

**SKRIPSI**  
**STUDI KONTINGENSI SISTEM INTERKONEKSI SULBAGSEL**

Disusun dan diajukan oleh:

**A.ANUGRAH PARANRENGI**

**D411 16 310**



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2021**

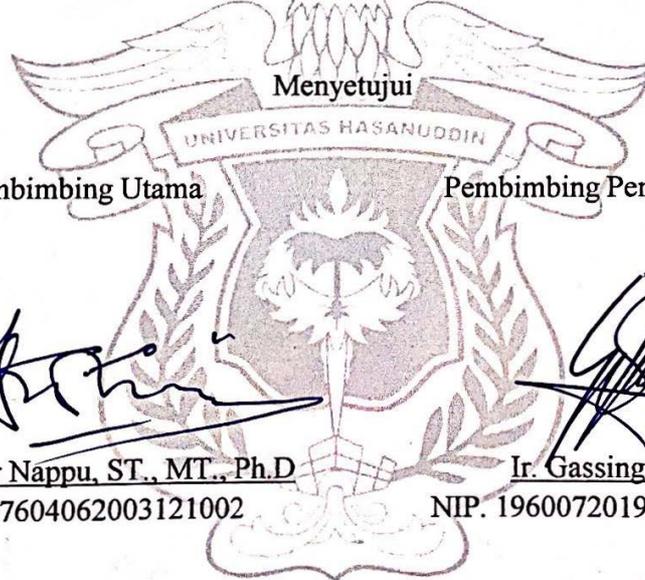
**LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR**

**STUDI KONTINGENSI SISTEM INTERKONEKSI SULBAGSEL**

Disusun dan diajukan oleh :

**A. ANUGRAH PARANRENGI**  
**D411 16 310**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 09 Juni 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan



M. Bachtiar Nappu, ST., MT., Ph.D  
NIP. 197604062003121002

Ir. Gassing, MT  
NIP. 196007201987021001

Ketua Program Studi



Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.  
NIP. 19691026 199412 2 001

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : A. Anugrah Paranrengi

NIM : D41116310

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

### **Studi Kontingensi Sistem Interkoneksi Sulbagsel**

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi/tesis/disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 10 Juni 2021

Yang Menyatakan



A. Anugrah Paranrengi

## KATA PENGANTAR

Segala puji atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul : “Studi Kontingensi Sistem Interkoneksi Sulbagsel”.

Tujuan penulisan skripsi ini untuk memenuhi sebagai syarat menyelesaikan studi bagi mahasiswa program S-1 diprogram Studi Teknik Elektro Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini.

Terlesaikannya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis mengucapkan banyak terima kasih bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai. Maka, dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Keluarga saya yang saya cintai yang terus memberikan doa, memberika motivasi, dan memberikan dukungan dari segi moril maupun materi kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi saya ini.
2. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT, Ketua Departemen Teknik Elektro
3. Bapak M. Bachtiar Nappu, ST., MT., Ph.D dan Bapak Ir. Gassing, MT selaku dosen pembimbing skripsi saya yang telah memberikan bimbingan dan kritik hingga dapat terselesaikannya skripsi ini.

4. Ibu Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph.D dan bapak Prof. Dr. Ir. Nadjamuddin Harun, M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.
5. Bapak/Ibu dosen dan staff di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin khususnya program Studi Teknik Elektro yang telah banyak membantu saya selama menjalani masa studi.
6. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) UPB Makassar.
7. Kepada teman-teman syahrul college ( Vicky, Alman, Dave, Onan, Dammang, Gafur, Yudi, Ryan) yang selalu menjadi teman cerita.
8. Kepada teman-teman EXCITER16 untuk kebersamaannya.
9. Kepada semua pihak yang terlibat dan tidak dapat saya sebut satu persatu, terima kasih yang tak terhingga atas semua dukungan dan bantuannya.

Akhir kata semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua, amin.

Makassar, Februari 2021

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>SKRIPSI</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR</b> .....	ii
<b>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iv
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	viii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	ix
<b>ABSTRAK</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metode Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik [1] .....	6
2.2 Sistem Interkoneksi [2].....	9
2.3 Keandalan Sistem Tenaga Listrik [1] .....	10
2.4 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik.....	12
2.4.1 Faktor-Faktor Penyebab Gangguan .....	12
2.4.2 Jenis Gangguan .....	13
2.5 Analisis Kontingensi .....	16
2.6 Aliran Daya .....	19
2.6.1 Konsep Perhitungan Aliran Daya .....	19
2.6.2 Persamaan Aliran Daya .....	20
2.7 Static Var Compensator [6].....	22
2.8 DIgSILENT <i>PowerFactory</i> .....	23
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	25

3.1	Judul Penelitian .....	25
3.2	Lokasi Penelitian .....	25
3.3	Waktu Penelitian .....	25
3.4	Teknik Pengambilan Data .....	25
3.5	Alur Penelitian.....	26
3.5.1	Studi Literatur.....	28
3.5.2	Pengambilan Data Sistem Sulbagsel.....	28
3.5.3	Pemodelan Single Line Diagram Sistem Sulbagsel pada DIgSILENT	29
3.5.4	Analisis Kontingensi.....	29
3.5.5	Analisa Solusi Untuk Mempertahankan Kestabilan Tegangan .....	30
3.5.6	Penulisan Hasil .....	30
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>31</b>
4.1	Pemodelan Sistem Interkoneksi SULBAGSEL .....	31
4.1.1	<i>Single Line</i> Diagram Sistem Sulbagsel .....	31
4.1.2	Data Sistem Sulbagsel.....	33
4.2	Simulasi .....	33
4.2.1	Simulasi Lepasnya Salah Satu Pembangkit (n-1) .....	35
4.2.2	Simulasi Lepasnya Salah Satu Saluran Transmisi (n-1) .....	36
4.2.3	Pemasangan Static VAR Compensator (SVC) .....	37
4.2.4	Simulasi Lepasnya Dua Pembangkit (n-2).....	50
4.2.5	Simulasi Lepasnya Dua Saluran Transmisi (n-2).....	51
4.2.6	Pemasangan <i>Static VAR Compensator</i> (SVC) .....	52
4.2.7	Pengujian Pada Kasus n-1 .....	62
5.1	Kesimpulan.....	69
5.2	Saran.....	71
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>72</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>73</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik [1] .....	6
Gambar 2.3 Diagram sat ugaris GI tipe bus dari sistem tenaga [6] .....	21
Gambar 2.3 One-line Diagram dari konfigurasi SVC.....	23
Gambar 4.1 Single Line Diagram Sistem Kelistrikan SULBAGSEL.....	32
Gambar 4.2 Pemasangan SVC pada bus Sidera dan Ntnsa 20kV .....	39
Gambar 4.3 Pemasangan SVC pada bus Silae dan Ntnsa 20kV .....	40
Gambar 4.4 Pemasangan SVC pada bus Pamona .....	42
Gambar 4.5 Pemasangan SVC pada bus Bulukumba .....	49
Gambar 4.6 Pemasangan SVC pada bus Pamona dan Pasangkayu .....	54
Gambar 4.7 Pemasangan SVC pada Gi Balusu, Mamuju, dan Ntnsa 20kV .....	55
Gambar 4.8 Pemasangan SVC pada bus Silae dan Wotu .....	58
Gambar 4.9 Pemasangan SVC pada bus Bulukumba dan Sinjai .....	60
Gambar 4.10 Pemasangan SVC pada bus Parigi .....	61
Gambar 4.11 Pengujian pada kasus Pembangkit n-1 .....	63
Gambar 4.12 Penempatan SVC untuk kasus lepasnya pembangkit n-1 .....	64
Gambar 4.13 Pengujian pada kasus transmisi n-1 .....	66
Gambar 4.14 Pemasangan SVC untuk kasu lepasnya transmisi n-1.....	68
Gambar 4.12 Pemasangan SVC pada bus Sidera lepasnya salah satu saluran transmisi n-1 .....	85
Gambar 4.13 Pemasangan SVC pada bus Silae lepasnya salah satu saluran transmisi n-1 .....	86

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Hasil Simulasi Kontingensi Analisis Pembangkit Lepas (n-1).....	35
Tabel 4.2 Hasil Simulasi Kontingensi Analisis Saluran Transmisi Lepas (n-1)...	36
Tabel 4.3 Hasil Pemasangan SVC pada Bus Sidera dan Ntnsa 20 kV .....	38
Tabel 4.4 Hasil Pemasangan SVC pada Bus Silae dan Ntnsa 20 kV.....	40
Tabel 4.5 Hasil Pemasangan SVC pada Bus PMONA .....	41
Tabel 4.6 Hasil Pemasangan SVC pada Bus Sidera .....	44
Tabel 4.7 Hasil Pemasangan SVC pada Bus Silae.....	46
Tabel 4.8 Hasil pemasangan SVC pada bus PMONA .....	48
Tabel 4.9 Hasil Pemasangan SVC pada bus Bulukumba.....	49
Tabel 4.10 Hasil Analisis Kontingensi 2 Pembangkit Lepas (n-2).....	50
Tabel 4.11 Hasil Analisis Kontingensi 2 Saluran Transimis Lepas (n-2).....	51
Tabel 4.12 Hasil Simulasi Pemasangan SVC pada bus Pamona dan Pasangkayu	53
Tabel 4.13 Hasil Simulasi Pemasangan SVC pada Bus Gi Balusu, Mamuju, dan Ntnsa2 20kV.....	55
Table 4.14 Hasil Pemasangan SVC pada Bus Silae dan Wotu .....	57
Table 4.15 Hasil Pemasangan SVC pada Bus Bulukumba dan Sinjai.....	59
Table 4.16 Hasil Pemasangan SVC pada Bus Parigi .....	61
Tabel Data Pembangkit Sistem Sulbagsel.....	74
Tabel Transformator Sistem Sulbagsel .....	76
Tabel Data Saluran Transmisi Sistem Sulbagsel .....	78

## ABSTRAK

### **A. Anugrah Paranrengi, Studi Kontingensi Sistem Interkoneksi Sulbagsel (dibimbing oleh M. Bachtiar Nappu dan Gassing).**

Karakteristik beban akan sangat mempengaruhi kapasitas (*capacity*) dan kemampuan (*capability*) sistem dalam menyalurkan daya dari pusat pembangkit hingga sampai ke beban. Hal itu menyebabkan sistem harus tetap beroperasi secara terus-menerus walaupun terjadi gangguan yang menyebabkan lepasnya salah satu perangkat lepas atau terputus dari sistem. Keadaan seperti ini biasanya dinamakan dengan keadaan kontingensi yang dapat merugikan penyaluran daya untuk memenuhi beban konsumen. Dengan menggunakan sebuah perangkat *Static Var Compensator* (SVC) performa sistem tenaga dan stabilitas sistem tenaga dapat ditingkatkan. Pada tugas akhir ini bertujuan untuk memperbaiki stabilitas tegangan apabila terjadi gangguan lepasnya pembangkit listrik dan saluran transmisi. Pemodelan sistem disimulasikan menggunakan *software* DIgSILENT *PowerFactory* dengan menggunakan *tools* *Contingency Analysis*. Kompensasi daya reaktif yang diuji pada kasus kontingensi n-2 juga dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif yang cukup untuk kasus kontingensi n-1 tetapi tidak sebaliknya.

**Kata Kunci :** Kontingensi, *Static Var Compensator* (SVC), Kompensasi, Daya Reaktif, Stabilitas, *Capacity*, *Capability*.

## ABSTRACT

### **A. Anugrah Paranrengi, Contingency Study of the South Sulawesi Interconnection System (supervised by M. Bachtiar Nappu and Gassing).**

The characteristics of the load will greatly affect the capacity and capability of the system in distributing power from the power plant to the load. This causes the system to continue to operate continuously even though there is a disturbance that causes one of the devices to be disconnected or disconnected from the system. This situation is usually called a contingency condition which can harm the distribution of power to meet consumer loads. By using a Static Var Compensator (SVC) device the performance of the power system and the stability of the power system can be improved. This final project aims to improve voltage stability in the event of a breakdown in power generation and transmission lines. System modeling is simulated using DIgSILENT PowerFactory software using Contingency Analysis tools. The reactive power compensation tested in the n-2 contingency case can also meet the sufficient reactive power requirement for the n-1 contingency case but not vice versa.

**Keyword :** Static Var Compensator, DIgSILENT PowerFactory, Reactive Power, Contingency

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar belakang**

Pengoperasian suatu sistem tenaga listrik berperan untuk menyediakan dan menyalurkan energi listrik secara terus-menerus dan andal untuk memenuhi kebutuhan konsumen listrik. Keandalan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga listrik untuk memberikan atau menyediakan pasokan energi listrik yang cukup dengan kualitas yang baik. Dengan andalnya suatu sistem listrik maka kebutuhan seluruh beban pada sistem dapat dilayani dengan memenuhi seluruh batasan-batasan operasi.

Dalam sistem interkoneksi apabila terjadi suatu gangguan pada salah satu sistem karena adanya beban lebih dan ketidakstabilan tegangan, akan berpengaruh ke sistem yang lain. Gangguan yang pada awalnya bersifat sementara dan terjadi pada bagian sistem yang mengalami gangguan saja, jika tidak ada perbaikan, maka gangguan akan tetap berlangsung dan terjadi pelepasan bertingkat yang pada akhirnya akan mengakibatkan pemadaman total (*black out*). Gangguan pelepasan elemen sistem (*outage*) dalam sistem tenaga listrik adalah sesuatu yang tidak dapat dihindarkan. Elemen terlepas dari sistem karena gangguan atau karena pemeliharaan. Pemeliharaan peralatan dari sistem tenaga listrik memerlukan pembebasan tegangan yang artinya bahwa peralatan yang dipelihara harus dikeluarkan dari operasi.

Kontingensi adalah suatu kejadian yang disebabkan oleh kegagalan atau pelepasan dari satu atau lebih generator/transmisi. Istilah ini berkaitan erat dengan

kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk melayani beban bila terjadi gangguan pada salah satu komponennya. Efek dari gangguan lepasnya transmisi tersebut akan menyebabkan perubahan aliran daya pada setiap cabang-cabang transmisi lainnya dan perubahan besar pada bus-bus lain. Dengan analisis kontingensi dapat dilakukan perhitungan terhadap gangguan (*outage*) yang terjadi pada saluran transmisi sehingga dapat diprediksikan besaran tegangan bus, maupun kapasitas transmisi yang tersisa sudah *overload* atau masih bisa dibebani saat dalam kondisi gangguan (*post-outage*). Karena adanya kontingensi, sehingga lebih dari satu saluran digunakan untuk menyalurkan daya listrik ke beban, walaupun sebenarnya dalam keadaan normal. Analisis kontingensi adalah komponen yang berfungsi untuk pengujian sistem keamanan dan merupakan kelanjutan hasil program *load flow* untuk mempertimbangkan berbagai kondisi yang mungkin terjadi dalam sistem dimasa yang akan datang dengan pengoperasian sistem untuk mengatasi terjadinya kasus-kasus yang ditimbulkan oleh kontingensi saluran transmisi. Analisis ini dilakukan dengan mengacu keadaan sistem yang diperoleh dari studi aliran daya. Sehingga merupakan suatu hal yang sangat penting bahwa sistem harus direncanakan dan dioperasikan agar dalam keadaan kontingensi atau terlepasnya suatu elemen sistem saluran transmisi tidak akan mengakibatkan pemadaman pada sebagian atau seluruh sistem. Oleh karena itu, penulis tertarik untuk meneliti keadaan kontingensi sistem interkoneksi pada sistem Sulbagsel. Adapun judul penelitian yang diangkat adalah “Studi Kontingensi Sistem Interkoneksi Sulbagsel” yang akan disimulasikan menggunakan software *digilent*.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang maka rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana cara menganalisis dampak yang ditimbulkan dari kondisi kontingensi.
2. Bagaimana cara menganalisis dampak dari kondisi kontingensi terhadap tegangan.
3. Bagaimana solusi untuk mengatasi keadaan kontingensi.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

1. Menganalisis dampak yang ditimbulkan dari kondisi kontingensi
2. Menganalisis dampak dari kondisi kontingensi terhadap tegangan.
3. Menemukan solusi untuk mengatasi keadaan kontingensi.

## **1.4 Batasan Masalah**

Untuk menghindari permasalahan yang lebih luas maka penelitian ini dibatasi sebagai berikut :

1. Sistem kelistrikan yang dianalisis adalah sistem interkoneksi jaringan transmisi dan jaringan distribusi subbagsel.
2. Sistem dalam keadaan steady state dan berada pada kondisi beban puncak siang saat simulasi.
3. Keadaan kontingensi 1 adalah lepasnya 1 unit pembangkit dan 1 unit saluran transmisi dari sistem (N-1)
4. Keadaan kontingensi 2 adalah lepasnya 2 unit pembangkit dan 2 saluran transmisi dari sistem (N-2).

5. Dalam simulasi kontingensi tidak terdapat pembangkit cadangan dalam sistem.
6. Perangkat kompensasi daya reaktif yang digunakan adalah *Static Var Compensator*.
7. Parameter kestabilan yang ditinjau adalah tegangan.

### **1.5 Metode Penelitian**

Tahap penyusunan tugas akhir ini menggunakan metode penelitian berupa :

1. Studi Literatur

Studi literatur untuk mengumpulkan dan mencari referensi bahan melalui buku, jurnal ilmiah (*paper*), dan melalui media internet yang berhubungan dengan judul penelitian.

2. Pengambilan Data

Berupa pengambilan data yang penting dan untuk diolah dalam penelitian ini.

3. Pemodelan

Pemodelan ini akan menggunakan *software* simulasi DIGSILENT. Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan *single line diagram* pada *software* simulator untuk sistem Sulbagsel.

4. Simulasi dan Pengolahan Data

Dilakukan simulasi aliran daya yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik profil tegangan pada sistem kelistrikan

5. Analisa Data

Dilakukan analisis data dari hasil simulasi dan menganalisis kestabilan tegangan dan frekuensi dengan kondisi lepasnya salah satu unit pembangkit dan salah satu beban.

#### 6. Penarikan Kesimpulan

Simpulan ini merupakan hasil akhir dari semua masalah yang dibahas dengan melihat antara hasil pengolahan dengan permasalahan yang diteliti.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Penyusunan tugas akhir ini memiliki sistematika penulisan sebagai berikut :

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi, dan sistematika penulisan.

#### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi teori penunjang dan literatur/referensi lain terkait keadaan kontingensi dari sistem interkoneksi SULBAGSEL

#### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Dalam bab ini berisi tentang waktu dan tempat penelitian, metode pengambilan data, analisa data, dan langkah-langkah penelitian.

#### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini berisi hasil simulasi dan pembahasan berdasarkan rumusan masalah.

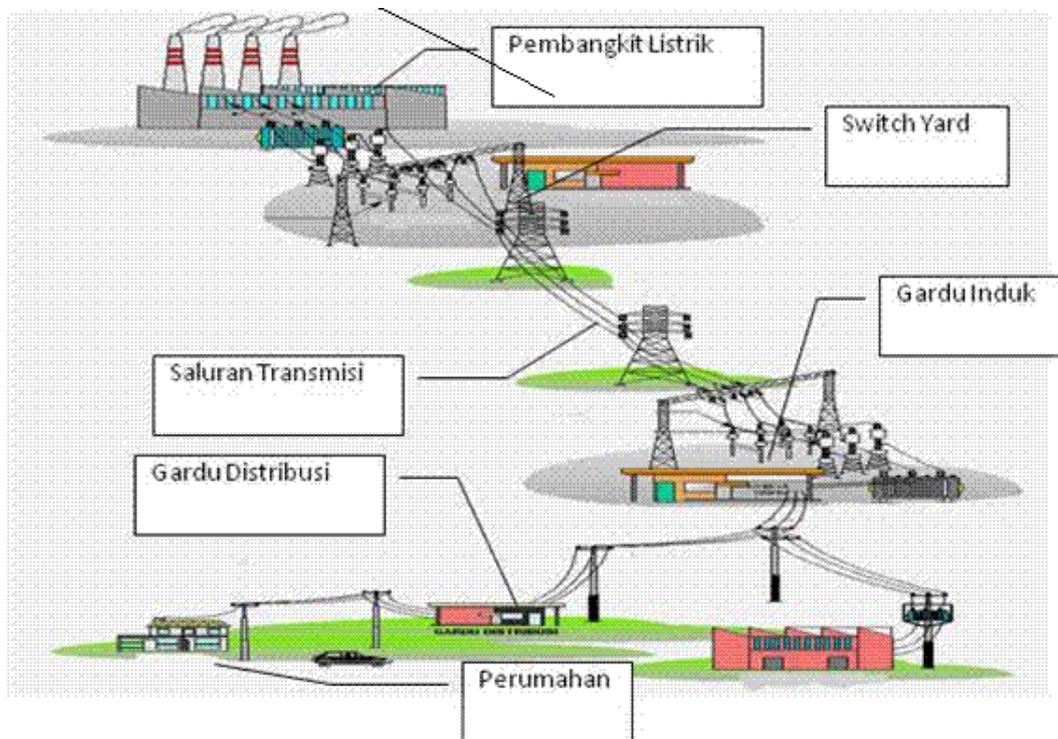
#### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab ini berisi kesimpulan dan saran berdasarkan tujuan penelitian.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik [1]

Sistem Tenaga Listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan dan berkerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Secara garis besar Sistem Tenaga Listrik dapat digambarkan dengan skema di bawah ini.



Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik [1]

Fungsi masing-masing komponen secara garis besar adalah sebagai berikut:

1. Pembangkitan merupakan komponen yang berfungsi membangkitkan tenaga listrik, yaitu mengubah energi yang berasal dari sumber energi lain misalnya: air, batu bara, panas bumi, minyak bumi dll. menjadi energi listrik.
2. Transmisi merupakan komponen yang berfungsi menyalurkan daya atau energi dari pusat pembangkitan ke pusat beban.
3. Distribusi merupakan komponen yang berfungsi mendistribusikan energi listrik ke lokasi konsumen energi listrik.
4. Beban adalah peralatan listrik di lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tersebut.

Pada suatu sistem tenaga listrik, tegangan yang digunakan pada masing-masing komponen dapat berbeda sesuai dengan kepentingannya. Dengan kata lain, setiap komponen pada sistem tenaga listrik mempunyai level tegangan yang berbeda-beda. Pada sistem pembangkitan, level tegangan disesuaikan dengan spesifikasi generator pembangkit yang digunakan, biasanya berkisar antara 11 s/d 24 kV. Untuk pembangkit yang berkapasitas lebih besar biasanya menggunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini dilakukan agar arus yang mengalir tidak terlalu besar. Karena untuk kapasitas daya tertentu, besar arus yang mengalir berbanding terbalik dengan tegangannya. Level tegangan pada pembangkit biasanya tidak tinggi, karena semakin tinggi level tegangan generator, jumlah lilitan generator

harus lebih banyak lagi. Dengan lilitan yang lebih banyak mengakibatkan generator menjadi lebih besar dan lebih berat sehingga dinilai tidak efisien.

Pada sistem saluran transmisi biasanya digunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini karena fungsi pokok saluran transmisi adalah menyalurkan daya, sehingga yang dipentingkan adalah sistem mampu menyalurkan daya dengan efisiensi yang tinggi atau rugi-rugi daya dan turun tegangannya kecil. Upaya yang dilakukan adalah mempertinggi level tegangan agar arus yang mengalir pada jaringan transmisi lebih kecil. Level tegangan saluran transmisi lebih tinggi dari tegangan yang dihasilkan generator pembangkit. Tegangan saluran transmisi umumnya berkisar antara 70 s/d 500 kV. Untuk menaikkan tegangan dari level pembangkit ke level tegangan saluran transmisi diperlukan transformator penaik tegangan.

Pada jaringan distribusi biasanya menggunakan tegangan yang lebih rendah dari tegangan saluran transmisi. Hal ini karena daya yang didistribusikan oleh masing-masing jaringan distribusi biasanya relatif kecil dibanding dengan daya yang disalurkan saluran transmisi, dan juga menyesuaikan dengan tegangan pelanggan atau pengguna energi listrik. Level tegangan jaringan distribusi yang sering digunakan ada dua macam, yaitu 20 kV untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan 220 V untuk jaringan tegangan rendah (JTR). Dengan demikian diperlukan gardu induk yang berisi trafo penurun tegangan untuk menurunkan tegangan dari saluran transmisi ke tegangan distribusi 20 kV. Diperlukan juga trafo distribusi untuk menurunkan tegangan dari 20 kV ke 220V sesuai tegangan pelanggan.

Level tegangan beban pelanggan menyesuaikan dengan jenis bebannya, misalnya beban industri yang biasanya memerlukan daya yang relatif besar biasanya menggunakan tegangan menengah 20 kV, sedang beban rumah tangga dengan daya yang relatif kecil, biasanya menggunakan tegangan rendah 220 V.

## 2.2 Sistem Interkoneksi [2]

Kecukupan kapasitas pembangkit dalam sistem tenaga biasanya ditingkatkan dengan menghubungkan sistem ke sistem tenaga lain. Setiap sistem yang saling berhubungan kemudian dapat beroperasi pada tingkat risiko tertentu dengan cadangan yang lebih rendah daripada yang diperlukan tanpa interkoneksi. Kondisi ini disebabkan oleh keragaman dalam kemungkinan terjadinya pemadaman beban dan kapasitas dalam sistem yang berbeda. Manfaat interkoneksi yang sebenarnya tergantung pada kapasitas terpasang di setiap sistem, total kapasitas ikat, tingkat pemadaman paksa dari garis ikat, tingkat beban dan ketidakpastian residual mereka di setiap sistem dan jenis perjanjian yang ada di antara sistem.

Ada beberapa metode probabilistik yang tersedia saat ini yang memberikan penilaian keandalan kuantitatif dari fasilitas pembangkit sistem yang saling berhubungan. *The loss of load expectation* (LOLE) adalah teknik yang paling banyak digunakan karena fleksibilitas dan kesederhanaan aplikasi. Dua pendekatan berbeda disajikan dalam bab ini untuk menghitung indeks LOLE dalam sistem yang saling berhubungan. Mereka adalah metode array probabilitas dan metode unit bantuan yang setara. Dalam pendekatan pertama model kapasitas dikembangkan untuk setiap sistem dan berbagai probabilitas eksistensi pemadaman kapasitas simultan kemudian diperoleh dari masing-masing model. Metode kedua

memodelkan sistem bantuan sebagai unit bantuan setara yang dapat dipindahkan melalui garis ikat dan ditambahkan ke dalam model kapasitas yang ada dari sistem bantuan. Perhitungan risiko dalam sistem bantuan berlangsung seperti dalam kasus studi sistem tunggal normal.

### **2.3 Keandalan Sistem Tenaga Listrik [1]**

Keandalan sistem tenaga listrik berkaitan dengan kualitas pelayanan tenaga listrik ke beban. Bagi pelanggan atau pengguna tenaga listrik, kualitas pelayanan ditunjukkan kenyamanan bagi pengguna dan juga keamanan terhadap peralatan yang digunakan. Hal-hal yang langsung berhubungan dengan keandalan suatu sistem tenaga listrik adalah tegangan, frekuensi, kontinuitas pelayanan dan aman bagi peralatan dan orang yang menggunakan. Perubahan tegangan pada sistem tenaga listrik biasanya terjadi akibat perubahan beban. Pada saat beban bertambah, turun tegangan yang terjadi pada saluran maupun trafo distribusi bertambah yang berakibat tegangan sistem menurun. Untuk mengatasi hal ini dapat dilakukan memindahkan tap atau terminal trafo didtribusi ke tegangan yang lebih tinggi. Untuk sistem yang lebih besar, dilakukan dengan menaikkan tegangan keluaran generator. Kenaikan tegangan yang terlalu besar dapat mengakibatkan kerusakan peralatan listrik yang digunakan karena peralatan tidak bekerja sesuai spesifikasinya. Sedang bila tegangan sistem terlalu rendah, maka peralatan tidak dapat bekerja secara maksimal. Dengan demikian perubahan tegangan perlu dijaga agar tidak melebihi batas toleransi yang diijinkan. Perubahan frekuensi dapat terjadi bila putaran generator berubah, sebagai akibat dari perubahan beban. Perubahan frekuensi dapat berakibat pada perubahan putaran motor beban, yang tentunya tidak

diinginkan oleh pihak pengguna. Seperti halnya perubahan tegangan, frekuensi sistem juga perlu diupayakan agar perubahannya tidak melebihi batas toleransi.

Unsur keandalan yang lain adalah kontinuitas pelayanan. Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem yang dapat melayani tenaga listrik secara terus menerus tanpa henti. Bila pelayanan sering terhenti baik akibat dari gangguan arus beban lebih, maupun gangguan alam atau cuaca, maka dapat merugikan konsumen pengguna, terutama bagi beban-beban yang membutuhkan kontinuitas pelayanan yang tinggi. Untuk mengupayakan hal ini diperlukan peralatan pengamanan yang baik dan bisa bekerja secara otomatis mengamankan gangguan yang terjadi atau meminimalisir akibat yang terjadi. Dengan demikian bila terjadi suatu gangguan pada jaringan tertentu atau lokasi tertentu, diupayakan seminimal mungkin bagian sistem yang terganggu atau mungkin terputus.

Hal lebih penting diperhatikan dalam sistem tenaga listrik adalah faktor keamanan, baik keamanan bagi peralatan yang digunakan maupun keamanan bagi orang yang memanfaatkan energi dari sistem tersebut. Upaya ini dapat dilakukan dengan cara hanya menggunakan peralatan-peralatan listrik yang memenuhi standar di seluruh sistem mulai dari pembangkitan, penyaluran, distribusi sampai ke pengguna. Dengan demikian kerusakan peralatan yang diakibatkan tegangan atau arus lebih dapat dikurangi. Dan yang lebih penting korban manusia akibat kecelakaan yang berkaitan dengan sistem tenaga listrik dapat ditekan seminimal mungkin.

## **2.4 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik**

### **2.4.1 Faktor-Faktor Penyebab Gangguan**

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang melibatkan banyak komponen dan sangat kompleks. Oleh karena itu, ada beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik, antara lain sebagai berikut [3] :

#### **1. Faktor manusia**

Faktor ini terutama menyangkut kesalahan atau kelalaian dalam memberikan perlakuan pada sistem. Misalnya salah menyambung rangkaian, keliru dalam mengkalibrasi suatu piranti pengaman, dan sebagainya.

#### **2. Faktor external**

Faktor ini meliputi gangguan- gangguan yang bersal dari lingkungan di sekitar sistem. Misalnya cuaca, gempa bumi, banjir, dan sambaran petir. Di samping itu ada kemungkinan gangguan dari binatang, misalnya gigitan tikus, burung, kelelawar, ular, dan sebagainya.

#### **3. Faktor internal**

Faktor ini menyangkut gangguan-gangguan yang berasal dari sistem itu sendiri. Misalnya usia pakai (ketuaan), keausan, dan sebagainya. Hal ini bias mengurangi sensitivitas rele pengaman, juga mengurangi daya isolasi peralatan listrik lainnya.

## 2.4.2 Jenis Gangguan

Jika ditinjau dari sifat dan penyebabnya, jenis gangguan dapat dikelompokkan sebagai tegangan lebih dan hubung singkat antara lain [3] :

### 1. Tegangan Lebih (*Over Voltage*)

Tegangan lebih merupakan suatu gangguan akibat tegangan pada sistem tenaga listrik lebih besar dari seharusnya. Gangguan tegangan lebih dapat terjadi karena kondisi external dan internal. Kondisi internal terutama karena isolasi akibat perubahan yang mendadak dari kondisi rangkaian atau karena resonansi. Misalnya operasi hubung pada saluran tanpa beban, perubahan beban yang mendadak, operasi pelepasan pemutus tenaga yang mendadak akibat hubungan singkat pada jaringan, kegagalan isolasi, dan sebagainya. Kondisi external terutama akibat adanya sambaran petir. Petir terjadi disebabkan oleh terkumpulnya muatan listrik, yang mengakibatkan bertemunya muatan positif dan negatif. Pertemuan ini berakibat terjadinya beda tegangan antara awan bermuatan positif dengan muatan negatif, atau awan bermuatan positif atau negatif dengan tanah. Bila beda tegangan ini cukup tinggi maka akan terjadi loncatan muatan listrik dari awan ke awan atau dari awan ke tanah.

Jika ada menara (tiang) listrik yang cukup tinggi maka awan bermuatan yang menuju ke bumi ada kemungkinan akan menyambar menara atau kawat tanah dari saluran transmisi dan mengalir ke tanah melalui menara dan tahanan pentanahan menara. Bila arus petir ini besar, sedangkan tahanan tanah menara kurang baik maka akan timbul tegangan tinggi pada menaranya. Keadaan ini akan berakibat

dapat terjadinya loncatan muatan dari menara ke penghantar fasa. Pada penghantar fasa ini akan terjadi tegangan tinggi dan gelombang tegangan tinggi petir yang sering disebut surja petir. Surja petir ini akan merambat atau mengalir menuju ke peralatan yang ada di gardu induk.

## **2. Hubung Singkat**

Hubung singkat adalah terjadinya hubungan penghantar bertegangan atau penghantar tidak bertegangan secara langsung tidak melalui media (resistor/ beban) yang semestinya sehingga terjadi aliran arus yang tidak normal (sangat besar). Hubung singkat merupakan jenis gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik, terutama pada saluran udara 3 fasa. Meskipun semua komponen peralatan listrik selalu diisolasi dengan isolasi padat, cair (minyak), udara, gas, dan sebagainya. Namun karena usia pemakaian, keausan, tekanan mekanis, dan sebab-sebab lainnya, maka kekuatan isolasi pada peralatan listrik bisa berkurang atau bahkan hilang sama sekali. Hal ini akan mudah menimbulkan hubung singkat.

Pada beban isolasi padat atau cair, gangguan hubung singkat bisanya mengakibatkan busur api sehingga menimbulkan kerusakan yang tetap dan gangguan ini disebut gangguan permanent (tetap). Pada isolasi udara yang biasanya terjadi pada saluran udara tegangan menengah atau tinggi, jika terjadi busur api dan setelah padam tidak menimbulkan kerusakan, maka gangguan ini disebut gangguan temporer (sementara). Arus hubung singkat yang begitu besar sangat membahayakan peralatan, sehingga untuk mengamankan peralatan dari kerusakan akibat arus hubung singkat maka hubungan kelistrikan pada seksi yang terganggu perlu diputuskan dengan peralatan pemutus tenaga atau *circuit breaker* (CB).

Gangguan hubung singkat yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik 3 fasa sebagai berikut :

- a. satu fasa dengan tanah.
- b. fasa dengan fasa
- c. Fasa dengan fasa dan pada waktu bersamaan dari fasa ke 3 dengan tanah.
- d. 3 fasa dengan tanah.
- e. Hubung singkat 3 fasa.

Empat jenis gangguan pertama menimbulkan arus gangguan tidak simetris (*unsymmetrical short-circuit*). Sedangkan dua jenis gangguan terakhir menimbulkan arus gangguan hubung singkat simetris (*symtrical short-circuit*). Perhitungan arus hubung singkat sangat penting untuk menentukan kemampuan pemutus tenaga dan untuk koordinasi pemasangan rele pengaman.

Beban lebih (*over load*) merupakan gangguan yang terjadi akibat konsumsi energi listrik melebihi energi listrik yang dihasilkan pada pembangkit. Gangguan beban lebih sering terjadi terutama pada generator dan transformator daya. Ciri dari beban lebih adalah terjadinya arus lebih pada komponen. Arus lebih ini dapat menimbulkan pemanasan yang berlebihan sehingga bisa menimbulkan kerusakan pada isolasi. Pada transformator distribusi sekunder yang menyalurkan energi listrik pada konsumen akan memutuskan aliran melalui rele beban lebih jika konsumsi tenaga listrik oleh konsumen melebihi kemampuan trafo tersebut.

Daya balik (*reserve power*) merupakan suatu gangguan berubahnya fungsi generator menjadi motor (beban) pada sistem pembangkit tenaga listrik. Gangguan ini terjadi pada sistem tenaga listrik yang terintegrasi (*interconnected system*). Hal ini menyebabkan sebagian generator menjadi motor dan sebagian berbeban lebih. Cara untuk mengatasi gangguan ini adalah dengan melepas generator yang terganggu atau melepas daerah yang terjadi hubung singkat secepat mungkin. Untuk mengamankan gangguan di atas biasanya pada penyerentakan generator telah dilengkapi dengan rele daya balik (*reserve power relay*).

## **2.5 Analisis Kontingensi**

Dalam analisis ini gangguan yang mungkin terjadi pada sistem dimodelkan, sehingga bisa diambil tindakan yang diperlukan, jika benar-benar terjadi. Kontingensi adalah suatu kejadian yang disebabkan oleh kegagalan atau pelepasan dari satu atau lebih generator dan/atau transmisi.

Teknik analisis kontingensi dari tahun ke tahun berkembang terus seiring dengan perkembangan computer. Walaupun ada metode aliran daya yang lebih baik seperti Gauss-Seidel dan Newton-Rhapson yang bisa mempercepat proses komputasi, namun untuk menganalisis system dengan mensimulasi satu persatu gangguan pada saluran dan pembangkit akan memakan waktu yang lama. Ada 2 metode analisis kontingensi [4] :

### **1. Analisis kontingensi deterministik**

Merupakan cara penganalisan dengan membuat simulasi terlepasnya elemen dari system tenaga misalnya terlepasnya saluran, trafo ataupun satu

unit pembangkit dilepas dengan melihat pengaruh yang diakibatkannya.

Beberapa metode analisis kontingensi yang dikenal saat ini :

- a. Analisis kontingensi dengan menggunakan aliran daya DC (*DC Power Flow Contingency Analysis*)
- b. Analisis kontingensi dengan menggunakan matriks impedansi bus (Z BUS).
- c. Analisis kontingensi dengan menggunakan metode aliran daya *Fast Decoupled* dan Newton-Rhapson.

## 2. Analisis kontingensi non-deterministik

Pengalisan didasarkan pada tingkatan keandalan system yang didefinisikan pada 2 indeks keandalan yaitu LOLP (*Loss Of Load Probability*) dan EDNS (*Expected Values of Demand Not Served*).

Keandalan system yang dimaksudkan tergantung kepada :

- a. Ketidakpastian perkiraan beban.
- b. Tingkat kepercayaan komponen/unit sistem tenaga.
- c. Jadwal pemeliharaan komponen/unit sistem tenaga.
- d. Keandalan-keandalan bagian yang terinterkoneksi.

Dengan kedua metode di atas (LOLP dan EDNS), maka perencanaan sistem mampu menentukan kapasitas elemen sistem tenaga yang akan dievaluasi dengan

menggunakan fungsi probabilitas kerapatan. Dengan teknik penganalisisan secara probablistrik ini dapat ditentukan bagian saluran mana yang dibebani lebih atau bus mana yang bertegangan abnormal tanpa mengevaluasi keseluruhan sistem. Dengan demikikian diharapkan waktu komputasi lebih cepat dan pengevaluasian dapat dititikberatkan pada daerah dimana sering terjadi gangguan (*outage*).

Seperti dijelaskan sebelumnya analisis kontingensi merupakan pelepasan secara sengaja komponen generator atau saluran transmisi untuk di dapatkan keandalannya. Setelah pelepasan tersebut maka dapat mengetahui dan mengevaluasi sistem tersebut. Sistem transmisi secara periodik harus dianalisa oleh fungsi *Contingency Analysis (CA)* untuk memprediksi masalah yang potensial apabila elemen terpilih dari sistem tenaga dikeluarkan (*out of service*). Fungsi CA harus menggunakan hasil hitungan *state estimation* sebagai “*base case*” dan memeriksa kasus kontingensi tertentu untuk menetapkan apakah ada *overload* yang potensial atau masalah tegangan yang muncul. Setiap kasus kontingensi harus berisi salah satu dari elemen berikut, yaitu :

- a. *Branch outages*
- b. *Switching* reactor atau kapasitor
- c. *Outages* untuk pembangkit
- d. *Outages* elemen beban
- e. Perubahan peralatan *switch* (keluar atau masuk)

## 2.6 Aliran Daya

Perhitungan aliran daya merupakan suatu alat bantu yang sangat penting untuk mengetahui kondisi operasi sistem. Perhitungan aliran daya pada tegangan, arus dan faktor daya di berbagai simpul suatu jaringan listrik dilakukan pada keadaan operasi normal. Hasil perhitungan aliran daya ini kemudian digunakan untuk mensimulasi kondisi gangguan yang besar, stabilitas transien maupun analisa kontigensi yaitu analisa keadaan dimana sebagian komponen sistem tidak terhubung ke sistem dengan baik.

Perhitungan aliran daya membutuhkan informasi ramalan kebutuhan beban di setiap titik pelayanan, rencana operasi pusat pembangkit dan rencana operasi fasilitas transmisi. Dari informasi di atas dapat disusun persamaan aliran daya dari satu Gardu Induk (G.I.) ke G.I. lainnya.

### 2.6.1 Konsep Perhitungan Aliran Daya

Perhitungan aliran daya pada dasarnya adalah menghitung besaran tegangan  $|V|$  dan sudut fasa tegangan  $\delta$  pada setiap G.I. pada kondisi tunak dan ketiga fasa seimbang. Hasil perhitungan ini digunakan untuk menghitung besar aliran daya aktif  $P$  dan daya reaktif  $Q$  di setiap peralatan transmisi, besarnya daya aktif  $P$  dan daya reaktif  $Q$  yang harus dibangkitkan setiap pusat pembangkit serta jumlah rugi-rugi di sistem.

Pada setiap bus G.I. ada 4 (empat) variabel operasi yang terkait, yaitu daya aktif  $P$ , daya reaktif  $Q$ , besaran tegangan  $|V|$  dan sudut fasa tegangan  $\delta$ . Supaya persamaan aliran daya dapat dihitung 2 (dua) dari 4 (empat) variabel di atas harus

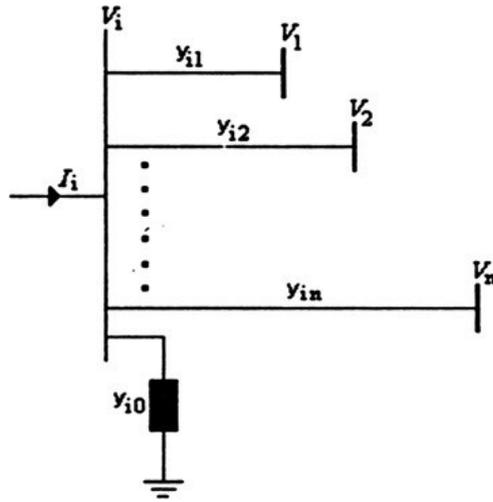
diketahui untuk setiap G.I., sedangkan 2 (dua) variabel lainnya dihitung. Setiap G.I. dalam sistem tenaga listrik dikelompokkan menjadi 3 (tiga) tipe G.I., yaitu [5] :

1. G.I. bus beban: Variabel yang diketahui adalah daya aktif  $P$ , daya reaktif  $Q$ . Kemudian akan dihitung besaran tegangan  $|V|$  dan sudut fasa tegangan  $\delta$  disetiap G.I.
2. G.I. bus pembangkit: Variabel yang diketahui adalah daya aktif  $P$  dan besaran tegangan  $|V|$ , sedangkan daya reaktif  $Q$  dan sudut fasa tegangan  $\delta$  merupakan hasil perhitungan.
3. G.I. bus penyanggah (G.I. swing): Variabel yang diketahui adalah besaran tegangan  $|V|$  dan sudut fasa tegangan  $\delta$  yang merupakan sudut acuan. Sedangkan daya aktif  $P$  dan daya reaktif  $Q$  yang harus dikompensasi merupakan hasil perhitungan

#### 2.6.2 Persamaan Aliran Daya

Sistem tenaga listrik tidak hanya terdiri dari dua bus, melainkan terdiri dari beberapa bus yang akan diinterkoneksi satu sama lain. Daya listrik yang diinjeksikan oleh generator kepada salah satu bus, bukan hanya dapat diserap oleh beban bus tersebut, melainkan dapat juga diserap oleh beban di bus yang lain. Kelebihan daya pada bus akan dikirimkan melalui saluran transmisi ke bus-bus lain yang kekurangan daya.

Diagram satu garis G.I. tipe bus dari suatu sistem tenaga listrik terdapat pada Gambar 2.2



Gambar 2.3 Diagram satu garis GI tipe bus dari sistem tenaga [8]

Arus pada G.I. i adalah :

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=i}^n y_{ij} V_j \text{ dimana } j \neq i$$

Persamaan daya pada GI i adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i$$

Atau  $I_i \frac{P_i - jQ_i}{V_i}$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.3) ke persamaan (2.1) diperoleh:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=i}^n y_{ij} V_j$$

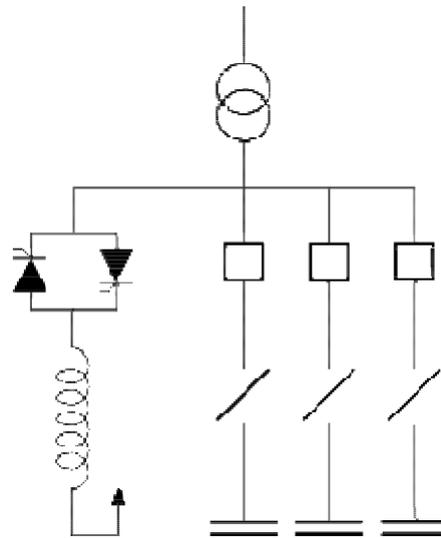
Dari persamaan di atas tampak bahwa persamaan aliran daya bersifat tidak dan harus diselesaikan dengan metode numerik iteratif [5].

## **2.7 Static Var Compensator [6]**

Static VAR Compensator (atau disebut SVC) adalah peralatan listrik untuk menyediakan kompensasi fast-acting reactive power pada jaringan transmisi listrik tegangan tinggi. SVC adalah bagian dari sistem peralatan AC transmisi yang fleksibel, pengatur tegangan dan menstabilkan sistem. Istilah “static” berdasarkan pada kenyataannya bahwa pada saat beroperasi atau melakukan perubahan kompensasi tidak ada bagian (part) SVC yang bergerak, karena proses kompensasi sepenuhnya dikontrol oleh sistem elektronika daya.

Jika power sistem beban reaktif kapasitif (leading), SVC akan menaikkan daya reaktor untuk mengurangi VAR dari sistem sehingga tegangan sistem turun. Pada kondisi reaktif induktif (lagging), SVC akan mengurangi daya reaktor untuk menaikkan VAR dari sistem sehingga tegangan sistem akan naik.

Pada SVC pengaturan besarnya VAR dan tegangan dilakukan dengan mengatur besarnya kompensasi daya reaktif induktif pada reaktor, sedangkan kapasitor bank bersifat statis.



Gambar 2.3 One-line Diagram dari konfigurasi SVC

## 2.8 DIgSILENT *PowerFactory*

Program *PowerFactory* atau biasa disebut DIgSILENT merupakan *engineering tool* untuk melakukan analisis jaringan tenaga listrik, transmisi, dan distribusi. Nama DIgSILENT merupakan kepanjangan “*Digital Simulation and Electrical Network calculation program*”. Metode yang digunakan DIgSILENT adalah Newton Rhapson. Ada dua pilihan yang bisa digunakan:

- a) *Classical Newton Rhapson* dengan *Power Equation*, pilihan ini digunakan untuk menganalisa sistem transmisi, terutama sistem dengan beban yang besar.
- b) *Newton Rhapson* dengan *Current Equation*, pilihan ini digunakan untuk menganalisa sistem distribusi yang tidak seimbang [7].

Berikut merupakan simulasi yang terdapat pada *PowerFactory*:

- *Load Flow Analysis*
- *Short Circuit Analys*
- *Contingency Analysis*

- *Quasi-Dynamic Simulation*
- *RMS/EMT Simulation*
- *Modal Analysis*
- *Harmonics/Power Quality*
- *Reliability Analysis*
- *Optimal Power Restoration*
- *Generation Adequacy Analysis*
- *Distribution Network Tools*
- *Optimal Capacitor Placement*
- *Protection*