

**ANALISIS SENSITIVITAS SISTEM TENAGA LISTRIK UNTUK  
PENGATURAN TEGANGAN PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 KV**

**SKRIPSI  
TEKNIK ELEKTRO**

**KONSENTRASI TEKNIK TENAGA ELEKTRIK**

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



**FARIZ AULIA RIFQI  
NIM. 145060301111042**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG**

**2021**









*Teriring Ucapan Terima Kasih Kepada:  
Ibunda dan Ayahanda Tercinta*



## LEMBAR KEASLIAN

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan ditulis di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apalagi ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 26 Juli 2021

Maha



Fariz Aulia Rifqi

**NIM 145060301111042**



## RINGKASAN

Fariz Aulia Rifqi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2021,  
Analisis Sensitivitas Sistem Tenaga Listrik untuk Pengaturan Tegangan pada Sistem Distribusi  
20 kV, Dosen Pembimbing: Ir. Teguh Utomo, M.T. dan Dr. Rini Nur-Hasanah, S.T., M.Sc,  
IPM.

Energi listrik saat ini terjadi peningkatan yang signifikan seiring meningkatnya penggunaan oleh perindustrian, perkantoran, maupun teknologi. Agar dapat memenuhi kebutuhan tersebut secara maksimal, maka dibutuhkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Cara mendapatkan tenaga listrik yang berkualitas tinggi adalah dengan mempertahankan tegangan tetap stabil dengan analisis sensitivitas. Analisis ini memungkinkan beberapa variabel yang saling mempengaruhi untuk dianalisis agar tahu nilai yang paling sensitif dari beberapa variabel. Hasilnya diperoleh dengan analisis sensitivitas dapat diketahui jenis variabel yang perubahannya paling berpengaruh dan pengaruhnya terhadap keadaan operasi sistem tenaga listrik. Tindakan kontrol yang paling efektif untuk mengatasi pelanggaran tegangan pada suatu simpul adalah dengan merubah daya reaktif tegangan pada simpul itu sendiri. Besar tindakan kontrol kompensasi daya reaktif yang dibutuhkan adalah sebanding dengan koefisien sensitivitas diagonal utamanya. Untuk meningkatkan keamanan dan keandalan operasi sistem tenaga listrik 20 kV perlu ditambahkan suatu peralatan kompensasi daya reaktif pada tiap simpulnya.

**Kata kunci:** *Analisis Sensitivitas, Variabel, Pelanggaran Tegangan, Kompensasi Daya Reaktif.*

## SUMMARY

**Fariz Aulia Rifqi**, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, July 2021, Sensitivity Analysis of Electrical Energy System for Voltage Control in 20 KV Distribution System, Advisor: Ir. Teguh Utomo, M.T. and Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc., IPM.*

*Electrical energy is currently experiencing a significant increase in line with the increasing use by industry, offices, and technology. In order to meet these needs optimally, the reliability of the electric power distribution system is needed. The way to get high-quality electric power is to maintain a stable voltage with sensitivity analysis. This analysis allows several variables that influence each other to be analyzed in order to know the most sensitive value of several variables. The results obtained by sensitivity analysis can be seen which types of variables have the most influential changes and their effects on the operating state of the electric power system. The most effective control measure to overcome voltage violations at a node is to change the reactive power of the voltage at the node itself. The amount of reactive power compensation control action required is proportional to the main diagonal sensitivity coefficient. To improve the safety and reliability of the operation of the 20 kV electric power system, it is necessary to add a reactive power compensation device at each node.*

**Keywords:** *Sensitivity Analysis, Variable, Voltage violation, Reactive Power Compensation.*



## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
DAFTAR TABEL.....	v
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>3</b>
2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	3
2.1.1 Jaringan Distribusi Primer.....	3
2.1.1.1 Sistem Radial.....	4
2.1.1.2 Sistem Loop.....	5
2.1.1.3 Sistem Spindel.....	6
2.1.2 Jaringan Distribusi Sekunder.....	7
2.2 Transformator Distribusi.....	8
2.3 Analisis Aliran Daya.....	9
2.3.1 Metode Newton-Raphson.....	10
2.3.2 Daya Listrik.....	10
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>13</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	13
3.2 Identifikasi Masalah.....	15
3.3 Studi Literatur.....	15
3.4 Pengambilan Data.....	15
3.5 Pengolahan Data.....	16
3.6 Menganalisis Hasil Perhitungan.....	16
3.7 Analisis Aliran Daya.....	16
3.7.1 Klasifikasi Simpul.....	17
3.7.2 Penyelesaian Persamaan Aliran Daya Metode Newton-Raphson.....	18
3.8 Analisis Sensitivitas.....	24



3.8.1	Klasifikasi Variabel Sistem Tenaga Listrik .....	25
3.8.2	Persamaan Sensitivitas .....	26
3.8.3	Matriks Jacobian dan Sensitivitas .....	28
3.9	Pengaturan Tegangan dalam Sistem Tenaga Listrik .....	30
3.9.1	Pengaruh Daya Reaktif terhadap Tegangan .....	31
3.9.2	Metode Pengaturan Tegangan .....	33
3.9.3	Pengaturan Tegangan dengan Kapasitor Shunt .....	34
3.9.4	Hubungan Sensitivitas dengan Pengaturan Tegangan .....	36
3.10	Kesimpulan .....	39
<b>BAB IV HASIL &amp; PEMBAHASAN .....</b>		<b>41</b>
4.1	Sistem Distribusi 20 KV Bandung .....	41
4.2	Langkah-Langkah Penyelesaian .....	42
4.2.1	Menghitung Matriks Admitansi Simpul .....	45
4.2.2	Membentuk Matriks Fx dan Matriks Fu .....	46
4.2.3	Menghitung Matriks Sensitivitas .....	47
4.3	Analisis dan Pembahasan .....	48
<b>BAB V .....</b>		<b>51</b>
<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>51</b>
5.1	Kesimpulan .....	51
5.2	Saran .....	51
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>53</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>55</b>



**DAFTAR GAMBAR**

*Gambar 2.1 Konfigurasi Jaringan Sistem Radial Terbuka* ..... 4

*Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan Sistem Radial Paralel* ..... 5

*Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Sistem Loop* ..... 6

*Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan Sistem Spindel* ..... 7

*Gambar 2.5 Jaringan Distribusi Sekunder* ..... 8

*Gambar 2.6 Segitiga Daya* ..... 10

*Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian* ..... 14

*Gambar 3.2 Pengiriman Daya oleh Simpul 1* ..... 31

*Gambar 3.3 Bentuk Perubahan Tegangan sebagai Fungsi Aliran Daya Reaktif* ..... 32

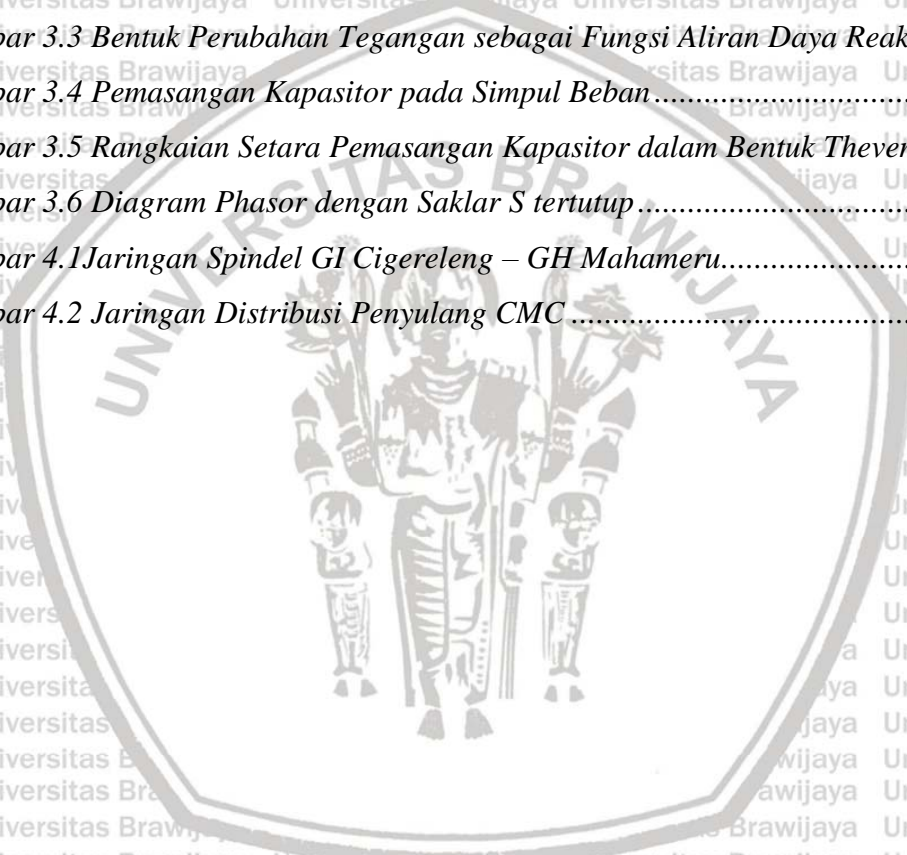
*Gambar 3.4 Pemasangan Kapasitor pada Simpul Beban* ..... 34

*Gambar 3.5 Rangkaian Setara Pemasangan Kapasitor dalam Bentuk Thevenin* ..... 35

*Gambar 3.6 Diagram Phasor dengan Saklar S tertutup* ..... 35

*Gambar 4.1 Jaringan Spindel GI Cigereleng – GH Mahameru* ..... 41

*Gambar 4.2 Jaringan Distribusi Penyulang CMC* ..... 42





**DAFTAR TABEL**

*Tabel 4.1 Data Saluran*.....43

*Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Analisis Aliran Daya*.....44

*Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Admitansi Saluran*.....45







## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Seiring dengan meningkatnya jumlah perindustrian, perkantoran, dan teknologi, tentu akan berdampak pada meningkatnya konsumsi energi listrik yang besar. Agar dapat memenuhi kebutuhan tersebut secara maksimal, maka dibutuhkan keandalan sistem yang semakin tinggi pula. Sistem tenaga listrik dikatakan andal bila sistem tersebut dapat dengan segera mengatasi segala macam keadaan gangguan yang mungkin terjadi.

Bagian dari sistem tenaga listrik yang paling dekat dengan pelanggan adalah sistem distribusi. Juga sistem distribusi adalah bagian sistem tenaga listrik yang paling banyak mengalami gangguan, sehingga masalah utama dalam operasi sistem distribusi adalah mengatasi gangguan. (Marsudi, 2006, p. 14)

Salah satu akibat yang mungkin terjadi bila sistem tenaga listrik mengalami gangguan adalah adanya perubahan tegangan sehingga tegangan pada suatu simpul melebihi batas yang telah ditentukan.

Disamping itu salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk mendapatkan tenaga listrik yang berkualitas tinggi adalah dengan mempertahankan tegangan tetap stabil pada harga yang telah ditentukan. Tindakan-tindakan pengaturan yang dapat digunakan untuk mengurangi persoalan tegangan ini adalah dengan kompensasi kapasitor, perubahan tap transformator, dan perubahan eksitasi generator. (Poetro, 1990, p.3)

Dalam skripsi ini akan dibahas suatu metode yang efektif untuk memecahkan persoalan pengaturan tegangan, yaitu dengan analisis sensitivitas. Dengan analisis ini dapat ditentukan juga besar tindakan kontrol yang dibutuhkan untuk mengatasi pelanggaran tegangan. (Cheng, S.J., O.P. Malik, & G.S. Hope, 1988)

Sensitivitas didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan variabel tak bebas (variabel yang diatur) terhadap perubahan variabel bebas (variabel yang mengatur). Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua macam sensitivitas, salah satunya sensitivitas dari suatu variabel listrik terhadap variabel listrik yang lain. (Peschon, Piercy, & W.F. Tinney 1968)



## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, akan diuraikan rumusan masalah yang efektif untuk memecahkan permasalahan pengaturan tegangan dengan analisis sensitivitas.

1. Bagaimana cara memilih atau menentukan tindakan kontrol tegangan yang paling efektif.
2. Bagaimana cara menghitung besarnya tindakan kontrol tegangan yang diperlukan untuk mengatasi gangguan tegangan.

## 1.3 Batasan Masalah

Dengan mengacu pada permasalahan yang telah dirumuskan, maka hal-hal yang berkaitan dengan penelitian akan diberi batasan sebagai berikut:

1. Pembahasan dilakukan pada jaringan distribusi tegangan 20 KV.
2. Tindakan-tindakan kontrol (pengaturan) menggunakan kompensasi kapasitor.

## 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada penulisan skripsi ini adalah untuk memecahkan permasalahan pengaturan tegangan dengan metode analisis sensitivitas.

1. Mengetahui besar sensitivitas perubahan tegangan terhadap tindakan kontrol tegangan.
2. Memilih atau menentukan tindakan pengaturan tegangan yang paling efektif.

## 1.5 Manfaat

Penulisan skripsi ini diharapkan dapat membantu memecahkan masalah utama dalam operasi sistem distribusi, yaitu bagaimana mengatasi gangguan dengan cepat, karena gangguan yang terbanyak dalam sistem tenaga listrik terdapat dalam sistem distribusi.

Disamping itu juga diharapkan dapat membantu memecahkan masalah pengaturan tegangan pada sistem distribusi khususnya dan sistem tenaga listrik pada umumnya. Sehingga dapat diperoleh pengoperasian sistem tenaga listrik dengan kualitas dan kontinuitas yang dapat diandalkan.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Saluran distribusi berfungsi untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk ke konsumen. Penurunan tegangan menengah 20 kV ke tegangan rendah 220/380 V dilakukan melalui trafo distribusi. Penyaluran energi listrik yang berawal dari pusat tenaga listrik ke konsumen melalui saluran transmisi dan distribusi.

Sistem distribusi daya listrik meliputi semua jaringan tegangan menengah 20 kV dan semua jaringan tegangan rendah 220/380 Volt hingga ke meter-meter pelanggan. Jaringan tegangan menengah (JTM) sering disebut dengan jaringan distribusi primer sedangkan jaringan tegangan rendah (JTR) sering disebut dengan jaringan distribusi sekunder. Pendistribusian daya listrik dilakukan melalui saluran udara atau bawah tanah.

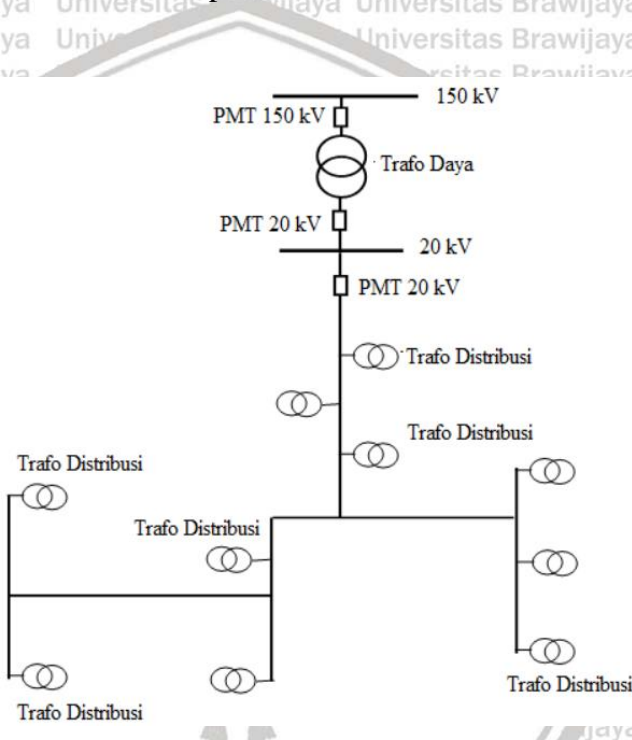
Setiap elemen jaringan distribusi pada lokasi tertentu dipasang trafo-trafo distribusi, dimana tegangan distribusi 20 kV diturunkan ke level tegangan yang lebih rendah menjadi 220/380 Volt. Dari trafo-trafo distribusi kemudian para pelanggan listrik dilayani dengan menarik kabel-kabel tegangan rendah menjalar ke sepanjang pusat pemukiman yang meliputi pelanggan komersial maupun beberapa industri yang ada di lokasi tersebut.

#### 2.1.1 Jaringan Distribusi Primer

Distribusi primer adalah jaringan distribusi daya listrik yang bertegangan menengah (20 kV). Jaringan distribusi primer tersebut merupakan jaringan penyulang. Jaringan distribusi primer berawal dari sisi sekunder trafo daya yang terpasang pada gardu induk hingga ke sisi primer trafo distribusi yang terpasang pada tiang-tiang saluran. Pola konfigurasi jaringan pada distribusi primer umumnya terdiri dari 3 tipe yaitu sistem radial, sistem loop, sistem spindel.

### 2.1.1.1 Sistem Radial

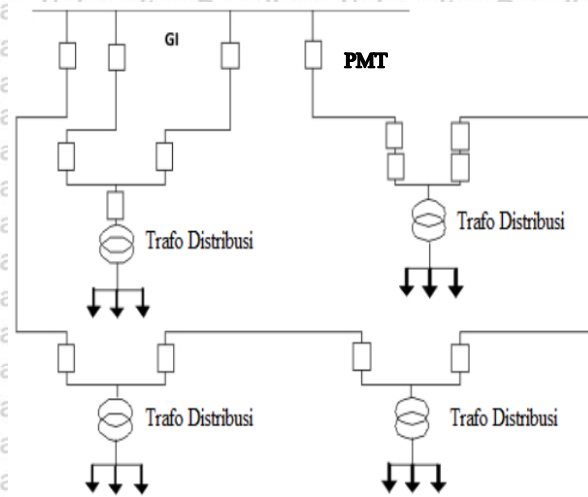
Sistem jaringan radial pada distribusi tenaga listrik paling banyak digunakan dan paling sederhana dibandingkan dengan tipe jaringan yang lain. Tenaga listrik yang disalurkan secara radial melalui gardu induk ke konsumen-konsumen dilakukan secara terpisah satu sama lainnya. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang-cabangkan ke titik-titik beban yang dilayani. Sistem radial terdiri atas fider (*feeders*) atau penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial. Konfigurasi jaringan sistem radial terbagi atas 2 (dua) bagian yaitu sistem radial terbuka dan sistem radial paralel.



Gambar 2.1 Konfigurasi Jaringan Sistem Radial Terbuka  
(Syufrijal, 2014)

Pada Gambar 2.1 terlihat bahwa konfigurasi jaringan sangat sederhana dimana alat proteksi PMT hanya ada di dekat peralatan trafo daya. Hal seperti ini memang lebih ekonomis untuk penyaluran jarak pendek, tetapi jika ada gangguan pada salah satu titik beban, maka PMT akan memutuskan semua nya. Konfigurasi ini juga hanya dilayani satu saluran saja, sehingga jika ada gangguan maka harus menunggu untuk diperbaiki.





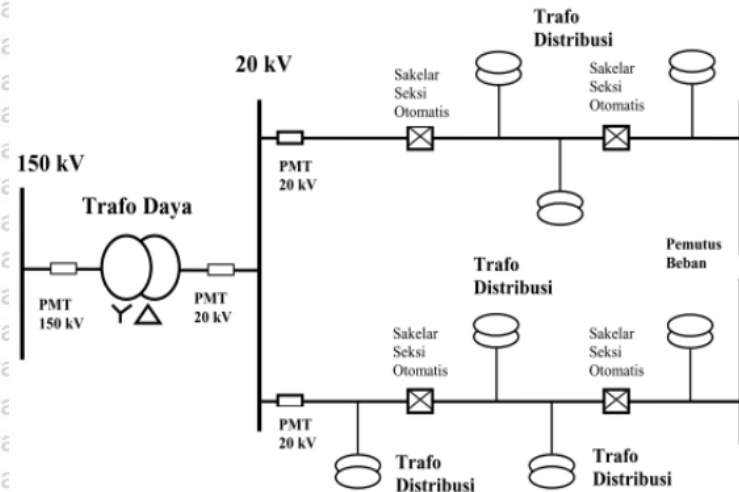
Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan Sistem Radial Paralel

(Syufrijal, 2014)

Pada Gambar 2.2 terlihat bahwa peralatan proteksi PMT lebih banyak dimana pasti menggunakan biaya yang lebih besar. Tetapi konfigurasi jaringan sistem radial paralel bisa dilayani oleh dua saluran, sehingga bila ada satu saluran mengalami gangguan, maka saluran yang satu lagi dapat melayani. Hal ini yang menjadi kelebihan daripada konfigurasi jaringan sistem radial terbuka.

#### 2.1.1.2 Sistem Loop

Sistem jaringan loop merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan ring. Susunan rangkaian saluran membentuk ring yang memungkinkan titik beban terlayani dari dua arah saluran, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin serta kualitas dayanya menjadi lebih baik.



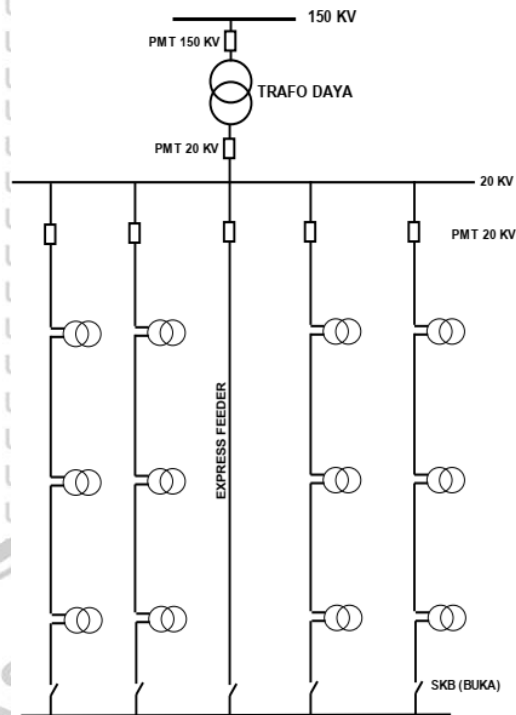
Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Sistem Loop  
(Syufrijal, 2014)

Pada Gambar 2.3 dapat dijelaskan struktur jaringan loop merupakan gabungan dari dua buah struktur jaringan radial, dimana pada ujung dari dua buah jaringan dipasang sebuah pemutus (PMT) atau pemisah (PMS). Pada saat terjadi gangguan, atau setelah gangguan dapat diisolir, maka pemutus atau pemisah ditutup sehingga aliran daya listrik ke bagian yang tidak terkena gangguan tidak terhenti. Pada umumnya penghantar dari struktur ini mempunyai struktur yang sama, ukuran konduktor tersebut dipilih sehingga dapat menyalurkan seluruh daya listrik beban struktur loop, yang merupakan jumlah daya listrik beban dari kedua struktur radial. Jaringan distribusi loop mempunyai kualitas dan kontinuitas pelayanan daya yang lebih baik, tetapi biaya investasi lebih mahal dan cocok digunakan pada daerah yang padat dan memerlukan keandalan tinggi.

### 2.1.1.3 Sistem Spindel

Jaringan distribusi spindel merupakan saluran kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM) yang penerapannya cocok di kota-kota besar. Sistem jaringan spindel biasanya terdiri atas maksimum 6 penyulang dalam keadaan dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban. Saluran penyulang yang beroperasi dalam keadaan berbeban dinamakan "*working feeder*" atau saluran kerja, sedangkan saluran yang dioperasikan tanpa beban dinamakan "*express feeder*".



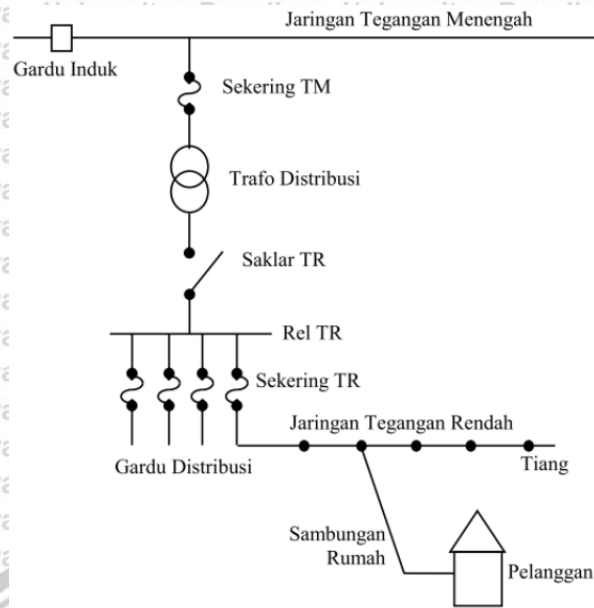


Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan Sistem Spindel  
(Syufrijal, 2014)

Dapat dilihat pada Gambar 2.4 fungsi "express feeder" dalam hal ini selain sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu "working feeder", juga berfungsi untuk memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada keadaan operasi normal. Konfigurasi jaringan sistem spindel.

### 2.1.2 Jaringan Distribusi Sekunder

Distribusi sekunder adalah jaringan daya listrik yang termasuk dalam kategori tegangan rendah (sistem 220/380 Volt), yaitu rating yang sama dengan tegangan peralatan yang dilayani. Jaringan distribusi sekunder bermula dari sisi sekunder trafo distribusi dan berakhir hingga ke alat ukur (meteran) pelanggan. Sistem jaringan distribusi sekunder disalurkan kepada para pelanggan melalui kawat berisolasi. Jaringan distribusi sekunder dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Jaringan Distribusi Sekunder  
(Syufrijal, 2014)

## 2.2 Transformator Distribusi

Transformator Distribusi merupakan bagian penting dalam sistem distribusi listrik. Pada umumnya transformator digunakan untuk mentransformasikan daya atau energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Sebagai konsumen listrik skala industri, transformator distribusi digunakan sebagai mentransformasi tegangan menengah ke tegangan rendah (*Step Down*) dimana transformator dipasang setelah MVMDP (*Medium Voltage Main Distribution Panel*) yang berarti sebagai sumber kumpulan primer atau outgoing dari panel MVMDP dan kumpulan sekundernya merupakan incoming dari LVMDP (*Low Voltage Main Distribution Panel*).

Transformator dalam penerapannya secara umum memiliki 2 tipe yaitu tipe kering (*Trafo Dry*) dan tipe basah (*Trafo Oil*). Pemilihan transformator disesuaikan dengan kondisi lingkungan yang ada dengan beberapa faktor yang harus diperhatikan antara lain resiko sambaran petir, kondisi lingkungan (berdebu), kelembapan ruangan dan presentase keasaman serta tingkat oksidasi yang mampu menyebabkan korosif. Dengan melihat beberapa faktor tersebut, jika suatu lingkungan baik maka dapat dianjurkan menggunakan trafo kering. Sedangkan jika keadaan adalah sebaliknya maka dianjurkan untuk menggunakan trafo basah atau trafo *oil*. Kondisi ruangan juga menunjang kinerja transformator, dimana trafo kering



memiliki konstruksi pendingin yang menggunakan *fan* dan terletak di dalam unit transformator yang menyebabkan tipe ini lebih mudah panas dibandingkan tipe *oil*. Maka dari itu penggunaan trafo kering harus ditunjang dengan kestabilan suhu yang baik dengan memasang AC (*Air Conditioning*) pada ruangan. Sebaliknya, *oil transformer* memiliki konstruksi yang lebih sederhana dimana menggunakan sistem pendingin dengan oli dan sirip pada bodi konstruksinya. Selain itu trafo tipe basah ini mempunyai *cost* atau harga yang lebih murah dibanding dengan trafo kering. (Sugianto & Mu'is, 2017)

Transformator distribusi *step down* memiliki 2 konstruksi lilitan atau kumparan yaitu kumparan primer sebagai input transformator yang memiliki kapasitas tegangan yang lebih tinggi dibanding dengan kumparan sekunder yang merupakan *output* dari transformator. Perbandingan jumlah lilitan antara sisi primer dan sekunder menentukan kapasitas tegangan pada transformator. (Basri, 2008)

### 2.3 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya atau perhitungan aliran daya merupakan langkah penting dalam perancangan instalasi listrik khususnya untuk mengetahui kondisi operasi sistem. Studi aliran daya terhadap tegangan, arus dan faktor daya pada jaringan listrik dilakukan saat kondisi operasional normal. Hasil dari perhitungan tersebut digunakan sebagai variabel untuk mensimulasikan kondisi gangguan yang besar, stabilitas transien maupun analisis kontigensi yaitu analisis keadaan dimana sebagian komponen sistem tidak terhubung dengan baik.

Perhitungan aliran daya membutuhkan informasi data kebutuhan beban di setiap titik pelayanan, rencana operasi *power grid* dan rencana sistem distribusi. Dari informasi tersebut mampu tersusun persamaan aliran daya dari *power grid* hingga ke beban. (Sawai, 2008)

### 2.3.1 Metode Newton-Raphson

Metode Newton-Raphson merupakan penyempurnaan metode Gauss-Siedel. Metode Newton-Raphson adalah uraian dari deret Taylor untuk satu fungsi dengan dua variabel atau lebih untuk memecahkan persoalan aliran daya yaitu dengan mencari daya aktif, daya reaktif, tegangan dan faktor daya.

Menurut Dhimas (2015:24), metode Newton-Raphson mempunyai perhitungan lebih baik dari pada metode Gauss-Siedel bila untuk sistem tenaga yang besar karena lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi (perhitungan) yang dibutuhkan untuk memperoleh pemecahan ditentukan berdasarkan ukuran sistem. Metode Newton-Raphson diformulasikan dan diselesaikan secara *iterative* melalui persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

Dimana :

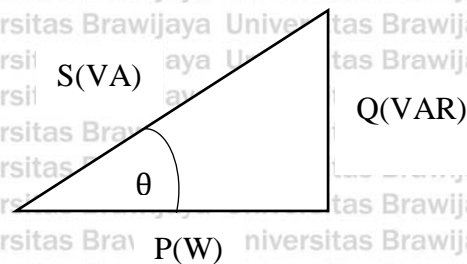
$\Delta P$  &  $\Delta Q$  = Selisih daya aktif dan daya reaktif antara nilai yang diketahui dan nilai yang dihitung

$\Delta \delta$  &  $\Delta V$  = Selisih sudut fasa dan selisih tegangan bus

$J_1, J_2, J_3, J_4$  = Matriks jacobian

### 2.3.2 Daya Listrik

Daya listrik merupakan parameter penting dalam instalasi listrik. Setiap beban atau peralatan listrik memiliki ukuran daya yang berbeda. Dalam menentukan peralatan distribusi seperti transformator, Busbar LVMDP (*Low Voltage Main Distribution Panel*), dll, juga dibutuhkan kapasitas kebutuhan daya yang ada diseluruh beban. Pada penerapannya, daya memiliki 3 jenis yang memiliki hubungan dalam segitiga daya sebagai berikut :



Gambar 2.6 Segitiga Daya



- Daya Semu (S) : Daya *supply* PLN atau hasil perkalian dari tegangan kerja dengan arus efektif.
- Daya Aktif (P) : Daya yang dibutuhkan oleh beban dan dimanfaatkan secara langsung.
- Daya Reaktif (Q) : Daya yang timbul akibat adanya efek induksi elektromagnetik oleh beban yang mempunyai nilai induktif atau kapasitif.

Hubungan segitiga daya dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut : Pada jaringan 1 fasa :

$$Q = S \sin \phi$$

$$P = S \cos \phi$$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Pada jaringan 3 fasa :

$$Q = \sqrt{3} S \sin \phi ; P = \sqrt{3} S \cos \phi ; S^2 = \sqrt{3} (P^2 + Q^2)$$

Pada gambar 2.6 juga diperlihatkan hubungan faktor daya dengan daya semu, aktif, maupun reaktif. Dimana faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif dengan daya semu (Sankaran, 2002). Faktor daya juga bisa dikatakan sebagai besaran yang menunjukkan efisiensi jaringan dalam menyalurkan daya yang dimanfaatkan. Pada penerapan jaringan distribusi listrik semakin besar faktor daya maka pemanfaatan listrik terhadap beban akan semakin maksimal. Sedangkan perusahaan listrik negara (PLN) memiliki peraturan dimana faktor daya  $\geq 0.85$  (SPLN 70-1). Untuk mencapai nilai faktor daya yang sesuai maka dibutuhkan sebuah sistem perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor bank. Dimana penentuan kapasitas kapasitor bank dapat dihitung dengan rumus pada segitiga daya.

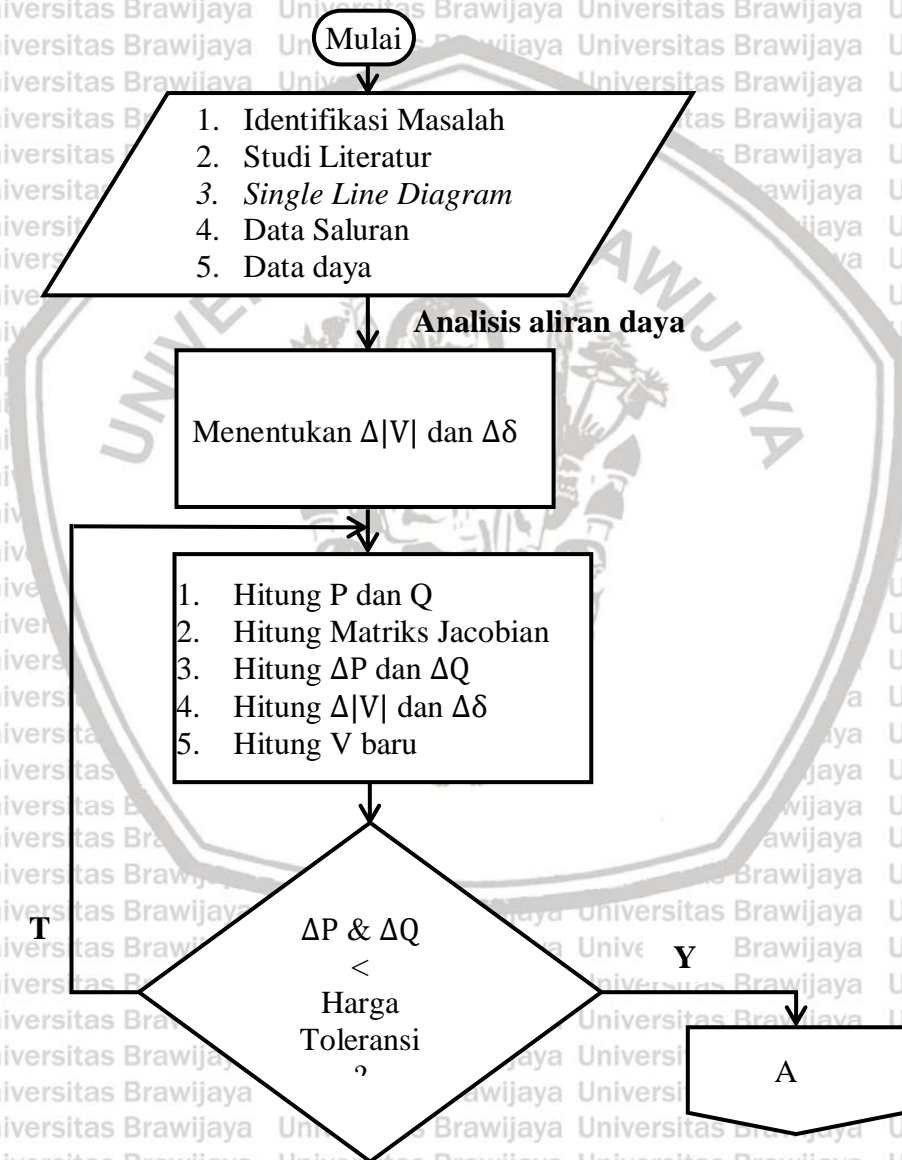


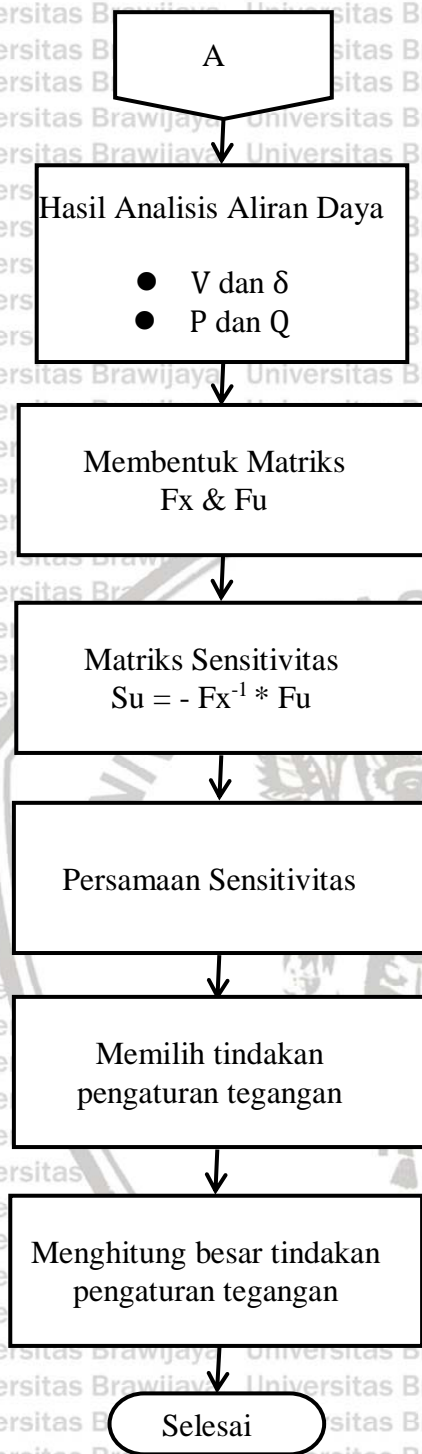


### BAB III METODE PENELITIAN

Pada skripsi ini akan dilakukan analisis sensitivitas sistem tenaga listrik untuk pengaturan tegangan pada sistem distribusi 20 kV. Adapun alur penelitian yang dilakukan dijelaskan seperti berikut.

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



### 3.2 Identifikasi Masalah

Tahap ini merupakan langkah awal untuk mengidentifikasi suatu permasalahan yang ada di sistem distribusi 20 kV. Identifikasi masalah dilakukan pada saat mengamati objek untuk mengenal dan memahami topik yang akan diangkat sebagai bahan pembahasan dalam penyusunan skripsi. Skripsi ini difokuskan pada perancangan jaringan distribusi untuk dijadikan sebagai objek skripsi. Tahap ini dilakukan dengan cara mengamati kondisi lingkungan dan rencana penggunaan beban serta mencari solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut sehingga dapat dijadikan sebagai skripsi.

### 3.3 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk membantu menyelesaikan masalah yang telah didapatkan pada tahap sebelumnya. Berbagai literatur pendukung digunakan sebagai referensi dalam proses pengerjaan skripsi ini. Referensi/sumber yang diperoleh berupa artikel, buku materi, *guide book*, laporan penelitian sebelumnya dan jurnal ilmiah.

### 3.4 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan data sekunder dan melakukan pengamatan dan perhitungan secara sistematis terhadap masalah atau objek yang diteliti.

Data yang dikumpulkan untuk dapat melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Single Line Diagram* (SLD) *eksisting* sistem distribusi 20 kV
2. Data saluran / impedansi distribusi 20 kV
3. Data Analisis Aliran Daya

### 3.5 Pengolahan Data

Berdasarkan data-data yang diperoleh, selanjutnya dibuat pemodelan *Single Line Diagram*. Setelah pemodelan selesai, selanjutnya dilakukan perhitungan aliran daya dan analisis sensitivitas untuk dapat melakukan perhitungan pengaturan tegangan pada sistem distribusi tersebut.

Hasil dari perhitungan aliran daya digunakan untuk memperoleh data kelengkapan aliran daya pada setiap busbar nya. Data tersebut kemudian diolah dan dijadikan acuan untuk analisis sensitivitas dan perhitungan gangguan tegangan.

### 3.6 Menganalisis Hasil Perhitungan

Parameter yang dicatat meliputi arus, tegangan, daya dan sensitivitas terhadap perubahan tegangan beban. Pencatatan semua parameter dilakukan pada setiap kondisi pembebanan.

Pada tahap selanjutnya perlu divalidasi untuk memastikan bahwa proses analisis data hingga terbentuk tabel prioritas pengaturan tegangan telah sesuai dengan perhitungan dan teori.

Proses validasi dilakukan berulang kali agar meminimalisir terjadinya kesalahan ketika dilakukan perhitungan di tahap berikutnya.

### 3.7 Analisis Aliran Daya

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik, perlu dilakukan penganalisisan aliran daya, agar sistem dapat dioperasikan tidak hanya memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga persyaratan ekonomis.

Analisis aliran daya adalah suatu analisis tentang penyelesaian *steady state* (keadaan tetap) dari rangkaian sistem tenaga listrik. Pada dasarnya analisis aliran daya berfungsi untuk menentukan magnitude tegangan, sudut fasa, daya aktif, dan daya reaktif untuk setiap simpul.

Bila keempat variabel tersebut dapat ditentukan, aliran daya beserta rugi-rugi pada setiap saluran transmisi dapat dihitung.

Sehubungan dengan analisis aliran daya, variabel-variabel yang perlu diperhatikan adalah magnitude tegangan ( $|V|$ ), sudut fasa tegangan ( $\delta$ ), daya aktif ( $P$ ), dan daya reaktif ( $Q$ ). Perubahan variabel  $P$  sangat bergantung pada variabel  $\delta$  dan variabel  $Q$  bergantung pada  $|V|$ , demikian pula sebaliknya.



Tujuan dari analisis aliran daya sistem tenaga listrik ini antara lain :

- a. Untuk mengetahui sudut fasa dan magnitude tegangan pada setiap simpul yang ada dalam sistem.
- b. Untuk memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru.
- c. Untuk mengetahui apakah semua peralatan telah bekerja dalam batas ketentuan untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
- d. Untuk keterangan-keterangan lain, seperti hubung singkat, stabilitas, sensitivitas, pengoperasian yang ekonomis, dan lain sebagainya.

Disamping untuk menentukan prosedur terbaik dari operasi sistem yang sudah ada ataupun tambahan yang akan direncanakan dalam perluasan selanjutnya, analisis aliran daya ini juga dapat menentukan prosedur terbaik dalam hal hilangnya satu atau lebih pusat pembangkit atau saluran transmisi.

Untuk memudahkan pemecahan persoalan dalam aliran daya ini dilakukan asumsi-asumsi berikut :

- a. Tegangan setiap fasa simetris.
- b. Tahanan transformator diabaikan.
- c. *Mutual coupling* antara kawat transmisi tidak ada.
- d. Perhitungan dilakukan untuk keadaan tetap (*steady state*).

### 3.7.1 Klasifikasi Simpul

Setiap simpul dalam rangkaian sistem tenaga listrik ditentukan oleh keadaan dari parameter-parameter : daya aktif (P), daya reaktif (Q), magnitude tegangan ( $|V|$ ), dan sudut fasa ( $\delta$ ).

Dari keempat parameter diatas, untuk mendapatkan penyelesaian aliran daya perlu diketahui dua buah parameter pada setiap simpul. Tergantung pada parameter-parameter yang ditetapkan, simpul-simpul dalam sistem tenaga listrik diklasifikasikan dalam tiga golongan :

1. Simpul beban (*load bus*)

Adalah suatu simpul yang hanya ada penyerapan daya. Pada simpul ini, parameter-parameter P dan Q diketahui. Sedangkan parameter-parameter  $|V|$  dan  $\delta$  tidak diketahui. Simpul semacam ini biasa disebut simpul P-Q.



2. Simpul kontrol (*generator bus*)

Suatu simpul yang terdapat pembangkitan daya dinamakan simpul kontrol, atau biasa disebut dengan simpul P-|V|. Parameter-parameter yang diketahui adalah P dan |V|, sedangkan yang belum diketahui adalah Q dan  $\delta$ . Pada simpul ini mempunyai pembatas untuk daya reaktif. Bila dalam perhitungan iterasinya Q diluar pembatas, maka simpul ini dianggap sebagai simpul beban. Sebaliknya bila daya reaktif Q memenuhi pembatasnya, akan dihitung sebagai simpul generator kembali.

3. Simpul swing (*slack bus*)

Simpul swing selalu mempunyai generator. Parameter-parameter yang diketahui adalah |V| dan  $\delta$  ( $\delta$  biasanya = 0) dengan |V| dan  $\delta$  selama perhitungan tetap tidak berubah. Dalam perhitungan aliran daya, P dan Q pada simpul ini tidak perlu dihitung. Guna simpul ini adalah untuk memenuhi kekurangan daya seluruhnya, karena rugi-rugi daya tak dapat diketahui sebelum perhitungan selesai dilakukan.

### 3.7.2 Penyelesaian Persamaan Aliran Daya Metode Newton-Raphson

Metode yang umum dan disukai untuk mendapatkan penyelesaian aliran daya adalah metode Newton-Raphson. Bila dibandingkan dengan metode-metode lainnya seperti metode Gauss-Seidel, metode Newton-Raphson mempunyai waktu hitung yang lebih cepat dalam mencapai konvergensi atau membutuhkan jumlah iterasi yang lebih sedikit.

Penyelesaian aliran daya dengan metode Newton-Raphson disini dibentuk berdasarkan matriks admitansi simpul ( $Y_{bus}$ ), yang mana matriks admitansi simpul dapat dibuat dengan prosedur yang langsung dan sederhana.

Secara matematis, persamaan aliran daya dapat dibentuk dengan menggunakan sistem koordinat bentuk rectangular (kompleks), bentuk polar, atau bentuk *hybrid* (gabungan antara bentuk kompleks dan polar).

Hubungan antara arus simpul  $I_p$  dan tegangan simpul  $V_q$  pada suatu jaringan dengan n simpul dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \dots \dots \dots (3.1)$$



Injeksi daya pada simpul p adalah :

$$\begin{aligned} S_p &= P_p + j Q_p = V_p I_p^* \\ &= V_p \sum_{q=1}^n Y_{pq}^* V_q^* \dots \dots \dots (3.2) \end{aligned}$$

Dalam menyelesaikan aliran daya dengan metode Newton-Raphson, bentuk persamaan aliran daya yang dipilih adalah *hybrid*, dimana tegangan dinyatakan dalam polar dan admittansi dinyatakan dalam kompleks, yaitu :

$$\begin{aligned} V_p &= |V_p| e^{j\delta_p} = |V_p| (\cos \delta_p + j \sin \delta_p) \\ V_q^* &= |V_q| e^{-j\delta_q} = |V_q| (\cos \delta_q - j \sin \delta_q) \\ Y_{pq}^* &= G_{pq} - j B_{pq} \end{aligned}$$

Maka persamaan (3.2) dapat dituliskan menjadi :

$$\begin{aligned} P_p + j Q_p &= |V_p| e^{j\delta_p} \sum_{q=1}^n (G_{pq} - j B_{pq}) |V_q| e^{-j\delta_q} \\ &= (G_{pp} - j B_{pp}) |V_p|^2 + \sum_{q=1, q \neq p}^n (G_{pq} - j B_{pq}) \\ &\quad |V_p| |V_q| e^{j(\delta_p - \delta_q)} \dots \dots \dots (3.3) \end{aligned}$$

Dengan memisahkan bagian real dan bagian imajiner, maka diperoleh :

$$\begin{aligned} P_p &= G_{pp} |V_p|^2 + \sum_{q=1, q \neq p}^n |V_p| |V_q| \{G_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q) + \\ &\quad B_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q)\} \dots \dots \dots (3.4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_p &= -B_{pp} |V_p|^2 + \sum_{q=1, q \neq p}^n |V_p| |V_q| \{G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) - \\ &\quad B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q)\} \dots \dots \dots (3.5) \end{aligned}$$

Kedua persamaan diatas akan menghasilkan suatu kumpulan persamaan serempak (simultan) yang tidak linear untuk setiap simpul sistem tenaga listrik. Untuk mengetahui magnitudo tegangan ( $|V|$ ) dan sudut fase ( $\delta$ ) di setiap simpul dapat diselesaikan dengan

menggunakan persamaan aliran daya (3.4) dan (3.5) yang dilinearakan dengan metode Newton-Raphson.

Cara iterasi pada metode Newton-Raphson untuk mendapatkan penyelesaian aliran daya adalah suatu proses pengulangan perhitungan yang berkali-kali, hingga mencapai nilai toleransi yang telah ditentukan. Nilai toleransi adalah selisih injeksi netto daya aktif (MW) dan reaktif (MVAR) di setiap simpul dengan jumlah aljabar aliran daya aktif dan reaktif yang mengalir dari atau menuju simpul tersebut.

$$\Delta P_p = P_p - [G_{pp} |V_p|^2 + \sum_{q \neq p}^n \{G_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q)\} |V_p||V_q|] \dots \dots \dots (3.6)$$

$$\Delta Q_p = Q_p - [B_{pp} |V_p|^2 + \sum_{q \neq p}^n \{G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q)\} |V_p||V_q|] \dots \dots \dots (3.7)$$

Jadi  $\Delta P_p$  dan  $\Delta Q_p$  adalah selisih antara nilai yang ditentukan dengan nilai yang dihitung dengan harga awal. Dengan ekspansi deret Taylor serta suku-suku yang mempunyai orde tinggi diabaikan, diperoleh :

$$\Delta P_p = \frac{\partial P_p}{\partial \delta_p|_0} \Delta \delta_p + \sum_{q=1}^n \frac{\partial P_p}{\partial \delta_p|_0} \Delta \delta_p + \frac{\partial P_p}{\partial |V_p|_0} \Delta |V_p| + \sum_{q \neq p}^n \frac{\partial P_p}{\partial |V_p|_0} \Delta |V_p| \dots \dots \dots (3.8)$$

$$\Delta Q_p = \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p|_0} \Delta \delta_p + \sum_{q=1}^n \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p|_0} \Delta \delta_p + \frac{\partial Q_p}{\partial |V_p|_0} \Delta |V_p| + \sum_{q \neq p}^n \frac{\partial Q_p}{\partial |V_p|_0} \Delta |V_p| \dots \dots \dots (3.9)$$





Didefinisikan :

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = H_{pq} \qquad \frac{\partial P_p}{\partial |V_q|} = N_{pq}$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = J_{pq} \qquad \frac{\partial Q_p}{\partial |V_q|} = L_{pq}$$

H, N, J, dan L merupakan submatriks Jacobian, maka bentuk umum persamaan-persamaan untuk perubahan daya (vektor mismatch) dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3.10)$$

dimana :

$\Delta P$  = selisih injeksi netto daya aktif dengan penjumlahan aliran daya aktif setiap transmisi yang menghubungkan simpul dengan  $|V|$  yang didapat dari perhitungan iterasi ke k.

$\Delta Q$  = selisih injeksi netto daya reaktif dengan penjumlahan aliran daya reaktif setiap transmisi yang menghubungkan simpul dengan  $|V|$  yang didapat dari perhitungan iterasi ke k.

$\Delta \delta$  = vektor koreksi sudut fasa tegangan.

$\Delta |V|$  = vektor koreksi magnitude tegangan.

Adapun harga dari elemen-elemen matriks Jacobian dapat diperoleh dengan menurunkan persamaan (3.4) sebagai berikut :

$$H_{pp} = \frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} = \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |V_p| |V_q| \{ -G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) + B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q) \} \dots \dots \dots (3.11)$$

$$H_{pq} = \frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = |V_p| |V_q| \{G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q)\} \dots (3.12)$$

$$N_{pp} = \frac{\partial P_p}{\partial |V_p|} = 2G_{pp} |V_p| \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \{G_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q) + B_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q)\} |V_q| \dots (3.13)$$

$$N_{pq} = \frac{\partial P_p}{\partial |V_q|} = |V_p| G_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q) + B_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) \dots (3.14)$$

$$J_{pp} = \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} = \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |V_p| |V_q| \{G_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q) + B_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q)\} \dots (3.15)$$

$$J_{pq} = \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = |V_p| |V_q| \{-G_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q)\} \dots (3.16)$$

$$L_{pp} = \frac{\partial Q_p}{\partial |V_p|} = -2B_{pp} |V_p| \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \{G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q)\} |V_q| \dots (3.17)$$

$$L_{pq} = \frac{\partial Q_p}{\partial |V_q|} = |V_p| \{G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q)\} \dots (3.18)$$

Untuk menghitung selisih daya, maka mula-mula ditentukan harga awal dari tegangan simpul dan sudut phasanya. Kemudian daya aktif dan daya reaktif dihitung dengan menggunakan persamaan (3.4). Selisih daya antara daya yang telah ditentukan dengan daya hasil perhitungan ini merupakan perubahan daya yang terjadi pada simpul.

$$\Delta P_p = P_{p,sp} - P_{p,cal}$$

$$\Delta Q_p = Q_{p,sp} - Q_{p,cal}$$



Magnitude tegangan dan sudut fase yang diasumsikan ( $|V_p^0|$  dan  $|\delta_p^0|$ ) serta selisih daya yang dihitung ( $\Delta P_p$  dan  $\Delta Q_p$ ) digunakan untuk memperoleh elemen-elemen matriks Jacobian. Persamaan (3.10) diselesaikan untuk menghitung vektor koreksi magnitude tegangan ( $\Delta|V|$ ) dan sudut fase tegangan ( $\Delta\delta$ ) yang baru. Sehingga diperoleh harga magnitude tegangan dan sudut fase tegangan yang baru.

$$|V|^{k+1} = |V|^k + \Delta|V|^k$$

$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta\delta^k$$

Proses perhitungan akan berulang sampai selisih daya aktif dan daya reaktif antara yang dijadwalkan dan yang dihitung, yaitu  $\Delta P$  dan  $\Delta Q$  (vektor mismatch) untuk semua simpul mendekati nilai toleransi atau proses perhitungan iterasi mencapai konvergen.

Proses iterasi perhitungan aliran daya dengan metode Newton-Raphson dapat diringkas dalam algoritma berikut :

1. Menentukan harga awal magnitude tegangan suatu simpul selain simpul slack, kemudian untuk simpul-simpul yang lain diberi harga sama dengan simpul slack.
2. Menentukan harga awal sudut fase seluruh simpul sama dengan sudut fase simpul slack.
3. Menghitung daya aktif dan daya reaktif ( $P_{p,calc}$  dan  $Q_{p,calc}$ ) untuk semua simpul kecuali simpul slack.
4. Menghitung elemen-elemen matriks Jacobian, yaitu H, N, J, dan L.
5. Menghitung selisih daya aktif dan selisih daya reaktif ( $\Delta P$  dan  $\Delta Q$ ) yang merupakan selisih antara daya yang ditentukan dengan daya dari hasil perhitungan pada langkah 3.
6. Menghitung koreksi magnitude tegangan dan sudut fase ( $\Delta|V|$  dan  $\Delta\delta$ ) pada persamaan (3.10) untuk semua simpul kecuali simpul slack.
7. Menghitung nilai tegangan yang baru yaitu dengan menjumlahkan harga tegangan dan sudut fase pada iterasi sebelumnya dengan koreksi tegangan maupun koreksi sudut fase yang diperoleh dari perhitungan pada step 6.
8. Menyelidiki harga  $\Delta P_p$  dan  $\Delta Q_p$ , jika lebih kecil dari harga toleransi yang ditentukan maka iterasi dihentikan. Jika lebih besar, maka dilanjutkan untuk iterasi berikutnya dan mulai dari step 3.



### 3.8 Analisis Sensitivitas

Pengetahuan mengenai sensitivitas sangat berguna antara lain pada studi-studi perencanaan sistem, perencanaan biaya operasi, penyaluran daya yang ekonomis, penyaluran daya dalam keadaan darurat, pengaturan daya reaktif dan tegangan, optimasi, dan sebagainya.

Pada perencanaan dan perancangan sistem tenaga listrik, penting untuk mengetahui pengaruh perubahan beberapa variabel sistem terhadap performance sistem. Apabila terjadi perubahan pada harga suatu variabel sistem, akan terjadi pula perubahan pada harga variabel-variabel yang lain. Ketergantungan antara variabel-variabel tersebut dapat ditentukan dengan apa yang dikenal sebagai analisis sensitivitas.

Sensitivitas didefinisikan sebagai perbandingan dari perubahan (deviasi) variabel tak bebas terhadap perubahan variabel bebas ( $\Delta x/\Delta u$ ). Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua macam sensitivitas, yaitu :

1. Sensitivitas dari suatu variabel listrik terhadap variabel listrik yang lain
2. Sensitivitas dari biaya operasi terhadap variabel listrik

Dalam skripsi ini hanya akan dibahas sensitivitas jenis pertama.

Pada operasi sistem tenaga listrik, analisis sensitivitas sangat membantu dalam menggambarkan hubungan sebab dan akibat antara variabel-variabel sistem. Dengan menggunakan analisis sensitivitas dapat diketahui variabel mana yang perubahannya paling berpengaruh pada perubahan variabel yang lain dan besarnya perubahan yang terjadi pada variabel yang terpengaruh tersebut. Hal yang demikian ini sangat penting dalam pengaturan sistem tenaga listrik, khususnya pengaturan tegangan yang akan dibahas dalam skripsi ini. Pengalaman menunjukkan bahwa teknik sensitivitas dapat dipergunakan dengan hasil yang baik sekali untuk menganalisis persoalan pengaturan tegangan.

Persamaan-persamaan yang menyatakan kondisi keseimbangan antara variabel-variabel pada operasi sistem adalah nonlinier. Apabila titik operasi diketahui, baik dari pengukuran, perkiraan, maupun perhitungan yang berdasarkan pada syarat-syarat operasi yang diberikan, persamaan nonlinier dapat didekati dengan linierisasi. Hubungan-hubungan sensitivitas urutan pertama antara variabel bebas dan variabel tak bebas ditentukan dengan persamaan yang dilinierisasi tersebut.



### 3.8.1 Klasifikasi Variabel Sistem Tenaga Listrik

Dalam persamaan aliran daya (3.4),  $P_p$  dan  $Q_p$  adalah daya input aktif dan reaktif pada simpul  $p$ .

Jika :

$$P_p = P_{Gp} - P_{Dp}$$

$$Q_p = Q_{Gp} - Q_{Dp}$$

Maka dapat dituliskan bentuk persamaan mismatch daya sebagai berikut :

$$G_{pq} |V|^2 + \sum_{q=1, q \neq p}^n |V_p||V_q| \{G_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q) + B_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q)\} - P_{Gp} + P_{Dp} = 0 \dots\dots\dots(3.19)$$

$$-B_{pp} |V|^2 - \sum_{q=1, q \neq p}^n |V_p||V_q| \{G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q)\} - Q_{Gp} + Q_{Dp} = 0 \dots\dots\dots(3.20)$$

Dimana  $P_{Gp}$  dan  $Q_{Gp}$  adalah pembangkitan daya aktif dan reaktif pada simpul  $p$ , sedang  $P_{Dp}$  dan  $Q_{Dp}$  adalah konsumsi daya aktif dan reaktif pada simpul  $o$  ( $p = 1, 2, \dots, n$ ).

Variabel-variabel yang menyusun kedua persamaan diatas dapat dikelompokkan menjadi 3 golongan, yaitu :

1. Variabel kontrol (variabel yang mengatur), adalah variabel yang dipergunakan untuk mengatur operasi sistem. Variabel control disebut juga variabel bebas, karena sifatnya yang tidak tergantung pada variabel lain. Variabel-variabel yang termasuk kelompok ini, adalah :
  - a. Magnitude tegangan dan sudut phasa tegangan dari simpul slack.
  - b. Magnitude tegangan dan pembangkitan daya aktif dari simpul generator.
2. Variabel keadaan (variabel yang diatur) adalah variabel yang tergantung pada kondisi sistem serta kebutuhan konsumen. Variabel keadaan disebut juga variabel tak bebas. Yang termasuk variabel keadaan, adalah :
  - a. Pembangkitan daya aktif dan reaktif pada simpul slack.

- b. Sudut fasa tegangan dan pembangkitan daya reaktif pada simpul generator.
- c. Sudut fasa dan magnitude tegangan pada simpul beban.

3. Parameter tetap (variabel yang tak dapat diatur) adalah variabel yang ditentukan oleh kebutuhan konsumen.

Yang termasuk dalam golongan ini, adalah semua daya aktif dan reaktif yang dikonsumsi pada simpul-simpul slack, generator, maupun beban.

Jika  $u$  adalah variabel kontrol (bebas),  $x$  adalah variabel keadaan (tak bebas), dan  $p$  adalah parameter tetap, maka persamaan mismatch daya (3.19) dapat dituliskan dalam bentuk yang ringkas seperti :

$$F_p(x, u, p) = 0, p = 1, 2, \dots, 2n. \dots\dots\dots(3.21)$$

dimana  $F_p$  menunjukkan  $2n$  persamaan mismatch daya seperti yang diperlihatkan oleh persamaan (3.19).

**3.8.2 Persamaan Sensitivitas**

Bila  $y = f(x_i)$  adalah suatu fungsi rangkaian dan  $x_i$  menyatakan parameter fisis yang berhubungan dengan rangkaian itu, sensitivitas dari fungsi rangkaian  $y$  terhadap perubahan parameter  $x_i$  asalkan semua perubahan itu kecil secara matematis dituliskan sebagai :

$$S_{xi} = \frac{dy}{dx_i} \dots\dots\dots(3.22)$$

Untuk memperoleh  $S_{xi}$  dilakukan analisis rangkaian dengan nilai nominal dari  $x_1, x_2, \dots, x_n$  seperti yang akan diuraikan berikut ini.

Anggaplah bahwa kondisi operasi sistem dalam keadaan tetap (steady state) untuk harga-harga nominal  $x_0, u_0$  dan  $p_0$ . Dalam keadaan ini persamaan (3.21) dapat ditulis seperti :

$$F(x_0, u_0, p_0) = 0 \dots\dots\dots(3.23)$$

Bila vektor variabel  $u$  dan variabel  $p$  mengalami perubahan sebesar  $\Delta u$  dan  $\Delta p$  dari harga nominalnya, maka vektor variabel tak bebas  $x$  akan berubah dari  $x_0$  menjadi  $x_0 + \Delta x$  supaya







Yang mana persamaan diatas memberitahukan bahwa betapa sensitifnya vektor  $x$  terhadap perubahan vektor  $u$  dan/atau vektor  $p$ .

Persamaan (3.30) diatas merupakan persamaan linier. Dari persamaan tersebut perubahan-perubahan dalam variabel keadaan  $x$  dapat dihitung bagi setiap perubahan perubahan variabel kontrol  $u$  maupun kebutuhan konsumen  $p$ .

Apabila matriks-matriks sensitivitas dituliskan sebagai :

$$S_u = -F_x^{-1} F_u \dots \dots \dots (3.31)$$

$$S_p = -F_x^{-1} F_p \dots \dots \dots (3.32)$$

Maka persamaan (3.30) dapat dituliskan seperti berikut :

$$\Delta x = S_u \Delta u + S_p \Delta p \dots \dots \dots (3.33)$$

Bila  $n$  adalah banyaknya simpul sistem dan  $m$  adalah banyaknya variabel operasi, maka matriks  $S_u$  berdimensi  $2n \times m$  dan matriks  $S_p$  berdimensi  $2n \times 2n$ .

Jika matriks-matriks sensitivitas  $S_u$  dan  $S_p$  sudah didapatkan, maka sensitivitas dari variabel tak bebas terhadap perubahan variabel kontrol  $\Delta u$  dan/atau perubahan parameter tetap  $\Delta p$  dapat dihitung langsung dari persamaan (3.33) diatas.

### 3.8.3 Matriks Jacobian dan Sensitivitas

Analisis sensitivitas ini didasarkan pada penyelesaian aliran daya Newton-Rapson. Keuntungan pemilihan metode Newton-Raphson adalah diperolehnya matriks Jacobian yang dijadikan dasar penyusunan matriks sensitivitas.

Berbeda dengan analisis sensitivitas, matriks Jacobian pada penyelesaian aliran daya Newton-Raphson dibentuk dengan menganggap bahwa semua simpul sistem adalah simpul beban. Sehingga variabel keadaan pada semua simpul adalah sama, yaitu sudut fasa dan magnitude tegangan. Dengan demikian elemen-elemen matriks Jacobiannya diperoleh dengan menurunkan persamaan aliran daya terhadap  $\delta$  dan  $|V|$ . Elemen-elemen tersebut adalah  $H$ ,  $N$ ,  $J$ ,

$L$ .



Pada analisis sensitivitas, variabel keadaan pada simpul slack dan simpul generator juga diperhatikan disamping variabel keadaan pada simpul beban. Sehingga penentuan elemen-elemen Jacobian sensitivitas tidak hanya dipengaruhi oleh  $\delta$  dan  $|V|$ , tetapi juga oleh  $P$  dan  $Q$ . Karena itu terdapat perbedaan nilai pada elemen-elemen tertentu antara matriks Jacobian Newton-Raphson dan matriks Jacobian sensitivitas  $F_x$ .

Variabel-variabel state pada simpul slack adalah  $P$  dan  $Q$ . Maka elemen-elemen Jacobian dari simpul slack hanya muncul pada penurunan mismatch daya terhadap variabel-variabel keadaan dari simpul yang sama. Penurunan mismatch daya aktif terhadap  $P$  menghasilkan elemen berharga  $-1$ , sedangkan terhadap  $Q$  menghasilkan elemen berharga  $0$ . Sebaliknya penurunan mismatch daya reaktif terhadap  $P$  menghasilkan elemen berharga  $0$ , sedangkan penurunan terhadap  $Q$  menghasilkan elemen berharga  $-1$ .

Pada simpul generator (pembangkitan), variabel-variabel keadaannya adalah  $\delta$  dan  $Q$ . Dari penurunan mismatch daya aktif terhadap  $\delta$  dihasilkan elemen  $H$ , sedangkan dari mismatch reaktif dihasilkan  $J$ . Dari penurunan mismatch daya aktif terhadap  $Q$  dihasilkan elemen berharga  $0$ , sedang dari mismatch daya reaktif dihasilkan elemen  $-1$  pada simpul yang sama.

Untuk simpul beban, variabel keadaannya adalah  $\delta$  dan  $|V|$ . Oleh karena itu elemen-elemen matriks  $F_x$  diperoleh dengan penurunan mismatch daya aktif terhadap  $\delta$  dan  $|V|$  dihasilkan elemen  $H$  dan  $N$ . Sedang penurunan daya reaktifnya dihasilkan elemen  $J$  dan  $L$ .

Matriks  $F_u$  dibentuk dengan cara yang sama seperti pada pembentukan matriks  $F_x$ . Pada simpul slack, variabel kontrol yang ada adalah  $\delta$  dan  $|V|$ . Tetapi karena sudut fasa tegangannya dipakai sebagai referensi, maka pengaturan hanya dilakukan hanya dengan  $|V|$ . Penurunan mismatch daya aktif dan reaktif menghasilkan elemen-elemen  $N$  dan  $L$ .

Pada simpul generator variabel kontrol yang ada adalah  $P$  dan  $|V|$ . Karena daya aktif yang dihasilkan adalah tetap, maka hanya dapat dilakukan pengaturan dengan  $|V|$ . Dengan demikian elemen matriks  $F_u$  yang dihasilkan pada simpul generator adalah  $N$  dan  $L$ .

Sebaliknya pada simpul beban tidak terdapat variabel kontrol, karena variabel  $P$  dan  $Q$  merupakan parameter tetap (variabel yang tak dapat diatur). Akan tetapi jika pada suatu simpul beban dipasang suatu sumber daya reaktif seperti, kapasitor shunt, raktor shunt atau kondensator sinkron maka simpul beban tersebut mempunyai satu variabel kontrol, yaitu  $Q$ . Dengan demikian penurunan mismatch daya aktif dan daya reaktif terhadap  $Q$  menghasilkan elemen berharga  $0$  dan  $-1$ .



Pada pembentukan matriks  $F_p$ , karena yang termasuk parameter tetap adalah semua kebutuhan daya, baik daya aktif maupun reaktif pada semua simpul, maka penurunan mismatch daya aktif terhadap P menghasilkan elemen berharga 1, sedang terhadap Q berharga 0. Sebaliknya penurunan mismatch daya reaktif terhadap P menghasilkan elemen berharga 0, sedang terhadap Q berharga 1.

Matriks Jacobian sensitivitas  $F_x$  dan  $F_p$  berdimensi  $2n \times 2n$ , dimana  $n$  adalah jumlah simpul sistem. Sedangkan matriks  $F_u$  berdimensi  $2n \times m$ , dimana  $m$  dapat berubah tergantung jumlah variabel kontrol yang dipilih.

Setelah  $F_p$ ,  $F_u$ , dan  $F_x$  serta inversinya diperoleh, dapat dihitung besar perubahan variabel keadaan yang disebabkan oleh perubahan variabel kontrol maupun oleh berubahnya kebutuhan daya dengan persamaan (3.33).

Apabila hanya terjadi perubahan nilai pada variabel kontrol maka  $\Delta p = 0$ . Dengan demikian selain  $F_x$  hanya perlu menurunkan persamaan mismatch daya terhadap variabel-variabel kontrol. Persamaan sensitivitas untuk keadaan ini adalah :

$$\Delta x = S_u \Delta u \dots\dots\dots(3.34)$$

### 3.9 Pengaturan Tegangan dalam Sistem Tenaga Listrik

Pengaturan tegangan memegang peranan penting dalam keamanan sistem tenaga listrik yang modern. Hal ini perlu dilaksanakan untuk menyediakan para konsumen level tegangan yang konstan, karena banyak beban-beban konsumen yang sangat peka terhadap perubahan tegangan yang pada dasarnya menghendaki penyediaan daya secara terus-menerus dengan tegangan konstan. Jadi profil tegangan harus dipelihara didalam range yang diinginkan untuk menjaga kestabilan sistem tenaga listrik.

Bilamana terjadi tegangan keluar dari batas normal atau sistem dalam keadaan darurat, maka akibatnya tidak saja merugikan konsumen, tetapi juga kestabilan sistem itu akan terganggu.

Yang dimaksud dengan sistem dalam keadaan darurat adalah adanya ketidakseimbangan antara pembangkitan, beban, dan fasilitas transmisi, yang menyebabkan harga tegangan, arus, daya, dan sebagainya melebihi batas normal sampai jumlah sedemikian besar, sehingga operasi dan keutuhan sistem tak dapat dipertahankan. Sistem dalam kondisi ini tidak mampu beroperasi secara terus-menerus (kelangsungan hidupnya amat singkat) dan tidak

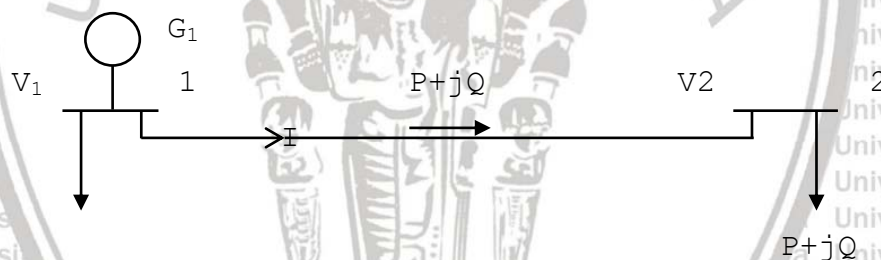


mampu kembali ke operasi normal. Bila tidak segera dilakukan tindakan darurat untuk memulihkan operasi sistem, maka sistem akan dapat padam. Tindakan darurat itu dapat dilakukan dengan cara menginjeksikan daya reaktif, merubah tap transformator, atau bahkan dengan pelepasan beban.

Karena rugi-rugi daya reaktif jauh lebih besar daripada rugi-rugi aktif, maka daya reaktif tidak dapat ditransmisikan dalam jarak jauh. Karena itu gangguan daya reaktif atau tegangan pada suatu simpul hanya akan mempengaruhi simpul itu sendiri dan simpul-simpul yang berhubungan dengannya. Jadi keseimbangan di bagian ini harus dipelihara sama baik dengan seluruh sistem.

### 3.9.1 Pengaruh Daya Reaktif terhadap Tegangan

Keseimbangan daya reaktif yang dihasilkan dan digunakan harus dapat dipertahankan agar tidak terjadi perubahan tegangan. Bilamana besaran tegangan ini mengalami perubahan, maka daya reaktif pada simpul tersebut tidak dapat dipertahankan lagi. Ini perlu diberikan aliran daya reaktif dari sistem tersebut.



Gambar 3.2 Pengiriman Daya oleh Simpul 1

(Elgerd, 1971)

Seperti terlihat pada Gambar 3.2,  $P$  dan  $jQ$  adalah daya yang diberikan oleh pembangkit  $G1$  dan diteruskan ke simpul beban. Karena  $R \ll X$ , maka resistansi saluran transmisi dapat diabaikan, sehingga impedansi saluran transmisi adalah  $Z = jX$ . Karena adanya drop tegangan sepanjang saluran, maka berlaku hubungan :

$$V_2 = V_1 - IZ \dots \dots \dots (3.35)$$

Bila daya yang mengalir pada saluran transmisi :

$$P + jQ = V_1 I^* \quad \dots\dots\dots(3.36)$$

Jadi :

$$I^* = \frac{P + jQ}{V_1} \quad \dots\dots\dots(3.37)$$

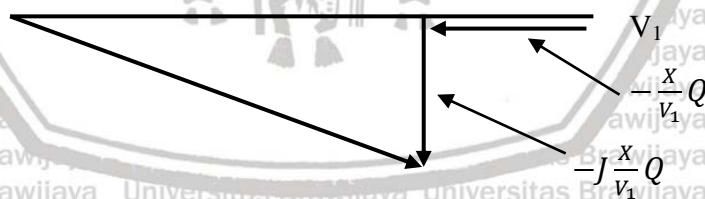
Kemudian

$$I = \frac{P - jQ}{V_1^*} = \frac{P - jQ}{V_1} \quad \dots\dots\dots(3.38)$$

Bila  $V_1$  dipilih sebagai referensi, maka dengan mensubstitusikan persamaan (3.38) kedalam persamaan (3.35) dapat diperoleh :

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 - \frac{P - jQ}{V_1} jX \\ &= V_1 - \frac{X}{V_1} Q - j \frac{X}{V_1} P \quad \dots\dots\dots(3.39) \end{aligned}$$

Persamaan ini adalah bentuk tegangan yang digambarkan pada *Gambar 3.3* sebagai berikut :



*Gambar 3.3 Bentuk Perubahan Tegangan sebagai Fungsi Aliran Daya Reaktif*

Berdasarkan persamaan (3.39) dan *Gambar 3.3* tersebut dapat dijelaskan bahwa :

- Perubahan daya aktif  $\Delta P$  pada dasarnya hanya mempengaruhi sudut fasa tegangan  $\delta$ , sedang magnitudo tegangan hampir tidak berubah.



b. Perubahan daya reaktif  $\Delta Q$  pada dasarnya hanya mempengaruhi magnitudo tegangan  $|V|$  dan hampir tidak berpengaruh pada sudut fasa tegangan.

c. Perubahan daya reaktif pada suatu simpul berpengaruh paling kuat pada simpul yang sama dan makin kurang berpengaruh pada simpul-simpul yang makin jauh.

Perlu ditegaskan disini, bahwa hasil pengamatan-pengamatan di atas hanya berlaku untuk perubahan yang kecil.

Jika diinginkan mempertahankan magnitudo tegangan  $|V_2|$  pada harga yang konstan, maka aliran daya reaktif harus diatur untuk disesuaikan dengan permintaan beban pada simpul 2, yang metode pengaturannya akan diuraikan berikut ini.

### 3.9.2 Metode Pengaturan Tegangan

Pengaturan tegangan pada dasarnya adalah merupakan pengaturan daya reaktif pada saluran dan simpul. Sehingga untuk mempertahankan tegangan didalam batas-batas yang diinginkan, maka perlu menjaga keseimbangan daya reaktif pada simpul tersebut.

Sebagaimana diketahui masalah-masalah tegangan dapat diakibatkan oleh pelanggaran batas atas maupun batas bawah. Jika ada terlalu banyak beban daya reaktif induktif (positif), misalnya pada daerah industri, maka tegangan simpul yang terlalu rendah akan jadi masalah. Ini dapat diatasi dengan memasang kapasitor shunt, static var control, dan sebagainya.

Sebaliknya pada saat beban ringan, karena pengaruh kapasitansi shunt dari saluran transmisi, maka akan ada kelebihan daya reaktif pada saluran, sehingga tegangan simpul terlalu tinggi. Hal ini dapat diatasi dengan memasang reaktor shunt, static var control, dsb.

Dengan menginjeksikan daya reaktif ke dalam sistem, pengatur-pengatur mengatur baik pembangkitan maupun aliran daya reaktif. Dengan cara ini, profil tegangan simpul yang diinginkan dapat diperoleh. Tindakan-tindakan control (pengaturan) yang digunakan secara umum untuk mengatur tegangan adalah :

1. Perubahan tegangan terminal generator.

Dengan merubah eksitasi generator, akan merubah daya reaktif yang diinjeksikan, sehingga akan merubah simpul generator maupun simpul beban.

2. Perubahan tap transformator

Tindakan ini menambah atau mengurangi tegangan simpul dengan merubah perbandingan belitan transformator. Karena simpul-simpul dalam suatu sistem tenaga dihubungkan melalui saluran transmisi, maka beberapa tegangan simpul bertambah dan beberapa tegangan simpul yang lain berkurang.



### 3. Kompensasi kondensator sinkron atau kapasitor

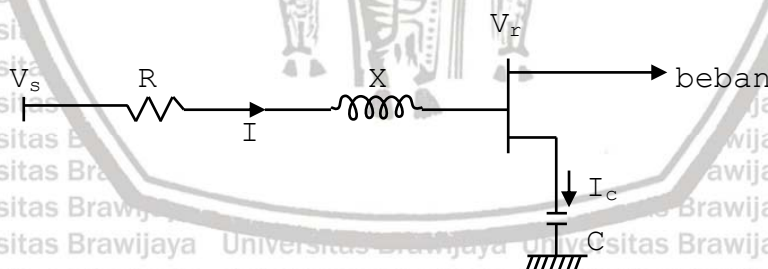
Tindakan ini mencatu daya reaktif sejumlah tertentu pada saluran transmisi dan simpul beban, sehingga menambah tegangan simpul beban yang terdekat. Biasanya semakin dekat simpul itu terhadap kapasitor kompensasi, maka bertambah pula tegangan yang ditambahkan.

Dalam skripsi ini dibatasi pada pengaturan dengan menggunakan kompensasi kapasitor shunt.

### 3.9.3 Pengaturan Tegangan dengan Kapasitor Shunt

Rendahnya faktor daya beban akan mengakibatkan naiknya kebutuhan daya reaktif dan arus saluran. Karena itu diperlukan peralatan yang dapat mengkompensir kebutuhan daya reaktif ini, baik lagging maupun leading. Kapasitor shunt digunakan untuk sirkit faktor daya lagging, sedang reaktor shunt digunakan pada sirkit leading.

Pada dasarnya kapasitor adalah suatu alat untuk mencatu daya reaktif pada titik pemasangannya. Dengan pemasangan kapasitor secara paralel pada sisi terima, rugi-rugi tegangan dan rugi-rugi lain pada saluran akan berkurang dan tegangan di titik tersebut akan naik. Kapasitor-kapasitor shunt dapat dihubungkan secara tetap, tetapi sebagai pengatur tegangan dapat juga dihubungkan dan diputuskan dari sistem melalui saklar sesuai dengan perubahan-perubahan permintaan tegangan dan daya reaktif.



Gambar 3.4 Pemasangan Kapasitor pada Simpul Beban

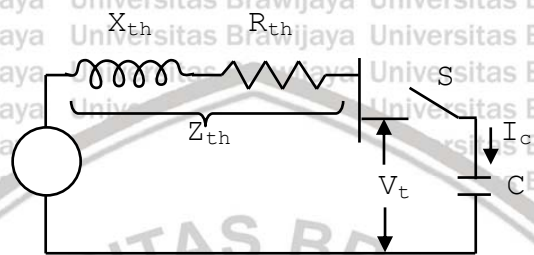
Jika pada suatu simpul tertentu dipasang kapasitor, kenaikan tegangan pada simpul dapat ditentukan dalil Thevenin (lihat Gambar 3.5).



Pada saat kapasitor belum terhubung (S terbuka),  $V_t = E_{th}$ . Jika saklar S ditutup, maka akan mengalir arus kapasitif sebesar :

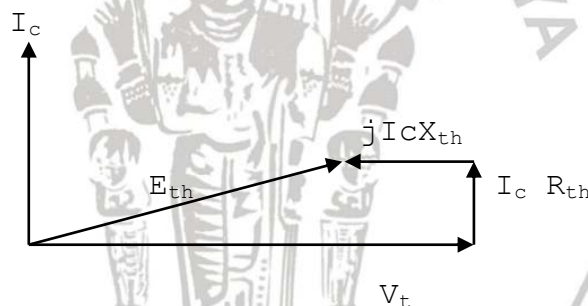
$$I_c = \frac{E_{th}}{Z_{th} - jX_c} \quad (3.40)$$

Diagram phasornya diperlihatkan pada *Gambar 3.6*. Terlihat bahwa kenaikan  $V_t$  yang disebabkan oleh penambahan kapasitor hampir sama dengan  $|I_c|X_{th}$ .



*Gambar 3.5 Rangkaian Setara Pemasangan Kapasitor dalam Bentuk Thevenin*

(Ibid, p.232)



*Gambar 3.6 Diagram Phasor dengan Saklar S tertutup*

(Ibid, p.232)

Untuk menentukan rating VAR dari kapasitor yang dibutuhkan dapat diperoleh dengan memperhitungkan kebutuhan daya reaktif beban.

Untuk pengaturan tegangan yang lebih luwes, pemakaian kondensator sinkron akan memberikan kemudahan yang diinginkan.

Pada prinsipnya kondensator sinkron adalah suatu motor sinkron yang berputar tanpa beban mekanis. Tergantung pada penguatan (eksitasi) yang diberikan padanya, kondensator

sinkron dapat menyerap atau membangkitkan daya reaktif kepada sistem. Penguatan lebih akan membangkitkan daya reaktif dan sebaliknya penguatan kurang akan menyerap daya reaktif.

Dengan bantuan suatu pengatur tegangan otomatis (AVR), kondensator sinkron akan secara otomatis bekerja untuk mengadakan eksitasi lebih pada saat beban berat dan mengurangi eksitasinya pada saat beban rendah.

Salah satu keuntungan dari penggunaan kondensator sebagai sumber daya reaktif adalah kemampuannya bekerja dalam keadaan *overload* untuk waktu yang singkat. Hal ini diperlukan bila sistem mendadak memerlukan daya reaktif tambahan, misalnya dalam keadaan gangguan pada saluran atau sistem dalam keadaan darurat. Disamping itu kondensator sinkron mempunyai kemampuan untuk mengatur tegangan secara halus dan dapat membantu stabilitas sistem. Akan tetapi, karena harganya yang terlalu mahal terutama bila dayanya kecil, membutuhkan pemeliharaan yang sulit, dan keandalannya yang kurang dibandingkan dengan kapasitor shunt, maka penggunaan kondensator sinkron sebagai sumber daya reaktif akhir-akhir ini sangat terbatas.

**3.9.4 Hubungan Sensitivitas dengan Pengaturan Tegangan**

Teknik sensitivitas telah lama dipergunakan untuk memecahkan persoalan pengaturan tegangan. Analisis secara teoritis dan matematis telah membuktikan bahwa teknik sensitivitas merupakan suatu cara yang efektif untuk menangani masalah pengaturan tegangan.

Misalkan suatu sistem beroperasi dalam keadaan seimbang untuk vektor variabel-variabel  $x$ ,  $u$ , dan  $p$  pada harga nominal  $x_0$ ,  $u_0$ , dan  $p_0$ . Keadaan ini secara matematis dapat dituliskan dalam bentuk umum seperti :

$$F(x_0, u_0, p_0) = 0 \dots\dots\dots(3.41)$$

Diinginkan untuk menjaga sistem itu dalam keadaan operasi ini. Tetapi karena adanya perubahan permintaan beban, maka vektor  $p$  mengalami perubahan (deviasi) sebesar  $\Delta p$  dari harga nominalnya. Jika vektor variabel kontrol  $u$  dibiarkan konstan, akibatnya akan merubah vektor keadaan  $x$  sebesar  $\Delta x$ , dimana :

$$\Delta x = S_p \Delta p \dots\dots\dots(3.42)$$



Perubahan vektor  $x$  ini merupakan hal yang tidak diinginkan. Oleh karena itu untuk mengimbangi pengaruh  $\Delta p$ , vektor kontrol  $u$  pada sistem harus dirubah besarnya dengan  $\Delta u$  berjumlah tertentu sedemikian rupa sehingga deviasi vektor keadaan  $x$  turun ke nol. Dalam hal ini besarnya  $\Delta u$  dapat diperoleh dari persamaan :

$$\Delta x = S_u \Delta u \dots\dots\dots (3.43)$$

Dalam merancang sebuah sistem pengaturan (*control*), yang terpenting adalah pengertian tentang bagaimana pengaruh perubahan vektor  $u$  dan/atau vektor  $p$  mempengaruhi vektor  $x$ .

Dalam skripsi ini vektor  $p$  dianggap tidak berubah, jadi persamaan sensitivitas yang dipergunakan untuk menganalisis masalah pengaturan tegangan adalah persamaan (3.43).

Persamaan ini menyajikan hubungan utama antara tindakan kontrol dan pengaruhnya terhadap variabel yang diatur.

Untuk contoh sistem tiga simpul seperti yang telah dikemukakan dalam sub bab 3.8.2, berdasarkan persamaan (3.31) perhitungan matriks sensitivitas dapat dilukiskan seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} SU_{11} & SU_{12} \\ SU_{21} & SU_{22} \\ SU_{31} & SU_{32} \\ SU_{41} & SU_{42} \\ SU_{51} & SU_{52} \\ SU_{61} & SU_{62} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial F_1}{\partial Q_{G1}} & \frac{\partial F_1}{\partial \delta_2} & \frac{\partial F_1}{\partial Q_{G2}} & \frac{\partial F_1}{\partial \delta_3} & \frac{\partial F_1}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial F_2}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_{G1}} & \frac{\partial F_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_{G2}} & \frac{\partial F_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial F_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial F_3}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial F_3}{\partial Q_{G1}} & \frac{\partial F_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial F_3}{\partial Q_{G2}} & \frac{\partial F_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial F_3}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial F_4}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial F_4}{\partial Q_{G1}} & \frac{\partial F_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial F_4}{\partial Q_{G2}} & \frac{\partial F_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial F_4}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial F_5}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial F_5}{\partial Q_{G1}} & \frac{\partial F_5}{\partial \delta_2} & \frac{\partial F_5}{\partial Q_{G2}} & \frac{\partial F_5}{\partial \delta_3} & \frac{\partial F_5}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial F_6}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial F_6}{\partial Q_{G1}} & \frac{\partial F_6}{\partial \delta_2} & \frac{\partial F_6}{\partial Q_{G2}} & \frac{\partial F_6}{\partial \delta_3} & \frac{\partial F_6}{\partial |V_3|} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial F_1}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial F_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial F_2}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial F_3}{\partial |V_1|} & \frac{\partial F_3}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial F_4}{\partial |V_1|} & \frac{\partial F_4}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial F_5}{\partial |V_1|} & \frac{\partial F_5}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial F_6}{\partial |V_1|} & \frac{\partial F_6}{\partial |V_2|} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.44)$$

Dari matriks sensitivitas yang telah diperoleh di atas, berdasarkan persamaan (3.43) dapat dirumuskan suatu hubungan sensitivitas antara tindakan kontrol (variabel kontrol) dengan variabel yang diatur (variabel keadaan) sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{G1} \\ \Delta Q_{G1} \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta Q_{G2} \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta |V_3| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SU_{11} & SU_{12} \\ SU_{21} & SU_{22} \\ SU_{31} & SU_{32} \\ SU_{41} & SU_{42} \\ SU_{51} & SU_{52} \\ SU_{61} & SU_{62} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.45)$$

Perlu diingat bahwa sudut fase tegangan dari pada simpul slack telah diambil sebagai referensi, sehingga  $\delta$  tetap tidak berubah ( $\delta = 0$ ). Ini berarti bahwa  $\Delta x_1 = \Delta \delta_1 = 0$ . Sebagai akibatnya matriks  $F_x$  berubah dimensinya menjadi  $2n-1 \times 2n-1$ , dan matriks  $F_u$  menjadi  $2n-1 \times m$ .

Selanjutnya pada kasus pengaturan tegangan, perubahan sudut fase tegangan  $\Delta \delta$  adalah tidak penting dan dapat diabaikan. Demikian juga halnya dengan perubahan daya aktif  $\Delta P$ , karena pada dasarnya perubahan daya aktif hanya dipengaruhi oleh perubahan sudut fase tegangan dan sebaliknya. Sebagai akibatnya persamaan matriks (3.45) dapat disederhanakan menjadi :

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{G2} \\ \Delta Q_{G2} \\ \Delta |V_3| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SU_{21} & SU_{22} \\ SU_{41} & SU_{42} \\ SU_{61} & SU_{62} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.46)$$

Bilamana ada pelanggaran tegangan atau daya reaktif pada simpul tertentu ( $\Delta G1, \Delta G2, \Delta |V3|$ ), maka dengan menggunakan hubungan sensitivitas di atas dapat dihitung tindakan kontrol ( $|V1|, |V2|$ ) yang diperlukan untuk mengatasi pelanggaran batas tegangan ini. Dengan teknik sensitivitas dapat juga ditentukan tindakan kontrol yang paling efektif dalam mengkompensir pelanggaran tegangan tersebut.



Untuk suatu  $n$  simpul sistem tenaga listrik dengan  $m$  tindakan kontrol, hubungan antara tegangan simpul dan tindakan kontrol dapat digambarkan seperti berikut :

$$\begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 & \dots & V_n \\ C_1 & C_2 & C_3 & \dots & C_n \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{Tegangan simpul} \\ \text{Tindakan kontrol} \end{matrix}$$

*Gambar 3.7 Representasi Pengaturan (Kontrol) Tegangan*

(S.J. Cheng, O.P. Malik, G.S. Hope, 1988)

Dari *Gambar 3.7* dapat dilihat bahwa untuk tiap-tiap tegangan simpul, beberapa tindakan kontrol dapat digunakan. Dapat juga dilihat bahwa perubahan-perubahan dalam setiap tindakan kontrol mengakibatkan perubahan pada beberapa tegangan simpul. Ada dua faktor yang membatasi tindakan kontrol ini, yaitu :

1. Tindakan kontrol tidak boleh melebihi rating pembatas dari peralatan kontrol reaktif.
2. Tindakan kontrol yang digunakan untuk mengatasi pelanggaran tegangan tidak akan menghasilkan pelanggaran-pelanggaran tegangan yang baru.

Jika suatu injeksi daya reaktif dirubah untuk tujuan pengaturan, tindakan-tindakan kontrol ini hanya efektif pada daerah yang terbatas. Artinya hanya efektif pada simpul-simpul terdekat atau saluran yang menunjukkan sensitivitas yang berarti. Hal ini dikarenakan rugi-rugi daya reaktif yang besar, sehingga masing-masing peralatan kontrol reaktif mempunyai jangkauan yang terbatas.

### 3.10 Kesimpulan

Setelah dilakukan perencanaan sistem dan perhitungan manual menggunakan rumus, maka akan didapatkan hasil yang diharapkan memenuhi tujuan pengerjaan skripsi.

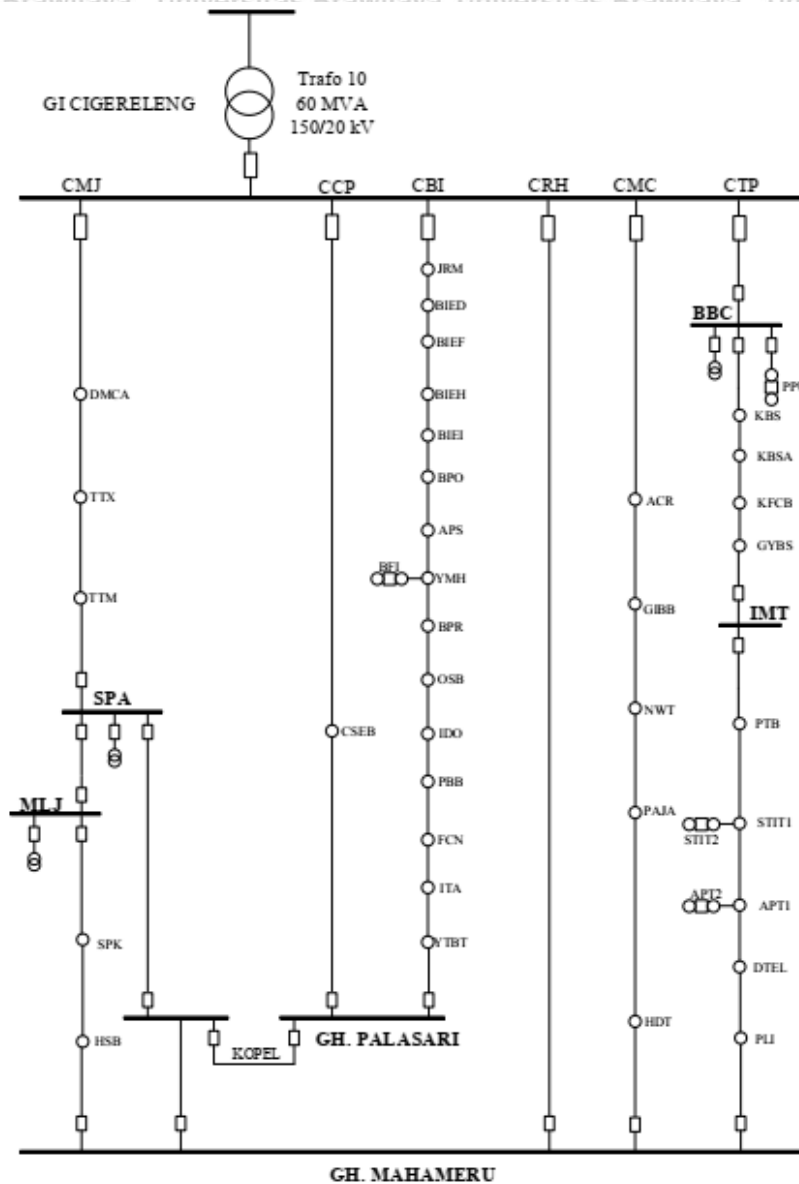




## BAB IV HASIL & PEMBAHASAN

### 4.1 Sistem Distribusi 20 KV Bandung

Untuk menerapkan teori tentang sensitivitas dalam praktek guna menganalisis masalah pengaturan daya reaktif dan tegangan, dipergunakan sistem 20 kV sebagai tes sistem. *Gambar 4.1* menggambarkan diagram segaris dari jaringan sistem tenaga listrik 20 kV di Bandung.



Gambar 4.1 Jaringan Spindel GI Cigereleng – GH Mahameru

Jaringan menengah 20 kV spindel antara GI Cigereleng dengan GH mahameru mempunyai 6 penyulang. Jaringan ini mendapat suplai dari GI Cigereleng melalui sebuah trafo daya 150/20 kV, 60 MVA.

Penyulang yang terdapat pada jalur tersebut yaitu penyulang CMJ, CCP, CBI, CRH, CMC dan CTP. Diagram jaringan spindel tersebut ditunjukkan pada *Gambar 4.1*. Sebagian besar beban yang digunakan pada jaringan spindel tersebut adalah beban industri.

Pada keadaan operasi normal, semua saklar daya pada Gardu Hubung Palasari dan Mahameru dalam keadaan terbuka, sehingga struktur jaringan adalah radial.

Pada skripsi ini akan dilakukan analisis sensitivitas pada penyulang CMC sebagai simpul slack yang terdiri atas lima gardu distribusi sebagai simpul beban. Untuk keperluan pengaturan tegangan dengan kompensasi kapasitor, semua simpul beban dijadikan simpul kontrol.

#### 4.2. Langkah-Langkah Penyelesaian

Pertama-tama perlu disiapkan data yang diperlukan untuk analisis sensitivitas, yaitu data saluran seperti dalam Tabel 4.1 dan data magnitude tegangan dan sudut fasa tiap simpul untuk sistem yang beroperasi dalam keadaan *steady state*.



*Gambar 4.2 Jaringan Distribusi Penyulang CMC*



Sebagaimana yang ada pada *Gambar 4.2*, jaringan distribusi penyulang CMC terdiri dari satu simpul slack yaitu pada CMC sendiri dan lima simpul beban yaitu pada ACR, GIBB, NWT, PAJA, dan HDT.

*Tabel 4.1 Data Saluran*

Nama Antar Gardu	Jarak (m)	R (Ohm)	X (Ohm)
CMC(1) - ACR(2)	2178	0,28314	0,197744
ACR(2) - GIBB(3)	3535	0,57267	0,329833
GIBB(3) - NWT(4)	542	0,07046	0,049209
NWT(4) - PAJA(5)	5534	0,71942	0,502442
PAJA (5) - HDT(6)	2677	0,34801	0,24305

Pada *Tabel 4.1*, untuk tiap hubungan antar saluran telah diketahui jarak, resistansi, dan reaktansi nya. Data resistansi dan reaktansi akan digunakan dalam perhitungan G dan B.

Harga-harga nominal dari magnitude tegangan dan sudut fasa tegangan dapat diperoleh dari analisis aliran daya yang dalam hal ini menggunakan metode Newton-Rapshon.

Untuk itu diperlukan data saluran seperti tersusun dalam *Tabel 4.1* dan data simpul, yang berupa nilai magnitude tegangan dan sudut fasa untuk simpul slack, daya aktif dan magnitude tegangan pada simpul generator, serta daya beban baik daya aktif maupun daya reaktif. Kedua data ini dimasukkan kedalam rumus dan penyelesaian aliran daya dilakukan dengan metode Newton-Raphson seperti yang telah diuraikan dalam Bab sebelumnya. Hasil dari proses perhitungan ini tersusun dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Analisis Aliran Daya

Simpul	Tegangan (kV)	Sudut Phasa	P Input (kW)	Q Input (kVAR)
CMC(1)	20	80	18030,12	102257,28
ACR(2)	19,96	80	85	426,072
GIBB(3)	19,94	80	113	1073,70144
NWT(4)	19,94	80	108	681,7152
PAJA(5)	19,92	80	195	1073,70144
HDT(6)	19,91	80	279	1073,70144

Pada Tabel 4.2, dapat diketahui empat elemen hasil analisis aliran daya, yaitu magnitudo tegangan, sudut phasa, daya aktif, dan daya reaktif. Pertama pada data magnitudo tegangan telah terjadi penurunan tegangan dengan semakin jauh jarak jaringan dan banyaknya simpul yang telah terlewati.

Selanjutnya data magnitudo tegangan dan sudut phasa tiap simpul yang diperoleh dari analisis aliran daya ini dan type tiap simpul beserta data saluran dimasukkan ke dalam program pembentukan matriks sensitivitas. Adapun proses perhitungan pembentukan matriks sensitivitas  $S_u$  ini dapat diringkas dalam algoritma berikut :

1. Membaca data saluran (impedansi dan line charging saluran) dan data simpul (magnitudo tegangan, sudut phasa, dan type simpul)
2. Berdasarkan data saluran di atas, dibentuk matriks admitansi simpul ( $Y_{bus}$ )
3. Membentuk matriks  $F_x$  dan  $F_u$  yang prosedurnya telah dijelaskan dalam sub bab 2
4. Menginversikan matriks  $F_x$
5. Membentuk matriks sensitivitas  $S_u$  dengan mengalikan negatif dari inversi matriks  $F_x$  dengan matriks  $F_u$  berpedoman pada persamaan (3.31)

Untuk sistem distribusi enam simpul seperti pada Gambar 4.2, dimana penyulang CMC sebagai simpul slack dan yang lain merupakan lima simpul beban. Untuk keperluan pengaturan tegangan dengan kompensasi kapasitor, semua simpul beban dijadikan simpul kontrol.





Pada Tabel 4.3, telah didapatkan nilai konduktansi (G) dan suseptansi (B) yang akan digunakan pada perhitungan matriks  $F_x$  dan  $F_u$ .

#### 4.2.2 Membentuk Matriks $F_x$ dan Matriks $F_u$

Pada kasus pengaturan tegangan, perubahan sudut phasa tegangan  $\Delta\delta$  adalah tidak penting dan dapat diabaikan. Demikian juga halnya dengan perubahan daya aktif  $\Delta P$ , karena pada dasarnya perubahan daya aktif hanya dipengaruhi oleh perubahan sudut phasa tegangan dan sebaliknya. Oleh karena itu persamaan (4.1) bisa diabaikan. Jadi yang mempengaruhi perubahan tegangan adalah daya reaktif.

Untuk menyederhanakan perhitungan, matriks  $F_x$  dan matriks  $F_u$  diperoleh dengan menurunkan persamaan (4.2) persamaan mismatch daya reaktif. Matriks  $F_x$  diperoleh dengan menurunkan persamaan (4.2) terhadap variabel keadaan (tak bebas)  $Q_G$ .

$F_x$ , adalah elemen-elemen matriks Jacobian yang dihitung sebagai berikut :

$$F_x = \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x_0, u_0, p_0}$$

$$F_x = \begin{matrix} \left. \begin{array}{cccccc} \frac{\partial F_2}{\partial Q_{G1}} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_{G2}} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_{G3}} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_{G4}} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_{G5}} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_{G6}} \\ \frac{\partial F_4}{\partial Q_{G1}} & \frac{\partial F_4}{\partial Q_{G2}} & \frac{\partial F_4}{\partial Q_{G3}} & \frac{\partial F_4}{\partial Q_{G4}} & \frac{\partial F_4}{\partial Q_{G5}} & \frac{\partial F_4}{\partial Q_{G6}} \\ \frac{\partial F_6}{\partial Q_{G1}} & \frac{\partial F_6}{\partial Q_{G2}} & \frac{\partial F_6}{\partial Q_{G3}} & \frac{\partial F_6}{\partial Q_{G4}} & \frac{\partial F_6}{\partial Q_{G5}} & \frac{\partial F_6}{\partial Q_{G6}} \end{array} \right. & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix} \quad (4.5)$$

$$F_x = \begin{matrix} \left. \begin{array}{cccccc} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right. & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix}$$



$F_u$ , adalah elemen-elemen matriks Jacobian yang dihitung sebagai berikut :

$$F_u = \frac{\partial F}{\partial u} \Big|_{x_0, u_0, p_0}$$

$$F_u = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial F_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial F_2}{\partial |V_3|} & \frac{\partial F_2}{\partial |V_4|} & \frac{\partial F_2}{\partial |V_5|} & \frac{\partial F_2}{\partial |V_6|} \\ \frac{\partial F_4}{\partial |V_1|} & \frac{\partial F_4}{\partial |V_2|} & \frac{\partial F_4}{\partial |V_3|} & \frac{\partial F_4}{\partial |V_4|} & \frac{\partial F_4}{\partial |V_5|} & \frac{\partial F_4}{\partial |V_6|} \\ \frac{\partial F_6}{\partial |V_1|} & \frac{\partial F_6}{\partial |V_2|} & \frac{\partial F_6}{\partial |V_3|} & \frac{\partial F_6}{\partial |V_4|} & \frac{\partial F_6}{\partial |V_5|} & \frac{\partial F_6}{\partial |V_6|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_{12}}{\partial |V_1|} & \frac{\partial F_{12}}{\partial |V_2|} & \frac{\partial F_{12}}{\partial |V_3|} & \frac{\partial F_{12}}{\partial |V_4|} & \frac{\partial F_{12}}{\partial |V_5|} & \frac{\partial F_{12}}{\partial |V_6|} \end{pmatrix} \dots (4.6)$$

$$F_u = \begin{pmatrix} 137,412 & 70,636 & 23,369 & 21,591 & 12,152 & 10,031 \\ 70,495 & 162,719 & 34,854 & 31,035 & 14,649 & 11,668 \\ 23,299 & 34,819 & 383,937 & 282,997 & 25,244 & 17,523 \\ 21,527 & 31,004 & 282,997 & 381,966 & 27,716 & 18,680 \\ 12,104 & 14,619 & 25,219 & 27,688 & 136,974 & 57,239 \\ 9,986 & 11,639 & 17,497 & 18,652 & 57,211 & 115,144 \end{pmatrix}$$

#### 4.2.3 Menghitung Matriks Sensitivitas

Membentuk matriks sensitivitas  $S_u$  dengan mengalikan negatif dari inversi matriks  $F_x$  dengan matriks  $F_u$  berpedoman pada persamaan (3.31)

$$S_u = -F_x^{-1} F_u \dots (4.7)$$

$$S_u = \begin{pmatrix} 137,412 & 70,636 & 23,369 & 21,591 & 12,152 & 10,031 \\ 70,495 & 162,719 & 34,854 & 31,035 & 14,649 & 11,668 \\ 23,299 & 34,819 & 383,937 & 282,997 & 25,244 & 17,523 \\ 21,527 & 31,004 & 282,997 & 381,966 & 27,716 & 18,680 \\ 12,104 & 14,619 & 25,219 & 27,688 & 136,974 & 57,239 \\ 9,986 & 11,639 & 17,497 & 18,652 & 57,211 & 115,144 \end{pmatrix}$$

### 4.3 Analisis dan Pembahasan

Dari matriks sensitivitas yang telah diperoleh di atas, berdasarkan persamaan (3.43) dapat dirumuskan suatu hubungan sensitivitas antara tindakan kontrol (variabel kontrol) dengan variabel yang diatur (variabel keadaan) sebagai berikut :

$$\Delta x = S_u \Delta u \dots\dots\dots (4.8)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{G1} \\ \Delta Q_{G2} \\ \Delta Q_{G3} \\ \Delta Q_{G4} \\ \Delta Q_{G5} \\ \Delta Q_{G6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 137,412 & 70,636 & 23,369 & 21,591 & 12,152 & 10,031 \\ 70,495 & 162,719 & 34,854 & 31,035 & 14,649 & 11,668 \\ 23,299 & 34,819 & 383,937 & 282,997 & 25,244 & 17,523 \\ 21,527 & 31,004 & 282,997 & 381,966 & 27,716 & 18,680 \\ 12,104 & 14,619 & 25,219 & 27,688 & 136,974 & 57,239 \\ 9,986 & 11,639 & 17,497 & 18,652 & 57,211 & 115,144 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \\ \Delta |V_3| \\ \Delta |V_4| \\ \Delta |V_5| \\ \Delta |V_6| \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.9)$$

Bilamana ada pelanggaran tegangan atau daya reaktif pada simpul tertentu, maka dengan menggunakan persamaan (4.9) di atas dapat ditentukan tindakan kontrol yang paling efektif dalam mengkompensasi pelanggaran tegangan tersebut. Dengan teknik sensitivitas dapat juga dihitung tindakan kontrol yang diperlukan untuk mengatasi pelanggaran batas tegangan ini.

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik, variasi tegangan yang diijinkan adalah sebesar 5% dari harga nominalnya (19 - 21 kV). Bila harga tegangan melebihi batas ini, maka sistem itu dinyatakan dalam keadaan darurat. Keadaan demikian tidak boleh dibiarkan terlalu lama, karena dapat mengganggu kelangsungan penyaluran tenaga listrik. Oleh karena itu diperlukan tindakan pengaturan guna mengembalikan harga tegangan ke batas normal dengan mengatur tap transformator, eksitasi generator, dengan memasang peralatan kompensasi kapasitor shunt, dan sebagainya.

Dengan menganggap bahwa sistem dalam kondisi normal untuk harga-harga tegangan seperti yang tercantum dalam tabel, maka dapat dihitung pengaturan daya reaktif dan tegangan dengan metode sensitivitas.



Sebagai contoh, misalkan tegangan pada simpul 4 (NWT) turun menjadi 18 kV ( $\Delta|V_4| = 19,94 - 18 = 1,94$  KV). Disini jelas bahwa tegangan keluar dari batas normal, maka perlu dilakukan pengaturan daya reaktif dan tegangan guna memulihkan tegangan simpul 4 ke dalam batas normal. Untuk kasus ini, dari persamaan, dapat diturunkan hubungan sebagai berikut :

$$\Delta Q_{G4} = 21,527\Delta|V_1| + 31,004\Delta|V_2| + 282,997\Delta|V_3| + 381,966\Delta|V_4| + 27,716\Delta|V_5| + 18,680\Delta|V_6|$$

Dari persamaan diatas dengan melihat besar kecilnya koefisien sensitivitas dapat dilihat bahwa perubahan nilai variabel-variabel kontrol yang berpengaruh paling besar terhadap tegangan simpul 4 adalah perubahan daya reaktif pada simpul 4 itu sendiri. Jadi tindakan kontrol yang paling efektif untuk mengatasi pada simpul 4 adalah dengan merubah daya reaktif pada simpul 4.

Besar tindakan kontrol yang diperlukan untuk memulihkan tegangan ini dapat dihitung sebagai berikut :

$$\Delta Q_{G4} = 381,966\Delta|V_4| = 381,966 * 1,94 = 741,014$$

Jadi untuk memulihkan tegangan kembali ke keadaan normal 19,94 KV, dibutuhkan injeksi daya reaktif sebesar 741 KVAR dengan memasang kapasitor. Dengan kata lain untuk setiap perubahan tegangan setiap kV nya dibutuhkan injeksi daya reaktif sebesar 381,966 KVAR.

Dengan cara yang sama, besar kompensasi daya reaktif yang dibutuhkan sebanding dengan koefisien sensitivitas diagonal utamanya.





## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dengan analisis sensitivitas dapat dipilih jenis variabel yang perubahannya paling berpengaruh yaitu pada diagonal utama nya dan tindakan kontrol yang paling efektif untuk mengatasi pelanggaran tegangan pada suatu simpul adalah dengan merubah daya reaktif tegangan pada simpul itu sendiri.

Jadi penurunan tegangan per kV pada simpul 1 (CMC) dibutuhkan tambahan daya reaktif sebesar 137,412 kVAR, pada simpul 2 (ACR) dibutuhkan tambahan daya reaktif sebesar 162,719 kVAR, pada simpul 3 (GIBB) dibutuhkan tambahan daya reaktif sebesar 383,937 kVAR, pada simpul 4 (NWT) dibutuhkan tambahan daya reaktif sebesar 381,966 kVAR, pada simpul 5 (PAJA) dibutuhkan tambahan daya reaktif sebesar 136,974 kVAR, pada simpul 6 (HDT) dibutuhkan tambahan daya reaktif sebesar 115,144 kVAR.

### 5.2 Saran

Untuk meningkatkan keamanan dan keandalan operasi sistem tenaga listrik 20 kV perlu ditambahkan suatu peralatan kompensasi daya reaktif pada tiap simpulnya.





## DAFTAR PUSTAKA

- Cheng, S.J., O.P. Malik, & G.S. Hope (1988). *An Expert System for Voltage and Reactive Power Control System, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 3, No. 4.*
- Dhar, R.N.(1982). *Computer Aided Power System Operation and Analysis.* New Delhi : Tata Mcgraw-Hill.
- Mismat, Budiono.(1983). *Analisa Sistem Tenaga.* Malang : Lembaga penerbitan Universitas Brawijaya.
- Marsudi, Djiteng (2006). *Operasi Sistem Tenaga Listrik,* Yogyakarta : Penerbit Graha Ilmu.
- Nurfitri.(2016). *Studi Perancangan Instalasi Listrik Pada Gegung Bertingkat ONIHBogor.* Bogor : Program Studi Teknik Elektro, konsentrasi Teknik Tenaga Listrik Universitas Pakuan Bogor.
- Peschon, J., D.S. Piercy, & W.F. Tinney (1968). *Sensitivity in Power Systems, IEEE Transaction on Power. Apparatus and Systems, Vol. PAS-87.*
- Poetro, Joessianto E. (1990). *Analisa Sensitivitas Sistem Tenaga Listrik untuk Pengaturan Daya reaktif dan Tegangan pada sistem 150 KV Jawa Timur,* ITS, Surabaya.
- Sankur, Michael D. (2016). *A Linearized Power Flow Model for Optimization in Unbalanced Distribution Systems.*
- Stevenson, W.D., Jr. (1984). *Analisa Sistem Tenaga Listrik.* Jakarta : Erlangga.
- Sumardjati, Prih.(2008). *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.* Departemen Pendidikan Nasional.
- Syufrijal, Monantun R. (2013). *Jaringan Distribusi tenaga Listrik Paket Keahlian Teknik Ketenagalistrikan, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.* Departemen Pendidikan Nasional.
- Weedy, B.M. (1972). *Electric Power System, John Wiley and sons.* New York.





LAMPIRAN

Perhitungan  $F_x$

$$F_2 = -B_{pp} |V_p|^2 - \sum_{q=1, q \neq p}^n |V_p| |V_q| \{G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q)\} -$$

$$Q_{Gp} + Q_{Dp} = 0$$

Simpul 1 :

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G1}} = -1$

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G2}} = 0$

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G3}} = 0$

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G4}} = 0$

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G5}} = 0$

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G6}} = 0$

Simpul 2 :

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G1}} = 0$

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G2}} = -1$

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G3}} = 0$

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G4}} = 0$

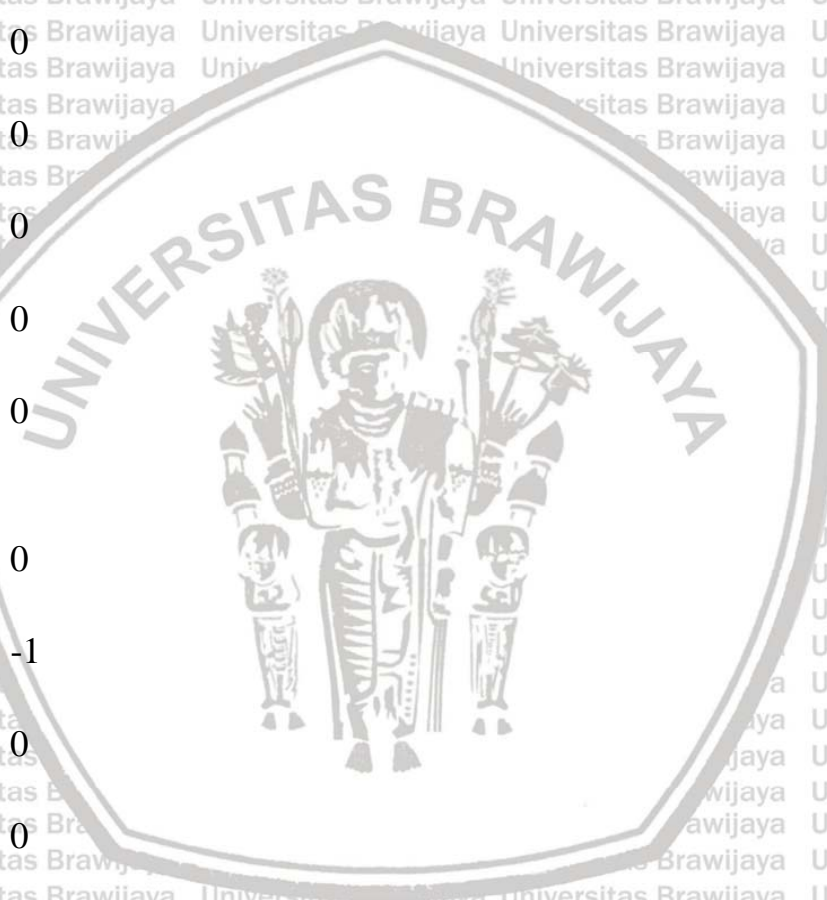
- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G5}} = 0$

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G6}} = 0$

Simpul 3 :

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G1}} = 0$

- $\frac{\partial F}{\partial Q_{G2}} = 0$



•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G3}} = -1$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G4}} = 0$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G5}} = 0$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G6}} = 0$

Simpl 4 :

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G1}} = 0$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G2}} = 0$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G3}} = 0$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G4}} = -1$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G5}} = 0$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G6}} = 0$

Simpl 5 :

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G1}} = 0$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G2}} = 0$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G3}} = 0$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G4}} = 0$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G5}} = -1$

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G6}} = 0$

Simpl 6 :

•  $\frac{\partial F}{\partial Q_{G1}} = 0$





$$\bullet \frac{\partial F}{\partial Q_{G2}} = 0$$

$$\bullet \frac{\partial F}{\partial Q_{G3}} = 0$$

$$\bullet \frac{\partial F}{\partial Q_{G4}} = 0$$

$$\bullet \frac{\partial F}{\partial Q_{G5}} = 0$$

$$\bullet \frac{\partial F}{\partial Q_{G6}} = -1$$

**Perhitungan Fu**

$$F_2 = -B_{pp} |V_p|^2 - \sum_{q=1}^n |V_p| |V_q| \{G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q)\} -$$

$$Q_{Gp} + Q_{Dp} = 0$$

Diketahui :  $B = \frac{1}{X}$  ;  $G = \frac{1}{R}$  ; Sudut phasa semua sama

Jawab :

Simpl 1 :

$$\frac{\partial F}{\partial |V_1|} = -2 B_{11} |V_1| - [ 2V_1 (-B_{11}) + V_2 (-B_{12}) + V_3 (-B_{13}) + V_4 (-B_{14}) + V_5 (-B_{15}) +$$

$$V_6 (-B_{16}) = \underline{137,41273}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_2|} = V_1 (B_{12}) = \underline{70,63643}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_3|} = V_1 (B_{13}) = \underline{23,36967}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_4|} = V_1 (B_{14}) = \underline{21,59197}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_5|} = V_1 (B_{15}) = \underline{12,15295}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_6|} = V_1 (B_{16}) = \underline{10,03159}$$

Simpl 2 :

$$\frac{\partial F}{\partial |V_1|} = V_2 (B_{21}) = \underline{70,49516}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_2|} = -2 B_{22} |V_2| - [ V_1 (-B_{21}) + 2V_2 (-B_{22}) + V_3 (-B_{23}) + V_4 (-B_{24}) + V_5 (-B_{25}) +$$

$$V_6(-B_{26}) = \underline{162.71949}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_3|} = V_2(B_{23}) = \underline{34,85427}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_4|} = V_2(B_{24}) = \underline{31,03571}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_5|} = V_2(B_{25}) = \underline{14,64900}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_6|} = V_2(B_{26}) = \underline{11,66869}$$

Simpl 3 :

$$\frac{\partial F}{\partial |V_1|} = V_3(B_{31}) = \underline{23,29956}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_2|} = V_3(B_{32}) = \underline{34,81935}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_3|} = -2 B_{33} |V_3| - [ V_1 (-B_{31}) + V_2 (-B_{32}) + 2V_3 (-B_{33}) + V_4 (-B_{34}) + V_5 (-B_{35}) +$$

$$V_6 (-B_{36}) = \underline{383,93770}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_4|} = V_3(B_{34}) = \underline{282,99745}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_5|} = V_3(B_{35}) = \underline{25,24434}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_6|} = V_3(B_{36}) = \underline{17,52366}$$

Simpl 4 :

$$\frac{\partial F}{\partial |V_1|} = V_4(B_{41}) = \underline{21,52720}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_2|} = V_4(B_{42}) = \underline{31,00461}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_3|} = V_4(B_{43}) = \underline{282,99745}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_4|} = -2 B_{44} |V_4| - [ V_1 (-B_{41}) + V_2 (-B_{42}) + V_3 (-B_{43}) + 2V_4 (-B_{44}) + V_5 (-B_{45}) +$$

$$V_6 (-B_{46}) = \underline{381,96637}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_5|} = V_4(B_{45}) = \underline{27,71677}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_6|} = V_4(B_{46}) = \underline{18,68038}$$

Simpl 5 :





$$\frac{\partial F}{\partial |V_1|} = V_5 (B_{51}) = \underline{12,10434}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_2|} = V_5 (B_{52}) = \underline{14,61969}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_3|} = V_5 (B_{53}) = \underline{25,21902}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_4|} = V_5 (B_{54}) = \underline{27,68897}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_5|} = -2 B_{55} |V_5| - [ V_1 (-B_{51}) + V_2 (-B_{52}) + V_3 (-B_{53}) + V_4 (-B_{54}) + 2V_5 (-B_{55}) + V_6 (-B_{56}) ] = \underline{136,97405}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_6|} = V_5 (B_{56}) = \underline{57,23973}$$

Simplu 6 :

$$\frac{\partial F}{\partial |V_1|} = V_6 (B_{61}) = \underline{9,98645}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_2|} = V_6 (B_{62}) = \underline{11,63946}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_3|} = V_6 (B_{63}) = \underline{17,49729}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_4|} = V_6 (B_{64}) = \underline{18,65227}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_5|} = V_1 (B_{15}) = \underline{57,21099}$$

$$\frac{\partial F}{\partial |V_6|} = -2 B_{11} |V_1| - [ V_1 (-B_{61}) + V_2 (-B_{62}) + V_3 (-B_{63}) + V_4 (-B_{64}) + V_5 (-B_{65}) + 2V_6 (-B_{66}) ] = \underline{115,14405}$$

