



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS *FACTS DEVICE*
OPTIMAL MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION (PSO)* PADA SISTEM TRANSMISI 500 KV
JAWA-MADURA-BALI**

Helga Dendy Ardianika
NRP 07111440000162

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS *FACTS DEVICE*
OPTIMAL MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION* (PSO) PADA SISTEM TRANSMISI 500 KV
JAWA-MADURA-BALI**

Helga Dendy Ardianika
NRP 07111440000162

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

**DETERMINATION OF LOCATION AND CAPACITY OF
OPTIMAL FACTS DEVICE USING PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION (PSO) METHOD ON 500 KV JAWA-
MADURA-BALI TRANSMISSION SYSTEM**

Helga Dendy Ardianika
NRP 07111440000162

Advisor
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

**** Halaman ini sengaja dikosongkan ****

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "Penentuan Lokasi dan Kapasitas FACTS Device Optimal Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization (PSO)* pada Sistem Transmisi 500 KV Jawa-Madura-Bali" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 28 Januari 2019



Helga Dendy Ardianika
NRP 07111445000162

**** Halaman ini sengaja dikosongkan ****

**PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS FACTS
DEVICE OPTIMAL MENGGUNAKAN METODE
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) PADA
SISTEM TRANSMISI 500 KV JAWA-MADURA-BALI**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,



Dr. Eng. Rony San Wibowo, S.T., M.T.
NIP. 1974 11 29 2000 12 1001

Dosen Pembimbing II,



Dr. Ir. Ni Kenit Aryani, M.T.
NIP. 1965 09 01 1991 03 2002



**** Halaman ini sengaja dikosongkan ****

Penentuan Lokasi dan Kapasitas *FACTS Device* Optimal Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada Sistem Transmisi 500 KV Jawa-Madura-Bali

Nama Mahasiswa : Helga Dendy Ardianika
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

Abstrak :

Berdasarkan data prediksi P2B (Pusat Pengatur Beban) bahwa pada tahun 2018 hingga 2030 pada sistem transmisi 500 kV Jamali (Jawa-Madura-Bali) akan mengalami pertumbuhan beban yang sangat besar dan sistem kelistrikan di Indonesia akan menjadi sangat kompleks dengan adanya penambahan saluran transmisi dan unit generator. Dengan penambahan saluran transmisi dan unit generator pada sistem kelistrikan Jamali dapat sangat rentan terjadinya gangguan seperti ketidakstabilan tegangan, menurunnya kapabilitas transfer daya listrik sistem, kegagalan total pada sistem, dan gangguan lainnya. Maka dari itu diusulkan dengan penggunaan perangkat *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS) untuk mengatur ketidakstabilan tegangan, meningkatkan kapabilitas transfer daya listrik sistem, pengaturan daya reaktif, mengurangi biaya pembangkitan yaitu *Static VAR Compensator* (SVC). SVC merupakan peralatan yang digunakan untuk mengatur kestabilan tegangan bus pada sistem. Metode yang digunakan yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menentukan lokasi penempatan dan kapasitas SVC. Hasil yang diperoleh berupa kestabilan tegangan pada bus tertentu, biaya pembangkitan yang minimum daripada sebelum dipasang perangkat SVC dan biaya instalasi pemasangan perangkat SVC.

Kata Kunci : Saluran Transmisi 500 kV Jamali, SVC, *Particle Swarm Optimization* (PSO), Lokasi dan Kapasitas Optimal SVC, Total Biaya Pembangkitan Minimum, Biaya Instalasi SVC

*** *Halaman ini sengaja dikosongkan* ***

Determination of Location and Capacity of Optimal FACTS Device Using Particle Swarm Optimization (PSO) Method on 500 KV Jawa-Madura-Bali Transmission System

Student Name : Helga Dendy Ardianika
Supervisor I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T. M.T.
Supervisor II : Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

Abstract:

Based on predictive data from P2B (Pusat Pengatur Beban) that in 2018 to 2030, the 500 kV transmission systems of Jamali (Jawa-Madura-Bali) will experience enormous of growth load and the electricity systems in Indonesia will be very large and complex with the addition of transmission lines and generator units. With the addition of transmission lines and generator units in the electricity systems of Jamali can be very susceptible to disturbances such as voltage instability, decreased transmission capability of power electric on the transmission lines, total system failure, and other failures. Therefore, it is proposed to use Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices to regulate the voltage instability, improve the power transfer capability of the system, regulate the reactive power, reduced the generation costs, namely Static VAR Compensator (SVC). SVC is a device that is used to regulate the stability of the bus voltage in the system. The method used is Particle Swarm Optimization (PSO) to determine the location of placement and capacity of SVC. The results obtained in the form of voltage stability on certain buses, minimum generation costs than before the SVC devices were installed and installation cost of SVC device.

Keywords: *Transmission Line 500 kV Jamali, SVC, Particle Swarm Optimization (PSO), Optimal Location and Capacity of SVC, Total Minimum Generation Cost, Installation Cost of SVC*

**** Halaman ini sengaja dikosongkan ****

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, tiada kata yang pantas diucapkan selain kalimat syukur yang tiada henti penulis panjatkan kehadirat Allah SWT serta tidak lupa sholawat serta salam semoga tetap tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW sehingga penelitian dalam tugas akhir ini bisa berjalan lancar dan selesai tepat pada waktunya.

Selama pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak, dan penulis sampaikan rasa terima kasih. Terima kasih yang sebesar-besarnya juga penulis sampaikan kepada berbagai pihak yang mendukung dan membantu dalam tugas akhir ini, diantaranya:

1. Kedua orang tua dan adik yang senantiasa memberikan do'a, nasihat, motivasi, dukungan dan karena keberadaan merekalah penulis tetap semangat untuk menyelesaikan penelitian ini.
2. Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T dan Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T. selaku dosen pembimbing, atas dukungan, serta bimbingan, inspirasi, pengarahan, dan motivasi yang diberikan selama pengerjaan penelitian tugas akhir ini.
3. Seluruh dosen-dosen Departemen Teknik Elektro, khususnya dosen-dosen bidang studi Teknik Sistem Tenaga.
4. Teman-teman seperjuangan e54 yang masih menemani dan memberikan dukungan hingga penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis sadar bahwa Tugas Akhir ini masih belum sempurna dan masih banyak hal yang perlu diperbaiki. Saran, kritik dan masukan baik dari semua pihak sangat membantu penulis terutama untuk berbagai kemungkinan pengembangan lebih lanjut. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat untuk kedepannya.

Surabaya, 28 Januari 2019

Helga Dendy Ardianika

**** Halaman ini sengaja dikosongkan ****

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
TUGAS AKHIR.....	iii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 TEORI PENUNJANG	7
2.1 Studi Aliran Daya	7
2.1.1 Analisis Aliran Daya	7
2.1.2 Sistem Per Unit (p.u).....	8
2.1.3 Persamaan Aliran Daya.....	9
2.1.4 Perhitungan Aliran Daya.....	12
2.1.5 Aliran Daya dengan Metode <i>Newton-Raphson</i>	13
2.2 Optimal Power Flow	17
2.3 Perangkat FACTS.....	19
2.3.1 Static VAR Compensator (SVC).....	21
2.3.2 Penempatan Perangkat FACTS	23
2.3.3 Biaya Investasi Pemasangan Perangkat FACTS.....	24
2.4 Particle Swarm Optimization (PSO).....	25
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	31

3.1	Data Sistem Kelistrikan Jawa-Madura-Bali 500 kV.....	31
3.2	Penambahan Perangkat SVC.....	36
3.3	Penempatan dan Penentuan Rating SVC Menggunakan Metode PSO Untuk Mendapatkan Total Biaya Pembangunan Minimum.....	37
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		39
4.1	Hasil Sistem Jamali 500 kV Sebelum Pemasangan SVC Saat Kondisi Normal dan Kontingensi.....	39
4.2	Hasil Lokasi dan Rating Pemasangan SVC Optimal.....	45
4.3	Hasil Simulasi Sistem Jamali 500 kV Sesudah Pemasangan SVC Saat Kondisi Normal dan Kontingensi	46
4.3.1	Hasil Simulasi Sesudah Pemasangan SVC Saat Kondisi Normal.....	46
4.3.2	Hasil Simulasi Sesudah Pemasangan SVC Saat Kondisi Kontingensi	49
4.4	Analisis Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC pada Sistem Jamali 500 kV.....	52
4.4.1	Analisis Kondisi Normal Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC	52
4.4.2	Analisis Kondisi Kontingensi Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC	54
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		61
5.1	Kesimpulan.....	61
5.2	Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA		63
RIWAYAT HIDUP PENULIS		65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tipikal Bus pada Sistem Tenaga Listrik	9
Gambar 2.2 Pemodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya	12
Gambar 2.3 Konfigurasi Dasar dari Perangkat SVC	22
Gambar 2.4 Diagram Alur Metode PSO.....	28
Gambar 3.1 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Kelistrikan Jamali 500 kV Tahun 2018	31
Gambar 3.2 Diagram Alur Penentuan Penempatan Lokasi dan Kapasitas SVC Menggunakan PSO.....	37
Gambar 4.1 Grafik Penurunan Total Biaya Pembangkitan (<i>Total Cost</i>).....	589

*** *Halaman ini sengaja dikosongkan* ***

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Tegangan Bus Setiap Kondisi Beban pada Sistem Jamali	32
Tabel 3.1 Data Tegangan Bus Setiap Kondisi Beban pada Sistem Jamali (lanjutan)	33
Tabel 3.2 Data Beban Puncak Siang dan Pembangkitan	33
Tabel 3.2 Data Beban Puncak Siang dan Pembangkitan (lanjutan).....	34
Tabel 3.3 Data Beban Puncak Malam dan Pembangkitan	34
Tabel 3.3 Data Beban Puncak Malam dan Pembangkitan (lanjutan) ...	35
Tabel 3.4 Data Beban Rendah dan Pembangkitan	35
Tabel 3.4 Data Beban Rendah dan Pembangkitan (lanjutan)	36
Tabel 3.5 Data Parameter Nilai TCSC dan SVC	36
Tabel 3.6 Data Parameter Metode PSO	37
Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Normal dan Sebelum Pemasangan SVC	39
Tabel 4.2 Hasil Kapasitas Aliran Daya pada Saluran Saat Kondisi Normal dan Sebelum Pemasangan SVC	40
Tabel 4.3 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Kontingensi dan Sebelum Pemasangan SVC	42
Tabel 4.4 Hasil Kapasitas Aliran Daya pada Saluran Saat Kondisi Kontingensi dan Sebelum Pemasangan SVC	43
Tabel 4.5 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Normal Setelah Pemasangan SVC	46
Tabel 4.6 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan <i>Losses</i> Setiap Bus Saat Kondisi Normal Setelah Pemasangan SVC	47
Tabel 4.7 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Kontingensi Setelah Pemasangan SVC	49
Tabel 4.8 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan <i>Losses</i> pada Saluran Saat Kondisi Kontingensi dan Sesudah Pemasangan SVC	50
Tabel 4.9 Total Biaya Pembangkitan Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC Saat Kondisi Normal	52
Tabel 4.10 Tabel Perbandingan Antara Selisih Total Biaya Pembangkitan Sistem dengan Biaya Instalasi Perangkat SVC Saat Kondisi Normal..	53
Tabel 4.11 Dampak Total Aliran Daya Aktif dan Reaktif Saat Kondisi Normal Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC	54

Tabel 4.12 Total Rugi-Rugi Saluran (<i>losses</i>) Daya Aktif dan Reaktif Saat Kondisi Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC	54
Tabel 4.13 Total Biaya Pembangkitan Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC Saat Kondisi Kontingensi	55
Tabel 4.14 Tabel Perbandingan Antara Selisih Total Biaya Pembangkitan Sistem dengan Biaya Instalasi Perangkat SVC Saat Kondisi Kontingensi	56
Tabel 4.15 Total Aliran Daya Aktif dan Reaktif Saat Kondisi Kontingensi Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC.....	57
Tabel 4.16 Total Rugi-Rugi Saluran (<i>losses</i>) Daya Aktif dan Reaktif Saat Kondisi Kontingensi Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC.....	57
Tabel 4.17 Hasil Total Biaya Pembangkitan Setiap Iterasi Setelah Pemasangan SVC	58

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan jumlah penduduk di Indonesia setiap tahunnya semakin meningkat pesat sehingga memberikan dampak terhadap kebutuhan akan jumlah energi listrik terutama pada sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali). Karena jumlah penduduk yang semakin meningkat maka semakin besar pula permintaan beban energi listrik yang dibutuhkan oleh konsumen. Hal tersebut menyebabkan pengelola pembangkit energi listrik semakin terdesak untuk menambah jumlah unit pembangkit dan jumlah saluran transmisi yang dapat membuat sistem kelistrikan di Indonesia semakin kompleks dan bisa semakin rentan terjadinya gangguan. Komposisi penambahan jumlah pembangkitan yang beroperasi, perubahan beban, dan perubahan konfigurasi jaringan transmisi dapat menyebabkan terjadinya perubahan variasi level tegangan pada bus-bus sistem, dan mengalami ketidakstabilan kapabilitas transfer daya listrik pada sistem. Karena pola beban yang dinamis dan permintaan beban yang terus meningkat, aliran daya di beberapa saluran transmisi jauh di atas batas normal operasi, sementara beberapa saluran transmisi tidak mencukupi karena melebihi kapasitas saluran [4]. Sebagai akibat dari distribusi beban yang tidak merata tersebut menyebabkan level tegangan sistem kelistrikan menjadi tidak stabil dan memburuk sehingga dapat menimbulkan ancaman bagi keamanan sistem kelistrikan kita. Maka dari itu, perlu diadakan solusi untuk merealisasikan sistem transmisi baru yang sangat penting untuk memanfaatkan unit pembangkitan dan saluran transmisi yang ada dengan cara yang efisien. Kontroler FACTS ditemukan menjadi alternatif yang efektif dan efisien untuk tugas yang sangat kompleks dalam membangun koridor sistem transmisi yang baru [6].

Peralatan kontroler *Flexible AC Transmission System* (FACTS) yang digunakan *Static VAR Compensator* (SVC). Perangkat SVC merupakan perangkat kompensator yang digunakan untuk mengatur kestabilan tegangan bus pada sistem kelistrikan [9]. Dengan menggunakan perangkat SVC diharapkan sistem transmisi 500 kV Jawa-Madura-Bali semakin handal, tidak mengalami gangguan ketika terjadi penambahan beban, saluran transmisi, unit pembangkit, dan juga dapat menstabilkan tegangan bus pada sistem transmisi Jamali 2018.

Pemasangan perangkat FACTS (SVC) dibutuhkan metode kecerdasan buatan yang dapat menunjang dalam hal pencarian penempatan optimal dan kapasitas perangkat tersebut pada sistem. Maka dari itu, metode yang digunakan yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menentukan lokasi penempatan optimal dan kapasitas dari perangkat FACTS tersebut. Dengan dibuatnya metode pengaplikasian tersebut diharapkan dapat meminimalkan biaya total operasional pembangkitan pada sistem transmisi 500 kV Jawa-Madura-Bali.

1.2 Permasalahan

Tugas Akhir ini memiliki beberapa permasalahan yang akan dibahas, yaitu:

1. Menentukan lokasi penempatan yang optimal dan kapasitas untuk *Static VAR Compensator* (SVC) pada saluran transmisi sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Madura-Bali pada tahun 2018;
2. Menentukan lokasi penempatan yang optimal dan kapasitas untuk SVC dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO).
3. Mencari total biaya pembangkitan minimum dan biaya instalasi perangkat SVC ketika sistem transmisi Jamali 500 kV setelah dipasang SVC.

1.3 Tujuan

Penelitian Tugas Akhir ini memiliki beberapa tujuan untuk diselesaikan, yaitu:

1. Menentukan lokasi penempatan dan kapasitas yang optimal untuk perangkat SVC pada saluran transmisi sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Madura-Bali;
2. Menentukan lokasi penempatan dan kapasitas yang optimal untuk perangkat SVC dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO);
3. Mengetahui total biaya pembangkitan minimum dan biaya instalasi setelah dipasang perangkat SVC pada sistem transmisi 500 kV Jawa-Madura-Bali.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada Tugas Akhir ini sebagai berikut:

1. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode *Particle Swarm Optimization* (PSO);

2. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB 2014a;
3. *Input* data yang digunakan adalah data bus, data saluran, dan fungsi biaya pembangkitan unit-unit pembangkit pada sistem transmisi 500 kV Jawa-Madura-Bali dari PLN P2B;
4. Biaya investasi pemasangan perangkat SVC diperhatikan.

1.5 Metodologi

Metodologi yang akan digunakan dalam menyusun penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Studi literatur dilakukan mengenai sistem tenaga listrik, analisis aliran daya, sistem transmisi 500 kV Jawa-Madura-Bali, metode *Particle Swarm Optimization* (PSO), penentuan lokasi dan kapasitas optimal perangkat kontroler FACTS (SVC) dan penggunaan *software* MATPOWER pada MATLAB.
2. Pengumpulan Data
Pengumpulan data dilakukan dengan menentukan sistem kelistrikan yang akan digunakan untuk mengambil data-data yang dibutuhkan, seperti data *single line diagram* sistem transmisi 500 kV Jawa-Madura-Bali, data beban, data saluran, data bus, dan data hasil metode analitis lain.
3. Pemodelan Sistem dan Perancangan Metode
Setelah mendapatkan data yang dibutuhkan maka selanjutnya adalah memodelkan sistem 500 kV Jawa-Madura-Bali beserta aliran daya sistemnya. Setelah itu, dilakukan perancangan sistem menggunakan metode PSO dengan menggunakan *software* MATPOWER pada MATLAB.
4. Simulasi dan Analisis
Setelah perancangan metode selesai dilaksanakan, maka langkah berikutnya melakukan simulasi pada sistem kelistrikan yang telah ditentukan dengan menggunakan *software* MATLAB dan melakukan analisis terhadap hasil dari simulasi tersebut.
5. Penarikan Kesimpulan
Setelah semua kegiatan di atas telah dilakukan, maka dilakukan penarikan kesimpulan. Kesimpulan dapat ditarik dengan melihat

analisa data dan perbandingan dengan metode kecerdasan buatan lain.

6. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Penulisan dan penyusunan buku Tugas Akhir dibuat setelah rangkaian kegiatan di atas telah dilakukan. Hasil yang telah didapat selama penelitian, semuanya disusun dengan rapih menjadi sebuah buku Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan laporan tugas akhir ini terdiri dari lima bab, dengan uraian sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan

Bab ini merupakan bagian awal yang berisi tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, serta relevansi pada penelitian Tugas Akhir ini.

BAB II Teori Penunjang

Bab ini memuat tentang teori penunjang mengenai penelitian Tugas Akhir ini, seperti sistem transmisi 500 kV Jawa-Madura-Bali, analisis aliran daya sistem, fungsi biaya pembangkitan, perangkat *Flexible AC Transmission System* (FACTS), perangkat *Static VAR Compensator* (SVC), dan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO).

BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini membahas mengenai penerapan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal perangkat FACTS (SVC) pada sistem jaringan transmisi 500 kV Jawa-Madura-Bali.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi tentang hasil dan juga pembahasan mengenai simulasi berbasis program MATPOWER pada MATLAB.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab ini memberikan penjelasan mengenai kesimpulan terkait penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

1.7 Relevansi

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Memberikan kontribusi terhadap perkembangan sistem kelistrikan di Indonesia, khususnya pada permasalahan yang berkaitan dengan perangkat SVC untuk optimasi kualitas sistem tenaga listrik;
2. Menjadi salah satu langkah untuk meningkatkan pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) dan penerapannya secara nyata di bidang sistem tenaga listrik;
3. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang hendak melaksanakan penelitian Tugas Akhir dengan topik seputar sistem tenaga listrik.

**** Halaman ini sengaja dikosongkan ****

BAB 2

TEORI PENUNJANG

2.1 Studi Aliran Daya

Pada suatu sistem tenaga listrik, studi aliran daya listrik merupakan bagian yang sangat penting dimana studi ini mengungkapkan kinerja dan aliran daya (aktif dan reaktif) untuk keadaan tertentu ketika sistem bekerja. Studi aliran daya dapat memberikan informasi mengenai data impedansi beban, daya aktif dan reaktif, saluran transmisi, tegangan dan sudut setiap bus tertentu, dan rugi-rugi daya untuk evaluasi kinerja sistem tenaga listrik [1]. Dengan studi aliran daya ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam melakukan perencanaan operasional sistem tenaga listrik, studi hubung singkat dan stabilitas sistem, serta pengembangan sistem tenaga listrik untuk meningkatkan kualitas energi listrik.

2.1.1 Analisis Aliran Daya

Dalam melakukan analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik, sistem diasumsikan beroperasi dalam keadaan stabil, *steady-state*, keadaan seimbang, tidak mengalami gangguan, dan perhitungan analisisnya menggunakan pemodelan sistem satu fasa [1]. Nilai-nilai yang sering muncul pada analisis aliran daya sistem tenaga listrik mencakup nilai tegangan pada bus-bus tertentu, daya aktif dan reaktif yang mengalir pada saluran transmisi atau bus-bus tertentu, daya aktif dan reaktif yang dibangkitkan oleh generator pembangkit. Bus-bus yang dimaksudkan diatas terbagi menjadi 3 bagian, sebagai berikut [2]:

1. *Slack/Swing* bus disebut sebagai referensi bus. Pada bus ini magnitude dan sudut pada tegangan bernilai tetap (sudah ditentukan sebesar $1\angle 0^\circ$). Dalam sistem tenaga listrik ditetapkan 1 bus sebagai penyuplai kekurangan daya yang dibangkitkan oleh bus-bus pembangkitan yang lain. Selain karena rugi-rugi daya tidak dapat diprediksi juga dengan beban yang terus mengalami kenaikan dan penurunan. Sehingga daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) yang dikirim dari bus ini selalu berubah-ubah sesuai dengan kekurangan daya yang dialaminya.
2. Generator bus (PV Bus) merupakan bus yang terhubung dengan generator pembangkit dan memiliki nilai injeksi daya aktif (P) dan besar tegangan bus yang tetap. Bus ini dapat menyuplai penuh berdasarkan ketetapan daya aktif.

3. *Load bus* (PQ Bus) merupakan bus yang terhubung dengan beban dimana daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) telah diketahui dan bernilai tetap. Nilai magnitudo tegangan (V) dan sudut phasa perlu dihitung.

Data yang diperlukan untuk studi analisis aliran daya suatu sistem tenaga listrik yaitu data-data pada bus sistem dan data-data pada saluran transmisi sistem. Data-data yang terdapat pada tiap bus terdiri dari :

1. Magnitudo tegangan (V) dalam satuan per unit (p.u);
2. Sudut tegangan;
3. Daya pembangkitan berupa daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada bus pembangkit;
4. Daya pembebanan berupa daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada bus beban.

Data-data yang terdapat pada saluran transmisi terdiri dari :

1. Tap transformator;
2. Rating tegangan (dalam satuan kV);
3. Resistansi saluran transmisi (per unit);
4. Reaktansi saluran transmisi (per unit).

2.1.2 Sistem Per Unit (p.u)

Dalam melakukan perhitungan analisis aliran daya diperlukan perubahan konsep nilai satuan menjadi nilai-nilai dalam satuan per unit (p.u) dengan tujuan untuk mempermudah dalam perhitungan dan analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik. Dimana rumusan dasar dalam mencari satuan per unit (p.u) adalah sebagai berikut [3]:

$$pu = \frac{Actual}{Base} \quad (2.1)$$

Untuk mencari nilai dari arus dasar (I_{Base}), dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$I_{Base} = \frac{KVA_{Base-1\phi}}{KV_{Base-LN}} \quad (2.2)$$

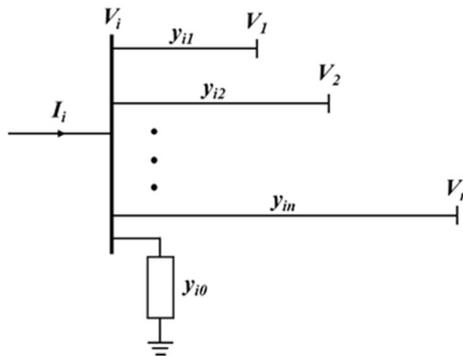
Untuk mencari nilai impedansi dasar (Z_{Base}), dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$Z_{Base} = \frac{(KV_{Base-LN})^2 \times 1000}{KVA_{Base-1\phi}} \quad (2.3)$$

$$Z_{Base} = \frac{(KV_{Base-LN})^2}{MVA_{Base-1\phi}} \quad (2.4)$$

2.1.3 Persamaan Aliran Daya

Dalam referensi Hadi Saadat telah dimodelkan persamaan-persamaan yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang berkaitan dengan analisis aliran daya. Pada gambar 2.1 merupakan gambaran sederhana dari tipikal bus pada sistem tenaga listrik. Pada gambar tersebut dijabarkan proses aliran arus dari bus dan kemudian melewati besaran admitansi pada masing-masing bus, juga digambarkan tegangan pada bus dan tiap-tiap saluran transmisinya.



Gambar 2.1 Tipikal Bus pada Sistem Tenaga Listrik [1],[3],[4]

Admitansi-admitansi tersebut dijadikan dalam satuan per unit (p.u) dengan rumusan nilai dasar dibagi dengan *base* MVA sistem. Untuk mencari nilai per unit (p.u) untuk arus dasar menggunakan persamaan (2.2) dan impedansi dasar menggunakan persamaan (2.3) dan persamaan (2.4).

Pada gambar 2.1, bisa dihitung nilai dari tegangan bus dan arus yang diwakili dengan persamaan-persamaan matriks admitansi sebagai berikut [3]:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$I_{Bus} = Y_{Bus} \cdot V_{Bus} \quad (2.6)$$

Keterangan:

- n = Jumlah total *node* bus
- Y_{11} = Admitansi dari *node* i
- Y_{12} = Admitansi dari *node* i dan j
- V_i = Tegangan fasor pada *node* i
- I_i = Arus fasor ke *node* i

Dari persamaan (2.5) di atas, dapat dicari nilai arus yang masuk pada bus dengan menggunakan hukum kirchoff yang dijabarkan oleh persamaan sebagai berikut [3]:

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (2.7)$$

$$I_i = V_i(y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}) - V_1y_{i1} - V_2y_{i2} - \dots - V_ny_{in} \quad (2.8)$$

Keterangan:

- I_i = Arus pada bus i
- V_i = Tegangan pada bus i
- Y_{i0} = Admitansi antara bus i dan bus n
- Y_{in} = Admitansi antara bus i ke tanah

Dari persamaan (2.7) dan (2.8) di atas, dapat ditulis kembali menjadi persamaan sebagai berikut:

$$I_i = V_i \cdot \sum_{j=0}^n (y_{ij}) - \sum_{j=1}^n (y_{ij} V_j), \quad j \neq 1 \quad (2.9)$$

Keterangan:

- I_i = Arus pada bus i
- V_i, V_j = Tegangan pada bus i dan bus j
- Y_{ij} = Admitansi antara bus i dan bus j

Sehingga daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah persamaan sebagai berikut:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad (2.10)$$

Atau :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.11)$$

Keterangan:

- I_i = Arus pada bus i
- V_i = Tegangan pada bus i
- P_i = Daya aktif pada bus i
- Q_i = Daya reaktif pada bus i

Sehingga akan didapatkan hubungan persamaan antara daya aktif dan reaktif dengan admitansi pada saluran transmisi sistem menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \cdot \sum_{j=0}^n (y_{ij}) - \sum_{j=1}^n (y_{ij} V_j) \quad (2.12)$$

Keterangan:

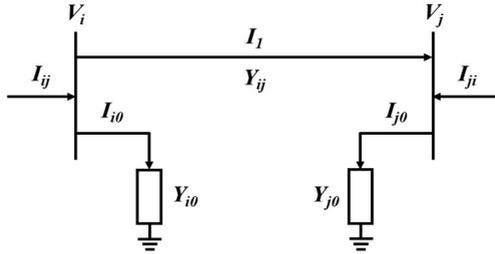
- y_{ij} = Admitansi antara bus i dan bus j
- V_i = Tegangan pada bus i
- P_i = Daya aktif pada bus i
- Q_i = Daya reaktif pada bus i

Dari persamaan (2.12) diketahui bahwa untuk mencari suatu nilai aliran daya yang terjadi pada bus i , dibutuhkan adanya suatu iterasi

dikarenakan pada persamaan di atas merupakan suatu persamaan aljabar yang bersifat non-linear.

2.1.4 Perhitungan Aliran Daya

Untuk melakukan perhitungan aliran daya pada sistem tenaga listrik, maka berdasarkan referensi [1], diasumsikan terjadi aliran daya antara 2 bus (i dan j) yang ditunjukkan pada gambar 2.2:



Gambar 2.2 Pemodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya [1],[3],[4]

Aliran arus I_{ij} mengalir dari bus i menuju bus j , sehingga apabila dilihat dari bus j , maka aliran arus dari bus i , bernilai positif, sehingga besar arus yang mengalir dari bus i menuju bus j adalah sebagai berikut:

$$I_{ij} = I_1 + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (2.13)$$

Apabila dilihat dari sisi bus j , maka aliran arus akan bernilai negatif dan digambarkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_{ji} = -I_1 + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (2.14)$$

Kemudian untuk menghitung daya kompleks S_{ij} yang mengalir dari bus i ke bus j dan daya kompleks S_{ji} dari bus j ke bus i adalah sebagai berikut:

$$S_{ij} = V_i \cdot I_{ij}^* = V_i(V_i^* - V_j^*)y_{ij}^* + V_iV_i^*y_{i0}^* \quad (2.15)$$

$$S_{ji} = V_j \cdot I_{ji}^* = V_j(V_j^* - V_i^*)y_{ij}^* + V_jV_j^*y_{j0}^* \quad (2.16)$$

Dari persamaan (2.15) dan (2.16) dapat diketahui besaran rugi-rugi daya yang timbul pada saluran transmisi, yang merupakan penjumlahan dari kedua persamaan diatas sebagai berikut [3]:

$$S_{TOTAL} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.17)$$

Keterangan:

S_{TOTAL} = Total rugi-rugi daya pada saluran transmisi (MW)

S_{ij} = Rugi-rugi saluran transmisi bus i ke j

S_{ji} = Rugi-rugi saluran transmisi bus j ke i

2.1.5 Aliran Daya dengan Metode Newton-Raphson

Aliran daya pada sistem tenaga listrik dapat diselesaikan dengan menggunakan berbagai macam metode seperti metode *Gauss Siedel*, metode *Newton-Raphson*, metode *Fast Decoupled*, dan metode lainnya. Metode Newton-Raphson sebenarnya secara sistematis hampir sama seperti metode *Gauss Siedel*, akan tetapi metode Newton-Raphson lebih efisien dan praktis dalam menyelesaikan permasalahan studi aliran daya pada sistem tenaga listrik yang besar. Metode Newton-Raphson ini memiliki konvergensi kuadratik yang baik, perhitungan lebih cepat, dan jumlah iterasi yang sedikit. Untuk sistem tenaga yang besar, penggunaan metode ini lebih praktis dan efisien, karena banyaknya iterasi yang diperlukan untuk memperoleh solusi yang tidak terikat pada ukuran sistem. Dalam masalah aliran daya, daya aktif dan tegangan telah dispesifikasikan pada bus kontrol tegangan, sehingga persamaan aliran daya dapat diselesaikan atau dirumuskan ke dalam bentuk polar [1].

Dari gambar 2.2 dapat dihitung arus yang masuk ke bus i yang dituliskan oleh persamaan (2.9) dan ditulis ulang menjadi persamaan sebagai berikut:

$$I_i = \sum_{j=1}^n (Y_{ij} \cdot V_j) \quad (2.18)$$

Dari persamaan diatas, apabila diubah dalam bentuk polar, maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle (\theta_{ij} + \delta_j) \quad (2.19)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.19) untuk nilai I_i ke dalam persamaan (2.10), maka didapatkan daya kompleks pada bus i sebagai berikut:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle (\theta_{ij} + \delta_j) \quad (2.20)$$

Dengan memisalkan komponen riil dan imajinernya didapatkan daya aktif dan reaktif pada bus i sebagai berikut:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.21)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.22)$$

Persamaan (2.21) dan (2.22) merupakan persamaan non-linear yang terdiri dari variabel bebas, dengan besaran tegangan dalam satuan per unit (p.u) dan sudut dalam radian. Untuk setiap bus terdapat dua persamaan untuk bus beban yaitu pada persamaan (2.21) dan (2.22) dan satu persamaan untuk bus generator. Kedua persamaan di atas dikembangkan dari deret Taylor pada persamaan berikut [1]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V_2|^{(k)} \\ \dots \\ \Delta |V_n|^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Pada permasalahan di atas, diasumsikan bahwa bus ke-1 merupakan *slack* bus. Matriks Jacobian memberikan hubungan linear antara perubahan kecil dalam sudut tegangan $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta|V_2^{(k)}|$ dan dengan perubahan kecil pada daya aktif dan reaktif ($\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$). Elemen-elemen pada matriks Jacobian merupakan turunan parsial atau sebagian dari persamaan (2.21) dan (2.22) yang diturunkan terhadap $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan $\Delta|V_i^{(k)}|$. Dalam pemodelan pendek, dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \text{---} \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ \text{---} & \text{---} \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \text{---} \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Untuk bus generator atau *Voltage-Controlled* bus, besar tegangan diketahui. Oleh karena itu, jika dalam suatu sistem yang terdiri dari n bus, m bus generator, maka terdapat m persamaan untuk ΔV dan ΔQ pada kolom matriks Jacobian dihilangkan. Juga terdapat konstrain yang berkaitan dengan daya aktif adalah $n-1$, dan konstrain daya reaktif yaitu $n-1-m$. Sedangkan ukuran matriks Jacobian yaitu $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$. Untuk elemen J_1 memiliki ukuran matriks $(n-1) \times (n-1)$. Untuk elemen J_2 memiliki ukuran $(n-1) \times (n-1-m)$. Untuk elemen J_3 memiliki ukuran matriks $(n-1-m) \times (n-1)$. Untuk elemen J_4 memiliki ukuran $(n-1-m) \times (n-1-m)$. Untuk persamaan diagonal dan *off*-diagonal dari elemen J_1 yaitu :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq 1 \quad (2.26)$$

Untuk persamaan diagonal dan *off*-diagonal dari elemen J_2 yaitu :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) + \sum_{j \neq 1}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq 1 \quad (2.28)$$

Untuk persamaan diagonal dan *off*-diagonal dari elemen J3 yaitu :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq 1 \quad (2.30)$$

Untuk persamaan diagonal dan *off*-diagonal dari elemen J2 yaitu :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) + \sum_{j \neq 1}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq 1 \quad (2.32)$$

Dari penjabaran rumus diatas maka akan didapatkan aliran kesetimbangan daya pada bus i , untuk mendapatkan persamaan daya *schedulling*, daya sisa (*power residual/power mismatch*) dan perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus yang baru. Sehingga persamaan daya *schedulling* didapatkan sebagai berikut [3]:

$$P_i^{SCH} = P_{Gi} - P_{Di} \quad (2.33)$$

$$Q_i^{SCH} = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (2.34)$$

Kemudian didapatkan pula persamaan daya sisa (*power residual*) sebagai berikut:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{SCH} - P_i^{(k)} \quad (2.35)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{SCH} - Q_i^{(k)} \quad (2.36)$$

Sehingga didapatkan magnitudo dan sudut baru untuk tegangan bus dengan persamaan sebagai berikut [3]:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.37)$$

$$\left| V_i^{(k+1)} \right| = \left| V_i^{(k)} \right| + \Delta \left| V_i^{(k)} \right| \quad (2.38)$$

2.2 Optimal Power Flow

Aliran daya optimal (*Optimal Power Flow*) merupakan bentuk pengembangan dari *Economic Dispatch* (ED) konvensional dengan mempertimbangkan aliran daya saluran transmisi dan bertujuan untuk menentukan pengaturan variabel kontrol optimal dengan memperhatikan berbagai macam batasan yang ada. OPF dapat mengatur pembebanan masing-masing pembangkit yang terinterkoneksi dengan mempertimbangkan beberapa batasan tertentu untuk mendapatkan biaya pembangkitan yang paling murah. Analisa aliran daya optimal dapat melalui bentuk *DC* maupun *AC*. Untuk sistem interkoneksi yang besar, hasil perhitungan *DCOPF* dinilai kurang akurat, tetapi memiliki kelebihan sendiri dari segi penyederhanaan dan perhitungan yang cepat. Karena tingkat akurasi perhitungan akan mempengaruhi nilai ekonomis, maka dari itu diperlukan analisa berdasarkan *ACOPF* [4]. Meskipun model jaringan AC lebih rumit untuk dioptimisasi, tetapi pemodelan AC akan menggambarkan karakter jaringan yang lebih nyata melalui pemodelan *losses*, dan perubahan tegangan yang selanjutnya dapat menawarkan manajemen risiko dan bagaimana cara memenuhi persyaratan dalam memenuhi pendapatan.

Pada dasarnya *ACOPF* digunakan untuk menemukan biaya pembangkitan yang optimal, sehingga persamaan fungsi objektif OPF untuk arus bolak-balik (*ACOPF*) pada umumnya merupakan persamaan orde dua yang dimodelkan melalui persamaan sebagai berikut [4]:

$$MinGenCost = \sum_{i \in G} C_i (P_{Gi}) = \sum_{i \in G} (C_2 P_{Gi}^2 + C_1 P_{Gi} + C_0) \quad (2.39)$$

Dalam aliran daya optimal, batasan persamaan (*equality constraint*) dan pertidaksamaan (*inequality constraint*) harus dipenuhi

untuk hasil yang optimal. *Equality constraint* adalah batas dari keseimbangan aliran daya aktif dan reaktif (*Power Balance*), sedangkan *inequality constraint* adalah batas dari setiap saluran yang biasanya digunakan sebagai batas keamanan sistem yang digunakan. Persamaan matematis dari *equality constraint* memiliki persamaan sebagai berikut [5]:

$$P_{Gm} - P_{Dm} = V_m \sum_{n=1}^{NB} V_n (G_{mn} \cos(\theta_m - \theta_n) + B_{mn} \sin(\theta_m - \theta_n)) \quad (2.40)$$

$$Q_{Gm} - Q_{Dm} = V_m \sum_{n=1}^{NB} V_n (G_{mn} \sin(\theta_m - \theta_n) + B_{mn} \cos(\theta_m - \theta_n)) \quad (2.41)$$

Untuk *Inequality constraint* dalam perhitungan aliran daya optimal mempunyai beberapa parameter yang harus dipenuhi, diantaranya sebagai berikut:

1. Batasan Pembangkitan

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max} ; Q_{Gi,min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max} \quad (2.42)$$

2. Batasan Tegangan

$$V_{m,min} \leq V_m \leq V_{m,max} ; i = 1, 2, \dots, Nb \quad (2.43)$$

3. Batasan Panas (*Thermal*) Saluran Transmisi

$$S_l \leq S_{l,Max} \quad (2.44)$$

Keterangan :

- GenCost* : Total biaya pembangkitan
- C₁, C₂ C₃* : Koefisien dari biaya pembangkitan
- C_i* : Koefisien dari biaya pembangkitan pada unit *i*
- G* : Unit generator pembangkit
- G_{mn}* : Nilai konduktansi dari admitansi saluran *m-n*
- B_{mn}* : Nilai suseptansi dari admitansi saluran *m-n*
- V_m* : Tegangan pada bus *m*
- θ_m* : Sudut fasa tegangan pada bus *m*
- θ_n* : Sudut fasa tegangan pada bus *n*
- P_{Gi}* : Daya aktif pembangkit pada bus *i*

- Q_{Gi} : Daya reaktif pembangkit pada bus i
- P_{Di} : Permintaan daya aktif pada bus i
- Q_{Di} : Permintaan daya reaktif pada bus i
- S_i : Aliran daya pada saluran l

Dalam melakukan optimisasi, khususnya dalam permasalahan non-linear ini, *Sequential Quadratic Programming* merupakan salah satu metode yang unggul dalam hal efisiensi, akurasi, dan prosentase solusi sukses dalam sejumlah tes permasalahan apabila dibandingkan dengan metode lain. *Sequential Quadratic Programming* dilakukan dalam tiga tahap, pertama adalah pembentukan matriks *Hessian* dari fungsi *Lagrangian* menggunakan metode Quasi-Newton dari data sistem yang digunakan, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan permasalahan dalam *Quadratic Programming* yang akhirnya akan digunakan sebagai pencari nilai konvergensi pada daerah *feasible* yang diperbolehkan, sesuai dengan batasan-batasan yang ditentukan [5].

2.3 Perangkat FACTS

Perangkat FACTS (*Flexible AC Transmission System*) merupakan peralatan yang menggunakan konsep elektronika daya. Perangkat FACTS ini memanfaatkan penggunaan peralatan thyristor sebagai aplikasi dari elektronika daya. Dengan memanfaatkan kontrol elektronika daya, FACTS menjadi pilihan utama untuk melakukan kompensasi sekaligus kontrol. FACTS mampu memanfaatkan saluran transmisi sistem pada batas pembebanan (beban pembangkit *thermal*) tanpa perlu mengkhawatirkan terjadinya gangguan seperti kelebihan beban (*overload*) [6]. Keadaan ini menjadi sangat penting untuk menambah kapasitas penyaluran daya tanpa dilakukan penambahan jumlah saluran transmisi yang baru.

Berikut merupakan beberapa contoh peralatan FACTS yang telah digunakan dengan fungsi masing-masing [7]:

1. *Thyristor-Controlled Phase Shifter* (PS) : Kontroler yang diaplikasikan pada transformator dengan pergantian fasa yang diatur oleh thyristor untuk pergantian sudut fasa yang cepat.
2. *Load Tap Changer* (LTC) : Kontroler yang prinsipnya diatur oleh thyristor.
3. *Thyristor-Controlled Reactor* (TCR) : Kontroler yang terkoneksi paralel dengan saluran transmisi dengan mengatur reaktansi saluran transmisi.

4. *Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC)* : Kontroler pengembangan dari TCR yang dikombinasikan dengan kapasitor secara seri.
5. *Static VAR Compensator (SVC)* : Kontroler yang kinerjanya mengatur kestabilan tegangan bus pada saluran transmisi.
6. *Interphase Power Controller (IPC)* : Kontroler yang terhubung seri dengan induktor dan kapasitor. Untuk memisahkan besar tegangan saat terjadinya pergantian fasa.
7. *Static Compensator (STATCOM)* : Kontroler berupa kondensator ini terhubung paralel dengan sistem transmisi yang digunakan untuk mengontrol tegangan dan daya reaktif injeksi pada bus sistem.
8. *Solid-State Series Controller (SSSC)* : Kontroler yang hampir sama seperti STATCOM tetapi terhubung secara seri dengan sistem transmisi yang digunakan untuk mengontrol tegangan dan daya reaktif pada terminal transformator.
9. *Unified Power Flow Controller (UPFC)* : Kontroler gabungan dari STATCOM dan SSSC yang digunakan untuk injeksi tegangan secara seri yang dapat dikontrol besaran tegangan, impedansi saluran, dan aliran daya aktif dan reaktifnya.

Untuk memilih perangkat FACTS yang akan digunakan dapat disesuaikan dengan tujuan penggunaan dan pemasangan perangkat FACTS atau melihat dari persamaan dibawah ini:

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{x_{ij}} \sin(\theta_{ij}) \quad (2.45)$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} (V_i^2 - V_i V_j \cos(\theta_{ij})) \quad (2.46)$$

Keterangan:

V_i, V_j : Tegangan pada bus i dan bus j

X_{ij} : Reaktansi saluran transmisi

θ_{ij} : Sudut fasa antara V_i dan V_j (bentuk phasor)

Apabila dilihat dari kedua persamaan tersebut (2.45) dan (2.46), maka dapat disimpulkan bahwa daya aktif sangat dipengaruhi oleh θ_{ij} dan daya reaktif dipengaruhi oleh V_i dan V_j . Sedangkan reaktansi saluran sistem mempengaruhi keduanya. Sehingga dibutuhkan perangkat FACTS berupa *Static VAR Compensator* (SVC) untuk mengontrol daya reaktif pada sistem tenaga listrik.

2.3.1 Static VAR Compensator (SVC)

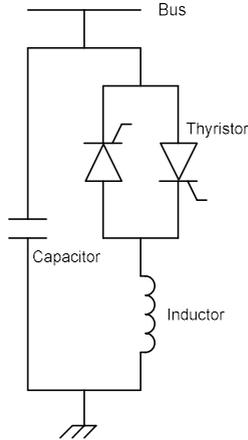
Static VAR Compensator (SVC) merupakan salah satu perangkat FACTS yang digunakan untuk menyediakan daya reaktif yang dapat beroperasi atau bertindak cepat pada saluran transmisi listrik tegangan tinggi. SVC mampu memberikan suseptansi variable secara terus-menerus yang dianggap sebagai *switching* komponen pada kapasitor. Oleh karena itu, SVC merupakan perangkat pilihan yang dapat mengurangi terjadinya *drop* tegangan transien pada sistem. Ketika SVC mencapai kapasitas maksimumnya, kinerjanya menjadi identik dengan kapasitor *shunt* sederhana [8], [9].

Selain itu, SVC berfungsi juga untuk mengontrol aliran daya reaktif dengan cara menginjeksikan atau menyerap daya reaktif tersebut dari saluran. Pada saat tegangan sistem rendah (*low voltage*), SVC akan menginjeksikan daya reaktif dengan cara membangkitkan daya reaktif pada SVC (SVC bersifat kapasitif) yang berasal dari *capacitor bank*. Akan tetapi sebaliknya, apabila tegangan mengalami kenaikan (*over voltage*), maka SVC akan menyerap daya reaktif tersebut (SVC bersifat induktif) sehingga dipasanglah reaktor pada bus sistem transmisinya. Pengaturan besaran daya reaktif yang diserap atau diinjeksikan dipengaruhi oleh pengaturan sudut penyalaan (α) pada *thyristor*. Pada gambar 2.3 merupakan rangkaian dasar dari perangkat SVC yang akan dipasang atau dihubungkan dengan saluran transmisi sebagai berikut :

$$B_L(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi X_S} \quad (2.47)$$

Dimana,

$\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$; Sudut penyulutan (*firing angle*) *thyristor*



Gambar 2.3 Konfigurasi Dasar dari Perangkat SVC [7]

Sedangkan, untuk batasan maksimum Q_{SVC} dan minimum Q_{SVC} dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{Min} = B_{INDUCTOR} \cdot V_{Reff}^2 \quad (2.48)$$

$$Q_{Max} = B_{CAPACITOR} \cdot V_{Reff}^2 \quad (2.49)$$

Dengan,

$$B_{inductor} = \frac{1}{X_L} \text{ dan } B_{capacitor} = \frac{1}{X_C} \quad (2.50)$$

Apabila SVC yang dipasang dengan kapasitas Q_{SVC} MVA pada sisi beban, maka faktor dayanya akan semakin baik sehingga menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\cos(\theta_1) = \frac{P_l}{S_l} \quad (2.51)$$

Faktor daya yang semula disebut dengan $\cos \theta_1$ dan diperbaiki menjadi $\cos \theta_2$ maka, besarnya daya reaktif Q_{SVC} dapat ditentukan dengan persamaan:

$$Q_{New} = P(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (2.52)$$

Besar nilai susceptansi B_{SVC} yang ditentukan dengan persamaan aliran daya dan daya reaktif yang dihasilkan oleh SVC dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$B_{SVC} = \frac{Q_{SVC}}{-V_{BUS}^2} \quad (2.53)$$

Dengan keseimbangan daya reaktif pada bus k berada pada *range* nilai dengan persamaan sebagai berikut:

$$B_{SVC Min} \leq B_{SVC} \leq B_{SVC Max} \quad (2.54)$$

2.3.2 Penempatan Perangkat FACTS

Perangkat FACTS sangat efektif untuk mempertahankan sistem operasi dengan aman dan ekonomis, apabila perangkat FACTS tersebut dipasang atau diletakkan di lokasi dan dengan kapasitas yang optimal dan menguntungkan. Oleh karena itu, pendekatan FACTS sangat diperlukan untuk memberikan analisis biaya secara detail untuk menghindari terjadinya pemilihan keputusan investasi yang salah. Rumusan permasalahan ini dikategorikan sebagai permasalahan bersifat *integer* untuk menentukan lokasi perangkat dan dikategorikan sebagai pemrograman *non-linear* sebagai dampak dari perangkat dipasang dan dievaluasi dalam operasi sistem tenaga listrik yang bersifat *non-linear* [10].

Fungsi objektif dari permasalahan ini untuk meminimalkan biaya investasi pemasangan perangkat dan memaksimalkan manfaat ekonomis dari dipasangnya perangkat. Batasan sistem operasi terdiri dari 2 yaitu kondisi normal dan kondisi darurat dengan beberapa pertimbangan aspek tingkat beban, dan aspek lainnya.

Fungsi objektif permasalahan sebagai berikut:

$$\text{Minimize } .F(c, w) = I(c) - \varepsilon B(c, w) \quad (2.55)$$

Keterangan:

- I : Biaya investasi perangkat FACTS
- c : Vektor *denotes* untuk investasi perangkat FACTS
- B : Manfaat dipasangnya perangkat FACTS

- w : Vektor *denotes* untuk sistem operasi
 ε : Koefisien untuk sinkronisasi waktu frame antara biaya investasi dan biaya operasi.

Biaya investasi perangkat FACTS tergantung pada jenis dan kapasitas perangkat, dimana unit kapasitas perangkat yaitu MVAR. Untuk berbagai jenis perangkat FACTS, biaya investasi perangkat per-MVAR yang terinstal akan berbeda satu sama lain. Persamaan total biaya investasi dijabarkan sebagai berikut [10]:

$$I(c) = \sum_{l=1}^N \sum_{\Omega} (S_l \cdot C_l) \quad (2.56)$$

Keterangan:

- I : Biaya investasi perangkat FACTS
 C : Kapasitas perangkat FACTS (MVAR)
 S : Biaya investasi perangkat per MVAR
 l : Vektor *denotes* untuk perangkat FACTS
 Ω : Lokasi perangkat FACTS

Dengan konstrain perangkat FACTS sebagai berikut:

$$0 \leq C \leq C_{Max} \quad (2.57)$$

Konstrain operasi sistem sebagai berikut:

$$H(z) = H(c, x, u) = 0 \quad (2.58)$$

$$G(z) = G(c, x, u) \leq 0 \quad (2.59)$$

Keterangan:

- C : Kapasitas perangkat FACTS yang terpasang
 C_{max} : Kapasitas maksimum perangkat FACTS yang terpasang
 x, u : Status dan vektor kontrol pada sistem
 c : Vektor kontrol untuk perangkat FACTS

2.3.3 Biaya Investasi Pemasangan Perangkat FACTS

Pada simulasi, SVC dimodelkan sebagai generator tanpa daya nyata sehingga hanya memodelkan injeksi daya reaktif yang terpasang pada sistem. Biaya investasi pemasangan SVC dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C_{SVC} = 0.0003.S_{SVC}^2 - 0.3051.S_{SVC} + 127.38 \quad (2.60)$$

$$IC_{dev} = \sum_{n \in N} S_{SVC,n} \cdot C_{SVC,n} \quad (2.61)$$

Dimana, IC_{dev} adalah biaya investasi perangkat, C_{SVC} adalah kapasitas SVC dalam MVar setiap lokasi, S_{SVC} adalah biaya investasi SVC per MVar-yang terpasang, dan N adalah kandidat lokasi terpasangnya SVC.

Kemudian biaya tersebut harus dirubah menjadi biaya instalasi perangkat FACTS dalam waktu per-tahun dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$AIC_{dev} = IC_{dev} \frac{ir(1+ir)^{LT}}{(1+ir)^{LT} - 1} \quad (2.62)$$

Dimana, ir adalah suku bunga dan LT adalah masa pakai perangkat FACTS

2.4 Particle Swarm Optimization (PSO)

Metode PSO ini pertama kali diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhard pada tahun 1995. Metode PSO ini menerapkan perilaku sosial dari kawanan burung atau ikan ketika mencari makan dalam suatu kelompok. Metode PSO ini menjadi salah satu teknik komputasi evolusioner, dimana populasi pada metode ini didasarkan pada penelusuran algoritma dan diawali dengan suatu populasi yang dipilih secara random yang disebut sebagai partikel [11].

Dalam metode PSO ini, setiap partikel dalam populasi memiliki dua parameter berupa posisi dan kecepatan. Dimana setiap partikel akan terus bergerak dan berpindah posisi melalui penelusuran ruang-ruang atau dimensi dengan kecepatan yang dinamis yang disesuaikan menurut perilaku historisnya. Oleh karena itu, partikel-partikel tersebut mempunyai kecenderungan untuk bergerak menuju area-area penelusuran yang lebih baik setelah melewati proses penelusuran tersebut. Pada algoritma PSO, vektor kecepatan diupdate untuk masing-masing partikel yang kemudian menjumlahkan vektor kecepatan tersebut ke posisi partikel. Update kecepatan tersebut dipengaruhi oleh kedua solusi yaitu personal best ($Pbest$) yang berhubungan dengan hasil terbaik sementara pada populasi awal, sedangkan global best ($Gbest$) yang berhubungan dengan hasil paling baik secara keseluruhan dari hasil sebelumnya jika

dibandingkan dengan hasil dari personal best. Jika solusi personal best mempunyai hasil yang kurang dari hasil solusi global maka solusi personal best yang akan menggantikan posisi global best. Berikut alur sederhana dari proses optimasi algoritma PSO [11]:

1. Inisialisasi Posisi Partikel

Proses inisialisasi posisi partikel ini didasarkan pada banyaknya partikel yang digunakan sebagai proses optimasi, batas atas dan batas bawah pencarian untuk setiap variabel dan banyaknya variabel yang memiliki nilai optimal. Inisialisasi pada masing-masing partikel menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Posisi Partikel} = & \text{Batas Bawah} + (\text{Batas Atas} \\ & - \text{Batas Bawah}) \times \text{rand}(1, \text{Jumlah Partikel}) \end{aligned} \quad (2.63)$$

2. Inisialisasi Kecepatan Partikel

Inisialisasi kecepatan partikel dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut:

$$V_{min} = 0 \quad (2.64)$$

$$V_{max} = \frac{1}{2} (\text{Batas Atas} - \text{Batas Bawah}) \quad (2.65)$$

$$V_{particle} = (V_{max} - V_{min}) \cdot \text{rand}(1, \text{Jumlah Partikel}) + V_{min} \quad (2.66)$$

3. Penentuan Pbest dan Gbest Awal

Penentuan posisi terbaik setiap partikel ini berdasarkan pada posisi dari masing-masing partikel sehingga setiap partikel menganggap bahwa posisi yang dimilikinya merupakan posisi terbaik sementara. Penentuan posisi secara global terbaik dilakukan dengan mencari posisi yang paling optimal dari seluruh partikel pada satu kelompok. Hal ini menjadi informasi yang sangat penting bagi setiap partikel karena menjadi acuan pergerakan untuk iterasi menuju posisi berikutnya.

4. Update Kecepatan dan Posisi Partikel

Update kecepatan dan posisi partikel ini dilakukan ketika partikel telah memiliki posisi yang belum optimal. Pada proses update

kecepatan dan posisi menggunakan konstanta c_1 dan c_2 , dimana c_1 merupakan konstanta akselerasi 1 (kognitif) sedangkan c_2 merupakan konstanta akselerasi (sosial). Dan juga menggunakan konstanta penimbang $weight$ (w) yang digunakan untuk mengatur eksplorasi global dan personal/lokal pada setiap partikel untuk setiap iterasinya. Jumlah pergerakan partikel akan sama dengan jumlah iterasi yang diterapkan pada proses optimisasi. Fungsi perbaikan penimbang ($weight$) ditentukan oleh persamaan sebagai berikut:

$$w(t) = (w_{max} - w_{min})x \left(\frac{iter_{max} - iter_{min}}{iter_{max}} \right) + w_{min} \quad (2.67)$$

Fungsi penimbang ($inertia\ weight$) yang besar memudahkan dalam penelusuran global sedangkan untuk $inertia\ weight$ yang kecil memudahkan dalam penelusuran personal/lokal. Nilai $inertia\ weight$ pada umumnya diset antara nilai 0.4 sampai 0.9. Untuk persamaan $update$ kecepatan dan posisi partikel dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V(t+1) &= w(t) * V(t) + c_1 * r_1(t) * (P_{Best}(t) - X(t)) + c_2 * r_2(t) * (G_{Best}(t) - X(t)) \\ X(t+1) &= X(t) + V(t+1) \end{aligned} \quad (2.68)$$

Keterangan :

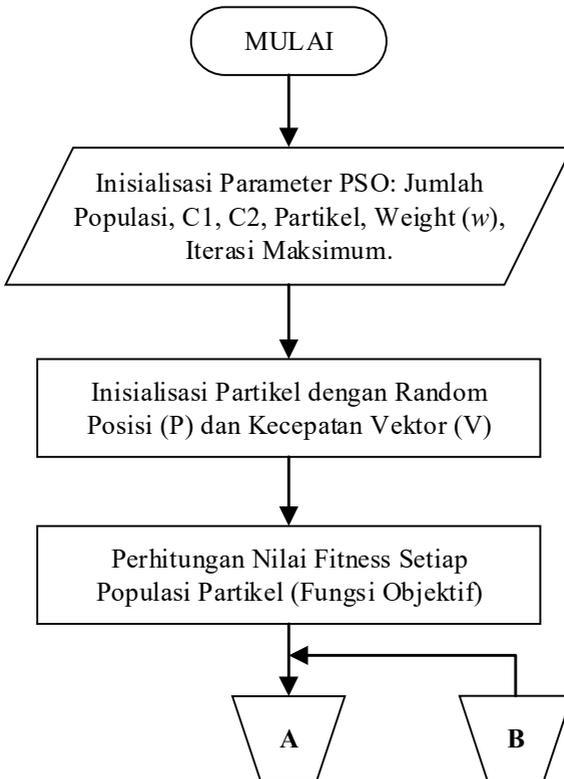
- $W(t)$ = Konstanta penimbang ($weight$)
- W_{Max} = Nilai penimbang maksimum
- W_{Min} = Nilai penimbang minimum
- $Iter_{max}$ = Iterasi maksimum
- $Iter_{min}$ = Iterasi minimum
- $Iter(t)$ = Iterasi ke- t
- t = iterasi
- $V(t)$ = Kecepatan partikel saat iterasi ke- t
- $V(t+1)$ = Kecepatan partikel saat iterasi berikutnya ke $t+1$
- $X(t)$ = Posisi partikel saat iterasi ke- t
- $X(t+1)$ = Posisi partikel saat iterasi ke $t+1$
- c_1 = Konstanta akselerasi 1
- c_2 = Konstanta akselerasi 2
- $r1(t)$ = Bilangan acak terdistribusi seragam antara 0 dan 1
- $r2(t)$ = Bilangan acak terdistribusi seragam antara 0 dan 1
- $Pbest(t)$ = Posisi terbaik lokal saat iterasi ke- t

$Gbest(t)$ = Posisi terbaik global saat iterasi ke- t

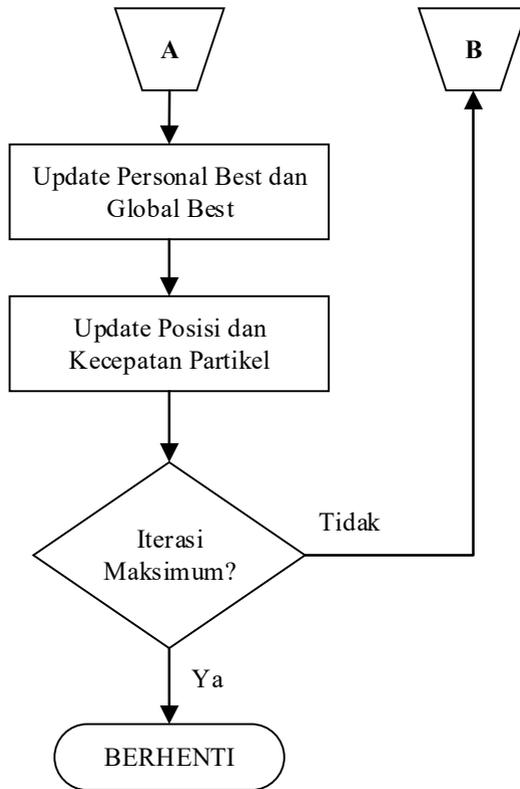
5. Penentuan Pbest dan Gbest Akhir

Proses berikutnya yaitu menentukan Pbest dan Gbest akhir yang diharapkan memiliki nilai optimisasi dari suatu permasalahan yang akan dihadapi.

Untuk lebih sederhananya, algoritma proses optimisasi dengan menggunakan metode PSO dapat digambarkan pada diagram alur seperti gambar berikut:



Gambar 2.4 Diagram Alur Metode PSO



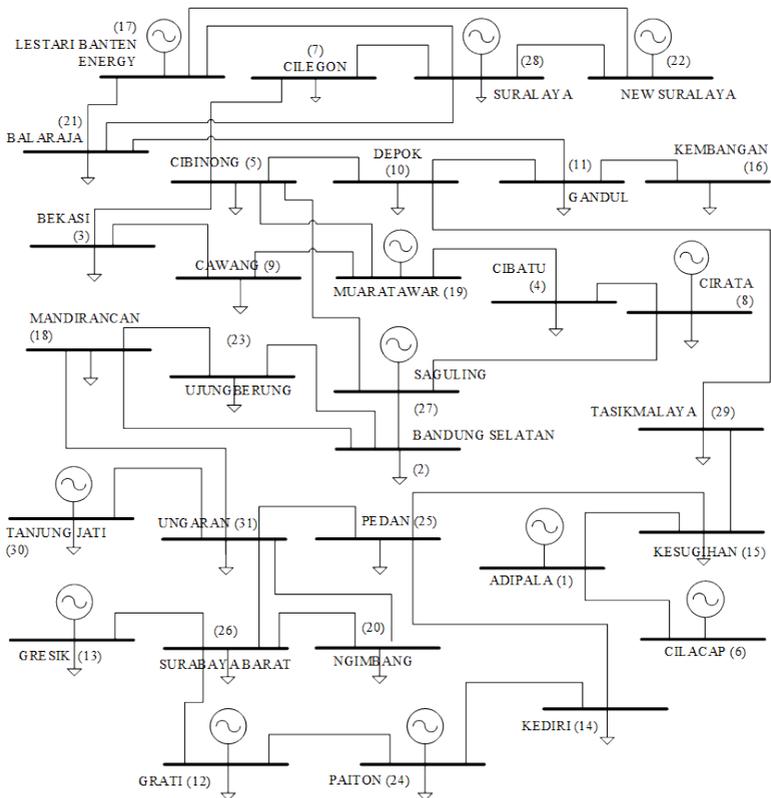
Gambar 2.4 Diagram Alur Metode PSO

**** Halaman ini sengaja dikosongkan ****

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Data Sistem Kelistrikan Jawa-Madura-Bali 500 kV

Data pemodelan sistem tenaga listrik Jawa-Madura-Bali 500 kV yang saling terinterkoneksi digunakan untuk analisa kondisi kestabilan tegangan pada sistem tersebut. Data tersebut terdiri dari 31 bus gardu induk. *Single line diagram* sistem Jamali 500 kV pada tahun 2018 ditunjukkan seperti gambar 3.1.



Gambar 3.1 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan Jamali 500 kV Tahun 2018

Kemudian, pada tabel 3.1 di bawah menunjukkan data besar tegangan (satuan kV) bus untuk setiap kondisi yang akan dianalisa. Terdapat tiga kondisi beban yang akan dianalisa yaitu beban puncak siang, beban puncak malam, dan beban rendah.

Tabel 3.1 Data Tegangan Bus Setiap Kondisi Beban pada Sistem Jamali

No Bus	Nama Bus	Tegangan Bus Setiap Beban (kV)		
		Siang	Malam	Rendah
1	Adipala (PLTU)	515.91	521.29	521.62
2	Bandung Selatan	490.58	500.64	503.49
3	Bekasi	487.03	497.82	501.85
4	Cibatu	483.95	493.69	497.25
5	Cibinong	495.24	504.39	504.78
6	Cilacap (PLTU)	516.03	521.25	521.74
7	Cilegon	509.48	513.41	506.33
8	Cirata (PLTA)	488.24	497.79	500.65
9	Cawang	486.76	497.14	501.35
10	Depok	497.65	506.65	506.09
11	Gandul	498.61	507.39	506.29
12	Grati (PLTG)	496.32	501.47	490.47
13	Gresik (PLTGU)	482.33	497.21	490.94
14	Kediri	503.41	509.03	498.78
15	Kesugihan	515.51	521.36	521.21
16	Kembangan	499.20	507.45	505.35
17	Lestari Banten Energy (PLTU)	510.80	514.59	506.92
18	Mandirancan	499.80	508.82	507.95
19	Muaratawar (PLTGU)	492.12	500.19	501.64
20	Ngimbang	481.22	494.66	488.73
21	New Balaraja	504.98	510.84	506.81
22	New Suralaya (PLTU)	511.00	514.71	506.98
23	New Ujungberung	493.65	503.53	504.58
24	Paiton (PLTU)	512.57	515.69	495.55
25	Pedan	503.36	510.69	507.55

Tabel 3.1 Data Tegangan Bus Setiap Kondisi Beban pada Sistem Jamali (lanjutan)

No Bus	Nama Bus	Tegangan Bus Setiap Beban (kV)		
		Siang	Malam	Rendah
26	Surabaya Barat	482.89	496.19	489.61
27	Saguling (PLTA)	491.43	501.16	503.19
28	Suralaya (PLTU)	511.11	514.76	507.09
29	Tasikmalaya	512.96	520.58	519.29
30	Tanjung Jati (PLTU)	517.25	520.61	510.40
31	Ungaran	498.08	506.31	501.88

Pada Tabel 3.2, 3.3, dan 3.4 merupakan data beban untuk tiga kondisi beban sistem Jamali 500 kV yang akan dianalisa berupa beban puncak siang, beban puncak malam, dan beban rendah.

Tabel 3.2 Data Beban Puncak Siang dan Pembangkitan

No Bus	Nama Bus	Pembangkit		Beban	
		P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	Adipala	0	0	0	0
2	Bandung Selatan	0	0	619	292
3	Bekasi	0	0	622	267
4	Cibatu	0	0	1006	547
5	Cibinong	0	0	600	195
6	Cilacap	656	109	0	0
7	Cilegon	0	0	631	216
8	Cirata	303	35	467	144
9	Cawang	0	0	661	150
10	Depok	0	0	505	12
11	Gandul	0	0	422	99
12	Grati	266	53	563	258
13	Gresik	491	80	150	357
14	Kediri	0	0	454	252
15	Kesugihan	0	0	0	0
16	Kembangan	0	0	155	-58
17	Lestari Banten E	634	20	0	0
18	Mandirancan	0	0	96	49
19	Muaratawar	1214	85	0	0
20	Ngimbang	0	0	152	62

Tabel 3.2 Data Beban Puncak Siang dan Pembangkitan (lanjutan)

No Bus	Nama Bus	Pembangkit		Beban	
		P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
21	New Balaraja	0	0	1214	140
22	New Suralaya	568	243.13	0	0
23	New Ujungberung	0	0	0	0
24	Paiton	2731	621	642	65
25	Pedan	0	0	651	219
26	Surabaya Barat	0	0	1120	379
27	Saguling	112.23	184	0	0
28	Suralaya	2797	712	116	53
29	Tasikmalaya	0	0	123	67
30	Tanjung Jati	2278	660	248	90
31	Ungaran	0	0	693	516

Tabel 3.3 Data Beban Puncak Malam dan Pembangkitan

No Bus	Nama Bus	Pembangkit		Beban	
		P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	Adipala	0	0	0	0
2	Bandung Selatan	0	0	680	244
3	Bekasi	0	0	516	274
4	Cibatu	0	0	956	481
5	Cibinong	0	0	515	176
6	Cilacap	657	-38.36	0	0
7	Cilegon	0	0	636	206
8	Cirata	323	8.13	483	120
9	Cawang	0	0	589	119
10	Depok	0	0	492	-41
11	Gandul	0	0	378	-83
12	Grati	460	-176.77	571	249
13	Gresik	576	173.67	133	64
14	Kediri	0	0	643	204
15	Kesugihan	0	0	0	0
16	Kembangan	0	0	304	-16
17	Lestari Banten	635	72	0	0
18	Mandiracan	0	0	79	83
19	Muaratawar	1101	-160.43	0	0
20	Ngimbang	0	0	201	52

Tabel 3.3 Data Beban Puncak Malam dan Pembangkitan (lanjutan)

No Bus	Nama Bus	Pembangkit		Beban	
		P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
21	New Balaraja	0	0	1082	0
22	New Suralaya	569	117.27	0	0
23	New Ujungberung	0	0	0	0
24	Paiton	2747	785.78	822	115
25	Pedan	0	0	671	190
26	Surabaya Barat	0	0	1033	323
27	Saguling	222.59	227.55	0	0
28	Suralaya	2677	578.78	116	47
29	Tasikmalaya	0	0	281	62
30	Tanjung Jati	2240	511	281	57
31	Ungaran	0	0	621	469

Tabel 3.4 Data Beban Rendah dan Pembangkitan

No Bus	Nama Bus	Pembangkit		Beban	
		P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	Adipala	0	0	0	0
2	Bandung Selatan	0	0	302	115
3	Bekasi	0	0	740	-24
4	Cibatu	0	0	853	428
5	Cibinong	0	0	368	130
6	Cilacap	657	117.60	0	0
7	Cilegon	0	0	616	151
8	Cirata	0	0	348	58
9	Cawang	0	0	431	27
10	Depok	0	0	373	-108
11	Gandul	0	0	408	-163
12	Grati	222	-11.50	539	173
13	Gresik	290	109.80	122	-61
14	Kediri	0	0	295	190
15	Kesugihan	0	0	0	0
16	Kembangan	0	0	122	127
17	Lestari Banten	490	-142	0	0
18	Mandiracan	0	0	39	-5
19	Muaratawar	173	-8.40	0	0
20	Ngimbang	0	0	134	38

Tabel 3.4 Data Beban Rendah dan Pembangkitan (lanjutan)

No Bus	Nama Bus	Pembangkit		Beban	
		P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
21	New Balaraja	0	0	836	-28
22	New Suralaya	470	-29.64	0	0
23	New Ujungberung	0	0	244	0
24	Paiton	2926	84.10	626	-28
25	Pedan	0	0	486	107
26	Surabaya Barat	0	0	968	242
27	Saguling	0.5	115.40	0	0
28	Suralaya	2416	326.39	139	58
29	Tasikmalaya	0	0	104	8
30	Tanjung Jati	2235	319.45	160	13
31	Ungaran	0	0	464	331

3.2 Penambahan Perangkat SVC

Sistem tenaga listrik yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah sistem saluran transmisi Jawa-Madura-Bali 500 kV. Dalam simulasi ini akan dilakukan penempatan SVC pada bus sistem tersebut. Untuk penentuan penempatan lokasi awal SVC dilakukan berdasarkan besar tegangan yang melebihi atau kurang dari batas range tegangan yang telah ditentukan. Data parameter injeksi nilai rating SVC yang akan dioptimisasi pada sistem ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Data Parameter Batas Nilai Kapasitas SVC

Parameter	Nilai SVC
Qsvc Minimal	-100 Mvar
Qsvc Maksimal	100 Mvar

Percobaan dilakukan dengan melakukan penambahan SVC pada bus sistem transmisi Jawa-Madura-Bali 500 kV. Penambahan ini dilakukan dengan tujuan untuk mengkompensasi tegangan dan aliran daya pada sistem.

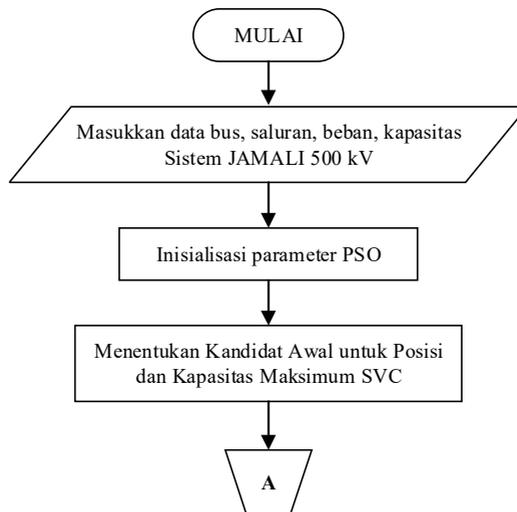
3.3 Penempatan dan Penentuan Rating SVC Menggunakan Metode PSO Untuk Mendapatkan Total Biaya Pembangkitan Minimum

Penentuan lokasi dan rating peralatan *Static VAR Compensator* (SVC) pada sistem kelistrikan 500 kV Jamali 2018 dapat menggunakan metode PSO seperti alur diagram pada Gambar 3.2 Dengan menggunakan metode PSO tersebut diharapkan dengan hasil biaya total pembangkitan yang minimum dan biaya investasi dengan adanya penempatan dan penentuan rating SVC dengan kondisi beban yang berbeda-beda tersebut.

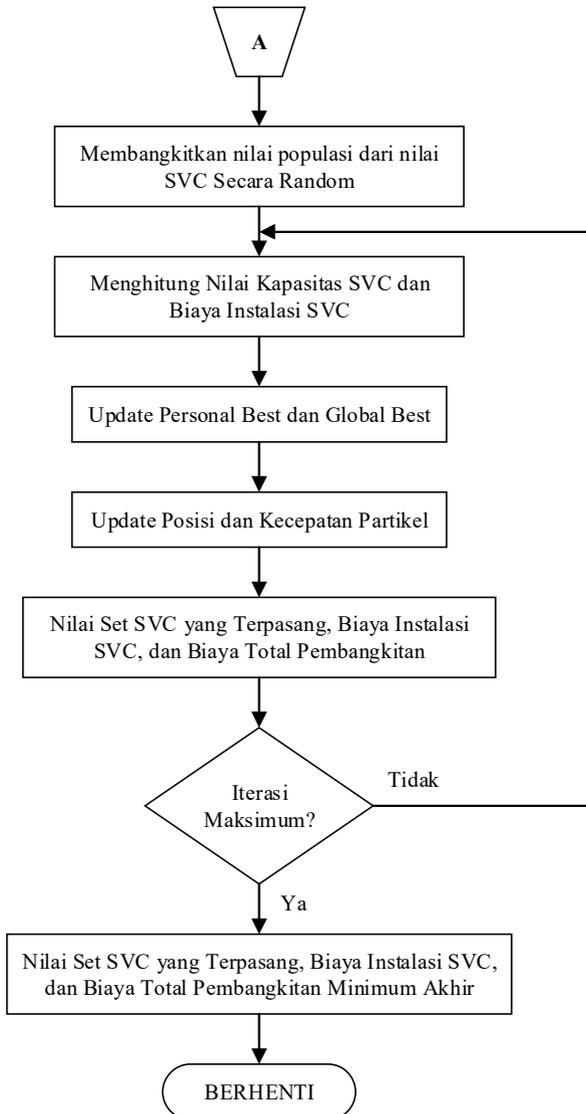
Data parameter PSO yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini dapat ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Data Parameter Metode PSO

Jumlah Partikel	5
Maksimum Iterasi	50
C_1	2
C_2	2
W	0.4 ~ 0.9



Gambar 3.2 Diagram Alur Penentuan Penempatan Lokasi dan Kapasitas SVC Menggunakan PSO



Gambar 3.2 Diagram Alur Penentuan Penempatan Lokasi dan Kapasitas SVC Menggunakan PSO

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab 4 ini, akan dibahas analisis terhadap hasil lokasi dan rating pemasangan SVC pada sistem kelistrikan transmisi 500 kV Jawa-Madura-Bali 500 kV pada tahun 2018 yang bertujuan untuk mengetahui dampak pemasangan SVC terhadap total biaya pembangkitan sistem. Dalam menentukan lokasi pemasangan dilihat berdasarkan bus yang memiliki nilai tegangan diluar batas rating yang telah ditentukan. Setelah ditentukan lokasinya, kemudian ditetapkan kapasitas maksimum SVC sebagai batas dalam pencarian nilai kapasitas SVC secara random melalui metode PSO.

Selanjutnya, akan dilakukan analisis dari perbedaan hasil total biaya pembangkitan baik itu sebelum dipasangnya SVC dan setelah dipasangnya SVC pada sistem dalam kondisi normal dan kontingensi.

4.1 Hasil Sistem Jamali 500 kV Sebelum Pemasangan SVC Saat Kondisi Normal dan Kontingensi

Simulasi program aliran daya pada sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2018 sebelum adanya penempatan SVC dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem transmisi 500 kV Jamali. Kondisi awal tersebut berupa nilai tegangan setiap bus, besar kapasitas daya aktif dan reaktif setiap bus hingga kapasitas dari saluran sistem. Simulasi dilakukan dalam kondisi normal dan kondisi kontingensi.

4.1.1 Hasil Simulasi Sebelum Pemasangan SVC Saat Kondisi Normal

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Normal dan Sebelum Pemasangan SVC

No Bus	Tegangan		Pembangkit		Beban	
	Besar (pu)	Sudut (deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	1.050	10.161	141.10	0.00	-	-
2	1.018	0.711	-	-	619.00	292.00
3	1.015	-2.065	-	-	622.00	267.00
4	1.016	-1.683	-	-	1006.0	547.00
5	1.025	-0.157	-	-	600.00	195.00

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Normal dan Sebelum Pemasangan SVC (lanjutan)

No Bus	Tegangan		Pembangkit		Beban	
	Besar (pu)	Sudut (deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
6	1.050	10.253	637.50	0.00	-	-
7	1.037	3.999	-	-	631.00	216.00
8	1.019	-0.681	252.00	120.00	467.00	144.00
9	1.016	-2.304	-	-	661.00	150.00
10	1.027	0.343	-	-	505.00	12.00
11	1.027	0.509	-	-	422.00	99.00
12	1.046	17.633	119.00	421.08	563.00	258.00
13	1.035	14.362	50.00	410.00	150.00	357.00
14	1.037	15.353	-	-	454.00	252.00
15	1.050	9.837	-	-	-	-
16	1.028	0.365	-	-	155.00	-58.00
17	1.039	4.401	669.80	103.25	-	-
18	1.024	6.520	-	-	96.00	49.00
19	1.028	-1.274	404.99	677.66	-	-
20	1.036	14.290	-	-	152.00	62.00
21	1.032	2.331	-	-	1214.0	140.00
22	1.039	4.442	836.00	0.00	-	-
23	1.021	2.036	-	-	-	-
24	1.050	21.809	3377.55	0.00	642.00	65.00
25	1.040	11.716	-	-	651.00	219.00
26	1.035	14.437	-	-	1120.0	379.00
27	1.022	0.000	350.37	160.00	-	-
28	1.039	4.436	2342.50	314.96	116.0	53.00
29	1.047	8.168	-	-	123.00	67.00
30	1.050	25.935	2887.20	304.35	248.00	90.00
31	1.027	15.608	-	-	693.00	516.00
Total			12068.01	2511.29	11910	4371.00

Tabel 4.2 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan *Losses* pada Saluran Saat Kondisi Normal dan Sebelum Pemasangan SVC

Bus (i to j)		Dari Bus Injeksi		Ke Bus Injeksi		Rugi-Rugi Daya	
i	j	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	6	-637.46	-4.20	637.50	0.00	0.037	1.03
2	23	-607.36	-31.83	608.26	7.90	1.244	14.11
3	5	-844.32	-161.59	847.31	151.48	2.990	29.69
5	10	-1210.02	-172.77	1211.16	168.83	1.137	10.94
7	5	542.26	-12.65	-538.77	-88.10	3.488	39.67
8	4	682.93	69.17	-682.34	-104.12	0.595	12.21
8	27	-897.93	-93.17	899.03	77.54	1.095	10.88
3	9	222.32	-105.41	-222.21	88.97	0.108	1.06
10	29	-962.44	-118.71	975.90	-47.27	13.46	133.30
11	10	753.93	56.35	-753.71	-62.12	0.217	2.22
12	26	1205.31	-103.89	-1199.36	-136.56	5.944	68.35
15	1	-778.34	-14.75	778.56	4.20	0.220	4.40
15	25	-323.31	21.85	324.35	-225.24	1.037	11.80
16	11	-155.00	58.00	155.04	-89.68	0.039	0.46
17	21	1436.20	111.64	-1431.56	-112.28	4.633	52.50
2	18	-619.89	-28.76	625.41	-70.67	5.523	63.07
18	23	612.44	-72.89	-608.26	-7.90	4.187	47.70
19	4	324.39	399.20	-323.66	-442.88	0.730	7.17
19	5	-359.23	72.17	359.97	-118.58	0.736	7.31
9	19	-438.79	-238.97	439.83	206.28	1.046	10.46
21	11	1335.34	58.85	-1330.97	-65.67	4.368	42.67
22	17	766.45	6.99	-766.40	-8.38	0.054	0.54
22	28	69.55	-6.99	-69.55	5.36	0.000	0.01
24	12	1659.80	-36.28	-1649.31	59.19	10.49	120.45
14	24	-1065.18	-80.28	1075.74	-28.72	10.57	120.09
25	14	-607.77	-9.87	611.18	-171.72	3.405	38.93
26	13	100.02	-78.73	-100.00	53.00	0.017	0.18
20	26	-49.87	1.25	49.89	-52.61	0.016	0.16
26	31	-70.54	-111.10	70.71	-174.02	0.168	1.67
27	2	-607.18	200.11	607.90	-231.41	0.719	8.23
5	27	-58.49	32.98	58.52	-117.65	0.034	0.38

Tabel 4.2 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan *Losses* pada Saluran Saat Kondisi Normal dan Sebelum Pemasangan SVC (lanjutan)

Bus (i to j)		Dari Bus Injeksi		Ke Bus Injeksi		Rugi-Rugi Daya	
i	j	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
28	7	1174.05	198.67	-1173.26	-203.35	0.790	9.35
28	21	1122.00	57.93	-1117.17	-85.97	4.230	41.60
29	15	-1098.90	-19.73	1101.65	-7.10	2.755	32.07
31	30	-2591.25	112.51	2639.20	214.35	47.95	473.78
18	31	-1333.86	94.56	1355.26	-118.07	21.40	213.35
31	20	102.41	-157.26	-102.13	-63.25	0.276	2.74
31	25	369.87	-179.15	-367.58	16.11	2.294	26.23
Total						158.1	1661.8

Dari hasil simulasi program pada sistem transmisi Jamali 500 kV diatas, didapatkan nilai biaya:

Total biaya pembangkitan (*Total Cost*) = \$8,396,457,041.88

Total biaya pemasangan SVC bernilai nol karena pada sistem keadaan normal ini disimulasikan dalam keadaan belum terpasang SVC.

4.1.2 Hasil Sebelum Pemasangan SVC Saat Kondisi Kontingensi

Tabel 4.3 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Kontingensi dan Sebelum Pemasangan SVC

No Bus	Tegangan		Pembangkit		Beban	
	Besar (pu)	Sudut (deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	1.050	14.139	157.71	300.00	-	-
2	1.032	0.102	-	-	619.00	292.00
3	1.033	-1.242	-	-	622.00	267.00
4	1.036	-1.267	-	-	1006.0	547.00
5	1.039	0.715	-	-	600.00	195.00
6	1.050	14.232	637.50	69.77	-	-
7	1.048	5.266	-	-	631.00	216.00
8	1.036	-0.539	252.00	120.00	467.00	144.00
9	1.035	-1.521	-	-	661.00	150.00

Tabel 4.3 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Kontingensi dan Sebelum Pemasangan SVC (lanjutan)

No Bus	Tegangan		Pembangkit		Beban	
	Besar (pu)	Sudut (deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
10	1.040	1.387	-	-	505.00	12.00
11	1.040	1.579	-	-	422.00	99.00
12	0.959	-8.275	119.90	425.00	563.00	258.00
13	0.951	-6.895	50.00	410.00	150.00	357.00
14	0.982	31.465	-	-	454.00	252.00
15	1.047	13.815	-	-	-	-
16	1.041	1.439	-	-	155.00	-58.00
17	1.050	5.674	669.80	83.15	-	-
18	1.025	3.355	-	-	96.00	49.00
19	1.050	-0.647	453.97	996.29	-	-
20	0.955	-4.179	-	-	152.00	62.00
21	1.044	3.543	-	-	1214.0	140.00
22	1.050	5.718	836.00	0.00	-	-
23	1.032	0.832	-	-	-	-
24	1.050	47.917	3257.12	710.23	642.00	65.00
25	0.997	17.711	-	-	651.00	219.00
26	0.950	-6.806	-	-	1120.0	379.00
27	1.037	0.000	350.37	160.00	-	-
28	1.050	5.718	2540.51	261.77	116.0	53.00
29	1.045	11.662	-	-	123.00	67.00
30	1.050	19.510	2887.20	753.86	248.00	90.00
31	0.996	9.037	-	-	693.00	516.00
Total			12212.08	4290.07	11910	4371.00

Tabel 4.4 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan *Losses* pada Saluran Saat Kondisi Kontingensi dan Sebelum Pemasangan SVC

Bus (i to j)		Dari Bus Injeksi		Ke Bus Injeksi		Rugi-Rugi Daya	
i	j	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	6	-637.46	-73.96	637.50	69.77	0.037	1.05
2	23	-340.31	-2.25	340.69	-32.39	0.382	4.33

Tabel 4.4 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan *Losses* pada Saluran Saat Kondisi Kontingensi dan Sebelum Pemasangan SVC (lanjutan)

Bus (i to j)		Dari Bus Injeksi		Ke Bus Injeksi		Rugi-Rugi Daya	
i	j	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
3	5	-885.39	-82.87	888.49	72.59	3.103	30.81
5	10	-1637.24	70.17	1639.23	-66.31	1.990	19.15
7	5	606.16	-38.06	-601.94	-57.88	4.228	48.09
8	4	510.84	-26.43	-510.52	-15.96	0.316	6.49
8	27	-725.84	2.43	726.52	-22.96	0.687	6.82
3	9	263.39	-184.13	-263.21	167.73	0.178	1.74
10	29	-1258.05	57.32	1281.04	-132.10	22.99	227.84
11	10	886.47	-2.21	-886.18	-3.01	0.290	2.98
12	26	-443.10	167.00	444.25	-238.83	1.151	13.23
15	1	-794.90	-383.21	795.18	373.96	0.282	5.65
15	25	-613.68	454.20	619.62	-592.57	5.945	67.60
16	11	-155.00	58.00	155.04	-90.52	0.038	0.45
17	21	1509.16	85.12	-1504.18	-83.57	4.986	56.51
2	18	-347.54	1.56	349.32	-146.01	1.779	20.31
18	23	342.07	-146.66	-340.69	32.39	1.379	15.72
19	4	496.74	490.45	-495.48	-531.04	1.260	12.36
19	5	-441.59	222.72	442.90	-265.39	1.310	13.01
9	19	-397.79	-317.73	398.82	283.12	1.031	10.31
21	11	1468.65	5.83	-1463.51	-6.27	5.145	50.26
22	17	839.43	0.62	-839.36	-1.97	0.064	0.64
22	28	-3.43	-0.62	3.43	-1.05	0.000	0.00
24	12	-	-	-	-	-	-
14	24	-2547.83	-92.49	2615.12	645.23	67.29	771.18
25	14	-2049.70	463.61	2093.83	-159.51	44.12	504.44
26	13	100.02	-74.64	-100.00	53.00	0.020	0.21
20	26	795.42	-0.63	-791.74	-6.56	3.683	36.41
26	31	-872.53	-58.97	897.63	56.62	25.09	249.12
27	2	-68.72	252.16	68.85	-291.31	0.132	1.51
5	27	307.78	-14.49	-307.44	-69.20	0.345	3.90
28	7	1238.02	173.67	-1237.16	-177.94	0.852	10.08
28	21	1183.06	36.15	-1178.48	-62.26	4.587	45.11

Tabel 4.4 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan *Losses* pada Saluran Saat Kondisi Kontingensi dan Sebelum Pemasangan SVC (lanjutan)

Bus (i to j)		Dari Bus Injeksi		Ke Bus Injeksi		Rugi-Rugi Daya	
i	j	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
29	15	-1404.04	65.10	1408.58	-70.98	4.533	52.76
31	30	-2588.10	-301.56	2639.20	663.86	51.09	504.85
18	31	-787.39	243.67	796.19	-385.72	8.79	87.70
31	20	970.11	87.18	-947.42	-61.37	22.68	225.38
31	25	-768.82	31.49	779.08	-90.04	10.26	117.31
Total						302.0 83	3225.3 0

Dari hasil simulasi program pada sistem transmisi Jamali 500 kV diatas, didapatkan nilai

Total biaya pembangkitan (*Total Cost*) = \$8,485,163,418.20

Total biaya pemasangan SVC bernilai nol karena pada sistem keadaan kontingensi ini disimulasikan dalam keadaan belum terpasang SVC. Pemilihan kontingensi pada saluran yang dipilih untuk dinon-aktifkan berdasarkan saluran-saluran yang berdekatan dengan bus pembangkit dan daerah bus yang memiliki nilai tegangan diluar range tegangan yang telah ditentukan.

4.2 Hasil Lokasi dan Rating Pemasangan SVC Optimal

Pada algoritma PSO ditetapkan batas nilai kapasitas maksimum untuk SVC sebesar 100 MVar yang kemudian akan dipilih secara random, seberapa besar nilai kapasitas yang paling optimal bisa dipasang pada sistem transmisi Jamali 500 kV. Setelah dilakukan simulasi program didapatkan tiga lokasi penempatan SVC yang sesuai dengan penempatan awal dari batas nilai kapasitas maksimum SVC yaitu:

- a. Bus 14 [Kediri] = 100 MVar
- b. Bus 24 [Paiton] = 0 MVar
- c. Bus 26 [Surabaya Barat] = 100 Mvar

4.3 Hasil Simulasi Sistem Jamali 500 kV Sesudah Pemasangan SVC Saat Kondisi Normal dan Kontingensi

4.3.1 Hasil Simulasi Sesudah Pemasangan SVC Saat Kondisi Normal

Tabel 4.5 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Normal Setelah Pemasangan SVC

No Bus	Tegangan		Pembangkit		Beban	
	Besar (pu)	Sudut (deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	1.050	10.161	141.10	0.00	-	-
2	1.018	0.711	-	-	619.00	292.00
3	1.015	-2.065	-	-	622.00	267.00
4	1.016	-1.683	-	-	1006.0	547.00
5	1.025	-0.157	-	-	600.00	195.00
6	1.050	10.253	637.50	0.00	-	-
7	1.037	3.999	-	-	631.00	216.00
8	1.019	-0.681	252.00	120.00	467.00	144.00
9	1.016	-2.304	-	-	661.00	150.00
10	1.027	0.343	-	-	505.00	12.00
11	1.027	0.509	-	-	422.00	99.00
12	1.046	17.633	119.00	421.08	563.00	258.00
13	1.035	14.362	50.00	410.00	150.00	357.00
14	1.037	15.353	-	-	454.00	252.00
15	1.050	9.837	-	-	-	-
16	1.028	0.365	-	-	155.00	-58.00
17	1.039	4.401	669.80	103.25	-	-
18	1.024	6.520	-	-	96.00	49.00
19	1.028	-1.274	404.99	677.66	-	-
20	1.036	14.290	-	-	152.00	62.00
21	1.032	2.331	-	-	1214.0	140.00
22	1.039	4.442	836.00	0.00	-	-
23	1.021	2.036	-	-	-	-
24	1.050	21.809	3377.55	0.00	642.00	65.00
25	1.040	11.716	-	-	651.00	219.00
26	1.035	14.437	-	-	1120.0	379.00
27	1.022	0.000	350.37	160.00	-	-

Tabel 4.5 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Normal Setelah Pemasangan SVC (lanjutan)

No Bus	Tegangan		Pembangkit		Beban	
	Besar (pu)	Sudut (deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
28	1.039	4.436	2342.50	314.96	116.0	53.00
29	1.047	8.168	-	-	123.00	67.00
30	1.050	25.935	2887.20	304.35	248.00	90.00
31	1.027	15.608	-	-	693.00	516.00
Total			12068.01	2511.29	11910	4371.00

Tabel 4.6 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan Losses Setiap Bus Saat Kondisi Normal Setelah Pemasangan SVC

Bus (i to j)		Dari Bus Injeksi		Ke Bus Injeksi		Rugi-Rugi Daya	
i	j	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	6	-637.46	-4.20	637.50	0.00	0.037	1.03
2	23	-607.36	-31.83	608.26	7.90	1.244	14.11
3	5	-844.32	-161.59	847.31	151.48	2.990	29.69
5	10	-1210.02	-172.77	1211.16	168.83	1.137	10.94
7	5	542.26	-12.65	-538.77	-88.10	3.488	39.67
8	4	682.93	69.17	-682.34	-104.12	0.595	12.21
8	27	-897.93	-93.17	899.03	77.54	1.095	10.88
3	9	222.32	-105.41	-222.21	88.97	0.108	1.06
10	29	-962.44	-118.71	975.90	-47.27	13.46	133.30
11	10	753.93	56.35	-753.71	-62.12	0.217	2.22
12	26	1205.31	-103.89	-1199.36	-136.56	5.944	68.35
15	1	-778.34	-14.75	778.56	4.20	0.220	4.40
15	25	-323.31	21.85	324.35	-225.24	1.037	11.80
16	11	-155.00	58.00	155.04	-89.68	0.039	0.46
17	21	1436.20	111.64	-1431.56	-112.28	4.633	52.50
2	18	-619.89	-28.76	625.41	-70.67	5.523	63.07
18	23	612.44	-72.89	-608.26	-7.90	4.187	47.70
19	4	324.39	399.20	-323.66	-442.88	0.730	7.17
19	5	-359.23	72.17	359.97	-118.58	0.736	7.31
9	19	-438.79	-238.97	439.83	206.28	1.046	10.46
21	11	1335.34	58.85	-1330.97	-65.67	4.368	42.67

Tabel 4.6 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan *Losses* Setiap Bus Saat Kondisi Normal Setelah Pemasangan SVC (lanjutan)

Bus (i to j)		Dari Bus Injeksi		Ke Bus Injeksi		Rugi-Rugi Daya	
i	j	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
22	17	766.45	6.99	-766.40	-8.38	0.054	0.54
22	28	69.55	-6.99	-69.55	5.36	0.000	0.01
24	12	1659.80	-36.28	-1649.31	59.19	10.49	120.45
14	24	-1065.18	-80.28	1075.74	-28.72	10.57	120.09
25	14	-607.77	-9.87	611.18	-171.72	3.405	38.93
26	13	100.02	-78.73	-100.00	53.00	0.017	0.18
20	26	-49.87	1.25	49.89	-52.61	0.016	0.16
26	31	-70.54	-111.10	70.71	-174.02	0.168	1.67
27	2	-607.18	200.11	607.90	-231.41	0.719	8.23
5	27	-58.49	32.98	58.52	-117.65	0.034	0.38
28	7	1174.05	198.67	-1173.26	-203.35	0.790	9.35
28	21	1122.00	57.93	-1117.17	-85.97	4.230	41.60
29	15	-1098.90	-19.73	1101.65	-7.10	2.755	32.07
31	30	-2591.25	112.51	2639.20	214.35	47.95	473.78
18	31	-1333.86	94.56	1355.26	-118.07	21.40	213.35
31	20	102.41	-157.26	-102.13	-63.25	0.276	2.74
31	25	369.87	-179.15	-367.58	16.11	2.294	26.23
Total						158.1	1661.8

Dari hasil simulasi program pada sistem transmisi Jamali 500 kV diatas setelah dipasangnya SVC, didapatkan total biaya sebagai berikut:

$$\text{Total biaya pembangkitan (Total Cost)} = \$8,396,395,000.36$$

Dari hasil simulasi pemasangan SVC pada kondisi normal didapatkan total biaya pemasangan SVC sebesar nol yang menandakan dalam kondisi normalnya sistem tidak efektif untuk dipasangkan perangkat SVC sehingga saat kondisi normal baik itu sebelum dan sesudah pemasangan SVC didapatkan total biaya pembangkitan tidak mengalami perubahan. Dan juga untuk rugi-rugi daya (*losses*) saluran dan aliran daya setiap busnya tidak mengalami perubahan.

4.3.2 Hasil Simulasi Sesudah Pemasangan SVC Saat Kondisi Kontingensi

Tabel 4.7 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Kontingensi Setelah Pemasangan SVC

No Bus	Tegangan		Pembangkit		Beban	
	Besar (pu)	Sudut (deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	1.050	11.463	155.17	67.80	-	-
2	1.037	-0.089	-	-	619.00	292.00
3	1.036	-1.002	-	-	622.00	267.00
4	1.037	-1.160	-	-	1006.0	547.00
5	1.041	1.005	-	-	600.00	195.00
6	1.050	11.556	637.50	0.00	-	-
7	1.048	6.447	-	-	631.00	216.00
8	1.039	-0.500	252.00	120.00	467.00	144.00
9	1.039	-1.306	-	-	661.00	150.00
10	1.042	1.704	-	-	505.00	12.00
11	1.042	1.978	-	-	422.00	99.00
12	0.998	-9.743	119.00	425.00	563.00	258.00
13	0.990	-8.466	50.00	410.00	150.00	357.00
14	1.018	22.779	-	-	454.00	252.00
15	1.049	11.135	-	-	-	-
16	1.043	1.838	-	-	155.00	-58.00
17	1.050	6.871	669.80	73.69	-	-
18	1.036	2.321	-	-	96.00	49.00
19	1.050	-0.473	430.09	831.28	-	-
20	0.990	-5.932	-	-	152.00	62.00
21	1.045	4.447	-	-	1214.0	140.00
22	1.050	6.926	836.00	0.00	-	-
23	1.044	0.451	-	-	-	-
24	1.050	35.470	2720.34	291.19	642.00	65.00
25	1.024	13.035	-	-	651.00	219.00
26	1.049	-8.384	-	-	1120.0	379.00
27	1.043	0.000	350.37	160.00	-	-
28	1.050	6.943	3034.53	217.80	116.0	53.00
29	1.049	9.459	-	-	123.00	67.00
30	1.050	17.067	2887.20	510.68	248.00	90.00

Tabel 4.7 Hasil Aliran Daya Setiap Bus Saat Kondisi Kontingensi Setelah Pemasangan SVC (lanjutan)

No Bus	Tegangan		Pembangkit		Beban	
	Besar (pu)	Sudut (deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
31	1.013	6.674	-	-	693.00	516.00
Total			12142.00	3107.44	11910	4371.00

Tabel 4.8 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan *Losses* pada Saluran Saat Kondisi Kontingensi dan Sesudah Pemasangan SVC

Bus (i to j)		Dari Bus Injeksi		Ke Bus Injeksi		Rugi-Rugi Daya	
i	j	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	6	-637.46	-4.20	637.50	0.00	0.037	1.03
2	23	-258.87	-53.27	259.09	16.36	0.222	2.52
3	5	-908.92	-51.64	912.16	42.52	3.239	32.16
5	10	-1709.74	83.22	1711.90	-77.74	2.163	20.82
7	5	724.11	-51.25	-718.09	-24.58	6.019	68.46
8	4	476.66	29.09	-467.39	-72.68	0.267	5.48
8	27	-682.66	-53.09	683.27	31.59	0.606	6.02
3	9	286.92	-215.36	-286.70	199.25	0.221	2.15
10	29	-960.92	-35.39	974.12	-138.00	13.20	130.82
11	10	1256.57	-103.36	-1255.98	101.13	0.585	6.00
12	26	-444.00	167.00	445.07	-246.79	1.073	12.34
15	1	-792.40	-82.34	792.63	72.00	0.230	4.61
15	25	-307.48	180.21	308.99	-374.60	1.520	17.28
16	11	-155.00	58.00	155.04	-90.61	0.038	0.45
17	21	1713.51	62.50	-1707.10	-44.83	6.410	72.65
2	18	-264.37	-50.49	265.34	-105.82	0.977	11.16
18	23	259.84	-107.38	-259.09	-16.36	0.754	8.59
19	4	539.84	433.40	-538.61	-474.32	1.232	12.10
19	5	-484.83	193.75	486.27	-235.19	1.444	14.34
9	19	-374.30	-241.35	375.08	204.13	0.784	7.84
21	11	1841.69	-66.77	-1833.61	94.97	8.086	78.99
22	17	1043.81	-12.18	-1043.71	11.19	0.099	0.99
22	28	-207.81	12.18	207.81	-13.79	0.004	0.06
24	12	-	-	-	-	-	-

Tabel 4.8 Hasil Kapasitas Aliran Daya dan *Losses* pada Saluran Saat Kondisi Kontingensi dan Sesudah Pemasangan SVC (lanjutan)

Bus (i to j)		Dari Bus Injeksi		Ke Bus Injeksi		Rugi-Rugi Daya	
i	j	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
14	24	-2038.10	9.06	2078.34	226.19	40.24	461.20
25	14	-1560.57	213.52	1584.10	-157.50	23.53	269.00
26	13	100.02	-76.48	-100.00	53.00	0.019	0.19
20	26	795.46	-62.50	-792.03	49.31	3.428	33.90
26	31	-873.06	-7.25	896.60	-29.40	23.54	233.66
27	2	95.83	147.94	-95.77	-188.23	0.062	0.72
5	27	429.39	-60.98	-428.73	-19.54	0.664	7.51
28	7	1356.12	162.43	-1355.11	-164.75	1.017	12.03
28	21	1354.59	16.16	-1348.59	-28.40	6.000	59.00
29	15	-1097.12	71.00	1099.88	-97.88	2.759	32.11
31	30	-2590.14	-80.91	2639.20	420.68	49.05	484.67
18	31	-621.19	164.19	626.54	-347.21	5.351	53.34
31	20	968.77	0.73	-947.46	0.50	21.31	211.69
31	25	-594.76	-59.22	600.57	-57.92	5.81	66.44
Total						232.0 0	2442.3 1

Dari hasil simulasi program pada sistem transmisi Jamali 500 kV diatas setelah adanya pemasangan SVC, didapatkan total biaya:

Total biaya pembangkitan (*Total Cost*) = \$8,465,475,090.30

Dari hasil simulasi pemasangan SVC pada kondisi kontingensi didapatkan total biaya pemasangan SVC sebesar 1188800 yang menandakan dalam kondisi kontingensi sistem diperlukan pemasangan SVC sehingga akan berdampak terjadinya penurunan rugi-rugi daya (*losses*) saluran dan bus pembangkit akan lebih sedikit untuk membangkitkan daya reaktifnya menuju sistem.

4.4 Analisis Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC pada Sistem Jamali 500 kV

4.4.1 Analisis Kondisi Normal Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

Berdasarkan hasil simulasi pada saat sistem dalam kondisi normal baik itu sebelum maupun sesudah pemasangan SVC pada sistem dengan injeksi maksimum kapasitas SVC sebesar 100 MVar dan didapatkan ringkasan hasil berupa tabel sebagai berikut:

Tabel 4.9 Total Biaya Pembangkitan Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC Saat Kondisi Normal

Kondisi Normal	Total Biaya Pembangkitan (\$/h)	Selisih Total Biaya Pembangkitan (\$/h)
Sebelum Pemasangan SVC	8,396,457,041.88	62,041.52
Sesudah Pemasangan SVC	8,396,395,000.36	

Berdasarkan pada tabel 4.9 diatas, didapatkan total biaya pembangkitan antara sebelum dan sesudah pemasangan SVC bernilai berbeda karena jika dengan pemasangan SVC bisa membuat total biaya operasi pembangkitan menjadi menurun. Sehingga didapatkan selisih total biaya operasi pembangkitan sebesar \$62,041.52. Berdasarkan hasil program optimasi didapatkan besar lokasi pemasangan SVC saat kondisi normal sebesar 100 MVar hanya terpasang pada satu titik lokasi bus sistem dan dicari besar biaya investasi instalasi pemasangan SVC tersebut dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_{SVC} = 0.0003.S_{SVC}^2 - 0.3051.S_{SVC} + 127.38$$

$$C_{SVC} = 0.0003.(100)^2 - 0.3051.(100) + 127.38 = 99.87 \$/MVar$$

$$IC_{dev} = \sum_{n \in N} S_{SVC,n} \cdot C_{SVC,n} \times 1000$$

$$IC_{dev} = \sum_{n=1} (100MVar) \cdot (99,87\$/MVar) = \$9,987,000.00$$

Setelah didapatkan biaya instalasi pemasangan SVC saat sistem kondisi normal sebesar \$9,987,000.00 , biaya tersebut harus diubah menjadi dalam bentuk biaya instalasi tahunan dengan suku bunga sebesar 0.04% dan masa pakai perangkat SVC selama 15 tahun dengan persamaan dan hasil biaya instalasi perangkat SVC sebagai berikut:

$$AIC_{dev} = IC_{dev} \frac{ir(1+ir)^{LT}}{(1+ir)^{LT} - 1}$$

$$AIC_{dev} = (\$9,987,000.00) \times \frac{0.04(1+0.04)^{15}}{(1+0.04)^{15} - 1} = \$898,241.77$$

Fungsi objektif dari penelitian ini yaitu mencari layak atau tidaknya pemasangan SVC dengan mempertimbangkan antara biaya investasi instalasi pemasangan SVC terhadap penurunan biaya operasi pembangkitan sistem. Sehingga didapatkan hasil penurunan biaya operasi pembangkitan sistem dengan biaya investasi instalasi perangkat SVC pada tabel berikut:

Tabel 4.10 Tabel Perbandingan Antara Selisih Total Biaya Pembangkitan Sistem dengan Biaya Instalasi Perangkat SVC Saat Kondisi Normal

Selisih Total Biaya Pembangkitan (\$/h)	Biaya Instalasi Perangkat SVC (\$/h)	Perangkat SVC 100MVar
62,041.52	898,241.77	Lebih Baik Tidak Dipasang

Berdasarkan hasil simulasi dengan sistem normal terpasang SVC dan pada tabel 4.10, didapatkan hasil penurunan total biaya pembangkitan lebih kecil daripada biaya investasi instalasi perangkat SVC (100 MVar) yang bisa dikatakan sistem mengalami kerugian biaya sehingga pemasangan perangkat SVC menjadi tidak efektif dan lebih baik SVC tidak dipasangkan pada sistem saat kondisi normal.

Tabel 4.11 Dampak Total Aliran Daya Aktif dan Reaktif Saat Kondisi Normal Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

Kondisi	Pembangkitan		Beban	
	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVar)	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVar)
Normal Sebelum Pemasangan SVC	12068.01	2511.29	11910	4371.00
Normal Sesudah Pemasangan SVC	12068.01	2511.29	11910	4371.00

Tabel 4.12 Total Rugi-Rugi Saluran (*losses*) Daya Aktif dan Reaktif Saat Kondisi Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

Kondisi	Rugi-Rugi Saluran (<i>losses</i>)	
	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVar)
Normal Sebelum Pemasangan SVC	158.01	1661.77
Normal Sesudah Pemasangan SVC	158.01	1661.77

Berdasarkan hasil simulasi saat kondisi normal, didapatkan bahwa tidak perlu dipasangkan SVC pada sistem dikarenakan sistem mengalami kerugian biaya akibat biaya instalasi pemasangan SVC yang terlalu besar jika dibandingkan dengan penurunan biaya operasi pembangkitan. Sehingga setelah optimasi pemasangan SVC pada sistem, total aliran daya (aktif dan daya reaktif) dan rugi-rugi daya (*losses*) saluran sistem dianggap bernilai sama seperti saat sistem dalam kondisi normal tanpa pemasangan SVC.

4.4.2 Analisis Kondisi Kontingensi Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

Berdasarkan hasil simulasi pada saat sistem dalam kondisi kontingensi baik itu sebelum maupun sesudah pemasangan SVC pada sistem dengan injeksi maksimum kapasitas SVC sebesar 100 MVar didapatkan lokasi dan kapasitas optimal sebesar 100 MVar terpasang pada daerah Kediri (Bus 14) dan Surabaya Barat (Bus 26) dengan total biaya pembangkitan sebagai berikut:

Tabel 4.13 Total Biaya Pembangkitan Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC Saat Kondisi Kontingensi

Kondisi Normal	Total Biaya Pembangkitan (\$/h)	Selisih Total Biaya Pembangkitan (\$/h)
Sebelum Pemasangan SVC	8,485,163,418.20	19,688,327.90
Sesudah Pemasangan SVC	8,465,475,090.30	

Berdasarkan hasil simulasi, saat kondisi kontingensi setelah pemasangan kapasitas SVC sebesar 100 MVar hanya pada daerah Kediri (Bus 14) dan Surabaya Barat (Bus 26), terjadi penurunan total biaya pembangkitan sebesar 0.23% dari \$8,485,163,418.20 menjadi \$8,465,475,090.30.

Berdasarkan hasil program optimasi didapatkan besar lokasi pemasangan SVC saat kondisi normal sebesar 100 MVar terpasang pada dua titik lokasi bus sistem dan dicari besar biaya investasi instalasi pemasangan SVC tersebut dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (2 titik lokasi bus):

$$C_{SVC} = 0.0003 \cdot S_{SVC}^2 - 0.3051 \cdot S_{SVC} + 127.38$$

$$C_{SVC} = 0.0003 \cdot (100)^2 - 0.3051 \cdot (100) + 127.38 = 99.87 \text{ \$/MVar}$$

$$IC_{dev} = \sum_{n \in N} S_{SVC,n} \cdot C_{SVC,n} \times 1000$$

$$IC_{dev} = \sum_{n=2} (100 \text{ MVar}) \cdot (99,87 \text{ \$/MVar}) = \$19,974,000.00$$

Setelah didapatkan biaya instalasi pemasangan SVC saat sistem kondisi kontingensi sebesar \$19,974,000.00, biaya tersebut harus diubah menjadi dalam bentuk biaya instalasi tahunan dengan suku bunga sebesar 0.04% dan masa pakai perangkat SVC selama 15 tahun dengan persamaan dan hasil biaya instalasi perangkat SVC sebagai berikut:

$$AIC_{dev} = IC_{dev} \frac{ir(1+ir)^{LT}}{(1+ir)^{LT} - 1}$$

$$AIC_{dev} = (\$19,974,000.00) \times \frac{0.04(1+0.04)^{15}}{(1+0.04)^{15} - 1} = \$1,796,483.54$$

Fungsi objektif dari penelitian ini yaitu mencari layak atau tidaknya pemasangan SVC dengan mempertimbangkan antara biaya investasi instalasi pemasangan SVC terhadap penurunan biaya operasi pembangkitan sistem. Sehingga didapatkan hasil penurunan biaya operasi pembangkitan sistem dengan biaya investasi instalasi perangkat SVC pada tabel berikut:

Tabel 4.14 Tabel Perbandingan Antara Selisih Total Biaya Pembangkitan Sistem dengan Biaya Instalasi Perangkat SVC Saat Kondisi Kontingensi

Selisih Total Biaya Pembangkitan (\$/h)	Biaya Instalasi Perangkat SVC (\$/h)	Perangkat SVC 100MVar
19,688,327.90	1,796,483.54	Lebih Baik Dipasang dan Dioperasikan

Berdasarkan hasil simulasi dengan sistem normal terpasang SVC dan pada tabel 4.10, didapatkan hasil penurunan total biaya pembangkitan lebih besar daripada biaya investasi instalasi perangkat SVC pada 2 lokasi (@100 MVar) yang bisa dikatakan sistem mengalami keuntungan sebesar 90.87% sehingga pemasangan perangkat SVC menjadi efektif dan lebih baik SVC dipasangkan dan dioperasikan pada sistem saat kondisi kontingensi.

Tabel 4.15 Total Aliran Daya Aktif dan Reaktif Saat Kondisi Kontingensi Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

Kondisi	Pembangkitan		Beban	
	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVar)	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVar)
Kontingensi Sebelum Pemasangan SVC	12212.08	4290.07	11910	4371.00
Kontingensi Sesudah Pemasangan SVC	12142.00	3107.44	11910	4371.00

Berdasarkan hasil simulasi dengan profil pembangkit dan beban sistem Jamali 500 kV pada tahun 2018 saat kondisi kontingensi, dengan adanya pemasangan SVC akan berdampak pada total aliran daya untuk pembangkitan daya aktif (MW) dan daya reaktif (MVar) saat kondisi kontingensi sebelum dan sesudah pemasangan SVC mengalami perubahan, terutama pada saat kontingensi sesudah pemasangan SVC mengalami penurunan pembangkitan pada total daya aktif sebesar 0.57% dari 12212.08 MW menjadi 12142 MW dan penurunan pembangkitan daya reaktif sebesar 27.57% dari 4290.07 MVar menjadi 3107.44 MVar. Penurunan pembangkitan daya aktif dan reaktif tersebut terjadi pada daerah pembangkit Adipala (Bus 1), Cilacap (Bus 6), Pembangkit Lestari Banten Energy (Bus 17), Muaratawar (Bus 19), Pembangkit Paiton (Bus 24), dan Pembangkit Suralaya (Bus 28).

Tabel 4.16 Total Rugi-Rugi Saluran (*losses*) Daya Aktif dan Reaktif Saat Kondisi Kontingensi Sebelum dan Sesudah Pemasangan SVC

Kondisi	Rugi-Rugi Saluran (<i>losses</i>)	
	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVar)
Kontingensi Sebelum Pemasangan SVC	302.08	3225.30
Kontingensi Sesudah Pemasangan SVC	232.00	2442.31

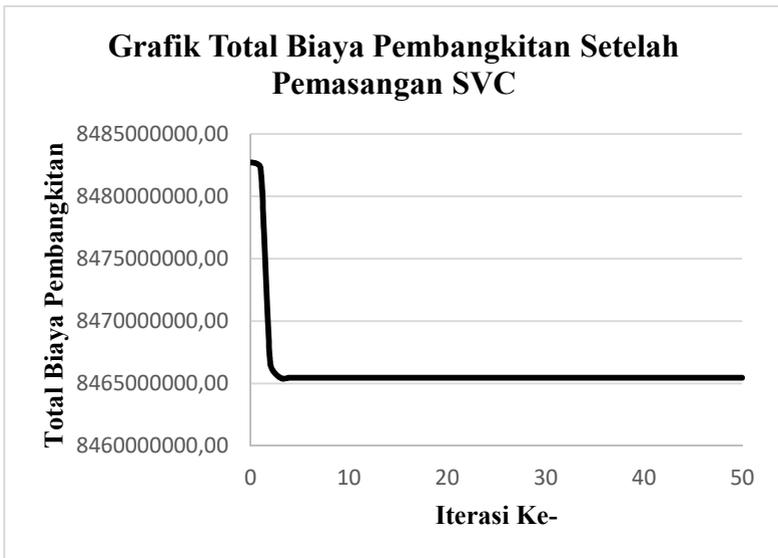
Berdasarkan hasil simulasi, dalam kondisi normal baik itu sebelum maupun sesudah pemasangan SVC dikarenakan sistem tidak mengalami perubahan rugi-rugi daya (*losses*) pada sistem. Sedangkan, saat kondisi kontingensi dengan adanya pemasangan SVC pada sistem akan berdampak pada rugi-rugi daya pada saluran (*losses*), dimana rugi-rugi saluran pada sistem mengalami penurunan rugi daya aktif saluran sebesar 23.20% dari 302.08 MW menjadi 232.00 MW sedangkan mengalami penurunan rugi daya reaktif saluran sebesar 24.27% dari 3225.30 MVar menjadi 2442.31 MVar.

Tabel 4.17 Hasil Total Biaya Pembangkitan Setiap Iterasi Setelah Pemasangan SVC

Iterasi Ke-	Total Biaya Pembangkitan	Iterasi Ke-	Total Biaya Pembangkitan
0	8482712463.02	26	8465475090.30
1	8482263023.74	27	8465475090.30
2	8466595085.95	28	8465475090.30
3	8466455085.95	29	8465475090.30
4	8465475090.30	30	8465475090.30
5	8465475090.30	31	8465475090.30
6	8465475090.30	32	8465475090.30
7	8465475090.30	33	8465475090.30
8	8465475090.30	34	8465475090.30
9	8465475090.30	35	8465475090.30
10	8465475090.30	36	8465475090.30
11	8465475090.30	37	8465475090.30
12	8465475090.30	38	8465475090.30
13	8465475090.30	39	8465475090.30
14	8465475090.30	40	8465475090.30
15	8465475090.30	41	8465475090.30
16	8465475090.30	42	8465475090.30
17	8465475090.30	43	8465475090.30
18	8465475090.30	44	8465475090.30
19	8465475090.30	45	8465475090.30
20	8465475090.30	46	8465475090.30
21	8465475090.30	47	8465475090.30
22	8465475090.30	48	8465475090.30
23	8465475090.30	49	8465475090.30

Tabel 4.17 Hasil Total Biaya Pembangkitan Setiap Iterasi Setelah Pemasangan SVC (lanjutan)

Iterasi Ke-	Total Biaya Pembangkitan	Iterasi Ke-	Total Biaya Pembangkitan
24	8465475090.30	50	8465475090.30
25	8465475090.30		



Gambar 4.1 Grafik Penurunan Total Biaya Pembangkitan (*Total Cost*)

Berdasarkan tabel 4.17 dan grafik pada gambar 4.1 mengenai hasil total biaya pembangkitan setiap iterasinya setelah dilakukan pemasangan SVC pada sistem, total biaya pembangkitan sistem mengalami konvergensi penurunan total biaya hingga menunjukkan pada iterasi terakhir total biaya pembangkitan paling minimum sebesar \$8,465,475,090.30.

**** Halaman ini sengaja dikosongkan ****

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis yang telah dilakukan, didapat beberapa kesimpulan yaitu:

1. Penentuan kapasitas SVC didapatkan secara optimal melalui metode PSO yang pengambilan nilai kapasitas tersebut secara random dengan adanya batas maksimal kapasitas SVC.
2. Dengan adanya pemasangan SVC dapat meminimalkan total rugi-rugi daya pada saluran sistem dan meminimalkan total biaya pembangkitan.
3. Biaya total pembangkitan mengalami penurunan disetiap iterasinya yang akan menunjukkan nilai paling minimum dari biaya total pembangkitan sistem.
4. Perangkat SVC lebih efektif jika dipasangkan pada sistem saat kondisi kontingensi jika dibandingkan saat kondisi normal.

5.2 Saran

Berdasarkan dari analisis yang dilakukan, peneliti memberikan saran sebagai berikut:

1. Untuk pengoptimalan sistem tenaga listrik dengan menggunakan *FACTS Device*, akan lebih baik dan optimal hasilnya ketika dikombinasikan dengan perangkat *FACTS* lain.
2. Untuk penelitian selanjutnya lebih baik jika data yang digunakan untuk pengotimalan sistem menggunakan data beban yang bervariasi.

**** Halaman ini sengaja dikosongkan ****

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Saadat, "Power System Analysis - Hadi Saadat." pp. 335–340, 2002.
- [2] J. J. G. and W. Stevenson, *Power System Analysis*. 1994.
- [3] L. Powell, *Power System Load Flow Analysis*. 2005.
- [4] J. C. Das, *Load Flow and Optimal Power Flow (Vol.2)*. 2017.
- [5] S. S. K. S. Swarup, "Sequential quadratic programming based differential evolution algorithm for optimal power flow problem," no. May, pp. 1149–1154, 2011.
- [6] I. N. P. Transmission, *FACTS Controllers In Power Transmission and Distribution*. 2004.
- [7] C. A. C. Enrique Acha, Claudio, R. F., Hugo Ambriz-Perez, *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*. 2004.
- [8] N. Ch and K. C. Sekhar, "Optimal Placement of SVC for the Transmission Congestion Management," vol. 1, no. 5, pp. 54–58, 2014.
- [9] R. Agrawal, "Optimal Position and Setting of SVC using Heuristic optimization techniques," pp. 569–575, 2017.
- [10] R. S. Wibowo, N. Yorino, M. Eghbal, Y. Zoka, and Y. Sasaki, "FACTS devices allocation with control coordination considering congestion relief and voltage stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2302–2310, 2011.
- [11] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc.IEEE Int. Conf. Neural Networks*, Australia, 1995, pp. 1942–1948.
- [12] C. R. Wang, H. J. Yuan, C. J. Sun and J. W. Zhang, "A Modified Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Application In Optimal Power Flow Problem," *Proc.IEEE Int. Conf.Machine Learning*, Guangzhou, 2005
- [13] K. Sundareswaran, F. P. Parasseri, D. S. Antony, and B. Subair, "Optimal Placement of Static VAR Compensators (SVC's) Using Particle Swarm Optimization,"
- [14] Pujo Puryono. H, " Studi Perbaikan Stabilitas Tegangan Sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) dengan Pemasangan SVC Setelah Masuknya Pembangkit 1000 MW Paiton", Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.

*** *Halaman ini sengaja dikosongkan* ***

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Helga Dendy Ardianika, lahir di Denpasar pada 14 Juni 1996. Penulis memulai jenjang pendidikan di SD YPWKS 1 Cilegon, SMPN 1 Cilegon, SMAN 2 KS Cilegon hingga lulus SMA pada tahun 2014 dan dilanjutkan dengan menempuh pendidikan di bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada tahun 2017, penulis melaksanakan Kerja Praktek di PT Indonesia Power UP Suralaya, Cilegon, selama satu bulan. Penulis memiliki pengalaman aktif di Divisi Workshop Teknik

Elektro ITS dan menjadi staff PSDM UKM Robotika ITS. Pada tahun ketiga menjadi Kepala Departemen PSDM Kabinet UKM Robotika ITS. Dalam bidang minat dan bakat, penulis beberapa kali meraih juara dibidang minat bakat robotika ditingkat regional, nasional, dan internasional. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik (*email*) pada alamat: helga.da.sf@gmail.com

**** Halaman ini sengaja dikosongkan ****