



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR EE - 184801

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN
MEMPERTIMBANGKAN PELEPASAN BEBAN UNTUK SISTEM
JAWA-MADURA-BALI**

Eunike Widya Adinda
NRP 0711154000085

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Feby Agung P., S.T., M.T., Ph.D

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



TUGAS AKHIR - EE 184801

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN
MEMPERTIMBANGKAN PELEPASAN BEBAN UNTUK SISTEM
JAWA-MADURA-BALI**

Eunike Widya Adinda
NRP 0711154000085

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Feby Agung P., S.T., M.T., Ph.D

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

**SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW
CONSIDERING LOAD SHEDDING FOR JAWA-MADURA-BALI
SYSTEM**

Eunike Widya Adinda
NRP 0711154000085

Supervisors
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Feby Agung P., S.T., M.T., Ph.D

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Fakulty of Electrcal Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

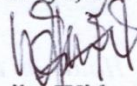
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan “Aliran Daya Optimal Dengan Batas Keamanan Mempertimbangkan Pelepasan Beban Untuk Sistem Jawa-Madura-Bali” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2019



Eunike Widya Adinda
NRP 07111540000085

Halaman ini sengaja dikosongkan.

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN
MEMPERTIMBANGKAN PELEPASAN BEBAN UNTUK
SISTEM JAWA-MADURA-BALI**

TUGAS AKHIR

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

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Ronv Seto Wibowo, S.T., M.T.

Feby Agung P., S.T., M.T., Ph. D.

NIP: 197411292000121001

NIP: 198702062012121002



**SURABAYA
JULI, 2019**

Halaman ini sengaja dikosongkan.

Aliran Daya Optimal dengan Batas Keamanan Mempertimbangkan Pelepasan Beban untuk Sistem Jawa-Madura-Bali

Nama Mahasiswa : Eunike Widya Adinda
NRP : 07111540000085
Pembimbing I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
NIP : 197411292000121001
Pembimbing II : Feby Agung P., S.T., M.T., Ph. D.
NIP : 198702062012121002

ABSTRAK

Kementerian ESDM menyatakan, pada tahun 2008 hingga 2027, pertumbuhan kebutuhan energi listrik akan mengalami kenaikan sebesar 6,1% per tahun dengan asumsi pertumbuhan penduduk sebesar 1,3% (RUKN, 2008). Kenaikan kebutuhan energi listrik ini dapat menyebabkan ketidakseimbangan sistem seperti peristiwa jatuh tegangan hingga penurunan pasokan daya yang berdampak pada peristiwa *black out*. Misalnya, pada Agustus 2015 telah terjadi pemadaman total di Jakarta-Banten selama 3 jam dan pada awal September 2018 telah terjadi pemadaman total di Cirebon akibat adanya kontingensi di sistem JAMALI 500 kV (Kompas, 2018). Oleh karena itu, dalam menjaga kestabilan sistem *backbone* JAMALI 500 kV, perlu dilakukan analisis perencanaan sistem kelistrikan yang optimal dan pertimbangan pelepasan beban untuk mencegah terjadinya *black out*. Hal ini dapat dilakukan dengan melakukan analisis *security constrained optimal power flow (SCOPF)* untuk mendapatkan data eksisting beban sehingga dapat dilakukan perencanaan sistem kelistrikan yang optimal serta pelepasan beban minimal untuk perbaikan sistem setelah terjadi kontingensi. Metode yang digunakan untuk menyelesaikan masalah *SCOPF* adalah *quadratic programming (QP)* yang dijalankan pada *software Matpower*. Analisis perencanaan sistem JAMALI 500 kV ini diharapkan mampu mengantisipasi terjadinya kontingensi serta meminimalkan biaya pembangkitan dan jumlah pelepasan beban yang optimal.

Kata Kunci : JAMALI, SCOPF, QP, Pelepasan Beban

Halaman ini sengaja dikosongkan.

Security Constrained Optimal Power Flow Considering Load Shedding for Jawa-Madura-Bali System

Student Name : Eunike Widya Adinda
NRP : 07111540000085
Supervisor I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
NIP : 197411292000121001
Supervisor II : Feby Agung P., S.T., M.T., Ph. D.
NIP : 198702062012121002

ABSTRACT

The Ministry of Energy and Mineral Resources stated that the growth of electricity demand in 2008 until 2027 would increase by 6,1% per year assuming a population growth of 3,1% (RUKN, 2008). This increase in electrical energy demand can cause a system imbalance such as voltage drop and a decrease in power generation that has an impact on black out events. For example, in August 2015, there was a total black out in Jakarta-Banten for 3 hours and in September 2018, there was a total black out in Cirebon due to contingency in the 500 kV JAMALI system. Therefore, in maintaining the stability of the 500 kV JAMALI backbone system, it is necessary to analyze the optimal electrical system planning and consider the load shedding to prevent the occurrence of black out. This can be done by conducting a security constrained optimal power flow (SCOPF) analysis to obtain the existing load data so the optimal electrical system planning can be carried out and minimize the load shedding to improve system after contingency occurs. The method that used to solve the SCOPF problem is quadratic programming (QP) which is run on Matpower software. The analysis of the 500 kV JAMALI system planning is expected to be able to anticipate the occurrence of contingencies and minimize generation costs and the optimal amount of load shedding

Kata Kunci : JAMALI, SCOPF, QP, Load Shedding

Halaman ini sengaja dikosongkan.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan yang Maha Esa karena kasih dan anugerah-Nya memampukan penulis untuk menyelesaikan penelitian ini sebagai tugas akhir guna menyelesaikan jenjang studi S1 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis berharap, tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca untuk penelitian selanjutnya dan dapat diterapkan secara nyata, khususnya bagi mahasiswa Teknik Elektro.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, penulis sangat berterima kasih atas segala dukungan, bantuan, bimbingan, dan doa yang telah diberikan kepada penulis. Teima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Orang tua, kakak, adik, dan seluruh keluarga yang telah memberikan seluruh cinta dan doanya.
2. Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Feby Agung P., S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan waktunya untuk mengarahkan dan membimbing selama perkuliahan dan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Prof. Ontoseno Penangsang, Prof. Adi Soeprijanto, Bu Ni Ketut Aryani, Bapak Dimas Fajar Uman, Bapak Suyanto, serta dosen-dosen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak masukan dan pengetahuan kepada penulis.
4. Yusiharfian, Christian, dan Mbak Fia sebagai kawan seperjuangan atas waktu, cerita, bimbingan, dan dukungannya.
5. Teman-teman asisten Power System Simulation Laboratory, Gracia, Elpha, Shafira, Mbak Farida, Christian, Baihaqi, Restu, Miftah, Saad, Arba, dan Mas Taufik.
6. Teman-teman tercinta, Gracia, Madeline, Imelda, Efrem, Gerald, Yousef, dan Elfrinsen.
7. Teman-teman yang setia, Yohana, Resa, Cici, Putri, dan, Vivia.
8. Teman-teman Kominfo Himatekro, Vipril, Rangga, Danial, Bagus, Dandi, Mas Aden, Mas Nobel, Mas Irul, dan Mas Ojan.
9. Teman-teman e55 untuk segala cerita, baik suka maupun duka.

10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu tanpa mengurangi rasa terima kasih penulis.

Penulis menyadari banyak kekurangan dari penulisan tugas akhir ini dan masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran dari pembaca untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

Surabaya, Mei 2019

Eunike Widya Adinda
NRP 0711154000085

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	1
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan	2
1.5. Metode Penelitian	2
1.6. Sistematika Penelitian	4
1.7. Relevansi	5
BAB 2 SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW SISTEM KELISTRIKAN JAWA-MADURA-BALI 500 KV	7
2.1. Sistem Tenaga Listrik	7
2.2. Kontingensi pada Sistem Tenaga	8
2.3. Power Flow	10
2.3.1. AC-PF	10
2.3.2. DC-PF	11
2.4. Optimal Power Flow	11
2.5. Security Constrained Optimal Power Flow	12
2.5.1. AC-SCOPF	13
2.5.1.1. Kondisi Normal	13
2.5.1.2. Kondisi Kontingensi	15
2.5.2. DC-SCOPF	16
2.6. Load Shedding atau Pelepasan Beban	18
BAB 3 PENERAPAN QUADRATIC PROGRAMMING DALAM SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW UNTUK SISTEM KELISTRIKAN JAMALI 500 kV	19
3.1. Algoritma	19
3.2. Penggunaan QP untuk Penyelesaian DC-SCOPF	20
3.2.1. Quadratic Programming	20

3.2.2.	Metode QP pada Matlab	21
3.2.3.	Penyelesaian DC-SCOPF Menggunakan QP	24
3.2.3.1.	Variabel Kontrol	26
3.2.3.2.	Pembentukan Matriks A.....	27
3.2.3.3.	Pembentukan Matriks I dan u	29
3.2.3.4.	Pembentukan Matriks H.....	30
3.2.3.1.	Pembentukan Matriks G.....	31
3.2.3.2.	Pembentukan Vektor x_{min} dan x_{max}	32
3.2.3.3.	Pembentukan Vektor x_0	32
BAB 4	VALIDASI, SIMULASI, DAN ANALISIS	33
4.1.	Validasi Sistem Kelistrikan IEEE 9 Bus.....	33
4.1.1.	Validasi Tahap Pertama	35
4.1.1.1.	Simulasi Validasi Tahap Pertama	35
4.1.1.2.	Analisis Validasi Tahap Pertama.....	36
4.1.2.	Validasi Tahap Kedua.....	36
4.1.2.1.	Simulasi Validasi Tahap Kedua.....	36
4.1.2.2.	Analisis Validasi Tahap Kedua	37
4.1.3.	Validasi Tahap Ketiga	37
4.1.3.1.	Simulasi Tahap Ketiga	37
4.1.3.2.	Analisis Tahap Ketiga	38
4.1.4.	Kesimpulan	40
4.2.	Simulasi Program untuk Sistem JAMALI 500 kV.....	40
4.2.1.	Data Plan JAMALI 500 kV.....	40
4.2.1.1.	Data Generator JAMALI 500 kV	40
4.2.1.2.	Data Bus JAMALI 500 kV.....	43
4.2.1.3.	Data Saluran JAMALI 500 kV	44
4.3.	Program DC-SCOPF Memertimbangkan Pelepasan Beban untuk Sistem JAMALI 500 kV.....	47
4.3.1.	Screening Kontingensi Sistem JAMALI 500 kV	47
4.3.2.	Simulasi Program DC-SCOPF Memertimbangkan Pelepasan Beban untuk Sistem JAMALI 500 kV	50
4.3.2.1.	Simulasi Tanpa Batasan Ramp Rate ...	50
4.3.2.2.	Simulasi dengan Batasan Ramp Rate..	52
4.3.2.3.	Analisis Pengaruh Batasan Ramp Rate	55
BAB 5	PENUTUP.....	57
5.1.	Kesimpulan	57

5.2. Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	59
RIWAYAT HIDUP PENULIS.....	61

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Sistem Tenaga Listrik	7
Gambar 3.1.	Proses Pengerjaan Tugas Akhir	19
Gambar 3.2.	Sistem Tenaga Listrik 3 Bus	27
Gambar 4.1.	Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus	33
Gambar 4.2.	Biaya Pelepasan Beban Tanpa dan Dengan Batasan <i>Ramp Rate</i> pada Kondisi Normal dan Kontingensi	39
Gambar 4.3.	Biaya Pembangkitan Tanpa dan Dengan Batasan <i>Ramp Rate</i> pada Kondisi Normal dan Kontingensi	39
Gambar 4.4.	<i>Single Line Diagram</i> Sistem Kelistrikan JAMALI 500 kV	46
Gambar 4.5.	Daya Pembangkitan Sistem JAMALI 500 kV Tanpa <i>Ramp Rate</i> Kondisi Kontingensi	49
Gambar 4.6.	Daya Pelepasan Beban Sistem JAMALI 500 kV Tanpa <i>Ramp Rate</i> Kondisi Kontingensi	49
Gambar 4.7.	Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV Kondisi Normal Tanpa <i>Ramp Rate</i>	51
Gambar 4.8.	Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV Kondisi Kontingensi Tanpa <i>Ramp Rate</i>	52
Gambar 4.9.	Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV Kondisi Normal dengan <i>Ramp Rate</i>	54
Gambar 4.10.	Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV Kondisi Kontingensi dengan <i>Ramp Rate</i>	55

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1.	Data Modifikasi Generator Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus.....	34
Tabel 4.2.	Data Modifikasi Bus Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus	34
Tabel 4.3.	Data Modifikasi Saluran Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus.....	34
Tabel 4.4.	Variabel Keluaran Hasil Simulasi Validasi Tahap Pertama.....	35
Tabel 4.5.	<i>Screening</i> Kontingensi Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus.....	36
Tabel 4.6.	Selisih Pembangkitan Kondisi Normal dan Kontingensi Tanpa Batasan <i>Ramp Rate</i>	37
Tabel 4.7.	Selisih Pembangkitan Kondisi Normal dan Kontingensi dengan Batasan <i>Ramp Rate</i>	37
Tabel 4.8.	Besar Daya dan Biaya Pelepasan Beban dan Saat Kondisi Normal dan Kontingensi Tanpa dan dengan Batasan <i>Ramp Rate</i>	38
Tabel 4.9.	Besar Daya dan Biaya Pembangkitan dan Saat Kondisi Normal dan Kontingensi Tanpa dan dengan Batasan <i>Ramp Rate</i>	38
Tabel 4.10.	Biaya Total Pembangkitan, Pelepasan Beban, dan <i>Objective Function</i> Saat Kondisi Normal dan Kontingensi Tanpa dan dengan Batasan <i>Ramp Rate</i>	38
Tabel 4.11.	Data Modifikasi Pembangkit JAMALI 500 kV	41
Tabel 4.12.	Data <i>Ramp Rate</i> Pembangkit 500 kV	42
Tabel 4.13.	Data Modifikasi Bus JAMALI 500 kV	44
Tabel 4.14.	Data Modifikasi Saluran JAMALI 500 kV	45
Tabel 4.15.	<i>Screening</i> Kontingensi Sistem JAMALI 500 kV	48
Tabel 4.16.	Aliran Daya Optimal Tanpa <i>Ramp Rate</i>	50
Tabel 4.17.	Aliran Daya Optimal dengan <i>Ramp Rate</i>	53
Tabel 4.18.	Pengaruh Batasan <i>Ramp Rate</i> dengan Besar Daya Pembangkitan pada Kondisi Normal dan Kontingensi ...	55
Tabel 4.19.	Pengaruh Batasan <i>Ramp Rate</i> dengan Besar Biaya Pembangkitan pada Kondisi Normal dan Kontingensi ...	56
Tabel 4.20.	Pengaruh Batasan <i>Ramp Rate</i> dengan Besar Daya Pelepasan Beban pada Kondisi Normal dan Kontingensi	56

Tabel 4.21.	Pengaruh Batasan <i>Ramp Rate</i> dengan Besar Biaya Pelepasan Beban pada Kondisi Normal dan Kontingensi.....	56
--------------------	---	----

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Semakin berkembangnya populasi dan peradaban manusia, semakin berkembang pula kebutuhan akan energi listrik untuk mendukung gaya hidupnya. Kementerian ESDM menyatakan, pada tahun 2008 hingga 2027, asumsi pertumbuhan kebutuhan energi listrik akan mengalami kenaikan sebesar 6,1% per tahun dengan asumsi pertumbuhan penduduk sebesar 1,3% (RUKN, 2008). Pertumbuhan kebutuhan energi tersebut harus diiringi dengan pertumbuhan kapasitas pembangkit supaya terjaga kestabilan sistemnya karena ketidakstabilan sistem dapat mengakibatkan peristiwa jatuh tegangan, penurunan frekuensi, hingga berkurangnya pasokan daya. Namun, untuk membangun pembangkit baru dibutuhkan biaya yang sangat besar dengan waktu pembangunan yang lama. Ketidakstabilan sistem menyebabkan tidak tersedianya pasokan listrik yang seimbang dengan beban yang kemudian mengakibatkan terjadinya peristiwa *black out* atau pemadaman listrik total pernah terjadi di Indonesia. Misalnya, Jakarta-Banten (tiga jam) pada tanggal 18 Agustus 2015, Pulau Bali (satu jam) pada tanggal 5 September 2018, dan Sulawesi (34 jam) pada tanggal 15 November 2018. *Black out* di Pulau Bali ini terjadi akibat adanya kontingensi di sistem backbone JAMALI 500 kV (Kompas.com, 2018). Pemadaman listrik akan memengaruhi hampir seluruh kehidupan manusia. Tidak tersedianya listrik dapat menghambat pekerjaan, memperlambat tersebarnya informasi, serta meningkatkan kriminalitas, yang kemudian juga berpengaruh pada sisi perekonomian. Untuk mencegah terjadinya pemadaman total maka kestabilan sistem harus selalu dijaga agar pasokan listrik dapat mencukupi kebutuhan beban. Salah satunya dengan melakukan metode pelepasan beban atau *load shedding* saat terjadi kontingensi [1].

1.2. Permasalahan

Ketika terjadi penambahan daya beban listrik, maka diperlukan juga penambahan daya pembangkit atau suplai untuk menjaga kestabilan sistem sehingga tidak mengakibatkan terjadinya *black out* atau pemadaman total. Dalam keadaan darurat dapat dipilih metode pelepasan beban untuk mempertahankan keandalan sistemnya. Untuk melakukan pelepasan beban yang optimal perlu diperhitungkan jumlah pelepasan

beban dan lokasi yang tepat. Pelepasan beban tidak boleh dilakukan pada beban esensial dan dilakukan seminimal mungkin agar mengurangi biaya pembangkitan dan tidak menimbulkan permasalahan baru yang merugikan [2].

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengimplementasikan metode *Quadratic Programming* ke dalam modifikasi program *Matpower 6.0*
2. Sistem kelistrikan yang digunakan adalah modifikasi sistem kelistrikan JAMALI 500 kV dengan sistem DC-SCOPF
3. Operasi pembangkitan selalu dalam keadaan menyala
4. Menggunakan batasan yang sama untuk asumsi *ramp up* dan *ramp down* pada pembangkit
5. Semua saluran dianggap *double circuit*
6. Rugi-rugi beban dan VAR diabaikan
7. Pembobotan kondisi diabaikan

1.4. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengantisipasi terjadinya kontingensi dengan melakukan pelepasan beban seminimal mungkin di lokasi yang tepat. Hal ini bermanfaat untuk mengurangi biaya pembangkitan bagi PLN dan mencegah terjadinya *black out* yang dapat merugikan pelanggan.

1.5. Metode Penelitian

Pada pengerjaan tugas akhir ini, akan dilakukan analisis aliran daya optimal dengan batas keamanan (*SCOPF*) pada sistem yang mengalami kontingensi yaitu putusnya salah satu saluran. Analisis ini digunakan untuk mendapatkan total biaya pembangkitan dan pelepasan beban minimal. Program *SCOPF* ini akan dijalankan menggunakan metode *quadratic programming* dalam *Matpower 6.0* pada sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (JAMALI) 500 kV dengan tahapan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap pertama, perlu dilakukan studi literatur dengan menggunakan referensi berupa *paper*, jurnal, atau buku

untuk mempelajari *Power Flow*, perhitungan *SCOPF*, *load shedding*, serta karakteristik penggunaan *quadratic programming* pada *Matpower 6.0*. Pada tahap ini juga dilakukan studi untuk mengetahui karakteristik sistem JAMALI 500 kV, seperti karakteristik pembangkit, beban, dan salurannya.

2. Pengumpulan Data dan Permodelan Sistem

Pada tahap kedua akan dilakukan proses pengumpulan data pembangkit yang berupa fungsi harga, kapasitas, dan batas *ramp rate* pembangkitan untuk masing-masing generator *in service*, data beba, dan data saluran berupa impedansi dan kapasitasnya. Selain itu, akan ditambahkan fungsi perhitungan dan data harga pelepasan beban. Kemudian akan dimodelkan ke dalam program *Matpower 6.0* dan dilanjutkan dengan penulisan variabel tambahan berupa data *load* untuk analisis pelepasan beban.

3. Penyusunan Matriks

Setelah menentukan fungsi matematis sistem maka selanjutnya dilakukan penyusunan matriks untuk berbagai kondisi, yaitu kondisi normal dan kontingensi.

4. Validasi, Simulasi, dan Analisis

Untuk melakukan validasi program, maka akan digunakan sistem IEEE 9 bus dalam kondisi normal dan kontingensi dengan batasan *ramp rate*. Apabila valid, maka dapat dilanjutkan proses simulasi *SCOPF* pada sistem JAMALI 500 kV menggunakan perhitungan *DC* untuk menentukan biaya pembangkitan terkecil dan pelepasan beban minimal. Proses validasi dan simulasi akan dilakukan dalam beberapa tahap yaitu pada Kondisi Pertama untuk sistem saat normal tanpa batas *ramp rate*, pada Kondisi Kedua untuk sistem saat kontingensi tanpa batas *ramp rate*, dan pada Kondisi Ketiga untuk sistem saat kontingensi dengan batas *ramp rate*.

Hasil simulasi pada ketiga kondisi ini diharapkan dapat menjelaskan pengaruh kontingensi dan batas *ramp rate* terhadap sistem termasuk terhadap biaya pembangkitan dan pelepasan bebannya.

5. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Apabila semua proses validasi, simulasi, dan analisis telah selesai, telah menjawab permasalahan, dan mencapai tujuan dalam perencanaan tugas akhir ini, maka selanjutnya

dilakukan penyusunan buku Tugas Akhir sesuai dengan format yang telah ditentukan.

1.6. Sistematika Penelitian

Dalam menyusun tugas akhir ini digunakan sistematika sebagai berikut:

- BAB 1** **PENDAHULUAN**
Pada bab ini akan dibahas mengenai latar belakang, permasalahan, batasan masalah, metode penelitian, tujuan, dan relevansi tugas akhir.
- BAB 2** **SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW UNTUK SISTEM KELISTRIKAN JAWA-MADURA-BALI 500 kV**
Pada bab ini akan dijelaskan mengenai sistem tenaga listrik, *optimal power flow*, *AC* dan *DC optimal power flow*, *security constrained optimal power flow* atau *SCOPF*, metode pelepasan beban atau *load shedding*, dan *quadratic programming* secara umum.
- BAB 3** **PENERAPAN QUADRATIC PROGRAMMING DALAM SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW UNTUK SISTEM KELISTRIKAN JAWA-MADURA-BALI 500 kV**
Pada bab ini akan dijelaskan tentang sistem kelistrikan JAMALI 500 kV dan bagaimana penerapan *quadratic programming* atau *QP* pada *SCOPF* (perhitungan *DC*) mempertimbangkan pelepasan beban atau *load shedding* dengan menggunakan program *Matpower 6.0* untuk sistem kelistrikan JAMALI 500 kV.
- BAB 4** **VALIDASI, SIMULASI DAN ANALISIS**
Pada bab ini akan dibahas hasil analisis dari simulasi program *SCOPF* (*DC*) mempertimbangkan pelepasan beban atau *load shedding* untuk validasi sistem IEEE 9 Bus dan sistem kelistrikan JAMALI 500 kV.
- BAB 5** **PENUTUP**
Pada bab ini akan dibahas kesimpulan dari hasil simulasi dan analisis pada bab sebelumnya. Selain itu, akan ditulis saran rekomendasi yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya.

1.7. Relevansi

Dalam menyusun tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam:

1. Perkembangan sistem kelistrikan menggunakan analisis *SCOPF* (DC) dengan mempertimbangkan pelepasan beban atau *load shedding*.
2. Menambah pemahaman ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya di bidang kelistrikan dan optimasi sistem tenaga.
3. Pengembangan penelitian dengan masalah serupa.

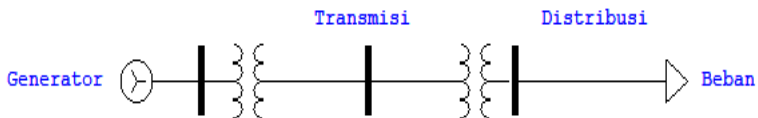
Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 2

SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW SISTEM KELISTRIKAN JAWA-MADURA- BALI 500 KV

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Secara umum, bagian utama dalam sistem tenaga listrik dibagi menjadi empat bagian yaitu pembangkitan, transmisi, distribusi, dan beban yang ditunjukkan oleh **Gambar 2.1** [3].



Gambar 2.1. Sistem Tenaga Listrik

Pembangkitan terjadi karena adanya proses perubahan sumber energi menjadi energi listrik dengan menggunakan pembangkit tenaga listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, atau PLTGU untuk skala pembangkitan dengan kapasitas yang besar, maupun PLTD untuk skala pembangkitan dengan kapasitas yang lebih kecil [4]. Setelah energi listrik dibangkitkan, maka selanjutnya energi listrik tersebut akan disalurkan melalui saluran transmisi.

Biasanya, sebuah pembangkit dibangun sangat jauh dari tempat tinggal atau pelanggan. Saluran transmisi yang saat ini banyak digunakan di Indonesia menggunakan sistem *HVAC*. Jarak yang sangat panjang ini kemudian dapat memperbesar nilai *losses* karena impedansi semakin besar sehingga nilai daya terima akan semakin berkurang [5]. Oleh karena itu, sebelum daya listrik dialirkan, tegangan pada saluran transmisi akan dinaikkan sehingga nilai arus yang mengalir akan menurun dan nilai *losses*-nya pun berkurang. Kemudian pada sisi distribusi, tegangan akan diturunkan kembali sesuai dengan kebutuhan pelanggan. Namun, untuk sistem transmisi menggunakan *HVDC* dengan saluran yang sangat panjang, nilai *losses* akan lebih kecil dari pada *HVAC*. Hal ini disebabkan

oleh tidak adanya nilai *losses* dari beban kapasitif dan induktif pada saluran *HVDC*.

Kemudian, listrik akan dialirkan ke pelanggan-pelanggan, seperti pelanggan industri maupun rumah tangga. Untuk pelanggan industri, biasanya dibutuhkan listrik dengan tegangan tinggi dan menengah, sedangkan untuk pelanggan rumah tangga dibutuhkan listrik dengan tegangan yang lebih rendah. Untuk mendapatkan tegangan yang lebih rendah, tegangan dari sisi transmisi akan diturunkan nilainya menggunakan trafo distribusi dan disalurkan melalui gardu induk distribusi menuju pelanggan rumah tangga.

Pada pengoperasian sistem tenaga listrik terdapat beberapa kriteria yang harus dijaga, seperti sisi keamanan (*security*) yaitu kemampuan sistem dalam menghadapi gangguan dengan cara mengidentifikasi gangguan yang akan terjadi sehingga tidak sampai terjadi pemadaman, sisi kualitas yaitu kemampuan sistem dalam menjaga batas-batas operasi sistem kelistrikan sesuai dengan standar yang diterapkan, dan sisi ekonomi yaitu mempertimbangkan operasi sistem kelistrikan yang optimal dengan biaya murah namun tetap terjaga keamanan dan kualitasnya. Ketiga kriteria tersebut dijalankan berdasarkan kondisi *real time*. Sisi keamanan akan menjadi prioritas utama yang harus dijaga pada saat terjadi gangguan. Kemudian pada saat sisi keamanan dan kualitas sistem sudah memenuhi batas standar maka sisi ekonomi dapat dipertimbangkan [6].

2.2. Kontingensi pada Sistem Tenaga

Kotingsensi merupakan suatu kegagalan yang terjadi akibat satu atau beberapa pembangkit mati maupun terputusnya saluran. Kontingensi ini sering terjadi pada sisi transmisi dan dapat mengakibatkan masalah dalam sistem kelistrikan.

Analisis kontingensi merupakan salah satu bagian dari analisis keamanan [7]. Saat terjadi gangguan atau kontingensi, sistem tenaga listrik diharapkan tetap dapat memenuhi kebutuhan pelanggan tanpa melanggar batas pengoperasian sistem tenaga listrik seperti kapasitas pembangkitan dan saluran. Hal ini dilakukan dengan menambahkan batasan-batasan pada generator dan salurannya. Pada generator diberikan batasan untuk mencegah kerusakan dengan menjaga gradien temperatur

dan tekanannya sedangkan pada saluran diberikan batasan pada kapasitasnya agar daya yang mengalir tidak *overload*. Kerusakan generator dapat mengakibatkan kurangnya pasokan daya ke beban atau pelanggan sedangkan saluran *overload* akan menurunkan tegangan bus sehingga arus saluran meningkat dan *losses* pun meningkat serta menurunkan kinerja peralatan. Selain keamanannya, kualitas sistem kelistrikan juga harus dijaga agar kebutuhan pelanggan atau beban dapat terpenuhi dengan baik. Parameter-parameter yang harus dijaga dalam menjaga kualitas sistem kelistrikan antara lain frekuensi dan tegangan. Frekuensi atau jumlah siklus bolak-balik arus per detik dipengaruhi oleh kecepatan putaran turbin generator. Di Indonesia, frekuensi yang diijinkan adalah 50 Hz. Jika frekuensi sistem kurang atau lebih dari 50 Hz (batas yang diijinkan ± 50 Hz) (PERMEN, 2008) atau tidak stabil maka akan mengakibatkan ketidakstabilan perputaran motor-motor listrik yang terdapat pada sisi pelanggan (terlebih pelanggan industri) sehingga mengganggu proses produksi pelanggan. Kualitas sistem tenaga juga dipengaruhi oleh perubahan nilai tegangan. Fluktuasi nilai tegangan pada sistem dapat mengakibatkan perubahan arus pada sistem. Penurunan tegangan menyebabkan peralatan bergetar dan intensitas cahaya pada beban lampu menurun sedangkan kenaikan tegangan dapat menyebabkan peralatan terbakar dan memperpendek umur peralatan. Oleh karena itu, untuk menjaga kualitas sistem kelistrikan maka frekuensi sistem harus dijaga tetap stabil dan tegangan harus dijaga sesuai dengan nilai atau *rating* yang telah ditentukan. Selain nilai keamanan dan kualitas sistem, nilai ekonomi sistem juga perlu dijaga karena peristiwa kontingensi juga merugikan di sisi ekonomi. Nilai ekonomi sistem tenaga listrik ditentukan oleh harga pembangkitan dan harga pelepasan beban sebagai tambahan. Harga pembangkitan bisa didapatkan dari perhitungan matematis dengan dua jenis biaya, yaitu biaya tetap dan biaya variabel. Biaya tetap merupakan biaya yang dibayarkan meskipun generator dalam keadaan tidak beroperasi seperti biaya pegawai sedangkan biaya variabel merupakan biaya yang berhubungan dengan proses pembangkitan, seperti biaya bahan bakar yang dibutuhkan pada saat membangkitkan listrik serta biaya pemeliharaan dan perbaikan pembangkit [8].

Oleh karena itu, untuk menjaga keamanan, kualitas, dan nilai ekonomi sistem saat terjadi kontingensi maka perlu dilakukan *re-dispatch*

daya pembangkitan. Permasalahan ini dapat diselesaikan dengan menganalisis aliran daya optimalnya menggunakan program *security constrained optimal power flow* atau *SCOPF* pada *Matpower*. *SCOPF* dapat dijalankan dengan perhitungan *AC* maupun *DC*, namun pada tugas akhir ini, *SCOPF* akan dijalankan menggunakan perhitungan *DC* pada *Matlab* dan menggunakan *Matpower 6.0*. Pada program ini, gangguan akan dimodelkan pada salah satu saluran sistem dimana salah satu salurannya putus.

2.3. Power Flow [5]

Analisis aliran daya merupakan analisis sistem kelistrikan dasar yang sangat penting untuk menganalisis suatu sistem mulai dari perencanaan, operasi, penjadwalan, sampai nilai ekonominya. Dalam perhitungannya, analisis aliran daya menggunakan beberapa metode seperti *Newton Raphson*, *Gaus-Seidel*, serta *Fast Decoupled Method*.

2.3.1. AC-PF

Untuk analisis aliran daya sistem *AC*, metode yang paling sederhana yang biasa digunakan adalah metode *Fast Decoupled* yaitu bentuk penyederhanaan dari metode *Newton Raphson*. Berdasarkan metode ini, maka pembentukan matriks *Jacobian*-nya adalah:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta |E_k|}{|E_k|} \end{bmatrix} \quad [2.1]$$

Sehingga didapatkan matriks *Fast Decoupled*-nya sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{|E_1|} \\ \frac{\Delta P_2}{|E_2|} \\ \vdots \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad [2.2]$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ |E_1| \\ \Delta Q_2 \\ |E_2| \\ \vdots \end{bmatrix} = [B''] \begin{bmatrix} \Delta |E_1| \\ \Delta |E_2| \\ \vdots \end{bmatrix} \quad [2.3]$$

2.3.2. DC-PF

Untuk analisis aliran daya sistem *DC*, magnitudo tegangan dan daya reaktif dibiarkan sehingga didapatkan matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad [2.4]$$

2.4. Optimal Power Flow

Optimal power flow analysis atau *OPF* merupakan suatu studi pengembangan dari *economy dispatch* atau *ED* dengan menganalisis aliran daya suatu sistem. Dengan hasil dari analisis aliran daya tersebut akan didapatkan nilai daya yang mengalir tiap saluran dan nilai tegangan tiap bus. Ada tiga jenis bus pada sistem tenaga yang harus diketahui, yaitu:

1. *Load Bus/PQ Bus*

Bus ini terletak di dekat beban sehingga dinamakan *load bus*. Besaran yang dihitung adalah nilai dan sudut tegangan dengan besaran yang diketahui adalah daya aktif dan reaktifnya. Pada program *Matpower*, *load bus* dimisalkan dengan angka 1.

2. *Generator/PV Bus*

Bus ini terletak di dekat generator sehingga dinamakan *generator bus*. Selain itu, bus ini juga disebut *voltage controlled bus* karena nilai tegangannya dipertahankan untuk tetap konstan. Besaran yang dihitung adalah daya reaktif dan sudut tegangan dengan besaran yang diketahui adalah daya aktif dan nilai tegangan generatornya. Pada program *Matpower*, *generator bus* dimisalkan dengan angka 2.

3. *Swing/Slack Bus*

Bus ini merupakan bus referensi dimana nilai dan sudut tegangannya adalah tetap nol. Besaran yang dihitung adalah

daya aktif dan reaktifnya. Pada program *Matpower*, *swing* atau *slack bus* dimisalkan dengan angka 3.

Analisis aliran daya ini dapat dilakukan untuk perhitungan *AC* maupun *DC*. Namun, analisis untuk sistem *AC* lebih rumit dibandingkan untuk sistem *DC* karena variabel yang dihitung lebih banyak. Pada perhitungan *DC*, nilai susceptansi dan daya reaktif akan diabaikan.

Dalam analisis aliran daya, ada dua bagian penting yang diperhitungkan yaitu variabel kontrol dan fungsi objektif. Variabel kontrol atau variabel pada batasan *OPF* antara lain besarnya sudut tegangan dan daya pembangkitan generator. Sedangkan untuk fungsi objektif dari *OPF* adalah total biaya minimal sistem. Untuk mencari nilai total biaya sistem yang optimal maka diperlukan data pembangkitan generator dan data *gencost* atau biaya produksinya (bahan bakar).

Selain biaya produksi, biaya pelepasan beban juga dapat diminimalisir. Pada kenyataannya, ketika terjadi kegagalan, suatu sistem yang kurang baik cenderung melakukan pelepasan beban untuk mencegah terjadinya *black out* total. Namun, pelepasan beban ini cenderung merugikan, baik di sisi pemasok maupun di sisi pelanggan. Oleh karena itu, diperlukan studi lanjutan yaitu analisis pelepasan beban dalam menjaga total biaya sistem yang minimal pada analisis aliran dayanya.

2.5. Security Constrained Optimal Power Flow [9]

Pada pengerjaan tugas akhir ini, digunakan analisis aliran daya optimal dengan batas keamanan atau *security constrained optimal power flow (SCOPF)* untuk menganalisis aliran daya sistem dari pembangkit menuju beban dan untuk mendapatkan nilai tegangan, daya, maupun frekuensi serta mencegah timbulnya kerusakan permanen sistem saat terjadi kegagalan. Aliran daya optimal dengan batas keamanan atau *SCOPF* merupakan perhitungan *OPF* konvensional yang mempertimbangkan keamanan sistem saat terjadi kontingensi. *SCOPF* digunakan untuk perhitungan fungsi nonlinier dengan variabel diskrit maupun kontinu untuk skala besar [10]. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis aliran daya dalam dua kondisi, yang pertama saat kondisi normal dan yang kedua saat kondisi kontingensi. Kemudian dari hasil *SCOPF* akan dianalisis nilai harga pembangkitan minimal dan

jumlah pelepasan beban minimalnya. Analisis *SCOPF* ini dapat digunakan untuk perhitungan *AC* maupun *DC*.

2.5.1. AC-SCOPF

Perhitungan aliran daya optimal yang sederhana digunakan untuk meminimalkan fungsi objektif atau f dalam batasan *equality* atau g dan batasan *inequality* atau h .

$$\begin{aligned} f &= f(x^k, u) && : \text{fungsi objektif} \\ g &= g(x^k, u) && : \text{batasan equality} \\ h &= h(x^k, u) && : \text{batasan inequality} \end{aligned}$$

dengan k adalah indeks kontingensi.

SCOPF juga digunakan untuk perhitungan biaya pembangkitan, yaitu dengan rumus sebagai berikut

$$F_i(P_{gi}^0) = \sum_i (a_i P_{gi}^0{}^2 + b_i P_{gi}^0 + c_i) \quad [2.5]$$

Dimana,

$F_i(P_{gi}^0)$: Biaya pembangkitan generator ke- i (Rupiah)

P_{gi}^0 : Daya generator ke- i (MW)

a_i, b_i, c_i : *Fuel Cost Coefficient* generator ke- i

i : Data generator ke- 1, 2, 3, ..., n .

Perhitungan pada *SCOPF* didapatkan dari perhitungan *OPF* konvensional dengan mempertimbangkan sisi keamanan dalam dua kondisi, yaitu kondisi normal dan kontingensi.

2.5.1.1. Kondisi Normal

a. Equality Constraint

Pada kondisi normal, perhitungan *equality constraint* aliran dayanya adalah sebagai berikut:

$$P_i - jQ_i = (P_{gi}^0 - P_{di}) + j(Q_{gi}^0 - Q_{di}) = V_i^{0*} \left(\sum_{j=1}^n V_j^0 Y_{ij} \right) \quad [2.6]$$

dengan

$$Y_{ij} = G_{ij} - jB_{ij} \text{ dan } V_i^0 = |V_i^0| e^{j\theta} \quad [2.7]$$

sehingga didapatkan nilai P_i dan Q_i sebagai berikut:

$$P_i = P_{gi}^0 - P_{di} = \sum_{j=1}^n V_i^0 V_j^0 (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad [2.8]$$

$$Q_i = Q_{gi}^0 - Q_{di} = \sum_{j=1}^n V_i^0 V_j^0 (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad [2.9]$$

b. *Inequality Constraint*

Pada kondisi normal, perhitungan *inequality constraint* sistem harus dipenuhi batasan-batasan yang lain seperti batasan pembangkit, tegangan, dan aliran daya, sebagai berikut:

Batasan Pembangkit

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^0 \leq P_{gi}^{max} \quad [2.10]$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^0 \leq Q_{gi}^{max} \quad [2.11]$$

Batasan Tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^0 \leq V_i^{max} \quad [2.12]$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^0 \leq \theta_i^{max} \quad [2.13]$$

Batasan Aliran Daya

$$|S_{ij}^0| \leq S_{ij}^{max} \quad [2.14]$$

Batasan Ramp Rate

$$-\delta_i \leq P_{gi}^1 - P_{gi}^0 \leq \delta_i \quad [2.15]$$

dimana,

i, j : Data bus ke- 1, 2, 3, ..., n ($i \neq j$)

P_i : Daya aktif bus ke-i

Q_i : Daya reaktif bus ke-i

P_{gi} : Daya aktif generator pada bus ke-i

Q_{gi} : Daya reaktif generator pada bus ke-i

P_{di} : Daya aktif beban pada bus ke-i

Q_{di} : Daya reaktif beban pada bus ke-i

Y_{ij} : Admitansi saluran dari bus ke-i menuju bus ke-j

G_{ij} : Konduktansi saluran dari bus ke-i menuju bus ke-j

B_{ij} : Suseptansi saluran dari bus ke-i menuju bus ke-j

- V_i : Tegangan bus ke-i
 V_j : Tegangan bus ke-j

2.5.1.2. *Kondisi Kontingensi*

Kondisi kontingensi merupakan kondisi dimana sistem mengalami gangguan dengan cara memutus salah satu saluran.

a. *Equality Constrained*

Pada kondisi kontingensi, perhitungan equality constraint aliran dayanya adalah sebagai berikut:

$$P_i^k = P_{gi}^k - P_{di}^k = \sum_{j=1}^n V_i^k V_j^k (G_{ij} \cos \theta_{ij}^k + B_{ij} \sin \theta_{ij}^k) \quad [2.16]$$

$$Q_i^k = Q_{gi}^k - Q_{di}^k = \sum_{j=1}^n V_i^k V_j^k (G_{ij} \sin \theta_{ij}^k - B_{ij} \cos \theta_{ij}^k) \quad [2.17]$$

b. *Inequality Constraint*

Pada kondisi kontingensi, perhitungan *inequality constraint* sistem harus dipenuhi batasan-batasan yang lain seperti batasan pembangkit, tegangan, aliran daya, dan *ramp rate* sebagai berikut:

Batasan pembangkitan

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^k \leq P_{gi}^{max} \quad [2.18]$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^k \leq Q_{gi}^{max} \quad [2.19]$$

Batasan tegangan:

$$V_i^{min} \leq V_i^k \leq V_i^{max} \quad [2.20]$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^k \leq \theta_i^{max} \quad [2.21]$$

Batasan aliran daya saluran:

$$S_l^k \leq S_l^{max} \quad [2.22]$$

Batasan ramp rate:

$$\frac{-\delta_i}{12} \leq P_{gi}^k - P_{gi}^n \leq \frac{\delta_i}{12} \quad [2.23]$$

dimana,

- i, j : Data bus ke- 1, 2, 3, ..., n ($i \neq j$)
- P_i : Daya aktif bus ke-i
- Q_i : Daya reaktif bus ke-i
- P_{gi} : Daya aktif generator pada bus ke-i
- Q_{gi} : Daya reaktif generator pada bus ke-i
- P_{di} : Daya aktif beban pada bus ke-i
- Q_{di} : Daya reaktif beban pada bus ke-i
- Y_{ij} : Admitansi saluran dari bus ke-i menuju bus ke-j
- G_{ij} : Konduktansi saluran dari bus ke-i menuju bus ke-j
- B_{ij} : Suseptansi saluran dari bus ke-i menuju bus ke-j
- V_i : Tegangan bus ke-i
- V_j : Tegangan bus ke-j
- θ_i : Sudut tegangan bus ke-i
- S_l : Aliran daya saluran
- δ_i : *Ramp rate* data ke- i

2.5.2. DC-SCOPF

Pada dasarnya, penggunaan *DC-SCOPF* hampir sama dengan penggunaan *AC-SCOPF*. Namun, pada sistem *DC*, variabel yang digunakan lebih sedikit. Pada sistem *DC*, nilai daya reaktif generator dan beban serta suseptansi saluran tidak diperhitungkan.

a. *Equality Constraint*

Pada perhitungan *DC*, rumus aliran daya yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$100[B_x]\theta = P_{gen} - P_{load} \quad [2.24]$$

Sehingga didapatkan fungsi Lagrangian sebagai berikut:

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} F_i(P_i) + \lambda^T (100[B_x]\theta - (P_{gen} - P_{load})) + \lambda_{N_{bus}+1} (\theta_{refbus} - 0) \quad [2.25]$$

dengan,

- B_x : Reaktansi saluran [nb, nb] (per unit)
- θ : Sudut tegangan [nb, 1] (radian)

$P_{gen} - P_{load}$: Daya aktif generator – beban (MW)
 MVA_{base} : 100 (MVA)

b. *Inequality Constraint*

Persamaan *inequality constraint* dalam persamaan Lagrangian *DC-SCOPF* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \sum_{i=1}^{N_{bus}} F_i(P_i) + \lambda^T (100[B_x]\theta - (P_{gen} - P_{load})) \\ & + \lambda_{N_{bus}+1} (\theta_{refbus} - 0) + \mu^T [g(P_{gen}, P_{gen}^{min}, P_{gen}^{min})] \end{aligned} \quad [2.26]$$

dengan,

$$\lambda^T = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \dots \quad \lambda_n] \quad [2.27]$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad [2.28]$$

$$[B_x] = \begin{bmatrix} B_{x11} & \dots & B_{x1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{xn1} & \dots & B_{xnn} \end{bmatrix} \quad [2.29]$$

$$(P_{gen} - P_{load}) = \begin{bmatrix} P_{gen_1} - P_{load_1} \\ \vdots \\ P_{gen_n} - P_{load_n} \end{bmatrix} \quad [2.30]$$

Sehingga fungsi Lagrangian dapat dijabarkan sebagai:

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad [2.31]$$

$$+ \lambda_1 (100B_{x11}\theta_1 + \dots + 100B_{x1n}\theta_n - P_{gen_1} + P_{load_1}) + \dots$$

$$+ \lambda_n (100B_{xn1}\theta_1 + \dots + 100B_{xnn}\theta_n - P_{gen_n} + P_{load_n})$$

Kemudian, dilanjutkan dengan perhitungan menggunakan penurunan atau diferensial dari fungsi Lagrangian di atas terhadap variabel independen dalam persamaan sehingga didapatkan persamaan baru sejumlah variabel independen yang telah didapatkan dari penurunan kemudian akan disusun dan diselesaikan dengan matriks sehingga didapatkan nilai optimal sistemnya. Variabel independen yang dimaksud antara lain:

1. P_l sampai P_n
2. Θ_l sampai Θ_n
3. λ_l sampai λ_{n+1} atau λ_l sampai λ_m

dengan,

n : jumlah indeks bus

m : jumlah *inequality constrained*.

2.6. Load Shedding atau Pelepasan Beban

Pelepasan beban merupakan salah satu cara pemeliharaan kestabilan sistem dengan melepaskan suatu saluran beban untuk memertahankan kondisi daya pembangkit agar selalu mencukupi kebutuhan daya beban sehingga suatu sistem tidak mengalami *blackout* atau pemadaman total [11]. Pelepasan beban ini hanya boleh dilakukan saat terjadi kontingensi dan dilakukan seminimal mungkin [5]. Dalam pengimplementasiannya pada *OPF*, maka akan ditambahkan variabel P_{demand} pada variabel kontrolnya. Kemudian dihitung nilai daya yang harus dilepas dengan rumus:

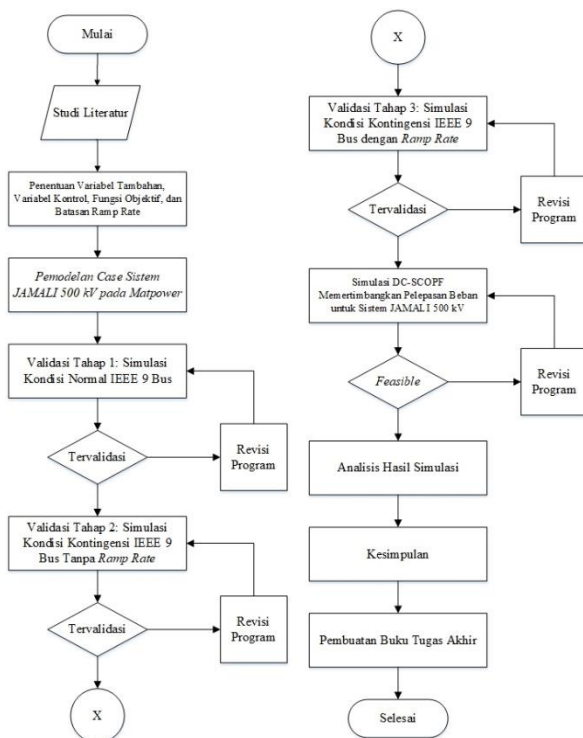
$$P_{shed} = P_{demand} - P_{load} \quad [2.32]$$

BAB 3

PENERAPAN QUADRATIC PROGRAMMING DALAM SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW UNTUK SISTEM KELISTRIKAN JAMALI 500 kV

3.1. Algoritma

Quadratic programming atau *QP* merupakan metode perhitungan yang digunakan pada program *Matpower* dalam menganalisis aliran daya sistem kelistrikan JAMALI 500 kV. Proses pengerjaan tugas akhir ini dilakukan sesuai dengan alur sebagai berikut:



Gambar 3.1. Proses Pengerjaan Tugas Akhir

Sebelum memulai pengerjaan tugas akhir ini, perlu dilakukan studi literatur untuk memahami dasar-dasar sistem kelistrikan, aliran daya dan aliran daya optimal, batasan keamanan pada aliran daya optimal, pelepasan beban, dan penggunaan metode *quadratic programming* pada *Matpower* untuk *DC-SCOPF*.

Kemudian dilakukan proses penentuan variabel masukan berupa data pembangkit, bus, dan saluran, variabel tambahan berupa penambahan variabel beban untuk perhitungan pelepasan bebannya, penentuan variabel kontrol, fungsi objektif untuk menentukan harga pembangkitan, serta batasan *ramp rate*-nya. Dilanjutkan dengan pengisian data sistem JAMALI 500 kV pada *case.m file* sesuai dengan data yang telah diperoleh.

Pada simulasi tahap pertama, akan dilakukan proses validasi program untuk sistem IEEE 9 Bus pada kondisi normal, kondisi kontingensi tanpa batasan *ramp rate*, dan kondisi kontingensi dengan batasan *ramp rate*. Apabila program dinyatakan tidak valid, maka akan dilakukan perbaikan program. Dan apabila program dinyatakan valid, maka akan dilanjutkan pada tahap kedua simulasi.

Pada simulasi tahap kedua, akan dijalankan program “*DC-SCOPF Memertimbangkan Pelepasan Beban*” untuk sistem JAMALI 500 kV. Apabila hasil dari simulasi tidak *feasible*, maka akan dilakukan perbaikan program. Apabila hasil dari simulasi *feasible*, maka tahap kedua simulasi telah selesai dan dapat dilanjutkan dengan pembuatan buku tugas akhir.

3.2. Penggunaan QP untuk Penyelesaian DC-SCOPF

3.2.1. Quadratic Programming

Quadratic programming merupakan sebuah metode perhitungan pada program *Matpower* yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi dengan fungsi objektif berupa persamaan kuadrat dan batasan batasan linear berupa *equality* maupun *inequality constrained* [13].

Persamaan umum metode *quadratic programming* adalah sebagai berikut:

$$F(x) = f + g^T x + \frac{1}{2} x^T H x \quad [3.1]$$

a. *Inequality Constraint*

Batasan untuk Ax:

$$lb \leq Ax \leq ub \quad [3.2]$$

Batasan untuk x:

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad [3.3]$$

b. *Equality Constraint*

$$lb = ub = Ax = b_{eq} \quad [3.4]$$

Perhitungan dengan metode *quadratic programming* ini pertama digunakan untuk menentukan nilai x sehingga kemudian dapat digunakan untuk perhitungan fungsi objektifnya.

3.2.2. Metode QP pada Matlab [14]

Pada *Matlab* telah dikembangkan *m-file* berisikan *quadratic programming* yang dinamakan *Matpower*. Dalam *Matpower* terdapat program *opf* baik untuk sistem *AC* maupun *DC*. Untuk sistem *DC*, terdapat fungsi *qps_matpower* yang merupakan pengembangan dari *quadratic programming*.

Untuk menjalankan fungsi ini perlu diketahui terlebih dahulu *argin* atau argumen masukan pada fungsi tersebut, yaitu:

1. **H** merupakan matriks dengan ukuran simetris yang digunakan untuk menyatakan bentuk kuadratik fungsi objektif. Ukuran awalnya adalah [$k^*(nb+ng+nloadbus)$, $k^*(nb+ng+nloadbus)$].
2. **c** merupakan suatu vektor yang menyatakan bentuk linier fungsi objektif dengan ukuran awal [$k^*(nb+ng+nloadbus)$, 1].
3. **A** merupakan matriks yang menyatakan koefisien linier untuk *equality* dan *inequality constraint* dengan ukuran [$k^*(nb+nl)$, $k^*(nb+ng)$].
4. **u** merupakan vektor yang menyatakan batas atas atau *upper bound* untuk persamaan *equality* dan *inequality constraint* dengan ukuran sama dengan **c**.

5. **I** merupakan vektor yang menyatakan batas bawah atau *lower bound* untuk persamaan *equality* dan *inequality constraint* dengan ukuran sama dengan **c**.

Kemudian perlu diketahui pula perintah yang digunakan untuk memanggil program dengan *argin* seperti di atas, yaitu sebagai berikut:

1. **x = qps_matpower(H, c, A, l, u)**
Perintah ini digunakan untuk meminimalkan vektor **x** terhadap *equality* dan *inequality constraint* dan dibatasi dengan *lower* dan *upper bound* ($l \leq A*x \leq u$) dengan **H** dan **c** merupakan fungsi objektif.
2. **x = qps_matpower(H, c, A, l, u, xmin, xmax)**
Perintah ini digunakan untuk meminimalkan vektor **x** terhadap *equality* dan *inequality constraint* dan dibatasi dengan *lower* dan *upper bound* ($l \leq A*x \leq u$). Nilai **x** juga dibatasi dengan **xmin** dan **xmax**, sedangkan **H** dan **c** merupakan fungsi objektif.
3. **x = qps_matpower(H, c, A, l, u, xmin, xmax, x0)**
Perintah ini digunakan untuk meminimalkan vektor **x** terhadap *equality* dan *inequality constraint* dengan inisiasi nilai awal **x0** untuk mempercepat proses pencarian dan dibatasi dengan *lower* dan *upper bound* ($l \leq A*x \leq u$). Nilai **x** juga dibatasi dengan **xmin** dan **xmax**, sedangkan **H** dan **c** merupakan fungsi objektif. Namun pada `qps_matpower`, **x0** dapat diabaikan.

Matpower yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *Matpower 6.0* pada *Matlab 2014a*. Versi *Matpower* yang berbeda akan memengaruhi *toolbox*, *m-file*, dan sintaksnya. *M-file* pada *Matpower 6.0* yang digunakan antara lain:

1. **Case File**
Merupakan sebuah *m-file* yang berisikan data plan sistem kelistrikan yang akan digunakan.
2. **Dcopf_solver**
Merupakan program yang digunakan untuk mengevaluasi *nonlinear constraint* dari persamaan dan pertidaksamaan,

membentuk matriks H dan c, serta menyelesaikan fungsi biaya sebagai fungsi objektif.

3. **Opf**

Merupakan program yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi kontingensi pada sistem dan merupakan perintah yang digunakan untuk menjalankan simulasi *opf* dari *case file*.

4. **Rundcopf**

Merupakan *m-file* yang digunakan untuk menjalankan semua rangkaian simulasi dan melakukan optimisasi dengan cara memanggil semua *m-file* yang berkaitan.

Sintaksis yang digunakan dalam *case file* antara lain:

1. **mpc** merupakan *case struct* dari *Matpower* dengan indeks untuk semua peralatan *in service*.
2. **mpc.baseMVA** merupakan nilai pembagi MVA dengan standar yang digunakan adalah 100.
3. **mpc.bus** berisi jenis bus, urutan bus, kebutuhan P, kebutuhan Q, shunt conductance, shunt susceptance, besar tegangan dan sudut tegangan. Untuk perhitungan *DC-OPF*, nilai Q akan diabaikan.
4. **mpc.gen** berisi data peletakan generator pada bus ke-n, nilai pembangkitan daya aktif dan reaktif (maksimal dan minimal), nilai tegangan, serta tambahan untuk *ramp rate*.
5. **mpc.branch** merupakan data tentang saluran, diantaranya from-to bus, nilai resistansi, reaktansi, susceptansi, rating saluran ketika kondisi long term, short term dan darurat, serta nilai sudut tegangan maksimal dan minimal. Untuk perhitungan *DC-OPF*, nilai susceptansi atau b akan diabaikan.
6. **mpc.area** berisi data penempatan.
7. **mpc.gencost** data berisi data tentang harga pembangkitan dari generator, yang dapat dimodelkan dalam *piecewise linear* dan *polynomial*, harga *start up* dan *shut down* generator dalam satuan USD.

Sintaksis yang digunakan dalam `dcopf_solver` antara lain:

1. **om** merupakan permodelan objek untuk program *Matpower*.
2. **om1** merupakan permodelan objek tambahan untuk program *Matpower*.
3. **mpopt** merupakan *option struct* untuk menimpa *option default* yang digunakan untuk menentukan algoritma solusi dari program.

Sintaksis yang digunakan dalam `rundcopf` antara lain:

1. **nargin** merupakan sintaksis yang digunakan untuk menentukan argumen masukan sejumlah *n*.
2. **fname** merupakan sebuah nama file hasil yang tercetak dalam *Matpower*.
3. **solvedcase** merupakan sebuah file yang akan disimpan dalam *case format Matpower* dengan ekstensi *.mat*.
4. **result** merupakan hasil *struct* yang berisi info dan et (waktu).
5. **success** merupakan informasi yang menunjukkan keberhasilan/ kegagalan program, bernilai 1 apabila berhasil dan 0 apabila gagal.

Seluruh program dan modifikasi *m-file* yang terkait harus diletakkan dalam satu *folder* guna menghindari kesalahan pembacaan *file*, kemudian *folder* di-set *add path* pada *Matlab*.

3.2.3. Penyelesaian DC-SCOPF Menggunakan QP [15]

Pada tugas akhir ini, akan ditambahkan analisis pelepasan beban ketika sistem tidak dapat memenuhi batasan kapasitas saluran saat salah satu salurannya putus (kontingensi) sehingga variabel beban akan ditambahkan pada matriks *x*, *A*, *H*, *c*, *l*, dan *u*. Persamaan yang digunakan untuk pelepasan beban adalah:

$$\sum_{i=1}^{N_L} k\Delta P_{Li}^t \quad [3.5]$$

Sehingga didapatkan fungsi objektif biaya pembangkitan dan pelepasan beban minimal sebagai berikut:

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (F(P_{Gi})) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_L} k \Delta P_{Li}^t \quad [3.6]$$

dengan,

T : Jumlah rentang waktu beban

N : Jumlah bus

P_L : Daya pada load bus (MW)

k : Konstanta biaya pelepasan beban

Batasan sistem yang perlu diperhatikan diantaranya:

a. *Equality Constraints*

Aliran Daya Seimbang

$$P_{Li}^t - P_{Gi}^t + P_{INi}^t = 0 \quad [3.7]$$

$$P_{INi}^t = \sum_{x_{ij}} \frac{1}{x_{ij}} [\theta_i - \theta_j] \quad [3.8]$$

dengan,

P_{IN} : Daya yang mengalir pada saluran dari bus i ke bus j

δ : Sudut tegangan

x : Reaktansi saluran

b. *Inequality Constraints*

Daya pembangkitan

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad [3.9]$$

Kapasitas saluran transmisi

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij} \quad [3.10]$$

Ramp rate

$$-\delta_i \leq P_{Gi}^{t+1} - P_{Gi}^t \leq \delta_i \quad [3.11]$$

dengan.

- P_{IN}^t : Daya yang mengalir pada saluran saat waktu ke- t
- P_{Gi}^t : Daya yang dibangkitkan pada bus i saat waktu ke- t
- δ_i : *Ramp rate* generator i
- P_{ij} : Daya mengalir pada bus i ke j
- $P_{Gi \text{ min}}$: Daya minimal generator i
- $P_{Gi \text{ max}}$: Daya maksimal generator i

3.2.3.1. Variabel Kontrol

Variabel yang dioptimasi disebut dengan variabel kontrol. Pada permasalahan *DC-SCOPF*, variabel kontrol berupa sudut tegangan, daya pembangkitan generator. Namun, dengan mempertimbangkan pelepasan beban maka akan ditambahkan variabel daya beban atau *Pload*. Sedangkan pada quadratic programming, variabel yang dikontrol adalah nilai x . Sehingga didapatkan persamaannya sebagai berikut:

$$x = \begin{bmatrix} \Theta_1^n \\ \vdots \\ \Theta_{nb}^n \\ P_{G1}^n \\ \vdots \\ P_{Gng}^n \\ P_{L1}^n \\ \vdots \\ P_{Lnlb}^n \\ \Theta_1^k \\ \vdots \\ \Theta_{nb}^k \\ P_{G1}^k \\ \vdots \\ P_{Gng}^k \\ P_{L1}^k \\ \vdots \\ P_{Lnlb}^k \end{bmatrix} \quad [3.11]$$

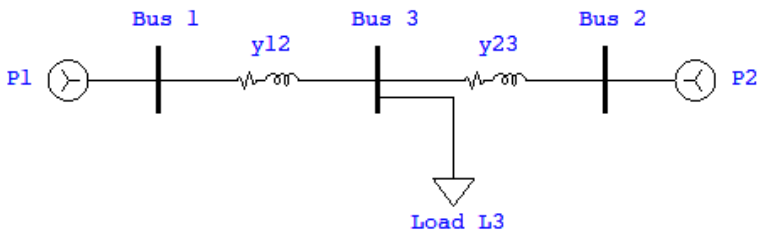
3.2.3.2. Pembentukan Matriks A

Koefisien A merupakan matriks yang tersusun dari *equality* dan *inequality constraint* yang berisi persamaan *power balance*, kapasitas saluran dan ramp rate. Susunannya diawali dengan *constraint* yang tidak dipengaruhi oleh perubahan waktu seperti *active power balance* dan kapasitas saluran dan dilanjutkan dengan *constraint* yang dipengaruhi oleh perubahan waktu seperti *ramp rate*.

Matriks A secara keseluruhan disusun sebagai berikut:

$$A = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \mathbf{NORMAL} \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline \mathbf{KONTINGENSI} \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline A_{eq}^1 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline A_{ineq\ branch}^1 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline Ramp\ Rate \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline A_{eq}^2 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline A_{ineq\ branch}^2 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline Ramp\ Rate \\ \hline \end{array} \end{array} \quad [3.12]$$

Contoh pembentukan matriks A menggunakan sistem tenaga listrik 3 bus:



Gambar 3.2. Sistem Tenaga Listrik 3 Bus

1. Pembentukan matriks A_{eq} (*Equality Constraint*)
Berdasarkan **Gambar 3.2**, persamaan aliran daya seimbangya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} 0 - P_{G1}^1 + (y_{11}\theta_1 - y_{13}\theta_3)^1 &= 0 \\ 0 - P_{G2}^1 + (y_{22}\theta_2 - y_{23}\theta_3)^1 &= 0 \\ P_{L3}^1 - 0 + (-y_{13}\theta_1 - y_{23}\theta_2 + y_{33}\theta_3)^1 &= 0 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan Matriks A_{eq} seperti:

$$A_{eq} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline y_{11} & 0 & -y_{13} & -1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & y_{22} & -y_{23} & 0 & -1 & 0 \\ \hline -y_{13} & -y_{23} & y_{33} & 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} \quad [3.13]$$

2. Pembentukan Matriks A_{ineq} (*Inequality Constraint*)
Persamaan *inequality constraint* dibentuk dari persamaan saluran sebagai berikut:

From bus to branch i

$$\begin{aligned} P_{to\ branch\ 1} &= y_{13}\theta_1 - y_{13}\theta_3 \\ P_{to\ branch\ 2} &= y_{23}\theta_2 - y_{23}\theta_3 \end{aligned}$$

To bus from branch i

$$\begin{aligned} P_{from\ branch\ 1} &= y_{13}\theta_3 - y_{13}\theta_1 \\ P_{from\ branch\ 2} &= y_{23}\theta_3 - y_{23}\theta_2 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan Matriks A_{ineq} seperti:

$$A_{ineq} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline y_{13} & 0 & -y_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & y_{23} & -y_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \hline -y_{13} & 0 & y_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -y_{23} & y_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \quad [3.14]$$

Sedangkan untuk persamaan *ramp rate*-nya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} -\delta_1 &\leq P_{G1}^2 - P_{G1}^1 \leq \delta_1 \\ -\delta_2 &\leq P_{G2}^2 - P_{G2}^1 \leq \delta_2 \end{aligned}$$

Persamaan RR kemudian dimasukkan ke dalam matriks bagian generator (baris ke-ng) pada jam ke-t dan ke-t+1. Sehingga didapatkan matriks sebagai berikut:

$$RR = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline \text{NORMAL} & & & & & & \text{KONTINGENSI} & & & & & \\ \hline \end{array} \quad [3.15]$$

3.2.3.3. Pembentukan Matriks l dan u

Vektor l dan u atau *lower bound* dan *upper bound* merupakan vektor batas atas dan batas bawah pada sistem dengan panjang baris sepanjang baris pada matriks A .

$$l = \begin{array}{|c|} \hline 0^n \\ \hline 0^n \\ \hline 0^n \\ \hline P_{13min}^n \\ \hline P_{23min}^n \\ \hline P_{31min}^n \\ \hline P_{32min}^n \\ \hline 0^k \\ \hline 0^k \\ \hline 0^k \\ \hline P_{13min}^k \\ \hline P_{23min}^k \\ \hline P_{31min}^k \\ \hline P_{32min}^k \\ \hline \delta_{1,nk} \\ \hline \delta_{2,nk} \\ \hline \end{array} \quad [3.16]$$

$$u = \begin{bmatrix} 0^n \\ 0^n \\ 0^n \\ P_{13\max}^n \\ P_{23\max}^n \\ P_{31\max}^n \\ P_{32\max}^n \\ 0^k \\ 0^k \\ 0^k \\ P_{13\max}^k \\ P_{23\max}^k \\ P_{31\max}^k \\ P_{32\max}^k \\ \delta_1^{nk} \\ \delta_2^{nk} \end{bmatrix} \quad [3.17]$$

3.2.3.4. Pembentukan Matriks H

Matriks H merupakan koefisien orde dua variabel kontrol dari fungsi objektif. Pada *DC-SCOPF* koefisien orde dua variabel kontrol yaitu koefisien a biaya pembangkitan, dan koefisien orde satu variabel kontrol yaitu berupa koefisien b biaya pembangkitan. Sehingga matriks H akan berisi koefisien a biaya pembangkitan tiap pembangkit.

Matriks H berukuran $[(nb+ng+nloadbus), (nb+ng+nloadbus)]$ atau $n \times n$ dengan n adalah jumlah variabel kontrol sehingga didapatkan Matriks H pada periode satu jam dalam dua kondisi sebagai berikut:

$$H = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & \text{NORMAL} & & & & & \text{KONTINGENSI} & & & & & & \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & a_1^n & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & a_2^n & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & a_1^k & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & a_2^k & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \end{array} \quad [3.18]$$

3.2.3.1. Pembentukan Matriks G

Matriks G merupakan koefisien orde satu variabel kontrol dari fungsi objektif, yaitu koefisien b dengan bentuk matriks:

$$G = \begin{array}{|c|} \hline 0^n \\ \hline 0^n \\ \hline 0^n \\ \hline b_1^n \\ \hline b_2^n \\ \hline -1^n \\ \hline 0^k \\ \hline 0^k \\ \hline 0^k \\ \hline b_1^k \\ \hline b_2^k \\ \hline -1^k \\ \hline \end{array} \quad [3.19]$$

Nilai -1 pada matriks G merupakan koefisien biaya pelepasan beban.

3.2.3.2. Pembentukan Vektor x_{min} dan x_{max}

Vektor x_{min} dan x_{max} merupakan batas atas dan batas bawah dari variabel kontrol. Pada *DC-SCOPF*, variabel kontrol berupa sudut tegangan, daya terbangkit generator, dan daya pada load bus sebagai variabel tambahan dengan nilai sebagai batasan untuk nilai x .

$$\begin{array}{|c|} \hline \Theta_1^n \text{ min} \\ \hline \Theta_2^n \text{ min} \\ \hline \Theta_3^n \text{ min} \\ \hline P_{G1}^n \text{ min} \\ \hline P_{G2}^n \text{ min} \\ \hline P_{L1}^n \text{ min} \\ \hline \Theta_1^k \text{ min} \\ \hline \Theta_2^k \text{ min} \\ \hline \Theta_3^k \text{ min} \\ \hline P_{G1}^k \text{ min} \\ \hline P_{G2}^k \text{ min} \\ \hline P_{L1}^k \text{ min} \\ \hline \end{array} \leq \begin{array}{|c|} \hline \Theta_1^n \\ \hline \Theta_2^n \\ \hline \Theta_3^n \\ \hline P_{G1}^n \\ \hline P_{G2}^n \\ \hline P_{L1}^n \\ \hline \Theta_1^k \\ \hline \Theta_2^k \\ \hline \Theta_3^k \\ \hline P_{G1}^k \\ \hline P_{G2}^k \\ \hline P_{L1}^k \\ \hline \end{array} \leq \begin{array}{|c|} \hline \Theta_1^n \text{ max} \\ \hline \Theta_2^n \text{ max} \\ \hline \Theta_3^n \text{ max} \\ \hline P_{G1}^n \text{ max} \\ \hline P_{G2}^n \text{ max} \\ \hline P_{L1}^n \text{ max} \\ \hline \Theta_1^k \text{ max} \\ \hline \Theta_2^k \text{ max} \\ \hline \Theta_3^k \text{ max} \\ \hline P_{G1}^k \text{ max} \\ \hline P_{G2}^k \text{ max} \\ \hline P_{L1}^k \text{ max} \\ \hline \end{array} \quad [3.20]$$

3.2.3.3. Pembentukan Vektor x_0

Vektor x_0 merupakan nilai awal untuk vektor x sehingga disebut dengan *initial point*. Untuk sistem perhitungan *DC*, vektor x_0 ini boleh diabaikan. Susunan vektor x_0 adalah sebagai berikut dengan jumlah baris sesuai dengan jumlah variabel kontrolnya:

$$x_0 = \begin{array}{|c|} \hline \Theta_1^n \\ \hline \Theta_2^n \\ \hline \Theta_3^n \\ \hline P_{G1}^n \\ \hline P_{G2}^n \\ \hline P_{L1}^n \\ \hline \Theta_1^k \\ \hline \Theta_2^k \\ \hline \Theta_3^k \\ \hline P_{G1}^k \\ \hline P_{G2}^k \\ \hline P_{L1}^k \\ \hline \end{array} \quad [3.21]$$

BAB 4

VALIDASI, SIMULASI, DAN ANALISIS

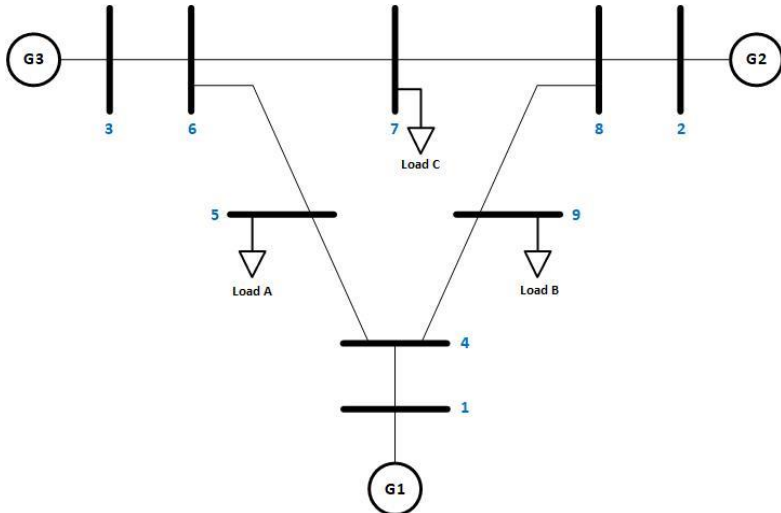
4.1. Validasi Sistem Kelistrikan IEEE 9 Bus

Untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan dasar teori, maka perlu dilakukan validasi pada program “Analisis Aliran Daya dengan Batas Keamanan Memertimbangkan Pelepasan Beban” atau “*DC-SCOPF* Memertimbangkan Pelepasan Beban”

Dalam proses validasi ini akan dilakukan secara bertahap yaitu sebagai berikut:

1. Validasi Tahap Pertama: Kondisi Normal Tanpa Batasan *Ramp Rate*.
2. Validasi Tahap Kedua: Menambahkan Kondisi Kontingensi Tanpa Batasan *Ramp Rate*.
3. Validasi Tahap Ketiga: Menambahkan Kondisi Kontingensi dengan Batasan *Ramp Rate*.

Data yang digunakan untuk melakukan validasi antara lain data pembangkit beserta *generator cost*-nya, bus beserta beban, dan saluran.



Gambar 4.1. Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus

Tabel 4.1. Data Modifikasi Generator Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus

No. Gen	Generator Cost Function	P Maks (MW)	P Min (MW)	Ramp Rate
1	$0.11P_1^2 + 5P_1 + 150$	270	10	10
2	$0.085P_2^2 + 1.2P_2 + 600$	320	10	10
3	$0.1225P_3^2 + P_3 + 335$	290	10	10

Tabel 4.2. Data Modifikasi Bus Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus

No. Bus	Type Bus	P Demand (MW)	Q Demand (MVAR)	Base Voltage (kV)
1	Reference Bus	0	0	70
2	PV Bus	0	0	70
3	PV Bus	0	0	70
4	PQ Bus	0	0	70
5	PQ Bus	90	30	70
6	PQ Bus	0	0	70
7	PQ Bus	100	35	70
8	PQ Bus	0	0	70
9	PQ Bus	125	50	70

Tabel 4.3. Data Modifikasi Saluran Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus

No. Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MW)
1	1	4	0,0576	110
2	4	5	0,0920	40
3	5	6	0,1700	60
4	3	6	0,0586	115
5	6	7	0,1008	60
6	7	8	0,0720	50
7	8	2	0,0625	100
8	8	9	0,1610	60
9	9	4	0,0850	75

4.1.1. Validasi Tahap Pertama

Pada tahap ini, validasi dilakukan dengan menjalankan program saat kondisi normal pada jam ke- t dan jam ke- $t+1$. Program diharapkan dapat menghasilkan variabel keluaran dengan nilai yang sama pada jam ke- t dan jam ke- $t+1$. Dengan demikian dapat dipastikan bahwa tidak ada variabel selain batasan *ramp rate* yang memengaruhi program ini. Validasi ini dilakukan dengan data beban seperti pada **Tabel 4.2**.

4.1.1.1. Simulasi Validasi Tahap Pertama

Hasil simulasi validasi tahap pertama menunjukkan nilai variabel keluaran berupa sudut tegangan (Θ), daya aktif generator (P_G), dan daya aktif beban (P_L) saat kondisi normal pada jam ke- t dan jam ke- $t+1$.

Tabel 4.4. Variabel Keluaran Hasil Simulasi Validasi Tahap Pertama

Variabel Keluaran	Jam ke- t	Jam ke- $t+1$
Θ_1	0,00000	0,00000
Θ_2	0,03489	0,03489
Θ_3	0,06263	0,06263
Θ_4	-0,06029	-0,06029
Θ_5	-0,09356	-0,09356
Θ_6	-0,00202	-0,00202
Θ_7	-0,05895	-0,05895
Θ_8	-0,02761	-0,02761
Θ_9	-0,11854	-0,11854
P_{G1}	1,04677	1,04677
P_{G2}	1,00000	1,00000
P_{G3}	1,10323	1,10323
P_{L1}	0,90000	0,90000
P_{L2}	1,00000	1,00000
P_{L3}	1,25000	1,25000
Total Daya Terbangkitkan (MW)	315	315
Total Biaya Pembangkitan (\$/jam)	5385	5385
Pelepasan Beban (MW)	0	0

4.1.1.2. Analisis Validasi Tahap Pertama

Berdasarkan hasil simulasi validasi tahap pertama, variabel keluaran saat kondisi normal pada jam ke-t dan jam ke-t+1 memiliki nilai yang sama untuk masing-masing variabel, total daya dan biaya pembangkitan, serta daya pelepasan bebannya. Besarnya daya pelepasan beban pada kondisi normal adalah nol. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa program ini dapat digunakan untuk memodelkan kondisi kontingensi dan penambahan batasan *ramp rate*.

4.1.2. Validasi Tahap Kedua

Pada tahap ini, validasi dilakukan dengan penambahan kondisi kontingensi pada jam ke-t dengan menganalisis terjadinya kontingensi pada tiap saluran. Berdasarkan hasil *screening* kontingensi tiap saluran, akan didapatkan tabel urutan dari saluran yang memiliki dampak kontingensi terbesar hingga terkecil. Dampak kontingensi terhadap sistem dapat dilihat dari besarnya biaya total pembangkitan, semakin besar biaya total pembangkitannya maka saluran tersebut memiliki peran yang paling penting dalam sistem.

4.1.2.1. Simulasi Validasi Tahap Kedua

Berikut adalah hasil *screening* kontingensi pada tiap saluran sistem tenaga listrik IEEE 9 bus.

Tabel 4.5. *Screening* Kontingensi Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus

No	Line	From Bus	To Bus	Biaya Pelepasan Beban (\$)	Biaya Pembangkitan (\$)	Biaya Pembebanan (\$)	Objective Function (\$)
1.	3	5	6	1.770	8.143	-61.230	-53.087
2.	9	9	4	1.789	8.117	-61.211	-53.094
3.	8	5	6	1.157	8.400	-61.843	-53.442
4.	5	6	7	355	8.502	-62.645	-54.143
5.	6	7	8	234	8.535	-62.766	-54.231
6.	1	1	4	0	8.600	-63.000	-54.400
7.	2	4	5	0	8.600	-63.000	-54.400
8.	4	3	6	0	8.600	-63.000	-54.400
9.	7	8	2	0	8.600	-63.000	-54.400

4.1.2.2. Analisis Validasi Tahap Kedua

Berdasarkan **Tabel 4.5**, saluran nomor tiga mendapatkan dampak terbesar ketika terjadi kontingensi. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *objective function* yang paling besar terjadi pada saluran tersebut yaitu \$ -53.087. Nilai *objective function* ini dipengaruhi oleh dua variabel keluaran yaitu total biaya pembangkitan dan pembebanan. Hasil dari *screening* kontingensi ini menunjukkan bahwa program ini dapat menjalankan kondisi kontingensi dan selanjutnya dapat digunakan untuk memodelkan dengan penambahan batasan *ramp rate*.

4.1.3. Validasi Tahap Ketiga

Pada tahap ini, dilanjutkan dengan penambahan batasan *ramp rate*. Pada validasi tahap ketiga, akan dilihat pengaruh batasan *ramp rate* pada sistem, besar daya dan biaya pelepasan beban, besar daya dan total biaya pembangkitan, dan nilai *objective function*.

4.1.3.1. Simulasi Tahap Ketiga

Simulasi pada tahap ini menggunakan data pengaruh kontingensi terbesar, yaitu kontingensi pada saluran tiga.

Tabel 4.6. Selisih Pembangkitan Kondisi Normal dan Kontingensi Tanpa Batasan *Ramp Rate*

Generator	Unit 1	Unit 2	Unit 3
Normal (MW)	104,67	100	110,32
Kontingensi (MW)	105,00	100	92,30
Selisih	-0,33	0	18,02

Tabel 4.7. Selisih Pembangkitan Kondisi Normal dan Kontingensi dengan Batasan *Ramp Rate*

Generator	Unit 1	Unit 2	Unit 3
Normal (MW)	110	100	102,3
Kontingensi (MW)	105	100	92,3
Selisih	5	0	10
<i>Ramp Rate</i>	10	10	10

Tabel 4.8. Besar Daya dan Biaya Pelepasan Beban dan Saat Kondisi Normal dan Kontingensi Tanpa dan dengan Batasan *Ramp Rate*

No.	<i>Ramp Rate</i>	Daya Pelepasan Beban (MW)		Biaya Pelepasan Beban (\$)
		Normal	Kontingensi	
1	Tidak Aktif	0	17,69	1.769
2	Aktif	2,69	17,69	2.039

Tabel 4.9. Besar Daya dan Biaya Pembangkitan dan Saat Kondisi Normal dan Kontingensi Tanpa dan dengan Batasan *Ramp Rate*

No.	<i>Ramp Rate</i>	Daya Pembangkitan (MW)		Biaya Pembangkitan (\$)	
		Normal	Kontingensi	Normal	Kontingensi
1	Tidak Aktif	315,00	297,30	4.300	3.844
2	Aktif	312,30	297,30	4.235	3.844

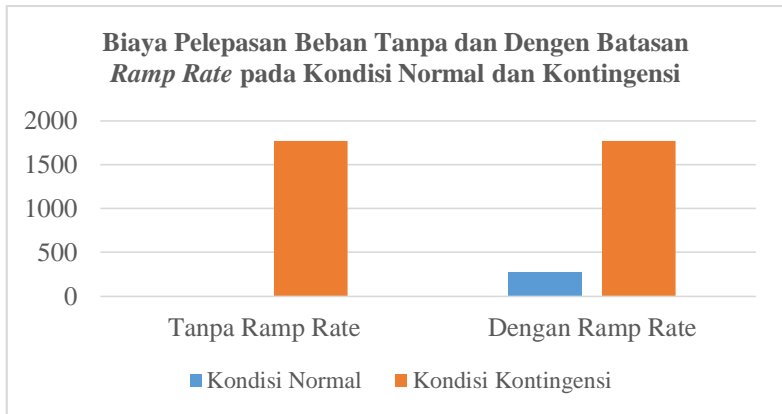
Tabel 4.10. Biaya Total Pembangkitan, Pelepasan Beban, dan *Objective Function* Saat Kondisi Normal dan Kontingensi Tanpa dan dengan Batasan *Ramp Rate*

No.	<i>Ramp Rate</i>	Total Biaya Pembangkitan (\$)	Total Biaya Pelepasan Beban (\$)	Total Biaya Pembebanan (\$)	<i>Objective Function</i> (\$)
1	Tidak Aktif	8.144	1.769	-61.230	-53.087
2	Aktif	8.079	2.039	-60.961	-52.881

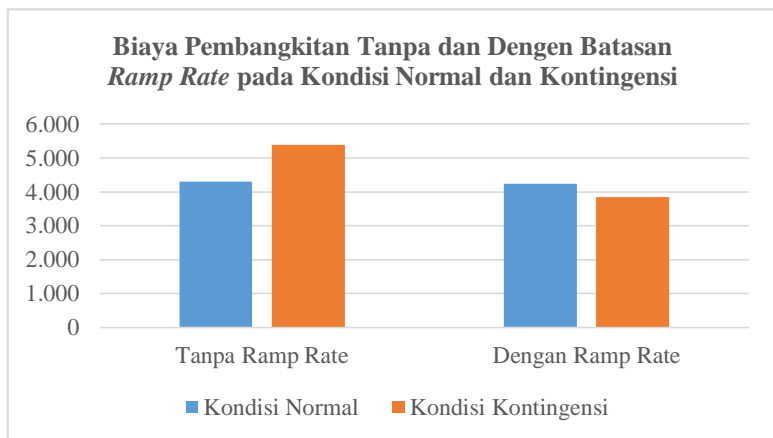
4.1.3.2. Analisis Tahap Ketiga

Hasil simulasi validasi tahap ketiga pada **Tabel 4.6** dan **Tabel 4.7** menunjukkan bahwa ketika sistem diberi batasan *ramp rate*, tidak terjadi pelanggaran batasan *ramp rate* saat kondisi normal beralih ke kondisi kontingensi. Besar pelepasan beban sesuai dengan data pembangkitan pada **Tabel 4.9**. Peningkatan daya pelepasan beban dan

penurunan pembangkitan saat sistem diberi batasan *ramp rate* pada kondisi normal dan kontingensi seiring adanya peningkatan biaya pelepasan beban dan penurunan biaya pembangkitan, digambarkan pada **Gambar 4.2** dan **Gambar 4.3**.



Gambar 4.2. Biaya Pelepasan Beban Tanpa dan Dengan Batasan *Ramp Rate* pada Kondisi Normal dan Kontingensi



Gambar 4.3. Biaya Pembangkitan Tanpa dan Dengan Batasan *Ramp Rate* pada Kondisi Normal dan Kontingensi

Nilai *objective function* akibat terjadinya kontingensi pada saluran tiga pada kondisi normal dan kontingensi tanpa dan dengan batasan *ramp rate* adalah sesuai dengan. Batasan *ramp rate* mengakibatkan sistem pembangkitan bekerja lebih ketat sehingga biaya pembangkitan lebih rendah. Hasil simulasi tahap ini juga menunjukkan bahwa pada saat terjadi kontingensi nilai *objective function* akan cenderung lebih mahal. Hal ini dikarenakan, saat terjadi kontingensi, sisi keamanan sistem lebih diprioritaskan dari pada sisi ekonominya.

4.1.4. Kesimpulan

Dari hasil validasi ketiga tahap ini, dapat disimpulkan bahwa program ini mampu melakukan perhitungan *DC-SCOPF* mempertimbangkan pelepasan beban.

4.2. Simulasi Program untuk Sistem JAMALI 500 kV

4.2.1. Data Plan JAMALI 500 kV

Sistem kelistrikan yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah Sistem Kelistrikan JAMALI (Jawa-Madura-Bali) 500 kV. Sistem kelistrikan ini disuplai oleh 35 pembangkit pada 7 wilayah yang terdiri dari PLTA, PLTU, dan PLTG, memiliki 25 bus dengan tegangan 500 kV, 30 saluran transmisi, dan terhubung dengan 22 beban. *Single line diagram* sistem kelistrikan JAMALI 500 kV digambarkan pada (**Gambar 4.4**)

4.2.1.1. Data Generator JAMALI 500 kV

Sistem kelistrikan JAMALI 500 kV memiliki 35 pembangkit yang terdiri dari 8 PLTU di Suralaya, 1 pembangkit di Muara Tawar, 7 PLTA di Cirata, 4 PLTA di Saguling, 1 PLTU di Tanjung Jati, 7 pembangkit di Gresik, 6 pembangkit di Paiton, dan 1 pembangkit di Grati dengan total pembangkitan seluruh pembangkit mencapai 12.215 MW. Daya reaktif pada tugas akhir ini diabaikan karena menggunakan perhitungan *DC-SCOPF*. Data pembangkit akan dijabarkan pada **Tabel 4.11** dan **Tabel 4.12**.

Tabel 4.11. Data Modifikasi Pembangkit JAMALI 500 kV

No Gen	Kapasitas (MW)	Jenis Gen	GI	Kapasitas (MW)	Kapasitas Maksimal (MW)
1	200,0	PLTU	Suralaya	1891	373
2	200,0	PLTU			373
3	200,0	PLTU			373
4	200,0	PLTU			373
5	301,0	PLTU			585
6	301,0	PLTU			585
7	301,0	PLTU			585
8	188,0	PLTU			625
9	440,0	PLTU	Muara Tawar	440	615
10	0,0	PLTA	Cirata	0	110
11	0,0	PLTA			110
12	0,0	PLTA			110
13	0,0	PLTA			110
14	0,0	PLTA			110
15	0,0	PLTA			110
16	0,0	PLTA			110
17	134,6	PLTA	Saguling	538,4	175
18	134,6	PLTA			175
19	134,6	PLTA			175
20	134,6	PLTA			175
21	408,0	PLTU	Tanjung Jati	408	668
22	80,0	PLTU	Gresik	760	480
23	80,0	PLTU			480
24	80,0	PLTU			480
25	80,0	PLTU			80
26	80,0	PLTU			80
27	180,0	PLTA			180
28	180,0	PLTU			180

(Lanjutan **Tabel 4.11.** Data Modifikasi Pembangkit JAMALI 500 kV)

No Gen	Kapasitas (MW)	Jenis Gen	GI	Kapasitas (MW)	Kapasitas Maksimal (MW)
29	225,0	PLTU	Paiton	1965,6	370
30	225,0	PLTU			370
31	358,5	PLTU			605
32	358,5	PLTU			605
33	399,3	PLTA			615
34	399,3	PLTA			615
35	180,0	PLTU	Grati	180,0	450

Tabel 4.12. Data *Ramp Rate* Pembangkit 500 kV

No. Gen	Bus	<i>Ramp Rate</i>
1	Suralaya	24,00
2		24,00
3		24,00
4		24,00
5		36,12
6		36,12
7		36,12
8		22,56
9	Muara Tawar	52,80
10	Cirata	100,00
11		100,00
12		100,00
13		100,00
14		100,00
15		100,00
16		100,00

(Lanjutan **Tabel 4.12.** Data *Ramp Rate* Pembangkit 500 kV)

No. Gen	Bus	<i>Ramp Rate</i>
17	Saguling	
18		134,60
19		134,60
20		134,60
21	Tanjung Jati	48,960
22	Gresik	9,60
23		9,60
24		9,60
25		9,60
26		9,60
27		180,00
28		180,00
29		Paiton
30	27,00	
31	43,02	
32	43,02	
33	399,30	
34	399,30	
35	Grati	21,60

4.2.1.2. *Data Bus JAMALI 500 kV*

Sistem kelistrikan JAMALI 500 kV memiliki 25 bus dengan *rating* tegangan 500 kV yang terhubung dengan 22 beban dengan total beban 9.493 MW. Pada perhitungan *DC-OPF*, daya reaktif beban diabaikan. Batas tegangan maksimal pada tiap-tiap bus adalah 1,1 p.u sedangkan batas tegangan minimal pada tiap-tiap bus adalah 0,9 p.u. Data bus JAMALI 500 kV akan dijabarkan pada **Tabel 4.13.**

Tabel 4.13. Data Modifikasi Bus JAMALI 500 kV

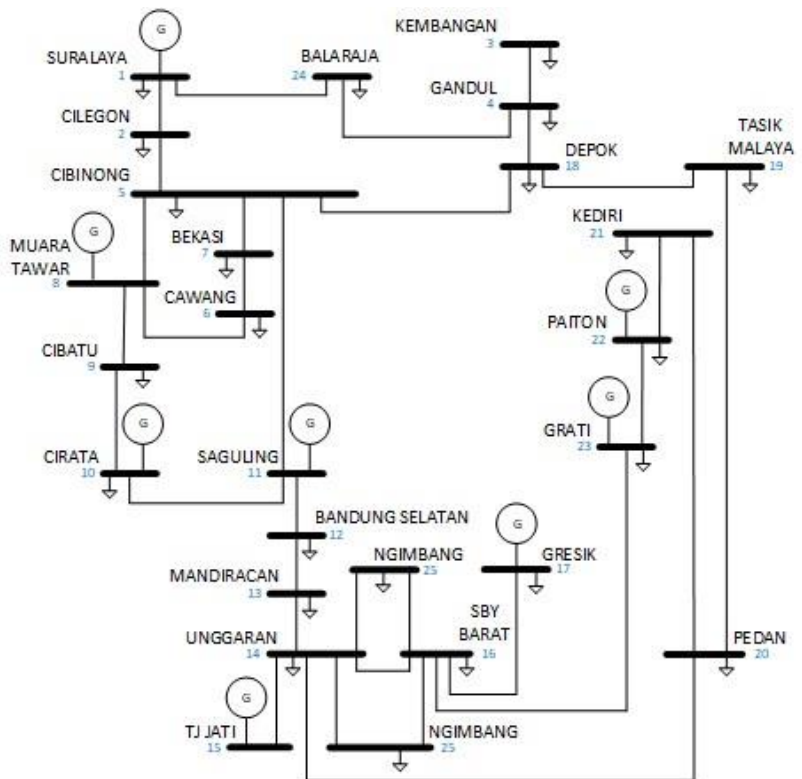
No Bus	Letak Bus	Tipe Bus	Daya Beban (MW)
1	Suralaya	<i>Slack Bus</i>	220
2	Cilegon	<i>Load Bus</i>	186
3	Kembangan	<i>Load Bus</i>	254
4	Gandul	<i>Load Bus</i>	447
5	Cibinong	<i>Load Bus</i>	680
6	Cawang	<i>Load Bus</i>	566
7	Bekasi	<i>Load Bus</i>	621
8	Muara Tawar	<i>Gen Bus</i>	0
9	Cibatu	<i>Load Bus</i>	994
10	Cirata	<i>Gen Bus</i>	550
11	Saguling	<i>Gen Bus</i>	0
12	Bandung Selatan	<i>Load Bus</i>	666
13	Mandiracan	<i>Load Bus</i>	293
14	Ungaran	<i>Load Bus</i>	494
15	Tanjung Jati	<i>Gen Bus</i>	0
16	Surabaya Barat	<i>Load Bus</i>	440
17	Gresik	<i>Gen Bus</i>	123
18	Depok	<i>Load Bus</i>	327
19	Tasik Malaya	<i>Load Bus</i>	213
20	Pedan	<i>Load Bus</i>	530
21	Kediri	<i>Load Bus</i>	551
22	Paiton	<i>Gen Bus</i>	267
23	Grati	<i>Gen Bus</i>	111
24	Balaraja	<i>Load Bus</i>	681
25	Ngimbang	<i>Load Bus</i>	279

4.2.1.3. Data Saluran JAMALI 500 kV

Sistem kelistrikan JAMALI 500 kV memiliki 30 saluran transmisi *double circuit* yang akan dijabarkan pada **Tabel 4.14**.

Tabel 4.14. Data Modifikasi Saluran JAMALI 500 kV

No Saluran	From Bus	To Bus	Circuit	r (p.u.)	x (p.u.)	Rate A
1	1	2	Double	0,000626496	0,007008768	800
2	1	24	Double	0,003677677	0,035333317	1200
3	2	5	Single	0,013133324	0,146925792	800
4	3	4	Double	0,001513179	0,016928308	1000
5	4	18	Double	0,000694176	0,006669298	600
6	5	7	Single	0,004441880	0,042675400	700
7	5	8	Double	0,006211600	0,059678000	50
8	5	11	Double	0,004111380	0,045995040	800
9	6	7	Single	0,001973648	0,018961840	40
10	6	8	Single	0,005625600	0,054048000	600
11	8	9	Double	0,002822059	0,027112954	70
12	9	10	Double	0,002739960	0,026324191	980
13	10	11	Double	0,001474728	0,014168458	750
14	11	12	Double	0,001957800	0,021902400	800
15	12	13	Single	0,006990980	0,067165900	1500
16	13	14	Double	0,013478000	0,129490000	1800
17	14	15	Double	0,013533920	0,151407360	680
18	14	16	Single	0,015798560	0,151784800	1400
19	14	20	Single	0,009036120	0,086814600	500
20	16	17	Double	0,001394680	0,013399400	1850
21	16	23	Double	0,003986382	0,044596656	4800
22	18	5	Double	0,000818994	0,007868488	1000
23	18	19	Double	0,014056000	0,157248000	2100
24	19	20	Single	0,015311000	0,171288000	4800
25	20	21	Double	0,010291000	0,115128000	2500
26	21	22	Double	0,010291000	0,115128000	3700
27	22	23	Double	0,004435823	0,049624661	2200
28	24	4	Double	0,002979224	0,028622920	1000
29	25	14	Single	0,023479613	0,225580588	1500
30	25	16	Single	0,005966652	0,057324466	1980



Gambar 4.4. *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan JAMALI 500 kV

4.3. Program DC-SCOPF Memertimbangkan Pelepasan Beban untuk Sistem JAMALI 500 kV

Simulasi untuk sistem tenaga listrik JAMALI 500 kV menggunakan program “DC-SCOPF Memertimbangkan Pelepasan Beban” dilakukan berdasarkan data masukan generator pada **Tabel 4.11** dan **Tabel 4.11**, bus pada **Tabel 4.12**, dan saluran pada **Tabel 4.13**. Simulasi pertama dilakukan dengan melakukan *screening* kontingensi untuk mengetahui letak saluran yang memiliki dampak terbesar untuk sistem JAMALI 500 kV. Kemudian, pada simulasi kedua dilakukan simulasi untuk kondisi normal dan kontingensi tanpa dan dengan batasan *ramp rate* untuk mengetahui biaya pembangkitan dan pelepasan beban terbaik. Simulasi kedua ini merupakan simulasi pengaplikasian program “DC-SCOPF Memertimbangkan Pelepasan Beban” untuk sistem kelistrikan JAMALI 500 kV.

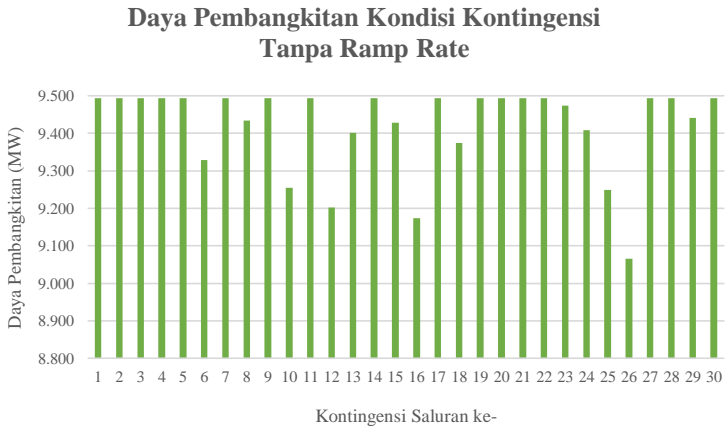
4.3.1. Screening Kontingensi Sistem JAMALI 500 kV

Screening kontingensi dilakukan untuk mengetahui letak saluran yang memiliki dampak terbesar bagi sistem kelistrikan JAMALI 500 kV. Kontingensi dalam tugas akhir ini terjadi karena putusya salah satu saluran pada saluran yang menggunakan *double circuit*.

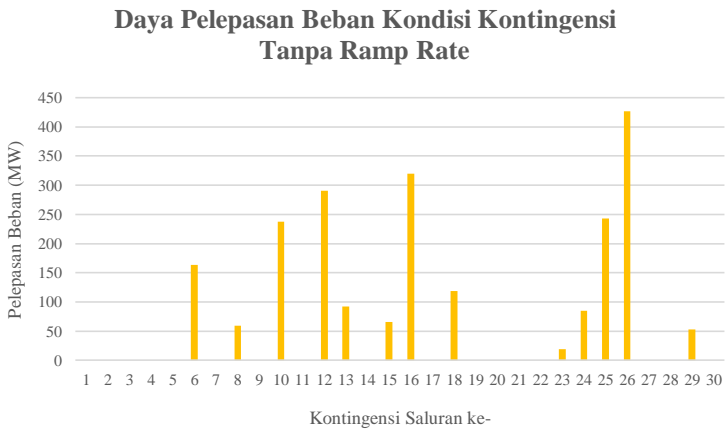
Ketika suatu saluran mengalami kontingensi maka beban akan kehilangan suplai daya, sehingga ketika nilai pembangkitannya menurun maka harus dilakukan mekanisme pelepasan daya untuk menjaga kestabilan tegangan sistem. Saluran yang memiliki dampak paling besar untuk sebuah sistem merupakan saluran yang ketika mengalami kontingensi akan melepaskan daya terbesar. Berdasarkan **Tabel 4.15**, saluran 26, yaitu saluran dari bus Kediri ke bus Paiton, merupakan saluran dengan dampak kontingensi terbesar pada sistem JAMALI 500 kV.

Tabel 4.15. *Screening* Kontingensi Sistem JAMALI 500 kV

Saluran	Pembangkitan Kondisi Normal (MW)	Pembangkitan Kondisi Kontingensi (MW)	Pelepasan Beban (MW)
26	9.493	9.066	426,92
16	9.493	9.173	319,36
12	9.493	9.202	290,19
25	9.493	9.249	243,25
10	9.493	9.255	237,85
6	9.493	9.329	163,20
18	9.493	9.374	118,85
13	9.493	9.401	92,22
24	9.493	9.408	85,01
15	9.493	9.428	65,37
8	9.493	9.434	59,01
29	9.493	9.441	52,39
23	9.493	9.474	19,15
30	9.493	9.493	0
14	9.493	9.493	0
19	9.493	9.493	0
1	9.493	9.493	0
2	9.493	9.493	0
3	9.493	9.493	0
4	9.493	9.493	0
5	9.493	9.493	0
7	9.493	9.493	0
9	9.493	9.493	0
11	9.493	9.493	0
17	9.493	9.493	0
20	9.493	9.493	0
21	9.493	9.493	0
22	9.493	9.493	0
27	9.493	9.493	0
28	9.493	9.493	0



Gambar 4.5. Daya Pembangkitan Sistem JAMALI 500 kV Tanpa Ramp Rate Kondisi Kontingensi



Gambar 4.6. Daya Pelepasan Beban Sistem JAMALI 500 kV Tanpa Ramp Rate Kondisi Kontingensi

4.3.2. Simulasi Program DC-SCOPF Memertimbangkan Pelepasan Beban untuk Sistem JAMALI 500 kV

Pada tahap ini, simulasi dilakukan pada kondisi normal dan kontingensi tanpa dan dengan batasan *ramp rate* untuk mengetahui pengaruh batasan *ramp rate* terhadap daya dan biaya pelepasan beban, serta daya dan biaya pembangkitan.

4.3.2.1. Simulasi Tanpa Batasan Ramp Rate

Pada tahap ini, akan dianalisis besarnya aliran daya optimal sistem JAMALI 500 kV pada saat kondisi normal maupun kontingensi pada saluran 26 (Kediri - Paiton) tanpa batasan *ramp rate*.

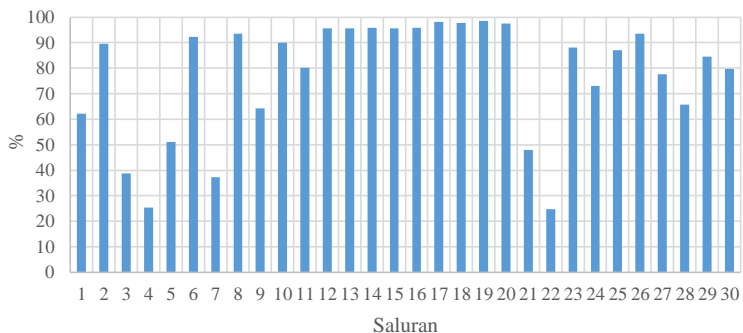
Tabel 4.16. Aliran Daya Optimal Tanpa *Ramp Rate*

Saluran	Aliran Daya (MW)		Kapasitas Saluran (MVA)	
	Normal	Kontingensi	Normal	Kontingensi
1	496,95	556,81	800	800
2	1075,05	1200,00	1200	1200
3	310,95	370,81	800	800
4	-254,00	-254,00	1000	1000
5	-306,95	-182,00	600	600
6	646,73	661,00	700	700
7	-18,65	9,01	50	50
8	-749,08	-681,47	800	800
9	-25,73	-40,00	40	40
10	-540,27	-526,00	600	600
11	56,08	70,00	70	70
12	-937,92	-911,20	980	980
13	-717,92	-691,20	750	750
14	-766,99	-672,67	800	800
15	-1432,99	-1338,67	1500	1500
16	-1725,99	-1631,67	1800	1800
17	-668,00	-531,07	680	680
18	-1367,67	-1400,00	1400	1400
19	492,93	500,00	500	500

(Lanjutan **Tabel 4.16.** Aliran Daya Optimal Tanpa *Ramp Rate*)

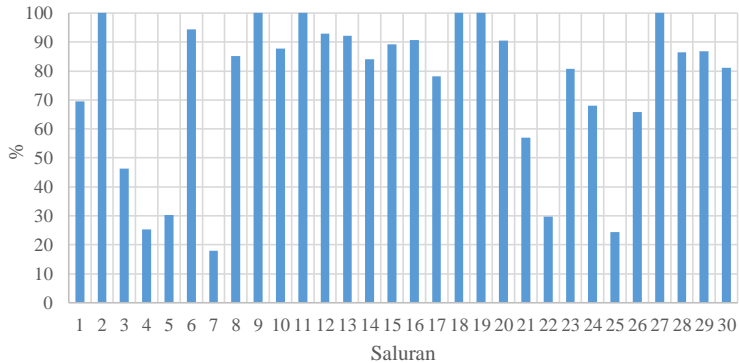
Saluran	Aliran Daya (MW)		Kapasitas Saluran (MVA)	
	Normal	Kontingensi	Normal	Kontingensi
20	-1803,00	-1674,60	1850	1850
21	-960,93	-1139,00	2000	2000
22	248,06	297,73	1000	1000
23	-882,01	-806,73	1000	1000
24	-1095,01	-1019,73	1500	1500
25	-1132,07	-317,81	1300	1300
26	-1683,07	-1186,61	2400	1200
27	621,93	800,00	800	800
28	394,05	519,00	600	600
29	677,25	694,60	800	800
30	-956,25	-973,60	1200	1200

Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV
Kondisi Normal Tanpa *Ramp Rate*



Gambar 4.7. Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV Kondisi Normal Tanpa *Ramp Rate*

**Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV
Kondisi Kontingensi Tanpa Ramp Rate**



Gambar 4.8. Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV Kondisi Kontingensi Tanpa Ramp Rate

Berdasarkan **Tabel 4.16**, daya yang mengalir pada tiap saluran masih dalam batas keamanan kapasitas saluran dengan daya yang mengalir seperti pada **Gambar 4.7** dan **Gambar 4.8**.

Sesuai dengan hasil *screening* kontingensi pada **Tabel 4.15**, nilai pelepasan beban saat kondisi kontingensi pada saluran 26 (Paiton – Kediri) memiliki nilai tertinggi seperti pada **Gambar 4.6**, dengan total sebesar 426,92 MW. Sedangkan pada kondisi normal, sistem tidak melaksanakan mekanisme pelepasan beban karena pembangkit masih mampu menyuplai kebutuhan beban.

4.3.2.2. Simulasi dengan Batasan Ramp Rate

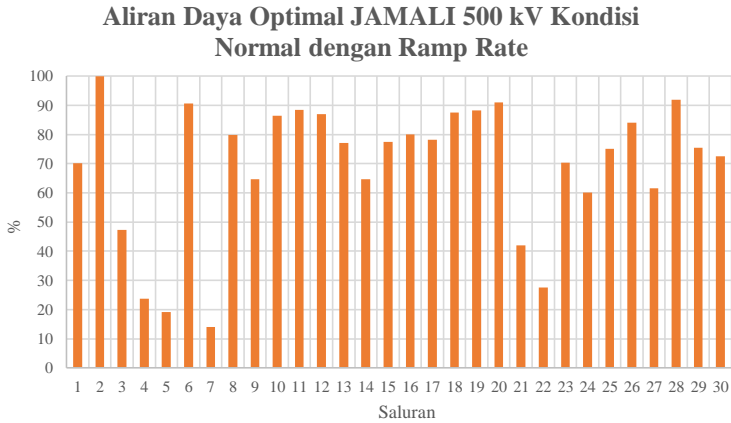
Pada tahap ini, akan dianalisis besarnya aliran daya optimal sistem JAMALI 500 kV pada saat kondisi normal maupun kontingensi pada saluran 26 (Kediri - Paiton) dengan batasan *ramp rate* untuk mengetahui pengaruh batasan *ramp rate* terhadap besarnya daya dan biaya pembangkitan, daya dan biaya pelepasan beban, serta *objective function*.

Tabel 4.17. Aliran Daya Optimal dengan *Ramp Rate*

Saluran	Aliran Daya (MW)		Kapasitas Saluran (MVA)	
	Normal	Kontingensi	Normal	Kontingensi
1	561,16	556,81	800	800
2	1198,83	1200,00	1200	1200
3	378,39	370,81	800	800
4	-237,21	-254,00	1000	1000
5	-114,71	-182,00	600	600
6	634,77	661,00	700	700
7	-7,05	9,01	50	50
8	-638,87	-681,47	800	800
9	-25,87	-40,00	40	40
10	-518,06	-526,00	600	600
11	61,88	70,00	70	70
12	-852,77	-911,20	980	980
13	-578,26	-691,20	750	750
14	-517,14	-672,67	800	800
15	-1162,75	-1338,67	1500	1500
16	-1439,80	-1631,67	1800	1800
17	-531,07	-531,07	680	680
18	-1226,24	-1400,00	1400	1400
19	440,99	500,00	500	500
20	-1684,55	-1674,60	1850	1850
21	-840,76	-1139,00	2000	2000
22	275,65	297,73	1000	1000
23	-702,37	-806,73	1000	1000
24	-901,11	-1019,73	1500	1500
25	-974,96	-317,81	1300	1300
26	-1512,17	-1186,61	2400	1200
27	492,39	800,00	800	800
28	550,82	519,00	600	600

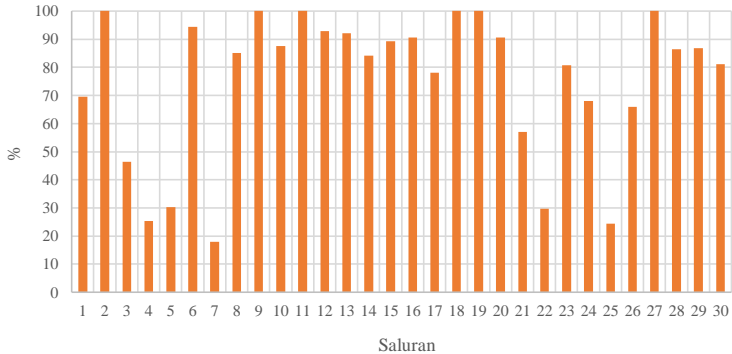
(Lanjutan **Tabel 4.17**. Aliran Daya Optimal dengan *Ramp Rate*)

Saluran	Aliran Daya (MW)		Kapasitas Saluran (MVA)	
	Normal	Kontingensi	Normal	Kontingensi
29	603,81	694,60	800	800
30	-870,80	-973,60	1200	1200



Gambar 4.9. Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV Kondisi Normal dengan *Ramp Rate*

Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV Kondisi Kontingensi dengan Ramp Rate



Gambar 4.10. Aliran Daya Optimal JAMALI 500 kV Kondisi Kontingensi dengan *Ramp Rate*

Berdasarkan **Tabel 4.17**, daya yang mengalir pada tiap saluran masih dalam batas keamanan kapasitas saluran dengan daya yang mengalir seperti pada **Gambar 4.9** dan **Gambar 4.10**.

4.3.2.3. Analisis Pengaruh Batasan Ramp Rate

Berdasarkan hasil simulasi **4.3.2.2** dan **4.3.2.3**, adanya batasan *ramp rate* pembangkitan membatasi besar kenaikan dan penurunan daya pembangkitannya sehingga kemudian memengaruhi daya dan biaya pembangkitan serta daya dan biaya pelepasan beban.

Tabel 4.18. Pengaruh Batasan *Ramp Rate* dengan Besar Daya Pembangkitan pada Kondisi Normal dan Kontingensi

<i>Ramp Rate</i>	Daya Pembangkitan (MW)	
	Normal	Kontingensi
Tidak Aktif	9.493	9.066
Aktif	9.066	9.066

Tabel 4.19. Pengaruh Batasan *Ramp Rate* dengan Besar Biaya Pembangkitan pada Kondisi Normal dan Kontingensi

<i>Ramp Rate</i>	Biaya Pembangkitan (Rp)	
	Normal	Kontingensi
Tidak Aktif	2.533.500.000	2.425.300.000
Aktif	2.425.300.000	2.425.300.000

Tabel 4.20. Pengaruh Batasan *Ramp Rate* dengan Besar Daya Pelepasan Beban pada Kondisi Normal dan Kontingensi

<i>Ramp Rate</i>	Daya Pelepasan Beban (MW)	
	Normal	Kontingensi
Tidak Aktif	0	426.92
Aktif	426.92	0

Tabel 4.21. Pengaruh Batasan *Ramp Rate* dengan Besar Biaya Pelepasan Beban pada Kondisi Normal dan Kontingensi

<i>Ramp Rate</i>	Total Biaya Pembangkitan (Rp)	Total Biaya Pelepasan Beban (Rp)
Tidak Aktif	4.958.800.000	552.860.000
Aktif	4.850.600.000	552.860.000

Berdasarkan **Tabel 4.18**, **Tabel 4.19**, **Tabel 4.20**, dan **Tabel 4.21**, biaya total pembangkitan menjadi lebih kecil pada saat *ramp rate* diaktifkan. Namun karena daya pembangkitan berkurang pada kondisi normal, maka pada kondisi normal sudah dilakukan pelepasan beban. Hal ini disebabkan karena pada tugas akhir ini tidak diberikan nilai prioritas pada kondisinya, sehingga dalam perhitungan aliran daya optimal didapatkan daya pembangkitan pada kondisi normal menurun dan tidak mampu menyuplai daya beban pada kondisi normal, sehingga untuk mengatasinya dilakukan pelepasan beban pada kondisi normal. Hal ini akan menjaga sistem pada saat terjadi kontingensi tetap aman.

BAB 5

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari simulasi sistem JAMALI 500 kV pada **BAB 4** adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan validasi program “DC-SCOPF Memertimbangkan Pelepasan Beban” pada sistem Modifikasi IEEE 9 Bus, program ini layak digunakan untuk mekanisme pelepasan beban.
2. Berdasarkan hasil simulasi untuk sistem modifikasi JAMALI 500 kV, program ini layak dan aman digunakan baik untuk kondisi normal maupun kontingensi dengan potensi kontingensi paling besar di saluran 26 (Paiton-Kediri).
3. Batasan Ramp Rate menjaga terjadinya sistem *collapse* saat kontingensi karena mampu menjaga nilai pelepasan beban pada kondisi kontingensi dengan melakukan pelepasan beban pada kondisi normal.
4. Mekanisme pelepasan beban mampu menjaga kestabilan sistem agar tidak melanggar kapasitas saluran.

5.2. Saran

Berikut adalah saran dari penulis untuk pengembangan ilmu dan penelitian ke depan:

1. Penelitian dapat digunakan untuk mekanisme pelepasan beban pada sistem jaringan distribusi JAMALI maupun sistem plan lainnya.
2. Penelitian dapat dikembangkan untuk program yang memprioritaskan batasan selain pelepasan beban, seperti batasan *ramp rate*.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Nuswantara, W. G. Ariastina, dan A. A. N. Amrita, “Studi Kestabilan Sistem dan Pelepasan Beban (Load Shedding) Berdasarkan Standar IEEE di PT. Pertamina (Persero) Refinery Unit IV,” *E-Journal Spektrum*, vol. IV, hlm. 66–75, Jun 2017.
- [2] Y. Wang, I. R. Pordanjani, W. Li, W. Xu, dan E. Vaahedi, “Strategy to Minimise The Load Shedding Amount for Voltage Collapse Prevention,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, Mei 2010.
- [3] H. Saadat, *Power System Analysis*. New York: WCB McGraw-Hill, 1999.
- [4] Soedibyo, *Pembangkit Tenaga Listrik*. Surabaya: ITS Press, 2015.
- [5] A. J. Wood, B. F. Wollenberd, dan G. B. Sheble, *Power Generation, Operation, and Control*, III. New Jersey, Canada: John Wiley and Sons, Inc., 2014.
- [6] A. G. Muljo Adji, “Gambaran Umum Pengelolaan Sistem Jawa Bali,” *Jakarta*, 2005.
- [7] V. J. Mishra dan M. D. Khardennis, “Contingency Analysis of Power System,” *IEEE Students’ Conferene on Electrical, Electronics, and Computer Science*, 2012.
- [8] R. Trizalda dan M. Heppy, “Analisis Penentuan Harga Jual Energi Listrik Berdasarkan Struktur Biaya PLTU,” *Univ. Indonesia*, 2013.
- [9] M. B. M, S. Muthyala, dan S. Maheswarapu, “Security Constraint Optimal Power Flow (SCOPF) – A Comprehensive Survey,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 11, Des 2010.
- [10] F. Capitanescu, M. Glavic, D. Ernst, dan L. Wehenkel, “Applications of Security-Constrained Optimal Power Flows,” *Modern Electric Power Systems Symposium (MEPS06)*, Wroclaw (Poland), 2006.
- [11] S. Hirodantis, H. Li, dan P. A. Crossley, “Load Shedding in a Distribution Network,” *Nanjing, China*, 2009.
- [12] A. Nugraheni dan R. Setiabudy, “Simulasi Pelepasan Beban dengan Menggunakan Rele Frekuensi pada Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd.,” *Univ. Indonesia*.
- [13] P. A. Jensen dan J. F. Bard, *Operations Research Models and Methods*. Wiley: Hoboken, 2003.
- [14] R. D. Zimmerman dan C. E. Murillo-Sanchez, “Matpower 6.0 User’s Manual.” PSERC, 2016.

- [15] A. Taradini, R. S. Wibowo, dan Soediby, "Dynamic Optimal Power Flow Arus Searah Mempertimbangkan Cadangan Berputar dan Pelepasan Beban Menggunakan Quadratic Programming," *ITS*, 2015.

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Eunike Widya Adinda lahir pada tanggal 12 Mei 1997 di Tulungagung. Penulis telah menyelesaikan pendidikan formal di SDK Petra Tulungagung pada tahun 2003 sampai dengan 2009, SMPN 1 Kauman pada tahun 2009 sampai dengan 2012, dan SMAN 1 Boyolangu pada tahun 2012 sampai dengan 2015, dan melanjutkan kuliah di S1 Teknik Elektro ITS, program studi Teknik Sistem Tenaga. Sebagai seorang yang menyukai desain grafis dan olah vokal, penulis telah mengabdikan diri untuk mengikuti beberapa organisasi di ITS seperti Himatekro ITS sebagai Sekertaris Departemen Kominfo dan Paduan Suara Mahasiswa ITS sebagai *alto singer*. Penulis juga aktif mengembangkan diri secara akademis dengan menjadi asisten di *Power System Simulation Laboratory*.

Halaman ini sengaja dikosongkan.