



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISA *UNDERVOLTAGE LOAD SHEDDING* PADA SISTEM
JAWA-BALI 500 KV UNTUK MENCEGAH *VOLTAGE COLLAPSE***

**Rachmad Ady Zakaria
NRP 2215105037**

**Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

***ANALISA UNDERVOLTAGE LOAD SHEDDING PADA
SISTEM JAWA-BALI 500 KV UNTUK MENCEGAH
VOLTAGE COLLAPSE***

**Rachmad Ady Zakaria
NRP 2215105037**

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***ANALYSIS OF UNDERVOLTAGE LOAD SHEDDING ON
JAVA-BALI 500 KV SYSTEM TO PREVENT VOLTAGE
COLLAPSE***

**Rachmad Ady Zakaria
NRP 2215105037**

Advisor

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**ANALISA UNDERVOLTAGE LOAD SHEDDING PADA SISTEM JAWA-BALI 500 KV UNTUK MENCEGAH VOLTAGE COLLAPSE**" 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 2017



Rachmad Ady Zakaria
2215 105 037

**ANALISA UNDERVOLTAGE LOAD SHEDDING PADA SISTEM
JAWA-BALI 500 KV UNTUK MENCEGAH VOLTAGE
COLLAPSE**

TUGAS AKHIR

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

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
NIP. 194907151974121001

Dr. Ir. Soedibyo, M.M.T.
NIP. 195512071980031004



Juli, 2017

ANALISA UNDERVOLTAGE LOAD SHEDDING PADA SISTEM JAWA-BALI 500 KV UNTUK MENCEGAH VOLTAGE COLLAPSE

Nama : Rachmad Ady Zakaria
Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

ABSTRAK

Salah satu indikasi sistem mengalami ketidakstabilan yaitu terjadinya *underfrequency* dan *undervoltage*. Salah satu metode yang paling ekonomis untuk mencegah *voltage collapse* dalam skala yang besar adalah *Undervoltage Load Shedding* (UVLS). Pelepasan beban dilakukan sebagai usaha memperbaiki kestabilan sistem yang terganggu karena beban lebih. Salah satu komponen stabilitas sistem yang mampu menjadi referensi pelepasan beban adalah tegangan. Pelepasan beban diharapkan dapat memulihkan tegangan dengan cepat dan jumlah beban yang dilepaskan seminimal mungkin. Demi mendapatkan kinerja sistem yang baik dengan tegangan sistem yang selalu stabil dengan ketentuan variasi tegangan pelayanan dimana *drop* tegangan yang diijinkan hanya sebesar $\pm 5\%$. Simulasi pelepasan beban dilakukan pada bus yang memiliki nilai sensitivitas (*VQ Sensitivity*) tertinggi. Setelah melakukan simulasi maka di dapatkan ranking sensitivitas bus yang digunakan sebagai acuan urutan pelepasan beban. Semakin besar nilai sensitivitas dianggap sebagai bus terlemah, maka pada bus tersebut akan dilakukan pelepasan beban. Jumlah beban yang dilepas pada pelepasan beban yang dilakukan berdasarkan *UVLS Guideline* dengan pelepasan beban sebesar 5% dari total beban yang tersambung didalam sistem dalam setiap tahapannya, Semakin banyak jumlah beban (MW) yang dilepas, maka semakin baik pula kondisi tegangan sistem. *Load Shedding* berdasarkan kondisi bus *undervoltage* dan metode sensitivitas bus dapat mencegah terjadinya *voltage collapse* pada sistem Jawa-Bali 500 kV.

Kata Kunci : *Undervoltage*, pelepasan beban, sensitivitas bus, Sistem Jawa-Bali 500 kV

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALYSIS OF UNDERVOLTAGE LOAD SHEDDING ON JAVA-BALI 500 KV SYSTEM TO PREVENT VOLTAGE COLLAPSE

Name : Rachmad Ady Zakaria
Advisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Advisor II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

ABSTRACT

One indication of the system instability that is the occurrence of under frequency and under voltage. One of the most economical methods to prevent large-scale voltage collapse is Undervoltage Load Shedding (UVLS). Load shedding is an effort to improve the stability of the system is disrupted due to overload. One component of system stability that can be a reference to the release of the load is voltage. The release of the load is expected to recover the voltage quickly and the amount of load that is released to a minimum. In order to get a good system performance with system voltage is always stable with the provision of voltage service variation where the allowable voltage drop is only $\pm 5\%$. Load shedding simulation is performed on the bus with the highest sensitivity (VQ Sensitivity). After doing the simulation then get the rank of the sensitivity of the bus that is used as the reference of the load release sequence. The greater the sensitivity value is considered as the weakest bus, then on the bus will be the release of the load. The amount of load to release at the load shedding under the UVLS Guideline with a load release of 5% of the total load connected in the system, The greater the amount of load (MW) released, the better the system voltage condition. Load Shedding based on under voltage bus conditions and bus sensitivity can prevent the occurrence of voltage collapse in Java-Bali system 500 kV.

Keywords: *Undervoltage, load release, bus sensitivity, Java-Bali System 500 kV*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya sehingga saya selaku penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul :

ANALISA UNDERVOLTAGE LOAD SHEDDING PADA SISTEM JAWA-BALI 500 KV UNTUK MENCEGAH VOLTAGE COLLAPSE.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, saya sebagai penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. ALLAH SWT yang tanpa-Nya penulis tidak mungkin bisa menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua saya yang selalu memberikan doa dan semangat untuk selalu mengingatkan saya menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Profesor Ontoseno Penangsang dan Pak Soedibyo selaku dosen pembimbing tugas akhir atas bimbingan, perhatian, dan pendapat yang diberikan kepada penulis selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
4. Teman-teman LJ Elektro angkatan 2015 yang selalu bekerja keras mensupport TA saya,teman-teman CC LJ 2K12 dan juga terimakasih untuk “im”.
5. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan tugas akhir yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi pembaca. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Juli 2017

Penyusun

Halaman ini sengaja dikosongkan

2.7.2 Pelepasan Beban Otomatis (<i>Automatic Load Shedding</i>).....	23
2.7.3 Pelepasan Beban Lebih (<i>Overload Shedding</i>).....	24
2.7.3 Pelepasan Beban <i>Under Voltage (Under Voltage load Shedding)</i>	24
2.8 Sensitivitas Bus	24
2.9 Studi Aliran Daya	26
2.9.1 Persamaan Aliran Daya	27
2.9.2 Aliran Daya dan Rugi-rugi Daya pada Saluran... ..	28
2.9.3 Metode Newton Rhapson	29
BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN JAWA-BALI 500 KV	
3.1 Metodologi Pelaksanaan Studi	35
3.2 Sistem Kelistrikan Jawa-Bali 500 KV	37
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	
4.1 Data Simulasi.....	41
4.2 Analisis <i>Undervoltage</i> Bus	41
4.3 Analisis Sensitivitas Bus	43
4.4 Simulasi dan Analisis Jaringan.....	44
4.4.1 Simulasi dan Analisis tanpa UVLS	45
4.4.2 Simulasi dan Analisis dengan UVLS	47
4.4.2.1 UVLS 1	48
4.4.2.2 UVLS 2	49
4.4.2.3 UVLS 3	50
4.4.2.4 UVLS 4	51
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA	55
RIWAYAT HIDUP	57

TABLE OF CONTENT

TITLE	
AUTHENTICITY SHEET	
APPROVAL SHEET	
ABSTRACT	<i>iii</i>
PREFACE	<i>v</i>
TABLE OF CONTENT	<i>vii</i>
LIST OF FIGURE	<i>ix</i>
LIST OF TABLE	<i>xi</i>
CHAPTER 1 INTRODUCTION	
1.1 Background.....	<i>1</i>
1.2 Problem	<i>2</i>
1.3 Limitation of Problem.....	<i>2</i>
1.4 Intention.....	<i>2</i>
1.5 Methodology.....	<i>3</i>
1.6 Sistematic of Report Writing	<i>4</i>
1.7 Research Objectives and benefit.....	<i>5</i>
CHAPTER 2 BASIC THEORY	
2.1 Electrical Power System.....	<i>7</i>
2.1.1 Power Plant.....	<i>7</i>
2.1.2 Transmission Line	<i>8</i>
2.1.2.1 Short Line	<i>9</i>
2.1.2.2 Medium Line.....	<i>10</i>
2.1.2.3 Long line.....	<i>13</i>
2.2 Voltage Stability	<i>14</i>
2.3 Undervoltage Standard	<i>18</i>
2.4 Voltage Collapse	<i>18</i>
2.5 Prevent Voltage Collapse	<i>19</i>
2.6 Load Shedding	<i>22</i>
2.7 Planning of Load Shedding	<i>23</i>
2.7.1 Manual Load Shedding	<i>23</i>
2.7.2 Automatic Load Shedding	<i>23</i>
2.7.3 Overload Shedding.....	<i>24</i>
2.7.3 Under Voltage load Shedding	<i>24</i>
2.8 Bus Sensitivity.....	<i>24</i>

2.9	<i>Power Flow Study</i>	26
2.9.1	<i>Power Flow Equation</i>	27
2.9.2	<i>Power Flow and Line Power Losses</i>	28
2.9.3	<i>Newton Rhapson Method</i>	29
CHAPTER 3 ELECTRICITY SYSTEM of JAVA-BALI 500 KV		
3.1	<i>Study Implementation Methodology</i>	35
3.2	<i>Electricity system of java-bali 500 kv</i>	37
CHAPTER 4 SIMULATION AND ANALYSIS		
4.1	<i>Data Simulation</i>	41
4.2	<i>Analysis Undervoltage Bus</i>	41
4.3	<i>Analysis Bus Sensitivity</i>	43
4.4	<i>Simulatioi and Network Analysis</i>	44
4.4.1	<i>Simulation and Analysis without UVLS</i>	45
4.4.2	<i>Simulation and Analysis with UVLS</i>	47
4.4.2.1	<i>UVLS 1</i>	48
4.4.2.2	<i>UVLS 2</i>	49
4.4.2.3	<i>UVLS 3</i>	50
4.4.2.4	<i>UVLS 4</i>	51
CHAPTER 5 CLOSING		
5.1	<i>Conclution</i>	53
5.2	<i>Advice</i>	53
BIBLIOGRAPHY		55
BIOGRAPHY of AUTHOR		57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Blok Umum Sistem Tenaga Listrik.....	8
Gambar 2.2	Rangkaian Pengganti Saluran Transmisi	9
Gambar 2.3	Rangkaian Ekivalensi Saluran Transmisi Jarak Pendek	9
Gambar 2.4	Rangkaian Ekivalensi PI Saluran Transmisi Jarak Menengah	11
Gambar 2.5	Rangkaian Ekivalensi T Saluran Transmisi Jarak Menengah	12
Gambar 2.6	Rangkaian Ekivalensi Saluran Transmisi Jarak Panjang	13
Gambar 2.7	Klasifikasi Stabilitas Tegangan.....	17
Gambar 2.8	Definisi <i>Voltage Magnitude Event</i> berdasarkan Standar IEEE 1159-195	18
Gambar 2.9	Kurva PV	19
Gambar 2.10	Tipikal Bus dari Sistem Tenaga	27
Gambar 2.11	Model Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya dan Rugi Saluran.....	28
Gambar 2.12	Ilustrasi Metode Newton Raphson	28
Gambar 3.1	Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan.....	35
Gambar 3.2	Sistem Kelistrikan Jawa-Bali 500 kV	37
Gambar 4.1	Tegangan pada Bus 1-15 (% of Bus nominal kV) tanpa UVLS	46
Gambar 4.2	Tegangan pada Bus 16-30 (% of Bus nominal kV) tanpa UVLS	46
Gambar 4.3	Tegangan pada Bus Bekasi dan Cawang (% of Bus nominal kV) tanpa UVLS.....	47
Gambar 4.4	Tegangan Bus Bekasi dan Cawang dengan UVLS 1	49
Gambar 4.5	Tegangan Bus Bekasi dan Cawang dengan UVLS 2	50
Gambar 4.6	Tegangan Bus Bekasi dan Cawang dengan UVLS 3	51
Gambar 4.7	Tegangan Bus Bekasi dan Cawang dengan UVLS 4.....	52

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Saluran Sistem Jawa-Bali 500 kV	37
Tabel 3.2	Data Pembangkitan Sistem Jawa-Bali 500 kV	39
Tabel 4.1	Tegangan Bus Sistem Jawa-Bali 500 kV	41
Tabel 4.2	Hasil Rangka Sensitivitas Tegangan Bus	43

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pulau Jawa-Bali merupakan pulau dengan kepadatan penduduk yang tinggi. Pertumbuhan industri, pertumbuhan penduduk dan pertumbuhan ekonomi menyebabkan pertumbuhan beban yang tinggi. Persoalan stabilitas tegangan merupakan persoalan yang sangat penting dalam hal perencanaan dan operasi dalam sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan tegangan akan menyebabkan ketidakmampuan sistem untuk menyuplai daya yang dibutuhkan oleh beban. Stabilitas tegangan merupakan suatu persoalan yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik yang mempunyai saluran transmisi panjang dengan kapasitas pembebanan yang besar, sehingga hal ini dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan pada sistem tenaga listrik dan pada akhirnya dapat menyebabkan terjadinya jatuh tegangan atau *voltage collapse*[1].

Jatuh tegangan pada sistem tenaga listrik merupakan rangkaian kejadian lanjutan dari ketidakstabilan tegangan disaat tegangan menurun secara cepat dan tak terkendali. Fenomena jatuh tegangan dapat diakibatkan antara lain oleh sumber daya reaktif yang tidak sesuai, kenaikan tingkat beban yang tidak terduga akibat kondisi yang tidak biasanya pada sistem daya, atau oleh karena pengaruh gangguan pada sistem tenaga listrik seperti gangguan kontingensi yaitu terputusnya salah satu saluran transmisi, transformator, atau generator. Demi mendapatkan kinerja sistem yang baik dengan tegangan sistem yang selalu stabil berdasarkan SPLN No. 1:1995 Pasal 4 tentang ketentuan variasi tegangan pelayanan dimana drop tegangan yang diijinkan hanya sebesar -10% s/d +5%[2].

Salah satu indikasi sistem mengalami ketidakstabilan yaitu terjadinya *underfrequency* dan *undervoltage*. Dan respon dari *underfrequency load shedding* terjadi sedikit lebih terlambat daripada *undervoltage load shedding* [3]. Salah satu metode yang paling ekonomis untuk mencegah *voltage collapse* dalam skala yang besar adalah *Undervoltage Load Shedding* (UVLS)[4]. Pelepasan beban dilakukan sebagai usaha memperbaiki kestabilan sistem yang terganggu karena beban lebih. Salah satu komponen stabilitas sistem yang mampu menjadi referensi pelepasan beban adalah tegangan. Pelepasan beban

diharapkan dapat memulihkan tegangan dengan cepat dan jumlah beban yang dilepaskan seminimal mungkin.

1.2 Permasalahan

Permasalahan mengenai Analisa *Undervoltage Load Shedding* pada Sistem Jawa-Bali 500 kV untuk Mencegah *voltage collapse* yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Analisis sensitivitas bus dengan menggunakan *bus sensitivity* untuk menentukan bus terlemah pada sistem
2. Bagaimana keadaan sistem jika terjadi gangguan (*disturbance*) dengan terjadinya penambahan beban tiap bus hingga melebihi daya pembangkitan.
3. Bagaimana respon sistem jika terjadi gangguan dan dilakukan pelepasan beban dengan menggunakan mekanisme pelepasan beban dengan metode *Undervoltage Load Shedding (UVLS)* dan sensitivitas bus sebagai penentuan lokasi pelepasan beban.
4. Membandingkan respon sistem saat terjadi gangguan dengan adanya UVLS dan tanpa UVLS.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Tugas akhir ini dilakukan menggunakan *software* ETAP 12.6 dan analisa sensitivitas bus menggunakan *software* Powerworld.
2. Pembahasan mencakup masalah stabilitas tegangan *steady state* sistem.
3. Data yang digunakan adalah sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV kasus 24 April 2016 jam 13.30 WIB.
4. Metode yang digunakan adalah metode *bus sensitivity*.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui nilai sensitivitas bus pada sistem Jawa-Bali 500 kV dengan menggunakan metode *bus sensitivity*.

2. Mengetahui keadaan sistem saat terjadi gangguan apakah berpotensi terjadi *undervoltage* atau bahkan terjadi *voltage collapse*.
3. Membuat mekanisme pelepasan beban baru yang lebih efektif serta menaikkan keandalan terhadap gangguan stabilitas tegangan.
4. Mengetahui dan membandingkan respon sistem jika skema pelepasan beban menggunakan metode UVLS dan tanpa UVLS.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Mengumpulkan buku dan referensi mengenai *Power System Analysis* yang berkaitan dengan analisa stabilitas tegangan (*voltage stability*), pelepasan beban (*load shedding*) dan sensitivitas bus.

2. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan dalam tugas akhir ini adalah data sekunder Sistem Interkoneksi Jawa-Bali 500 kV oleh PT. PLN (Persero). Data meliputi data pembangkitan, data saluran dan data pembebanan.

3. Pengolahan Data

Menginterpretasikan dan menganalisis data yang diperoleh untuk disesuaikan dengan jenis dan format yang dibutuhkan untuk simulasi sistem dengan komputer. Hasil pengolahan dan analisis data ini akan digunakan untuk mendapatkan data dari peralatan Sistem Jawa-Bali 500 kV oleh PT. PLN (Persero) untuk dimasukkan dalam software untuk dilakukan simulasi dan analisa.

4. Simulasi dan Analisa Data

Dalam tahap ini dilakukan simulasi dengan komputer menggunakan ETAP 12.6 terhadap sistem Sistem Interkoneksi Jawa-Bali 500 kV, dan *software* Powerworld sebagai *tools* bantuan untuk menentukan sensitivitas bus. Software ETAP digunakan untuk mengetahui perilaku (*performance*), serta kondisi tegangan sistem kelistrikan tersebut jika dilakukan pembebanan secara kontinyu hingga sistem terjadi *voltage*

collapse. Hasil *Power Sistem Analysis* akan digunakan untuk acuan dilakukannya *load shedding* sebagai pencegahan terjadinya *voltage collapse*.

5. Penarikan kesimpulan

Memberikan kesimpulan mengenai kondisi kestabilan tegangan akibat gangguan berupa penambahan beban secara kontinyu dari sistem dan respon sistem setelah melakukan pelepasan beban dengan menggunakan metode *Undervoltage Load Shedding*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

BAB 1 : PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan dan manfaat, metodologi penelitian, sistematika penulisan dan relevansi.

BAB 2 : DASAR TEORI

Bab ini secara garis besar membahas stabilitas tegangan dan konsep pelepasan beban dan metode sensitivitas bus.

BAB 3 : SISTEM KELISTRIKAN JAWA-BALI 500 KV

Bab ini membahas sistem kelistrikan, meliputi sistem pembangkitan, data saluran transmisi dan data pembebanan pada Sistem Jawa-Bali 500 kV.

BAB 4 : SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini membahas data hasil simulasi stabilitas tegangan, mekanisme *load shedding* dengan pertimbangan *undervoltage* dan metode sensitivitas bus untuk penentuan lokasi bus yang akan dilakukan pelepasan beban.

BAB 5 : PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

1.7 Relevansi dan Manfaat

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Dapat digunakan sebagai metode baru untuk melakukan skema *load shedding* terhadap sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV.
2. Dapat dijadikan referensi pada penelitian selanjutnya dalam upaya peningkatan keandalan kestabilan sistem untuk mencegah *voltage collapse*.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 2

DASAR TEORI

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik dapat direpresentasikan oleh sebuah sistem interkoneksi yang bergantung pada sistem kontrol dalam upaya memanfaatkan sumber daya yang ada secara optimal. Salah satu masalah utama yang dihadapi oleh sistem tenaga listrik modern adalah jatuh tegangan atau ketidakstabilan tegangan setelah terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan *steady state* berhubungan dengan ketidakstabilan pada sudut daya serta terjadi kehilangan sinkronisasi antar generator secara perlahan dan jatuh tegangan bus beban saat kondisi beban tinggi dan melewati batas daya reaktif [5].

Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang saling berhubungan, sehingga memerlukan sistem interkoneksi. Pengiriman daya dari pembangkit listrik ke beban pada sistem melalui saluran transmisi dengan komposisi energi per jenis pembangkit listrik yang berbeda-beda (PLTA, PLTG, PLTU, PLTGU, PLTD, dan PLTP) dan pusat-pusat beban dengan pertimbangan meminimalkan total kapasitas daya dan biaya.

Sistem interkoneksi memiliki keuntungan ketersediaan sumber listrik yang besar, keberagaman beban yang dapat dijangkau sistem interkoneksi, dan harga pembangkitan tenaga listrik yang dapat dipilih dengan biaya minimum dan dengan keandalan yang tinggi. Secara garis besar sistem tenaga listrik terdiri dari:

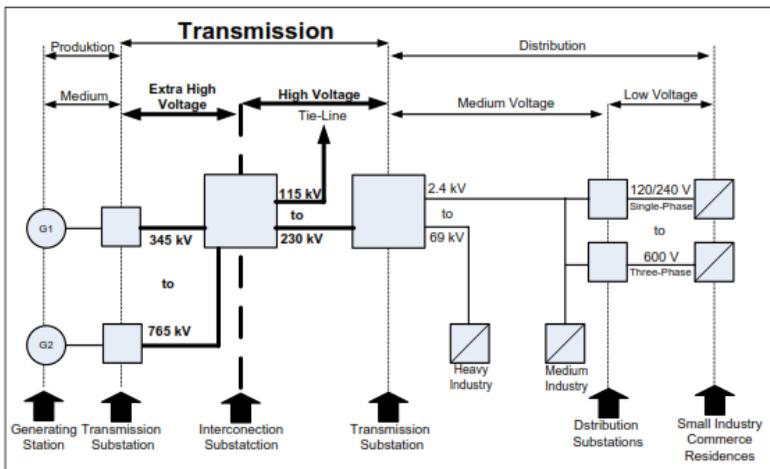
2.1.1 Pembangkit Listrik (*Power Plant*)[6]

Pembangkit listrik adalah sebuah tempat dimana energi listrik pertama kali dibangkitkan. Pada suatu pembangkit listrik terdapat turbin sebagai penggerak mula (*prime mover*) dan generator yang membangkitkan tenaga listrik. Tenaga listrik umumnya dibangkitkan pada pembangkit listrik (*power plant*) seperti PLTA (pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTU (Pusat Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pusat Listrik Tenaga Gas), PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap), PLTP (Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi), dan PLTD (Pusat Listrik Tenaga Diesel) kemudian dinaikkan tegangannya oleh transformator *step-up* yang ada dipusat pembangkit, selanjutnya tenaga listrik tersebut disalurkan melalui saluran transmisi dan diteruskan ke beban.

Umumnya pada pembangkit listrik terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain: transformer *step-up* yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11 kV s/d 24 kV) menjadi 70 kV, 154 kV, 220kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi dan juga peralatan pengamanan dan peralatan kontrol.

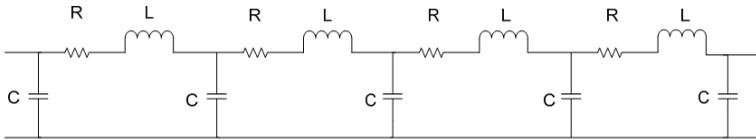
2.1.2 Saluran Transmisi (*Transmission Line*) [7]

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (*power plant*) menuju *substation* distribusi atau Gardu Induk (GI) sehingga dapat disalurkan sampai pada pelanggan pengguna listrik melalui suatu bahan konduktor seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram Blok Umum Sistem Tenaga Listrik [7]

Pada sistem tenaga listrik, jarak antara pembangkit listrik dengan beban yang cukup jauh dapat menimbulkan adanya penurunan kualitas tegangan dan timbul rugi-rugi daya yang diakibatkan oleh rugi-rugi pada jaringan. Besarnya rugi-rugi ditentukan oleh konduktor dan panjang saluran.



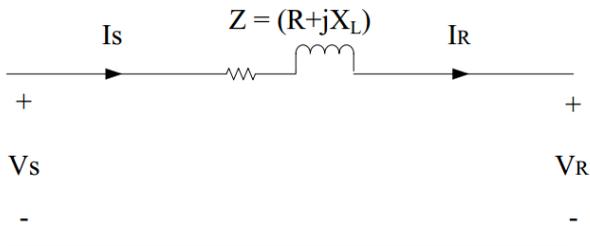
Gambar 2.2 Rangkaian Pengganti Saluran Transmisi[7]

Panjang saluran transmisi akan berpengaruh terhadap nilai parameter dari saluran transmisi. Parameter-parameter saluran antara lain tahanan (*resistansi*), reaktansi, kapasitansi, dan konduktansi yang tersebar sepanjang saluran konduktor seperti pada Gambar 2.2. Besar parameter-parameter tersebut berpengaruh terhadap tegangan bus dan daya yang mengalir pada saluran. Berdasarkan panjangnya saluran transmisi dapat dibagi menjadi tiga, yaitu:

1. Saluran transmisi pendek (*Short line*)
2. Saluran transmisi menengah (*Medium line*)
3. Saluran transmisi panjang (*Long line*)

2.1.2.1 Saluran transmisi pendek (*Short line*)

Saluran transmisi pendek merupakan saluran transmisi yang panjangnya kurang dari 80 km (50 mile). Pada saluran model transmisi pendek ini besar kapasitansi ke tanah sangat kecil, dengan demikian besar arus bocor ke tanah terhadap arus beban nilainya sangat kecil, sehingga kapasitansi ke tanah dapat diabaikan atau dianggap nol. Rangkain ekivalen saluran transmisi jarak pendek dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Rangkaian Ekivalen Saluran Transmisi Jarak Pendek[7]

Keterangan Gambar 2.3 :

V_s = Tegangan kirim atau tegangan pada sumber.

- I_S = Arus kirim atau arus pada sumber.
- V_R = Tegangan terima atau tegangan pada beban.
- I_R = Arus terima atau arus pada beban.
- $Z = (R+jX_L) =$ impedansi saluran.

Rangkaian diatas dapat diselesaikan seperti halnya rangkaian AC seri sederhana yang dimodelkan dengan nilai R dan L. Karena tidak terdapat cabang parallel (*shunt*), arus sisi kirim (I_S) sama dengan arus sisi terima (I_R).

$$I_S = I_R \quad (2.1)$$

Tegangan pada sisi pengirim yaitu :

$$V_S = V_R + I_R \cdot Z \quad (2.2)$$

Perubahan faktor daya beban terhadap regulasi tegangan (*voltage regulation*) saluran paling mudah dimengerti pada saluran jarak pendek. Regulasi tegangan (*voltage regulation*) pada saluran transmisi adalah kenaikan tegangan pada sisi penerima yang dinyatakan dalam presentase tegangan beban penuh dengan faktor daya tertentu dan pada sisi pengirim dibuat tetap. Persamaan regulasi tegangan adalah :

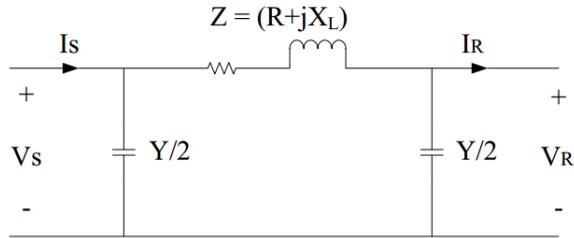
$$\text{Voltage Regulation} = \frac{|V_R \cdot NL + V_R \cdot FL|}{|V_R \cdot FL|} \times 100\% \quad (2.3)$$

2.1.2.2 Saluran transmisi menengah (*Medium line*)

Saluran transmisi menengah adalah saluran transmisi yang memiliki panjang saluran antara 80 km (50 mile) sampai dengan 240 km (150 mile). Nilai kapasitansi pada saluran menengah relatif cukup besar, sehingga tidak dapat diabaikan dalam perhitungan. Sehingga seluruh admitansi shunt saluran terpusat pada cabang shunt, dimana pada saluran transmisi menengah dibedakan menjadi dua model, yaitu:

1. Saluran transmisi menengah nominal T yaitu saluran transmisi dengan kapasitansi dipusatkan pada satu titik dan impedansi serinya terbagi dua pada kedua cabang serinya.
2. Saluran transmisi menengah nominal PI (π) yaitu saluran transmisi dengan kapasitansi dipusatkan pada dua titik dan impedansi serinya dipusatkan satu titik pada cabang serinya.

Untuk saluran model nominal PI (π) keseluruhan administrasi shunt saluran dibagi dua sama besar dan ditempatkan masing-masing pada ujung penerima, sehingga dinamakan rangkaian berbentuk nominal PI. Untuk mendapatkan suatu rumus untuk V_R kita akan berpedoman pada Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Rangkaian Ekuivalen PI Saluran Transmisi Jarak Menengah[7]

Arus pada kapasitansi pada ujung penerima adalah $V_R Y/2$ dan arus pada cabang seri adalah $I_R + V_R Y/2$. Maka diperoleh persamaan :

$$V_S = \left(1 + \frac{1}{2}YZ\right) V_R + I_R \cdot Z \quad (2.4)$$

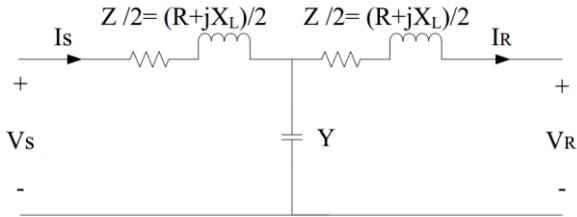
Arus pada kapasitansi shunt pada ujung pengirim adalah $V_S Y/2$ dan arus pada cabang seri adalah $I_R + V_R Y/2$. Sehingga jika ditambahkan arus pada ujung seri diperoleh arus I_S sebesar :

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (2.5)$$

Dari persamaan 2.4 dan 2.5 kita dapatkan :

$$I_S = Y \left(1 + \frac{1}{4}YZ\right) V_R + \left(1 + \frac{1}{2}YZ\right) I_R \quad (2.6)$$

Persamaan untuk rangkaian yang sesuai dapat diturunkan untuk rangkaian T nominal, gambar 2.5 menunjukkan rangkain pengganti untuk dari saluran tipe T nominal.



Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen T Saluran Transmisi Jarak Menengah[7]

$$V_s = \left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)V_R + Z\left(1 + \frac{1}{4}YZ\right)I_R \quad (2.7)$$

$$I_s = YV_R + \left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)I_R \quad (2.8)$$

Dari persamaan-persamaan yang didapatkan maka dapat dinyatakan dalam bentuk konstanta pengganti dari rangkain umum saluran transmisi. Konstanta ABCD sering disebut konstanta rangkain umum saluran transmisi tersebut. Pada umumnya konstanta berupa bilangan kompleks. A dan D adalah tanpa dimensi dan keduanya akan sama bila salurannya dilihat dari kedua ujung yang sama. Dimensi untuk B dan C masing-masing adalah ohm dan mho. Konstanta tersebut berlaku untuk jaringan empat terminal-linear, pasif, dan bilateral yang mempunyai dua pasang terminal. Maka didapatkan :

$$V_s = AV_R + BI_R \quad (2.9)$$

$$I_s = CV_R + DI_R \quad (2.10)$$

Dimana, untuk rangkaian PI (π) :

$$A = D = 1 + \frac{1}{2}YZ$$

$$B = Z$$

$$C = Y\left(1 + \frac{1}{4}YZ\right)$$

Sedangkan untuk rangkaian T :

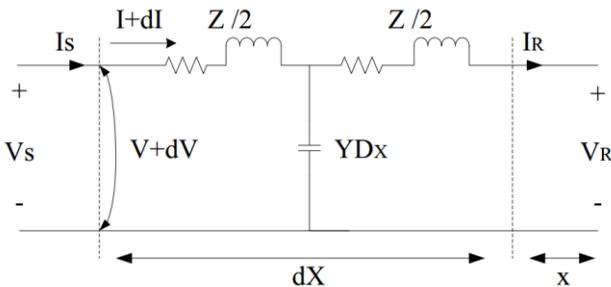
$$A = D = 1 + \frac{1}{2}YZ$$

$$B = Y\left(1 + \frac{1}{4}YZ\right)$$

$$C = Y$$

2.1.2.3 Saluran transmisi jarak panjang (Long line)

Saluran transmisi panjang adalah saluran transmisi yang memiliki panjang lebih dari 240 km (150 mile). Rangkaian T-Nominal dan Pi-Nominal tidak dapat merepresentasikan saluran transmisi panjang dengan tepat, karena rangkaian tersebut tidak memperhitungkan kenyataan bahwa besaran saluran tersebut tersebar merata. Perbedaan kedua rangkaian ekuivalen tersebut dengan saluran transmisi yang sebenarnya menjadi sangat besar. Tetapi masih mungkin untuk mendapatkan rangkaian ekuivalen dari saluran transmisi panjang dengan merepresentasikannya secara tepat dengan jaringan parameter terpusat, asal pengukuran-pengukuran hasilnya dilakukan pada ujung-ujung saluran. Karakteristik urutan positif ditentukan dengan konstanta ABCD yang didefinisikan dengan persamaan 2.9 dan persamaan 2.10:



Gambar 2.6 Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Jarak Panjang[7]

Keterangan gambar :

$Y = R + jX =$ Admitansi shunt

$Z = G + jB =$ Impedansi seri

$x =$ Panjang saluran

$Dx =$ Elemen panjang saluran

$$V_S = AV_R + BI_R$$

$$I_S = CV_R + DI_R$$

Diperoleh parameter ABCD saluran panjang :

$$A = D = 1 + \frac{1}{2}YZ$$

$$B = Z(1 + \frac{1}{6}YZ)$$

$$C = Y(1 + \frac{1}{6}YZ)$$

2.2. Stabilitas Tegangan [8]

Stabilitas Sistem Tenaga Listrik adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik dengan kondisi operasi awal tertentu, untuk mendapatkan kembali kesetimbangan kondisi operasi setelah mengalami gangguan fisik. Gangguan pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua, yakni gangguan kecil dan besar. Gangguan kecil dalam bentuk perubahan beban yang terjadi secara kontinyu dan sistem menyesuaikan dengan perubahan kondisi. Selain itu, sistem juga harus dapat bertahan terhadap beberapa gangguan besar dari dalam dan luar sistem, termasuk hubung singkat pada saluran transmisi atau lepasnya sebuah pembangkit besar. Tindakan dari pengendali otomatis dan operator akan segera mengembalikan sistem ke keadaan normal. Sebaliknya, pada sistem yang tidak stabil, hal tersebut akan menyebabkan kondisi lepas kendali, contohnya penurunan secara progresif pada tegangan bus. Sebuah kondisi sistem yang tidak stabil dapat menimbulkan pemadaman dalam porsi yang besar pada sistem tenaga listrik.

Stabilitas tegangan berhubungan dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan tunak pada seluruh bus dalam sistem yang berada di bawah kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan. Ketidakstabilan mungkin terjadi dalam bentuk kenaikan atau penurunan tegangan pada beberapa bus secara progresif. Akibat dari ketidakstabilan tegangan adalah lepasnya beban pada area dimana tegangan mencapai nilai rendah yang tidak dapat diterima atau kehilangan integritas sistem tenaga listrik.

Faktor utama penyebab ketidakstabilan tegangan biasanya adalah jatuh tegangan yang terjadi ketika ketika daya aktif dan reaktif mengalir melalui reaktansi induktif yang pada jaringan transmisi. Hal ini membatasi kemampuan jaringan transmisi untuk mengirim daya.

Transfer daya akan semakin terbatas ketika beberapa generator mencapai batas kemampuan daya reaktifnya. Pemicu utama ketidakstabilan tegangan adalah beban. Pemulihan beban meningkatkan tekanan pada jaringan tegangan tinggi menyebabkan lebih banyak pengurangan tegangan. Situasi tersebut menyebabkan terjadi ketidakstabilan tegangan ketika beban dinamis berusaha memulihkan konsumsi daya di luar kemampuan sistem transmisi dan pembangkit yang terhubung. Stabilitas tegangan dibagi menjadi dua kategori, yaitu:

- a. Stabilitas tegangan gangguan besar dikaitkan dengan kemampuan suatu sistem untuk mengendalikan tegangan mengikuti gangguan besar, seperti gangguan sistem, lepasnya pembangkitan, atau circuit contingencies. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik antara beban dan sistem, serta interaksi dari sistem proteksi dan kendali kontinyu. Rentang waktu studinya dari beberapa detik hingga puluhan menit. Oleh karena itu, simulasi dinamis jangka panjang dibutuhkan untuk analisa.
- b. Stabilitas tegangan gangguan kecil terkait berhubungan dengan kemampuan sistem untuk mengendalikan tegangan mengikuti gangguan kecil seperti kenaikan beban sistem. Bentuk stabilitas ini ditentukan antara lain oleh karakteristik beban dan kendali kontinyu. Konsep ini berguna untuk menentukan bagaimana tegangan sistem akan merespon terhadap perubahan kecil pada sistem setiap saat. Oleh sebab itu, analisis statis dapat digunakan secara efektif untuk menentukan batas stabilitas, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas, dan menguji kondisi sistem dalam cakupan luas, serta sejumlah besar skenario pasca gangguan. Kriteria untuk stabilitas tegangan gangguan kecil adalah sebagai berikut, pada kondisi operasi untuk setiap bus dalam sistem, nilai tegangan bus meningkat saat injeksi daya reaktif pada bus yang sama meningkat. Sebuah sistem dikatakan tidak stabil tegangannya jika untuk minimal satu bus pada sistem, nilai tegangan bus menurun ketika injeksi daya reaktif pada bus yang sama meningkat. Dengan kata lain, sebuah sistem dikatakan stabil tegangannya jika sensitivitas $V-Q$ adalah positif untuk seluruh bus, sedangkan dikatakan tidak stabil jika sensitivitas $V-Q$ adalah negatif untuk minimal satu bus

Stabilitas tegangan berkaitan dengan daerah beban dan karakteristik beban. Secara mendasar, stabilitas tegangan merupakan

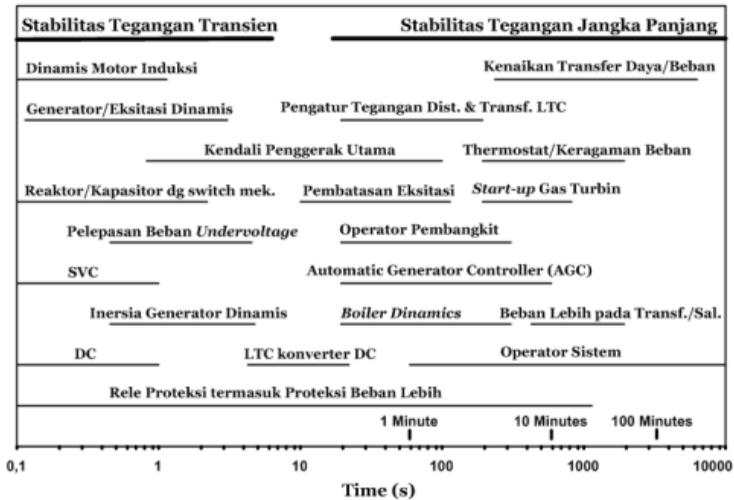
stabilitas beban. Jika runtuh tegangan terjadi pada daerah beban, hal tersebut sebagian besar disebabkan oleh masalah ketidakstabilan tegangan. Masalah stabilitas tegangan biasanya terjadi pada sistem dengan pembebanan yang besar. Ketidakstabilan tegangan dapat menginisiasi terjadinya runtuh tegangan. Gangguan yang menyebabkan runtuh tegangan dapat dipicu oleh beberapa hal, seperti naiknya beban atau gangguan besar yang muncul secara tiba-tiba. Masalah yang paling mendasar adalah lemahnya sistem tenaga listrik. faktor-faktor yang berkontribusi dalam fenomena runtuh tegangan (*voltage collapse*), antara lain batas kendali tegangan / daya reaktif generator, karakteristik beban, karakteristik kompensator daya reaktif, dan aksi dari divais kendali tegangan seperti transformator *on-load tap changer*.

Istilah-istilah yang terkait dengan stabilitas tegangan dapat didefinisikan sebagai berikut:

- a. Stabilitas tegangan (*voltage stability*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada seluruh bus dalam sistem agar tetap berada dalam batas toleransi tegangan, baik pada saat kondisi normal maupun setelah terkena gangguan.
- b. Runtuh tegangan (*voltage collapse*) adalah proses dimana ketidakstabilan tegangan berakhir pada nilai tegangan yang sangat rendah pada bagian penting dari sistem tenaga listrik.
- c. Keamanan Tegangan (*voltage security*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik, tidak hanya untuk beroperasi stabil, tetapi juga tetap stabil (selama sistem proteksi tetap bekerja untuk mempertahankan tegangan) setelah terjadi gangguan atau perubahan keadaan sistem yang signifikan.

Ketidakstabilan tegangan dan proses runtuh tegangan dapat terjadi dalam selang waktu beberapa detik hingga beberapa menit. Gambar 2.7 menunjukkan bahwa sejumlah komponen dan kendali sistem tenaga listrik memainkan peran dalam stabilitas tegangan. Karakteristik sistem dan gangguan akan menentukan fenomena yang penting bagi suatu sistem tenaga listrik.

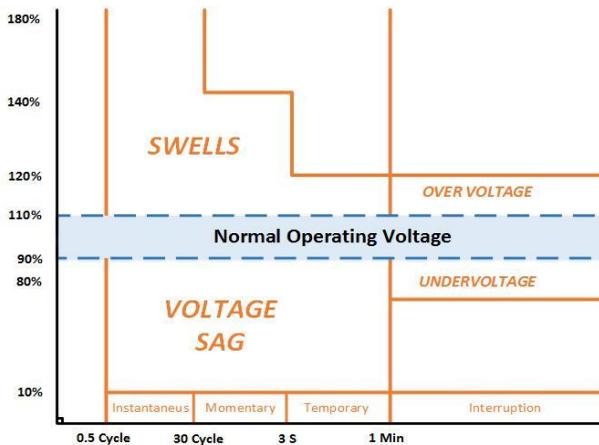
Berdasarkan rentang waktu terjadinya, stabilitas tegangan dibagi menjadi stabilitas tegangan transien (*transient voltage stability*) dan stabilitas tegangan jangka panjang (*longer-term stability*)



Gambar 2.7 Klasifikasi Stabilitas Tegangan

Setiap komponen dalam sistem tenaga listrik memberikan pengaruh terhadap stabilitas tegangan sistem tersebut, termasuk sistem pembangkitan, sistem transmisi, karakteristik beban, dan kompensator daya reaktif

Ketidakstabilan tegangan dan proses runtuh tegangan dapat terjadi dalam selang waktu beberapa detik hingga beberapa menit. Stabilitas tegangan mengacu pada kemampuan sistem daya untuk menjaga tegangan di semua bus. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan atau mengembalikan keseimbangan antara permintaan beban-beban dan suplai dari sistem daya. Macam-macam kondisi tegangan ketika terjadi gangguan ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2.8. Definisi *Voltage Magnitude Event* berdasarkan Standar IEEE 1159-1995 [8]

2.3. Standar *Undervoltage* [9]

Undervoltage adalah penurunan nilai efektif dari tegangan yang nilainya kurang dari 90% dari tegangan nominal dan durasinya lebih dari satu menit. *Undervoltage* biasanya disebabkan oleh peristiwa gangguan atau pembebanan yang berlebihan (*over load*) atau saat kondisi daya pada beban lebih besar daripada daya yang dibangkitkan, sehingga mengakibatkan terjadinya *undervoltage*. Tegangan sistem harus dipertahankan dengan batasan sebagai berikut :

Tegangan Nominal Kondisi Normal

- 500 kV +5%, -5%
- 150 kV +5%, -10%
- 70 kV +5%, -10%
- 20kV +5%, -10%

2.4. *Voltage Collapse* [9]

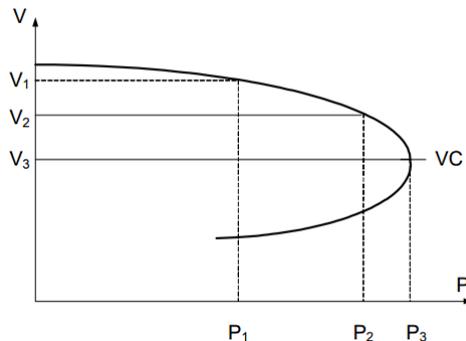
Voltage collapse adalah sebuah fenomena jatuhnya tegangan yang berkelanjutan akibat adanya gangguan, sehingga berpotensi mengakibatkan sistem kelisrikan menjadi *blackout* atau padam total. *Voltage collapse* dapat terjadi ketika daya pembangkit masih lebih besar dari pada daya yang diminta pada beban, namun karena adanya

gangguan maka sistem tidak mampu menyeimbangkan daya antara daya pembangkit dan daya beban sehingga terjadi *voltage collapse*.

Sebelum terjadi gangguan, sistem akan melemah karena pemadaman peralatan dan umumnya sangat banyak. Pemadaman ini bisa direncanakan atau dipaksakan. Karena itu, operator sistem harus sangat berhati-hati selama pemeliharaan fasilitas sistem tenaga. Tegangan pada bus utama akan mengalami penurunan menurut P-V Kurva yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Hal ini dapat dilihat pada gambar Gambar 2.9 bahwa tegangan pada sistem akan turun ketika beban dalam sistem meningkat. Secara alamiah, bentuk kurva tergantung pada topologi sistem dan kapasitas pembangkitannya. Seiring beban sistem meningkat, jika daya pembangkitan tidak mencukupi beban maka tegangan pada sistem akan drop, misalnya dari nilai V_1 ke nilai V_2 . Jika voltase turun lebih jauh sampai nilai *voltage collapse* pada nilai V_3 (VC) akan terjadi sehingga terjadi pemadaman sebagian[4].

Faktor-faktor yang dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan atau *voltage collapse* adalah:

1. Jarak yang jauh antara pembangkit dan beban
2. Cara kerja ULTC (*Under Load Tap Changer*) selama tegangan rendah
3. Pembebanan dan karakteristik beban dalam sistem yang kurang baik
4. Kordinasi yang kurang baik antara kontrol sistem dengan pengaman sistem tenaga listrik.



Gambar 2.9. Kurva PV[4]

2.5. Pencegahan Sistem *Voltage Collapse* [10]

Pada saat ini pembebanan semakin hari semakin meningkat. Seiring dengan meningkatnya pertumbuhan jumlah penduduk, pertumbuhan industri dan pertumbuhan ekonomi mengakibatkan meningkatnya kebutuhan akan tenaga listrik. Kemajuan teknologi informasi dan hiburan menyebabkan konsumsi energi listrik mengalami peningkatan yang sangat pesat. Peningkatan konsumsi energi listrik akan terus berlanjut di masa-masa yang akan datang. Pada kondisi tertentu, daya beban akan lebih besar daripada daya yang dibangkitkan. Hal tersebut merupakan salah satu yang menyebabkan meningkatnya potensi terjadinya *voltage collapse*, disamping adanya gangguan-gangguan yang dapat menyebabkan *voltage collapse* pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, perlu diambil langkah-langkah pencegahan agar tidak terjadi kegagalan sistem *voltage collapse* yang dapat mengakibatkan terjadinya *blackout*. Langkah-langkah yang dapat diambil untuk pencegahan *voltage collapse* antara lain :

1. Pemasangan kompensator daya reaktif

Pemasangan kompensator daya reaktif yang berbeda-beda dapat memberikan pengaruh kenaikan tegangan terhadap suatu bus pada sistem tenaga listrik sehingga mempengaruhi kestabilan tegangan. Adanya perbedaan kestabilan tegangan dapat diatasi dengan perencanaan skema pemasangan dan penggunaan kompensator pada lokasi dan waktu atau kondisi yang tepat. Perencanaan pemasangan kompensator harus memiliki referensi berdasarkan ukuran, rating dan lokasi yang didapatkan dari hasil studi yang mencakup semua kondisi sistem ketika stabil, kritis maupun kondisi tidak stabil dimana kompensator memiliki peran untuk menyeimbangkan kondisi tegangan pada sistem. Besaran kestabilan tegangan harus didasarkan pada perbedaan daya aktif (MW) dan daya reaktif (MVAR). Oleh karena itu, dibutuhkan pengenalan area kendali tegangan dan batasan transmisi yang menunjukkan tingkat *losses* yang besar pada suatu sistem tenaga listrik tersebut.

2. Pengendalian tegangan jaringan dan output daya reaktif generator.

Kompensasi beban dari *Automatic Voltage Regulator (AVR)* pada generator yang berfungsi untuk mengatur tegangan pada *output* generator atau sisi tegangan tinggi pada transformator penaik tegangan. Pada beberapa kondisi, hal ini memiliki efek yang menguntungkan pada kestabilan tegangan dengan memindahkan titik tegangan konstan atau pengaturan tegangan awal menjadi titik tegangan yang mendekati titik beban.

3. Koordinasi proteksi/kontrol

Salah satu penyebab dari *voltage collapse* adalah kekurangan koordinasi antara perlengkapan proteksi / kontrol dan kebutuhan sistem tenaga listrik. Koordinasi yang tepat harus didasarkan pada suatu studi fenomena dinamik. Melepas beberapa peralatan untuk menghindari kondisi beban berlebih menjadi upaya terakhir yang dapat dilakukan. Kontrol pengukuran harus dilakukan untuk mengurangi kondisi beban berlebih sebelum mengisolasi peralatan dari suatu sistem.

4. Kontrol transformator *tap changer*

Tap changer dapat dikendalikan, baik secara lokal maupun terpusat untuk mengurangi resiko dari *voltage collapse*. Ketika *tap changing* dalam kondisi rusak, metode sederhana untuk menghentikan *tap changing* ketika sumber mengalami *voltage sag* dan akan kembali normal ketika tegangan telah stabil. Ada beberapa cara untuk meningkatkan strategi kontrol ULTC. Seperti strategi harus dikembangkan berdasarkan teori tentang karakteristik beban dan sistem penyaluran tenaga listrik. Kontrol ULTC berdasarkan mikroprosesor dapat lebih fleksibel dalam mengimplementasikan strategi kontrol ULTC berdasarkan karakteristik beban. Ketika terjadi penurunan tegangan pada sisi beban, tegangan dapat turun ke level tertentu saat tegangan primer turun dibawah batas tertentu. Di lain kondisi, dimana tegangan sekunder perlu dipertahankan, kontrol ULTC secara normal dioperasikan. Adanya kemungkinan menaikkan tegangan sedikit diatas normal. Strategi tersebut bergantung pada sistem yang dioperasikan.

5. Pelepasan beban yang mengalami *undervoltage*

Untuk mengantisipasi terhadap kondisi diluar perencanaan, atau kondisi ekstrem, maka diperlukan pelepasan beban yang mengalami *undervoltage*. Hal ini hampir sama dengan pelepasan beban yang mengalami *underfrequency*. *Load shedding* dapat mencegah terjadinya penyebaran sistem yang kolaps menjadi lebih luas. Hal ini dapat dilakukan jika kondisi sistem dan kontingensi yang menyebabkan ketidakstabilan tegangan memiliki kemungkinan yang kecil untuk dapat terjadi, namun menyebabkan dampak yang serius terhadap sistem. Menentukan karakteristik dan lokasi dari beban yang akan dilepas menjadi penting untuk permasalahan

ketidakstabilan tegangan dibandingkan untuk ketidakstabilan frekuensi.

Skema pelepasan beban harus direncanakan untuk membedakan operasi pelepasan beban akibat hubung singkat, fluktuasi tegangan transien, tegangan dibawah standar yang menyebabkan *voltage collapse*.

2.6. Pelepasan Beban

Gangguan yang besar dapat menyebabkan ketidakstabilan frekuensi dan tegangan pada sistem. Ketidakstabilan tegangan seperti penurunan tegangan yang drastis dapat menyebabkan sistem mengalami pemadaman total (*blackout*). Salah satu strategi untuk mengantisipasi terhadap kemungkinan turunnya tegangan secara drastis adalah pelepasan sebagian beban yang dipikul oleh sistem [9]. Setelah sebagian beban dilepas, beban-beban yang dipikul oleh pembangkit yang masih beroperasi akan berkurang dan tegangan akan dapat kembali ke keadaan normal segera setelah terjadi keseimbangan antara pembangkitan dan pembebanan. Pelepasan beban harus dilakukan segera pada saat tegangan sistem mulai menurun dengan drastis.

Jika terjadi gangguan dalam sistem yang menyebabkan daya yang tersedia tidak dapat melayani beban, misalnya disebabkan oleh adanya saluran transmisi yang lepas, maka untuk mencegah terjadinya *collaps* pada sistem perlu dilakukan pelepasan beban. Kondisi jatuhnya salah satu unit pembangkit dapat dideteksi dengan adanya penurunan tegangan sistem yang drastis. Jika tegangan menurun, maka setelah mencapai titik puncak dilakukan pelepasan beban tahap pertama sesuai dengan tegangan yang menurun dan seterusnya sampai tahap yang telah ditentukan berdasarkan besarnya perubahan tegangan. Mencapai titik tegangan puncak yang telah mencapai keseimbangan atau normal kembali dikatakan seperti itu setelah melalui beberapa tahap pelepasan beban. Makin besar unit pembangkit yang jatuh yang berarti makin besar pula daya yang hilang, maka tegangan akan menurun dengan cepat. Selain itu kecepatan menurunnya tegangan juga tergantung pada besar kecilnya konstanta inersia sistem.

Selain penurunan tegangan, parameter lain yang digunakan pada pelepasan beban adalah frekuensi. Secara parallel penurunan daya reaktif akan mengakibatkan penurunan tegangan. Penurunan tegangan ini dapat diatasi dengan melakukan koordinasi peralatan yaitu pelepasan sementara sampai pelepasan total pengatur tegangan, pelepasan pengubah tap pada trafo, pelepasan *reactor shunt* dan penghubungan

kapasitor ke sistem. Jika dari koordinasi alat ini masih terjadi penurunan tegangan, maka dilakukan pelepasan beban dengan menggunakan rele tegangan.

Load Shedding akan membantu fungsi operator untuk memutuskan sebagian beban menurut skala prioritas sehingga diharapkan beban yang tersisa dapat ditanggung oleh generator yang masih beroperasi. Dengan demikian secara optimis generator dapat dibebani mendekati titik optimumnya (80% total kapasitas generator). Ini berarti disamping untuk mencegah terjadinya *Blackout* total, sistem *Load Shedding* ini juga dipergunakan sebagai sarana penunjang agar operasi pembangkitan listrik lebih efisien.

2.7. Perencanaan Pelepasan Beban

Pada proses pelepasan beban perlu direncanakan sebelumnya beban mana yang akan dilepas, dengan urutan prioritas. Prioritas utama yaitu beban-beban yang kurang penting karena beban-beban penting perlu mendapat pelayanan listrik secara kontinyu. Dalam pelaksanaannya pelepasan beban dapat dilakukan dengan 3 cara, yaitu:

1. Pelepasan beban manual (*Manual Load Shedding*)
2. Pelepasan beban otomatis (*Automatic Load Shedding*)
3. Pelepasan beban lebih (*Over Load Shedding*)

2.7.1 Pelepasan Beban Manual (*Manual Load Shedding*)

Pelepasan beban secara manual hanya berlaku pada kondisi sistem yang tidak kritis dan dalam hal ini operator harus mengambil inisiatif sendiri untuk melepaskan sebagian beban. Kekurangan-kekurangan pelepasan beban secara manual adalah sebagai berikut :

1. Diperlukan operator yang banyak
2. Dapat terjadi pelepasan beban berlebih (*over shedding*)
3. Kelambatan waktu bertindaknya operator

Pada kondisi yang kritis dimana arus naik sangat cepat, tindakan pelepasan beban secara manual sulit untuk mengantisipasi kenaikan arus.

2.7.2 Pelepasan Beban Otomatis (*Automatic Load Shedding*)

Pelepasan beban secara otomatis direncanakan khusus untuk mengatasi kondisi sistem yang kritis. Pelepasan beban secara otomatis menggunakan peralatan pengaman diantaranya *Underfrequency Relay* dan *Undervoltage Relay*. Dengan adanya pelepasan beban otomatis

maka sistem secara keseluruhan dapat diselamatkan dengan cepat tanpa harus menunggu operator bekerja. Dengan pelepasan beban secara otomatis dapat dilakukan mencegah *voltage collapse*.

2.7.3 Pelepasan Beban Lebih (*Overload Shedding*)

Permasalahan pokok dalam merencanakan pelepasan beban suatu sistem tenaga listrik, adalah:

1. Jumlah tingkat pelepasan beban
2. Besar beban yang dilepas pada setiap tingkat
3. Pengaturan arus setiap tingkat
4. Kelambatan waktu pada setiap tingkat pelepasan

Pelepasan beban dilakukan secara bertahap agar sistem tidak mengalami pelepasan beban yang terlalu besar atau melakukan pelepasan beban yang tidak diperlukan. Pelepasan beban ditentukan oleh besarnya kelebihan beban, hal ini dapat diartikan bahwa semakin besar kelebihan beban semakin banyak jumlah tingkat pelepasan.

2.7.4 Pelepasan Beban *Undervoltage* (*Undervoltage Load Shedding*)

Pelepasan beban mengacu kepada tegangan yang ada pada bus dalam suatu sistem. skema *undervoltage load shedding* yang digunakan yaitu dengan cara [4] :

1. Pelepasan beban sebesar 5% dari keseluruhan beban yang ada di sistem ketika diketahui tegangan pada bus jatuh sampai 0,9 pu untuk waktu minimum sebesar 3,5 detik.
2. Pelepasan beban sebesar 5% dari keseluruhan beban yang ada di sistem ketika diketahui tegangan pada bus jatuh sampai 0,92 pu untuk waktu minimum sebesar 5,0 detik.
3. Pelepasan beban sebesar 5% dari keseluruhan beban yang ada di sistem ketika diketahui tegangan pada bus jatuh sampai 0,92 pu untuk waktu minimum sebesar 8,0 detik.

Karakteristik yang paling penting dalam UVLS adalah nilai ambang tegangan (*threshold value*) = 0,85-0,95 pu, waktu tunda (*time delay*) = 1-10 detik , lokasi dan jumlah beban yang akan dilepas = 5-20%

2.8. Sensitivitas Bus [11]

Penentuan bus dengan tingkat sensitivitas tertinggi dilakukan dengan metode sensitivitas bus. Sensitivitas bus yang dimaksudkan adalah *V-Q Sensitivity analysis*, dimana nilai dV/dQ akan dijadikan sebagai acuan dalam menentukan lokasi pelepasan beban. Nilai dV/dQ

dapat dicari dengan penurunan rumus sebagai berikut. Kendala jaringan dapat direpresentasikan dalam bentuk linear sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Dimana :

ΔP = Perubahan penambahan daya aktif pada bus
 ΔQ = Perubahan penambahan daya reaktif pada bus
 $\Delta\theta$ = Perubahan sudut tegangan pada bus
 ΔV = Perubahan besar tegangan pada bus
 $J_{P\theta}, J_{PV}, J_{Q\theta},$ dan J_{QV} = Jacobian matriks

Dengan asumsi bahwa nilai $\Delta P = 0$ maka didapat,

$$\begin{aligned} \Delta Q &= (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}) \Delta V \\ \Delta V &= (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}) \Delta Q \\ &= J_R^{-1} \Delta Q \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dimana,

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] \quad (2.13)$$

Sehingga,

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} = J_R^{-1} \quad (2.14)$$

Dapat dilihat dari persamaan 2.14, rumus untuk mencari nilai sensitivitas bus. Sensitivitas V-Q bernilai positif mengindikasikan kestabilan operasi, semakin kecil nilai sensitivitas maka semakin stabil sistem tersebut [12]. Nilai sensitivitas tersebut digunakan sebagai acuan pemilihan lokasi pelepasan beban. Bus yang memiliki nilai sensitivitas tertinggi pada sistem tersebut dianggap sebagai bus terlemah. Maka pada bus tersebut akan dilakukan pelepasan beban. Semakin banyak jumlah beban (MW) yang dilepas, maka semakin baik pula kondisi tegangan sistem. Hal tersebut juga dapat dilihat dari nilai sensitivitasnya, semakin baik tegangan sistem maka semakin kecil pula nilai sensitivitas busnya.

2.9. Studi Aliran Daya

Analisa aliran daya merupakan studi dasar dalam menganalisa suatu sistem tenaga listrik, baik untuk perencanaan maupun operasi. Pada dasarnya sasaran utama dari semua analisa aliran daya adalah menentukan besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus, dengan diketahuinya tegangan maka daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat dihitung. Jika P dan Q pada dua buah bus diketahui maka aliran daya dengan jelas dapat diketahui, serta rugi-rugi daya saluran penghubung dapat diketahui. Secara umum tujuan analisa aliran daya adalah:

1. Untuk memeriksa tegangan dan sudut fasa masing-masing bus.
2. Untuk memeriksa kemampuan semua peralatan yang ada dalam sistem apakah cukup besar untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
3. Untuk memperoleh kondisi awal bagi studi-studi selanjutnya, yakni studi hubung singkat, studi rugi-rugi transmisi dan studi stabilitas.

Pada tiap-tiap bus terdiri dari 4 besaran, yaitu:

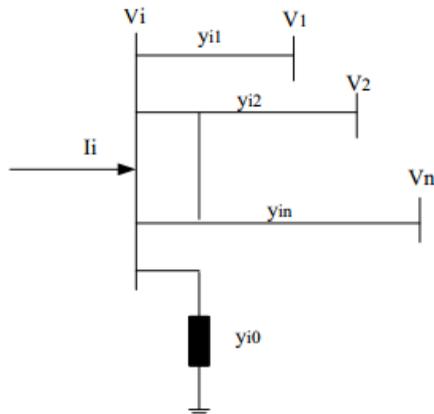
1. Daya riil atau daya aktif P
2. Daya reaktif Q
3. Harga skalar tegangan $|V|$
4. Sudut fasa tegangan θ

Ada 3 macam bus dalam hal ini setiap bus mempunyai empat besaran dengan dua besaran [9,10] diantaranya diketahui yakni:

1. Bus referensi (slack bus). Adalah bus yang selalu mempunyai besaran skalar ($|V|$) dan sudut fasa (θ) yang tetap dan telah diberikan sebelumnya, pada bus ini berfungsi untuk mencatu rugi-rugi, kekurangan daya yang ada pada jaringan, dalam hal ini penting karena kekurangan daya tidak dapat dicapai kecuali terdapat suatu bus yang mempunyai daya tak terbatas sehingga dapat mengimbangi rugi-rugi.
2. Bus beban (bus PQ). Pada tipe bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui, sedangkan dua lainnya didapat dari hasil perhitungan.
3. Bus generator (bus PV). Pada tipe bus ini, besar tegangan ($|V|$) dan daya aktif (P) telah ditentukan sedangkan daya reaktif dan sudut fasa tegangan didapat dari hasil perhitungan.

2.9.1 Persamaan Aliran Daya

Masalah aliran daya dapat didefinisikan sebagai perhitungan dari aliran-aliran daya saluran dan tegangan-tegangan bus dari suatu sistem tenaga listrik pada kondisi beban dan pembangkitan tertentu. Sistem tenaga listrik tidak hanya terdiri dari dua bus, melainkan terdiri dari beberapa bus yang saling terinterkoneksi satu sama lain. Daya listrik yang diinjeksikan generator pada salah satu bus bukan hanya diserap beban bus tersebut, melainkan dapat diserap beban bus yang lain. Kelebihan daya pada salah satu bus akan dikirim pada bus yang lain yang kekurangan daya. Gambar 2.10 memperlihatkan situasi pada salah satu bus (bus i) pada suatu sistem tenaga.



Gambar 2.10 Tipikal Bus dari Sistem Tenaga

Dengan menggunakan hukum Kirchof [9,11] untuk arus :

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (2.15)$$

$$= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \quad (2.16)$$

Atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad , j \neq i \quad (2.17)$$

Daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.18)$$

Atau

$$I_i = (P_i - jQ_i)/V_i^* \quad (2.19)$$

Substitusi untuk I_i pada persamaan berikut, hasilnya :

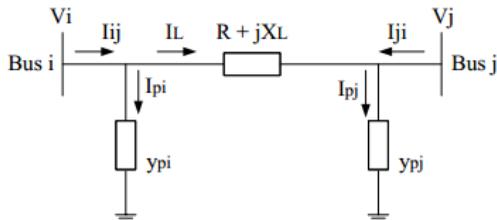
$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad , j \neq i \quad (2.20)$$

Dari hubungan di atas formulasi perhitungan dari aliran daya dalam sistem tenaga harus diselesaikan dengan teknik iterasi.

2.9.2 Aliran Daya dan Rugi-rugi Daya pada Saluran

Setelah penentuan dari bus tegangan, langkah berikutnya adalah perhitungan aliran daya dan rugi-rugi daya pada saluran. Saluran dihubungkan ke bus i dan bus j seperti gambar 2.11 di bawah, arus pada saluran I_{ij} dihitung dari bus yang ditandai positif. Besar arus I_{ij} dapat dihitung dengan persamaan:

$$I_{ij} = I_l + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (2.21)$$



Gambar 2.11 Model Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya dan Rugi Saluran

Sebaliknya untuk arus I_{ji} yang diukur pada bus j dan ditandai positif dalam arah $i - j$ dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$I_{ji} = -I_l + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (2.22)$$

Untuk perhitungan daya kompleks S_{ij} dari bus i ke bus j dan sebaliknya adalah :

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.23)$$

$$S_{ij} = V_i I_{ji}^* \quad (2.24)$$

Maka rugi-rugi total saluran $i - j$ merupakan penjumlahan aljabar dari persamaan 2.23 dan 2.24

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.25)$$

2.9.3 Metode Newton Raphson

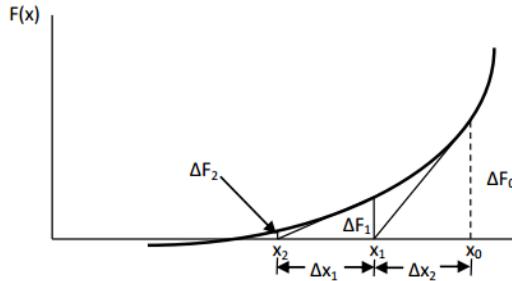
Load Flow merupakan langkah awal dalam penentuan parameter-parameter awal yang kemudian akan dilakukan iterasi pada langkah selanjutnya. Dalam proses ini akan dilakukan pembacaan data dan pemilahan data-data yang diperlukan. Selanjutnya akan dilakukan penomoran pada bus-bus yang terhubung, baik bus beban ataupun bus generator dalam bentuk matrik Y_{bus} .

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Setelah dilakukan pembacaan data maka dilakukan perhitungan untuk mengetahui aliran daya dari sistem. *Load flow* dapat dihitung dari matrik admitansi sistem. Secara umum, persamaan *load flow* dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \quad (2.27)$$

Metode Newton Raphson merupakan sebuah metode yang dikembangkan dari Deret Taylor mendapatkan turunan persamaan matematika dalam penentuan matrik Jacobian sebagai dasar perhitungan iterasinya. Metode ini dapat diaplikasikan pada sistem dengan banyak persamaan yang belum dikahui. Secara ilustrasi, metode Newton Raphson dapat digambarkan seperti Gambar 2.12 dibawah ini.



Gambar 2.12 Ilustrasi Metode Newton Raphson

Untuk persamaan Deret Taylor dapat ditulis seperti persamaan dibawah ini:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{1}{1!} \frac{df(x_0)}{dx} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2f(x_0)}{dx^2} (x - x_0)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} (x - x_0)^n = 0 \quad (2.28)$$

Dalam perhitungan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat diturunkan dari persamaan :

$$P = V I \cos \theta \quad (2.29)$$

Dimana

$$I = V . Y \quad (2.30)$$

dengan mestubstitusi persamaan (2.30) kedalam persamaan (2.29) maka akan didapat didapat persamaan (2.31) :

$$P = V_1 V_2 Y \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (2.31)$$

Jika persamaan tersebut diaplikasikan pada analisa banyak mesin / multimesin, maka persamaan yang didapat:

$$P_1 = Y_{11} V_1 V_1 \cos(\theta_{11} + \delta_1 - \delta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (2.32)$$

$$P_1 = V_1^2 Y_{11} \cos(\theta_{11}) + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots \\ + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (2.33)$$

dengan menstutbitusikan persamaan (2.34) kedalam persamaan (2.35)

$$Y = G + jB \quad (2.34)$$

$$G = Y \cos \theta ; B = Y \sin \theta \quad (2.35)$$

maka didapat persamaan,

$$P_1 = V_1^2 G_{11} + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots \\ + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (2.36)$$

begitu pula untuk menghitung daya pada bus yang lain, dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_i^n, i \neq j \sum_j^n Y_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \delta_i + \delta_j) \quad (2.37)$$

Pada persamaan Q juga dapat diturunkan dari persamaan

$$Q = VI \sin \theta \quad (2.38)$$

Sehingga,

$$Q = V_1 V_2 Y \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (2.39)$$

jika persamaan tersebut diaplikasikan pada analisa banyak mesin/ multimesin, maka persamaan yang didapat :

$$Q_1 = Y_{11} V_1 V_1 \sin(\theta_{11} + \delta_1 - \delta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) \\ + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (2.40)$$

$$Q_1 = V_1^2 Y_{11} \sin(\theta_{11}) + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots \\ + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (2.41)$$

Dengan menstutbitusikan persamaan (2.34) kedalam persamaan (2.41) maka didapat persamaan,

$$Q_1 = V_1^2 B_{11} + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots \\ + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (2.42)$$

Jika pada banyak mesin/ multimesin, maka persamaan yang didapat:

$$Q_i = V_i^2 B_{ii} + \sum_i^n, i \neq j \sum_j^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \delta_i + \delta_j) \quad (2.42)$$

Dimana :

P_i = daya aktif terbangkit pada bus ke-i

Q_i = daya reaktif terbangkit pada bus ke-i

Y_{ij}, θ_{ij} = magnitudo dan sudut phasa elemen matrik admitansi Y

V_i, δ_i = magnitudo tegangan dan sudut phasa pada bus ke-i

V_j, δ_j = magnitudo tegangan dan sudut phasa pada bus ke-j

Kemudian, setelah daya dan tegangan tiap bus diketahui, maka akan ditentukan matrik Jacobian untuk iterasi selanjutnya. Matrik Jacobian sendiri terdiri dari komponen H, komponen N, komponen J, dan komponen L.

$$Jacobian\ matrik = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Dimana :

$$H = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \quad (2.44)$$

$$N = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (2.45)$$

$$J = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \quad (2.46)$$

$$N = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (2.47)$$

Sehingga, untuk mencari aliran daya setiap bus dapat ditulis persamaan dari *load* sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Selanjutnya dari perkalian matrik Jacobian diatas, akan didapat nilai dari $\Delta\theta_i$ dan $\Delta|V|_i$ yang digunakan sebagai update sudut dan magnitudo tegangan tiap bus.

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \Delta\theta_i \quad (2.49)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V|_i \quad (2.50)$$

Dimana,

$(k + 1)$ = jumlah iterasi newton raphson

$\Delta\theta_i$ = Perubaha sudut tegangan pada bus ke-i

$\Delta|V|_i$ = Perubahan magnitudo tegangan pada bus ke-i

Kemudian selisih daya aktif dan reaktif tiap bus yang baru dengan yang lama akan dibandingkan dengan ketelitian yang telah ditentukan. Apabila nilai ketelitian telah tercapai, maka proses iterasi selesai, namun sebaliknya, jika nilai ketelitian belum tercapai maka iterasi akan dilanjutkan.

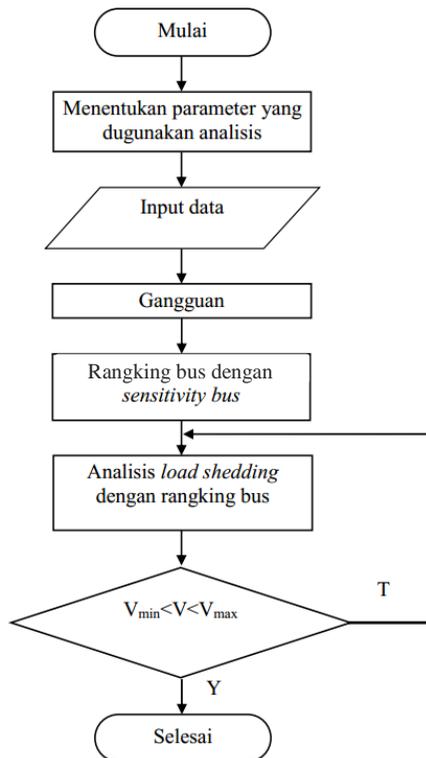
Hubungan daya aktif dan daya reaktif tiap bus akan di gambarkan secara kontinyu untuk mendapatkan Kurva PV. Kurva P-V adalah kurva yang menggambarkan karakteristik tegangan seiring dengan perubahan beban daya aktif yang terus meningkat. Kurva ini dihasilkan dengan sederet solusi aliran daya dengan tingkat beban yang berbeda-beda. Titik kritis ketika terjadi kenaikan beban merupakan hal yang sangat penting untuk diketahui karena dapat menyebabkan jatuh tegangan (*voltage collapse*). *Continuation Power Flow* pada umumnya menggunakan metode newton raphson untuk menghitung aliran daya dari sebuah sistem tenaga yang digunakan sebagai data awal, dimana data tersebut akan diolah untuk membentuk kurva P-V dengan adanya penambahan beban secara terus menerus, namun dalam kondisi penggunaan metode newton raphson pada sistem tertentu membuat Matriks Jacobian yang dihasilkan menjadi singular, dampak dari hal tersebut akan menghasilkan numerical perhitungan yang sulit sehingga dilakukan analisa dengan simulasi [14]

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN JAWA-BALI 500 KV

3.1 Metodologi Pelaksanaan Studi

Untuk melakukan analisa *undervoltage load shedding* pada sistem Jawa-Bali 500 kV dengan mempertimbangkan sensitivitas bus dengan metode *bus Sensitivity* dalam tugas akhir ini, digunakan metodologi yang dapat digambarkan dalam diagram alir pada gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan

Berdasarkan gambar 3.1 maka metodologi untuk analisa simulasi *undervoltage load shedding* pada sistem Jawa-Bali 500 kV dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Pengambilan Data

Penulis melaksanakan pengambilan data yang berupa data pembangkitan dan data beban pada sistem Jawa-Bali 500 kV, sedangkan simulasi gangguan menggunakan software ETAP.

2. Simulasi dan Analisa Data

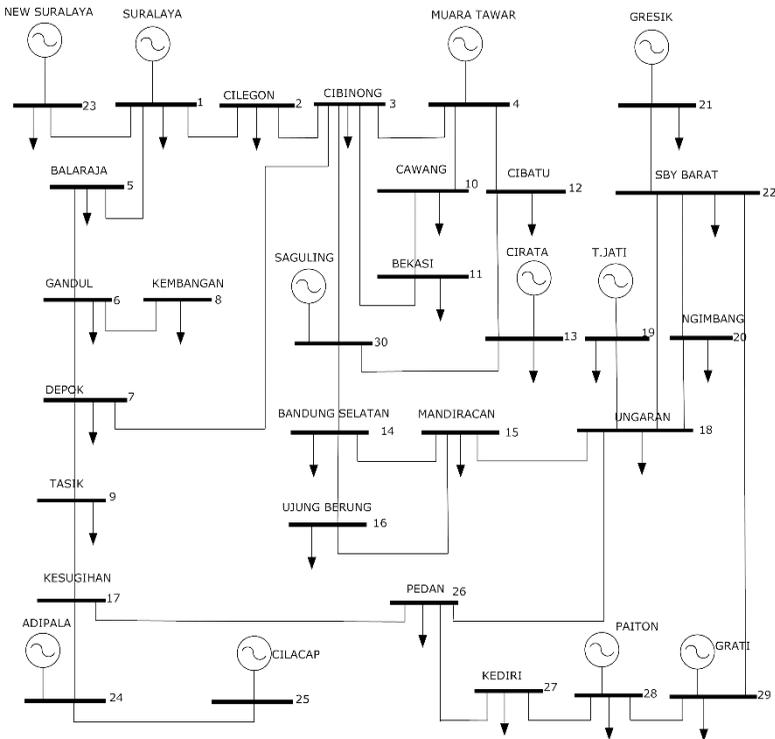
Langkah awal yang dilakukan untuk mekanisme pelepasan beban dengan mempertimbangkan sensitivitas bus adalah memasukkan data-data pembangkitan, data pembebanan dan data saluran tiap bus pada software ETAP. Setelah memasukkan parameter kemudian dilakukan *running* analisa aliran daya untuk memperoleh nilai tegangan pada tiap bus. Nilai tegangan tiap bus yang didapatkan dari analisa aliran daya tersebut digunakan sebagai kondisi awal. Untuk simulasi pemberian gangguan (*disturbance*) dengan cara menambahkan jumlah beban tiap bus agar sistem menjadi *undervoltage* kemudian dilakukan analisa aliran daya kembali untuk memperoleh nilai tegangan setelah terjadi gangguan. Dari hasil *running* analisa aliran daya setelah terjadi gangguan, penulis melakukan analisa *load shedding* dengan mempertimbangkan sensitivitas bus. Metode sensitivitas bus ini didasarkan pada nilai *bus sensitivity* tiap bus pada sistem Jawa-Bali 500 KV dari software Powerworld. Kemudian , langkah selanjutnya adalah menganalisa hasil simulasi, apakah tegangan setelah dilakukan *load shedding* sudah memenuhi standar yang telah ditentukan.

3. Penarikan Kesimpulan

Dari hasil analisa data, penulis dapat menarik kesimpulan yang merupakan jawaban dari permasalahan.

3.2 Sistem Kelistrikan Jawa-Bali 500 KV

Interkoneksi sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV yang digunakan untuk analisa *undervoltage load shedding* dapat digambarkan dengan *single line diagram* dapat ditunjukkan pada gambar 3.2 di bawah.



Gambar 3.2 Sistem Kelistrikan Jawa-Bali 500 kV

Data saluran dan data bus yang digunakan sebagai masukan untuk proses simulasi seperti yang ditunjukkan tabel 3.1. Dimana impedansi base ($Z_B = 2500 \Omega$) dan admitansi base ($Y_B = 0,0004 \text{ U}$).

Tabel 3.1 Data Saluran Sistem Jawa-Bali 500 kV

No	Dari Bus	Nama Bus	Ke Bus	Nama Bus	R (pu)	X (pu)	Y (pu)
1	1	SURALAYA	2	CILEGON	0,000063	0,000701	0,015411

Tabel 3.1 Data Saluran Sistem Jawa-Bali 500 kV (Lanjutan)

No	Dari Bus	Nama Bus	Ke Bus	Nama Bus	R (pu)	X (pu)	Y (pu)
2	1	SURALAYA	23	NEW SURALAYA	0,000015	0,000141	0,000775
3	1	SURALAYA	5	BALARAJA	0,000368	0,003533	0,077826
4	2	CILEGON	3	CIBINONG	0,001313	0,014693	0,080767
5	3	CIBINONG	30	SAGULING	0,000411	0,004600	0,101136
6	4	MUARA TAWAR	3	CIBINONG	0,000621	0,005968	0,032862
7	4	MUARA TAWAR	10	CAWANG	0,000563	0,005405	0,029762
8	6	GANDUL	5	BALARAJA	0,000298	0,002862	0,063046
9	6	GANDUL	8	KEMBANGAN	0,000151	0,001693	0,037223
10	7	DEPOK	3	CIBINONG	0,000091	0,000877	0,019308
11	7	DEPOK	6	GANDUL	0,000035	0,000333	0,007345
12	7	DEPOK	9	TASIK MALAYA	0,001403	0,015697	0,345147
13	11	BEKASI	3	CIBINONG	0,000444	0,004268	0,023500
14	11	BEKASI	10	CAWANG	0,000197	0,001896	0,010441
15	12	CIBATU	13	CIRATA	0,000274	0,002632	0,057982
16	12	CIBATU	4	MUARA TAWAR	0,000282	0,002711	0,059720
17	14	BANDUNG SELATAN	16	UJUNG BERUNG	0,000385	0,003703	0,020393
18	15	MANDIRACAN	14	BANDUNG SELATAN	0,001398	0,013433	0,073971
19	15	MANDIRACAN	16	UJUNG BERUNG	0,001013	0,009732	0,053590
20	15	MANDIRACAN	18	UNGERAN	0,001346	0,012935	0,284908
21	17	KESUGIHAN	9	TASIK MALAYA	0,000545	0,006093	0,133984
22	18	UNGERAN	26	PEDAN	0,000904	0,008681	0,047805
23	18	UNGERAN	20	NGIMBANG	0,002348	0,022558	0,124218
24	18	UNGERAN	19	TANJUNG JATI	0,000677	0,007570	0,166461
25	20	NGIMBANG	22	SURABAYA BARAT	0,000597	0,005740	0,031610
26	21	GRESIK	22	SURABAYA BARAT	0,000140	0,001346	0,029638

Tabel 3.1 Data Saluran Sistem Jawa-Bali 500 kV (Lanjutan)

No	Dari Bus	Nama Bus	Ke Bus	Nama Bus	R (pu)	X (pu)	Y (pu)
27	22	SURABAYA BARAT	18	UNGARAN	0,002979	0,028623	0,157614
28	22	SURABAYA BARAT	29	GRATI	0,000399	0,004460	0,098061
29	24	ADIPALA	17	KESUGIHAN	0,000055	0,000633	0,015627
30	25	CILACAP	24	ADIPALA	0,000019	0,000219	0,005412
31	26	PEDAN	27	KEDIRI	0,001027	0,011485	0,252531
32	26	PEDAN	17	KESUGIHAN	0,000984	0,011007	0,242035
33	28	PAITON	27	KEDIRI	0,001027	0,011485	0,252531
34	28	PAITON	29	GRATI	0,000441	0,004934	0,108500
35	30	SAGULING	14	BANDUNG SELATAN	0,000196	0,002190	0,048160
36	30	SAGULING	13	CIRATA	0,000147	0,001417	0,031208

Data pembangkitan dan beban yang digunakan pada sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV mengacu pada realisasi aliran daya pada kasus *undervoltage* tanggal 24 April 2016 jam 13.30 WIB. Penurunan tegangan yang dimaksud berada pada kurang dari 5% dari nilai tegangan nominal sistem tegangan 500 kV. Data pembangkitan dan data bus yang digunakan sebagai masukan untuk proses simulasi seperti yang ditunjukkan tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data Pembangkitan Sistem Jawa-Bali 500 kV

No Bus	Bus Code	Nama Bus	Load		Generator	
			MW	MVAR	MW	MVAR
1	2	SURALAYA	68	105	2055	650,8
2	0	CILEGON	90	99	544	126,246
3	0	CIBINONG	453	183	0	0
4	2	MUARA TAWAR	0	0	731	430,301
5	0	BALARAJA	771	173	0	0
6	0	GANDUL	571	-59	0	0
7	0	DEPOK	434	23	0	0

Tabel 3.2 Data Pembangkitan Sistem Jawa-Bali 500 kV (Lanjutan)

No Bus	Bus Code	Nama Bus	Load		Generator	
			MW	MVAR	MW	MVAR
8	0	KEMBANGAN	215	103	0	0
9	0	TASIKMALAYA	147	57	0	0
10	0	CAWANG	340	42	0	0
11	0	BEKASI	1087	92	0	0
12	0	CIBATU	849	269	0	0
13	2	CIRATA	462	93	395	476,563
14	0	BANDUNG SELATAN	241	146	0	0
15	0	MANDIRACAN	138	117	0	0
16	0	UJUNG BERUNG	0	2	-14	13,227
17	0	KESUGIHAN	0	0	0	0
18	0	UNGARAN	155	225	111	29,225
19	2	TANJUNG JATI	63	69	1927	851,296
20	0	NGIMBANG	148	-15	0	0
21	2	GRESIK	165	-75	383	333,208
22	0	SURABAYA BARAT	950	311	0	0
23	2	NEW SURALAYA	38	-42	0	0
24	2	ADIPALA	0	0	0	0
25	2	CILACAP	0	0	0	0
26	0	PEDAN	424	159	0	0
27	0	KEDIRI	384	68	0	0
28	2	PAITON	603	34	2623	563,097
29	2	GRATI	452	138	189	210,668
30	1	SAGULING	0	0	423,5	428,132

Dari tabel 3.2 didapatkan nilai total beban pada sistem Jawa-Bali 500 kV sebesar 9248 MW dan 2313 MVAR.

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab 4 ini akan dilakukan simulasi untuk membuktikan kesesuaian metode dan pemodelan yang telah dirancang. Simulasi dilakukan pada sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV pada kasus *undervoltage* pada tanggal 24 April 2016 yang ada pada PT.PLN (Persero) guna mengetahui bus yang mengalami *undervoltage* dan untuk mencegah terjadinya *voltage collapse* maka dilakukan metode *load shedding* berdasarkan *bus sensitivity*.

4.1 Data Simulasi

Pada tugas akhir ini data untuk simulasi yang diperlukan adalah data sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV pada tanggal 24 April 2016 pukul 13.30 WIB. Pemodelan sistem Jawa-Bali dalam bentuk *single line diagram*. Data parameter yang digunakan meliputi data saluran (*line*), data pembangkit (*generation*), dan data beban (*load*) pada aliran daya 500 kV pada saat terjadi penurunan tegangan terendah pada sistem pukul 13.30 WIB. Dimana jumlah total beban yang terpasang pada sistem Jawa-Bali 500kV adalah 9248 MW dan 2313 MVAR.

4.2 Analisis Undervoltage Bus

Analisa *undervoltage* bus digunakan untuk mengidentifikasi bus yang mengalami penurunan tegangan dibawah standar yaitu kurang dari 5% dari nilai tegangan nominal sistem tegangan 500 kV. Pada analisa *undervoltage* bus dilakukan perhitungan dengan Metode Newton Raphson pada masing-masing bus pada jaringan Jawa-Bali 500 kV. Hasil *running* perhitungan dengan ETAP 12.6 dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Tegangan Bus Sistem Jawa-Bali 500 kV

No	Nama Bus	kV	V(pu)
1	Suralaya	487,527	0,975054
2	Cilegon	487,185	0,97437
3	Cibinong	476,868	0,953736
4	Muara Tawar	479,471	0,958942

Tabel 4.1. Tegangan Bus Sistem Jawa-Bali 500 kV (Lanjutan)

No	Nama Bus	kV	V(pu)
5	Balaraja	478,867	0,957734
6	Gandul	476,602	0,953204
7	Depok	476,575	0,95315
8	Kembangan	475,526	0,951052
9	Tasikmalaya	475,605	0,95121
10	Cawang	474,631	0,949262
11	Bekasi	473,785	0,94757
12	Cibatu	478,833	0,957666
13	Cirata	483,137	0,966274
14	Bandung Selatan	479,724	0,959448
15	Mandiracan	478,014	0,956028
16	Ujung Berung	479,257	0,958514
17	Kesugihan	478,007	0,956014
18	Ungaran	490,751	0,981502
19	Tanjung Jati	513,405	1,02681
20	Ngimbang	499,471	0,998942
21	Gresik	503,831	1,007662
22	Surabaya Barat	501,493	1,002986
23	Suralaya	487,554	0,975108
24	Adipala	478,011	0,956022
25	Cilacap	478,011	0,956022
26	Pedan	483,618	0,967236
27	Kediri	494,122	0,988244
28	Paiton	512,197	1,024394
29	Grati	505,843	1,011686
30	Saguling	482,649	0,965298

Berdasarkan Tabel 4.1 diatas, didapatkan bus dengan nilai tegangan dibawah standar yaitu di bus Bekasi dan bus Cawang, dengan nilai tegangan yang didapatkan pada masing-masing bus sebesar 473,785kV dan 474,631 kV. Sehingga bus tersebut yang akan diamati untuk mengetahui pengaruh dan respon dari *undervoltage load shedding* yang akan dilakukan untuk meghindari terjadinya *voltage collapse* di sistem Jawa-Bali 500 kV.

4.3 Analisis Sensitivitas Bus

Analisa sensitivitas digunakan untuk mengetahui bus dengan sensitivitas tertinggi yang dianggap bus terlemah. *Bus sensitivity* atau Sensitivitas VQ bernilai positif mengindikasikan kestabilan operasi, semakin kecil nilai sensitivitas maka semakin stabil sistem tersebut. Bus dengan sensitivitas tertinggi akan digunakan sebagai acuan pemilihan lokasi pelepasan beban. Semakin banyak jumlah beban (MW) yang dilepas, maka semakin baik pula kondisi tegangan sistem. Hal tersebut juga dapat dilihat dari nilai sensitivitasnya, semakin baik tegangan sistem maka semakin kecil pula nilai sensitivitas busnya. Sensitivitas bus dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2. Hasil Rangkang Sensitivitas Tegangan Bus

No Bus	Nama Bus	<i>Bus Sensitivity</i>	Rangkang Sensitivitas
14	Saguling	0	1
13	Cirata	-0,00010867	2
12	Cibatu	-0,00030116	3
10	Muara Tawar	-0,00049638	4
3	Cawang	-0,0009466	5
6	Bekasi	-0,00112942	6
15	Bandung Selatan	-0,00154422	7
8	Cibinong	-0,00152171	8
2	Cilegon	-0,00184193	9
26	Suralaya Baru	-0,00185436	10
1	Suralaya	-0,00185447	11
9	Depok	-0,00189955	12

Tabel 4.2. Hasil Rangkaian Sensitivitas Tegangan Bus (Lanjutan)

No Bus	Nama Bus	<i>Bus Sensitivity</i>	Rangking Sensitivitas
4	Balaraja	-0,00190161	13
7	Gandul	-0,00190549	14
5	Kembangan	-0,00191082	15
27	Ujungberung	-0,00426672	16
16	Mandirancan	-0,00713521	17
11	Tasikmalaya	-0,00896189	18
28	Kesugihan	-0,01209964	19
29	Adipala	-0,01211316	20
30	Cilacap	-0,01211591	21
18	Ungaran	-0,01509349	22
19	Pedan	-0,01532149	23
17	Tanjung Jati	-0,01616371	24
24	Kediri	-0,01740688	25
20	Ngimbang	-0,01775131	26
22	Surabaya Barat	-0,01824092	27
21	Gresik	-0,01827618	28
25	Paiton	-0,01830378	29
23	Grati	-0,0184598	30

Berdasarkan tabel 4.2 dapat diketahui rangking bus yang paling sensitif dari sistem Jawa-Bali 500kV yang didapatkan dari software Powerworld. Hasil dari rangking ini digunakan sebagai acuan urutan *load shedding* pada sistem untuk menyelamatkan sistem agar tidak terjadi *voltage collapse*.

4.4 Simulasi dan Analisis Jaringan

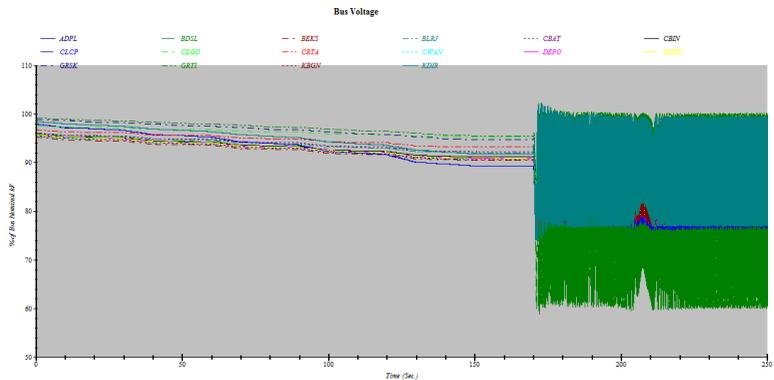
Sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV terdiri dari total 30 bus dengan 10 pembangkit dan 25 bus beban. *Undervoltage Load Shedding* (UVLS) akan di implementasikan pada 25 bus beban. Simulasi dibuat

dalam domain waktu. Total waktu selama 250 detik. Setiap 10 detik akan dilakukan penambahan beban sebesar 10% pada 8 bus (Bandung Selatan, Bekasi, Balaraja, Cawang, Cibatu, Cibinong, Cilegon, Cirata). 10 detik selanjutnya dilakukan penambahan beban pada 8 bus (Depok, Gandul, Grati, Gresik, Kediri, Kembangan, Krian Dan Mandiracan), 10 detik selanjutnya dilakukan penambahan beban pada bus (Suralaya Baru, Ngimbang, Paiton, Pedan, Suralaya, Tasikmalaya, Tanjung Jati, Ujung Berung dan Ungaran). Sehingga pada detik ke 30 telah terjadi kenaikan beban pada keseluruhan bus. Penambahan beban terus dilakukan sehingga pada detik ke 150 terjadi kenaikan beban sebesar 50% pada semua bus. Sehingga mengakibatkan sistem mulai mengalami penurunan tegangan secara progresif pada sistem Jawa-Bali 500 kV. Pada detik ke 170 terjadi kontingensi berupa saluran lepas yang terjadi pada saluran Pedan-Kesugihan yang akan mengakibatkan sistem terjadi *voltage collapse*. Kenaikan beban dilakukan dengan bertahap agar didapatkan kenaikan beban secara halus (*smooth*).

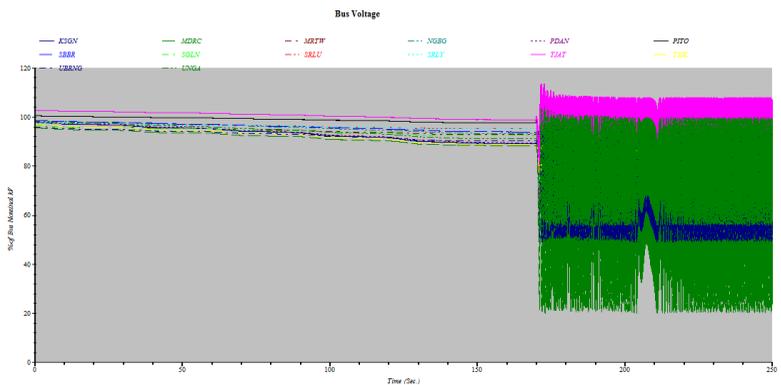
Simulasi dilakukan dengan cara membandingkan sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV dengan mengimplementasikan dan tanpa mengimplementasikan UVLS dalam mencegah *voltage collapse*. Simulasi untuk sistem tenaga listrik yang digunakan pada tugas akhir adalah dengan menggunakan ETAP 12.6. Metode Newton Raphson digunakan untuk perhitungan aliran daya sistem kelistrikan yang disimulasikan. *Initial load flow* di atur dengan *max iteration* sebesar 99 dan *solution precision* 0,00001.

4.4.1 Simulasi dan Analisis tanpa UVLS

Hasil Simulasi sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV tanpa implementasi dari UVLS. Respon sistem tanpa UVLS ditunjukkan pada gambar 4.1, gambar 4.2. Dari gambar dapat diketahui saat terjadi penambahan beban secara kontinyu maka akan menyebabkan penurunan tegangan karena daya yang dibangkitkan lebih kecil dari daya yang ada di beban, dan dengan kontingensi berupa saluran lepas di Pedan-Kesugihan yang akan menyebabkan *voltage collapse* pada semua bus dalam sistem.



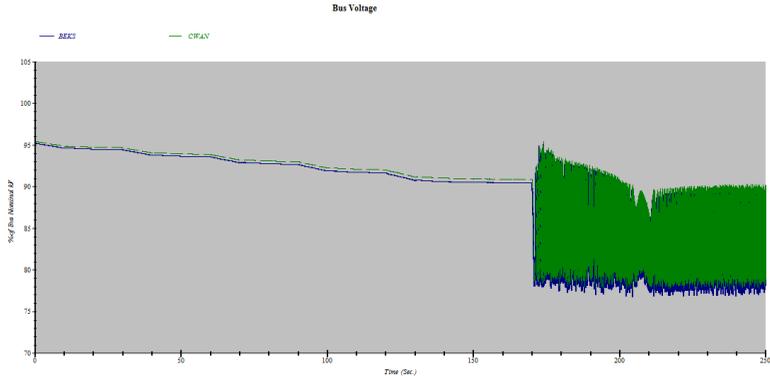
Gambar 4.1 Tegangan pada Bus 1-15 (% of Bus nominal kV) tanpa UVLS



Gambar 4.2 Tegangan pada Bus 16-30 (% of Bus nominal kV) tanpa UVLS

Dari gambar 4.1 dan gambar 4.2 menampilkan nilai tegangan pada semua bus yang terdapat pada sistem Jawa-Bali 500 kV mengalami penurunan tegangan dan terjadi *voltage collapse* setelah kontingensi. Respon tegangan pada bus mengalami penurunan tegangan akibat penambahan beban pada sistem. Penurunan tegangan yang ditampilkan gambar 4.1 dan gambar 4.2 terlihat sangat kecil dari detik ke-0 sampai dengan detik ke-150. Pada saat detik ke-150 terjadi penurunan tegangan sehingga nilai tegangan pada bus turun mendekati 0,9 pu. Pada saat memasuki detik ke-170 terjadi kontingensi berupa *tripping of line* pada

saluran Pedan-Kesugihan. Karena sistem sudah tidak mampu mempertahankan kestabilan tegangan maka terjadi *voltage collapse* pada sistem.



Gambar 4.3 Tegangan pada Bus Bekasi dan Cawang (% of Bus nominal kV) tanpa UVLS

Pada gambar 4.3 menunjukkan bus Bekasi dan Cawang yang merupakan bus dengan nilai tegangan terendah pada sistem Jawa-Bali 500 kV. Pada bus Bekasi, saat detik ke-0 tegangan terbaca sebesar 473,785 kV (0,94757 pu) mengalami penurunan tegangan secara perlahan hingga detik ke-150 terbaca tegangan sebesar 464,232 kV (0,928464 pu). Kemudian saat memasuki detik ke-160 tegangan bus terbaca sebesar 451,441 kV (0,902882 pu). Sedangkan pada bus Cawang, saat detik ke-0 tegangan terbaca sebesar 474,631 kV (0,949262 pu) mengalami penurunan tegangan secara perlahan hingga detik ke-150 terbaca tegangan sebesar 465,5665 (0,931133 pu). Kemudian saat memasuki detik ke-160 tegangan bus terbaca sebesar 453,3255kV (0,906651pu), yang berarti tegangan sistem Jawa-Bali 500 kV sudah berada jauh dibawa standar tegangan PLN. Pada saat terjadi kontingensi, yaitu pada detik ke-170 dan mengakibatkan terjadinya *voltage collapse*.

4.4.2 Simulasi dan Analisis dengan UVLS

Simulasi dengan sistem UVLS yang terpasang pada sistem Jawa - Bali 500 kV ditunjukkan pada gambar 4.4. Analisa dengan implementasi UVLS dalam sistem Jawa-Bali 500kV akan ditunjukkan dengan respon kenaikan tegangan pada bus Bekasi dan bus Cawang yang merupakan bus dengan tegangan terendah pada sistem.

Penerapan skema *Undervoltage Load Shedding Guideline* yang digunakan yaitu dengan cara [13] :

1. Pelepasan beban sebesar 5% dari keseluruhan beban yang ada di sistem ketika diketahui tegangan pada bus jatuh sampai 0,9 pu untuk waktu minimum sebesar 3,5 detik.
2. Pelepasan beban sebesar 5% dari keseluruhan beban yang ada di sistem ketika diketahui tegangan pada bus jatuh sampai 0,92 pu untuk waktu minimum sebesar 5,0 detik.
3. Pelepasan beban sebesar 5% dari keseluruhan beban yang ada di sistem ketika diketahui tegangan pada bus jatuh sampai 0,92 pu untuk waktu minimum sebesar 8,0 detik.

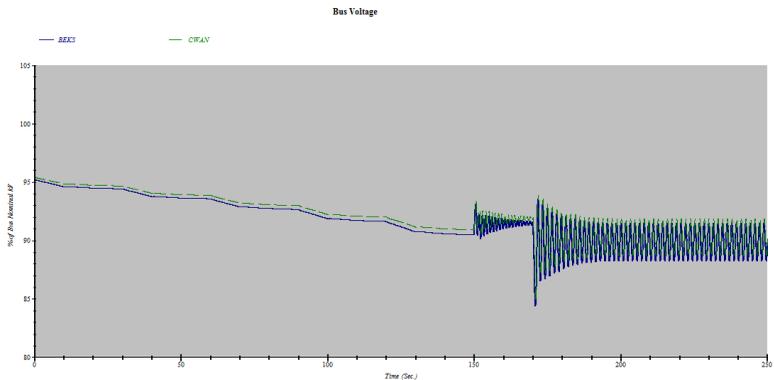
Karakteristik yang paling penting dalam *Undervoltage Load Shedding Guideline* adalah nilai ambang tegangan (*threshold value*) = 0,85-0,95 pu, waktu tunda (*time delay*) = 1-10 detik , jumlah beban yang akan dilepas = 5-20% [4]. Tahapan diatas merupakan skenario dasar dalam mengimplementasikan *Undervoltage Load Shedding* (UVLS) dalam sistem Jawa-Bali 500 kV. Berikut ini akan dilakukan analisa *Undervoltage Load Shedding* (UVLS) dengan variasi jumlah pelepasan beban yang dilakukan antara pelepasan beban sebesar 5% hingga 20% dari keseluruhan beban yang ada di sistem.

4.4.2.1 UVLS 1

Undervoltage Load Shedding 1 dilakukan dengan melepas beban di bus dengan rangking sensitivitas tertinggi yaitu Cirata, karena di bus Saguling tidak terdapat beban yang masuk ke sistem. Beban dilepas sebesar 5% dari total beban dengan waktu pelepasan pada detik ke-150.

$$\text{Beban Lepas} = 5\% \times \text{Total beban}$$

$$\text{Beban Lepas} = \frac{5}{100} \times 9248 \text{ MW} = 462 \text{ MW}$$

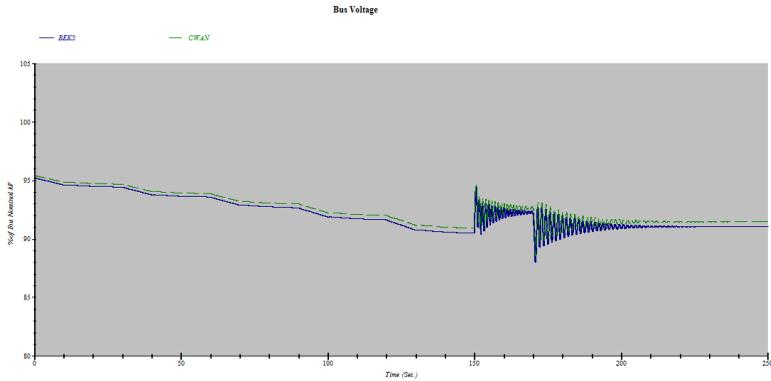


Gambar 4.4 Tegangan Bus Bekasi dan Cawang dengan UVLS 1

Dari gambar 4.4 menunjukkan respon tegangan setelah dilakukan *Load Shedding* 1. Dapat dilihat bahwa sistem mengalami ketidakstabilan tegangan mulai detik ke-170 akibat adanya kontingensi berupa saluran lepas antara Pedan dan Kesugihan, hal ini menunjukkan bahwa jumlah beban yang dilepas untuk mengatasi ketidakstabilan tegangan dan mencegah *voltage collapse* tidak mencukupi maka diperlukan penambahan beban untuk dilakukan pelepasan beban, sehingga dilakukan analisa *Undervoltage Load Shedding* 2 berupa pelepasan dengan referensi tegangan dibawah 0,9 pu dan waktu minimum 3,5 detik dengan total penambahan jumlah beban (MW) yang dilepas sebesar 10% dari total beban dalam sistem.

4.4.2.2 UVLS 2

Undervoltage Load Shedding 2 dilakukan dengan melepas beban di bus Cirata dan Cibatu. Total beban yang akan dilepas sebesar 10% dari total beban, pelepasan beban dilakukan pada detik ke-150.

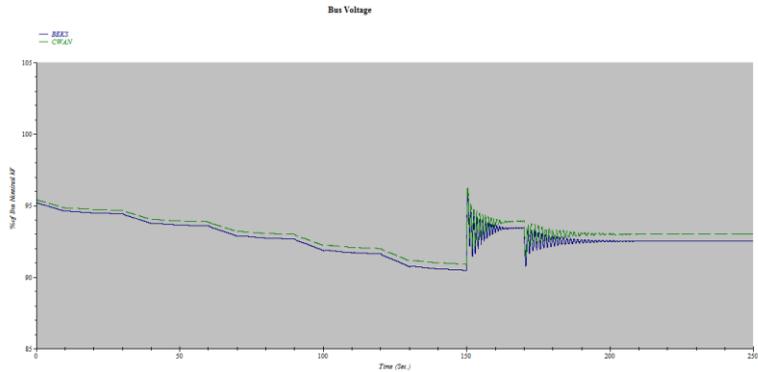


Gambar 4.5 Tegangan Bus Bekasi dan Cawang dengan UVLS 2

Dari gambar 4.5 menunjukkan respon tegangan pada bus Bekasi dan bus Cawang setelah dilakukan *Load Shedding 2*. Dapat dilihat bahwa sistem tidak mengalami *voltage collapse* meskipun terjadi kontingensi pada detik ke-170. Dari gambar 4.5 terlihat bahwa tegangan pada bus Bekasi pada detik ke-250 sebesar 455,265 kV (0,910529 pu) sedangkan tegangan pada bus Cawang sebesar 457,344 kV (0,914687 pu). Sehingga didapatkan bahwa pelepasan beban sebesar 10% dari keseluruhan beban dalam sistem dapat mencegah *voltage collapse* dan dapat menjaga kestabilan tegangan namun hasil tegangan pada bus masih berada di bawah standar 5% dari 500 kV. Selanjutnya, dilakukan analisa *Undervoltage Load Shedding 3* berupa pelepasan dengan referensi tegangan dibawah 0,9 pu dan waktu minimum 3,5 detik dengan total penambahan jumlah beban (MW) yang dilepas sebesar 15% dari total beban dalam sistem.

4.4.2.3 UVLS 3

Undervoltage Load Shedding 3 dilakukan untuk menaikkan tegangan agar tegangan berada pada kondisi standar dengan penambahan pelepasan beban di bus Cawang. Sehingga beban yang akan dilepas pada UVLS 3 yaitu sebesar 15% dari total beban, Pelepasan beban dilakukan pada detik ke-150 agar dapat mengetahui respon tegangan pada sistem dan dapat dibandingkan dengan UVLS 1 dan UVLS 2.

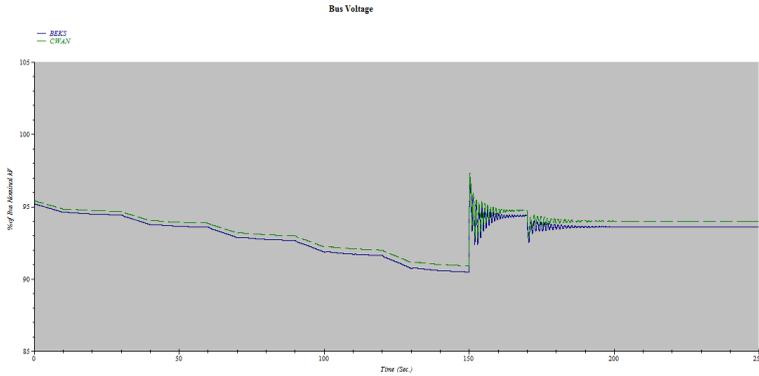


Gambar 4.6 Tegangan Bus Bekasi dan Cawang dengan UVLS 3

Dari gambar 4.6 menunjukkan respon tegangan setelah dilakukan *Load Shedding* 3. Dapat dilihat bahwa sistem tidak mengalami *voltage collapse*. Dari gambar 4.6 terlihat bahwa tegangan pada bus Bekasi pada detik ke-250 sebesar 462,616kV (0,925232 pu) sedangkan tegangan pada bus Cawang sebesar 465,0395kV (0,930079 pu). Dari hasil UVLS 3 menunjukkan bahwa tegangan di bus Bekasi dan Cawang setelah terjadi gangguan dan dilakukan pelepasan beban menunjukkan tegangan pada bus Bekasi dan Cawang mengalami kenaikan profil tegangan namun masih berada di bawah standar 5% dari 500 kV. Namun, berdasar *Undervoltage Load Shedding Guideline* pelepasan beban sudah tidak diperlukan karena tegangan sudah berada diatas 0,92 pu. Analisa UVLS 4 dilakukan hanya untuk menaikkan tegangan, karena semakin besar beban yang dilepas maka tegangan akan semakin meningkat .

4.4.2.4 UVLS 4

Undervoltage Load Shedding 4 hanya dilakukan untuk menaikkan tegangan dengan penambahan pelepasan beban di bus Bekasi sebesar 5% dari beban total. UVLS 4 dilakukan tanpa mempertimbangkan *Undervoltage Load Shedding Guideline* karena tegangan sudah berada diatas 0,92 pu. Pada UVLS 4 akan dilepas beban sebesar 20% dari total keseluruhan beban, Pelepasan beban dilakukan pada detik ke-150 agar dapat mengetahui respon tegangan pada sistem.



Gambar 4.7 Tegangan Bus Bekasi dan Cawang dengan UVLS 4

Dari gambar 4.7 menunjukkan respon tegangan setelah dilakukan *Undervoltage Load Shedding 4*. Dapat dilihat bahwa sistem meskipun terjadi gangguan berupa penambahan beban secara kontinyu dan kontingensi berupa saluran lepas tidak mengalami *voltage collapse* namun hanya terjadi peristiwa osilasi yang terjadi beberapa detik. Dari gambar 4.7 terlihat bahwa tegangan pada bus Bekasi pada detik ke-250 sebesar 468,0655 kV (0,936131 pu) sedangkan tegangan pada bus Cawang sebesar 470,0445 kV (0,940089 pu). Hubungan antara banyaknya jumlah beban yang dilepas, akan sangat berpengaruh terhadap kondisi kestabilan tegangan sistem ketika terjadi gangguan. Pelepasan beban dengan referensi tegangan dapat mencegah terjadinya *voltage collapse*.

BAB 5

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan beban P dan Q terhadap sistem interkoneksi Jawa-Bali 500 kV dapat mengakibatkan penurunan tegangan yang relatif besar.
2. Sensitivitas bus dengan menggunakan metode *VQ-Sensitivity* dapat digunakan sebagai acuan urutan pelepasan beban, semakin besar nilai sensitivitas bus maka bus semakin lemah. Urutan pelepasan beban pada sistem Jawa-Bali 500 kV adalah : Cirata, Cibatu, Cawang, Bekasi.
3. Pelepasan beban berdasarkan nilai sensitivitas bus, dengan jumlah beban yang dilepas setiap tahap sebesar 5% dari keseluruhan beban dapat mencegah terjadinya *voltage collapse*, semakin besar beban yang dilepas (MW) maka kondisi tegangan sistem akan semakin baik.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan simulasi ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu sebuah penelitian lebih lanjut dalam pengaturan relay *undervoltage* guna mengimplementasikan UVLS untuk mencegah *voltage collapse* pada sistem Jawa-Bali 500 kV.
2. Skenario pelepasan beban berdasarkan tegangan atau *undervoltage load shedding* dapat di gunakan sebagai metode baru selain *under frequency load shedding* untuk mencegah *voltage collapse* bahkan terjadinya *blackout*.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mohamad, Y., 2009. "*Perbaikan Tegangan Bus Akibat Gangguan Kontingensi Dengan Menggunakan Injeksi Sumber Daya Reaktif*". Jurnal Teknik, 7(2)..
- [2] A. M. Nur and A. Y. Dewi, "*Studi Analisa Kestabilan Tegangan Sistem 150 kV Berdasarkan Perubahan Tegangan (Aplikasi PT. PLN Batam)*," *J. Tek. Elektro ITP* ISSN 2252-3472, vol. 2, no. 1, 2013.
- [3] C. Mozina, "*Undervoltage load shedding*," in Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2007. *PSC 2007*, 2007, pp. 39–54.
- [4] M. Klaric, I. Kuzle, and T. Tomisa, "*Simulation of undervoltage load shedding to prevent voltage collapse*," in *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, 2005, pp. 1–6.
- [5] Penangsang, Ontoseno. "*Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2*", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [6]. C. W. Taylor, *Power System Voltage Stability*. New York: McGrawHill, 1994..
- [7]. Saadat, H., "*Power System Analysis*", McGraw-Hill, Inc, 1999.
- [8]. IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality, "*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*" IEEE Standards Board, Approved June 14, 1995
- [9] Resita, Riza,"*Undervoltage Load Shedding Pada Sistem Distribusi 20 kV Surabaya dengan Mempertimbangkan Sensitivitas Bus*", Surabaya, ITS,2013
- [10] Fransco, Pancar,"*Studi Kestabilan Berdasarkan Prediksi Voltage Collapse Pada Sistem Standar IEEE 14 Bus Menggunakan Modal Analysis*", Surabaya, ITS.2011
- [11] Malau, Dielita Anggitria," *Analisis Under Voltage Load Shedding berdasarkan nilai Sensitivitas Bus dan Daya Reaktif pada PT PLN (Persero) APB DKI Jakarta & Banten*", Depok, UI.2014
- [12] Kundur, Prabha. 1994. "*Power System Stability and Control*". USA: MCGraw-Hill.

- [13] U. L. S. T. Force, “*Undervoltage load shedding guidelines,*” Tech. Stud. Subcomm. WECC, 1999.
- [14] Ayustinura, Agiesta Pradios,” *Evaluasi Kestabilan Tegangan Sistem Jawa Bali 500kV menggunakan Metode Continuation Power Flow (CPF)* “,Surabaya, ITS.2013

RIWAYAT HIDUP



Rachmad Ady Zakaria, dilahirkan di kota Mojokerto, 30 Maret 1994. Penulis memulai pendidikan dari TK Dharma wanita pada tahun 1999-2000. Kemudian melanjutkan ke SDN 1 Kepuhklagen, Gresik pada tahun 2000-2006. Setelah itu ia melanjutkan pendidikan ke SMPN 2 Jetis, Mojokerto pada tahun 2006-2009, setelah lulus ia diterima sebagai murid SMAN 1 Sooko, Mojokerto pada tahun 2009-2012. Pada tahun yang sama ia masuk ke Jurusan D3 Teknik Elektro-Komputer Kontrol – Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga lulus pada tahun 2015. Penulis kemudian melanjutkan studi Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya jurusan Teknik Elektro dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.
email : adyzakaria.r@gmail.com

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan