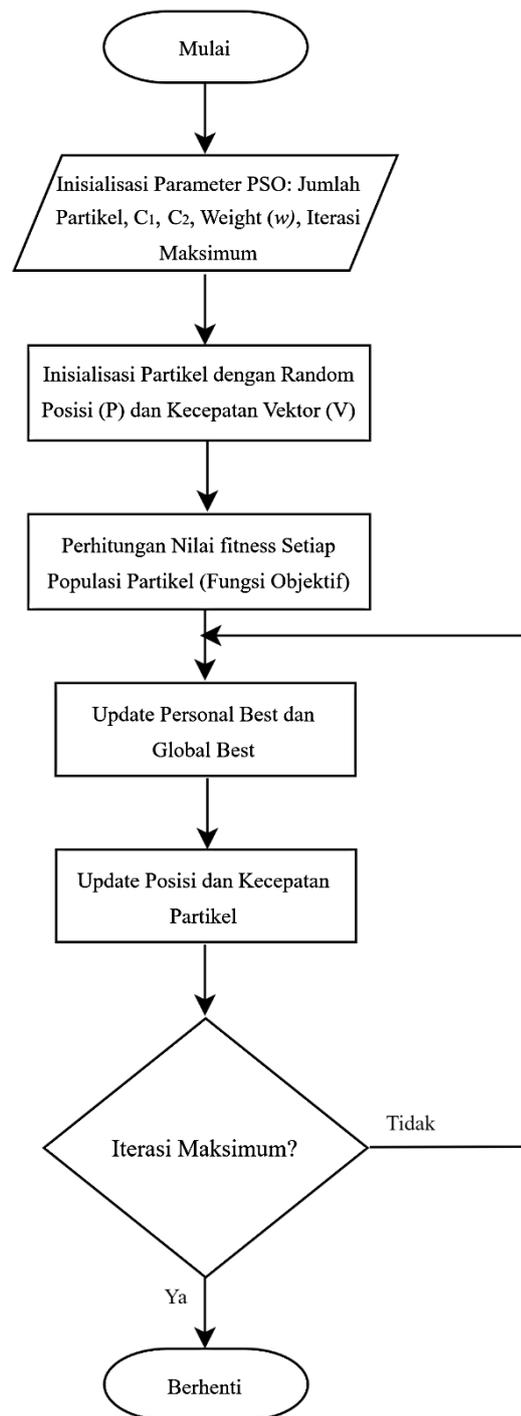
W = Bobot inersia

Momen inersia (W) dan *learning factor* (C_1 dan C_2) merupakan hal yang paling krusial dalam menentukan efisiensi pencarian dan tingkat keberhasilan algoritma *Particle Swarm Optimization*.

5. *Convergence Determination*

Tahapan terakhir dalam algoritma PSO adalah penentuan konvergensi (*convergence determination*). Pada tahap ini, dilakukan pemeriksaan terhadap kriteria konvergensi. Terdapat dua kondisi yang digunakan dalam algoritma ini. Pertama, konvergensi dapat tercapai jika kecepatan (*velocity*) dari semua partikel dalam populasi menjadi lebih kecil daripada suatu nilai ambang (*threshold*) yang ditentukan sebelumnya. Kedua, konvergensi juga dapat tercapai jika jumlah iterasi yang telah dilakukan mencapai batas maksimum yang telah ditentukan sebelumnya.

Adapun penjelasan mengenai metode PSO dapat dilihat melalui algoritma yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. *Flow Chart* Metode PSO

2.8 Penelitian Terdahulu yang Terkait

Dengan dilakukannya penelitian ini, penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan sangat penting sebagai referensi untuk menunjang pengembangan penelitian ini. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang memiliki relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan, antara lain:

1. Penelitian Septyan Krisna Nugraha, Istiyo Winarno, dan Daeng Rahmatullah (2021) dengan judul “Optimasi Nilai *Static Var Compensator* (SVC) Untuk Perbaikan Jatuh Tegangan Pada Sistem Distribusi 20 KV Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)”.

Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki jatuh tegangan pada sistem distribusi 20 kV menggunakan salah satu peralatan *Flexible AC Transmission System* (FACTS) yaitu *Static Var Compensator* (SVC) dengan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada sistem distribusi GI Toba. Menggunakan metode PSO ini nilai SVC dapat ditentukan secara tepat dengan menggunakan fungsi obyektif berdasarkan parameter rugi-rugi daya (Ploss), rugi-rugi tegangan (Vloss) dan kapasitas SVC. Pada penelitian ini, dilakukan perancangan sistem dan simulasi pada ETAP. Selanjutnya adalah penentuan kapasitas SVC dengan algoritma PSO menggunakan *software* MATLAB untuk menemukan nilai yang optimal. Berikutnya adalah penempatan SVC pada lokasi yang cenderung memiliki jatuh tegangan lebih besar/melebihi standar. Adapun hasil dari pemasangan SVC dengan metode PSO yaitu tegangan di bus 4 yang awalnya 94,48% menjadi 98,35. Bus 14 yang awalnya 94,4% menjadi 99,12% dan bus 15 yang awalnya 94,32% menjadi 99,21%.

2. Penelitian Tumpak Samosir (2021) dengan judul “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”

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemasangan *Static VAR Compensator* (SVC) terhadap rugi-rugi daya di penyulang Pujon-Malang dan untuk perbaikan profil tegangan. Penelitian ini dilakukan pada jaringan distribusi 20 kV dari Gardu Induk sistem kelistrikan Pujon Malang. Dengan

memodelkan *single diagram* penyulang Pujon pada *software* ETAP 19.01 dan simulasi *load flow* maka dapat dilihat profil tegangan tiap bus. Selanjutnya simulasi dan analisis pemasangan Static VAR Compensator (SVC). Adapun hasil penelitian ini yaitu dengan pemasangan SVC pada bus-bus yang mengalami gangguan dapat menaikkan profil tegangan diatas nilai tegangan standar yang ditentukan. Dimana pada bus 92 sebesar 1329 kVAR dan bus 107 sebesar 1664 kVAR. Dan pemasangan SVC juga dapat mengurangi nilai rugi-rugi saluran dari dari $P = 414,7 \text{ kW}$ dan $Q = 244,6 \text{ kVAR}$ menjadi $P = 350,7 \text{ kW}$ dan $Q = 201 \text{ kVAR}$.

3. Penelitian Erhaneli, Zuriman Anthony, Kartiria, dan Rahmad Kurnia (2022) dengan judul “Pengaruh Pemasangan SVC Terhadap Profil Tegangan pada Penyulang 20 kV”

Penelitian ini dilakukan dengan simulasi untuk menganalisis profil tegangan dengan adanya pemasangan SVC di Gardu Induk (GI) Payakumbuh diisi penyulang Tegangan 20 kV penyulang GH. Limbanang yang terdiri dari Feeder Andiang, Feeder Suliki, dan Feeder Danguangdanguang. Proses simulasi ini dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak ETAP untuk melihat perubahan profil tegangan yang terjadi pada saluran distribusi yang terhubung ke GH Limbanang GI Payakumbuh. Faktor penyebab terjadinya drop tegangan pada penyulang sehingga dilakukan pemasangan SVC ialah panjang penyulang, tingginya beban reaktif, dan faktor lainnya. Untuk rating nilai SVC yang digunakan pada simulasi dengan menginputkan nilai yang efisien yang mampu memperbaiki tegangan yang maksimal. Adapun hasil dari penelitian ini ialah SVC berhasil meningkatkan profil tegangan menjadi lebih baik dengan meningkatkan/menaikan tegangan dengan menginjeksikan daya reaktif pada penyulang mampu menaikan tegangan pada feeder Anding sebesar 1.39 kV atau sebesar 5.5%. Profil tegangan pada Feeder Anding yang diperbaiki dengan pemasangan SVC berhasil di tingkatkan dari 92.75% menjadi 99. 72%.