



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

**PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL SVC
(STATIC VAR COMPENSATOR) UNTUK MENINGKATKAN
KEAMANAN TEGANGAN**

Habibur Rohman
NRP 071113400093

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Adi Soeprijanto, MT.
Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE141599

**OPTIMAL PLACEMENT AND SIZING OF SVC (STATIC VAR
COMPENSATOR) FOR VOLTAGE SECURITY IMPROVEMENT**

Habibur Rohman
NRP 0711134000093

Supervisors
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL SVC (STATIC VAR COMPENSATOR) UNTUK MENINGKATKAN KEAMANAN TEGANGAN”** 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, Januari 2018



Habibur Rohman
NRP. 0711134000093

**PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL SVC
(STATIC VAR COMPENSATOR) UNTUK MENINGKATKAN
KEAMANAN TEGANGAN**

TUGAS AKHIR

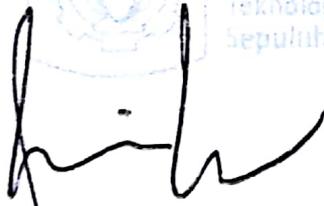
**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404051990021001

Dosen Pembimbing II



Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001



Penentuan Lokasi dan Kapasitas Optimal SVC (Static VAR Compensator) untuk Meningkatkan Keamanan Tegangan

Habibur Rohman
0711134000093

Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.

Dosen Pembimbing II : Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

Abstrak :

Tujuan dari sistem transmisi adalah menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban secara aman, efisien, handal dan ekonomis. Agar Penyediaan tenaga listrik dapat dilakukan dengan baik sistem tenaga listrik perlu memenuhi beberapa persyaratan diantaranya tegangan dan frekuensi yang stabil. Gangguan pada saluran transmisi dapat menyebabkan *overload* pada saluran, *overvoltage* dan *undervoltage* pada bus yang dapat mengancam keamanan dari sistem tenaga listrik. Dampak dari kontingensi pada tiap elemen sistem bermacam-macam. *Voltage performance index* adalah salah satu index yang dapat digunakan untuk menentukan tingkat kontingensi pada tiap saluran transmisi. Pada tugas akhir ini analisis kontingensi diterapkan pada saluran 500 KV Jawa-Bali untuk menentukan tingkat keparahan kontingensi dan untuk mengevaluasi dampak dari kontingensi terhadap sistem.

Static VAR Compensator (SVC) merupakan *FACTS device* yang dipasang secara shunt pada bus untuk memperbaiki profil tegangan pada kasus kontingensi terburuk. Penempatan *FACTS device* yang kurang optimal tidak mampu memperbaiki profil tegangan akibat kontingensi, sehingga pada tugas akhir ini akan dilakukan optimasi penempatan dan penentuan kapasitas SVC menggunakan *Voltage Performance Index* dan *Quantum Swarm Evolutionary Algorithm (QSEA)*.

Kata Kunci: *Voltage Security, Voltage Performance Index, Static VAR Compensator, Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

Optimal Placement and Sizing of SVC (Static VAR Compensator) for Voltage Security Improvement

Habibur Rohman
0711134000093

Lecture Advisor I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Lecture Advisor II : Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT..

Abstract :

The purpose of the transmission system is to channel electrical power from the center of the plant to the load center safely, efficiently, reliably and economically. In order to Provision of electric power can be done well the power system needs to meet some requirements such as voltage and frequency is stable. Disturbance on the transmission line may cause overload of the channel, overvoltage and undervoltage on the bus which may threaten the safety of the power system. The impact of contingency on each system element varies. Voltage performance index is one index that can be used to determine the contingency level on each transmission line. In this final project contingency analysis is applied to the Java-Bali 500 KV channel to determine contingency severity and to evaluate the impact of contingency on the system.

Static VAR Compensator (SVC) is a shunt-mounted FACTS device on a bus to fix the voltage profile in the worst case of contingency. Non-optimal FACTS device placement can not improve the voltage profile due to contingency, so in this final assignment will be done placement optimization and SVC capacity determination using Voltage Performance Index and Quantum Swarm Evolutionary Algorithm (QSEA).

Keywords *Voltage Security, Voltage Performance Index, Static VAR Compensator, Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan berkat, kasih dan anugerah-Nya semata, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Penentuan Lokasi dan Kapasitas Optimal SVC (Static VAR Compensator) untuk Meningkatkan Keamanan Tegangan”** dengan lancar, baik dan tepat waktu.

Adapun pembuatan Tugas Akhir ini ditujukan sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menuntaskan studi sebagai mahasiswa S1 Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua dan Tante dari penulis yang senantiasa tak pernah lelah memberikan dukungan dari segi apapun kepada penulis dan tak henti-hentinya berdoa demi keberhasilan penulis.
2. Bapak Prof. Adi Soeprijanto dan Bapak Rony Seto Wibowo selaku Dosen Pembimbing, terima kasih atas segala bimbingan, perhatian, dan arahan selama pengerjaan Tugas Akhir.
3. Bapak Ardyono selaku Ketua Departemen Teknik Elektro yang telah memberikan kesempatan penulis untuk menuntut ilmu dan selalu terbuka saat penulis ingin berdiskusi.
4. Bapak dan Ibu dosen pengajar Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberikan materi, bersedia berbagi ilmu pengetahuan dan pengalaman berguna kepada penulis. Terimakasih Bapak, Ibu, jasa kalian akan selalu penulis kenang.
5. Indrawan Gunartono, yang telah banyak sekali membantu penulis dalam proses pengerjaan dari awal hingga saat ini. Terimakasih untuk dukungan dan motivasinya.
6. Sahabat-sahabat asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik angkatan 2013 dan LJ 2015: Tufi, Bagus, Febri, Mas Aji, Mbah Gilang, Fiona, Ica, yang selalu

membantu penulis saat kesusahan dan selalu mengingatkan saat penulis mulai bermalas-malasan

7. Teman-teman konco plek wolak walik naga sobung yang senantiasa mengajak penulis untuk cangkruk dan bercengkrama saat penulis tengah dilanda rasa jenuh dan kepenatan.
8. Tiwul, Ghulam, Bayu, Bida, Chepi, Chibo, Disa yang telah memberikan dukungan kepada penulis sejak semasa SMP
9. Dhika, Ahong, Nab, Icha, Gendut, Annas, Kucur, Danissa, Namira, dan sahabat-sahabat sulastri yang lain
10. Teman-teman e53 yang penulis kasihi. Terimakasih untuk semua dukungan, doa, kebersamaan dan kekeluargaan yang kalian berikan.
11. Bapak Dimas Fajar Uman yang selalu memberikan masukan dan wejangan serta senantiasa terbuka ketika penulis ingin berdiskusi tentang Tugas Akhir
12. Adik-adik asisten *Power System Simulation Laboratory*, angkatan 2014 atas semua canda, tawa, dukungan dan semangat yang kalian berikan. Terkhusus kepada Konci, Aden, Amirul, Sabil, Ori, Mila.
13. Adik-adik *trainee Power System Simulation Laboratory*, angkatan 2015 atas semua canda, tawa, dukungan dan semangat yang kalian berikan. Terkhusus kepada Gracia, Eunike, Elva, Fira, Nanang, Arba, Hotang, Baihaqi, Totek, Saad, Mas Rinthon dan Mas Esa
14. Seluruh teman-teman Teknik Elektro ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberi semangat dan menulis cerita dengan penulis selama penulis disini.

Akhirnya, penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka oleh saran dan masukan yang bersifat membangun agar penulis dapat menghasilkan karya yang lebih baik di masa yang akan datang.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
LEMBAR PERNYATAAN
LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii

BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Permasalahan.....	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Batas Masalah.....	3
1.5. Metodologi	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
1.7. Relevansi	5
BAB 2. PERALATAN FACTS PADA ALIRAN DAYA.....	7
2.1. Studi Aliran Daya	7
2.1.1. Analisis Aliran Daya.....	7
2.1.2. Sistem Per Unit (pu).....	8
2.1.3. Persamaan Aliran Daya.....	9
2.1.4. Perhitungan Aliran Daya dan Rugi-Rugi Saluran.....	11
2.1.5. Aliran Daya dengan Metode <i>Newton Raphson</i>	12
2.2. Peralatan FACTS	17
2.2.1. <i>Static VAR Compensator(SVC)</i>	18
2.2.2. Permodelan SVC	19
2.3. <i>Voltage Security</i>	19
2.3.1. <i>Voltage Collapse</i>	19
2.3.2. Stabilitas Tegangan.....	20
2.4. <i>Voltage Performance Index</i>	21

BAB 3. PERMODELAN SISTEM DAN METODOLOGI PENYELESAIAN	23
3.1. Metodologi	23
3.2. Permodelan Sistem Kelistrikan Jamali 500 kV	27
3.3. Optimasi sizing SVC menggunakan QSEA	29
3.3.1. <i>Quantum Swarm Evolutionary</i>	29
3.3.2. <i>Quantum Evolutionary Algorithm</i>	31
3.3.3. <i>Particle Swarm Optimization</i>	32
3.3.4. <i>Quantum Angle</i>	33
3.3.5. Algoritma <i>Quantum Swarm Evolutionary</i>	33
3.3.6. Fungsi Objektif	36
3.4. Optimasi sizing SVC menggunakan PSO	37
BAB 4. SIMULASI DAN ANALISIS.....	39
4.1. Aliran Daya pada Kondisi Normal (<i>base case</i>)	39
4.2. Kontingensi n-1 pada Saluran Transmisi	43
4.3. Aliran Daya setelah Kontingensi n-1	44
4.3.1. Kontingensi Line Outage pada Saluran 1.....	44
4.3.2. Kontingensi Line Outage pada Saluran 6.....	50
4.3.3. Kontingensi Line Outage pada Saluran 2.....	54
4.4. Aliran Daya setelah Penempatan SVC dengan Metode Optimasi QSEA	58
4.4.1. Penempatan SVC dan Sizing dengan Metode Optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 1.....	59
4.4.2. Penempatan SVC dan Sizing dengan Metode Optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 6.....	62
4.4.3. Penempatan SVC dan Sizing dengan Metode Optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 2.....	65
4.5. Evaluasi Hasil dan Konvergensi Algoritma <i>Quantum Swarm Evolutionary</i>	68
4.6. Aliran Daya setelah Penempatan SVC dengan Metode Optimasi PSO	70

BAB 5. PENUTUP	75
5.1. Kesimpulan	75
5.2. Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN.....	81
BIOGRAFI PENULIS	85

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tipikal Bus Sistem Tenaga Listrik	9
Gambar 2.2	Permodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya dan Rugi Daya	11
Gambar 2.3	Kesetimbangan Daya Bus i.....	16
Gambar 2.4	Permodelan SVC terhadap Bus	18
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> Metodologi Penyelesaian Tugas Akhir	25
Gambar 3.2	<i>Single Line Diagram</i> Sistem Kelistrikan Jamali 500 kV Tahun 2017	27
Gambar 4.1	Grafik Tegangan <i>Base Case</i>	40
Gambar 4.2	Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah Kontingensi pada saluran 1	46
Gambar 4.3	Rugi-rugi daya pada saluran sistem Jamali 2017 pada kondisi <i>base case</i> dan kontingensi	50
Gambar 4.4	Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah Kontingensi pada saluran 6	52
Gambar 4.5	Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah Kontingensi pada saluran 2	56
Gambar 4.6	Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA Kontingensi pada Saluran 1	59
Gambar 4.7	Grafik konvergensi optimasi penempatan SVC menggunakan metode QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 1	62
Gambar 4.8	Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA Kontingensi pada Saluran 6	63

Gambar 4.9	Grafik konvergensi optimasi penempatan SVC menggunakan metode QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 6.....	65
Gambar 4.10	Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA Kontingensi pada Saluran 2	66
Gambar 4.11	Grafik konvergensi optimasi penempatan SVC menggunakan metode QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 2.....	68
Gambar 4.12	Grafik Tegangan Setelah Penempatan SVC dengan Sizing Menggunakan Metode PSO.....	73
Gambar 4.13	Grafik Konvergensi Optimasi Penempatan SVC menggunakan Metode PSO	73

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Bus GI (Gardu Induk) Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017	28
Tabel 4.1	Rugi-Rugi Saluran Sistem Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017 sebelum Kontingensi	41
Tabel 4.2	Data pembangkitan hasil simulasi aliran daya menggunakan metode Newton Rhapson.....	42
Tabel 4.3	Tabel Tegangan Bus Setelah Kontingensi <i>line outage</i> pada Saluran 1	44
Tabel 4.4	Rugi-Rugi Daya pada Saluran Setelah kontingensi <i>line outage</i> pada saluran 1	46
Tabel 4.5	Data pembangkitan hasil simulasi aliran daya menggunakan metode Newton Rhapson setelah <i>line outage</i> pada saluran 1	48
Tabel 4.6	Tabel Tegangan Bus setelah kontingensi <i>line outage</i> pada saluran 6.....	51
Tabel 4.7	Rugi-Rugi Daya pada Saluran Setelah Kontingensi <i>line outage</i> pada saluran 6	53
Tabel 4.8	Tabel Tegangan Bus setelah kontingensi <i>line outage</i> pada saluran 2	55
Tabel 4.9	Rugi-Rugi Daya pada Saluran Setelah kontingensi <i>line outage</i> pada saluran 2	57
Tabel 4.10	Profil Tegangan Bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 1	60
Tabel 4.11	Profil Tegangan Bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 6	63
Tabel 4.12	Profil Tegangan Bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 2	66

Tabel 4.13	Evaluasi Hasil Algoritma QSE dengan 30 partikel.....	69
Tabel 4.14	Evaluasi Hasil Algoritma QSE dengan 20 partikel.....	69
Tabel 4.15	Evaluasi Hasil Algoritma QSE dengan 10 partikel.....	69
Tabel 4.16	Evaluasi Kecepatan Konvergensi Algoritma QSE	69
Tabel 4.17	Profil tegangan bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi PSO	70
Tabel 4.18	Data pembangkitan hasil simulasi aliran daya dengan metode Newton Rhapson setelah pemasangan SVC pada bus 10 dan 11 menggunakan PSO.....	71

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi listrik telah menjadi kebutuhan utama yang harus dipenuhi dalam kehidupan masyarakat di masa kini. Seiring dengan bertambahnya kebutuhan jumlah penduduk, permintaan akan energi listrik juga terus meningkat seiring dengan berjalannya waktu. Pertumbuhan beban yang terus terjadi dan perkembangan sistem yang menjadi semakin kompleks menyebabkan sistem transmisi harus beroperasi pada batas kemampuannya. Menurut RUPTL 2016-2025, diperkirakan akan terjadi penambahan beban sebesar 7001 MVA pada sistem transmisi 500 KV Jawa-Madura-Bali pada tahun 2017. Hal tersebut menjadi tantangan tersendiri bagi insinyur dan operator kelistrikan untuk menjaga parameter kelistrikan sistem agar tetap stabil dan sesuai standar. Pada operasi sebuah sistem tenaga listrik, gangguan adalah suatu hal yang pasti terjadi. Gangguan yang terjadi dapat bersifat permanen maupun sementara dan dapat terjadi di berbagai lokasi pada sistem, namun apabila dilihat dari frekuensi terjadinya gangguan, gangguan pada saluran transmisi adalah gangguan yang paling sering terjadi. Gangguan dapat berupa hubung singkat atau terputusnya salah satu saluran.

Pemutusan saluran dari sistem (*Line Outage*) dapat menyebabkan terjadi perubahan aliran daya pada saluran yang lain, perubahan yang terjadi umumnya adalah pada level tegangan di bus, aliran daya reaktif dan pembebanan dari saluran. Saat terjadi *line Outage* saluran lain akan dibebani lebih dari kondisi normal, hal ini dapat menyebabkan terjadinya *overload* pada saluran transmisi dan dapat menyebabkan terjadinya drop tegangan pada ujung saluran. Dampak lebih lanjut dari *line Outage* dapat menyebabkan terganggunya kestabilan sistem hingga menyebabkan terjadinya *blackout* [1].

Analisis kontingensi adalah sebuah upaya untuk menentukan kondisi operasi dari sebuah sistem tenaga saat ada komponen yang rusak atau bahkan terlepas dari sistem. Dengan analisis kontingensi, operasi sistem tenaga diharapkan dapat berlanjut dengan aman walaupun terdapat gangguan pada sistem [1]. Hasil dari analisis kontingensi adalah ranking indeks yang menentukan tingkat bahaya yang dapat timbul saat kontingensi tertentu terjadi.

Setelah kemungkinan kontingensi dengan tingkat bahaya tertinggi dapat ditentukan, maka perlu dilakukan langkah korektif saat kontingensi tersebut terjadi. *FACTS devices* dapat meningkatkan kapasitas transfer daya serta memperbaiki profil tegangan pada bus saat terjadi kontingensi berupa line outage pada sistem. Namun, penempatan *FACTS devices* yang tidak tepat tidak bisa memperbaiki profil tegangan pada sistem secara maksimal, sehingga dibutuhkan optimasi penempatan dan penentuan kapasitas *FACTS devices* menggunakan algoritma kecerdasan buatan tertentu.

1.2. Permasalahan

Berdasarkan uraian latar belakang didapatkan beberapa permasalahan yang akan dikaji dalam tugas akhir ini. Permasalahan yang pertama adalah untuk mencari nilai indeks kontingensi terburuk saat terjadi line outage pada saluran transmisi. Lokasi kontingensi yang berbeda pada sistem akan memberikan dampak yang berbeda-beda terhadap sistem sehingga perlu diperhatikan dampak dari tiap-tiap kontingensi. Untuk menentukan urutan kontingensi pada saluran digunakan *Voltage performance index*. Permasalahan yang selanjutnya adalah menentukan keandalan sistem setelah terjadi kontingensi, masalah yang akan muncul adalah meningkatnya pembebanan pada transmisi, berubahnya nilai tegangan pada bus serta aliran daya reaktif yang berlebih. Selanjutnya setelah menganalisa dampak dari kontingensi perlu dilakukan sebuah solusi untuk mengurangi dampak dari kontingensi tersebut. Batasan dampak yang akan diperbaiki adalah profil tegangan pada bus. Untuk memperbaiki profil tegangan dilakukan pemasangan *FACTS devices*. Pada kondisi setelah kontingensi diasumsikan bahwa *dispatch* pembangkit tetap sama seperti kondisi sebelum kontingensi. Pada tugas akhir ini SVC akan ditempatkan pada bus dengan nilai deviasi tegangan terburuk setelah terjadi outage dan untuk menentukan penentuan kapasitas *FACTS devices* yang optimal digunakan algoritma *Quantum Swarm Evolutionary*.

1.3. Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mempelajari keandalan dari sistem kelistrikan Jawa-Bali saat terjadi gangguan pada saluran transmisi 500 KV dilihat dari kestabilan steady state.

2. Menentukan *ranking* kontingensi saluran transmisi 500 KV sistem kelistrikan Jawa-Bali menggunakan *Voltage performance index*.
3. Menentukan lokasi penempatan FACTS *devices* yang optimal berdasarkan deviasi tegangan.
4. Menentukan kapasistas FACTS *devices* yang optimal menggunakan QSEA untuk meningkatkan keamanan tegangan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Simulasi dan analisis yang dilakukan pada kondisi *steady state*.
2. Analisis sistem tenaga yang dilakukan adalah studi aliran daya dengan menggunakan metode *Newton Raphson*.
3. Simulasi menggunakan software MATLAB R2013a.
4. Data yang digunakan untuk simulasi berdasarkan data dari P2B Jawa-Bali tahun 2017.
5. Dalam penentuan SVC mengabaikan karakteristik dan rating SVC di pasaran.
6. *Dispatch* pembangkit setelah kontingensi diasumsikan sama dengan kondisi *base case*

1.5. Metodologi

Dalam penyusunan dan pengerjaan tugas akhir ini, metodologi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir ini berdasarkan pada *paper*, jurnal ilmiah atau buku yang berfokus pada kestabilan sistem tenaga, analisis kontingensi, *Voltage performance index*, *FACTS Device*, dan algoritma QSEA
2. Pengumpulan Data

Data-data yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah data sistem interkoneksi Jamali 500 kV yang didapatkan dari PT PLN (Persero) P2B Jawa-Bali yaitu berupa data saluran transmisi, data beban, dan data pembangkitan. Semua data diambil dari *Log Sheet*.
3. Permodelan Sistem

Sistem tenaga listrik yang disimulasikan adalah sistem tenaga listrik Jamali 500 kV tahun 2017. Sistem ini terdiri dari 30 bus dimana 10 bus merupakan bus generator, 20 bus beban, dan 36 saluran. Untuk SVC dimodelkan sebagai injected Q+/Q- pada bus.

Di mana ukuran dari SVC adalah jumlah daya reaktif yang diinjeksikan/diserap pada bus

4. Simulasi

Simulasi dilakukan dengan menggunakan software MATLAB. Simulasi dilakukan menggunakan program yang telah dibuat dengan memasukkan parameter sistem dan nilai hasil simulasi aliran daya. Data aliran transmisi akan disimulasikan untuk mendapat solusi penempatan dan kapasitas SVC yang optimal dan *feasible* untuk diterapkan. Simulasi akan dilakukan hingga solusi yang didapatkan memenuhi batasan permasalahan yang sudah ditentukan.

5. Analisis dan perbandingan

Melakukan analisis dan perbandingan deviasi tegangan pada sistem antara sebelum dan setelah penempatan SVC

6. Penulisan Buku

Buku Tugas Akhir ini ditulis sebagai laporan hasil dari penelitian Tugas Akhir. Penulisan laporan Tugas Akhir dilakukan untuk menunjukkan hasil dan kesimpulan dari Tugas Akhir. Kesimpulan yang ditunjukkan merupakan analisis dan solusi dari permasalahan yang diajukan.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab, dengan uraian sebagai berikut :

1. BAB 1

Bab 1 merupakan pendahuluan Tugas Akhir yang berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, serta relevansi dari laporan Tugas Akhir

2. BAB 2

Bab 2 merupakan teori penunjang yang menjadi acuan Tugas Akhir meliputi teori sistem tenaga listrik secara umum, studi aliran daya dengan menggunakan metode Newton Raphson, prinsip kerja dari SVC (Static VAR Compensator), teori analisis kontingensi, teori mengenai *Voltage Performance Index*, teori algoritma dari metode optimasi QSEA dan juga teori algoritma dari metode optimasi pembandingan QSEA yaitu PSO.

3. **BAB 3**
Bab 3 menjelaskan tentang tahapan perancangan Tugas Akhir yang akan dilakukan, yaitu mengenai data yang digunakan, permodelan simulasi, serta perancangan program simulasi yang akan dijalankan untuk menganalisa permasalahan dalam Tugas Akhir
4. **BAB 4**
Bab 4 menjelaskan tentang hasil dan simulasi penempatan optimal dan penentuan kapasitas optimal dari SVC dan analisis dari hasil yang didapatkan dari proses simulasi program.
5. **BAB 5**
Bab 5 menjelaskan tentang kesimpulan yang diambil dari hasil simulasi program dan analisis yang telah dilakukan. Juga terdapat saran perbaikan agar hasil dari Tugas Akhir ini dapat dikembangkan dan disempurnakan pada Tugas Akhir selanjutnya.

1.7. Relevansi

Hasil yang didapatkan dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan teknologi di bidang sistem tenaga, khususnya pada permasalahan optimasi saluran transmisi menggunakan *FACTS device*. Hasil Tugas akhir ini juga dapat dimanfaatkan sebagai dasar teori bagi penelitian di masa depan serta menjadi referensi bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS yang ingin meneliti masalah serupa sebagai Tugas Akhir.

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

BAB II

PERALATAN FACTS PADA ALIRAN DAYA

2.1. Studi Aliran Daya

Studi aliran daya dilakukan pada suatu sistem tenaga untuk mendapatkan informasi yang dibutuhkan untuk dilakukan analisa dan studi lebih lanjut. Informasi yang diperoleh yaitu besar dan sudut tegangan pada masing-masing bus, aliran daya aktif dan reaktif pada tiap saluran serta rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Hasil dari studi aliran daya digunakan sebagai pedoman kondisi awal (eksisting) dalam melakukan studi operasi ekonomis, analisis hubung singkat, analisis kestabilan, serta perencanaan pengembangan sistem berupa analisa kondisi unit pembangkit, saluran transmisi dan beban dari sebuah sistem tenaga listrik.

2.1.1. Analisis Aliran Daya [3]

Dalam melakukan analisis aliran daya, sistem tenaga listrik diasumsikan beroperasi pada keadaan stabil dengan beban seimbang, serta dimodelkan dalam sistem satu fasa. Setiap bus pada sistem tenaga dihubungkan dengan empat besaran yaitu magnitude tegangan $|V|$, sudut fasa (δ), daya aktif (P), dan daya reaktif (Q). Dalam solusi aliran daya, dua besaran telah ditentukan dan dua lainnya merupakan hasil dari perhitungan aliran daya.[3]

Bus pada sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi tiga tipe berdasarkan besaran-besarannya[4] :

1. *Slack/swing* bus adalah bus yang memiliki nilai magnitude tegangan dan sudut fasa yang sudah ditentukan (tetap). Dalam sebuah sistem tenaga listrik diperlukan 1 bus sebagai pemenuh kebutuhan daya yang tidak dapat dibangkitkan oleh bus-bus pembangkitan yang lain. Karena nilai beban yang berubah serta rugi-rugi saluran yang tidak dapat ditentukan di awal, maka daya P dan Q yang dikirim *slack* bus akan berubah-ubah sesuai dengan kekurangan daya pada sistem.
2. Generator bus (P - V bus), adalah bus dengan suplai daya aktif yang sudah ditentukan dengan nilai magnitude tegangan tetap. Berbeda dengan *slack* bus, bus ini menyuplai daya berdasarkan ketetapan daya aktif.

3. Load bus (P-Q bus), adalah bus yang terhubung dengan peralatan beban. P dan Q dari beban telah diketahui dan bernilai tetap, sehingga hasil perhitungan aliran daya adalah tegangan V dan sudut fasa.

Untuk melakukan sebuah studi aliran daya suatu pada sistem tenaga listrik dibutuhkan data-data dari bus dan saluran transmisi.

Data-data yang terdapat pada tiap-tiap bus yaitu :

1. Magnitude tegangan (dalam satuan p.u.)
2. Sudut tegangan (θ)
3. Nilai pembebanan berupa daya aktif (P) dan daya reaktif (Q)
4. Nilai pembangkitan berupa daya aktif (P), daya reaktif (Q), Q_{min} dan Q_{max} .

Data-data yang terdapat pada saluran transmisi yaitu :

1. Resistansi saluran transmisi (dalam satuan per unit)
2. Reaktansi saluran transmisi (dalam satuan per unit)
3. Nilai tap pada trafo
4. Rating tegangan (dalam kV)

2.1.2. Sistem per-unit (pu)

Untuk mempermudah perhitungan dan analisis dalam sistem tenaga listrik, digunakan nilai-nilai dalam satuan per unit (p.u). Rumusan dasar dalam mencari satuan per unit adalah sebagai berikut[3-4] :

$$pu = \frac{actual}{base} \quad (2.1)$$

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

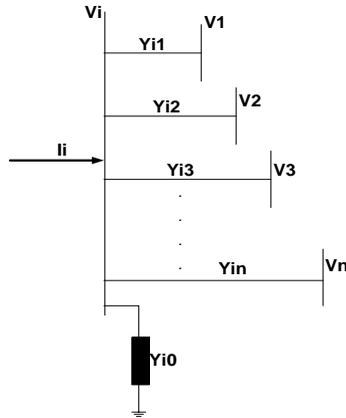
$$I_{base} = \frac{KVA_{base1\phi}}{KV_{baseLN}} \quad (2.2)$$

Untuk mencari nilai impedansi basis (Z_{base}), dinyatakan pada persamaan berikut :

$$\begin{aligned} Z_{base} &= \frac{(KV_{baseLN})^2 \times 1000}{KVA_{base1\phi}} \\ &= \frac{(KV_{baseLN})^2}{MVA_{base1\phi}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.1.3. Persamaan Aliran Daya

Penggambaran sederhana dari bus tipikal pada sistem tenaga dapat dilihat pada Gambar 2.1. Saluran transmisi dimodelkan menggunakan model persamaan Π dengan impedansi yang sudah dikonversikan menjadi admitansi dalam satuan p.u (per unit) pada base yang sama.



Gambar 2.1 Tipikal Bus Sistem Tenaga Listrik [3]

Dari persamaan Y_{bus} dapat ditentukan nilai arus, dengan menggunakan prinsip hukum Kirchoff I dengan persamaan berikut [3] :

$$I_i = V_i y_{i0} + (V_i - V_1) y_{i1} + (V_i - V_2) y_{i2} + \dots + (V_i - V_n) y_{in} \quad (2.4)$$

$$I_i = V_i (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}) - V_1 y_{i1} - V_2 y_{i2} - \dots - V_n y_{in} \quad (2.5)$$

Keterangan :

- I_i = arus pada bus i
- V_i = tegangan pada bus i
- y_{iN} = admitansi antara bus i dan bus N
- y_{i0} = admitansi antara bus i ke tanah

Dari persamaan (2.4) dan (2.5), dapat diperoleh persamaan :

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j, \quad j \neq 1 \quad (2.6)$$

Keterangan :

I_i = Arus yang mengalir pada bus i

V_i, V_j = Tegangan pada bus j

y_{ij} = Admitansi antara bus i dan bus j

Perhitungan daya aktif dan reaktif pada bus i adalah sebagai berikut :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.7)$$

Atau :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.8)$$

Keterangan :

I_i = Arus yang mengalir pada bus i

V_i = Tegangan pada bus j

P_i = Daya aktif pada bus i

Q_i = Daya reaktif pada bus i

Sehingga dapat diperoleh hubungan antara daya aktif dan daya reaktif dengan admitansi pada saluran transmisi dengan persamaan:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq 1 \quad (2.9)$$

Keterangan :

y_{ij} = Admitansi antara bus i dan bus j

V_i = Tegangan pada bus j

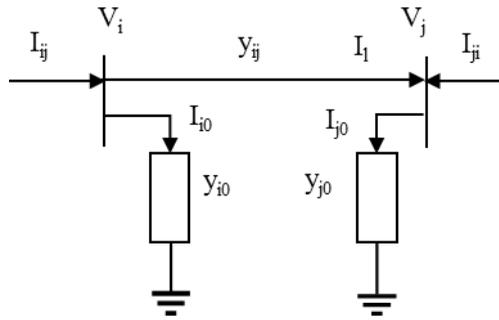
P_i = Daya aktif pada bus i

Q_i = Daya reaktif pada bus i

Dari persamaan (2.9) didapatkan bahwa untuk mencari nilai aliran daya pada bus i , dibutuhkan iterasi tertentu dikarenakan persamaan (2.9) merupakan persamaan aljabar non-linear.

2.1.4. Perhitungan Aliran Daya dan Rugi-Rugi Saluran

Untuk melakukan perhitungan aliran daya, berdasarkan referensi [3], diasumsikan terdapat aliran daya di antara 2 buah bus (i dan j) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Pemodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya dan Rugi Daya

Arus I_{ij} mengalir dari bus i menuju bus j , sehingga apabila diamati dengan bus j sebagai referensi, maka aliran arus dari bus i bernilai positif, sehingga besarnya nilai arus yang mengalir dari $i \rightarrow j$ adalah sebagai berikut :

$$I_{ij} = I_l + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (2.10)$$

Arus I_{ji} mengalir dari bus j menuju bus i , sehingga apabila diamati bus i sebagai referensi, maka aliran arus dari bus j bernilai positif, sehingga besarnya nilai arus yang mengalir dari $j \rightarrow i$ adalah sebagai berikut :

$$I_{ji} = -I_l + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (2.11)$$

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

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.12)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.13)$$

Dari persamaan (2.12) dan (2.13) dapat diperoleh bahwa besar rugi-rugi daya yang terdapat pada saluran transmisi merupakan penjumlahan aljabar dari kedua persamaan diatas, yaitu [3,4]:

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.14)$$

Keterangan :

S_{Lij} = total rugi-rugi daya pada saluran transmisi (MW)

S_{ij} = rugi-rugi saluran transmisi i - j

S_{ji} = rugi-rugi saluran transmisi j - i

2.1.5. Aliran Daya dengan Metode Newton Raphson

Terdapat beberapa metode untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya, diantaranya yaitu Metode Gauss Seidel, metode Newton Raphson, metode Fast Decoupled dan lain-lain. Metode yang akan digunakan untuk menyelesaikan perhitungan aliran daya pada Tugas Akhir ini adalah metode aliran daya Newton Raphson.

Metode Newton-Raphson memiliki konvergensi kuadratik yang lebih baik, perhitungan lebih cepat, dan jumlah iterasi yang lebih sedikit. Untuk sistem tenaga yang besar, metode Newton Raphson lebih praktis dan efisien untuk digunakan, karena banyaknya iterasi yang diperlukan untuk mendapatkan solusi aliran daya tidak terikat pada ukuran sistem. Di dalam masalah aliran daya, daya aktif dan besar tegangan telah ditentukan pada bus generator, maka persamaan aliran daya dapat dirumuskan ke dalam bentuk polar.

Dari Gambar 2.2, dapat dihitung arus yang melewati bus i dituliskan dengan persamaan (2.6) dan dapat ditulis ulang menjadi :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.15)$$

Dari persamaan (2.15), bila diubah dalam bentuk polar, maka diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.16)$$

Dengan memberikan nilai daya kompleks pada bus i adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.17)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.16) untuk nilai I_i ke dalam persamaan (2.17), maka didapatkan daya kompleks pada bus i adalah :

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.18)$$

Dengan memisahkan komponen riil dan imajinerinya didapatkan nilai daya aktif dan reaktif pada bus i , yaitu :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| |V_i| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.19)$$

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

Persamaan (2.19) dan (2.20) adalah persamaan non linier yang terdiri dari variabel bebas, dengan nilai besaran tegangan dalam satuan per unit (p.u) dan besaran sudut dalam satuan radian. Pada setiap bus, terdapat dua persamaan untuk bus beban yaitu persamaan (2.19) dan persamaan (2.20) dan satu persamaan untuk bus generator. Kedua persamaan diatas diturunkan dari deret Taylor pada persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \dots \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{array}{c|c} \begin{array}{cccc} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{array} & \begin{array}{c} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \dots \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \dots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{array} \end{array}$$

Pada permasalahan ini, bus 1 diasumsikan sebagai *slack* bus. Hubungan yang linier antara perubahan kecil dalam sudut tegangan $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta|V_i^{(k)}|$ dan dengan perubahan kecil pada daya aktif dan reaktif ($\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$) diberikan oleh matriks jacobian. Elemen-elemen pada matriks Jacobian adalah turunan parsial atau sebagian dari persamaan (2.19) dan (2.20) yang diturunkan terhadap $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan $\Delta|V_i^{(k)}|$. Dalam pemodelan yang pendek, dapat dituliskan menjadi :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \dots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ \dots & \dots \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \dots \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

Untuk bus Generator, besar tegangan telah dispesifikasikan. Sehingga jika dalam sebuah sistem yang terdiri dari n bus, m bus generator, maka akan terdapat m persamaan untuk ΔV dan ΔQ pada kolom matriks Jacobian yang dihilangkan. Terdapat pula batasan yang berkaitan dengan daya aktif adalah n-1, dan batasan daya reaktif adalah n-1-m. Sedangkan ukuran dari matriks Jacobian adalah (2n-2-m) x (2n-2-m). Untuk elemen J1 memiliki ukuran matriks (n-1) x (n-1). Untuk elemen J2 memiliki

ukuran (n-1) x (n-1-m). Untuk elemen J3 memiliki ukuran (n-1-m) x (n-1) dan untuk elemen J4 memiliki ukuran (n-1-m) x (n-1-m). Untuk persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J1 adalah

:

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

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.23)$$

Persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq 1}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.25)$$

Persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J3 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.27)$$

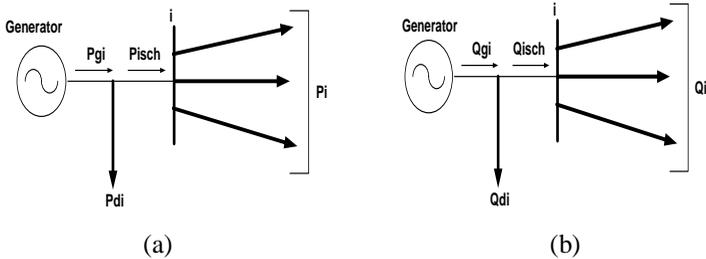
Persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J4 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq 1}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.29)$$

Aliran kesetimbangan daya pada bus i dapat digambarkan sebagai berikut, untuk memperoleh persamaan daya *scheduling*, daya sisa (*power*

residual/power mismatch) serta perhitungan baru untuk tegangan busdan sudut fasa yang baru.



Gambar 2.3 Kesetimbangan Daya Bus i , Daya Aktif (a) dan Daya Reaktif (b)

Berdasarkan Gambar 2.3 diatas, maka didapatkan persamaan daya *scheduling* :

$$P_i^{sch} = P_{gi} - P_{di} \quad (2.30)$$

$$Q_i^{sch} = Q_{gi} - Q_{di} \quad (2.31)$$

Kemudian persamaan *power mismatch/power residual* adalah sebagai :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.32)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.33)$$

Sehingga dapat diperoleh tegangan dan sudut baru :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.34)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.35)$$

2.2. Peralatan FACTS

FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) adalah peralatan *solid state* yang menggunakan konsep elektronika daya.. *FACTS devices* diperkenalkan oleh Hingorani [5] pada tahun 1988, dan telah digunakan secara luas pada saluran-saluran transmisi dala, sistem kelistrikan di seluruh dunia. *FACTS* pada dasarnya terdiri dari reaktor [6] dan kapasitor, mampu memberikan kompensasi daya reaktif yang dapat diatur pada saluran transmisi sehingga dapat memperbaiki profil tegangan serta mengurangi rugi-rugi daya pada saluran. CR. Fuente [7,8] (1987) dan Douglas J. Gotham (1998) [9] telah membuktikan bahwa penambahan *FACTS* pada sistem tenaga listrik dapat memberikan pengaruh yang signifikan.

FACTS devices menggunakan aplikasi thyristor untuk elektronika daya. Dengan memanfaatkan peralatan elektronika daya sebagai kontroler, *FACTS devices* menjadi salah satu pilihan utama dalam melakukan kompensasi sekaligus kontrol pada saluran transmisi [11].

Secara umum *FACTS devices* dapat bekerja sebagai :

1. Kompensator paralel
2. Kompensator seri
3. Kompensator seri dan paralel

Untuk menentukan *FACTS devices* yang ingin digunakan harus menyesuaikan dengan tujuan pemasangan *FACTS devices* atau dengan memperhatikan persamaan di bawah ini :

$$P_{ij} = \frac{v_i v_j}{x_{ij}} \sin \theta_{ij} \quad (2.36)$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (2.37)$$

Keterangan :

V_i dan V_j = Tegangan pada bus i dan j

X_{ij} = Reaktansi saluran saluran antara bus i dan j

θ_{ij} = Sudut antara V_i dan V_j (dalam phasor)

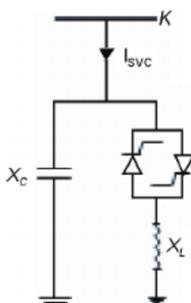
Dengan melihat kedua persamaan diatas, maka bisa disimpulkan bahwa daya aktif sangat berhubungan dengan θ_{ij} dan daya reaktif berhubungan dengan V_i dan V_j . Sedangkan perubahan reaktansi saluran mempengaruhi keduanya. Sehingga dari pernyataan tersebut, dibutuhkan

FACTS devices untuk memperbaiki profil tegangan yaitu SVC dimana TCSC dapat memberikan kompensasi daya reaktif pada saluran.

2.2.1. Static VAR Compensator (SVC)

Static VAR Compensator adalah *FACTS devices* yang dapat memberikan suplai var statis yang dapat dikontrol. Komponen penyusun SVC sama dengan TCSC yaitu gabungan antara kapasitor, reaktor dan thyristor sebagai kontroler. SVC bekerja berdasarkan nilai tegangan. Ketika tegangan sistem rendah SVC akan menginjeksikan daya reaktif menuju sistem dan sebaliknya. Nilai daya reaktif yang diinjeksikan SVC dipengaruhi oleh sudut penyalan thyristor [5]

2.2.2. Permodelan SVC



Gambar 2.4 Permodelan SVC terhadap Bus

Dari Gambar 2.4 diatas, terlihat bahwa SVC merupakan kombinasi antara komponen TCR dengan kapasitor. SVC terdiri dari induktor yang dirangkai secara paralel dengan thyristor. Sehingga fungsi X_{eq} merupakan hasil dari sudut penyalan [13]:

$$B_L(\alpha) = -\frac{1}{\omega L} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \quad (2.38)$$

$$B_c = \omega C \quad (2.39)$$

$$B_{eq} = B_L(\alpha) + B_c \quad (2.40)$$

Sehingga dari persamaan (2.38), (2.39) dan (2.40) didapatkan persamaan X_{eq} untuk SVC :

$$X_{eq} = \frac{-1}{B_L(\alpha) + B_c} \quad (2.41)$$

2.3. Voltage Security

Keamanan tegangan dapat didefinisikan sebagai keamanan tegangan statis, keamanan tegangan transien, dan keamanan tegangan dinamis sesuai waktu gangguan yang kontinu. Ketidakamanan tegangan terdiri atas ketidakstabilan tegangan atau *over voltage* akibat gangguan, peningkatan beban, atau jenis gangguan lain pada sistem. Masalah keamanan tegangan telah menjadi faktor penting yang mempengaruhi keamanan jaringan sistem tenaga dan membatasi kemampuan transmisi daya yang tersedia. Dewasa ini banyak kejadian *blackout* yang parah di seluruh dunia yang berhubungan dengan keamanan tegangan dan sebagian besar terjadi karena tegangan kolaps. [10]

2.3.1 Voltage Collapse

Tegangan kolaps adalah ketidakstabilan sistem yang melibatkan beberapa kegagalan komponen sistem tenaga secara serentak. Biasanya terjadi pada sistem yang dibebani berat, mengalami gangguan dan / atau kekurangan daya reaktif. [18]

Kolaps tegangan terjadi karena permintaan daya reaktif pada beban tidak dapat dipenuhi akibat batasan daya reaktif pada produksi daya dan saluran transmisi. Batasan produksi daya reaktif termasuk kapasitas generator, batas daya reaktif SVC, dan pengurangan daya reaktif yang diproduksi oleh kapasitor pada tegangan rendah. Batasan utama pada saluran transmisi adalah tingginya rugi-rugi daya reaktif pada saluran yang dibebani tinggi serta *outage* pada saluran. Permintaan daya reaktif juga bisa meningkat akibat perubahan beban seperti pemasangan motor atau penambahan proporsi beban kompresor. Tegangan kolaps terjadi pada rentang skala waktu yang berbeda-beda mulai dari detik hingga hitungan jam, khususnya:

- Fenomena elektromekanik transien (generator, regulator, mesin induksi) dan fenomena peralatan elektronika daya (SVC, HVDC) pada rentang waktu detik
- *Switching* peralatan diskrit seperti OLTC dan pembatas eksitasi, bekerja pada rentang waktu puluhan detik
- Proses pemulihan beban, dalam rentang waktu beberapa menit.

Terdapat beberapa kejadian pada sistem yang dapat menimbulkan tegangan kolaps. Umumnya kejadian ini memiliki dampak yang besar terhadap produksi daya reaktif atau saluran transmisi.

- Penambahan beban
- Batas daya reaktif generator atau SVC
- Perubahan tap transformator
- Saluran transmisi putus atau generator *outage*

2.3.2 Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan berhubungan dengan kemampuan sebuah sistem tenaga untuk menjaga nilai tegangan yang diizinkan pada semua bus dalam kondisi operasi normal dan saat mengalami gangguan. Sebuah sistem menjadi tidak stabil saat gangguan (lepasnya generator, saluran transmisi, transformator, bus, penambahan beban, penurunan pembangkitan daya, dan pelemahan kontrol tegangan) menyebabkan tegangan jatuh dengan cepat dan sistem kontrol otomatis gagal untuk memperbaiki level tegangan. Penyebab utama terjadinya ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan sistem untuk memenuhi permintaan daya reaktif beban untuk menjaga nilai tegangan yang diinginkan pada sistem yang dibebani tinggi. Faktor lain yang berpengaruh pada ketidakstabilan tegangan adalah batasan daya reaktif generator, karakteristik beban, karakteristik peralatan kompensasi daya reaktif, dan operasi peralatan kontrol tegangan. [19]

Kontrol dan ketidakstabilan tegangan adalah masalah lokal namun memiliki dampak yang luas. Kolaps tegangan adalah hasil dari serangkaian kejadian yang menyebabkan nilai tegangan menjadi sangat rendah secara tiba-tiba pada bagian yang penting pada sistem tenaga.

Dalam melakukan analisis, permasalahan kestabilan tegangan dapat diklasifikasikan sebagai gangguan kecil dan gangguan besar. Kestabilan tegangan gangguan kecil memperhitungkan kemampuan sistem tenaga untuk mengatur tegangan setelah terjadi gangguan yang

kecil seperti perubahan beban. Analisis kestabilan tegangan gangguan kecil dilakukan pada periode *steady state*. Pada kasus ini sistem dapat dilinierkan pada titik operasi dan analisisnya pada umumnya berdasarkan teknik *eigen value* dan *eigen vector*. Kestabilan tegangan gangguan besar menganalisis respon sistem tenaga pada gangguan seperti hubung singkat, generator lepas, dan saluran transmisi lepas. Kestabilan tegangan gangguan besar dapat dikaji menggunakan simulasi pada domain waktu non-linier untuk waktu singkat dan analisis aliran daya untuk waktu panjang.

2.4. Voltage Performance Index

Indeks kontingensi pada bus atau saluran adalah sebuah variable yang menunjukkan apakah operasi sistem setelah kontingensi aman atau tidak. Indeks kontingensi digunakan untuk menunjukkan saluran transmisi yang dapat menyebabkan kondisi kritis pada sistem apabila saluran tersebut dilepas dari sistem.

Untuk menentukan indeks kontingensi dapat digunakan beberapa metode. Salah satunya adalah *Voltage performance index* [10]. Dengan indeks kontingensi, skenario terburuk dari terputusnya saluran dapat diperoleh. Skenario tersebut yang akan menyebabkan dampak paling berbahaya apabila sistem tenaga listrik dioperasikan secara kontinu setelahnya. [11]

$$VPI = \sum_{i=1}^{NB} \left(\frac{\Delta|V_i|}{\Delta|V_i^{max}|} \right)^{2m} \quad (2.42)$$

$\Delta|V_i|$ = Selisih absolut antara tegangan saat kontingensi dan kondisi *base case*

$\Delta|V_i^{max}|$ = Batas tegangan yang diizinkan saat terjadi *outage*

Padatugas akhir ini nilai m dan $\Delta|V_i^{max}|$ ditetapkan 2 dan 0.2 p.u secara berturut-turut. Nilai tegangan base case dan setelah kontingensi didapatkan dengan melakukan analisis aliran daya *Newton-Rhapson* pada sistem.

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

BAB III

PERMODELAN SISTEM DAN METODOLOGI PENELITIAN

Pada Tugas Akhir ini, *FACTS (Flexible AC Transmission System) devices* shunt yaitu SVC (Static VAR Compensator) ditempatkan pada saluran transmisi 500kV sistem kelistrikan Jamali (Jawa-Madura-Bali). *Voltage Performance Index* digunakan untuk menentukan urutan kontingensi yang paling parah, jenis kontingensi yang dianalisa adalah kontingensi *n-1 line outage* , dari hasil simulasi kontingensi akan ditentukan letak pemasangan SVC yaitu pada bus yang memiliki deviasi tegangan paling tinggi terhadap *base case*, kemudian metode kecerdasan buatan QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*) akan digunakan untuk menentukan ukuran yang optimal dari SVC. Dan sebagai pembanding dari metode optimasi QSEA ini adalah metode optimasi PSO (*Particle Swarm Optimization*). Penentuan lokasi dan ukuran optimal SVC dilakukan untuk meningkatkan *Voltage Security* pada sistem. Pada bab ini akan diuraikan metode penyelesaian Tugas Akhir, data saluran transmisi, data pembangkitan, data pembebanan sistem, dan pemodelan sistem Jamali 500 kV. Program simulasi dilakukan menggunakan *software* Matlab dan validasi data menggunakan *software* ETAP.

3.1 Metodologi

Metode untuk melaksanakan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Studi literatur yang dilakukan berdasarkan pada paper, jurnal atau buku yang berfokus pada kestabilan sistem tenaga, analisis kontingensi, Voltage performance index, dan FACTS Device

Data yang dibutuhkan adalah data sistem dan peralatan sistem Jawa-Bali, pengumpulan data dilakukan melalui data yang dimiliki oleh Penyaluran dan Pusat Pengaturan Beban (P3B) Jawa-Bali

2. Pemodelan Sistem

Sistem distribusi yang akan diteliti dimodelkan dalam bentuk matematis berdasar data-data yang telah diperoleh. Sistem yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu sistem transmisi 500 KV Jawa-Bali.

3. Perancangan Program

Pada Tugas Akhir ini terdapat dua program utama, yaitu program analisa aliran daya dan penentuan ranking contingency menggunakan Voltage performance index untuk mendapatkan data kondisi sistem setelah terjadi kontingensi.

Program kedua yang dirancang yaitu program penentuan solusi penempatan optimal SVC. Kemudian hasil dari program ini akan ditampilkan sebagai solusi yang feasible untuk meningkatkan profil tegangan sistem setelah terjadi kotingensi pada sistem.

4. Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan program yang telah dibuat dengan memasukkan parameter sistem dan nilai hasil simulasi aliran daya. Data aliran transmisi akan disimulasikan untuk mendapat solusi penempatan dan kapasitas SVC yang optimal dan feasible untuk diterapkan. Simulasi akan dilakukan hingga solusi yang didapatkan memenuhi batasan permasalahan yang sudah ditentukan.

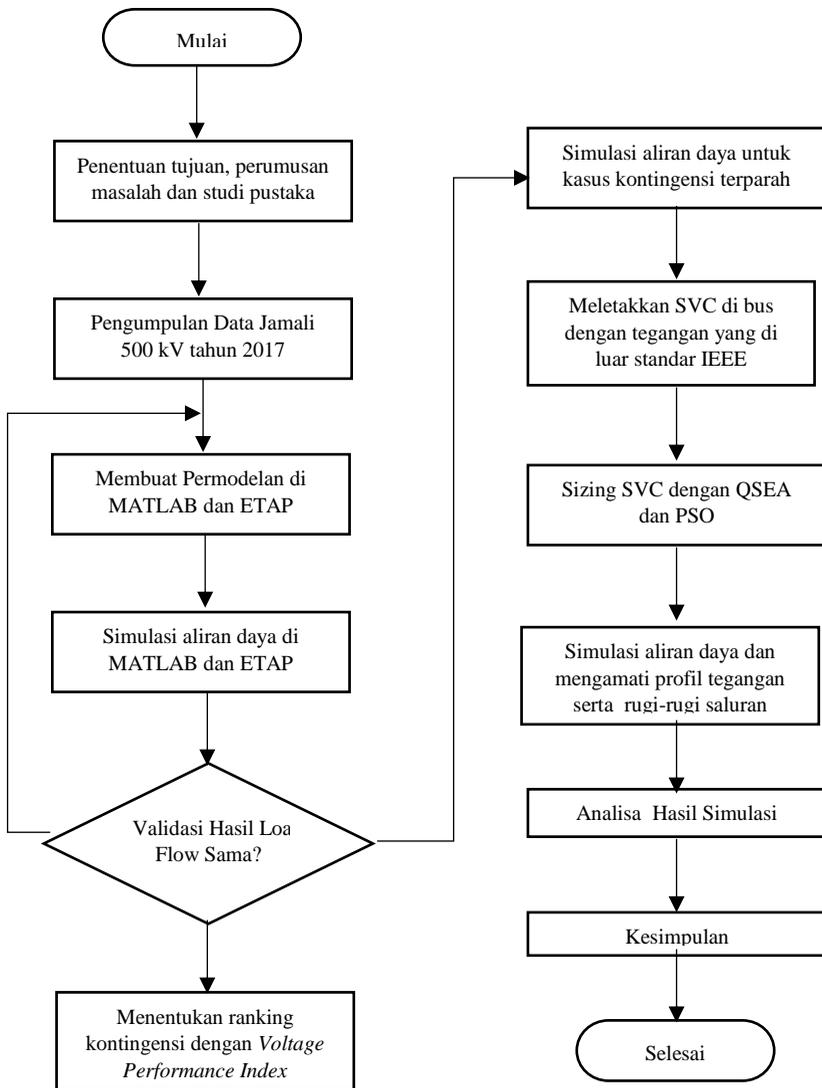
5. Penarikan Kesimpulan

Dari hasil simulasi dapat diperoleh kesimpulan berupa ranking kontingensi terburuk dan solusi penempatan dan kapasitas SVC yang optimal untuk kontingensi tersebut.

6. Pembuatan Laporan

Pembuatan laporan dilakukan setelah tahap-tahap penelitian yang telah disebutkan selesai dilakukan. Pembuatan laporan ditulis berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan yang didapat beserta tahap-tahap penelitian yang telah dilakukan.

Gambar 3.1 di bawah merupakan *flowchart* metodologi dari Tugas Akhir.



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penyelesaian Tugas Akhir

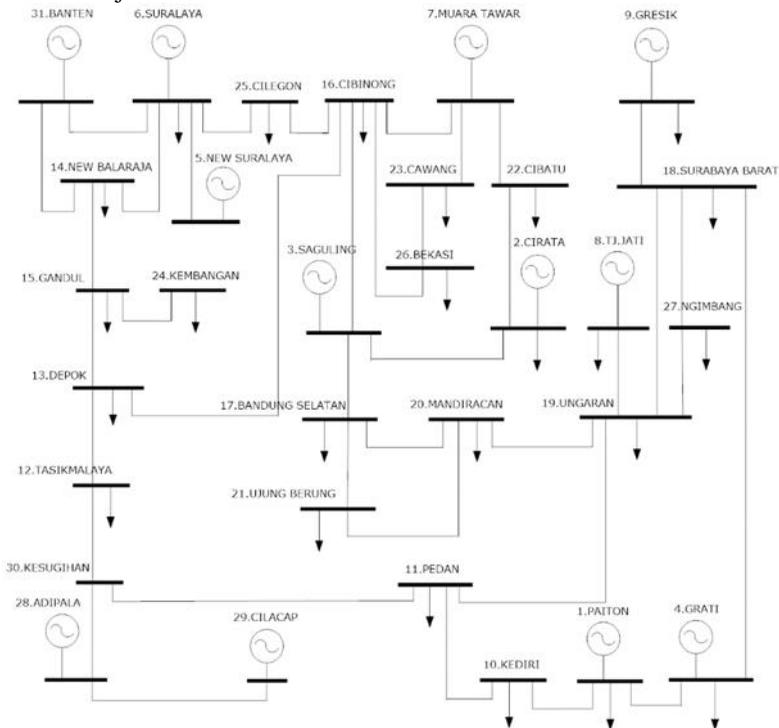
Berikut ini merupakan penjelasan rinci dari *flowchart* metodologi penyelesaian Tugas Akhir pada Gambar 3.1:

- Langkah 1 : Metodologi dimulai dari penentuan tujuan, perumusan masalah, dan tinjauan pustaka.
- Langkah 2 : Pengumpulan data meliputi data pembangkitan, data pembebanan, data saluran dan data transformator pada sistem Jamali 500 kV tahun 2017. Data yang digunakan diambil dari PT. PLN P2B Jawa-Bali.
- Langkah 3 : Membuat pemodelan pada Matlab dan ETAP. Pemodelan pada Matlab menggunakan metode Newton Raphson berdasarkan referensi [10].
- Langkah 4 : Mensimulasikan *loadflow* (aliran daya) pada Matlab dan ETAP.
- Langkah 5 : Hasil aliran daya dari Matlab dan ETAP dianalisa. Hasil aliran daya ada Matlab divalidasi dengan ETAP sehingga memperoleh hasil yang sama. Data yang dituliskan di Matlab merupakan data yang akan diolah untuk proses selanjutnya.
- Langkah 6 : Menghitung indeks kontingensi N-1 dengan kasus *line outage* dari sistem menggunakan *Voltage Performance Index* kemudian diranking dan diobservasi.
- Langkah 7 : Menentukan bus lokasi pemasangan SVC. SVC diletakkan pada bus yang memiliki nilai tegangan di luar standar normal IEEE setelah terjadinya kontingensi.
- Langkah 7 : Melakukan optimasi pada *sizing* SVC dengan metode QSEA dan PSO.
- Langkah 8 : Mensimulasikan aliran daya setelah penempatan QSEA sesuai hasil *Voltage Performance Index* dengan *sizing* sesuai hasil optimasi dengan metode QSEA dan PSO. Kemudian menghitung penurunan rugi-rugi daya pada saluran serta mengamati profil tegangan pada bus.
- Langkah 9 : Melakukan perbandingan hasil simulasi dan melakukan analisa.
- Langkah 10 : Dari analisa yang telah dilakukan ditarik kesimpulan. Bus dan *sizing* dimana SVC ditempatkan menghasilkan penurunan rugi-rugi daya terbesar, dipilih sebagai lokasi dan *sizing* dari SVC yang optimal.

3.2 Permodelan Sistem Kelistrikan Jamali 500 kV

Data sistem yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah data sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali 500 kV tahun 2017 yang diperoleh dari PT. PLN P2B (Pusat Pengatur Beban) Gandul, Depok, Jakarta per tanggal 24 Maret 2017. Data yang diperoleh berupa *logsheet* yang selanjutnya diolah sesuai dengan permodelan yang telah ditentukan.

Sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali 500 kV tahun 2017 terdiri dari 30 gardu induk. Sistem Jamali 500 kV tahun 2017 terdiri dari 30 bus (1 buah slack bus, 9 PQ generator bus dan 20 load bus) dan 35 saluran transmisi. Sistem ini memiliki tegangan bus sebesar 500 kV dan base daya 100 MVA. *Single line diagram* sistem kelistrikan Jamali 500 kV tahun 2017 ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3.2 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan Jamali 500 kV Tahun 2017

Tabel 3.1 merupakan data pembangkitan dan pembebanan untuk setiap gardu induk pada sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017. Untuk data detail dari pembangkitan setiap generator dapat dilihat pada lampiran 1.

Tabel 3.1. Data Bus GI (Gardu Induk) Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017

No Bus	Nama Bus	Load		Generation	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	Paiton	839	162	3984	0
2	Cirata	550	201	355	0
3	Saguling	0	0	574	0
4	Grati	512	217	450	0
5	New Suralaya	69	24	470	0
6	Suralaya	80	79	2395	0
7	Muara Tawar	0	0	1084	0
8	Tanjung Jati	263	42	1906	0
9	Gresik	117	-89	1159	0
10	Kediri	444	134	0	0
11	Pedan	657	194	0	0
12	Tasikmalaya	166	67	0	0
13	Depok	517	-82	0	0
14	New Balaraja	946	134	0	0
15	Gandul	919	-106	0	0
16	Cibinong	364	173	0	0
17	Bandung Selatan	439	174	0	0
18	Surabaya Barat	1284	518	0	0
19	Unggaran	1915	143	0	0
20	Mandirancang	0	68	0	0
21	Ujung Berung	0	-78	0	0
22	Cibatu	878	566	0	0

Tabel 3.1. Data Bus GI (Gardu Induk) Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017 (lanjutan)

No Bus	Nama Bus	Load		Generation	
		MW	MVAR	MW	MVAR
23	Cawang	710	150	0	0
24	Kembangan	0	0	0	0
25	Cilegon	122	281	0	0
26	Bekasi	1061	-73	0	0
27	Ngimbang	358	83	0	0
28	Adipala	0	0	0	0
29	Cilacap	0	0	689	0
30	Kesugihan	0	0	0	0
TOTAL		13209.6918	2982.2245	13064.4300	0.0000

Sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 terdiri dari 30 gardu induk dimana 10 diantaranya merupakan generator bus. Generator pada setiap gardu induk jumlahnya bermacam-macam. Paiton memiliki 8 generator, Cirata memiliki 8 generator dengan 5 generator yang aktif, Saguling memiliki 4 generator, Grati memiliki 6 generator dengan 4 generator yang aktif, New Suralaya memiliki 1 generator, Suralaya memiliki 7 generator, Muara Tawar memiliki 14 generator dengan 8 generator yang aktif, Tanjung Jati memiliki 4 generator, Gresik memiliki 18 generator dengan 12 generator aktif, Cilacap memiliki 3 generator, dan Adipala memiliki 1 generator namun belum aktif.

Sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 total terdiri dari 36 line.

3.3 Optimasi *sizing* SVC menggunakan QSEA

3.3.1 *Quantum Swarm Evolutionary*

Komputasi kuantum pertama kali diusulkan oleh Benioff dan Feynman pada awal tahun 1980. Didapatkan bahwa komputasi kuantum dapat menyelesaikan berbagai permasalahan sulit dalam bidang komputasi klasik, yang didasarkan pada konsep teori kuantum, seperti: superposisi kuantum, keterikatan, dan interferensi. Karena kinerja

komputasi yang baik dan unik, minat terhadap penggunaan konsep komputasi kuantum meningkat. Han mengusulkan Quantum Evolutionary Algorithm (QEA) [10] yang berdasar pada konsep komputasi kuantum. QEA telah diterapkan pada beberapa masalah optimasi dan aplikasi seperti fungsi optimasi, pemindai wajah, pemisahan sumber buta, dll.

Performa dari QEA menunjukkan bahwa QEA lebih baik daripada algoritma evolusi konvensional, seperti Genetic Algorithm (GA), dalam berbagai bidang. Meskipun delta ukuran langkah pada QEA selalu konstan dan dirancang dengan aplikasi masalah kompilasi, namun tetap tidak memiliki dasar teoritis sampai sekarang. Sedangkan, metode PSO (Particle Swarm Optimization), yang merupakan strategi optimasi berbasis populasi yang diusulkan oleh Kennedy dan Eberhart, menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam menyelesaikan berbagai jenis masalah optimasi penggunaan dan optimasi pengukuran dalam beberapa tahun terakhir. PSO diawali dengan kumpulan partikel acak dan kemudian memperbaharui kecepatan dan posisinya berdasarkan rumus berikut:

$$v(t + 1) = v(t) + c1 * rand * (pbest(t) - position(t)) + c2 * rand * (gbest - position(t)) \quad (3.1)$$

$$position(t + 1) = position(t) + v(t + 1) \quad (3.2)$$

QSEA menggunakan mekanisme ekspresi kuantum bit baru yang disebut sudut quantum dan menggunakan PSO untuk mengupdate Q-bit secara otomatis.

QSEA merupakan pengembangan dari algoritma QEA. Pada Algoritma QEA, Q-bits didefinisikan sebagai sudut kuantum yang selalu diperbarui menggunakan operator *quantum gate*. Terdapat beberapa jenis *quantum gate* yang dapat digunakan untuk memperbarui nilai *quantum angle*. Pada algoritma QEA *quantum angle* didefinisikan sebagai nilai sudut yang membentuk Q-bits berdasarkan probabilitas jatuhnya nilai Q-bits pada sinus atau cosinus dari *quantum angle* tersebut. Hal tersebut secara instan memenuhi syarat bahwa moduli dari Q-bits berjumlah 1. Sehingga Q bits bisa dinyatakan berada pada kondisi “1”, “0”, atau pada nilai superposisi mana pun diantara kedua nilai tersebut. Hal ini memungkinkan untuk mendapatkan nilai bit yang sama dengan operasi biner biasa namun dengan jumlah string yang lebih sedikit.

3.3.2. Quantum Evolutionary Algorithm

QEA diusulkan oleh Han [12] yang terinspirasi dari konsep komputasi kuantum. Pada QEA, satuan informasi terkecil disebut Q-bit, yang didefinisikan sebagai $\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$, dimana α dan β adalah bilangan kompleks yang menspesifikasi amplitude probabilitas pada keadaan masing-masing. $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. dan m -Q-bits didefinisikan sebagai $\begin{bmatrix} \alpha 1 & \alpha 2 & \dots & \alpha m \\ \beta 1 & \beta 2 & \dots & \beta m \end{bmatrix}$, dimana $|\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 = 1$ ($i = 1, 2, \dots, m$)

dan m adalah jumlah Q-bits[10]

Prosedur QEA adalah sebagai berikut:

Begin

Inisiasi $Q(0)$ saat $t=0$

Membuat $P(0)$ dengan melihat kondisi $Q(0)$

Memperbaiki $P(0)$

Evaluasi fungsi (X_j^0)

Simpan solusi terbaik dari $P(0)$ ke dalam B^0 dan $f(B^0)$

While (bukan kondisi terminasi) do

Begin

$t=t+1$

Membuat $P(t)$ dengan melihat kondisi $Q(t)$

Memperbaiki $P(t)$

Evaluasi $f(X_j^t)$

Perbarui $Q(t)$ menggunakan Q-gate $U(t)$

Simpan solusi terbaik dari $P(t)$ ke dalam B^t dan $f(B^t)$

End

End

Prosedur pembuatan $P(t)$

Begin

$j=0$;

While ($j < n$) do

$j=j+1$;

$i=0$;

While ($i < m$) do

$i=i+1$;

if random $[0,1] > |\alpha_{ji}|^2$

```

    then  $x_{ji} = 1$ 
    else  $x_{ji} = 0$ 
  End
End
End

```

Tahap perbaikan $P(t)$ dan evaluasi $f(X_i^t)$ bergantung pada permasalahan yang ingin diselesaikan, dimana $f(x)$ adalah fungsi fitness.

Prosedur pembaruan $Q(t)$

```

Begin
  j=0;
  While (j<n) do
    j=j+1;
    i=0;
    While (i<m) do
      i=i+1;
      
$$\begin{bmatrix} \alpha_{ji}^t \\ \beta_{ji}^t \end{bmatrix} = U(t) \begin{bmatrix} \alpha_{ji}^{t-1} \\ \beta_{ji}^{t-1} \end{bmatrix}$$

    End
  End
End

```

End
Quantum gate (Q-gate) $U(t)$ adalah variabel operator dari QEA. Dapat dipilih sesuai dengan permasalahan yang ingin diselesaikan.

3.3.3. Particle Swarm Optimization

PSO adalah strategi optimasi berbasis populasi yang diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart [13] dan telah menunjukkan performa yang baik untuk melakukan optimasi fungsi dan parameter dalam berbagai permasalahan. PSO ini diawali dengan kumpulan partikel acak dan kemudian memperbaharui kecepatan dan posisinya berdasarkan persamaan 3.1 berikut:

$$v(t + 1) = v(t) + c1 * rand * (pbest(t) - position(t)) + c2 * rand * (gbest - position(t))$$

$$position(t + 1) = position(t) + v(t + 1)$$

Dimana $v(t)$ adalah kecepatan partikel, $position(t)$ adalah posisi partikel, $pbest(t)$ dan $gbest(t)$ adalah nilai terbaik individual dan global. $Rand$ adalah bilangan acak diantara $[0,1]$, $c1$ dan $c2$ adalah factor pembelajaran.

Dalam algoritma PSO tiap partikel memiliki posisi dan kecepatan awal secara acak. Kemudian dalam setiap iterasi partikel akan memperbarui posisinya berdasarkan kecepatannya. Nilai kecepatan partikel akan diperbarui berdasarkan nilai $Pbest$ dan $Gbest$. Sehingga pergerakan setiap partikel akan mendekati posisi dan kecepatan terbaik dalam populasi.

3.3.4. Quantum Angle

Untuk mengadopsi PSO agar bisa memperbarui Q-bit secara otomatis maka kita perlu mendefinisikan *quantum angle*. *Quantum angle* didefinisikan sebagai sudut yang bisa berubah-ubah θ dan Q-bit sebagai $[\theta]$.

Kemudian $[\theta]$ adalah ekuivalen terhadap Q-bit orisinal sebagai $\begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix}$. Memenuhi $|\sin(\theta)|^2 + |\cos(\theta)|^2 = 1$ secara langsung. Kemudian m-Qbits dapat digantikan dengan $[\theta_i] = [\theta_i + \zeta(\Delta \theta_i)]$ [10]

3.3.5. Algoritma Quantum Swarm Evolutionary

Pada algoritma ini konsep kecerdasan kawanan pada PSO digunakan untuk membentuk semua m-Qbits dalam populasi sebagai kawanan kecerdasan yang dinamakan *quantum swarm*. Pertama kita mencari nilai *local best quantum angle* dan nilai *global best* dari nilai lokal. Kemudian berdasarkan nilai tersebut kita memperbarui *quantum angle* dengan Q-gate.

Prosedur QSEA dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Menggunakan Quantum angle untuk membentuk Q-bit
 $Q(t) = \{q_1^t, q_2^t, \dots, q_n^t\}$, $q_j^t = [\theta_{j1}^t | \theta_{j2}^t | \dots | \theta_{jm}^t]$.
2. Membuat setiap $x_{ji}^t = 0$ atau 1 dari $P(t)$ dengan mengamati kondisi $Q(t)$ melalui $|\cos(\theta_{ij})|^2$ atau $|\sin(\theta_{ij})|^2$ sebagai berikut:

```

Begin
j=0;
While (j<n) do
    j=j+1;

```

```

i=0;
While (i<m) do
  i=i+1;
  If random [0,1]> |cos( $\theta_{ij}$ )|2
    Then  $x_{ji}^t = 1$ 
    Else  $x_{ji}^t = 0$ 
  End
End
End

```

3. Modifikasi prosedur perbaruan untuk memperbarui Q(t) dengan rumus *improved* PSO menggantikan Qgate U(t) tradisional

$$v_{ji}^{t+1} = \chi * (\omega * v_{ji}^t + C1 * rand * (\theta_{ji}^t(pbest) - \theta_{ji}^t) + C2 * rand * (\theta_{ji}^t(gbest) - \theta_{ji}^t)), \quad (3.3)$$

$$\theta_{ji}^{t+1} = \theta_{ji}^t + v_{ji}^{t+1} \quad (3.4)$$

Dimana v_{ji}^t , θ_{ji}^t , $\theta_{ji}^t(pbest)$ dan $\theta_{ji}^t(gbest)$ adalah kecepatan, posisi sekarang, individual best dan global best dari Q-bit ke-i dan m-Qbits ke-j, secara berturut-turut. Atur $\chi = 0.99$, $W = 0.7928$, $C1=1.42$, $C2=1.57$, yang memenuhi kondisi konvergen partikel: $W > (C1+C2)/2 - 1$. Karena $C2 > C1$, partikel akan lebih cepat konvergen menuju posisi optimal global dari kawanan dibandingkan posisi optimal lokal dari tiap partikel.[11]

Komputasi kuantum pertama kali diusulkan oleh Benioff dan Feynman pada awal tahun 1980. Didapatkan bahwa komputasi kuantum dapat menyelesaikan berbagai permasalahan sulit dalam bidang komputasi klasik, yang didasarkan pada konsep teori kuantum, seperti: superposisi kuantum, keterikatan, dan interferensi. Karena kinerja komputasi yang baik dan unik, minat terhadap penggunaan konsep komputasi kuantum meningkat. Han mengusulkan Quantum Evolutionary Algorithm (QEA) yang berdasar pada konsep komputasi kuantum. QEA telah diterapkan pada beberapa masalah optimasi dan aplikasi seperti fungsi optimasi, pemindai wajah, pemisahan sumber buta, dll. Performa dari QEA menunjukkan bahwa QEA lebih baik daripada algoritma evolusi konvensional, seperti Genetic Algorithm (GA), dalam berbagai bidang. Meskipun delta ukuran langkah pada QEA selalu

konstan dan dirancang dengan aplikasi masalah kompilasi, namun tetap tidak memiliki dasaran teoritis sampai sekarang.

Pada algoritma ini konsep kecerdasan kawanan pada PSO digunakan untuk membentuk semua m-Qbits dalam populasi sebagai kawanan kecerdasan yang dinamakan *quantum swarm*. Pertama kita mencari nilai *local best quantum angle* dan nilai *global best* dari nilai lokal. Kemudian berdasarkan nilai tersebut kita memperbarui *quantum angle* dengan Q-gate.

Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan optimasi *sizing* SVC menggunakan QSEA dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Langkah 1 : **Memasukkan Data Sistem**
Memasukan data sistem Jamali 500 kV tahun 2017 sesuai aliran daya pada Newton Raphson.
- Langkah 2 : **Inisialisasi parameter individu QSEA**
Menentukan nilai awal parameter QEA dan PSO seperti jumlah partikel, jumlah populasi, konstanta intersia, dan *quantum angle*
- Langkah 3 : **Inisialisasi populasi Q-bits dari *quantum angle***
Membangkitkan populasi awal Q-bits secara random, namun dalam batas *quantum angle* tetap berada dalam kuadran 1
- Langkah 4 : **Inisialisasi kecepatan tiap partikel awal**
Membangkitkan kecepatan awal untuk setiap partikel dalam populasi
- Langkah 5 : **Memasuki iterasi utama**
Memasuki iterasi utama dari algoritma QSEA, dengan tahap awal adalah evaluasi nilai dari posisi dalam batas yang telah ditentukan.
- Langkah 6 : **Mengubah *Quantum Angle* menjadi probabilitas Q-bits**
Mengevaluasi posisi partikel dengan membandingkan nilai *Quantum angle* dengan nilai moduli Q-bits
- Langkah 7 : **Mengubah probabilitas Q-bits menjadi ukuran SVC**
Menerjemahkan nilai probabilitas menjadi ukuran kandidat SVC
- Langkah 8 : **Perhitungan Fitness**
Memasukkan nilai kandidat SVC ke dalam perhitungan load flow. Nilai fitness dihitung dari hasil load flow

Langkah 9 : **Mencari kandidat solusi terbaik**

Mencari nilai kandidat ukuran SVC terbaik berdasarkan nilai minimum fitness

Langkah 10 : **Update nilai Q-bits**

Melakukan update nilai Q-bits berdasarkan nilai minimum fitness untuk setiap iterasi

Langkah 11 : **Update kecepatan**

Melakukan update kecepatan dengan menggunakan

Langkah 12 : **Update kecepatan**

Melakukan update kecepatan dengan menggunakan Persamaan:

$$v_{ji}^{t+1} = \chi * (\omega * v_{ji}^t + C1 * rand * (\theta_{ji}^t(pbest) - \theta_{ji}^t) + C2 * rand * (\theta_{ji}^t(gbest) - \theta_{ji}^t))$$

Langkah 13 : **Update posisi partikel**

Pada step ini posisi partikel akan diperbarui berdasarkan nilai minimal gbest

Langkah 14 : **Pengulangan**

Pada langkah ini, langkah 5 sampai langkah 13 diulang sampai iterasi mencapai kriteria. Nilai yang dihasilkan merupakan solusi global dari masalah optimasi. *Fitness Function* yang diterapkan pada QSEA adalah nilai *Voltage Performance Index* dan biaya instalasi SVC.

3.3.6 Fungsi Objektif

Masalah yang ditunjukkan disini adalah untuk menentukan tempat dan ukuran SVC yang optimal untuk meminimalkan nilai indeks VPI dan biaya investasi SVC. VPI digunakan untuk menentukan rangking kontingensi. Dari sudut pandang pelanggaran batas tegangan bus, tingkat keparahan kontingensi dihitung menggunakan VPI [4]. Masalah penempatan SVC bisa dijelaskan oleh fungsi obyektif dan konstrain berikut:

1. *Voltage Performance Index (VPI)*

Dari sudut pandang pelanggaran batas tegangan bus, tingkat keparahan kontingensi dihitung menggunakan VPI [4]. VPI indeks harus memiliki nilai seminim mungkin untuk menjaga sistem tetap aman.

Objektif pertama adalah untuk meminimalkan indeks VPI yang dihitung dengan persamaan 2.42 sehingga:

$$f_1 = VPI \quad (3.5)$$

2. Biaya investasi SVC

Berdasarkan Database AG Siemens [15], fungsi objektif biaya investasi untuk SVC dalam satuan (US\$/kVar) adalah sebagai berikut:

$$\text{Cost} = 0.0003S^2 - 0.3051S + 127.38 \quad (3.6)$$

Sehingga:

$$f_2 = \text{Cost} \quad (3.7)$$

Untuk menyelesaikan permasalahan optimasi yang non linear maka dapat digunakan fungsi objektif dengan beberapa kriteria yaitu:

$$F = \min[f_1 + f_2] \quad (3.8)$$

3.4 Optimasi *sizing* SVC menggunakan PSO

Particle Swarm Optimization (PSO) pertama kali diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart [12] pada tahun 1995 . Algoritma ini terinspirasi perilaku sosial kolektif dari kecerdasan koloni binatang, seperti burung dan ikan. Perilaku sosial ini berupa tindakan individu dan pengaruh dari individu-individu lain dalam suatu kelompok. Setiap individu atau partikel berperilaku secara terdistribusi dengan cara menggunakan kecerdasannya sendiri dan juga dipengaruhi perilaku kelompok kolektifnya. Jika satu partikel atau seekor burung menemukan jalan yang tepat atau pendek menuju ke sumber makanan, maka sisa kelompok yang lain juga akan dapat segera mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka jauh dari kelompok tersebut. Selama proses pencarian, setiap partikel menentukan posisinya sendiri berdasarkan pengalaman terbaiknya sendiri (nilai ini yang disebut P_{best}) dan berdasarkan pengalaman terbaik dari semua partikel (nilai ini disebut G_{best}). [12]

Secara garis besar algoritma PSO tidak jauh berbeda dari algoritma GSA. Perbedaannya hanya pada *update* kecepatan, dimana persamaan *update* kecepatan dari PSO adalah sebagai berikut:

$$V_j(i) = k \cdot V_j(i-1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - x_j(i-1)] + c_2 r_2 [G_{best,j} - x_j(i-1)]$$

Keterangan:

V_j = Kecepatan partikel j pada iterasi ke- i

c_1 = Konstanta positif untuk kemampuan individu

$P_{best,j}$ = Posisi terbaik partikel berdasarkan pengalaman partikel itu sendiri

$G_{best,j}$ = Posisi terbaik partikel berdasarkan pengalaman semua partikel

c_2 = Konstanta positif untuk pengaruh sosial

x_j = Posisi partikel saat ini

r_1 = Bilangan acak antara 0 sampai 1

r_2 = Bilangan acak antara 0 sampai 1

c_1 dan c_2 masing-masing adalah *learning rates* untuk kemampuan individu (*cognitive*) dan pengaruh sosial (kelompok), dan r_1 dan r_2 merupakan bilangan random yang berdistribusi *uniform* dalam interval 0 sampai 1. Jadi parameter c_1 dan c_2 biasanya adalah 2 sehingga perkalian $c_1 r_1$ dan $c_2 r_2$ memastikan bahwa partikel-partikel akan mendekati target sekitar setengah selisihnya.

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

Bab 4 ini berisikan tentang hasil serta analisis dari simulasi penempatan dan alokasi optimal SVC pada sistem Jawa-Madura-Bali 500 kV tahun 2017. Dengan hasil yang diharapkan yaitu mengetahui pengaruh dari pemasangan SVC terhadap perbaikan profil tegangan sistem serta penurunan rugi-rugi daya setelah terjadi kontingensi n-1 pada saluran transmisi. Dengan mengetahui lokasi dan ukuran SVC yang optimal maka keamanan sistem terhadap *voltage collapse* akibat kontingensi dapat meningkat.

Voltage Performance Index digunakan untuk menentukan kasus kontingensi yang paling parah dampaknya terhadap sistem. Indeks ini berdasarkan terhadap nilai penyimpangan tegangan setelah kontingensi terhadap *base case*. Analisa aliran daya setelah kasus kontingensi tersebut yang digunakan untuk menentukan lokasi dan ukuran optimal SVC. Lokasi SVC diletakkan di bus yang memiliki nilai tegangan paling rendah dan ukuran SVC ditentukan menggunakan algoritma kecerdasan buatan dengan objektif penurunan rugi-rugi daya dan tegangan sebagai batasan.

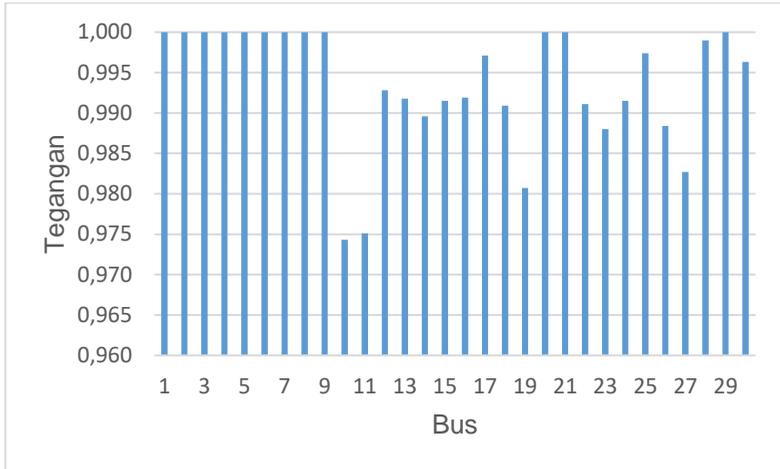
Untuk menentukan *sizing* dari SVC dilakukan simulasi dengan tahapan sebagai berikut:

1. Simulasi aliran daya pada kondisi normal
2. Simulasi aliran daya saat terjadi kontingensi n-1 pada saluran transmisi dan menentukan ranking kontingensi
3. Simulasi aliran daya pada kontingensi terparah sesudah dilakukan penempatan SVC sesuai dengan *sizing* menggunakan optimasi QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*)
4. Simulasi aliran daya pada kontingensi terparah sesudah dilakukan penempatan SVC sesuai dengan *sizing* menggunakan optimasi PSO (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*)

4.1 Aliran Daya pada kondisi normal (*base case*)

Simulasi aliran daya sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 sebelum kontingensi dilakukan untuk mendapatkan kondisi awal sistem transmisi Jamali 500 kV (*base case*). Kondisi awal yang didapatkan adalah nilai tegangan pada tiap bus pada sistem, besar aliran daya pada tiap saluran dan besarnya rugi-rugi daya pada saluran. Gambar 4.1

menunjukkan nilai tegangan pada setiap bus saluran transmisi 500 kV Jamali tahun 2017 dalam bentuk grafik batang.



Gambar 4.1 Grafik Tegangan *Base Case*

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa sebelum kontingensi tegangan pada bus sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 berada diantara 0.97-1.00 per unit. Nilai tersebut berada dalam standar tegangan IEEE yaitu $1 \pm 5\%$ per unit.

Tabel 4.1 dibawah ini merupakan hasil simulasi aliran daya sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 sebelum dilakukan penempatan SVC. Dari Tabel 4.1 kita dapat melihat besarnya aliran daya aktif dan aliran daya reaktif eksisting pada masing-masing saluran. Hasil aliran daya aktif eksisting inilah yang nantinya digunakan sebagai acuan untuk menghitung penurunan aliran daya setelah penempatan SVC.

Tabel 4.1. Rugi-Rugi Saluran Sistem Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017 sebelum Kontingensi

Line #	From #	To #	Rugi-Rugi Daya	
			MW	MVAR
1	1	4	8,998	69,555
2	1	10	11,024	52,771
3	2	22	0,922	8,883
4	2	3	0,729	6,998
5	3	17	0,286	3,197
6	4	18	7,379	82,564
7	5	6	0,024	0,23
8	6	14	20,215	194,193
9	7	23	3,328	31,972
10	7	16	0,135	1,295
11	8	19	18,567	164,885
12	9	18	1,985	19,067
13	10	11	6,868	45,494
14	11	19	0,058	0,56
15	12	13	3,190	-53,084
16	14	15	5,838	56,09
17	15	13	0,077	0,741
18	16	3	0,3	-22,958
19	17	20	1,793	-1,956
20	18	19	5,029	8,472
21	19	27	2,745	-4,899
22	19	20	2,566	-48,120
23	20	21	1,121	-3,168
24	21	17	0,715	6,873
25	22	7	0,639	6,136

Tabel 4.1. Rugi-rugi Saluran Sistem Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017 sebelum Penempatan SVC (lanjutan 1)

Line	From	To	Rugi-Rugi Daya	
#	#	#	MW	MVAR
26	23	26	0,004	0,042
27	24	15	0	0
28	25	6	0,614	6,871
29	26	16	4,755	45,685
30	27	18	2,996	28,785
31	25	16	8,959	79,356
32	29	28	0,191	2,196
33	30	11	0,371	-57,547
34	30	12	2,258	-9,363
35	30	28	0,551	6,338
36	13	16	0,153	1,466
Total			125,383	729,618

Tabel 4.2 Data pembangkitan hasil simulasi aliran daya menggunakan metode Newton Rhapson

Bus	Pembangkitan	
#	MW	MVAR
1	3283,488	225,6171
2	355	566,7359
3	573,66	237,558
4	449,77	502,9283
5	470	-17,8539
6	2964	560,2636
7	1083,63	589,438
8	1906	230,6918

Tabel 4.2 Data pembangkitan hasil simulasi aliran daya menggunakan metode Newton Rhapsion (lanjutan 1)

Bus	Pembangkitan	
#	MW	MVAR
9	1158,85	486,7998
20	302	178,506
21	99	-9,155
29	689	160,0884
Total	13334,4	3711,618

Dari Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa pada sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 sebelum kontingensi rugi-rugi daya pada saluran sebesar 125.383 MW dan 729.618 MVAR. Tabel 4.2 merupakan data pembangkitan hasil simulasi aliran daya menggunakan metode Newton-Rhapsion dengan bus 1 sebagai slack bus dan bus lainnya sebagai generator bus.

4.2 Kontingensi n-1 pada Saluran Transmisi

Untuk menentukan saluran mana yang merupakan kontingensi terparah bagi sistem dilakukan simulasi dengan menghilangkan satu per satu elemen saluran transmisi secara bergantian, kemudian untuk setiap kasus kontingensi akan dihitung tingkat keparahannya menggunakan *Voltage Performance Index*. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa saluran 1 yang menghubungkan bus 1 dan bus 4 adalah saluran yang memiliki dampak paling parah terhadap sistem apabila terjadi *line outage* dengan nilai indeks sebesar 0,1737. Saluran yang memiliki tingkat kontingensi terparah kedua adalah saluran 6 yang menghubungkan bus 4 dengan bus 18 dengan nilai VPI sebesar 0,1001. Saluran yang memiliki tingkat keparahan tertinggi ketiga adalah saluran 2 yang menghubungkan bus 1 dan bus 10 dengan nilai VPI sebesar 0,014. QSEA akan digunakan untuk menentukan lokasi dan nilai optimal SVC pada 3 kasus tersebut kemudian akan diamati perubahan nilai VPI sebelum dan sesudah dilakukan pemasangan SVC menggunakan metode optimasi QSEA

4.3 Aliran Daya setelah Kontingensi N-1

Setelah ditentukan saluran mana yang merupakan kontingensi *line outage* terparah maka kemudian dilakukan simulasi analisis aliran daya untuk 3 kasus *line outage* yaitu pada saluran 1 (bus 1- bus 4), saluran 6 (bus 4- bus 18) dan saluran 2 (bus 1- bus 10). Didapatkan hasil berupa nilai tegangan pada setiap bus dan aliran daya serta rugi-rugi daya pada setiap saluran.

4.3.1 Kontingensi *Line Outage* pada Saluran 1 (Bus 1 – Bus 4)

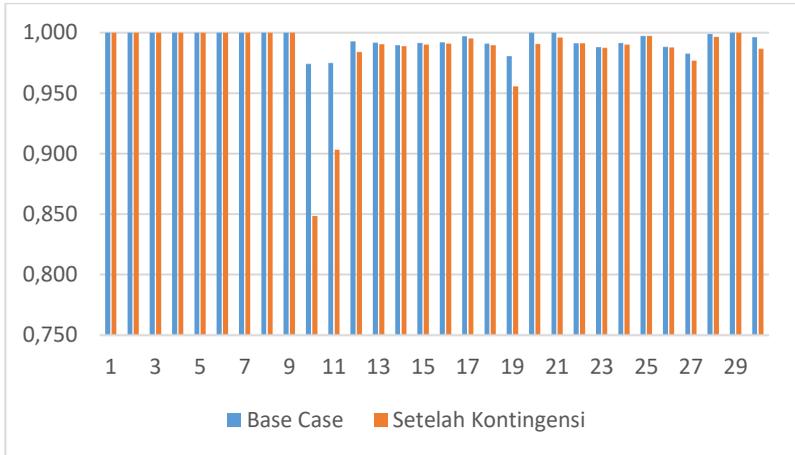
Kontingensi pada saluran 1 yang menghubungkan Bus 1 Pembangkit Paiton dengan Bus 4 Pembangkit Grati merupakan kontingensi terparah dengan nilai VPI sebesar 0,1737. Analisis aliran daya dilakukan pada kondisi ini untuk mengamati nilai tegangan pada bus dan rugi-rugi daya pada saluran.

Tabel 4.3 Tabel Tegangan Bus setelah kontingensi *line outage* pada saluran 1

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Base Case	Kontingensi di saluran 1
1	1,000	1,0000
2	1,000	1,0000
3	1,000	1,0000
4	1,000	1,0000
5	1,000	1,0000
6	1,000	1,0000
7	1,000	1,0000
8	1,000	1,0000
9	1,000	1,0000
10	0,9743	0,8484
11	0,9751	0,9032

Tabel 4.3 Tabel Tegangan Bus setelah kontingensi *line outage* pada saluran 1 (lanjutan 1)

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Base Case	Kontingensi di saluran 1
12	0,9928	0,9841
13	0,9918	0,9905
14	0,9896	0,9889
15	0,9915	0,9902
16	0,9919	0,9910
17	0,9971	0,9951
18	0,9909	0,9897
19	0,9807	0,9557
20	1,000	0,9908
21	1,000	0,9961
22	0,9911	0,9911
23	0,988	0,9876
24	0,9915	0,9902
25	0,9974	0,9973
26	0,9884	0,9878
27	0,9827	0,9770
28	0,999	0,9966
29	1,000	1,0000
30	0,9963	0,9867



Gambar 4.2 Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah Kontingensi pada saluran 1

Dari tabel 4.3 di atas dapat dilihat bahwa terdapat perubahan nilai tegangan pada bus setelah kontingensi. Penyimpangan tegangan yang cukup signifikan terjadi pada bus 10 dan 11 dengan nilai tegangan sebesar 0.848 dan 0.9032 p.u. Nilai tegangan pada kedua bus tersebut telah berada di bawah batas toleransi normal tegangan yaitu 0.95 p.u. Sedangkan bus lain masih berada pada batas normal. Setelah kontingensi juga terjadi perubahan aliran daya pada saluran dan meningkatnya rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada sistem. Rugi-rugi daya pada sistem setelah terjadi kontingensi pada saluran 1 dapat dilihat pada tabel 4.4

Tabel 4.4. Rugi-Rugi Daya pada Saluran Setelah kontingensi berupa *line outage* pada saluran 1

Line #	From #	To #	Rugi-Rugi Daya	
			MW	MVAR
2	1	10	96,971	1.022,577
3	2	22	0,779	7,482
4	2	3	0,61	5,856

Tabel 4.4. Rugi-Rugi Daya pada Saluran Setelah kontingensi berupa *line outage* pada saluran 1 (lanjutan 1)

Line	From	To	Rugi-Rugi Daya	
#	#	#	MW	MVAR
5	3	17	0,153	1,711
6	4	18	0,24	2,687
7	5	6	0,024	0,23
8	6	14	20,103	193,123
9	7	23	3,178	30,533
10	7	16	0,203	1,954
11	8	19	20,238	184,634
12	9	18	2,142	20,574
13	10	11	132,315	1.454,898
14	11	19	19,082	183,333
15	12	13	6,673	-13,230
16	14	15	5,761	55,352
17	15	13	0,073	0,702
18	16	3	0,173	-24,360
19	17	20	0,986	-9,500
20	18	19	3,480	-5,363
21	19	27	3,889	7,06
22	19	20	1,644	-54,499
23	20	21	0,608	-7,917
24	21	17	0,421	4,048
25	22	7	0,766	7,357
26	23	26	0,001	0,011
27	24	15	0	0

Tabel 4.4. Rugi-Rugi Daya pada Saluran Setelah kontingensi berupa *line outage* pada saluran 1 (lanjutan 2)

Line	From	To	Rugi-Rugi Daya	
#	#	#	MW	MVAR
28	25	6	0,625	7
29	26	16	4,952	47,752
30	27	18	0,293	2,818
31	25	16	9,132	81,312
32	29	28	0,38	4,379
33	30	11	6,179	12,320
34	30	12	4,003	10,796
35	30	28	1,099	12,642
36	13	16	0,341	3,275
Total			347,517	3.251,370

Tabel 4.5 Data pembangkitan hasil simulasi aliran daya menggunakan metode Newton Rhapson setelah *line outage* pada saluran 1

Bus	Pembangkitan	
#	MW	MVAR
1	3505,622	1653,874
2	355	565,4032
3	573,66	349,7699
4	449,77	454,4492
5	470	-17,8539
6	2964	585,5776
7	1083,63	612,6421
8	1906	559,8231
9	1158,85	576,9755
20	302	178,506

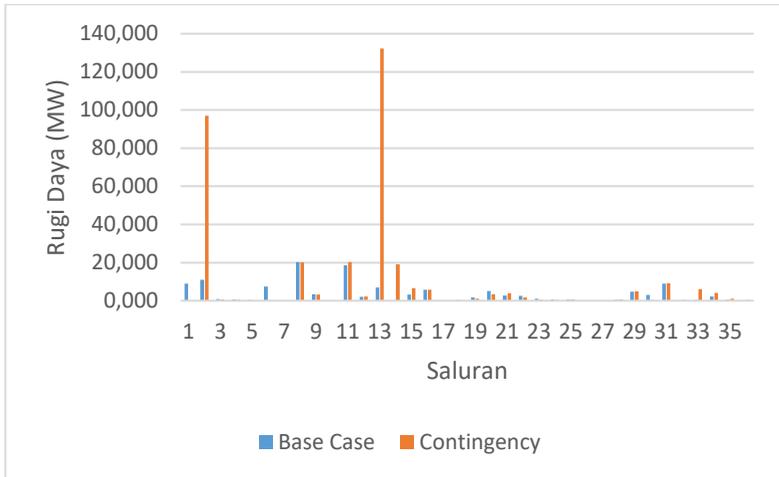
Tabel 4.5 Data pembangkitan hasil simulasi aliran daya menggunakan metode Newton Rhapsod setelah *line outage* pada saluran 1 (lanjutan 1)

Bus	Pembangkitan	
#	MW	MVAR
21	99	-9,155
29	689	723,3584
Total	13556,53	6233,37

Dari Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa setelah terjadi kontingensi pada saluran 1 maka rugi-rugi daya pada saluran 2 dari bus 1 menuju bus 10 mengalami peningkatan yang signifikan dengan nilai 96,971 MW dan 1022,577 MVAR. Rugi-rugi daya pada saluran 13 dari bus 10 menuju bus 11 meningkat menjadi 132,315 MW dan 1454,898 MVAR. Rugi-rugi daya pada saluran 14 dari bus 11 menuju 19 juga mengalami peningkatan menjadi 19,082 MW dan 183,333 MVAR.

Dari hasil simulasi aliran daya dengan kontingensi *line outage* pada saluran 1 yang menghubungkan bus 1 menuju bus 4 didapatkan bahwa terjadi peningkatan aliran daya yang sangat besar pada saluran-saluran yang terhubung dengan bus 10 dan bus 11 sehingga rugi-rugi daya pada saluran tersebut juga meningkat yang menyebabkan jatuhnya nilai profil tegangan pada kedua bus tersebut. Nilai tegangan pada kedua bus tersebut telah jauh melewati batas normal tegangan dari standar IEEE dan berpotensi mengakibatkan terjadinya *voltage collapse* apabila sistem dibiarkan beroperasi. Sehingga bus 10 dan 11 dipilih sebagai lokasi penempatan SVC untuk memperbaiki profil tegangan di bus tersebut serta menurunkan rugi-rugi daya pada saluran yang terhubung dengan kedua bus tersebut.

Untuk meningkatkan tegangan pada bus-bus yang mengalami *voltage collapse* pada sistem Jamali tahun 2017 maka SVC digunakan sebagai sumber daya reaktif untuk mengkompensasi kekurangan daya reaktif pada bus akibat rugi-rugi yang sangat besar. Rugi-rugi daya aktif pada saluran menyebabkan disipasi daya dan meningkatnya drop tegangan pada sisi terima sedangkan rugi-rugi daya aktif menyebabkan rugi-rugi magnetis pada saluran dan meningkatkan drop tegangan pada sisi terima. Sehingga untuk memperbaiki nilai tegangan dipasang SVC pada bus sisi terima sebagai kompensator daya reaktif.



Gambar 4.3 Rugi-rugi daya pada saluran sistem Jamali 2017 pada kondisi *base case* dan kontingensi

Dari grafik 4.3 dapat dilihat bahwa setelah *line outage* pada saluran 1, nilai rugi daya aktif pada saluran transmisi Jamali 2017 meningkat sangat jauh dibandingkan rugi-rugi daya saat kondisi normal. Peningkatan paling signifikan terlihat pada 2 saluran yaitu saluran no 2 yang meghubungkan bus 1 dan bus 10 serta saluran no 13 yang menghubungkan bus 10 dan bus 11.

4.3.2 Kontingensi *Line Outage* pada Saluran 6 (Bus 4 – Bus 18)

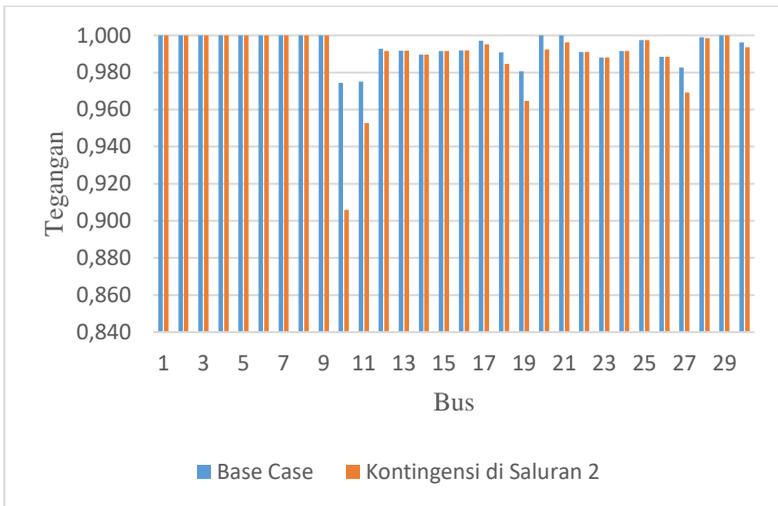
Kontingensi pada saluran 6 yang menghubungkan Bus 4 Pembangkit Grati dengan Bus 4 GI Surabaya Barat merupakan kontingensi terparah ranking 2 dengan nilai VPI sbesar 0,1001. Analisis aliran daya dilakukan pada kondisi inbi untuk mengamati nilai tegangan pada bus dan rugi-rugi daya pada saluran.

Tabel 4.6 Tabel Tegangan Bus setelah kontingensi *line outage* pada saluran 6

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Base Case	Kontingensi saluran 6
1	1,000	1,000
2	1,000	1,000
3	1,000	1,000
4	1,000	1,000
5	1,000	1,000
6	1,000	1,000
7	1,000	1,000
8	1,000	1,000
9	1,000	1,000
10	0,974	0,865
11	0,975	0,912
12	0,993	0,985
13	0,992	0,991
14	0,990	0,989
15	0,992	0,990
16	0,992	0,991
17	0,997	0,995
18	0,991	0,987
19	0,981	0,959
20	1,000	0,992
21	1,000	0,997
22	0,991	0,991
23	0,988	0,988

Tabel 4.6 Tabel Tegangan Bus setelah kontingensi *line outage* pada saluran 6 (lanjutan 1)

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Base Case	Kontingensi saluran 6
24	0,992	0,990
25	0,997	0,997
26	0,988	0,988
27	0,983	0,976
28	0,999	0,997
29	1,000	1,000
30	0,996	0,988



Gambar 4.4 Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah Kontingensi pada saluran 6

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa terdapat perubahan nilai tegangan pada bus setelah kontingensi. Penyimpangan tegangan yang cukup signifikan terjadi pada bus 10 dan 11 dengan nilai tegangan sebesar

0.865 dan 0.912 p.u. Nilai tegangan pada kedua bus tersebut telah berada di bawah batas toleransi normal tegangan yaitu 0.95 p.u. Sedangkan bus lain masih berada pada batas normal.

Tabel 4.7. Rugi-Rugi Daya pada Saluran Setelah kontingensi berupa *line outage* pada saluran 6

Line	From	To	Rugi-Rugi Daya	
#	#	#	MW	MVAR
1	1	4	0,017	-30,911
2	1	10	86,934	909,280
3	2	22	0,616	5,915
4	2	3	0,786	7,553
5	3	17	0,149	1,667
7	5	6	0,024	0,230
8	6	14	20,108	193,170
9	7	23	3,185	30,602
10	7	16	0,198	1,898
11	8	19	19,970	181,514
12	9	18	2,543	24,428
13	10	11	116,886	1281,556
14	11	19	16,612	159,602
15	12	13	6,436	-15,978
16	14	15	0,328	3,153
17	15	13	5,766	55,397
18	16	3	0,073	0,705
19	17	20	0,174	-24,350
20	18	19	1,015	-9,244
21	19	27	2,732	-12,566
22	19	20	3,194	0,330

Tabel 4.7. Rugi-Rugi Daya pada Saluran Setelah kontingensi berupa *line outage* pada saluran 6 (lanjutan 1)

Line	From	To	Rugi-Rugi Daya	
#	#	#	MW	MVAR
23	20	21	1,606	-55,157
24	21	17	0,624	-7,786
25	22	7	0,435	4,177
26	23	26	0,758	7,286
27	24	15	0,001	0,013
28	25	6	0,000	0,000
29	26	16	0,624	6,992
30	27	18	4,941	47,466
31	25	16	0,233	2,242
32	29	28	9,122	81,201
33	30	11	0,343	3,954
34	30	12	5,064	-0,750
35	30	28	2,258	-9,363
36	13	16	0,551	6,338
Total			314,306	2850,561

Dari Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa setelah *line outage* pada saluran 1, nilai rugi daya aktif pada saluran transmisi Jamali 2017 meningkat sangat jauh dibandingkan rugi-rugi daya saat kondisi normal. Peningkatan paling signifikan terlihat pada 2 saluran yaitu saluran no 2 yang menghubungkan bus 1 dan bus 10 serta saluran no 13 yang menghubungkan bus 10 dan bus 11

4.3.3 Kontingensi *Line Outage* pada Saluran 2 (Bus 1 – Bus 10)

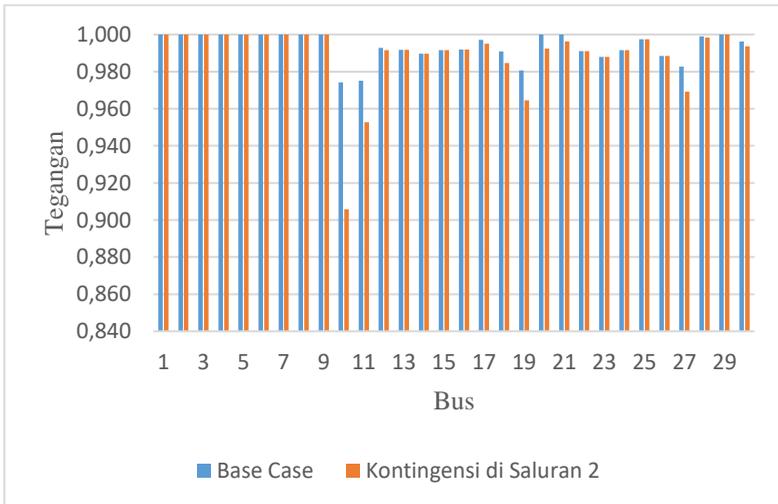
Kontingensi pada saluran 6 yang menghubungkan Bus 4 Pembangkit Paiton dengan Bus 10 GI Kediri merupakan kontingensi terparah ranking 2 dengan nilai VPI sebesar 0,014012756. Analisis aliran daya dilakukan pada kondisi inbi untuk mengamati nilai tegangan pada bus dan rugi-rugi daya pada saluran.

Tabel 4.8 Tabel Tegangan Bus setelah kontingensi *line outage* pada saluran 2

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Base Case	Kontingensi saluran 2
1	1,000	1,000
2	1,000	1,000
3	1,000	1,000
4	1,000	1,000
5	1,000	1,000
6	1,000	1,000
7	1,000	1,000
8	1,000	1,000
9	1,000	1,000
10	0,974	0,906
11	0,975	0,953
12	0,993	0,992
13	0,992	0,992
14	0,990	0,990
15	0,992	0,992
16	0,992	0,992
17	0,997	0,995
18	0,991	0,985
19	0,981	0,965
20	1,000	0,992
21	1,000	0,996
22	0,991	0,991
23	0,988	0,988

Tabel 4.8 Tabel Tegangan Bus setelah kontingensi *line outage* pada saluran 2 (lanjutan 1)

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Base Case	Kontingensi saluran 2
24	0,992	0,992
25	0,997	0,997
26	0,988	0,988
27	0,983	0,969
28	0,999	0,998
29	1,000	1,000
30	0,996	0,994



Gambar 4.5 Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah Kontingensi pada saluran 2

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa terdapat perubahan nilai tegangan pada bus setelah kontingensi. Penyimpangan tegangan yang cukup signifikan terjadi pada bus 10 dengan nilai tegangan sebesar 0,906. Nilai tegangan pada bus tersebut telah berada di bawah batas toleransi

normal tegangan yaitu 0.95 p.u. Sedangkan bus lain masih berada pada batas normal.

Tabel 4.9. Rugi-Rugi Daya pada Saluran Setelah kontingensi berupa *line outage* pada saluran 2

Line	From	To	Rugi-Rugi Daya	
#	#	#	MW	MVAR
1	1	4	28,234	285,045
3	2	22	0,814	7,820
4	2	3	1,033	9,929
5	3	17	0,592	6,620
6	4	18	24,138	270,061
7	5	6	0,024	0,230
8	6	14	20,303	195,043
9	7	23	3,442	33,068
10	7	16	0,119	1,146
11	8	19	19,476	175,735
12	9	18	3,043	29,225
13	10	11	5,297	30,759
14	11	19	8,534	81,991
15	12	13	1,645	-70,249
16	14	15	0,071	0,687
17	15	13	5,880	56,501
18	16	3	0,079	0,757
19	17	20	0,495	-20,783
20	18	19	2,607	6,046
21	19	27	27,213	222,505
22	19	20	18,655	148,895
23	20	21	4,872	-24,238

Tabel 4.9. Rugi-Rugi Daya pada Saluran Setelah kontingensi berupa *line outage* pada saluran 2 (lanjutan 1)

Line	From	To	Rugi-Rugi Daya	
#	#	#	MW	MVAR
24	21	17	1,693	2,482
25	22	7	0,957	9,197
26	23	26	0,565	5,429
27	24	15	0,007	0,068
28	25	6	0,000	0,000
29	26	16	0,608	6,802
30	27	18	4,631	44,487
31	25	16	9,543	91,682
32	29	28	8,848	78,115
33	30	11	0,219	2,517
34	30	12	1,584	-42,439
35	30	28	2,258	-9,363
36	13	16	0,551	6,338
Total			208,028	1642,110

Dari Tabel 4.9 dapat dilihat bahwa setelah *line outage* pada saluran 6, nilai rugi daya aktif pada saluran transmisi Jamali 2017 meningkat sangat jauh dibandingkan rugi-rugi daya saat kondisi normal. Peningkatan signifikan terlihat pada saluran no 1 yang meghubungkan bus 1 dan bus 4, saluran no 6 yang menghubungkan bus 4 dan bus 18, saluran no 21 yang menghubungkan bus 19 dengan bus 27 serta saluran no 21 yang menghubungkan bus no 19 dengan bus no 20.

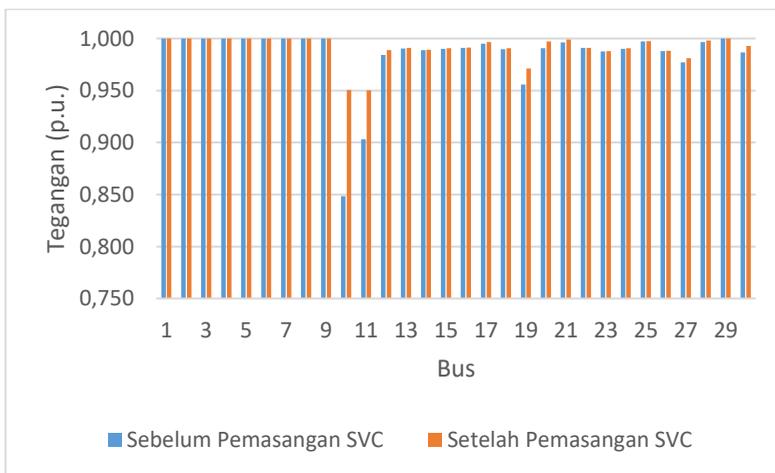
4.4 Penempatan SVC dan Sizing dengan Metode Optimasi QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*)

Pada sub bab ini dilakukan simulasi penempatan SVC pada 3 kasus kontingensi terparah yaitu kontingensi pada saluran 1, 6 dan 2. Ukuran optimal SVC untuk tiap-tiap kasus didapatkan menggunakan metoda QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*). Kemudian

akan dilakukan analisa aliran daya untuk mengamati perubahan nilai tegangan, VPI, dan rugi-rugi daya pada saluran.

4.4.1 Penempatan SVC dan Sizing dengan Metode Optimasi QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*) dengan Kontingensi *Line Outage* pada Saluran 1

Pada sub bab ini dilakukan simulasi penempatan SVC pada bus yang memiliki profil tegangan buruk pada kasus kontingensi *line outage* pada saluran no 1 yang menghubungkan bus 1 dan 4. Ukuran optimal SVC didapatkan dengan menggunakan metoda QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*). Metode ini digunakan untuk mencari ukuran SVC pada bus 10 dan 11 secara simultan dengan batasan tegangan dan fungsi objektif VPI dan biaya instalasi SVC. Setelah didapatkan ukuran optimal SVC pada bus 10 dan 11 maka dilakukan analisis aliran daya kembali untuk melihat perubahan nilai profil tegangan dan rugi-rugi daya.



Gambar 4.6 Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*) Kontingensi pada Saluran 1

Dari hasil simulasi program QSEA dengan 100 iterasi didapatkan ukuran SVC yang optimal untuk memperbaiki profil tegangan setelah kontingensi adalah sebesar 695.213 MVAR pada bus 10 dan 236.387 MVAR pada bus 11.

Dari grafik 4.6 di atas dapat diamati bahwa nilai tegangan bus pada sistem meningkat. Tegangan pada bus 10 dan 11 yang semula berada di bawah standar tegangan sudah meningkat menjadi 0.951 dan 0.95 p.u. secara berturut-turut. Profil tegangan bus setelah dilakukan pemasangan SVC dapat dilihat secara lengkap pada Tabel 4.3 berikut.

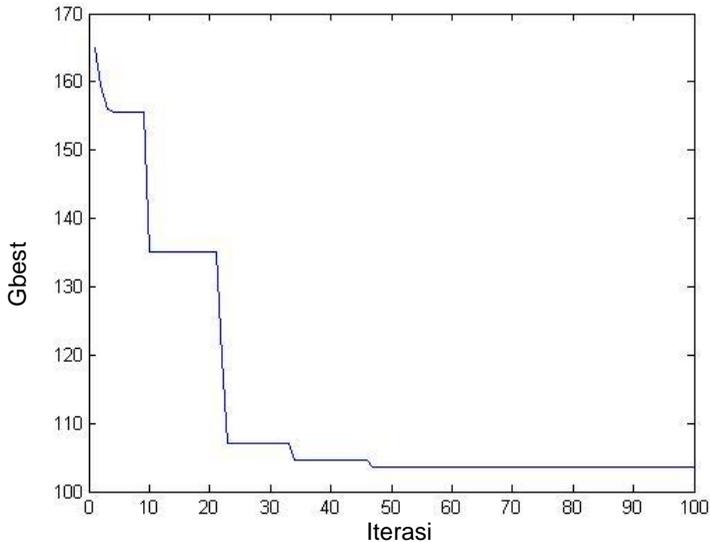
Tabel 4.10 Profil Tegangan Bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 1

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Tanpa SVC	Dengan SVC
1	1,000	1,000
2	1,000	1,000
3	1,000	1,000
4	1,000	1,000
5	1,000	1,000
6	1,000	1,000
7	1,000	1,000
8	1,000	1,000
9	1,000	1,000
10	0,848	0,951
11	0,903	0,950
12	0,984	0,989
13	0,991	0,991
14	0,989	0,989
15	0,990	0,991
16	0,991	0,991

Tabel 4.10 Profil Tegangan Bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 1 (lanjutan 1)

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Tanpa SVC	Dengan SVC
17	0,995	0,997
18	0,990	0,991
19	0,956	0,971
20	0,991	0,997
21	0,996	0,999
22	0,991	0,991
23	0,988	0,988
24	0,990	0,991
25	0,997	0,997
26	0,988	0,988
27	0,977	0,981
28	0,997	0,998
29	1,000	1,000
30	0,987	0,993

Dari hasil analisis aliran daya didapatkan bahwa pemasangan optimal SVC menggunakan metode QSEA dapat memperbaiki profil tegangan setelah terjadinya kontingensi dengan nilai VPI yang semula 0,1737 menjadi 0,000448 serta dapat menurunkan rugi-rugi daya aktif yang semula 347.517 MW menjadi 280.633 MW . Metode optimasi QSEA dapat menentukan nilai kapasitas optimal SVC untuk lebih dari 1 bus secara simultan dengan waktu untuk mencapai konvergensi yang relatif cepat. Grafik konvergensi optimasi ukuran SVC menggunakan metode QSEA dapat dilihat pada gambar berikut.

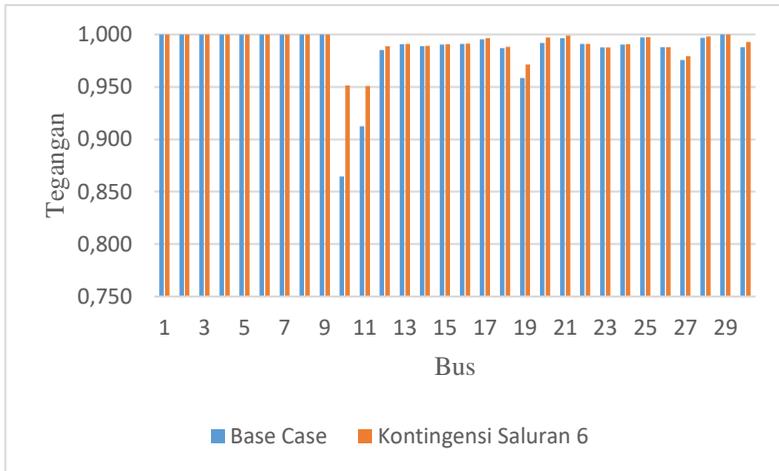


Gambar 4.7 Grafik konvergensi optimasi penempatan SVC menggunakan metode QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 1

4.4.2 Penempatan SVC dan Sizing dengan Metode Optimasi QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*) dengan Kontingensi Line Outage pada Saluran 6

Pada sub bab ini dilakukan simulasi penempatan SVC pada bus yang memiliki profil tegangan buruk pada kasus kontingensi *line outage* pada saluran no 6 yang menghubungkan bus 4 dan 18. Ukuran optimal SVC didapatkan dengan menggunakan metoda QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*). Metode ini digunakan untuk mencari ukuran SVC pada bus 10 dan 11 secara simultan dengan batasan tegangan dan fungsi objektif VPI dan biaya instalasi SVC. Setelah didapatkan ukuran optimal SVC pada bus 10 dan 11 maka dilakukan analisis aliran daya kembali untuk melihat perubahan nilai profil tegangan dan rugi-rugi daya.

Dari hasil simulasi program QSEA dengan 100 iterasi didapatkan ukuran SVC yang optimal untuk memperbaiki profil tegangan setelah kontingensi adalah sebesar 636,280 MVAR pada bus 10 dan 200,703MVAR pada bus 11



Gambar 4.8 Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA Kontingensi pada Saluran 6

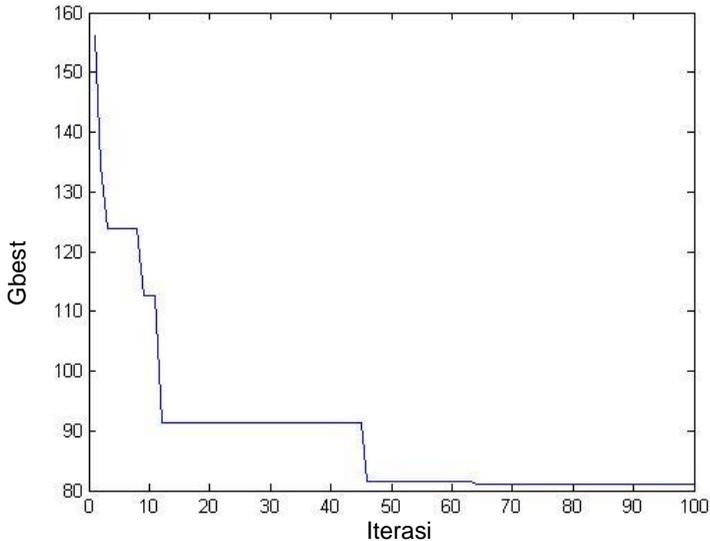
Tabel 4.11 Profil Tegangan Bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 6

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Tanpa SVC	Dengan SVC
1	1,000	1,000
2	1,000	1,000
3	1,000	1,000
4	1,000	1,000
5	1,000	1,000
6	1,000	1,000
7	1,000	1,000
8	1,000	1,000
9	1,000	1,000
10	0,865	0,951
11	0,912	0,951

Tabel 4.11 Profil Tegangan Bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 6 (lanjutan 1)

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Tanpa SVC	Dengan SVC
12	0,985	0,989
13	0,991	0,991
14	0,989	0,989
15	0,990	0,991
16	0,991	0,991
17	0,995	0,997
18	0,987	0,988
19	0,959	0,971
20	0,992	0,997
21	0,997	0,999
22	0,991	0,991
23	0,988	0,988
24	0,990	0,991
25	0,997	0,997
26	0,988	0,988
27	0,976	0,979
28	0,997	0,998
29	1,000	1,000
30	0,988	0,993

Dari hasil analisis aliran daya didapatkan bahwa pemasangan optimal SVC menggunakan metode QSEA dapat memperbaiki profil tegangan setelah terjadinya kontingensi dengan nilai VPI yang semula 0,1001 menjadi 0,0061 serta dapat menurunkan rugi-rugi daya aktif yang semula 314,306 MW menjadi 266,141 MW. Grafik konvergensi optimasi ukuran SVC menggunakan metode QSEA dapat dilihat pada gambar berikut.

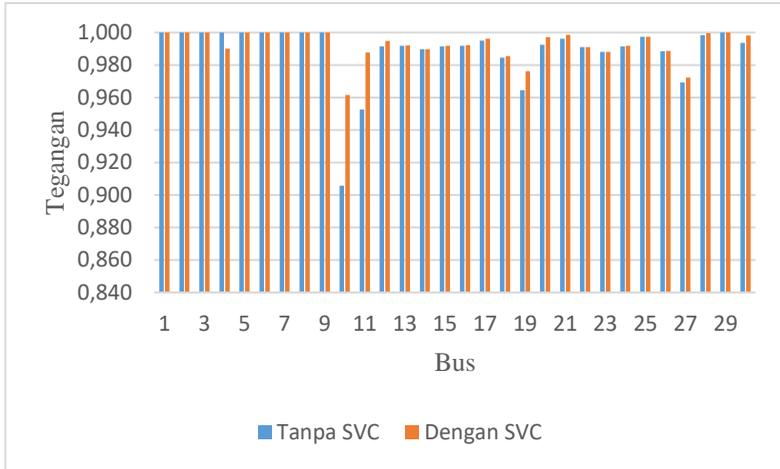


Gambar 4.9 Grafik konvergensi optimasi penempatan SVC menggunakan metode QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 6

4.4.3 Penempatan SVC dan Sizing dengan Metode Optimasi QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*) dengan Kontingensi *Line Outage* pada Saluran 2

Pada sub bab ini dilakukan simulasi penempatan SVC pada bus yang memiliki profil tegangan buruk pada kasus kontingensi *line outage* pada saluran no 2 yang menghubungkan bus 1 dan 10. Ukuran optimal SVC didapatkan dengan menggunakan metoda QSEA (*Quantum Swarm Evolutionary Algorithm*). Metode ini digunakan untuk mencari ukuran SVC pada bus 10 dan 11 secara simultan dengan batasan tegangan dan fungsi objektif VPI dan ukuran SVC. Setelah didapatkan ukuran optimal SVC pada bus 10 dan 11 maka dilakukan analisis aliran daya kembali untuk melihat perubahan nilai profil tegangan dan rugi-rugi daya.

Dari hasil simulasi program QSEA dengan 100 iterasi didapatkan ukuran SVC yang optimal untuk memperbaiki profil tegangan setelah kontingensi adalah sebesar 72,571 MVAR pada bus 10 dan 436,124 MVAR pada bus 11



Gambar 4.10 Grafik Tegangan Bus sebelum dan setelah pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA Kontingensi pada Saluran 2

Tabel 4.12 Profil Tegangan Bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 2

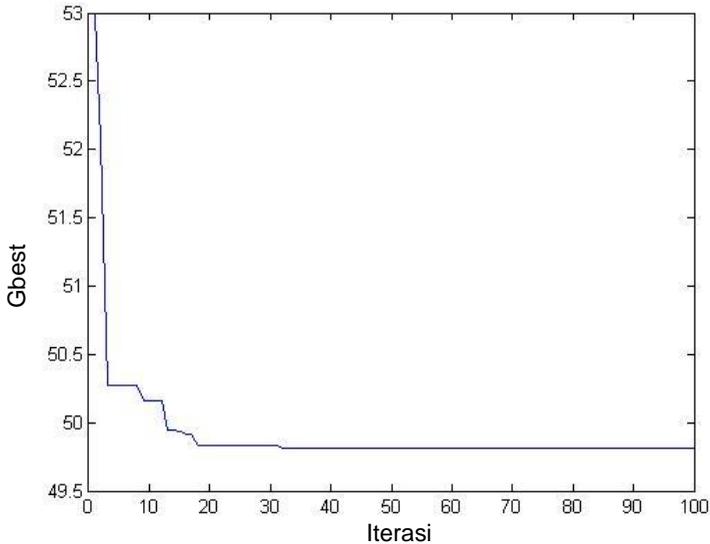
Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Tanpa SVC	Dengan SVC
1	1,000	1,000
2	1,000	1,000
3	1,000	1,000
4	1,000	0,990
5	1,000	1,000
6	1,000	1,000
7	1,000	1,000
8	1,000	1,000
9	1,000	1,000
10	0,906	0,962

Tabel 4.12 Profil Tegangan Bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 2 (lanjutan 1)

Bus No	Tegangan (p.u.)	
	Tanpa SVC	Dengan SVC
11	0,953	0,988
12	0,992	0,995
13	0,992	0,992
14	0,990	0,990
15	0,992	0,992
16	0,992	0,992
17	0,995	0,996
18	0,985	0,985
19	0,965	0,976
20	0,992	0,997
21	0,996	0,999
22	0,991	0,991
23	0,988	0,988
24	0,992	0,992
25	0,997	0,997
26	0,988	0,989
27	0,969	0,972
28	0,998	0,999
29	1,000	1,000
30	0,994	0,998

Dari hasil analisis aliran daya didapatkan bahwa pemasangan optimal SVC menggunakan metode QSEA dapat memperbaiki profil tegangan setelah terjadinya kontingensi dengan nilai VPI yang semula 0,01401 menjadi 0,000748 serta dapat menurunkan rugi-rugi daya aktif yang semula 207.264 MW menjadi 202,671 MW. Grafik konvergensi

optimasi ukuran SVC menggunakan metode QSEA dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.11 Grafik konvergensi optimasi penempatan SVC menggunakan metode QSEA dengan Kontingensi pada Saluran 2

4.5 Evaluasi Hasil dan Konvergensi Algoritma *Quantum Swarm Evolutionary*

Pada sub bab ini akan dilakukan pembahasan tentang evaluasi hasil dan konvergensi dari algoritma optimasi yang digunakan untuk menentukan *sizing* optimal dari SVC pada sistem Jamali tahun 2017. Evaluasi hasil dan konvergensi dilakukan dengan menjalankan program algoritma QSE sebanyak 10 kali untuk 3 macam jumlah partikel dalam populasi, kemudian diamati nilai minimum, maksimum, dan rata-rata dari hasil keluaran algoritma QSE. Kemudian juga dilakukan pengamatan terhadap hasil algoritma QSE dengan jumlah iterasi yang berbeda-beda. Untuk melakukan evaluasi ini algoritma QSE dijalankan untuk kasus kontingensi pada saluran 1.

Tabel 4.13 Evaluasi Hasil 10 kali percobaan Algoritma QSE dengan 30 partikel

Nilai data	Ukuran SVC	VPI	Gbest
nilai min	931,717	0,00029	103,543
nilai max	964,438	0,03990	112,173
rata-rata	951,397	0,00627	108,681

Tabel 4.14 Evaluasi Hasil 10 kali percobaan Algoritma QSE dengan 20 partikel

Nilai data	Ukuran SVC	VPI	Gbest
nilai min	937,5987	0,000107	105,0465
nilai max	976,6459	0,01547	115,5568
rata-rata	959,8866	0,004049	110,9707

Tabel 4.15 Evaluasi Hasil 10 kali percobaan 10 kali percobaan Algoritma QSE dengan 10 partikel

Nilai data	Ukuran SVC	VPI	Gbest
nilai min	931,717	0,00011	103,543
nilai max	976,646	0,03990	115,557
rata-rata	953,614	0,01101	109,328

Tabel 4.16 Evaluasi Kecepatan Konvergensi Algoritma QSE

Iterasi	Ukuran SVC	VPI	Gbest
50	967,009	0,002811	112,878
100	950,212	0,007826	108,342
150	929,154	0,001551	102,894

Dari tabel 4.13, 4.14, dan 4.15 di atas dapat diamati bahwa hasil algoritma QSE dengan jumlah partikel yang berbeda-beda memiliki rata-rata hasil yang hampir sama, dengan nilai varian data terkecil didapatkan dari hasil simulasi dengan 30 partikel. Dari tabel 4.16 dapat diamati bahwa dalam 50 iterasi hasil dari algoritma QSE sudah memiliki nilai konvergensi yang baik. Namun hasil terbaik diperoleh dari 150 iterasi

4.6 Aliran Daya setelah Penempatan SVC dengan Metode Optimasi PSO (*Particle Swarm Optimization*)

Pada sub bab ini dilakukan simulasi penempatan SVC pada bus yang memiliki profil tegangan buruk pada kasus kontingensi *line outage* pada saluran no 1 yang menghubungkan bus 1 dan 4. Ukuran optimal SVC didapatkan dengan menggunakan metoda PSO (*Particle Swarm Optimization*). Metode ini digunakan untuk mencari ukuran SVC pada bus 10 dan 11 secara berurutan dengan fungsi objektif VPI dan biaya instalasi. Setelah didapatkan ukuran optimal SVC pada bus 10 dan 11 maka dilakukan analisis aliran daya kembali untuk melihat perubahan nilai profil tegangan dan rugi-rugi daya.

Tabel 4.17 Profil tegangan bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi PSO

Bus No	Tegangan (pu)	
	Tanpa SVC	Dengan SVC
1	1,000	1,000
2	1,000	1,000
3	1,000	1,000
4	1,000	1,000
5	1,000	1,000
6	1,000	1,000
7	1,000	1,000
8	1,000	1,000
9	1,000	1,000
10	0,848	0,957
11	0,903	0,952
12	0,984	0,989
13	0,991	0,991
14	0,989	0,989
15	0,990	0,991

Tabel 4.17 Profil tegangan bus setelah dilakukan pemasangan SVC dengan metode optimasi PSO (lanjutan 1)

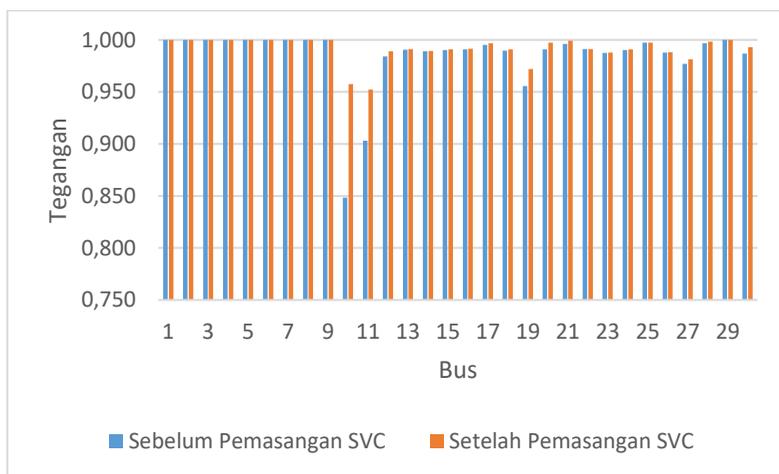
Bus No	Tegangan (pu)	
#	Tanpa SVC	Dengan SVC
16	0,991	0,991
17	0,995	0,997
18	0,990	0,991
19	0,956	0,972
20	0,991	0,997
21	0,996	0,999
22	0,991	0,991
23	0,988	0,988
24	0,990	0,991
25	0,997	0,997
26	0,988	0,988
27	0,977	0,981
28	0,997	0,998
29	1,000	1,000
30	0,987	0,993

Tabel 4.18 Data pembangkitan hasil simulasi aliran daya dengan metode Newton Rhapsion setelah pemasangan SVC pada bus 10 dan 11 menggunakan PSO

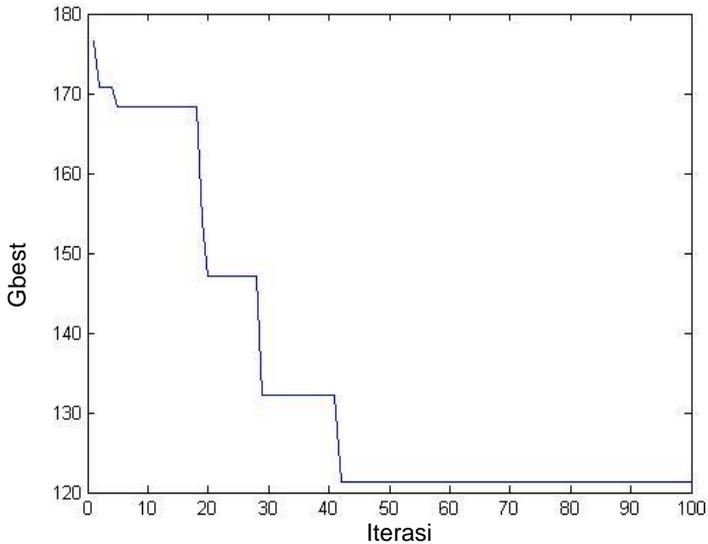
Bus	Pembangkitan	
#	MW	MVAR
1	3407,807	-118,708
2	355	565,5643
3	573,66	125,4212

Tabel 4.18 Data pembangkitan hasil simulasi aliran daya dengan metode Newton Rhapson setelah pemasangan SVC pada bus 10 dan 11 menggunakan PSO (lanjutan 1)

Bus	Pembangkitan	
#	MW	MVAR
4	449,77	385,6471
5	470	-17,8539
6	2964	556,1647
7	1083,63	586,0026
8	1906	-22,6495
9	1158,85	349,3173
20	302	178,506
21	99	-9,155
29	689	-271,514
Total	13458,72	2306,743



Gambar 4.12 Grafik Tegangan Setelah Penempatan SVC dengan *Sizing* Menggunakan Metode PSO



Gambar 4.13 Grafik Konvergensi Optimasi Penempatan SVC menggunakan algoritma PSO

Dari hasil simulasi optimasi penempatan dan alokasi SVC menggunakan algoritma PSO didapatkan nilai rating SVC sebesar 757,17 MVAR dan 239,731 MVAR pada bus 10 dan 11 secara berturut-turut. Setelah dilakukan simulasi aliran daya pada sistem Jamali 2017 dengan pemasangan SVC menggunakan metode optimasi PSO didapatkan nilai VPI baru sebesar 0,00040 serta rugi-rugi jaringan sebesar 277.946 MW dan 2462.655 MVAR. Nilai rugi-rugi yang didapatkan lebih tinggi dibandingkan hasil optimasi menggunakan QSEA dan waktu simulasi yang dibutuhkan jauh lebih lama. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa QSEA terbukti lebih baik dibandingkan PSO untuk menentukan ukuran SVC yang optimal untuk meningkatkan keamanan tegangan pada sistem Jamali tahun 2017 setelah terjadi kontingensi N-1 pada saluran transmisi.

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan percobaan yang dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Kontingensi terparah pada sistem transmisi 500 kV Jamali tahun 2017 adalah pada saluran no 1 yang menghubungkan bus 1 dan bus 4 dengan nilai VPI sebesar 0.1738
2. Penempatan optimal SVC didapatkan dari lokasi bus yang memiliki profil tegangan di luar standar saat terjadi kontingensi dengan nilai VPI terbesar yaitu pada bus 10 dan 11
3. Ukuran optimal SVC yg didapatkan dari algoritma QSE (*Quantum Swarm Evolutionary*) adalah sebesar 695.213 MVAR pada bus 10 dan 236.387 MVAR pada bus 11
4. Penempatan dan *sizing* optimal SVC dapat menurunkan VPI pada kasus kontingensi terparah menjadi 0,000448
5. Algoritma QSE (*Quantum Swarm Evolutionary*) dapat digunakan dengan baik untuk menentukan ukuran optimal SVC untuk meningkatkan keamanan tegangan.
6. Metode QSE (*Quantum Swarm Evolutionary*) memberikan hasil optimasi yang lebih baik dibandingkan metode PSO (*Particle Swarm Optimization*) dalam menentukan *sizing* SVC pada saluran transmisi. Metode QSE dapat menghasilkan nilai indeks keamanan tegangan yang lebih kecil dengan ukuran SVC yang lebih minimum dibandingkan metode PSO

5.2. Saran

Adapun saran untuk penelitian dan pengembangan selanjutnya yang berkaitan dengan tugas akhir ini yaitu :

1. Optimasi penentuan penempatan dan *sizing* SVC untuk meningkatkan *Voltage Security* dapat ditambah dengan mempertimbangkan kontingensi dan kemampuan *thermal* pada saluran serta respon generator dalam keadaan transien.
2. Optimasi untuk meningkatkan *Voltage Security* dapat dilakukan dengan menggunakan *Optimal Power Flow* sehingga biaya sebelum dan sesudah pun dapat dibandingkan.

3. Menggunakan koordinasi *FACTS devices* lainnya sehingga dapat dibandingkan mana yang lebih efektif antara penggunaan satu jenis *FACTS devices* atau kombinasi dari beberapa jenis *FACTS devices*.
4. Melakukan analisa optimasi penempatan *FACTS devices* dengan memperhitungkan *dispatch* generator setelah terjadinya kontingensi

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Susilo, Yusuf. "Analisis Kontingensi Sistem Transmisi 500 KV Jawa-Bali menggunakan EDSA. Skripsi S1, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi FT UGM. 2005
- [2] Glover, J. Duncan, "Power System Analysis and Design 5th Edition", Cengage Learning, USA, 2011.
- [3] Saadat, Hadi, "Power System Analysis 2nd Edition", McGraw Hill, Boston, 2004.
- [4] Ontoseno Penangsang, "Analisis Aliran Daya pada Sistem Tenaga Listrik", Teknik Elektro ITS, 2012
- [5] Hingorani, N.G., and Gyugyi, L., "Understanding FACTS concepts and technology of flexible AC transmission systems," IEEE Press, New York ;2000
- [6] Joseph Mutane and Goran Strbac, "Transmission Network Reinforcement Versus FACTS: An Economic Assessment", IEEE Transaction On Power System Vol 15, No 3, August 2000
- [7] CR Fuerte-Esquivael, Enrique Acha, "A Newton Type Algorithm The Control of Power Flow in Electrical Power Network", Transaction On Power System, Vol 12, No. 4, November 1997.
- [8] CR Fuerte, Esquivael, E. Acha, SG Tan JJ Riuco, "Efficient Object Oriented Power System Software for The Analysis of Large Scale Network 86 Containing FACTS-Controlled Brances", IEEE Transaction On Power System Vol 13, No2, May 1998
- [9] Douglas J. Gotham and G.T. Heydt, "Power Flow Control and Power Flow Studies for Systems With FACTS Devices", IEEE Transaction on Power System, Vol 13, No. 1, Februari 1998.
- [10] Wood, Allen J., "Power Generation, Operation, and Control", Wiley, New Jersey, 2014.
- [11] S. Dixit, L. Srivastava and G. Agnihotri, "Optimal placement of SVC for minimizing power loss and improving voltage profile using GA," 2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT), Ghaziabad, 2014, pp. 123-129.
- [12] A. Mishra, V. N. K. Gundavarapu, V. R. Bathina and D. C. Duvvada, "Real power performance index and line stability index-based management of contingency using firefly

- algorithm," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 10, pp. 2327-2335, 7 7 2016.
- [13] K.H. Han, J.H. Kim, Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization, *IEEE Trans. Evolut. Comput.*,6(6) (2002) 580–593
 - [14] Wang, Yan., Feng, Xiao-Yu., Huang, Yan-Xin., Pu, Dong-Bing., Zhou, Wen-Gang., Liang, Yan-Chun., Zhou, Chun-Guang, "A novel quantum swarm evolutionary algorithm and its applications" in *Elsevier Neurocomputing* 70 (2007) 633–640; 2006
 - [15] J. Kennedy, R.C. Eberhart, Particle swarm optimization, in: *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. IV, Perth, Australia, 1995, pp. 1942–1948.
 - [16] A. K. Shinha, "Power System Security: A Review". Department of EE, IIT Kharagpur.
 - [17] *ICFAI Journal of Science and Technology*, 2(1) (2006) 7-30.
 - [18] K.Habur, D.Oleary, "Flexiable AC transmission system, for cost effective and Reliable Transmission of Electrical Energy", online available: <http://www.siemensstd.com>.

Lampiran 1

Data Pembangkitan dan Pembebanan Setiap Bus Jamali 500 kV 2017

No Bus	Nama Bus	Bus Code	Load		Generation	
			MW	MVAR	MW	MVAR
1	Paiton	0	839	162	0	0
2	Cirata	0	550	201	0	0
3	Saguling	0	0	0	0	0
4	Grati	0	512	217	0	0
5	New Suralaya	0	69	24	0	0
6	Suralaya	0	80	79	0	0
7	Muara Tawar	0	0	0	0	0
8	Tanjung Jati	0	263	42	0	0
9	Gresik	0	117	-89	0	0
10	Kediri	0	444	134	0	0
11	Pedan	0	657	194	0	0
12	Tasikmalaya	0	166	67	0	0
13	Depok	0	517	-82	0	0
14	New Balaraja	0	946	134	0	0
15	Gandul	0	919	-106	0	0
16	Cibinong	0	364	173	0	0
17	Bandung Selatan	0	439	174	0	0
18	Surabaya Barat	0	1284	518	0	0
19	Unggaran	0	1915	143	0	0
20	Mandirancang	0	0	68	0	0
21	Ujung Berung	0	0	-78	0	0
22	Cibatu	0	878	566	0	0
23	Cawang	0	710	150	0	0
24	Kembangan	0	0	0	0	0
25	Cilegon	0	122	281	0	0

Data Pembangkitan dan Pembebanan Setiap Bus Jamali 500 kV 2017
(lanjutan1)

No Bus	Nama Bus	Bus Code	Load		Generation	
			MW	MVAR	MW	MVAR
26	Bekasi	0	1061	-73	0	0
27	Ngimbang	0	358	83	0	0
28	Adipala	0	0	0	0	0
29	Cilacap	0	0	0	0	0
30	Kesugihan	0	0	0	0	0
TOTAL			13209.6918	2982.2245	13064.4300	0.0000

Lampiran 2

Data Saluran Jamali 500 kV Tahun 2017

No Line	from bus	to bus	R'	X'	1/2 B	Length
			p.u.	p.u.	p.u.	km
1	1	4	0.0004410	0.0049343	0.1555175	87.86
2	1	10	0.0010265	0.0114847	0.3619650	204.50
3	2	22	0.0002739	0.0026324	0.0000000	46.76
4	3	2	0.0001474	0.0014168	0.0000000	25.17
5	3	17	0.0001957	0.0021902	0.0000000	39.00
6	5	6	0.0000146	0.0001407	0.0000000	1.25
7	5	31	0.0000055	0.0000541	0.0000000	0.98
8	6	14	0.0003677	0.0035333	0.0000000	62.76
9	6	25	0.0000626	0.0007008	0.0000000	12.48
10	7	22	0.0002822	0.0027112	0.0000000	48.16
11	7	23	0.0005625	0.0054048	0.0000000	48.00
12	8	19	0.0006766	0.0075703	0.2183220	134.80
13	11	10	0.0020531	0.0229694	0.1649090	204.50
14	11	30	0.0009839	0.0110073	0.3174415	196.00
15	13	12	0.0014030	0.0156967	0.4507775	279.50
16	14	15	0.0002979	0.0028622	0.0000000	50.84
17	15	13	0.0000347	0.0003334	0.0000000	5.92
18	15	24	0.0001513	0.0016928	0.0000000	30.14
19	16	3	0.0004111	0.0045995	0.1326450	81.90
20	16	7	0.0006211	0.0059678	0.0000000	53.00
21	16	13	0.0000912	0.0008765	0.0000000	15.57
22	16	26	0.0004441	0.0042675	0.0000000	37.90
23	17	20	0.0013981	0.0134331	0.0962035	119.30
24	17	21	0.0003854	0.0037034	0.0000000	32.89
25	18	4	0.0003986	0.0044596	0.0000000	79.41

Data Saluran Jamali 500 kV Tahun 2017 (lanjutan 1)

No Line	from bus	to bus	R'	X'	1/2 B	Length
			p.u.	p.u.	p.u.	km
26	18	9	0.0001400	0.0013455	0.0000000	23.90
27	18	19	0.0029792	0.0286229	0.2049870	254.20
28	18	27	0.0005974	0.0057404	0.0000000	50.98
29	19	11	0.0009036	0.0086814	0.0000000	77.10
30	19	27	0.0023479	0.0225580	0.1622335	200.34
31	20	19	0.0013478	0.0129490	0.3709440	229.50
32	21	20	0.0010129	0.0097320	0.0696970	86.43
33	25	16	0.0013133	0.0146925	0.1054850	130.81
34	26	23	0.0001973	0.0018961	0.0000000	16.84
35	28	29	0.0000381	0.0004387	0.0000000	4.79
36	28	30	0.0001100	0.0012668	0.0000000	13.83
37	30	12	0.0005446	0.0060933	0.1749890	108.50

BIOGRAFI PENULIS



Habibur Rohman, usually called Bibur, (born May 9, 1995 in Surabaya, East Java) is a senior college student of Electrical Engineering Department majoring in Power System Engineering in Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Started his education at SD Muhammadiyah 11 Surabaya . Then proceeded to Junior High School at SMP Negeri 6 Surabaya. Continues Senior High School at SMA Negeri 5 Surabaya, Then continue to pursue Electrical Engineering major in Department of Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. There are a lot of organizational activities that has been attended by Mr. Habibur at Institut Teknologi Sepuluh Nopember such as Staff at External Affair Ministry of BEM ITS, Vice President of HIMATEKTRO ITS, and Training Coordinator of Power System Simulation Laboratory. Mr. Habibur also participate in several self developing and short course program abroad namely XL Future Leaders Batch 4 and Global Korean Scholarship for ASEAN Science and Engineering Student 2016. Mr. Habibur interested in the field of Power Systems Simulation and Renewable Energy. Few of his achievement are 3rd winner of National Electrical Power System Competition in 2017 and Presenter in International Conference of Advanced Science and Technology at Kaohsiung, Taiwan, Republic of China in 2017. Mr. Habibur may be contacted by email : **habibur.its@gmail.com**

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]