



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS STABILITAS TEGANGAN MENGGUNAKAN REAKTOR
SHUNT PADA SISTEM TRANSMISI JAMALI 500kV TAHUN 2018**

Eka Rizky Aprierwanto
NRP 2215105067

Dosen Pembimbing
Prof. Ir Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D
Dr. Rony Seto Wibowo, S.T, M.T

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



FINAL PROJECT - TE 141599

**VOLTAGE STABILITY ANALYSIS USING SHUNT REACTOR
ON 500 kV TRANSMISSION SYSTEM JAMALI 2018**

Eka Rizky Aprierwanto
NRP 2215105067

Counsellor Lecturer
Prof. Ir Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D
Dr. Rony Seto Wibowo, S.T, M.T

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Analisis Stabilitas Tegangan Menggunakan Reaktor *Shunt* Pada Sistem Transmisi Jamali 500kv Tahun 2018**” 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



Eka Rizky Aprierwanto
2215105067

**ANALISIS STABILITAS TEGANGAN MENGGUNAKAN
REAKTOR SHUNT PADA SISTEM TRANSMISI JAMALI 500kV
TAHUN 2018**

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. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 19741129 200012 1 001



ANALISIS STABILITAS TEGANGAN MENGUNAKAN REAKTOR SHUNT PADA SISTEM TRANSMISI JAMALI 500 KV TAHUN 2018

ABSTRAK

Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk memperbaiki kualitas tegangan yang sesuai dengan keadaan mantap (*Steady-State*). Dalam sebuah sistem kelistrikan yang besar harus memiliki tingkat kestabilan yang handal. Salah satunya yaitu sistem transmisi Jamali. Pada tahun 2018 Plan Jamali mendapat penambahan pembangkit sebesar 4615 dengan bertambahnya pembangkit maka terjadi perubahan jaringan transmisi. Kebutuhan beban juga ikut naik seiring dengan penambahan pembangkit. Maka dari itu perlu dilakukan analisa kestabilan tegangan ulang. Reaktor *Shunt* merupakan peralatan yang digunakan pada sistem kelistrikan agar tidak terjadi kelebihan tegangan di sisi terima akibat adanya *stray capacitance* yang dapat menyebabkan terjadinya fenomena *line charging*. Reaktor *Shunt* merupakan peralatan bersifat induktif yang dapat mengkompensasi daya reaktif. Pada sistem kelistrikan Jamali 2018 terjadi *over voltage* pada bus 17 (Tanjung Jati) dengan nilai tegangan 1.08 pu. Lalu dengan pemasangan reaktor dengan nilai sebesar 279,8 MVAR. Tegangan pada bus 17 menjadi turun menjadi 1.016 pu. Sehingga dapat menjaga level tegangan sistem tetap berada dibatas yang aman. Hal ini bertujuan untuk menghindari rusaknya peralatan apabila terjadi tegangan lebih.

Kata Kunci : Kestabilan tegangan, Reaktor *Shunt*, Kurva PV, Sistem Kelistrikan Jamali 500kV-2018.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

VOLTAGE STABILITY ANALYSIS USING SHUNT REACTOR ON 500 kV TRANSMISSION SYSTEM JAMALI 2018

ABSTRACT

The stability of voltage is the ability of the electric power system to improve the quality of the voltage according with steady state. In a large electrical system must have a reliable level of stability. One of them is Jamali transmission system. In the year 2018 Plan Jamali get the addition of 4615 power plants with the increase of the transmission of transmission network. Load requirements also increase along with the addition of power plants. Therefore it is necessary to analyze the stability of reset voltage. Shunt reactor is an equipment used in electrical system to avoid excess voltage on the receiving side due to stray capacitance which can cause the phenomenon of charging line. Shunt reactors are inductive devices that can compensate for reactive power. In Jamali 2018 electricity system occurs over voltage on bus 17 (Tanjung Jati) with a voltage value of 1.08 pu. Then with the installation of reactor with a value of 279.8 MVAR. The voltage on the bus 17 becomes down to 1,016 pu. So as to keep the voltage level of the system remains limited to the safe. It aims to avoid damage to equipment in case of over voltage.

Keywords: Voltage stability, Shunt Reactor, PV Curve, Jamali 500kV-2018 Electrical System.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Analisis Stabilitas Tegangan Menggunakan Reaktor Shunt Pada Sistem Transmisi Jamali 500kv Tahun 2018**”. Penyusunan tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Segenap keluarga, terutama Ayah dan Ibu tercinta serta adik yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa kepada penulis.
2. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D dan Bapak Dr.Rony Seto Wibowo, ST. MT. sebagai Dosen Pembimbing penulis yang telah memberikan pengetahuan, arahan, dan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberikan ilmu selama penulis menempuh kuliah.
4. Teman-teman mahasiswa Jurusan Teknik Elektro ITS, terutama teman-teman lintas jalur angkatan 2015 Jurusan Teknik Elektro ITS dan seluruh asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik yang telah memberikan saran dan motivasi serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu .

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2016
Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTARTABEL	xvii

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Permasalahan	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan dan Manfaat	2
1.5. Metodologi	2
1.6. Sistematika Penulisan	3

BAB 2 DASAR TEORI

2.1. Konsep Dasar Kestabilan.....	5
2.1.1. Stabilitas Tetap (<i>Steady State</i>)	5
2.1.2. Stabilitas Peralihan (<i>Transient</i>)	6
2.1.3 Stabilitas Sub Peralihan (<i>Dynamic</i>)	8
2.2. Kestabilan Tegangan.....	9
2.2.1. Gangguan Besar	9
2.2.2. Gangguan Kecil.....	9
2.3. <i>Voltage Collapse</i>	9
2.4. Metode Analisa Pada Kestabilan Tegangan.....	10
2.4.1 Metode Analisis Statis (<i>Static Analysis</i>)	10
2.4.2 Metode Analisis Dinamis (<i>Dynamic Analysis</i>)	10
2.5. Beberapa Hal Yang Mempengaruhi Kestabilan.....	10
2.5.1 Hubung Singkat	10
2.5.2 Starting Motor.....	11
2.5.3 Penambahan Beban Secara Tiba-tiba.....	11
2.6. Hubungan Antara Kestabilan Dengan Frekuensi.....	13
2.7. Hubungan Antara Kestabilan Dengan Tegangan.....	13
2.7.1 <i>Impulsive Transient</i>	13
2.7.2 <i>Oscillatory Transient</i>	14

2.8. Saluran Transmisi (<i>Transmission Lines</i>)	15
2.8.1 Saluran Trasmisi Pendek (<i>Short Line</i>).....	16
2.8.2 Saluran Transmisi Menengah (<i>Medium Line</i>).....	17
2.8.3 Saluran Transmisi Jarak Panjang (<i>Long Line</i>).....	19
2.9. Deviasi Tegangan	21
2.10 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik.....	21
2.10.1 Penyebab Terjadinya Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik.....	22
2.11 Analisa Gangguan Hubung Singkat	24
2.11.1. Hubung Singkat Tiga Fasa.....	25
2.11.2. Hubung Singkat Antar Fasa.....	25
2.11.3. Hubung Singkat Fasa ke Netral	25
2.11.4. Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah	25
2.12 Reaktor <i>Shunt</i>	26
2.13 Kurva P-V	29

BAB 3 PEMODELAN SISTEM

3.1. Data Kelistrikan Jamali 500kV	31
3.2. <i>Power World</i> 18	37
3.3. Metodologi Simulasi	37

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1. Data Simulasi.....	41
4.2. Sistem Pembangkit Listrik Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV ...	41
4.3. Klasifikasi Bus pada Sistem Tenaga Listrik Jamali 500kV	42
4.4. Simulasi dan Analisis pada Sistem Jaringan.....	42
4.5. Perhitungan Reaktor <i>Shunt</i>	46
4.6. Kurva P-V.....	47
4.7. Pemasangan Reaktor <i>Shunt</i>	50
4.8. Analisis Stabilitas Tegangan Setelah Penambahan Reaktor	50

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	55

DAFTAR PUSTAKA	57
-----------------------------	----

RIWAYAT HIDUP	59
----------------------------	----

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Karakteristik respon generator pada saat gangguan.....	8
Gambar 2.2. Kurva sudut daya	12
Gambar 2.3. Gelombang arus <i>Impulsive Transient</i> akibat sambaran petir.....	14
Gambar 2.4. Gelombang arus <i>Oscillatory Transient</i> akibat <i>Back to Back Capacitor Switching</i>	14
Gambar 2.5. Diagram blok penyaluran sistem tenaga listrik.....	15
Gambar 2.6. Rangkaian pengganti saluran transmisi.....	15
Gambar 2.7. Rangkaian ekivalen saluran transmisi jarak pendek	16
Gambar 2.8. Saluran transmisi menengah tipe nominal T.....	17
Gambar 2.9. Saluran transmisi menengah tipe nominal PI.....	19
Gambar 2.10. Rangkaian nominal T saluran transmisi jarak panjang	20
Gambar 2.11. Gelombang arus hubung singkat.....	24
Gambar 2.12. Jarak antar fasa pada konduktor.....	27
Gambar 2.13. Rangkaian pengganti pemasangan xveactor <i>Shunt</i>	28
Gambar 2.14. Metode muatan bayangan	29
Gambar 2.14. Kurva P-V	30
Gambar 3.1. Sistem interkoneksi 500 kV Jamali tahun 2018.....	31
Gambar 3.2. Diagram alir metodologi pelaksanaan studi.....	37
Gambar 4.1. Grafik profil tegangan bus sistem kondisi awal (a) bus no. 1-22, (b) bus no. 23-44.....	45
Gambar 4.2. Kurva PV bus 17,18,20 dan 42 sebelum pemasangan reaktor	49
Gambar 4.3. Grafik profil tegangan bus setelah pemasangan reaktor (a) bus no. 1-22, (b) bus no. 23-44.....	51
Gambar 4.4. Kurva P-V bus 17, 18 ,20 dan 42 setelah pemasangan reaktor	51
Gambar 4.5. Kurva pembebanan pada bus 17,18,20 dan 42.....	52

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1.	Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali 32
Tabel 3.2.	Data pembangkitan sistem interkoneksi 500 kV Jamali tahun 2018..... 34
Tabel 3.3	Data pengembangan pembangkit sisteminterkoneksi 500 kV Jamali tahun 2018 35
Tabel 3.4	Data penambahan beban pada sistem interkoneksi 500 kV Jamali tahun 2018 36
Tabel 4.1.	Hasil simulasi <i>Load Flow</i> sistem kelistrikan Jamali 500 kV 43
Tabel 4.2.	Pembebanan pada bus sistem kelistrikan Jamali 2018..... 52

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Dalam sebuah sistem transmisi tenaga listrik penyaluran energi listrik harus memiliki kontinuitas suplai yang bagus. Jika tidak, maka penyaluran energi listrik ke konsumen dapat terganggu. Berbicara mengenai kontinuitas maka tak luput dengan kestabilan sistem tenaga listrik. Kestabilan sistem tenaga listrik terdiri dari stabilitas tegangan, stabilitas frekuensi, dan stabilitas sudut rotor generator. Pada pembuatan tugas akhir ini akan membahas tentang stabilitas tegangan. Seiring dengan berkembangnya jaman kebutuhan listrik tiap tahunnya selalu mengalami peningkatan. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di wilayah Jawa, Madura dan Bali. PT. PLN akan mengembangkan jaringan kelistrikan tiap tahun. Dalam upaya memenuhi kebutuhan beban konsumen maka tahun 2018 PT. PLN akan menambah kapasitas pada pembangkit sebesar 4615 MW. Namun pada saluran transmisi tegangan tinggi akan muncul adanya line charging yaitu tegangan sisi terima akan lebih besar dari tegangan sisi kirim. Selain itu ketika kondisi beban minimum juga dapat menyebabkan line charging. Untuk mengatasi permasalahan tersebut maka diperlukan reaktor shunt untuk menyerap daya reaktif untuk mengkompensasi line charging. Maka diperlukan analisa kestabilan tegangan agar tidak terjadi tegangan lebih pada sisi terima yang dapat mempengaruhi penyaluran daya pada saluran transmisi dan keamanan peralatan di sisi terima.

Reaktor Shunt digunakan pada saluran transmisi untuk meningkatkan keandalan sistem kelistrikan dan agar tidak terjadi kelebihan tegangan di sisi terima akibat adanya *stray capacitance* yang dapat menyebabkan terjadinya fenomena *line charging* [4,8]. Reaktor *Shunt* merupakan peralatan bersifat induktif yang dapat mengkompensasi daya reaktif [6,8]. Sehingga dapat menjaga level tegangan sistem tetap berada dibatas yang aman [1]. Hal ini bertujuan untuk menghindari rusaknya peralatan apabila terjadi tegangan lebih [8].

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Adanya penambahan pembangkit 4615 MW pada tahun 2018 berdasarkan RUPTL 2016-2025
2. Adanya perubahan pada jaringan transmisi Jawa-Madura-Bali.
3. Kondisi beban minimum jaringan transmisi tegangan tinggi rawan terjadi line charging
4. Perlu dilakukan analisa ulang kestabilan tegangan dari tahun sebelumnya.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Simulasi dan analisa menggunakan software Power World
2. Evaluasi dilakukan berdasarkan RUPTL 2018

3. Tujuan dan Manfaat

Tujuan dilaksanakannya tugas akhir ini adalah:

Memperoleh tegangan yang stabil pada sistem transmisi 500 kV Jamali pada tahun 2018 akibat perubahan konfigurasi sistem transmisi berdasarkan RUPTL 2016-2025

4. Metodologi

Metode yang digunakan pada tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Studi Literature
Studi literature perlu dilakukan untuk menunjang penguasaan tentang pengumpulan pustaka untuk dipelajari dalam pengerjaan dan penelitian Tugas Akhir (TA). Literatur yang dipelajari dalam topik tugas akhir ini yaitu mengenai analisa sistem tenaga, *Load Flow Analysis*, *Voltage Stability*, *Shunt Reactor*, dan *PV Curve*.
2. Pengumpulan Data
Data-data yang dikumpulkan adalah data sistem kelistrikan Jamali 500 kV. Data-data tersebut meliputi data pembangkitan, data beban yang ditanggung GI 500 kV, data saluran, dan konfigurasi tiang saluran transmisi.
3. Analisa Aliran Daya
Analisa aliran daya dilakukan dengan menggunakan *software* Power World. Data-data yang telah diperoleh dimasukkan ke dalam program Power World load-flow. Dari *running* program tersebut didapatkan profil tegangan dari setiap bus.

4. Perhitungan nilai *Reactor Shunt* dan *Reactor Netral*
Menganalisa nilai dari data hasil analisa aliran daya, serta menghitung impedansi pada saluran untuk menentukan nilai dari *Shunt Reactor*.
5. Penentuan Lokasi, permodelan *Reactor Shunt* dan *Reactor Netral*
Dari analisa aliran daya, lalu dilakukan pemodelan *Reactor Shunt* dan *Reactor Netral* selanjutnya dipasang pada GI yang mengalami profil tegangan yang tinggi.
6. Analisa Setelah Pemasangan *Reactor Shunt*
Menganalisa stabilitas tegangan dengan membandingkan sebelum dan setelah pemasangan Reaktor.
7. Penulisan Buku Tugas Akhir.
Penulisan laporan adalah rangkuman kesimpulan akhir dari beberapa rangkaian metodologi diatas untuk menggambarkan hasil serta analisa dan simulasi yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pembahasan yang akan dilakukan, tugas akhir ini terbagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi pengerjaan tugas akhir, sistematika pembahasan dan relevansi dari penulis.

BAB II : LANDASAN TEORI

Pada bab ini menjelaskan teori-teori penunjang yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

BAB III : PEMODELAN SISTEM

Dalam bab ini dijelaskan metode pelaksanaan studi serta penerapannya dalam studi kasus pada sistem, bagaimana konfigurasinya, dan beberapa hal mengenai operasi sistem kelistrikan Jamali.

BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Berisi tentang hasil dari simulasi power flow beserta analisis mengenai pengaruh penambahan SVC pada bus yang paling sensitif dan bagaimana pengaruhnya terhadap kestabilan sistem jawa bali 500kV.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil simulasi, studi literatur dan analisis yang telah dilakukan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Konsep Dasar Kestabilan [1]

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat diartikan sebagai kemampuan suatu sistem untuk menjaga operasi tetap dalam kondisi stabil. Suatu sistem dapat dikatakan stabil apabila ketika terjadi gangguan, sistem tersebut dapat kembali ke kondisi normal. Dalam sistem tenaga listrik yang baik harus bisa memberikan pasokan energi listrik secara terus menerus dengan besaran tegangan dan frekuensi yang sesuai dengan aturan dan standart yang berlaku.

Pada jaringan yang begitu kompleks dimana terdapat beberapa pembangkit yang saling interkoneksi satu dengan yang lain maka yang perlu diperhatikan agar tidak terjadi *overload* (kelebihan beban) dan *underload* (beban dibawah nominal) yaitu keluaran daya elektris berupa tegangan dan frekuensi. Beban dari sistem sendiri setiap detik dapat berubah-ubah karena setiap kondisi beban memiliki variasi yang dinamis.

Dengan melihat kondisi yang sedemikian rupa, maka pembangkit harus dapat memberikan pasokan daya listrik yang sesuai dengan kebutuhan beban. Namun, perubahan dari pada beban dapat dikatakan sebagai gangguan dari pada sistem tenaga listrik karena ketidakseimbangan antara pasokan daya listrik dengan permintaan energi listrik. Hal ini dapat berdampak pada sisi pembangkitan, sehingga menyebabkan pembangkit harus beroperasi lebih berat. Maka dari itu perlu dilakukan suatu analisis kestabilan sistem tenaga listrik.

Berdasarkan sifat gangguan masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas :

1. Stabilitas tetap (steady state).
2. Stabilitas peralihan (transient).
3. Stabilitas sub peralihan (dinamis).

2.1.1 Stabilitas Tetap (*Steady State*) [1,5]

Adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan mesin-mesin pada sistem tetap dalam keadaan sinkron akibat dari gangguan kecil. Apabila generator mengalami peningkatan beban maka, putaran rotor akan mengalami perlambatan, dan sebaliknya akan semakin cepat apabila beban pada generator menurun. Pada

kondisi normal, perubahan sudut rotor akan sedikit mengalami “overshoot”, yaitu akan sedikit lebih lambat atau lebih cepat. Pada kondisi stabil maka osilasi akan tetap terjadi sampai akhirnya berada pada posisi tertentu untuk kondisi beban yang baru. Apabila rotor berada pada kondisi tetap yang hanya terjadi dalam waktu yang cepat, maka mesin dapat dikatakan dalam keadaan stabil, dan osilasi dikatakan memiliki damping yang baik.

2.1.2. Stabilitas Peralihan (*Transient*) [1,5]

Kestabilan transien dapat didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil operasi baru yang dapat diterima setelah sistem mengalami gangguan besar. Analisis Stabilitas transien menggunakan pendekatan model non linear. Stabilitas transien merupakan fungsi dari kondisi operasi dan gangguan. Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan atau beban besar hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus semacam itu stabilitas *transient* harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap kejutan (*shock*) atau perubahan beban yang relatif besar yang terjadi.

Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba-tiba, keseimbangan antara energi input dan output listrik pada sistem akan hilang. Jika energi input tidak lagi mencukupi, inersia rotor mesin yang masih bekerja, pada periode yang singkat akan melambat. Apabila beban hilang maka energi input pada sistem akan melebihi beban listrik, dan mesin akan bergerak semakin cepat. Berbagai macam faktor mempengaruhi stabilitas sistem, seperti kekuatan pada jaringan transmisi didalam sistem dan saluran pada sistem yang berdekatan, karakteristik pada unit pembangkitan, termasuk inersia pada bagian yang berputar, dan properti listrik seperti reaktansi *transient* dan karakteristik saturasi magnetik pada besi stator dan rotor. Faktor penting lainnya adalah kecepatan dimana saluran atau perlengkapan yang terjadi gangguan dapat diputus (*disconnect*) dan, dengan *reclosing* otomatis pada saluran

Transmisi yang menentukan seberapa cepat saluran dapat beroperasi lagi. Sebagaimana pada stabilitas *steady-state*, kecepatan respon pada sistem eksitasi generator merupakan faktor yang penting dalam mempertahankan stabilitas *transient*. Gangguan pada sistem biasanya diikuti oleh perubahan tegangan yang cepat pada sistem, dan pemulihan kembali tegangan dengan cepat menuju ke kondisi normal

merupakan hal yang penting dalam mempertahankan stabilitas. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, stabilitas *transient* adalah kemampuan untuk tetap pada kondisi sinkron selama periode terjadinya gangguan dan sebelum adanya reaksi dari *governor*. Pada umumnya ayunan pertama pada rotor mesin akan terjadi selama satu detik setelah gangguan, tetapi waktu yang sebenarnya bergantung pada karakteristik mesin dan sistem transmisi. Setelah periode ini, *governor* akan mulai bereaksi, biasanya sekitar 4 hingga 5 detik, dan stabilitas dinamis akan efektif.

Selama periode peralihan, tegangan terminal, sudut rotor dan frekuensi akan berubah. Besarnya tegangan kumparan medan akan dipengaruhi oleh:

1. Arus induksi pada kumparan peredam (*damper winding*) selama terjadinya perubahan nilai arus pada kumparan jangkar. Konstanta waktu terjadinya arus ini berkisar antara 0.1 detik dan disebut “efek *subtransient*”.
2. Arus induksi pada kumparan medan selama terjadinya perubahan mendadak pada arus kumparan jangkar. Konstanta waktu untuk periode ini berkisar 2 detik dan disebut sebagai “efek *transient*”.

Study kestabilan transien bertujuan untuk menentukan apakah sistem tadi akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadinya gangguan besar, misalnya adanya motor starting yang besar, perubahan beban yang mendadak, terputusnya unit pembangkit, atau pemutaran saklar (*switching*) saluran.

Masalah kestabilan transien menyangkut gangguan besar yang tidak lagi memungkinkan proses kelinieran, sehingga persamaan tidak linier differensial dan aljabar harus diselesaikan dengan metoda langsung atau dengan prosedur iterasi. Perkiraan yang biasa digunakan untuk transfer daya diberikan oleh :

$$P = \frac{V_t \cdot V_\infty}{x} \sin \delta \quad (2.1)$$

Dengan :

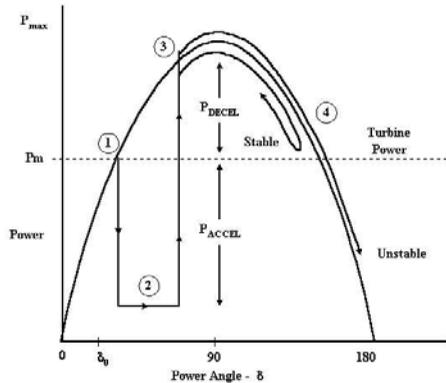
V_t : tegangan terminal mesin (volt)

V_∞ : tegangan *infinite* bus (volt)

P: Daya (watt)

δ : Sudut rotor (derajat)

Karakteristik generator saat terjadi gangguan ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Karakteristik respon generator pada saat gangguan

4.2.3. Stabilitas Sub Peralihan (*Dynamic*). [5]

Kestabilan dinamik merupakan kestabilan sistem tenaga listrik akibat adanya perubahan beban yang sangat kecil. Perubahan ini menyebabkan kecepatan sudut rotor ikut dan tegangan pada terminal generator ikut berubah. Kecepatan sudut generator akan berayun disekitar kecepatan sinkron dan nilai tegangan generator mendekati tegangan nominalnya. Generator dikatakan stabil apabila setelah mengalami gangguan (perubahan beban), kecepatan rotor kembali ke kecepatan sinkron sedangkan tegangan sedikit naik mendekati nilai tegangan nominal. Hal ini juga berlaku sebaliknya untuk generator yang tidak stabil.

Governor dan perlatan eksitasi merupakan peralatan pendukung yang berfungsi sebagai perlatan control. Jika terjadi perubahan penambahan permintaan daya disisi beban, maka frekuensi pada sistem akan mengalami perubahan. Hal ini dapat dijelaskan pada persamaan berikut :

$$P_m - P_e = M \frac{d\omega}{dt} \quad (2.2)$$

Jika $P_m > P_e \rightarrow \frac{d\omega}{dt} > 0$, sehingga ω dan f akan naik

Jika $P_m < P_e \rightarrow \frac{d\omega}{dt} < 0$, sehingga ω dan f akan turun

Jika $P_m = P_e \rightarrow \frac{d\omega}{dt} = 0$, sehingga ω dan f akan konstan

Perubahan ini dapat menyebabkan pengendali (controller) mengatur besaran-besaran input untuk mencapai titik kesetimbangan baru.

2.2 Kestabilan Tegangan [1,5]

Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk memperbaiki kualitas tegangan yang sesuai dengan keadaan mantap (*Steady-State*) pada seluruh bus baik dalam kondisi normal maupun saat sistem mengalami gangguan. Faktor utama yang menyebabkan sistem tidak stabil yaitu ketidakmampuan dari sistem tenaga listrik untuk memenuhi kebutuhan daya pada beban. Berdasarkan jenis gangguan stabilitas tegangan dapat dibagi menjadi dua tipe :

2.2.1. Gangguan Besar

Apabila sistem dapat mempertahankan level tegangan setelah terjadi gangguan yang besar seperti lepasnya pembangkit. Jenis gangguan ini dapat dilakukan analisis pada zona waktu non-linear pada jangka waktu yang singkat (*short term time frame*) dan analisis aliran daya pada jangka panjang (*long term time frame*).

2.2.2 Gangguan Kecil

Apabila sistem mampu mempertahankan kualitas tegangan setelah terjadi gangguan kecil contohnya naiknya permintaan beban. Jenis gangguan ini merupakan bagian dari keadaan *steady-state*.

2.3 Voltage Collapse

Dapat disebut juga runtuh tegangan yaitu sebuah peristiwa yang sering dialami pada sistem ketika terjadi kenaikan beban maupun penurunan beban dengan jumlah yang sangat besar pada sistem tenaga listrik. Jenis gangguan ini apabila tidak segera diatasi maka dapat menyebabkan pemadaman sistem (*blackout*). Berikut beberapa hal penyebab terjadinya *voltage collapse* :

1. Terjadi pemutusan pada saluran transmisi, transformator, dan generator
2. Peningkatan beban yang besar
3. Penurunan beban yang sangat drastis
4. Pengoperasian TAP *changer* pada transformator

Dari beberapa contoh tersebut maka perlu dilakukan tindakan untuk mengatasi gangguan diantaranya memasang kapasitor bank, pemasangan reactor, melakukan penguncian pada TAP transformator (*lock TAP-changer transformer*), pembatasan beban, pengaturan tegangan sisi kirim, dan lain-lain.

2.4 Metode Analisa pada Kestabilan Tegangan

Terdapat beberapa metode untuk melakukan analisa pada kestabilan tegangan diantaranya analisa statis dan dinamik.

2.4.1 Metode Analisis Statis (*Static Analysis*)

Terdiri atas kumpulan persamaan aljabar yang mewakili sistem dalam kondisi stabil atau *steady-state*. Tujuannya untuk meninjau kelayakan titik *equilibrium* yang menggambarkan kondisi sistem saat pengoperasian untuk memilih nilai tegangan kritis dalam sistem tersebut. Metode ini memiliki keuntungan yaitu dapat memberikan

Informasi tentang identifikasi faktor utama penyebab ketidakstabilan. Dengan cara menggambar kurva P-V dan menentukan ranking indeks setiap bus. Hal ini bertujuan untuk menganalisa batas dari tegangan pada sistem. Untuk jenis kasus yang dapat digunakan diantaranya dengan melakukan penambahan beban dan memberikan gangguan seperti lepasnya generator atau lepasnya saluran transmisi.

2.4.2 Metode Analisis Dinamis (*Dynamic Analysis*)

Pada metode ini terdiri dari bangunan persamaan diferensial dan aljabar pada pemodelan sistem tenaga listrik. Jenis ini memerlukan cukup banyak sumber daya komputasi karane untuk pemecahan solusinya membutuhkan waktu yang banyak dan hasil yang didapat kurang memberikan solusi tentang tingkat stabilitas dan sensitifitas karena untuk pemodelan sistem tenaga listrik pada kondisi transien.

2.5 Beberapa Hal yang Mempengaruhi Kestabilan

Pada sistem tenaga listrik terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kestabilan diantaranya :

2.5.1 Hubung Singkat

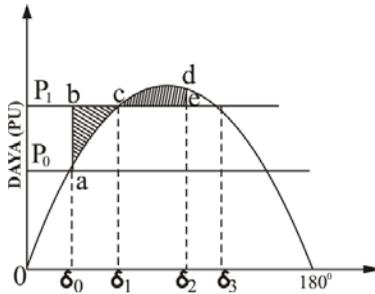
Gangguan hubung singkat (*short circuit*) ini sangat umum terjadi dalam sistem kelistrikan. Menurut jenis gangguannya dibedakan menjadi : Gangguan 1 fasa ke tanah adalah yang paling sering terjadi, sedangkan gangguan 3 fasa adalah yang paling jarang. Suatu sistem harus dapat mengatasi gangguan untuk kestabilan terhadap gangguan tiga fasa pada lokasi yang dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan. Sehingga kondisi pada sistem memiliki keandalan yang sempurna. Ketika terjadi gangguan hubung singkat, aliran arus akan menuju ke titik gangguan dengan nilai yang besar. Hal ini dapat menyebabkan penurunan tegangan secara signifikan disekitar gangguan. Aliran arus yang besar tersebut merupakan jumlah dari arus kontribusi yang berasal dari generator serta motor induksi.

2.5.2 Starting Motor

Ketika motor di-*starting* arus pada motor bisa mencapai 7x sampai 8x dari arus nominalnya, namun motor mencapai 80% atau 90% dari kecepatan sinkronnya. Hal berdampak terjadinya penurunan tegangan (*voltage drop*) pada sistem. Ketika sistem mengalami drop tegangan hingga dibawah dari standart. Maka lama kelamaan tegangan dari sistem dapat kolaps, hingga terjadi pemadaman. Oleh sebab itu motor starting dianggap sebagai gangguan yang mempengaruhi kestabilan sistem.

2.5.3 Penambahan Beban Secara Tiba-tiba

Ketika secara tiba-tiba dilakukan pembebanan secara penuh, maka terjadi lonjakan arus yang sangat besar, akibatnya terjadi penurunan frekuensi pada sistem. Kondisi ini dapat mengakibatkan sistem tidak sinkron meskipun besar beban belum mencapai batas kestabilan mantap yaitu daya maksimumnya. Daya input mekanis generator lebih kecil dibandingkan daya output generator, dan kekurangan ini disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator. Sehingga putaran generator turun atau frekuensi sistem turun, sudut daya δ bertambah besar dan melampaui sudut kritisnya, akibatnya generator akan lepas sinkron. Rotor generator akan mengalami ayunan dan getaran yang besar ketika dilakukannya pembebanan tersebut. Kondisi pada sistem dapat digambarkan seperti Gambar 2.2



Gambar 2.2 Kurva sudut daya

Dari gambar dapat dilihat sistem dibebani dengan beban P_0 pada sudut δ_0 yaitu merupakan gaya masukan penggerak mula dan keluaran poros dinaikkan secara tiba-tiba sampai P_1 . Karena adanya inersia dari mesin putar, maka sudut daya δ_0 tidak segera berayun mencapai δ_1 yang menyalurkan daya P_1 seharusnya perbedaan antara daya masukan dan daya keluaran digunakan untuk mempercepat generator dan memperlambat motor sebagai beban, tetapi perubahan-perubahan daya tersebut menyebabkan rotor-rotor akan menyimpang dari kecepatan sinkron dan perbedaan sudutnya akan bertambah besar. Selanjutnya ketika sistem mencapai δ_1 maka, dapat dikatakan kecepatan sinkron pada generator mengalami percepatan sehingga kecepatan motor dibawah kecepatan sinkron. Terdapat perbedaan daya yang berakibat timbulnya energi tersimpan yang tidak dapat dengan segera diserap dan menyebabkan sistem melampaui δ_1 dan sudut daya akan membesar mencapai δ_2 . Misalkan luasan cde sama dengan luas abc , sehingga osilasi tidak akan mengakibatkan sudut daya tidak melebihi δ_3 dan karena adanya rugi-rugi pada sistem, keseimbangan akan segera dicapai pada titik δ_2 .

Untuk kasus pada Gambar 2.2. Ketika sudut pada δ_2 lebih besar dari sudut 90° , maka sistem mengalami isolasi tetapi masih dapat dikatakan stabil karena sudut dari δ_2 lebih kecil daripada sudut δ_3 , yang merupakan sudut kritis untuk beban P_1 .

Dengan beban total yang lebih besar atau dengan penambahan beban yang lebih besar, titik maksimum akan dicapai saat osilasi lebih besar sudut δ_2 yang ditunjukkan Gambar 2.2. Jika penambahan beban dinaikkan terus, maka dicapai suatu titik dimana sudut osilasi sama dengan sudut kritis. Titik ini merupakan batas kestabilan transien akibat penambahan beban.

2.6 Hubungan Antara Kestabilan Dengan Frekuensi

Pada saat generator beroperasi dengan keadaan tidak normal, misalnya ketika frekuensi generator tidak stabil. Apabila terjadi *over-frekuensi*, maka dapat diturunkan menggunakan governor. Namun saat frekuensi turun bersamaan dengan meningkatnya permintaan beban saat kondisi *under-frekuensi* yang terjadi malah mesin cepat panas lama kelamaan batas kemampuan generator menahan panas terlampaui. Jika dibiarkan secara terus menerus akan berbahaya pada generator itu sendiri. Maka yang dilakukan adalah dengan cara mengubah *setting* frekuensi pada generator.

Power frequency variation didefinisikan sebagai penyimpangan dari sistem frekuensi fundamental (50 atau 60 Hz). Sangat berkaitan dengan kecepatan putaran generator yang digunakan untuk mensuplai sistem. Terdapat variasi pada frekuensi sebagai keseimbangan dinamis antara beban dan perubahan suplai. Nilai perubahan frekuensi dan durasi tergantung pada karakteristik beban dan respon dari suplai sistem terhadap perubahan. *frequency variation* yang diluar batas normal saat kondisi *steady state* pada pengoperasian sistem daya dapat disebabkan oleh kesalahan pada sistem transmisi daya, pelepasan beban yang besar, atau pelepasan pembangkit dengan kapasitas besar [5].

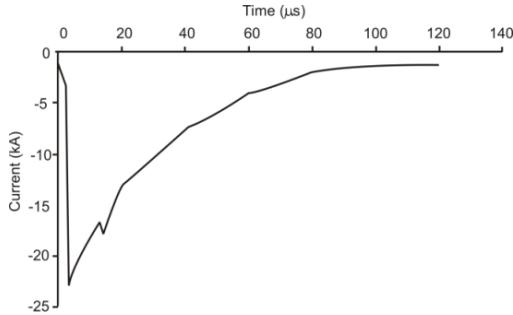
2.7 Hubungan Antara Kestabilan Dengan Tegangan

Untuk hubungan antara kestabilan dengan tegangan pada periode transien dibedakan menjadi dua kategori, yaitu *impulsive transient* dan *oscillatory transient*.

2.7.1 Impulsive Transient

Ketika terjadi perubahan dari tegangan secara tiba-tiba, arus atau keduanya pada keadaan *steady state* dengan polaritas positif atau negatif.

Memiliki *rise time* dan *decay time* yang nantinya dapat dilihat sebagai karakteristik dari bentuk gelombang. Penyebab utama dari *impulsive transient* umumnya adalah petir. Berikut merupakan contoh bentuk gelombang *impulsive transient* yang disebabkan oleh sambaran petir diperlihatkan pada Gambar 2.10.



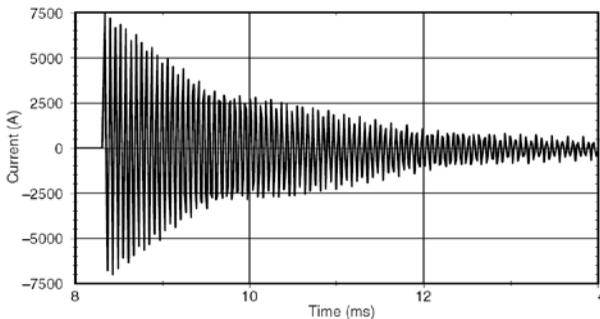
Gambar 2.3 Gelombang arus *Impulsive Transient* akibat sambaran petir

2.7.2 Oscillatory Transient

Pada saat terjadi perubahan dari tegangan secara tiba-tiba, arus atau keduanya pada keadaan *steady state* dengan polaritas positif atau negatif. Karakteristiknya ditentukan oleh spectral content (*predominate frequency*), duration, and magnitude.

Perubahan tersebut terjadi dalam keadaan *steady state* dengan polaritas positif atau negatif. Karakteristiknya ditentukan oleh *spectral content (predominate frequency), duration, and magnitude*.

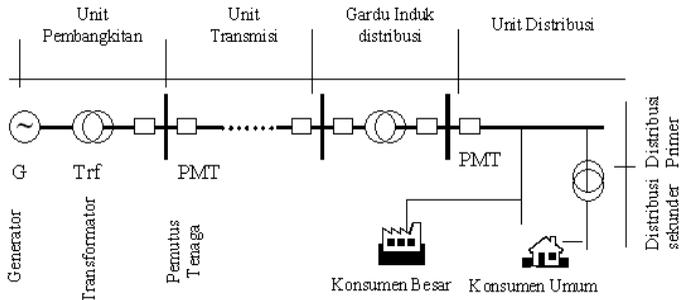
Berikut ini merupakan contoh bentuk gelombang *oscillatory transient* yang diakibatkan oleh *back to back capasitor switching* yang diperlihatkan pada Gambar 2.11



Gambar 2.4 Gelombang arus *Oscillatory Transient* akibat *Back to Back Capasitor Switching*.

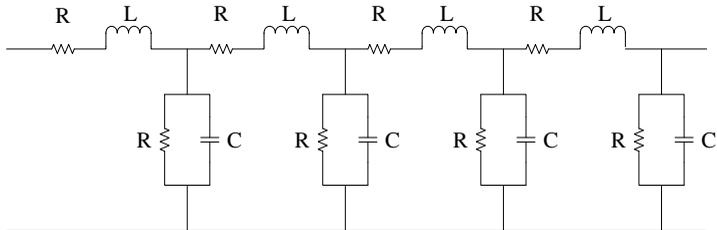
2.8 Saluran Transmisi (*Transmission Lines*) [4]

Pada saluran transmisi terjadi proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik (*power plant*) menuju *substation* distribusi lalu dapat disalurkan pada konsumen pengguna listrik melalui suatu kawat konduktor.



Gambar 2.5 Diagram blok penyaluran sistem tenaga listrik

Pada saat penyaluran tenaga listrik jarak antara pembangkit dengan beban yang cukup jauh. Hal ini menyebabkan terjadinya penurunan kualitas tegangan serta rugi daya yang diakibatkan oleh rugi-rugi pada jaringan. Maka dari itu dibutuhkan peralatan untuk meminimalisir akibat dari drop tegangan. Besarnya rugi-rugi dapat ditentukan oleh konduktor dan panjang saluran. Gambar 2.5 Menggambarkan penyaluran sistem tenaga listrik dari produsen ke konsumen



Gambar 2.6 Rangkaian pengganti saluran transmisi

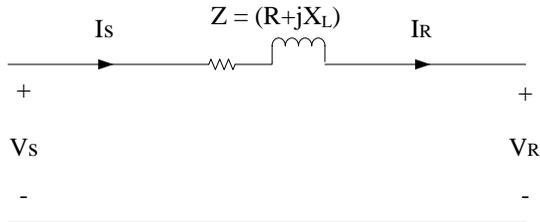
Panjang saluran transmisi akan berpengaruh terhadap nilai parameter dari saluran transmisi yang mempengaruhi terhadap tegangan bus dan daya yang mengalir pada saluran. Dari gambar 2.6 menjelaskan bahwa suatu saluran terdiri dari tahanan (resistansi), reaktansi,

kapasitansi, dan konduktansi yang tersebar. Berdasarkan panjangnya, saluran transmisi terbagi menjadi tiga, yaitu :

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

2.8.1 Saluran Transmisi Pendek (*Short Line*) [4]

Saluran transmisi pendek memiliki saluran transmisi yang panjangnya kurang dari 80 km (50 mile). Tipe saluran ini memiliki kapasitansi dengan tanah yang sangat kecil, sehingga memiliki arus bocor ke tanah yang kecil terhadap arus beban. Karena arus bocor bernilai kecil maka kapasitansi ke tanah dapat diabaikan. Gambar 2.7 menunjukkan rangkaian ekuivalen dari saluran transmisi jarak pendek.



Gambar 2.7 Rangkaian ekuivalen saluran transmisi jarak pendek [12]

Keterangan gambar :

V_S = tegangan sisi kirim atau sisi generator.

I_S = arus sisi kirim atau sisi generator.

V_R = tegangan sisi terima atau sisi beban.

I_R = arus sisi terima atau sisi beban.

$Z = (R + jX_L)$ = impedansi saluran.

Karena tidak terdapat cabang parallel (shunt), arus pada sisi pengirim (I_S) sama dengan arus sisi penerima (I_R).

$$I_S = I_R \quad (2.3)$$

Tegangan pada sisi pengirim yaitu:

$$V_S = V_R + I_R \cdot Z \quad (2.4)$$

Perubahan faktor daya beban terhadap regulasi tegangan (*voltage regulation*) saluran paling mudah dimengerti pada saluran jarak pendek. Regulasi tegangan pada saluran transmisi adalah kenaikan tegangan pada ujung penerima yang dinyatakan dalam presentase tegangan beban penuh jika beban penuh dengan faktor daya tertentu dilepaskan sedangkan pada ujung pengirim dibuat tetap. Persamaan regulasi tegangan adalah [12] :

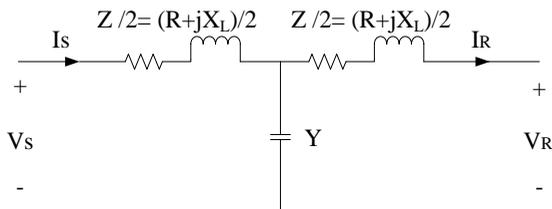
$$\text{Presentase regulasi} = \frac{|V_R, NL + V_R, FL|}{|V_R, FL|} \times 100\% \quad (2.5)$$

2.8.2 Saluran Transmisi Menengah (*Medium Line*) [4]

Saluran transmisi menengah memiliki panjang saluran antara 80 km (50 mile) sampai dengan 240 km (150 mile). Memiliki nilai kapasitansi lumayan cukup besar, sehingga tidak boleh diabaikan dalam perhitungan. Pada saluran transmisi menengah dibedakan menjadi dua tipe, 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.

Persamaan untuk rangkaian rangkaian T nominal, gambar 2.8 menunjukkan rangkain pengganti untuk dari saluran tipe T nominal.



Gambar 2.8 Saluran transmisi menengah tipe nominal T [12]

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

$$I_S = YV_R + \left(1 \times \frac{1}{2}YZ\right)I_R \quad (2.7)$$

Dari persamaan-persamaan yang didapatkan maka dapat dinyatakan dalam bentuk konstanta pengganti dari rangkaian umum saluran transmisi. Konstanta ABCD sering disebut konstanta rangkaian 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 :

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.8)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.9)$$

Rumus untuk rangkaian PI

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

$$B = Z$$

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

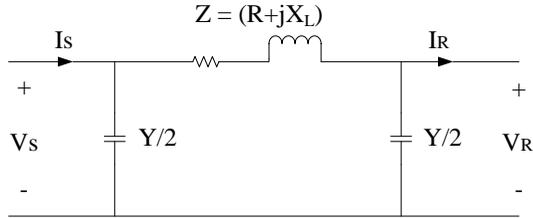
Sedangkan untuk rangkaian T

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

$$B = Z(1 + \frac{1}{4}YZ)$$

$$C = Y$$

Khusus untuk saluran tipe nominal PI (π) keseluruhan administrasi shunt saluran dibagi dua sama besar dan ditempatkan masing-masing pada sisi penerima, sehingga dinamakan rangkaian berbentuk nominal PI. Penjelasan lebih lanjut mengenai saluran tipe PI (π) dapat dilihat pada gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.9 Saluran transmisi menengah tipe nominal PI [12]

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

$$V_S = \left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)V_R + I_R \cdot Z \quad (2.10)$$

Arus pada kapasitansi shunt pada sisi 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:

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (2.11)$$

Dari persamaan 2.4 dan 2.5 kita dapatkan:

$$I_S = Y \left(1 + \frac{1}{4}YZ\right)V_R + \left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)I_R \quad (2.12)$$

2.8.3 Saluran Trasmisi Jarak Panjang (*Long Line*) [4]

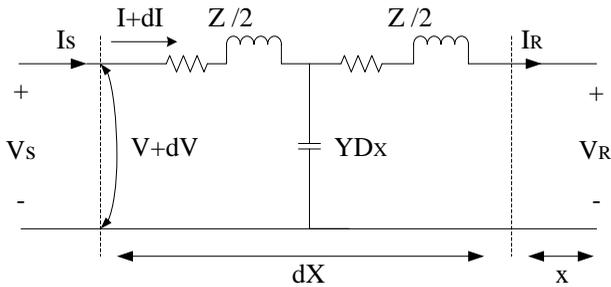
Saluran transmisi panjang memiliki panjang lebih dari 240 km (150 mile). Rangkaian T-Nominal dan Pi-Nominal kurang bisa diterapkan pada saluran panjang, karena rangkaian tersebut tidak memperhitungkan kenyataan bahwa besaran saluran tersebut tersebar merata. Perbedaan kedua rangkaian ekuivalen tersebut 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. Gambar 2.10 menunjukkan rangkain pengganti untuk dari saluran panjang.

Karakteristik urutan positif ditentukan dengan konstanta ABCD yang didefinisikan dengan persamaan :

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.13)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.14)$$



Gambar 2.10 Rangkaian nominal T saluran transmisi jarak panjang

Dimana V_S dan V_R adalah tegangan ke netral, I_S dan I_R adalah arus saluran. Koefisien dari saluran transmisi ini merupakan hasil pemecahan secara hiperbolis kedalam konstanta kharakter distribusi.

$$\begin{aligned}
 A &= \cos (ZY)^{-2} \\
 &= \left[1 + \frac{YZ}{2!} + \frac{Y^2 Z^2}{4!} + \frac{Y^3 Z^3}{6!} + \dots \right] \\
 B &= \sqrt{Z/Y} \sin \sqrt{ZY} \\
 &= \left[1 + \frac{YZ}{6} + \frac{Y^2 Z^2}{120} + \frac{Y^3 Z^3}{5040} + \dots \right] \\
 C &= \sqrt{Z/Y} \sin \sqrt{ZY} \\
 &= \left[1 + \frac{YZ}{6} + \frac{Y^2 Z^2}{120} + \frac{Y^3 Z^3}{5040} + \dots \right] \\
 D &= A
 \end{aligned}$$

Keterangan :

- Y = R + jX = impedansi total saluran = (r +jX)l
- Z = G + jB = suseptansi total saluran = (g +jb)l
- g = konduktansi dalam mho per unit dari panjang saluran (umumnya diabaikan)
- b = suseptansi kapasitif dalam mho per unit dari panjang saluran
- l = panjang saluran

2.9 Deviasi Tegangan

Deviasi tegangan adalah penyimpangan tegangan dengan adanya *over-voltage* atau *under-voltage* antara bus pertama (acuan) dengan bus lainnya dalam satu *feeder*. Dengan meminimalkan deviasi tegangan dapat meningkatkan level atau kualitas tegangan menjadi lebih baik dan sekaligus meningkatkan kualitas daya pada sistem distribusi. Deviasi tegangan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta \text{Deviasi Tegangan} = \max \frac{V_1 - V_k}{V_1} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

Dimana V_1 adalah nilai tegangan bus pertama (acuan), V_k dan k adalah nilai tegangan dari tegangan bus lain dan nomor bus.

2.10 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik [5]

Dalam sistem tenaga listrik selalu terdapat gangguan entah itu gangguan dari luar sistem maupun dalam sistem. Gangguan ini dapat menyebabkan menurunnya kualitas suplai tenaga listrik. Untuk itu harus ada suatu peralatan yang dapat mengamankan sistem dari gangguan. Salah satunya dengan menggunakan peralatan proteksi. Peralatan ini harus dapat mengisolasi arus gangguan agar tidak terjadi kerusakan pada peralatan dan menjaga keandalan sistem tetap handal..

Klasifikasi gangguan pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh dua faktor yaitu dari dalam sistem dan dari luar sistem. Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain :

1. Tegangan dan arus abnormal.
2. Pemasangan yang kurang baik.
3. Beban lebih.

Sedangkan untuk yang berasal dari luar sistem antara lain :

1. Gangguan akibat pekerjaan galian saluran lain. Gangguan ini terjadi untuk sistem kelistrikan bawah tanah.
2. Pengaruh lingkungan seperti pohon tumbang, binatang dan benda-benda asing serta akibat kecerobohan manusia.
3. Pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir dan tanah longsor. Pada gangguan surja petir dapat mengakibatkan gangguan tegangan lebih dan dapat menyebabkan gangguan hubung singkat karena tembus isolasi peralatan (*breakdown*).

Berdasarkan lama waktu gangguan (*fault*) pada sistem tenaga listrik dapat dibagi atas dua kelompok :

1. Gangguan yang bersifat temporer, gangguan sementara yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya.
2. Gangguan yang bersifat permanen, yaitu gangguan yang sifatnya cukup lama apabila tidak dilakukan tindakan perbaikan dan/atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut.

Untuk gangguan yang bersifat sementara setelah arus gangguannya terputus misalnya karena terbukanya *circuit breaker* oleh rele pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali. Sedangkan pada gangguan permanen terjadi kerusakan yang bersifat permanen sehingga baru bisa dioperasikan kembali setelah bagian yang rusak diperbaiki atau diganti.

Pada saat terjadi gangguan akan mengalir arus yang sangat besar pada fasa yang terganggu menuju titik gangguan, dimana arus gangguan tersebut mempunyai harga yang jauh lebih besar dari rating arus maksimum yang diijinkan, sehingga terjadi kenaikan temperatur yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik yang digunakan.

2.10.1 Penyebab Terjadinya Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik [4, 5]

Gangguan – gangguan yang mungkin terjadi pada sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut yaitu :

a. Gangguan Beban Lebih (*Overload*)

Merupakan gangguan dimana arus yang mengalir melebihi arus nominal yang diijinkan ($I > I_n$). Bila gangguan ini dibiarkan berlangsung terus menerus maka dapat menyebabkan rusaknya peralatan

listrik yang dialiri arus tersebut. Pencegahan gangguan semacam ini dapat dilakukan dengan mengatur alokasi pembangkitan agar tidak ada bagian tertentu dalam sistem yang mengalami beban lebih. Namun hal ini tidaklah selalu mungkin dilakukan karena tergantung kepada keadaan sistem .

b. Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi dua macam yaitu: gangguan hubung singkat seimbang (*balance faults*) dan gangguan hubung singkat tidak seimbang (*unbalance faults*) atau simetri dan tidak simetri (asimetri). Gangguan ini dapat mengakibatkan mengalirnya arus lebih pada fasa yang terganggu. Selain itu gangguan ini juga dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu. Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan tidak simetri.

c. Gangguan Tegangan Lebih

Gangguan tegangan lebih diakibatkan karena adanya kelainan pada sistem. Gangguan tegangan lebih dapat terjadi antara lain karena:

- Gangguan petir
- Gangguan surja hubung, di antaranya adalah penutupan saluran tak serempak pada pemutus tiga fasa, penutupan kembali saluran dengan cepat, pelepasan beban akibat gangguan, penutupan saluran yang semula tidak masuk sistem menjadi masuk sistem, dan sebagainya.

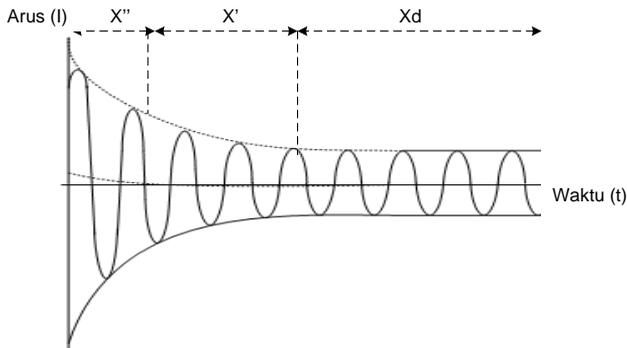
Akibat-akibat yang ditimbulkan oleh adanya gangguan antara lain :

1. Jenis gangguan yang tidak normal dari batas yang diijinkan akan menyebabkan arus yang besar mengalir pada saluran sistem tenaga listrik.
2. Suatu gangguan dapat menurunkan, menghilangkan atau menaikkan sistem tegangan diluar batas yang ditentukan.
3. Gangguan hubung singkat dan gangguan yang memancarkan listrik dalam cairan dapat menyebabkan temperatur yang sangat tinggi sehingga dapat Menguapkan material atau zat, merusakkan peralatan serta dapat menimbulkan api.

4. Gangguan dapat mengakibatkan sistem daya tiga fasa menjadi tidak simetri atau tidak seimbang, hal ini menyebabkan peralatan tiga fasa tidak layak untuk dioperasikan.
5. Gangguan dapat menghalangi aliran daya
6. Gangguan dapat mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil dan menghentikan aliran daya sistem tenaga listrik.

2.11 Analisa Gangguan Hubung Singkat [5, 8]

Pada saat terjadi gangguan hubung singkat, akan mengalir arus yang sangat tinggi dengan tiba-tiba dari sumber ke titik gangguan. Besarnya arus yang mengalir ini dipengaruhi oleh nilai reaktansi sumber dan reaktansi pada rangkaian yang dilalui arus hubung singkat. Reaktansi pada beberapa *cycle* pertama sangat kecil dan arus hubung singkatnya tinggi. Reaktansi pada saat ini disebut reaktansi subtransien atau *subtransient reactance* (X''_d). Beberapa *cycle* kemudian arus hubung singkat cenderung menurun dan reaktansi pada saat ini disebut reaktansi transien atau *transient reactance* (X'_d), dan akhirnya kondisi mencapai *steady state* dan pada saat ini reaktansinya disebut reaktansi sinkron atau *synchronous reactance* (X_d). Gambar 2.11 Menunjukkan bentuk gelombang ketika terjadi hubung singkat.



Gambar 2.11 Gelombang arus hubung singkat [5]

2.11.1. Hubung Singkat Tiga Fasa [5]

Hubung singkat ini melibatkan ketiga fasa. Arus hubung singkat tiga fasa (I_{sc3}) diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_{sc3} = \frac{V/\sqrt{3}}{Z_{sc}} \quad (2.14)$$

Dimana V adalah tegangan nominal *line to line*, dan Z_{sc} adalah impedansi ekivalen sistem ketika arus mengalir dari sumber menuju titik hubung singkat.

2.11.2. Hubung Singkat Antar Fasa[5]

Hubung singkat ini terjadi antara dua fasa tanpa terhubung ketanah. Arus hubung singkat antar fasa (I_{sc2}) diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_{sc2} = \frac{V/\sqrt{3}}{2 \times Z_{sc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc3} \approx 0.86 I_{sc3} \quad (2.15)$$

2.11.3. Hubung Singkat Fasa ke Netral [5]

Hubung singkat ini terjadi antara salah satu fasa dengan netral. Arus hubung singkat fasa ke netral (I_{sc1}) diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_{sc1} = \frac{V/\sqrt{3}}{Z_{sc} + Z_{Ln}} \quad (2.16)$$

Dengan Z_{Ln} adalah impedansi netral.

2.11.4. Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah [5]

Hubung singkat ini melibatkan impedansi urutan nol (Z_0), dan besarnya arus hubung singkat ini tergantung sistem pentanahan yang digunakan. Arus hubung singkat antar fasa (I_{sc0}) diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_{sc0} = \frac{V/\sqrt{3}}{Z_{sc} + Z_0} \quad (2.17)$$

2.12 Reaktor *Shunt* [6, 8, 10, 11]

Reaktor adalah peralatan sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyerap kelebihan daya reaktif. Peletakan reaktor biasanya dipasang pada bus yang memiliki level tegangan tinggi. Hal ini berguna untuk meningkatkan keandalan sistem, terutama ketika terjadi beban minimum.

Berdasarkan fungsi dan penempatannya dapat dibedakan menjadi :

1. Reaktor seri
Berfungsi sebagai hambatan arus hubung singkat
2. Reaktor pengetanahan
Berfungsi untuk mengkompensasi arus gangguan kapasitif
3. Reaktor shunt
Berfungsi sebagai beban reaktif induktif untuk mengkompensasi daya reaktif kapasitif yang ditimbulkan oleh jaringan yang panjang

Pada penentuan besarnya reaktor shunt dapat digunakan rumus dibawah ini :

$$Lp = \frac{1}{\omega^2 \cdot k \cdot (Ce - 3Cc)} \quad (2.18)$$

Keterangan

Lp: Reaktor *Shunt*

K: Konstanta

Cc : Kapasitansi kabel fasa

Ce: Kapasitansi kabel fasa ke tanah [6, 8]

$$Ln = \frac{1}{3} \times \frac{Lp \cdot mo}{k - mo} \quad (2.19)$$

Keterangan :

Lp: Reaktor *Shunt*

Ln: Reaktor netral

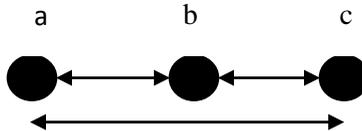
k : konstanta (0,6 dan 0,8)

Co: Ce.

$$Mo: \frac{c-co}{c} \quad (2.20)$$

Konstanta perbandingan L_n dan L_p , besar m_o dan k [6, 8].

L_n/L_p	$m_o = 0,3$	$m_o = 0,45$
$K = 0,6$	0,33	1
$K = 0,8$	0,2	0,43



Gambar 2.12 Jarak antar fasa pada konduktor [6, 8, 10]

$$Deq = Deq = \sqrt[3]{Dab \times Dbc \times Dca} \quad (2.21)$$

$$D = Deq \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Deq^2}{4Heq^2}}} \quad (2.22)$$

Keterangan :

Deq : Panjang ekuvalen antar kawat fasa

Heq : Ketinggian tiang dengan tanah

$$= \frac{S}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{N}} \quad (2.24)$$

$$R = (N \times r \times A^{N-1})^{1/N} \quad (2.25)$$

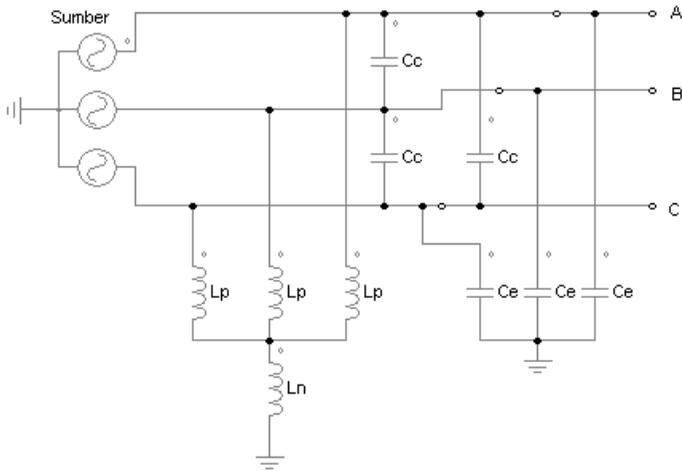
Keterangan :

A : Luas penampang

N : Jumlah reaktor penghantar

r : Jari-jari kawat penghantar

S : 45×10^{-2}

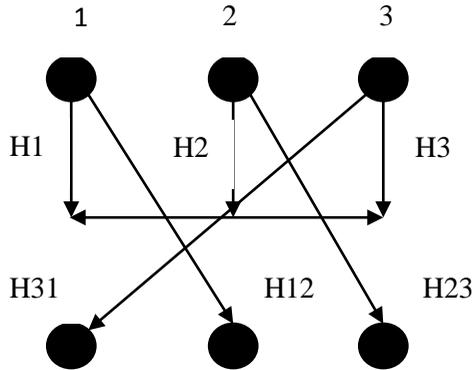


Gambar 2.13 Rangkaian pengganti pemasangan reaktor *Shunt* [6, 8, 11]

$$= \frac{0,0388}{\log \frac{GMD}{GMR}} \quad (2.26)$$

Keterangan :

C_c : Kapasitansi antar fasa



Gambar 2.14 Metode muatan bayangan [6, 8]

$$= \frac{2\pi x \epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r} - \ln \left(\frac{\sqrt[3]{H_{12}xH_{23}xH_{31}}}{\sqrt[3]{H_1xH_2xH_3}} \right)} \quad (2.26)$$

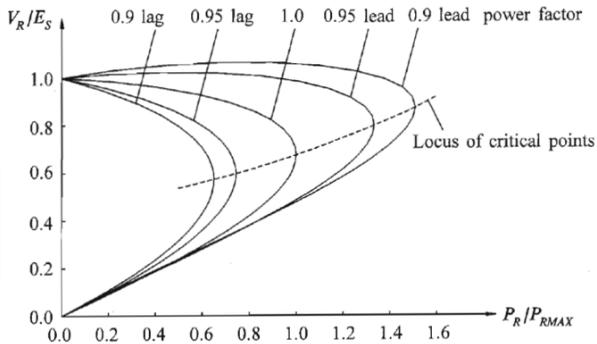
Keterangan :

Ce : Ekuivalen kapasitansi antar fasa

$\epsilon_0 : 8,854 \times 10^{-12}$

2.13 Analisa Kurva P-V [1, 9, 12]

Kurva P-V menggambarkan karakteristik kondisi tegangan bus pada suatu sistem. Kurva ini terbentuk dengan cara menambahkan beban pada bus secara terus menerus hingga tercapai titik kritis. Setelah titik kritis tersebut tercapai maka dapat dilihat karakteristik kurva PV pada masing-masing bus. Saat dilakukan analisa pada kurva PV pada stabilitas tegangan, maka dapat diketahui seberapa besar daya yang dapat dikirim namun masih dalam batas tegangan yang diperbolehkan. Gambar 2.15 berikut ini merupakan Kurva P-V



Gambar 2.15 Kurva P-V [12]

Dapat dilihat garis putus-putus merupakan titik kritis. Untuk stabilitas tegangan dapat melihat dari titik tersebut. Sehingga dapat diketahui batas dari beban pada kondisi *steady-state*. Lalu garis melengkung keatas merupakan operasi saat kondisi stabil sedangkan garis melengkung ke bawah adalah operasi saat kondisi tidak stabil [12].

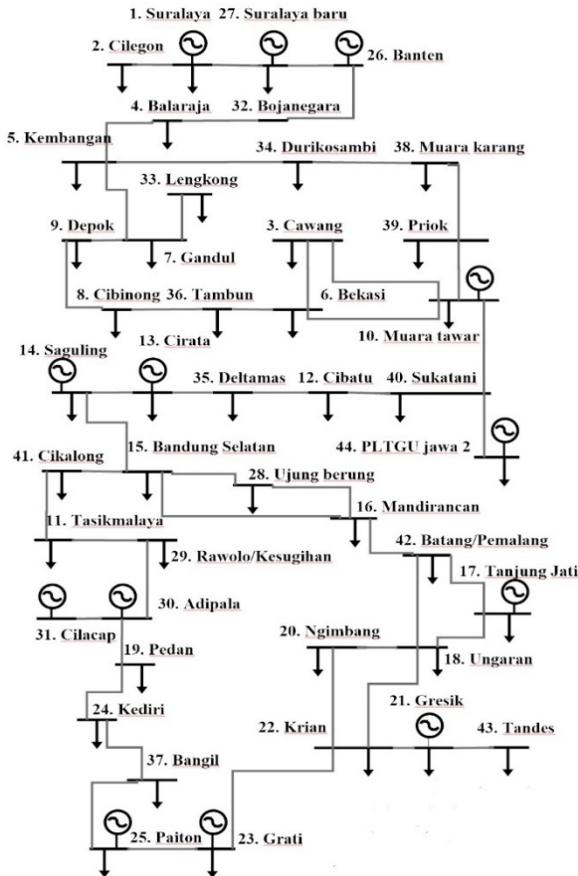
Berikut ini adalah cara kurva PV untuk menentukan stabilitas tegangan :

1. Jika titik operasi berada di luar daya maksimum, bagian bawah kurva PV didekati dengan Fungsi kuadratik.
2. Perbandingan kurva PV dan karakteristik beban dapat memprediksi kondisi *over/under voltage*.
3. Melihat daya maksimum dengan cara mengukur tegangan dan daya aktif.

BAB 3 PEMODELAN SISTEM

3.1 Data Kelistrikan Jamali 500kV

Analisa stabilitas tegangan akan dilakukan pada sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV pada tahun 2018. Berikut ini merupakan single line diagram dapat ditunjukkan pada gambar 3.1 di bawah.



Gambar 3.1 Sistem interkoneksi 500 kV Jamali tahun 2018

Data saluran dan data bus yang digunakan sebagai masukan untuk proses simulasi seperti yang ditunjukkan tabel 3.1. Dimana $MVA_{base} = 100$ MVA impedansi base ($Z_B = 2500 \Omega$) dan admitansi base ($Y_B = 0,0004 \text{ U}$).

Tabel 3.1 Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali

No	Dari Bus	Nama Bus	Ke Bus	Nama Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	1	SRLYA	2	CLGON	0.000065	0.00072	0.26
2	1	SRLYA	4	BLRJA	0.00037	0.0036	1.29
3	1	SRLYA	27	SRLYA BR	0.000009	0.00008	0.03
4	3	CWANG	6	BKASI	0.00019	0.0019	0.17
5	4	BLRJA	5	KMBNG	0.000012	0.00014	0.06
6	5	KMBNG	34	DKSBI	0.000012	0.00014	0.06
7	6	BKASI	36	TMBUN	0.00014	0.0013	0.48
8	7	GNDUL	5	KMBNG	0.00015	0.0017	0.61
9	8	CIBNG	36	TMBUN	0.00015	0.0015	0.52
10	9	DEPOK	8	CIBNG	0.00008	0.00079	0.28
11	9	DEPOK	7	GNDUL	0.00013	0.0012	0.43
12	10	MTWAR	3	CWANG	0.00048	0.0046	0.41
13	10	MTWAR	6	BKASI	0.00074	0.0071	0.64
14	10	MTWAR	39	PRIOK	0.00006	0.00069	0.33
15	10	MTWAR	40	SUKATANI	0.00019	0.0021	0.77
16	11	TASIK	29	KSGHN	0.00068	0.0076	2.78
17	12	CBATU	35	DLTAMAS	0.000059	0.00056	0.2
18	13	CRATA	14	SGLNG	0.00015	0.0015	0.53
19	14	SGLNG	15	BDSLN	0.00019	0.0021	0.76
20	15	BDGSLN	16	MDCAN	0.00047	0.0055	2.64
21	15	BDGSLN	28	NRKBA	0.00058	0.0065	0.58
22	15	BDGSLN	41	CKLNG	0.00013	0.0015	0.54
23	16	MDCAN	42	BATANG	0.00066	0.0076	3.71
24	17	TJATI	18	UNGAR	0.00067	0.0075	2.73
25	18	UNGAR	20	NBANG	0.0024	0.023	0.1
26	18	UNGAR	22	KRIAN	0.0029	0.028	2.58
27	19	PEDAN	24	KEDIRI	0.001	0.011	4.11
28	20	NBANG	22	KRIAN	0.00056	0.0054	0.48

Tabel 3.1 Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali (lanjutan)

No	Dari Bus	Nama Bus	Ke Bus	Nama Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
29	21	GRSIK	43	TNDES	0.00003	0.00028	0.1
30	21	GRSIK	22	KRIAN	0.00014	0.0013	0.48
31	22	KRIAN	23	GRATI	0.0004	0.0045	1.62
32	23	GRATI	25	PAITON	0.00044	0.005	1.79
33	24	KEDIRI	37	BANGIL	0.00055	0.0062	2.23
34	26	BANTEN	32	BJNGRA	0.00021	0.002	0.73
35	27	SRLYA BR	26	BANTEN	0.00021	0.002	0.73
36	28	NRKBA	16	MDCAN	0.00062	0.0069	0.63
37	29	KSGHN	19	PEDAN	0.00083	0.0093	3.39
38	30	ADIPALA	29	KSGHN	0.00007	0.0008	0.29
39	31	CLCAP	30	ADIPALA	0.00005	0.00056	0.2
40	32	BJNGRA	4	BLRJA	0.00035	0.0035	1.21
41	33	LKONG	7	GNDUL	0.0001	0.00093	0.33
42	34	DKSBI	38	MKRNG	0.0006	0.00069	0.33
43	35	DLTMS	13	CRATA	0.00023	0.0022	0.81
44	37	BNGIL	25	PAITON	0.00052	0.0058	2.08
45	38	MKRNG	39	PRIOK	0.00004	0.00046	0.22
46	40	SUKATANI	44	PLTGU JW 1	0.00001	0.00006	0.02
47	40	SUKATANI	12	CBATU	0.00012	0.0011	0.4
48	41	CKLNG	11	TASIK	0.0006	0.0067	2.43
49	42	BATANG	17	TJATI	0.0066	0.0076	3.69
50	42	BATANG	18	UNGAR	0.00016	0.0018	0.63

Data pembangkitan dan data bus yang digunakan sebagai masukan untuk proses simulasi seperti yang ditunjukkan tabel 3.2. Dimana MVA base ($MVA_B = 100$ MVA) dan tegangan base ($V_B = 500$ kV).

Selain itu terdapat data pengembangan pembangkit pada sistem interkoneksi Jamali 500 kV hingga tahun 2018 yang ditunjukkan pada tabel 3.4, sedangkan untuk penambahan beban sistem Jamali hingga tahun 2018 dapat ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.2 Data pembangkitan sistem interkoneksi 500 kV Jamali

No	Kode Bus	Nama Bus	Load		Generator		Qmax	Qmin	Qinj
			MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	MVAR	MVAR
1	1	SRLYA	28	13	2538	1741	1870	-796	-
2	2	CLGON	392	190	-	-	-	-	-
3	3	CWANG	664	321	-	-	-	-	-
4	4	BLRJA	466	226	-	-	-	-	-
5	5	KMBNG	630	305	-	-	-	-	-
6	6	BKASI	416	202	-	-	-	-	-
7	7	GNDUL	838	406	-	-	-	-	-
8	8	CIBNG	338	164	-	-	-	-	-
9	9	DEPOK	241	117	-	-	-	-	-
10	10	MTWAR	285	138	2261	1165	1483	-259	-
11	11	TASIK	421	204	-	-	-	-	-
12	12	CBATU	702	340	-	-	-	-	-
13	13	CRATA	252	122	696	191	347	-320	-
14	14	SGLNG	-	-	420	71	177	-461	-
15	15	BDSLN	71	35	-	-	-	-	-
16	16	MDCAN	353	171	-	-	-	-	-
17	17	TJATI	248	120	2200	10	3195	-969	-
18	18	UNGAR	239	116	-	-	-	-	-
19	19	PEDAN	767	371	-	-	-	-	-
20	20	NBANG	277	134	-	-	-	-	-
21	21	GRSIK	142	69	684	204	1204	-241	-
22	22	KRIAN	816	395	-	-	-	-	-
23	23	GRATI	423	205	600	208	798	-137	-
24	24	KEDIRI	765	371	-	-	-	-	-
25	25	PAITON	1169	566	395	539	2427	-1271	-
26	26	BANTEN	-	-	550	550	319	-168	-
27	27	SRLYA BR	66	32	531	85	319	-168	-
28	28	NRKBA	348	168	-	-	-	-	-
29	29	KSGHN	688	333	-	-	-	-	-
30	30	ADIPALA	-	-	550	60	283	-220	-
31	31	CILACAP	-	-	1350	60	1227	-220	-

Tabel 3.2 Data pembangkitan sistem interkoneksi 500 kV Jamali (lanjutan)

No	Kode Bus	Nama Bus	Load		Generator		Qmax	Qmin	Qinj
			MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	MVAR	MVAR
32	33	LKONG	621	301	-	-	-	-	-
33	34	DKSBI	610	295	-	-	-	-	-
34	35	DLTMS	390	189	-	-	-	-	-
35	36	TMBUN	496	240	-	-	-	-	-
36	37	BANGIL	419	203	-	-	-	-	-
37	38	MKRNG	224	109	-	-	-	-	-
38	39	PRIOK	624	302	-	-	-	-	-
39	40	SUKATANI	132	64	-	-	-	-	-
40	41	CKLNG	440	213	-	-	-	-	-
41	42	BATANG	294	142	-	-	-	-	-
42	43	TNDES	461	223	-	-	-	-	-
43	44	PLTGU JW 1	-	-	640	166	1250	-	-

Tabel 3.3 Data pengembangan pembangkit pada sistem interkoneksi 500kV Jamali tahun 2018

Tahun	Nama	Kapasitas Daya (MW)	Total Daya (MW)	Pembangkitan (MW)	Beban (MW)
2016	SRLYA	3613	18891	14601	13878
	SRLYA BR	637.5			
	M.TAWAR	2324			
	CRATA	1008			
	SGLNG	700			
	T. JATI	2888			
	GRESIK	1120			
	GRATI	560			
	PAITON	4803			
	ADIPALA	637.5			
	CILACAP	600			

Tabel 3.3 Data pengembangan pembangkit dan beban pada sistem interkoneksi 500kV Jamali tahun 2018 (lanjutan)

Tahun	Nama	Kapasitas Daya (MW)	Total Daya (MW)	Pembangkitan (MW)	Beban (MW)
2017	Banten	630.4	20671.4	153806	14134
	M. TAWAR	850			
	GRATI	300			
2018	SUKATANI	1600	25286.4	16392	17109
	M. TAWAR	890			
	GRATI	850			
	CILACAP	1275			

Tabel 3.4 Data penambahan beban pada sistem interkoneksi 500kV Jamali tahun 2018

Tahun	Nama bus	Kapasitas Beban (MW)	Total Beban (MW)
2016-2018	DKSBI	83	3231
	KMBNG	31	
	GANDUL	159	
	CLGON	468	
	DLTMS	74	
	TASIK	250	
	KSGHN	361	
	MDCAN	90	
	PEDAN	196	
	TANDES	461	
	NGBANG	80	
	GRATI	106	
	PAITON	504	
KEDIRI	371		

3.2 PowerWorld 18

Merupakan perangkat lunak (*software*) yang dapat dipakai untuk mensimulasikan sistem kelistrikan. Power world bisa digunakan untuk mendesain suatu sistem tenaga listrik dan dapat mempermudah dalam melakukan analisa sistem kelistrikan. Dalam penggunaannya sebagai perangkat lunak untuk bidang keilmuan teknik tenaga listrik, simulator ini telah teruji mempunyai kemampuan yang sebanding dalam memecahkan permasalahan-permasalahan di area sistem ketenagalistrikan dengan perangkat lunak sejenis, selain itu juga memiliki kelebihan pada tampilannya yang tersaji secara interaktif melalui tampilan visualisasi grafis.

Pada PowerWorld Simulator, pemodelan sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi *graphical case editor*. Jaringan transmisi, misalnya dapat dihubungkan atau dikeluarkan dari sistem, jaringan transmisi atau pembangkit baru dapat ditambahkan, demikian pula untuk aktifitas penyaluran daya (*power dispatch*). Untuk aplikasi dasar, PowerWorld Simulator 18 dapat melakukan analisis *integrated economic dispatch*,

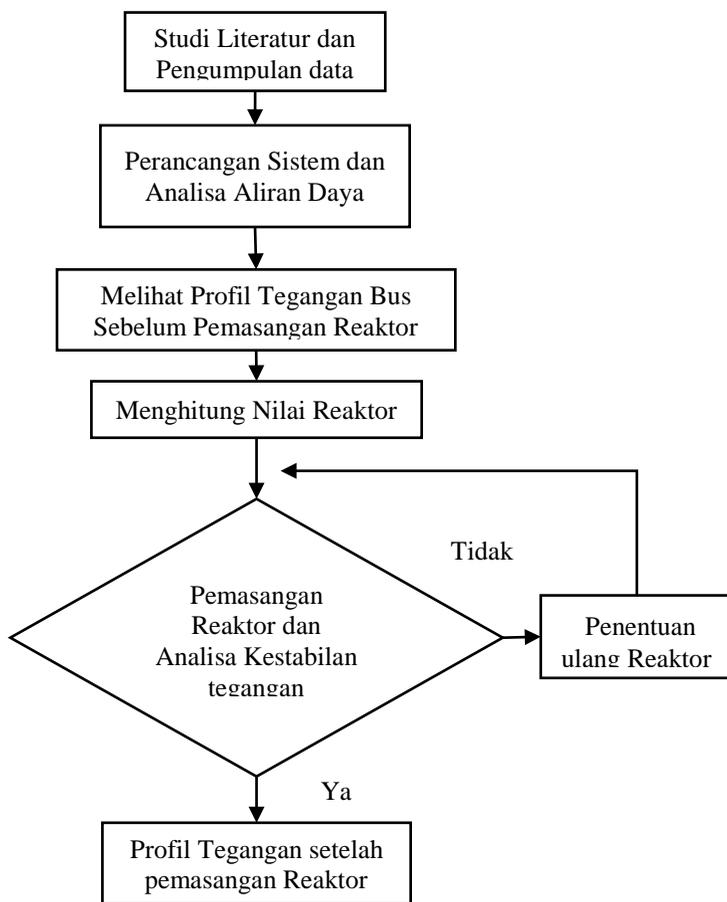
Analisis transaksi ekonomi per area, komputasi *Power Transfer Distribution Factor* (PTDF), analisis hubung singkat, dan analisis kontingensi. Semua aplikasi ini dapat diakses dengan mudah melalui fasilitas antar muka yang tervisualisasi.

Sebagai tambahan, beberapa *Add-on* telah tersedia yang memungkinkan pengguna dapat melakukan analisis khusus, diantaranya *Voltage Adequacy and Stability Tool* (PVQV). Fitur *Add-on* ini memungkinkan pengguna untuk menganalisis stabilitas tegangan sistem melalui simulasi PV/QV. Selanjutnya, pengguna dapat memperoleh tampilan grafik dari parameter-parameter sistem.

3.3 Metodologi Simulasi

Pada pembuatan tugas akhir ini metodologi yang digunakan adalah Kurva PV. Kurva ini dapat digunakan untuk melakukan analisis kestabilan tegangan. Caranya yaitu dengan memberikan pembebanan maksimum pada bus dengan melakukan transfer daya dari sumber menuju beban. Pada kurva PV terdapat dua sumbu yaitu sumbu x dan sumbu y. Pada sumbu x mewakili transfer daya pada bus, sedangkan Sumbu y mewakili tegangan bus ketika dilakukan pembebanan.

Pada titik puncak menggambarkan kondisi operasi stabil dan jika melebihi titik kritis menyatakan ketidakstabilan kondisi operasi sistem tenaga listrik. Untuk flowchart metodologi simulasi dapat ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram alir metodologi pelaksanaan studi

Berdasarkan gambar 3.2 di atas maka metodologi yang digunakan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Studi literatur

Studi literatur perlu dilakukan untuk menunjang penguasaan tentang pengumpulan pustaka untuk dipelajari dalam pengerjaan dan penelitian Tugas Akhir (TA). Literatur yang dipelajari dalam topik tugas akhir ini yaitu mengenai analisa sistem tenaga, *Load Flow Analysis*, *Voltage Stability*, *Shunt Reactor*, dan *PV Curve* .

2. Pengumpulan Data

Data-data yang dikumpulkan adalah data sistem kelistrikan Jamali 500 kV. Data-data tersebut meliputi data pembangkitan, data beban yang ditanggung GI 500 kV, data saluran, dan konfigurasi tiang saluran transmisi.

3. Analisa Aliran Daya

Analisa aliran daya dilakukan dengan menggunakan *software* Power World. Data-data yang telah diperoleh dimasukkan ke dalam program Power World load-flow. Dari *running* program tersebut didapatkan profil tegangan dari setiap bus.

4. Melihat profil tegangan bus sebelum pemasangan reaktor

Menganalisa nilai dari data hasil analisa aliran daya, serta menghitung impedansi pada saluran untuk menentukan nilai dari *Shunt Reactor*.

5. Analisa Setelah Pemasangan *Shunt Reactor*

Menganalisa stabilitas tegangan dengan membandingkan sebelum dan setelah pemasangan Reaktor.

6. Penulisan Buku Tugas Akhir.

Penulisan laporan adalah rangkuman kesimpulan akhir dari beberapa rangkaian metodologi diatas untuk menggambarkan hasil serta analisa dan simulasi yang telah dilakukan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab 4 ini akan membahas tentang stabilitas tegangan pada sistem kelistrikan transmisi Jawa-Madura-Bali 500kV (2018) untuk mengetahui bus yang mengalami kelebihan tegangan (*over voltage*)

4.1 Data Simulasi

Data simulasi yang digunakan yaitu *single line diagram* sistem tenaga listrik Jamali 500 kV pada tahun 2018. Untuk parameter yang dipakai yaitu data saluran transmisi (*transmission line*), data pembangkit (*generation*), data beban (*load*), data tiang transmisi, data beban puncak (*peak load*) pada pukul 13.00 dan 19.00 Dimana memiliki jumlah beban keseluruhan 16612,9 MW dan 8046 MVAR untuk pukul 13.00. sedangkan kan 17109,9 MW dan 8297 MVAR untuk pukul 19.00..

4.2 Sistem Pembangkit Listrik Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV

Operasi sistem tenaga listrik Jamali untuk sisi tegangan ekstra tinggi dan tegangan tinggi dikelola oleh PT.PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Jawa Bali (PLN P3B JB). Sistem tenaga listrik Jamali terhubung satu sama lain melalui transmisi tenaga listrik 500 kV, 150 kV dan 70 kV. Single line diagram sistem tenaga listrik dapat dilihat pada bab 3.

Sistem interkoneksi memungkinkan adanya transfer antar area, sehingga kekurangan daya di suatu area akan dapat dibantu area lain melalui jaringan yang terinterkoneksi. Sistem interkoneksi ini juga membuat setiap kejadian di sistem tenaga listrik akan mempengaruhi ke seluruh sistem interkoneksi tersebut. Besarnya sistem interkoneksi ini diukur dari besarnya kapasitas pasokan dalam hal ini pembangkit, serta tingkat kebutuhan tenaga listrik. Daya yang disalurkan berasal dari pembangkit listrik tenaga air (terdapat pada pembangkit Cirata, Saguling, dan Matenggeng), pembangkit listrik tenaga uap (terdapat pada pembangkit Suralaya, Banten, Bojanegara, Balaraja, Tanjung Pucut, Rawalo, Cirebon, Jawa Tengah, Indramayu, Tanjung Jati, dan Paiton). pembangkit listrik tenaga gas uap (terdapat pada pembangkit Muara Karang, Priok, Muara Tawar, Jawa1, Grati, dan Gresik).

4.3 Klasifikasi Bus pada Sistem Tenaga Listrik Jamali 500kV

Pada sistem tenaga listrik Jamali 500kV terdapat single line diagram berisikan bus yang memiliki klasifikasi tipe bus sebagai berikut :

1. Slack bus (1 bus) yaitu bus dengan pembangkit yang berfungsi menyuplai kekurangan daya pada beban. Untuk Slack bus pada sistem ini yaitu bus Suralaya dengan pembangkit listrik tenaga uap.
2. Generator bus (11 bus) yaitu Muara tawar, Cirata, Saguling, Tanjung Jati, Gresik, Grati, Paiton, Adipala, Cilacap, Banten, dan Sukatani. Generator bus merupakan bus yang terhubung langsung dengan generator yang memiliki kemampuan mengubah-ubah (variable) daya reaktifnya, untuk menjaga agar besar tegangan dibusnya tetap.
3. Load bus (29 bus) yaitu bus Cilegon, Cawang, Balaraja, Kembangan, Bekasi, Gandul, Cibinong, Depok, Tasikmalaya, Cibatu, Bandung selatan, Mandirancan, Ungaran, Pedan, Ngimbang, Kediri, Ujungberung, Rawolo/kesugihan, Bojanegara, Lengkong, Duri kosambi, Deltamas, Tambun, Bangil, Muara karang, Priok, Cikalong, Batang/pemalang, Tandes.

Perencanaan single line diagram menggunakan MVA base 100 MVA dan kV base 500 KV sebagai nilai base untuk kelistrikan sistem Jamali 500 kV.

4.4 Simulasi dan Analisis pada Sistem Jaringan

Simulasi untuk sistem tenaga listrik yang digunakan pada tugas akhir adalah dengan menggunakan PowerWorld 18. Metode Newton Raphson digunakan untuk perhitungan aliran daya sistem kelistrikan yang disimulasikan. Hasil running program load flow untuk tegangan dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil simulasi *Load Flow* sistem kelistrikan Jamali 500kV

Kode Bus	Tegangan (PU)	Angle	Load		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.03	94.12	27.6	13.37	1889	1768
2	1.028	93.97	392.4	190.05	0	0
3	0.958	90.06	663.5	321.35	0	0
4	0.978	91.14	465.6	225.5	0	0
5	0.975	90.98	629.5	304.88	0	0
6	0.956	89.72	416	201.48	0	0
7	0.957	89.23	838.3	406.01	0	0
8	0.953	88.99	338.1	163.75	0	0
9	0.954	89.02	241.2	116.82	0	0
10	0.98	92.65	285.4	138.23	2125	1308.99
11	0.994	106.05	420.8	203.8	0	0
12	0.975	95.66	701.5	339.75	0	0
13	0.987	99.33	251.6	121.86	696	192
14	0.992	100.91	0	0	420	60
15	0.996	102.65	71.4	34.58	0	0
16	1.006	105.61	352.5	170.72	0	0
17	1.08	118.02	248.4	120.31	2200	102
18	1.039	114.61	239.3	115.9	0	0
19	0.979	111.61	766.9	371.43	0	0
20	0.995	118.04	277.2	134.25	0	0
21	0.987	119.98	142.3	68.9	896	208
22	0.987	119.75	816.2	395.3	0	0
23	0.986	123.36	423.1	204.9	600	208
24	0.970	117.03	365.3	270.65	0	0
25	0.98	126.91	1169.1	566.22	3950	595.32
26	1.021	93.79	0	0	550	166

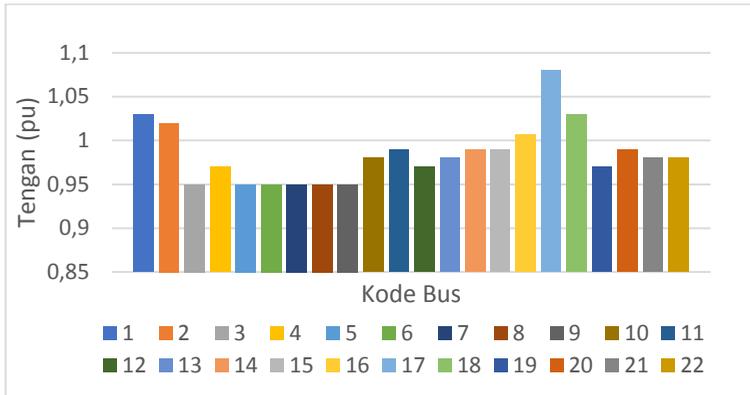
Tabel 4.1 Hasil simulasi *Load Flow* sistem kelistrikan Jamali 500kV(lanjutan)

Kode Bus	Tegangan (PU)	Angle	Load		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
27	1.0297	94.13	66.4	32.16	550	84.93
28	0.996	103.44	347.7	168.4	0	0
29	0.998	111.45	688.2	333.31	0	0
30	1.002	112.31	0	0	550	60
31	1.003	112.74	0	0	1350	172
32	1.006	92.84	0	0	0	0
33	0.954	88.89	620.4	300.47	0	0
34	0.974	91.02	610	295.4	0	0
35	0.976	96.3	389.9	188.8	0	0
36	0.954	89.25	296	140.2	0	0
37	0.970	121.4	418.9	202.8	0	0
38	0.978	91.54	224	108.5	0	0
39	0.978	91.89	624.4	302.4	0	0
40	0.978	94.84	132.2	64	0	0
41	0.994	102.96	440	213	0	0
42	1.032	113.48	293.5	142.15	0	0
43	0.986	119.91	461	223.22	0	0
44	0.978	94.86	0	0	640	166

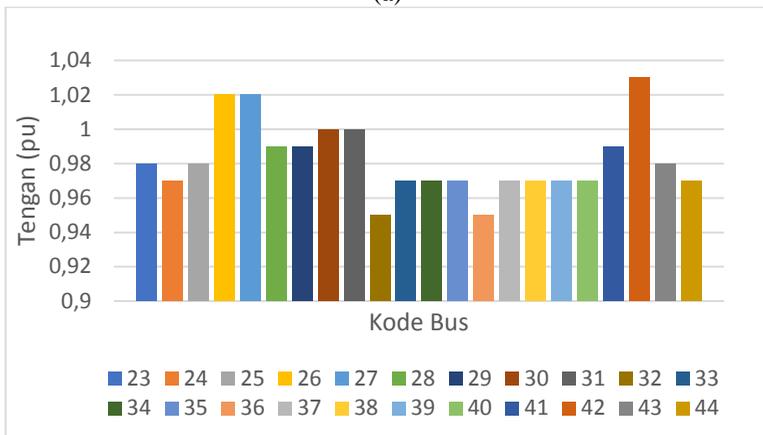
Dari table 4.1 dapat dilihat hasil dari aliran daya dari sistem kelistrikan Jamali 500 kV. Pada kondisi awal dapat dilihat pada tabel terdapat bus yang memiliki kelebihan tegangan yaitu tegangan diatas batas toleransi 1,05 pu (>105%) yaitu pada bus 17(Tanjung Jati) dengan nilai tegangan 1,08 pu sekitar 540.012 kV.

Hal ini melebihi dari batas yang diperbolehkan dari standart PLN. Jika dibiarkan maka dapat menyebabkan kerusakan dari peralatan sistem.

Maka dari itu perlu dilakukan tindakan pencegahan dengan memasang sebuah Reaktor. Berikut ini merupakan grafik kondisi awal level tegangan masing-masing bus ditunjukkan pada gambar 4.1



(a)



(b)

Gambar 4.1 Grafik profil tegangan bus sistem kondisi awal (a) bus no. 1-22, (b) bus no. 23-44

4.5 Perhitungan Reaktor Shunt

Pada penentuan besarnya reaktor shunt dapat digunakan rumus dibawah ini :

1. *Shunt Reactor*

$$Lp = \frac{1}{\omega^2 \cdot k \cdot (Ce - 3Cc)}$$

Dimana

Lp: Reaktor *Shunt*

K: Konstanta

Cc : Kapasitansi kabel fasa

Ce: Kapasitansi kabel fasa ke tanah [6, 8].

2. Reaktor Netral

$$Ln = \frac{1}{3} \times \frac{Lp \cdot m_o}{k - m_o}$$

Dimana :

Lp: Reaktor *Shunt*

Ln: Reaktor netral

k : konstanta (0,6 dan 0,8)

Co: Ce [1 2].

Mo: $\frac{c-co}{c}$

Konstanta perbandingan Ln dan Lp, besar m_o dan k [6, 8].

Ln/Lp	m _o = 0,3	m _o = 0.45
K = 0,6	0,33	1
K = 0,8	0,2	0,43

3. Menghitung GMD

Jarak antar kawat fasa

Jarak kawat antar fasa SUTT 70kV idealnya adalah 3 meter, SUTT= 6 meter dan SUTET=13,2 meter. Hal ini karena menghindari terjadinya efek ayunan yang dapat menimbulkan flash over antar fasa.

Jarak Antar Fasa : 13,2 m, Maka Dab = 13,2 m, Dbc = 13,2 m, Dac = 26,4 m

$$Deq = Deq = \sqrt[3]{13,2 \times 13,2 \times 26,4} = 16,63m$$

Tinggi kawat fasa : 85,875 m

$$GMD = Deq \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Deq^2}{4Heq^2}}}$$

$$GMD = 16,63 \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{20,16^2}{4 \times 8,6^2}}} = 16,61 m$$

4. Menghitung GMR

$$A = \frac{S}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{N}}$$

$$A = \frac{45 \times 10^{-2}}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{4}} = 0,318$$

$$GMR = (N \times r \times A^{N-1})^{1/N}$$

$$GMR = (4 \times 0,16395 \times 0,318^{4-1})^{1/4} = 0,381$$

5. Menghitung Cc

$$Cc = \frac{0,0388}{\log \frac{GMD}{GMR}}$$

$$Cc = \frac{0,0388}{\log \frac{16,61}{0,381}} = 0,023 \frac{\mu F}{mile}$$

$$Cc = 0,014 \mu F$$

6. Menghitung Ce

$$Ce = \frac{2\pi x \epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r} - \ln \left(\frac{\sqrt[3]{H12xH23xH31}}{\sqrt[3]{H1xH2xH3}} \right)}$$

$$H1 = 85,875 \text{ m}, H2 = 85,875 \text{ m}, H3 = 85,875 \text{ m}$$

$$H12 = \sqrt{171,75^2 + 13,2^2} = 172,25 \text{ m}$$

$$H23 = \sqrt{171,45^2 + 13,2^2} = 172,25 \text{ m}$$

$$H31 = \sqrt{171,45 + 26} = 173,76 \text{ m}$$

Maka nilai Ce,

$$Ce = \frac{2\pi x 8,854 x 10^{-12}}{\ln \frac{16,61}{0,16395} - \ln \left(\frac{\sqrt[3]{172,25 x 172,25 x 172,25}}{\sqrt[3]{85,875 x 85,875 x 85,875}} \right)}$$

$$Ce = \frac{2\pi x 8,854 x 10^{-12}}{4,61 - 0,093}$$

$$Ce = 1,41 x 10^{-11}$$

7. Menghitung Lp

$$Lp = \frac{1}{\omega^2 \cdot k(Ce + 3 \cdot Cc)}$$

$$Lp = \frac{1}{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot 0,6(1,36 x 10^{-11} + 3(0,014 x 10^{-6}))}$$

$$Lp = \frac{1}{98596 x 0,6 x 4,2 x 10^{-8}} = 383 \text{ H}$$

8. Menghitung Ln :

$$Ln = \frac{1}{3} x \frac{Lp x mo}{k - mo}$$

$$Ln = \frac{1}{3} x \frac{402,47 x 0,33}{0,6 - 0,33} = 157 \text{ H}$$

9. Mengkonversi nilai L ke Q

$$L_p = 383 \text{ H}$$

$$L_p = 383 // 383 // 383 = 127,6 \text{ H}$$

$$L_n = 157$$

$$L_{\text{total}} = L_p + L_n = 127,6 + 157 = 284,6 \text{ H}$$

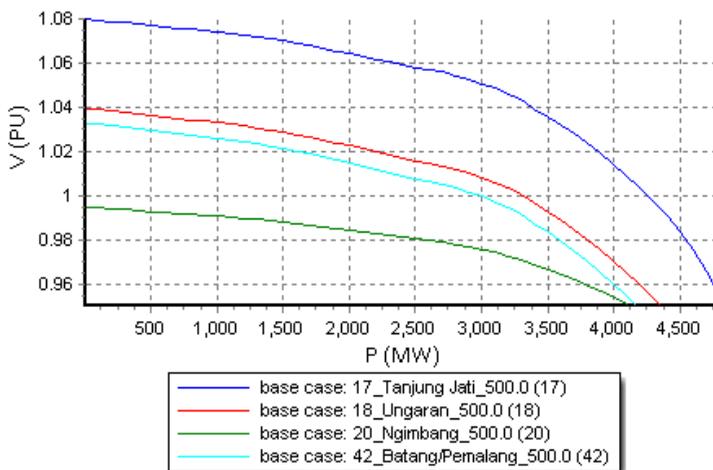
$$X_L = 2\pi fL = 2,3,14 \times 50 \times 284,6 = 89364,4 \text{ ohm}$$

$$X_L = \frac{KV^2}{Q}$$

$$Q = \frac{KV^2}{X_L} = \frac{500^2}{89364,4} = 279753458 \text{ var} = 279,8 \text{ Mvar}$$

4.6 Kurva PV

Pada perancangan kurva PV ini dilakukan dengan cara menambahkan beban pada bus secara terus menerus hingga tercapai titik kritis. Setelah titik kritis tersebut tercapai maka dapat dilihat karakteristik kurva PV pada masing-masing bus. Saat dilakukan penambahan beban secara terus menerus maka tegangan tiap bus akan mengalami penurunan tegangan. Hal ini dikarenakan karakteristik dari kurva PV untuk tegangan berbanding terbalik dengan penambahan beban. Dari gambar 4.2 dapat dilihat kurva PV pada bus 17 yaitu Tanjung jati memiliki nilai tegangan hingga 1.08 pu.



Gambar 4.2 Kurva PV bus 17,18,20 dan 42

4.7 Pemasangan Reaktor Shunt

Pada kasus yang dialami sistem kelistrikan Jamali 2018, terdapat gangguan yaitu kelebihan tegangan (*over voltage*) dibus tertentu. Berdasarkan hasil yang didapat dari karakteristik kurva PV bus yang mengalami *over voltage* pada bus 17 (tanjung jati) yang memiliki tegangan lebih hingga 1.08 pu. Maka dari itu bus tersebut dipilih untuk dilakukan pemasangan Reaktor *shunt*.

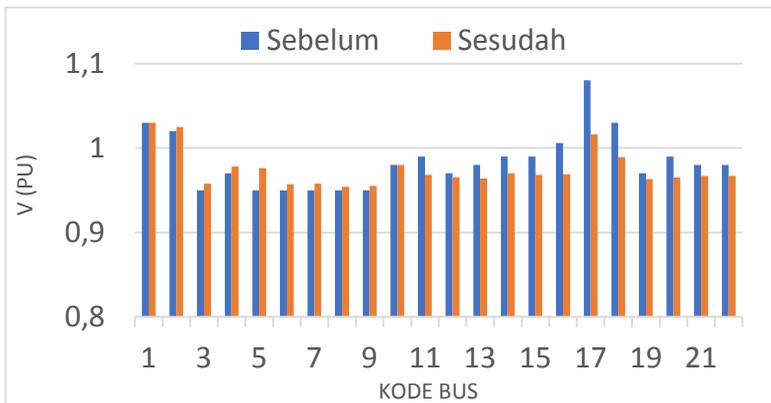
Dari perhitungan yang dilakukan maka ukuran reaktro *shunt* yang dipasang pada bus adalah 300 MVAR. Setelah simulai dijalankan maka besar daya reaktif yang diinjeksikan pada bus adalah:

Bus 17 = 279,8 MVAR

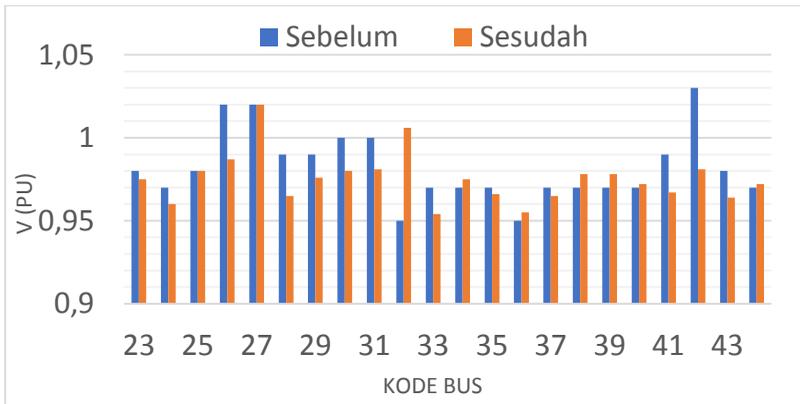
4.8 Analisis Stabilitas Tegangan Setelah Penambahan Reaktor

Kelebihan tegangan pada bus salah satu penyebabnya adalah akibat adanya line charging pada saluran. Terutama pada saluran transmisi yang sangat panjang. Selain itu kondisi saat beban minimum juga penyebab terjadinya *over voltage*. Karena ketika penyerapan daya reaktif yang terlalu besar pada sisi beban.

Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa aliran daya setelah pemasangan Reaktor dapat memperbaiki tegangan pada bus yang sebelumnya mengalami *over voltage*. Gambar 4.3 Menunjukkan profil perubahan tegangan setelah pemasangan reaktor.



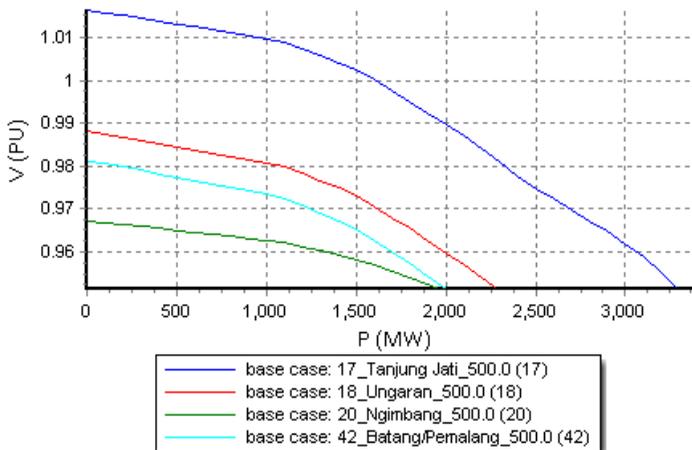
(a)



(b)

Gambar 4.3 Grafik profil tegangan bus sistem setelah pemasangan Reaktor (a) bus no. 1-22, (b) bus no. 23-44

Gambar 4.4 berikut ini merupakan hasil plot kurva PV setelah kompensasi daya reaktif dari reaktor perbaikan dari bus *over voltage* (bus 17,18, 20 dan 42).

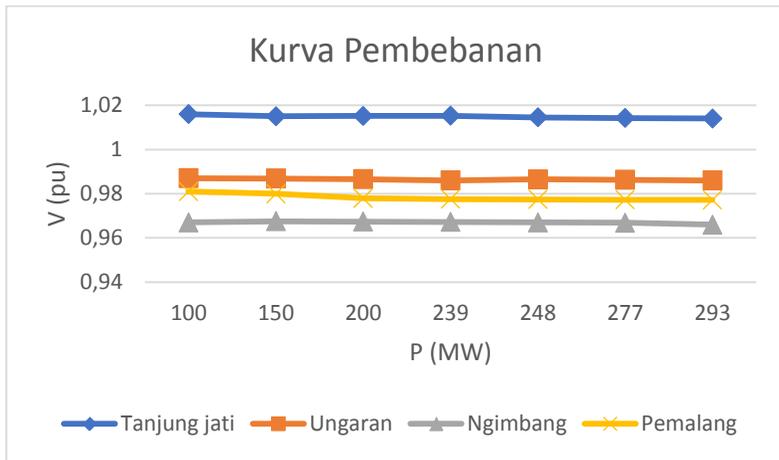


Gambar 4.4 Kurva PV bus 17, 18 ,20 dan 42

Setelah dilakukan perancangan kurva PV selanjutnya dilakukan analisis kestabilan tegangan pada bus yang mengalami masalah. Dengan cara melihat beban yang ditanggung pada bus. Berikut ini adalah tabel 4.1 pembebanan pada bus system kelistrikan Jamali 2018

Tabel 4.2 Pembebanan pada bus system kelistrikan Jamali 2018

Kode Bus	Nama Bus	Tegangan PU	ΔV	Load	
				MW	Mvar
17	Tanjung Jati	1.015	1.5%	248	120
18	Ungaran	0.98	2%	239	116
20	Ngimbang	0.96	4%	277	134
42	Pemalang	0.97	3%	294	142



Gambar 4.5 Kurva Pembebanan pada bus 17,18,20 dan 42

Dari gambar 4.5 dapat dilihat bahwa saat beban pada bus semakin naik maka terjadi penurunan tegangan pada bus. Namun profil tegangan pada bus 17, 18, 20 dan 42 masi dibawah standart dari PLN yaitu $\pm 5\%$. Sehingga tegangan sistem dapat dikatakan stabil

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. Pemasangan reaktor *Shunt* dapat mengatasi bus *Overvolage*.
2. Sebelum pemasangan reactor tegangan bus 17 (Tanjung jati) yaitu 1.08 pu, setelah dipasang tegangan bus 17 menjadi 1.016 pu.
3. Setelah pemasangan reaktor tegangan tertinggi berada pada bus 1 (Suralaya) yaitu 1.03 pu. Sedangkan tegangan terendah berapada pada bus 8 (Cibinong) yaitu 0.953 pu.
4. Tingkat kestabilan tegangan dan tegangan sistem masih dalam batas yang aman.

5.2 Saran

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

1. Perlu sebuah pengembangan untuk menentukan dimana lokasi yang cocok untuk pemasangan reaktor, agar diperoleh sistem yang stabil.
2. Pemasangan reaktor pada bus yang mengalami tegangan lebih diharapkan tidak membuat sistem mengalami kolapse ataupun under voltage. Jika terjadi maka harus dibawah batas nominal toleransi yaitu $\pm 5\%$ tegangan nominal.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Agung Sembogo. T, "Studi Perbaikan Stabilitas Tegangan Kurva P-V pada Sistem Jawa-Bali 500kV dengan Pemasangan Kapasitor Bank Menggunakan Teori Sensitivitas", Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.
- [2]. Kundur, P, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [3]. Gregorius Arief Dwi P, "Estimasi Batas Kestabilan Tegangan Sistem Tenaga Listrik", Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2006.
- [4]. Wahyudi, R, Ir. "Transmisi Tenaga Listrik", Diktat Kuliah Jurusan Teknik Elektro, FTI ITS, 2010.
- [5]. Penangsang, Ontoseno. "*Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2*", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [6]. Zoran Gajić, Birger Hillström, Fahrudin Mekić. "*Hv Shunt Reactor Secrets For Protection Engineers*", Spokane, Washington, 2003.
- [7]. PT.Perusahaan Listrik Negara (Persero),"Renacana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL)", 2016-2025
- [8]. Wisnu Pribadi, "Permodelan Transient Reaktor *Shunt* pada Sistem Transmisi 500 kV Akibat Gangguan Fasa ke Tanah", Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.
- [9]. Andi M. Nur Putra, Arfita Yuana Dewi, "Studi Analisa Kestabilan Tegangan Sistem 150 Kv Berdasarkan Perubahan Tegangan (Aplikasi Pt. Pln Batam)", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Padang, Padang, 2013.
- [10]. M. Ramold, G. Idarraga, J. Jäger, "Transient shunt reactor dimensioning for bulk power transmission systems during normal and faulty network conditions", IEEE, 2006.
- [11]. Kevin Marojahan B.N, Nanang Hariyanto, Muhammad Nurdin, "Characteristics and Suppression of Secondary Arc on 500 kV Transmission Lines for Single Pole Reclosure Purposes", EECCIS, 2006.
- [12]. Karbalaeei. F, Abasi. S, "Prediction of Voltage Collapase in Presence of Voltage Dependent Loads by PV Curve Approximation", IEEE, 2011.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

RIWAYAT HIDUP



Eka Rizky Aprierwanto yang akrab dipanggil Apri lahir di Surabaya pada tanggal 22 April 1993. Merupakan Anak pertama dari 3 bersaudara, dari pasangan Siswanto dan Ermawanti. Sebelum melanjutkan pendidikan sarjana mengambil program diploma 3 (D3) PENS dengan prodi Elektro Industri (Arus Kuat) selama 3 tahun. Kemudian melanjutkan jenjang pendidikan sarjana (S1) teknik Elektro ITS, dengan konsentrasi bidang Teknik

Sistem Tenaga Listrik sampai sekarang. Selama kuliah aktif mengikuti organisasi unit kegiatan mahasiswa (UKM) dibidang olahraga yaitu bulutangkis. Sempat diamanahi sebagai ketua UKM badminton di PENS, selain itu sebagai staff ahli departemen Luar Negeri HIMA ELIN PENS. Memiliki hobi bulutangkis, renang, dan kuliner.

email : rizky.viens@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)