

## KATA PENGANTAR

Puji Tuhan, hanya atas kasih setia Tuhan Yesus Kristus, skripsi dengan judul “**Analisis Kestabilan Peralihan pada Sistem Transmisi High Voltage Direct Current (HVDC)**” dapat diselesaikan dengan tepat waktu. Skripsi ini disusun dalam rangka untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik, di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak tersebut diantaranya:

1. Kedua orang tua tercinta, Papa Minarto Pranoto, Alm., dan Mama Sudiah yang telah mendidik, mencintai, dan mendoakan anak pertamanya. Serta adik terkasih, Elza Bertha Jane dan Christian Immanuel, yang memberikan semangat dan doa yang tulus.
2. Bapak M. Azis Muslim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan, Bapak Ali Mustofa, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi S1 dan Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D dan Bapak Ir. Mahfudz Shidiq, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan bimbingan dan bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Visi Saujaningati Kristyanto, Sahabat Missiodei, teman-teman angkatan 2012 (VOLTAGE'12), teman-teman POWER, dan teman-teman Laboratorium Sistem Daya Elektrik Universitas Brawijaya Malang. Terima kasih atas semua bantuan dan doa.
5. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Dalam penyusunan skripsi ini tentunya terdapat kekurangan oleh karena keterbatasan penulis, untuk itu diperlukan saran dan kritik dari semua pihak untuk perbaikan dan kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat memberi manfaat bagi nusa dan bangsa, tanah air tercinta, Indonesia.

Malang, 4 Agustus 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>viii</b>
<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
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Saluran Transmisi.....	5
2.2 Klasifikasi Saluran Transmisi .....	5
2.3 Sistem Transmisi <i>High Voltage Direct Current</i> (HVDC).....	7
2.4 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	16
2.5 Perhitungan Jaringan .....	18
2.6 Analisis Aliran Daya .....	20
2.7 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan.....	28
2.8 Kestabilan Mesin Majemuk.....	33
2.9 Persamaan Sudut Daya.....	35
2.10 Metode <i>Step By Step</i> .....	37
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	<b>41</b>
3.1 Studi Literatur.....	41
3.2 Pengambilan Data Model Jaringan.....	42
3.3 Pembuatan Rangkaian Simulasi Transmisi AC dan HVDC .....	42
3.4 Perhitungan dan Simulasi.....	42
3.5 Simulasi Program Kestabilan Peralihan Menggunakan PSSE .....	45
3.6 Membandingkan Hasil Simulasi Kestabilan Peralihan .....	46
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>47</b>
4.1 Gambaran Umum .....	47
4.2 Data Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV .....	47

4.3	Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Pembebanan 100% .....	51
4.4	Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Pembebanan 70% .....	71
<b>BAB V PENUTUP .....</b>		<b>93</b>
5.1	Kesimpulan .....	93
5.2	Saran .....	93
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>95</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Pendek.....	5
Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Menengah.....	6
Gambar 2.3 Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Panjang.....	7
Gambar 2.4 Lambang katup terkontrol .....	8
Gambar 2.5 Jembatan Graetz .....	8
Gambar 2.6 Rangkaian ekuivalen konverter 3 fasa gelombang penuh .....	9
Gambar 2.7 Tegangan fasa dengan netral dan tegangan antar fasa .....	10
Gambar 2.8 Arus pada dioda dan periode konduksi dioda .....	10
Gambar 2.9 Arus fasa Ia.....	10
Gambar 2.10 Variasi perubahan fasa tegangan dan arus dengan sudut penyalaan $\alpha$ .....	11
Gambar 2.11 Monopolar HVDC .....	12
Gambar 2.12 Bipolar HVDC.....	13
Gambar 2.13 Homopolar HVDC .....	13
Gambar 2.14 Sistem Operasi transmisi HVDC Bipolar.....	14
Gambar 2.15 Jenis-jenis gangguan sistem tiga fasa.....	18
Gambar 2.16 Tipikal Bus dari Sistem Tenaga .....	21
Gambar 2.17 Diagram alir Aliran Daya dengan Metode Newton Raphson.....	25
Gambar 2.18 Diagram alir Aliran Daya Sistem AC-DC Metode Sekuensial .....	28
Gambar 2.19 Representasi arah perputaran momen putar mekanis dan elektrik .....	29
Gambar 2.20 Jaringan yang diperbesar dari suatu sistem daya.....	34
Gambar 2.21 Sistem yang dipresentasikan dengan rangkaian 4 kutub .....	35
Gambar 2.22 Representasi Pa dengan menggunakan metode step by step .....	38
Gambar 2.23 Representasi $\omega'$ dengan menggunakan metode step by step.....	38
Gambar 2.24 Diagram alir Metode Step by step.....	40
Gambar 3.1 Diagram alir langkah-langkah penelitian .....	41
Gambar 3.2 Diagram alir Simulasi Program .....	45
Gambar 4.1 Diagram satu garis Sistem Standar IEEE 30 Bus.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Gambar 4.2 Sudut Rotor Generator 1 Saluran AC Pembebanan 100 %	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Gambar 4.3 Sudut Rotor Generator 5 Saluran AC Pembebanan 100 %	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

Gambar 4.4 Konfigurasi Saluran Monopolar HVDC dari Bus 1 ke Bus 2 **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.5 Sudut Rotor Generator 1 Monopolar HVDC Pembebanan 100 % ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.6 Sudut Rotor Generator 5 Monopolar HVDC Pembebanan 100 % ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.7 Konfigurasi Saluran Bipolar HVDC dari Bus 1 ke Bus 2 **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.8 Sudut Rotor Generator 1 Bipolar HVDC Pembebanan 100 % ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.9 Sudut Rotor Generator 5 Bipolar HVDC Pembebanan 100 % ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.10 Perbandingan Sudut Rotor Generator 1 Pembebanan 100% ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.11 Perbandingan Sudut Rotor Generator 5 Pembebanan 100% ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.12 Sudut Rotor Generator 1 Saluran AC Pembebanan 70 % **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.13 Sudut Rotor Generator 5 Saluran AC Pembebanan 70 % **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.14 Konfigurasi Saluran Monopolar HVDC dari Bus 1 ke Bus 2 ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.15 Sudut Rotor Generator 1 Monopolar HVDC Pembebanan 70% ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.16 Sudut Rotor Generator 5 Monopolar HVDC Pembebanan 70% ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.17 Konfigurasi Saluran Bipolar HVDC dari Bus 1 ke Bus 2 **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.18 Sudut Rotor Generator 1 Bipolar HVDC Pembebanan 70% ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.19 Sudut Rotor Generator 5 Bipolar HVDC Pembebanan 70% ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.20 Perbandingan Sudut Rotor Generator 1 Pembebanan 70% **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.21 Perbandingan Sudut Rotor Generator 5 Pembebanan 70% **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.22 Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik Jawa Bali 500 kV.....48

Gambar 4.23 Sudut Rotor Generator 26 Saluran AC Pembebanan 100 % .....55

Gambar 4.24 Sudut Rotor Generator 11 Saluran AC Pembebanan 100 % .....55

Gambar 4.25 Konfigurasi Saluran HVDC dari Bus 26 ke Bus 24.....56

Gambar 4.26 Sudut Rotor Generator 26 Monopolar HVDC Pembebanan 100 % .....61

Gambar 4.27 Sudut Rotor Generator 11 Monopolar HVDC Pembebanan 100 % .....61

Gambar 4.28 Konfigurasi Saluran HVDC dari Bus 26 ke Bus 24.....62

Gambar 4.29 Sudut Rotor Generator 26 Bipolar HVDC Pembebanan 100 % .....68

Gambar 4.30 Sudut Rotor Generator 11 Bipolar HVDC Pembebanan 100 % .....68

Gambar 4.31 Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 Pembebanan 100% .....69

Gambar 4.32 Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 100% .....70

Gambar 4.33 Sudut Rotor Generator 26 Saluran AC Pembebanan 70 % .....76

Gambar 4.34 Sudut Rotor Generator 11 Saluran AC Pembebanan 70 % .....76

Gambar 4.35 Sudut Rotor Generator 26 Monopolar HVDC Pembebanan 70% .....82

Gambar 4.36 Sudut Rotor Generator 11 Monopolar HVDC Pembebanan 70% .....82

Gambar 4.37 Sudut Rotor Generator 26 Bipolar HVDC Pembebanan 70% .....88

Gambar 4.38 Sudut Rotor Generator 11 Bipolar HVDC Pembebanan 70% .....88

Gambar 4.39 Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 Pembebanan 70% .....89

Gambar 4.40 Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 70% .....90

#### DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Jenis-jenis Bus pada Sistem Standar IEEE 30 Bus .....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.2 Data Pembangkitan Sistem Standar IEEE 30 Bus**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.3 Data Saluran Sistem Standar IEEE 30 Bus .....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.4 Data Pembebanan Sistem Standar IEEE 30 Bus**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.5 Simulasi Aliran Daya Saluran AC Pembebanan 100%..**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.6 Tegangan peralihan Saluran AC Pembebanan 100%.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.7 Sudut Rotor Generator 1 dan 5 AC Pembebanan 100 %**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.8 Parameter Transmisi Monopolar HVDC IEEE 30 Bus. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.9 Simulasi Aliran Daya Saluran Monopolar HVDC Pembebanan 100 % . **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.10 Tegangan peralihan Monopolar HVDC Pembebanan 100% **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.11 Sudut Rotor Generator 1 dan 5 Monopolar HVDC Pembebanan 100 % **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.12 Parameter Transmisi Bipolar HVDC IEEE 30 Bus..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.13 Simulasi Aliran Daya Saluran Bipolar HVDC Pembebanan 100% ..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.14 Tegangan peralihan Bipolar HVDC Pembebanan 100% **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.15 Sudut Rotor Generator 1 dan 5 Bipolar HVDC Pembebanan 100 % ... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.16 Perbandingan Sudut Rotor Generator 1 IEEE 30 bus Pembebanan 100% **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.17 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.18 Perbandingan Sudut Rotor Generator 5 IEEE 30 bus Pembebanan 100% **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.19 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.20 Simulasi Aliran Daya Saluran AC Pembebanan 70% . **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.21 Tegangan peralihan Saluran AC Pembebanan 70% .... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.22 Sudut Rotor Generator 1 dan 5 AC Pembebanan 70 % **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.23 Parameter Transmisi Monopolar HVDC IEEE 30 Bus **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.24 Simulasi Aliran Daya Saluran Monopolar HVDC Pembebanan 70% .. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.25 Tegangan peralihan Monopolar HVDC Pembebanan 70% **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.26 Sudut Rotor Generator 1 dan 5 Monopolar HVDC Pembebanan 70% **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.27 Parameter Transmisi Monopolar HVDC IEEE 30 Bus **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.28 Simulasi Aliran Daya Saluran Bipolar HVDC Pembebanan 70% ..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.29 Tegangan peralihan Bipolar HVDC Pembebanan 70% **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.30 Sudut Rotor Generator 1 dan 5 Bipolar HVDC Pembebanan 70 % .... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.31 Perbandingan Sudut Rotor Generator 1 IEEE 30 bus Pembebanan 70% **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.32 Perbandingan nilai sudut penyimpangan awal dan kenaikan sudut rotor **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.33 Perbandingan Sudut Rotor Generator 5 IEEE 30 bus Pembebanan 70% **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.34 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.35 Jenis-jenis Bus pada Sistem Tenaga Listrik Jawa Bali 500 kV .....47

Tabel 4.36 Data Saluran Transmisi Jawa Bali 500 kV .....49

Tabel 4.37 Data Pembebanan Jawa Bali 500 kV .....50

Tabel 4.38 Data Pembangkitan Sistem Jawa Bali 500 kV .....50

Tabel 4.39 Simulasi Aliran Daya Saluran AC Pembebanan 100% .....51

Tabel 4.40 Tegangan peralihan Saluran AC Pembebanan 100% .....52

Tabel 4.41 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 AC Pembebanan 100 % .....54

Tabel 4.42 Parameter Transmisi Monopolar HVDC Transmisi Jawa Bali 500 kV .....57

Tabel 4.43 Simulasi Aliran Daya Monopolar HVDC Pembebanan 100 % .....57

Tabel 4.44 Tegangan peralihan Monopolar HVDC Pembebanan 100% .....59

Tabel 4.45 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Monopolar HVDC Pembebanan 100% ...61

Tabel 4.46 Parameter Transmisi Bipolar HVDC Transmisi Jawa Bali 500 kV .....63

Tabel 4.47 Simulasi Aliran Daya Bipolar HVDC Pembebanan 100% .....63

Tabel 4.48 Tegangan peralihan Bipolar HVDC Pembebanan 100% .....65

Tabel 4.49 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Bipolar HVDC Pembebanan 100 % .....67

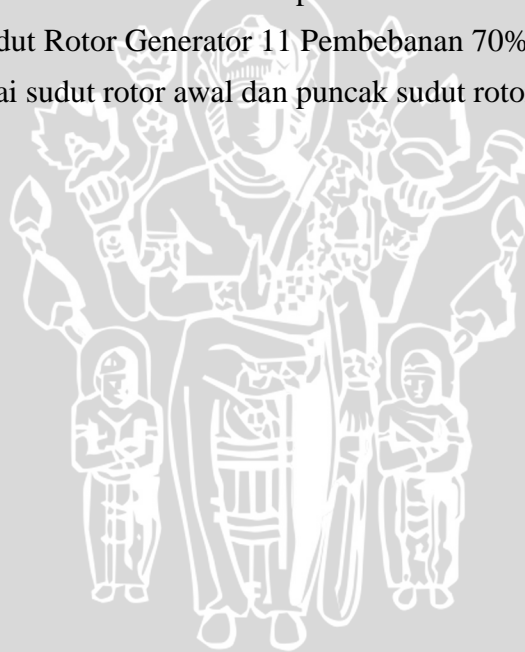
Tabel 4.50 Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 100% .....68

Tabel 4.51 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor .....69

Tabel 4.52 Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 100% .....70



Tabel 4.53 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor .....	71
Tabel 4.54 Simulasi Aliran Daya Saluran AC Pembebanan 70% .....	71
Tabel 4.55 Tegangan peralihan Saluran AC Pembebanan 70% .....	72
Tabel 4.56 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Bipolar AC Pembebanan 70 % .....	75
Tabel 4.57 Parameter Transmisi Monopolar HVDC Transmisi Jawa Bali 500 kV .....	77
Tabel 4.58 Simulasi Aliran Daya Monopolar HVDC Pembebanan 70% .....	78
Tabel 4.59 Tegangan peralihan Monopolar HVDC Pembebanan 70% .....	79
Tabel 4.60 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Monopolar HVDC Pembebanan 70% ....	81
Tabel 4.61 Parameter Transmisi Bipolar HVDC Transmisi Jawa Bali 500 kV .....	83
Tabel 4.62 Simulasi Aliran Daya Saluran Bipolar HVDC Pembebanan 70% .....	84
Tabel 4.63 Tegangan peralihan Bipolar HVDC Pembebanan 70% .....	85
Tabel 4.64 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Bipolar HVDC Pembebanan 70 % .....	87
Tabel 4.65 Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 Pembebanan 70% .....	88
Tabel 4.66 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor .....	89
Tabel 4.67 Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 70% .....	90
Tabel 4.68 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor .....	91



## DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
Lampiran 1	Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran AC Pembebanan 100% dalam Program PSSE .....	97
Lampiran 2	Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran Monopolar HVDC Pembebanan 100% dalam Program PSSE.....	98
Lampiran 3	Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran Bipolar HVDC Pembebanan 100% dalam Program PSSE .....	99
Lampiran 4	Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran AC Pembebanan 70% dalam Program PSSE .....	100
Lampiran 5	Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran Monopolar HVDC Pembebanan 70% dalam Program PSSE.....	101
Lampiran 6	Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran Bipolar HVDC Pembebanan 70% dalam Program PSSE .....	102



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara berpenduduk terpadat nomor empat di dunia. Pertumbuhan jumlah penduduk yang meningkat tiap tahunnya menuntut persediaan kebutuhan energi listrik yang semakin besar. Energi listrik yang diproduksi saat ini masih belum memenuhi kebutuhan listrik masyarakat secara menyeluruh. Padahal kehidupan masyarakat sangat bergantung pada pemanfaatan energi listrik. Sistem tenaga listrik pun harus senantiasa diperbaharui demi menunjang kebutuhan energi listrik untuk memenuhi kebutuhan masyarakat.

Untuk penyaluran energi listrik, dibutuhkan suatu sistem tenaga listrik yang terintegrasi dengan baik. Sistem tenaga listrik pada umumnya terdiri atas empat bagian, yaitu pembangkit, transmisi, distribusi, dan pemakaian tenaga listrik atau beban (Cekdin, dkk., 2013:1). Energi listrik mulanya diproduksi dari pembangkit tenaga listrik yang letaknya jauh dari beban. Energi listrik mengalami rugi-rugi yang signifikan pada saluran transmisi.

Pada saluran transmisi tentunya juga tidak terlepas dari gangguan. Gangguan pada saluran transmisi dapat menyebabkan sistem memasuki keadaan peralihan. Jika yang terjadi adalah gangguan yang besar, maka kestabilan sistem dapat terganggu. Kerja paralel antar generator menjadi tidak serempak atau sinkron satu sama lain. Hal ini memungkinkan terjadi pemadaman skala besar atau yang biasa disebut black-out. Telaah kestabilan peralihan bertujuan untuk menentukan apakah sistem tadi tetap dalam keadaan serempak setelah terjadinya gangguan berat, misalnya gangguan sistem transmisi, perubahan beban yang mendadak terputusnya unit pembangkit atau pemutaran saklar (*switching*) saluran. (Stevenson, 1996:349)

Menurut bentuk arus yang ditransmisikan, terbagi menjadi 2, yaitu arus bolak-balik (*alternating current*) dan arus searah (*direct current*). Saluran transmisi di Indonesia menggunakan jenis transmisi AC. Namun dalam perkembangannya, saluran transmisi HVDC sudah banyak digunakan pada negara-negara maju seperti Jepang dan China. Contohnya Republik Rakyat Tiongkok, sejak tahun 2009 telah melaksanakan pembangunan saluran transmisi arus searah yang sangat panjang, yaitu sekitar 2096 kM pada tegangan ultratinggi UHV  $\pm 800$  kV DC (Panjaitan, 2012:15). Transmisi HVDC memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan sistem transmisi AC, yaitu : kerugian corona lebih rendah; memerlukan isolasi yang lebih sedikit; dan drop tegangan rendah (Behraves, 2012:300-303).

Berdasarkan karakteristiknya, transmisi HVDC ini dapat menjadi salah satu rekomendasi alternatif transmisi di Indonesia. Dalam skripsi ini akan dilakukan penelitian tentang Analisis Kestabilan Peralihan pada Transmisi *High Voltage Direct Current* (HVDC). Dari pembelajaran ini diharapkan dapat mengetahui Pengaruh penggunaan Transmisi *High Voltage Direct Current* (HVDC) terhadap Kestabilan Peralihan Sistem Tenaga Listrik.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah yang diambil adalah :

1. Bagaimana pengaruh penggunaan Saluran transmisi HVDC terhadap kestabilan peralihan sistem tenaga listrik.
2. Bagaimana pengaruh penggunaan Saluran Transmisi HVDC terhadap sudut rotor awal sistem bekerja.
3. Bagaimana pengaruh penggunaan Saluran Transmisi HVDC angka puncak sudut rotor ketika sistem terjadi gangguan.

## 1.3 Batasan Masalah

Dalam kajian ini ada beberapa batasan masalah:

1. Kondisi Beban dan besar daya pembangkitan dianggap konstan.
2. Parameter yang dianalisis adalah sudut rotor.
3. Tidak membahas sistem proteksi.
4. Tidak membahas teknologi elektronika daya.
5. Konfigurasi sistem yang dianalisis adalah Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV
6. Menggunakan perangkat lunak PSSE

## 1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan sistem transmisi HVDC terhadap kestabilan peralihan sistem tenaga listrik.

## 1.5 Manfaat

Dalam penelitian ini diharapkan dapat memberikan ide dan pertimbangan untuk mengadakan transmisi HVDC di Indonesia, demi sistem kelistrikan yang lebih baik. Selain itu juga diharapkan menjadi sumber riset transmisi HVDC selanjutnya.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Laporan skripsi disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut:

### BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang pemilihan judul penelitian ini. Dari latar belakang tersebut didapatkan rumusan masalah yang akan dibahas. Rumusan masalah juga perlu memiliki batasan masalah yang jelas. Penelitian ini pun memiliki tujuan yang ingin dicapai sehingga memiliki manfaat.

### BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Dalam penelitian ini, diperlukan dasar teori yang mendukung, pengetahuan ilmiah serta referensi sebagai dasar argumentasi. Referensi ini bersumber dari buku, jurnal, maupun web browser. Referensi yang ditulis memiliki keterkaitan dengan masalah yang akan dibahas. Untuk lebih jelasnya, pada bab ini berisi teori tentang saluran transmisi, transmisi HVDC, gangguan pada saluran transmisi dan kestabilan peralihan pada sistem tenaga listrik.

### BAB III : METODE PENELITIAN

Dalam menyelesaikan permasalahan, tentunya harus memiliki langkah-langkah yang tepat dan jelas. Langkah-langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini yaitu: studi literatur untuk mencari teori yang mendukung, menjelaskan data-data yang akan dicari, melakukan simulasi saluran transmisi HVDC, membandingkan dengan simulasi saluran transmisi HVAC, menganalisa hasil simulasi, dan menarik kesimpulan.

### BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dituliskan data-data yang telah didapatkan. Dimulai dengan pembuatan sistem dengan menggunakan program PSSE. Data tersebut disimulasikan. Hasil dari simulasi kestabilan peralihan tersebut dianalisa berdasarkan rumusan masalah yang ada.

### BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi mengenai kesimpulan dan saran. Kesimpulan dari hasil simulasi merupakan uraian yang menjawab rumusan masalah. Saran yang ditulis dapat menjadi referensi pengembangan bagi penelitian selanjutnya.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Saluran Transmisi

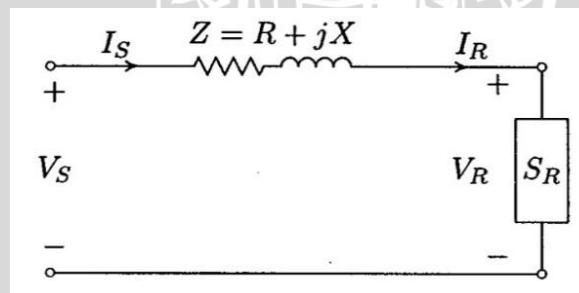
Suatu sistem tenaga listrik pada umumnya terdiri atas empat unsur, yaitu pembangkit, transmisi, distribusi, dan pemakaian tenaga listrik atau beban listrik. Energi listrik yang dibangkitkan di pusat tenaga listrik harus ditransmisikan ke pusat-pusat pemakai melalui saluran. Saluran transmisi merupakan saluran penghubung antara pusat pembangkit listrik dengan sistem distribusi. Suatu saluran transmisi listrik mempunyai empat parameter yang mempengaruhi kemampuannya untuk berfungsi sebagai bagian dari suatu sistem tenaga, yaitu resistansi, induktansi, kapasitansi, dan konduktansi. (Stevenson, 1996:36)

#### 2.2 Klasifikasi Saluran Transmisi

Berdasarkan ukuran panjang maka saluran transmisi diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu: (Stevenson, 1996:86)

##### 2.2.1 Saluran Transmisi Pendek

Saluran ini memiliki panjang kurang dari 80 km (50 mil). Nilai kapasitansi shunt dapat diabaikan sehingga hanya memperhatikan nilai resistansi seri  $R$  dan induktansi seri  $L$  di sepanjang saluran. Rangkaian tersebut dapat diselesaikan seperti halnya dengan rangkaian AC seri yang sederhana. Rangkaian ekuivalen suatu saluran transmisi pendek dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Pendek

Sumber: Saadat (1999:143)

Karena tidak terdapat cabang paralel (shunt), arus pada ujung-ujung pengirim dan penerima adalah sama besar

$$I_S = I_R \quad (2-1)$$

Tegangan pada ujung pengirim adalah

$$V_S = V_R + Z I_R \quad (2-2)$$

Dimana  $Z = R + jX$

$$I_R = \frac{S_{R(3\phi)}^*}{3V_R^*} \quad (2-3)$$

dengan  $S_{R(3\phi)}$  = beban tiga fasa

$I_S$  = arus pada ujung pengirim

$I_R$  = arus pada ujung penerima

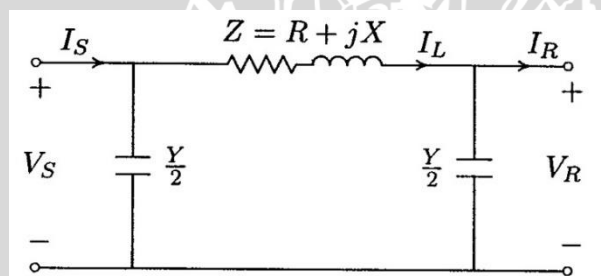
$V_S$  = tegangan saluran terhadap netral pada ujung pengirim

$V_R$  = tegangan saluran terhadap netral pada ujung penerima

$Z$  = impedansi seri keseluruhan sistem

### 2.2.2 Saluran Transmisi Menengah

Saluran ini memiliki panjang antara 80 km (50 mil) dan 240 km (150 mil). Pada saluran ini admitansi shunt ikut diperhitungkan. Jika keseluruhan admitansi shunt saluran dibagi dua sama besar dan ditempatkan pada ujung-ujung pengirim dan penerima, maka rangkaian yang terbentuk dinamakan rangkaian pi nominal. Rangkaian ekuivalen suatu saluran transmisi menengah dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Menengah

Sumber: Saadat (1999:148)

Relasi arus dan tegangan: (Stevenson, 1996:88-89)

$$V_S = (V_R \frac{Y}{2} + I_R) Z + V_R$$

$$V_S = (\frac{ZY}{2} + 1) V_R + Z I_R \quad (2-4)$$

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (2-5)$$

Dengan memasukkan  $V_S$  pada persamaan (2-4) ke dalam persamaan (2-5) maka didapatkan (2-6).

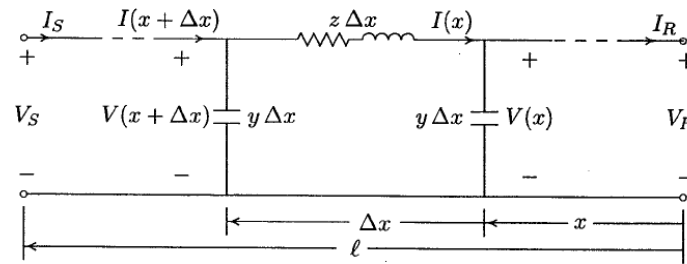
$$I_S = V_R Y (1 + \frac{ZY}{4}) + (\frac{ZY}{2} + 1) I_R \quad (2-6)$$

### 2.2.3 Saluran Transmisi Panjang

Saluran ini memiliki panjang lebih dari 240 km (150 mil). Kapasitansi pada saluran ini sangat besar dan tidak dapat dianggap sebagai kapasitansi terpusat, tetapi terdistribusi merata sepanjang saluran. Perhitungan dilakukan dengan memodelkan saluran panjang



dalam rangkaian ekivalen pi yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 dalam bentuk satu fasa dengan panjang  $l$  km.



Gambar 2.3 Rangkaian Ekivalen Saluran Transmisi Panjang

Sumber: Saadat (1990:152)

Panjang impedansi per unit ditunjukkan dengan menggunakan huruf  $z$  dan admitansi shunt per fasa ditunjukkan dengan huruf  $y$ , dimana  $z = r + j\omega L$  dan  $y = g + j\omega C$ . Misal bagian kecil dari panjang  $x$  dilambangkan  $\Delta x$ . Fasor tegangan dan arus pada kedua sisi ditunjukkan dalam fungsi jarak (Saadat, 1990):

$$V(x + \Delta x) = V(x) + z \Delta x I(x) \quad (2-7)$$

Sehingga didapat persamaan turunan:

$$\frac{dV(x)}{dx} = z I(x) \quad (2-8)$$

Dengan mengaplikasikan persamaan di atas, maka didapatkan persamaan untuk arus adalah:

$$\begin{aligned} I(x) &= \frac{1}{z} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{y}{z} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \\ &= \sqrt{\frac{y}{z}} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \end{aligned} \quad (2-9)$$

Persamaan tegangan dan arus dapat dituliskan dalam bentuk yang lebih sederhana

$$V = V_R \cosh \gamma x + I_R Z_C \sinh \gamma x \quad (2-10)$$

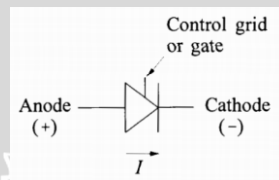
$$I = I_R \cosh \gamma x + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma x \quad (2-11)$$

### 2.3 Sistem Transmisi High Voltage Direct Current (HVDC)

Teknologi HVDC digunakan untuk mengirimkan daya untuk jarak jauh melalui saluran udara atau kabel laut dengan rugi-rugi saluran yang lebih rendah. Transmisi HVDC menjadi lebih efisien daripada Transmisi AC jika melebihi batas panjang saluran tertentu (breakpoint). Selain itu Transmisi HVDC juga dapat mengurangi kendala sinkron antara dua sistem AC, sehingga dapat meningkatkan stabilitas steady state dan dinamis.

Penggunaan Transmisi HVDC tentunya tidak terlepas dari konverter. Konverter berguna untuk mengubah arus AC menjadi DC, begitu pula sebaliknya. Konverter ini juga mengontrol aliran daya kontinyu pada saluran HVDC. Komponen utama pada konverter yaitu katup penghubung dan transformator konverter. Katup penghubung adalah susunan tombol tegangan tinggi, yang terhubung secara berurutan, menghubungkan tegangan AC 3 fasa ke terminal DC. Sedangkan transformator konverter mengatur tegangan antara sistem AC dan DC.

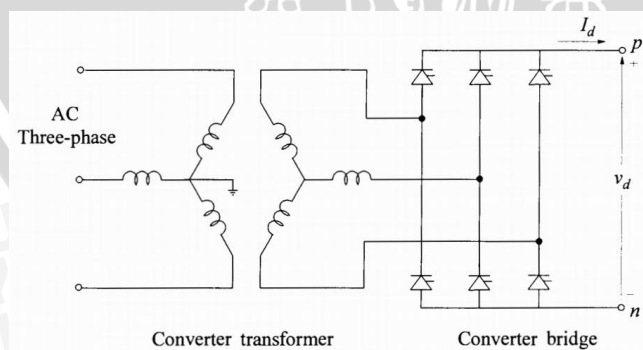
Katup pada konverter HVDC dikontrol menggunakan elektronika daya. Katup hanya akan terhubung 1 arah yaitu bias maju, seperti terlihat pada Gambar 2.4. Katup terkonduksi bias maju disebabkan oleh karena tegangan sisi anoda lebih positif daripada sisi katoda. Sedangkan apabila tegangan sisi katoda lebih positif daripada sisi anoda, katup memblokir arus, sehingga arus tidak mengalir.



Gambar 2.4 Lambang katup terkontrol

Sumber: Kundur (1994:469)

Rangkaian ekuivalen dari konverter HVDC dapat dilihat pada Gambar 2.5. Rangkaian ini biasa disebut jembatan Graetz. Meskipun ada beberapa konfigurasi alternatif yang memungkinkan, jembatan Graetz telah digunakan secara universal sebagai konverter HVDC. Selain karena alasan efisiensi lebih baik, ketika katub dalam kondisi tak terkonduksi katup hanya bertegangan rendah. Puncak tegangan balik juga salah satu faktor penting untuk menentukan rating dari katup tersebut.



Gambar 2.5 Jembatan Graetz

Sumber: Kundur (1994:470)

Trafo konverter memiliki tap berbeban pada sisi AC untuk mengontrol tegangan. Belitan sisi AC dari transformer pada umumnya menggunakan hubungan bintang dengan

pentanahan netral; sedangkan pada sisi katup, belitan menggunakan hubungan delta atau bintang, tanpa pentanahan netral.

Analisis pada rangkaian konverter 3 fasa gelombang penuh dilakukan dengan membuat asumsi sebagai berikut :

1. Sistem AC (termasuk transformator konverter) direpresentasikan sebagai sumber tegangan konstan dan frekuensi dihitung dengan rugi-rugi induktansi (adanya kebocoran induktansi sisi primer transformator)
2. Arus DC ( $I_d$ ) konstan dan tidak ada ripple, dengan alasan karena adanya smooting reactor yang besar digunakan pada sisi DC
3. Katup adalah saklar ideal dengan hambatan nol ketika terkonduksi dan hambatan bernilai tak terhingga ketika terbuka.

Berdasarkan asumsi di atas, besar tegangan antar fasa dengan tanah:

$$e_a = E_m \cdot \cos(\omega t + 60) \quad (2-12)$$

$$e_b = E_m \cdot \cos(\omega t - 60) \quad (2-13)$$

$$e_c = E_m \cdot \cos(\omega t + 180) \quad (2-14)$$

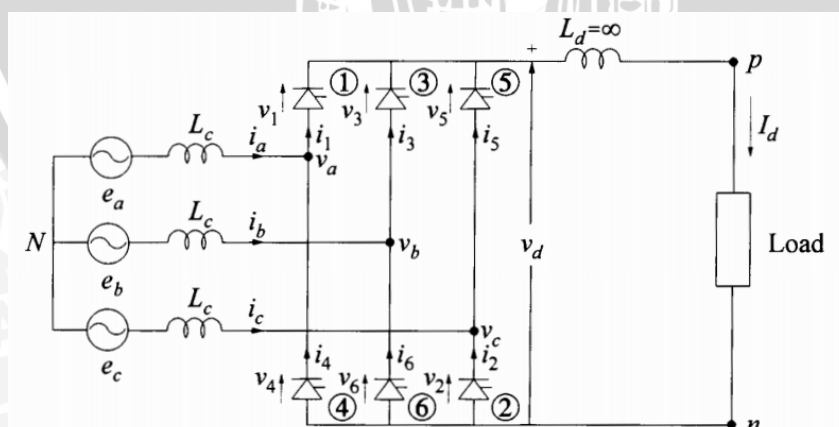
Sedangkan tegangan antar fasa dengan fasa :

$$e_{ac} = e_a - e_c = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 30) \quad (2-15)$$

$$e_{ba} = e_b - e_a = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - 90) \quad (2-16)$$

$$e_{cb} = e_c - e_b = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 150) \quad (2-17)$$

Berdasarkan asumsi di atas pula, jembatan Graetz pada Gambar 2.5 dapat direpresentasikan dengan rangkaian ekuivalen pada Gambar 2.6

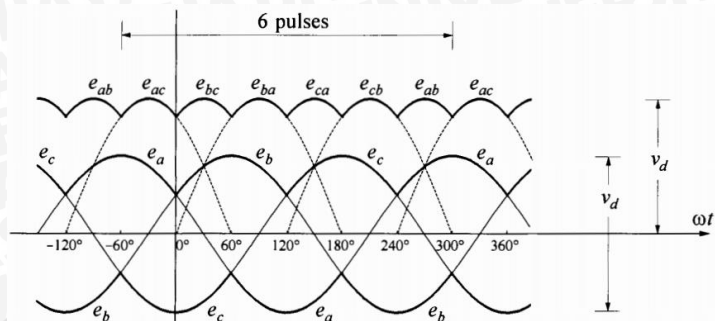


Gambar 2.6 Rangkaian ekuivalen konverter 3 fasa gelombang penuh

Sumber: Kundur (1994:472)

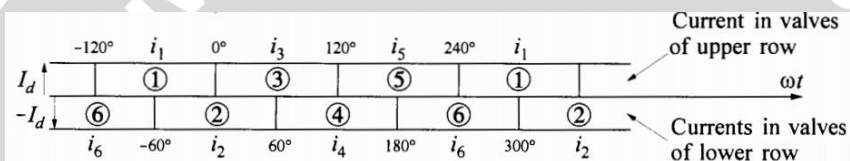
Konverter 3 fasa gelombang penuh ini terdiri dari 6 buah katup. Ke enam dioda akan konduksi dengan urutan konduksi tertentu, yaitu  $D_1D_2$ ,  $D_2D_3$ ,  $D_3D_4$ ,  $D_4D_5$ ,  $D_5D_6$ ,  $D_6D_1$ .

Dalam 1 siklus setiap pasangan dioda akan konduksi selama 60°. Bentuk gelombang tegangan masukan konverter 3 fasa dinyatakan dalam Gambar 2.7. Arus pada dioda dan periode konduksi dioda dinyatakan dalam Gambar 2.8. Arus fasa Ia dinyatakan dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.7 Tegangan fasa dengan netral dan tegangan antar fasa

Sumber: Kundur (1994:472)



Gambar 2.8 Arus pada dioda dan periode konduksi dioda

Sumber: Kundur (1994:472)



Gambar 2.9 Arus fasa Ia

Sumber: Kundur (1994:472)

Konverter 3 fasa gelombang penuh ini memiliki 6 gelombang pulsa itulah sebabnya konverter ini biasa disebut konverter 6 pulsa. Gelombang tegangan keluaran konverter 6 pulsa berubah dari nilai minimum ke nilai maksimumnya setiap pertambahan sudut sebesar 60°. Tegangan rata-rata DC ( $V_d$ ) dapat ditemukan dengan mengintegrasikan wilayah 60° dengan sudut penyalan dianggap bernilai 0 ( $\alpha = 0$ ).

$$V_{d(0)} = \frac{3}{\pi} \int_{-60}^0 e_{ac} d\theta = \frac{3}{\pi} \int_{-60}^0 Em \cos(\theta + 30) d\theta \quad (2-18)$$

$$V_{d(0)} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} Em \quad (2-19)$$

$$V_{d(0)} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{LL} \quad (2-20)$$

Jika sudut penyalan memiliki nilai ( $\alpha \neq 0$ ), maka persamaan menjadi :

$$V_{d(\alpha)} = \frac{3}{\pi} \int_{-(60-\alpha)}^{\alpha} e_{ac} d\theta = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha-60}^{\alpha} \sqrt{3} Em \cos(\theta + 30) d\theta \quad (2-21)$$



$$V_{d(\alpha)} = V_{d(0)} \int_{\alpha-60}^{\alpha} \cos(\theta + 30) d\theta = V_{d(0)} \sin(\theta + 30) \Big|_{\alpha-60}^{\alpha} \quad (2-22)$$

$$V_{d(\alpha)} = V_{d(0)} [\sin(\alpha + 30) - \sin(\alpha - 30)] \quad (2-23)$$

$$V_{d(\alpha)} = V_{d(0)} (2\sin 30) \cos \alpha = V_{d(0)} \cos \alpha \quad (2-24)$$

Hubungan antara arus DC dan AC, diasumsikan konverter tidak memiliki rugi-rugi.

Maka daya yang dikirim dari sistem AC sama dengan daya DC, maka:

$$Pd = Vd \cdot Id = 3 \cdot V_{LN} \cdot I_{L1} \cdot \cos \theta \quad (2-25)$$

$Pd$  = Daya DC

$V_{LN}$  = Tegangan fasa dengan tanah

$I_{L1}$  = Arus fasa Fundamental

$\theta$  = beda sudut antara sudut tegangan fasa dengan sudut arus fasa

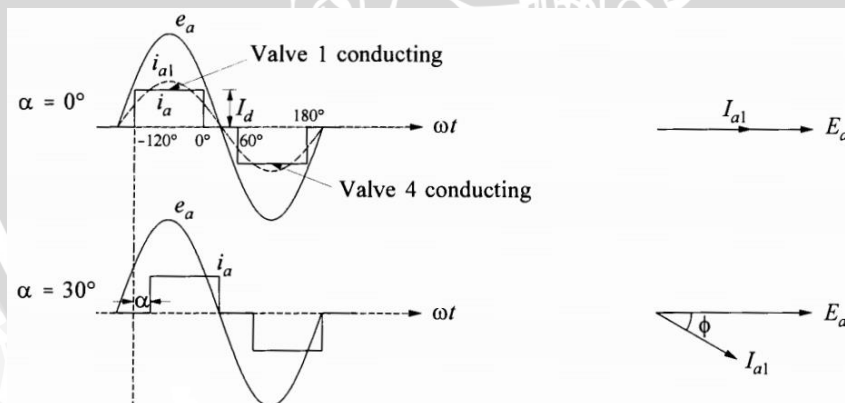
Dengan analisis Fourier, didapatkan besar nilai  $I_{L1}$ :

$$I_{L1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \int_{-60}^{60} Id \cdot \cos \theta \cdot d\theta \quad (2-26)$$

$$I_{L1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} Id \quad (2-27)$$

Setiap dioda pada konverter 6 pulsa terkonduksi selama 120 derajat tiap siklus.

Ketika sudut penyalaan bernilai nol, maka arus sefasa dengan tegangan. Sedangkan bila sudut penyalaan diberikan, arus akan tertinggal dari tegangan. Hal ini dinyatakan dalam Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Variasi perubahan fasa tegangan dan arus dengan sudut penyalaan  $\alpha$

Sumber: Kundur (1994:477)

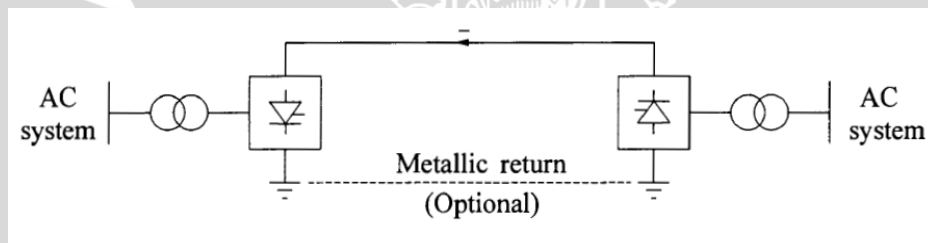
Untuk memperbaiki faktor daya, digunakan smooting reactor agar arus tidak tertinggal jauh oleh tegangan. Namun dengan penggunaan reactor membuat konsumsi daya reaktif semakin besar.

### 2.3.1 Konfigurasi Sistem Transmisi HVDC

Berdasarkan jumlah konduktor maka saluran transmisi HVDC diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu sebagai berikut:

#### 2.3.1.1 Hubungan Monopolar

*Monopolar link* adalah sistem DC link yang menggunakan satu konduktor dengan arus balik melalui tanah atau air laut. Satu konduktor pada *monopolar link* mengalirkan tegangan dengan polaritas positif atau polaritas negatif. *Monopolar link* sering digunakan untuk transmisi saluran bawah laut karena jarang terjadi kerusakan pada konduktor yang tertanam permanen di bawah laut. Hal ini menyebabkan tidak menggunakan dua konduktor seperti *bipolar link* atau *homopolar link* yang bertujuan apabila satu konduktor mengalami gangguan konduktor yang lain masih bisa beroperasi. Dilihat dari segi ekonomis *monopolar link* lebih murah bila dibandingkan dengan sistem *bipolar link* dan *homopolar link* karena menggunakan satu konduktor dan memerlukan dua konverter.

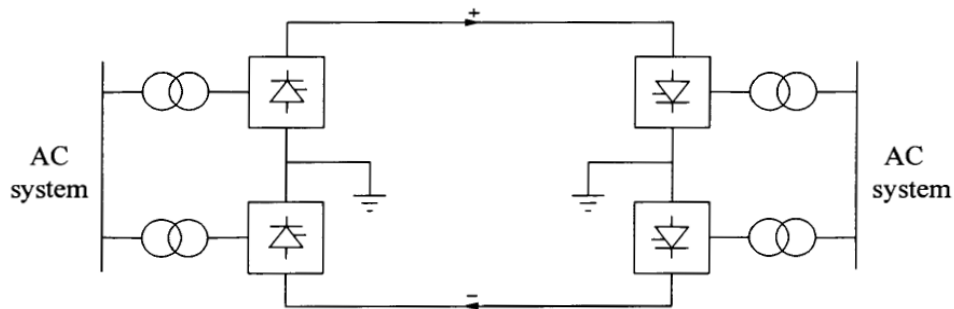


Gambar 2.11 Monopolar HVDC

Sumber : Gönen (1988:332)

#### 2.3.1.2 Hubungan Bipolar

*Bipolar link* adalah sistem DC link yang menggunakan dua konduktor yang mengalirkan tegangan dengan polaritas positif dan polaritas negatif. Setiap terminal pada sistem *bipolar link* memiliki dua konverter yang terhubung seri dan tidak ada arus ke tanah. Namun, bila salah satu konduktor mengalami gangguan maka konduktor yang lain dapat beroperasi dengan arus balik melalui tanah. Hal ini menjadi kelebihan dari sistem *bipolar link* yang mampu beroperasi dengan arus balik melalui tanah apabila salah satu konduktor mengalami gangguan. Dilihat dari sisi ekonomis sistem *bipolar link* lebih mahal daripada sistem *monopolar link* karena menggunakan dua konduktor dan 4 konverter.

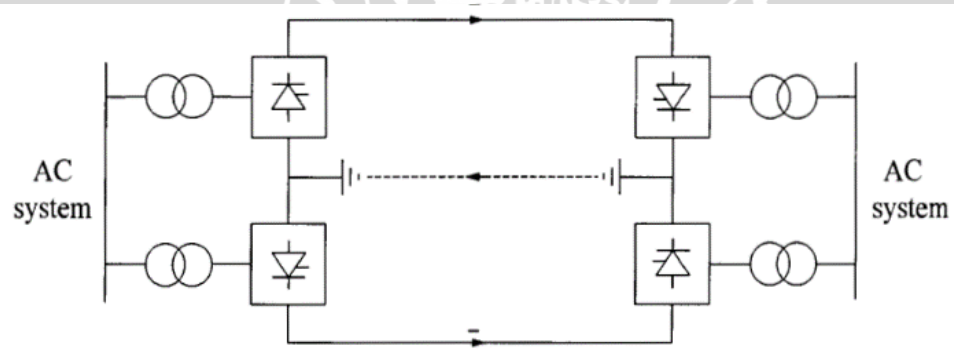


Gambar 2.12 Bipolar HVDC

Sumber: Kundur (1994:465)

### 2.3.1.3 Hubungan Homopolar

*Homopolar link* adalah sistem DC *link* yang menggunakan dua atau lebih konduktor yang mengalirkan tegangan dengan polaritas sejenis yaitu polaritas positif atau polaritas negatif. Setiap terminal pada sistem *homopolar link* memiliki dua konverter yang terhubung seri dengan arus kembali dari masing-masing terminal melalui tanah. Jika salah satu konduktor mengalami gangguan, maka terminal yang lain dapat beroperasi dengan arus kembali melalui tanah. Dilihat dari sisi ekonomis sistem *homopolar link* lebih mahal daripada sistem *monopolar link* karena menggunakan dua atau lebih konduktor dan konverter.

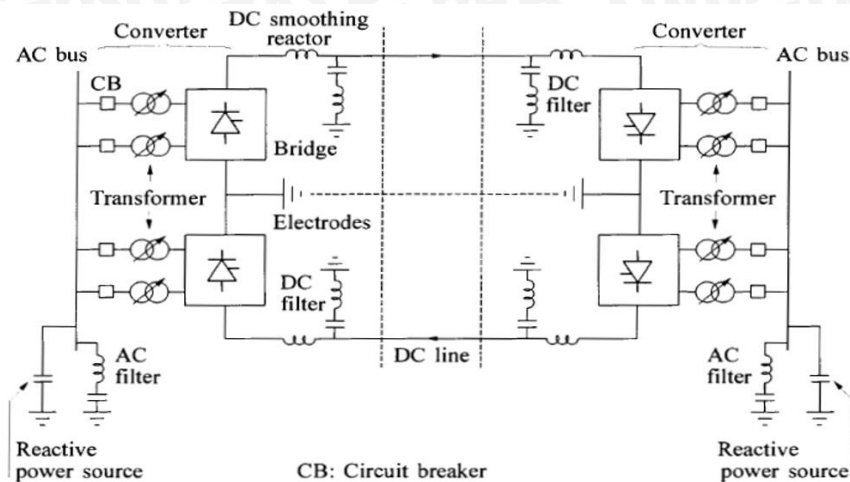


Gambar 2.13 Homopolar HVDC

Sumber: Kundur (1994:466)

### 2.3.2 Komponen Sistem Transmisi HVDC

Komponen utama pada sistem HVDC ditunjukkan pada Gambar 2.14, sebagai contoh menggunakan sistem bipolar. Komponen untuk konfigurasi lain pada umumnya sama seperti dengan yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Sistem Operasi transmisi HVDC Bipolar

Sumber: Kundur (1994:467)

Berikut ini dijelaskan fungsi dari komponen pembentuk sistem HVDC:

- *Smoothing Reactors*

Reaktor yang digunakan berukuran besar yaitu hingga 1.0 H dihubungkan seri pada setiap kutub di stasiun konverter. Tujuan adanya reaktor ini adalah: mengurangi harmonisa tegangan dan harmonisa arus pada transmisi DC, mencegah gangguan komutasi pada *inverter*, mencegah arus menjadi diskontinyu pada beban lampu, dan membatasi arus puncak pada *rectifier* jika terjadi *short circuit* pada transmisi DC

- *Converters*

Proses utama yang terjadi di dalam sistem HVDC adalah perubahan arus listrik AC menjadi arus DC. Untuk melakukan proses tersebut, digunakan konverter dan terdiri dari *valve bridges* dan transformator dengan *tap changer*.

- *Harmonic Filter*

Konverter menghasilkan tegangan dan arus harmonisa pada sisi AC dan DC. Harmonisa ini dapat menyebabkan panas berlebihan pada kapasitor di daerah dekat generator. Selain itu harmonisa memungkinkan interferensi dengan sistem telekomunikasi di dekatnya. *Harmonic Filter* ini digunakan pada sisi AC dan DC, untuk mengurangi efek-efek tersebut.

- *Reactive Power Supplies*

*DC converter* menyerap daya reaktif yang besar. Dalam kondisi *steady state*, daya reaktif yang diserap sekitar 50 persen dari daya yang dikirim. Sedangkan dalam kondisi peralihan, konsumsi daya reaktif bisa menjadi lebih besar. *Reactive Power Supplies* ini terletak di dekat konverter untuk menyediakan daya reaktif bagi konverter. Pada sistem AC biasanya menggunakan kapasitor shunt, kondensor sinkron ataupun *Static Var Compensator*



(SVC). Kapasitor yang terdapat pada filter AC juga merupakan bagian dari *Reactive Power Supplies*.

- *Electrodes*

Umumnya saluran DC menggunakan media tanah sebagai sebuah konduktor netral untuk setidaknya periode waktu yang singkat. Hubungan ke tanah membutuhkan sebuah konduktor dengan permukaan yang lebar untuk meminimalisir kerapatan arus dan gradien permukaan tegangan. Konduktor ini menggunakan sebuah elektroda.

- *DC Lines*

Saluran DC adalah saluran transmisi yang menghantarkan arus DC. Jumlah konduktor lebih sedikit daripada saluran transmisi AC. Ruang yang dibutuhkan untuk saluran DC lebih sedikit bila dibandingkan dengan saluran transmisi AC

- *AC Circuit Breakers*

*Circuit Breaker* digunakan pada sisi AC untuk membersihkan gangguan pada transformator. Bila terjadi gangguan DC, alat ini tidak berfungsi, karena gangguan tersebut diatasi oleh pengendalian konverter.

### 2.3.3 Gangguan pada Sistem Transmisi HVDC

#### 2.3.3.1 Gangguan pada saluran AC

Gangguan pada sistem AC dapat terjadi pada stasiun penyearah dan stasiun pembalik. Gangguan pada stasiun penyearah dapat mengakibatkan jatuh tegangan bus secara tiba-tiba, sehingga tidak ada daya yang disalurkan sebelum gangguan diatasi. Gangguan yang terjadi pada stasiun pembalik, juga menyebabkan jatuh tegangan bus. Hal ini menyebabkan kesalahan komutasi. Kesalahan komutasi adalah terjadinya hubung singkat pada saluran DC dan hubung buka pada saluran AC sehingga tidak ada daya yang disalurkan oleh saluran AC. Hubung singkat pada saluran DC menyebabkan kenaikan arus DC tiba-tiba dan menambah sudut penyalan sehingga kesalahan komutasi terjadi. Rugi-rugi energi ketika terjadi gangguan harus segera dipenuhi untuk mencegah ketidakstabilan peralihan dari mesin sinkron.

#### 2.3.3.2 Gangguan pada saluran DC

Gangguan pada saluran DC yang mungkin terjadi adalah gangguan fasa ke tanah, gangguan kabel, gangguan peralatan stasiun, dan kerusakan isolasi. Circuit breaker DC tidak digunakan secara langsung sebagai peralatan utama untuk mengatasi gangguan, walaupun circuit breaker ini dapat memotong bunga api ketika switching. Pada dasarnya, sistem

pengontrol HVDC yang memainkan peran utama untuk mengatasi gangguan pada saluran DC.

Fungsi pengontrolan sistem HVDC ini dinamakan fungsi *retard*. Sedini mungkin ketika gangguan DC dirasakan, fungsi *retard* ini akan aktif. Fungsi *retard* ini akan mengoperasikan penyearah dengan nilai alpha yang tinggi, sehingga inverter mengirim energi kembali ke sistem AC dan tidak ada arus yang mengalir pada sistem DC.

Untuk DC link berjenis bipolar, memiliki 2 pasang konverter (satu untuk kutub positif, dan yang lain untuk kutub negatif). Jika terjadi gangguan pada 1 sisi saluran, maka tidak ada arus yang mengalir pada saluran tersebut, sehingga DC Link akan beroperasi layaknya DC Link berjenis monopolar. Hal tersebut mengakibatkan penurunan daya yang disalurkan yang biasa disebut *de-energization* (Muthusamy, 2010:34-35).

#### 2.4 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem yang dapat kembali stabil setelah terjadi gangguan. Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai sifat dari sistem tersebut yang memungkinkan mesin-mesin tetap bekerja serempak meski terjadi suatu gangguan pada keadaan kerja yang normal. Batas stabilitas sistem adalah daya maksimum yang dapat dialirkan sistem tanpa kehilangan stabilitas sistem.

Menurut Stevenson (1996, 349), penelaahan kestabilan biasanya digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan. Penelaahan ini menghasilkan telaah kestabilan peralihan (*transient*), dinamis, dan keadaan tetap (*steady state*). Kestabilan peralihan atau *transient* adalah kemampuan sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak. Kestabilan dinamis dan keadaan tetap memiliki ruang lingkup yang lebih kecil dan hanya menyangkut perubahan keadaan kerja yang berangsur-angsur pada satu atau beberapa mesin. Perbedaan dari keduanya adalah telaah kestabilan dinamis menggunakan model mesin yang lebih terperinci, serta menggunakan sistem penguatan eksitasi dan sistem governor. Sedangkan kestabilan keadaan tetap hanya menggunakan model mesin yang sangat sederhana dan memperlakukan generator sebagai sumber tegangan konstan.

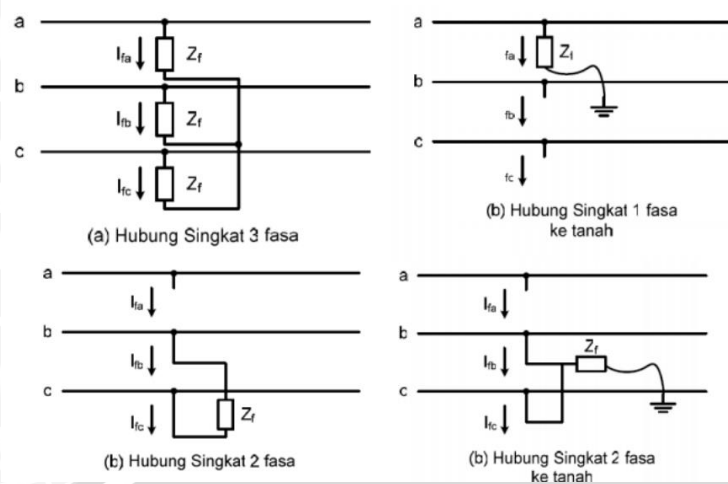
Tujuan menganalisa kestabilan keadaan tetap dan dinamis ialah menyelidiki kestabilan sistem itu terhadap perubahan kecil (incremental) di sekitar titik keseimbangan. Persamaan diferensial non linier dan aljabar dapat digantikan dengan persamaan linier, yang kemudian dapat diselesaikan dengan metode analisis linier, untuk menentukan apakah mesin atau rotor tadi akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadi perubahan kecil dari titik kerjanya (Stevenson, 1996:350).

Telaah kestabilan peralihan jauh lebih banyak dan lebih umum dilakukan, karena menggunakan gangguan besar. Proses kelinieran tidak dapat digunakan, sehingga proses diferensial non linier dan aljabar harus diselesaikan secara langsung atau dengan prosedur metode iterasi *step by step*. Masalah kestabilan peralihan ini terbagi menjadi 2 bagian, yaitu kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multiswing*). Kestabilan ayunan pertama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana, serta periode waktuyangcukup singkat, yaitu pada ayunan pertama setelah terjadinya gangguan. Bila mesin sistem tetap berada dalam keadaan serempak, maka dapat dikatakan bahwa sistem itu stabil. Masalah kestabilan ayunan majemuk mencakup periode waktu yang lebih lama, karena harus mempertimbangkan pengaruh sistem pengaturan generator terhadap perilaku mesin dalam waktu yang cukup lama.

Tujuan dari studi kestabilan ialah menentukan apakah rotor mesin yang terganggu dapat kembali ke keadaan kerja dengan kecepatan konstan, atau tidak. Jelaslah bahwa kecepatan rotor harus menyimpang dari kecepatan serempak, setidaknya untuk sementara waktu. Untuk memudahkan perhitungan, pada semua studi kestabilan dibuat 3 pengandaian yang mendasar, yaitu:

- Dalam gulungan stator dan sistem daya, hanya diperhitungkan arus dan tegangan frekuensi serempak. Oleh karena itu arus pergeseran DC (DC offset current) dan komponen harmoni semuanya diabaikan.
- Komponen simetris digunakan dalam representasi gangguan tak seimbang.
- Tegangan yang dibangkitkan dianggap tidak dipengaruhi oleh perubahan kecepatan mesin.

Penyebab utama dari ketidakstabilan sistem tenaga listrik adalah adanya gangguan. Begitu pentingnya untuk mengenali jenis gangguan pada sistem. Gangguan- tersebut berupa: hubung singkat pada jaringan transmisi, hilangnya pembangkit, hilangnya beban yang signifikan secara tiba-tiba, ataupun putusya hubungan antara dua buah subsistem dalam sistem tenaga listrik. Macam-macam gangguan ini dapat menimbulkan kerusakan pada sistem tenaga listrik. Gangguan pada sistem tiga fasa umumnya diklasifikasikan menjadi: gangguan tiga fasa ke tanah, gangguan satu fasa ke tanah, gangguan fasa ke fasa, dan gangguan dua fasa ke tanah (El-Hawary, 1995:469). Adapun gangguan sistem tiga fasa dapat ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Jenis-jenis gangguan sistem tiga fasa

Sumber: Stevenson (1994:310)

Jika gangguan yang terjadi sangat besar, diatas kemampuan sistem yang bekerja, maka dapat memungkinkan sistem kehilangan kestabilan. Perubahan-perubahan yang terjadi tersebut memberikan pengaruh yang besar pada sistem. Sistem juga harus menjaga pembangkit-pembangkit tetap bekerja dalam keadaan serempak. Analisis stabilitas peralihan melihat pada siklus-siklus pertama dari daya dan sudut daya setelah gangguan. Bila dalam waktu yang singkat gangguan tersebut dapat teratasi dan pembangkit-pembangkit dapat mempertahankan sinkronisasinya, maka sistem dapat dikatakan stabil pada periode peralihan.

Pengertian hilangnya sinkronisasi adalah ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan daya beban. Hal ini menimbulkan suatu keadaan peralihan, yaitu sudut rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi lebih yang membuat percepatan atau perlambatan pada rotor tersebut. Bila torsi tersebut cukup besar, maka mampu membuat mesin sinkron tersebut kehilangan sinkronisasinya dengan mesin sinkron yang lain.

## 2.5 Perhitungan Jaringan

Jaringan pada sistem tenaga listrik sekarang ini mengalami perkembangan besar. Jaringan listrik semakin meluas, mengikuti peningkatan jumlah konsumen energi listrik. Sistem tenaga listrik pun semakin rumit untuk dianalisis. Jaringan suatu sistem dipresentasikan sebagai  $Y_{bus}$ , dalam analisisnya. Suatu cara penghapusan (reduksi) simpul elemen matrik  $Y_{bus}$  pun sangat membantu dalam mempermudah menganalisis sistem tenaga listrik.

Bus-bus dapat dihapus dengan manipulasi matriks pada persamaan  $Y_{bus}$ , tetapi hanya bus yang tidak memiliki beban, ataupun generator saja, yang dapat dihapus. Persamaan  $Y_{bus}$  dalam notasi matriks dinyatakan sebagai:

$$I = Y_{bus} V \quad (2-28)$$

dimana  $I$  dan  $V$  adalah matriks kolom dan  $Y_{bus}$  adalah matriks bujursangkar simetris. Matriks kolom harus diatur sedemikian sehingga unsur yang berkesesuaian dengan bus yang akan dihapus berada pada baris bawah matriks tersebut. Unsur matriks admitansi bujursangkar juga ditempatkan sesuai dengan hal ini. Matriks kolom disekat sedemikian sehingga unsur yang berhubungan dengan simpul yang akan dihapus terpisah dari unsur-unsur lainnya oleh garis mendatar dan tegak. Bila disekat menurut aturan tersebut, persamaan diatas menjadi:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & L \\ L^T & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_X \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

dimana  $I_X$  adalah submatriks yang terdiri dari arus yang memasuki bus yang akan dihapus dan  $V_X$  adalah submatriks yang terdiri dari tegangan simpul tersebut. Tentu saja setiap unsur dalam  $I_X$  sama dengan nol, karena jika tidak, bus tersebut tidak dapat dihapus. Admitansi sendiri dan bersama, yang membentuk  $K$  adalah yang ditandai hanya dengan bus yang akan tetap ada.  $M$  terdiri dari admitansi sendiri dan bersama yang ditandai hanya dengan bus yang akan dihapus.  $M$  ini adalah sebuah matriks bujursangkar yang ordenya sama seperti banyaknya simpul yang akan dihapus.  $L$  dan transposenya  $L^T$  hanya terdiri dari admitansi-admitansi bersama yang dimiliki oleh bus yang akan tertinggal dan bus yang akan dihapus.

Dengan melakukan perkalian seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (2-29) didapat

$$I_A = KV_A + LV_X \quad (2-30)$$

dan

$$I_X = L^T V_A + M V_X \quad (2-31)$$

Karena semua element  $I_X$  adalah nol, dengan mengurangi  $L^T V_A$  dari kedua sisi persamaan (2-32) dan mengalikan kedua sisi tersebut dengan kebalikan  $M$  (dinyatakan dengan  $M^{-1}$ ) diperoleh

$$M^{-1} L^T V_A = V_X \quad (2-32)$$

Dengan memasukan persamaan (2-32) kedalam persamaan (2-31) didapat

$$I_A = KV_A + LM^{-1} L^T V_A \quad (2-33)$$

yang sebenarnya adalah persamaan bus yang mempunyai matriks admitansi

$$Y_{bus} = K - LM^{-1}L^T \quad (2-34)$$

Matriks admitansi ini memungkinkan untuk membuat rangkaian dimana bus-bus yang tidak dikehendaki dihapuskan.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \overbrace{Y_{11} \cdots Y_{1j} \cdots}^K & \vdots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{k1} \cdots Y_{kj} \cdots & \vdots & Y_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \underbrace{Y_{n1} \quad Y_{nj} \quad \cdots \quad Y_{nn}}_M \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

Menurut persamaan (2-34), perhitungan reduksi matriks (n-1)x(n-1) yang direduksikan adalah

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1j} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \\ Y_{k1} & \cdots & Y_{kj} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{1n} \\ \vdots \\ Y_{kn} \\ \vdots \end{bmatrix} \frac{1}{Y_{nn}} [Y_{n1} \cdots Y_{nk} \cdots] \quad (2-36)$$

$$Y_{kj}(\text{baru}) = Y_{kj}(\text{lama}) - \frac{Y_{kn}Y_{nj}}{Y_{nn}} \quad (2-37)$$

## 2.6 Analisis Aliran Daya

Analisis aliran beban atau aliran daya merupakan solusi untuk sistem tenaga dalam kondisi operasi statis. Analisis aliran daya digunakan untuk menentukan:

- Aliran jaringan
- Profil tegangan bus dan tegangan sistem
- Efek perubahan konfigurasi jaringan dan masuknya jaringan baru pada sistem
- Memperkecil rugi-rugi sistem transmisi
- Operasi ekonomis sistem
- Pengaturan tap transformator untuk operasi ekonomis

Untuk tujuan analisis aliran daya, representasi fasa tunggal dari jaringan tenaga digunakan ketika sistem dalam keadaan seimbang.

Untuk memudahkan analisis aliran daya maka digunakan sistem per unit agar komputasi menjadi lebih mudah dengan menghilangkan satuan dan mengekspresikan kuantitas pada sistem dalam bentuk rasio tanpa dimensi. Hal ini ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$\text{Nilai per unit} = \frac{\text{nilai sebenarnya}}{\text{nilai dasar}} \text{ pu} \quad (2-38)$$

Nilai impedansi dasar dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{kV dasar line-netral})^2}{\text{MVA dasar 1 fasa}} \text{ pu} \quad (2-39)$$

kV dasar line-netral adalah tegangan dasar saluran ke netral dalam kilo Volt sedangkan MVA dasar 1 fasa adalah daya dasar satu fasa dalam mega volt ampere.

Setiap titik/bus pada suatu sistem tenaga listrik terdapat daya aktif  $P$ , daya reaktif  $Q$ , tegangan  $E$ , dan sudut fasa tegangan  $\delta$ . Jadi pada setiap bus terdapat empat besaran yaitu  $P$ ,  $Q$ ,  $E$  dan  $\delta$ . Di dalam studi aliran daya, dua dari keempat besaran itu diketahui, dan dua yang lain perlu dicari. Berdasarkan hal tersebut di atas, bus-bus dibedakan menjadi tiga jenis yaitu bus beban, bus generator, dan *slack bus* (Stevenson, 1994:332).

- Bus beban ( $P$ - $Q$  bus)

Pada bus ini, selisih daya antara daya yang dibangkitkan oleh generator dan daya yang diserap oleh beban diketahui nilainya.

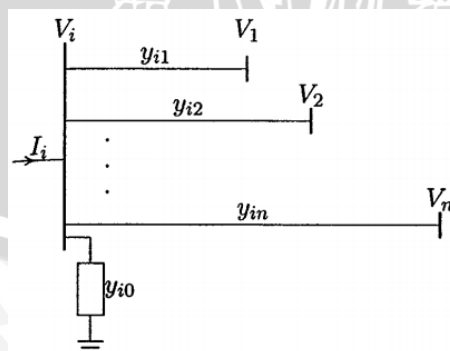
- Bus generator ( $P$ - $V$  bus)

Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan daya aktif  $P$ , sedangkan yang tidak diketahui adalah sudut fasa tegangan dan daya reaktif  $Q$ .

- Bus berayun (*Slack bus*)

Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan sudut fasa, sedangkan yang tidak diketahui adalah daya aktif  $P$  dan daya reaktif  $Q$ . Dalam studi aliran daya hanya terdapat satu bus berayun.

Dalam menganalisa sistem jaringan yang memiliki lebih dari satu sumber listrik ataupun pada sistem jaringan kompleks maka diperlukan suatu metode analisa daya yang sesuai untuk memudahkan perhitungan. Oleh karena itu, untuk mempermudah perhitungan akan digunakan metode Newton-Raphson (Hadi Saadat, 1999:232).



Gambar 2.16 Tipikal Bus dari Sistem Tenaga

Sumber: Saadat (1999:209)

Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Dari Gambar 2.16, arus yang memasuki bus  $i$  dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2-40)$$

Dari Persamaan (2-40) diatas, apabila diubah dalam bentuk polar akan didapatkan Persamaan (2-41):

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2-41)$$

Dengan  $\theta_{ij}$  adalah sudut  $Y_{ij}$ , dan  $\delta_j$  adalah sudut tegangan pada bus j.

Persamaan daya kompleks pada bus-i yaitu:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2-42)$$

Persamaan (2-41) dapat disubstitusikan kedalam persamaan (2-42) sehingga menghasilkan:

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta_i) (\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j) \quad (2-43)$$

Sehingga apabila bagian real dan imajiner pada persamaan diatas dipisahkan, maka didapatkan persamaan berikut:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-44)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-45)$$

Dengan  $I_i$  adalah arus pada bus i,  $V_i$  merupakan tegangan pada bus i,  $V_j$  merupakan tegangan pada bus j,  $Y_{ij}$  adalah element matrik  $Y_{bus}$  antara i dan j,  $P_i$  adalah daya aktif pada bus i,  $Q_i$  adalah daya reaktif pada bus i,  $\theta_{ij}$  adalah sudut polar admitansi  $Y_{ij}$ , dan  $\delta_j$  merupakan sudut tegangan  $V_j$ .

Dari kedua persamaan diatas, yaitu persamaan (2-44) dan (2-45) dikembangkan dengan deret taylor seperti pada persamaan dibawah ini (Hadi Saadat, 1999:233) :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

Pada permasalahan ini, dimisalkan bahwa bus 1 adalah *slack bus*. Matriks Jacobian memberikan perbandingan linier antara perubahan sudut tegangan  $\Delta \delta_i^{(k)}$  dan besar tegangan  $\Delta |V_i^{(k)}|$  dan dengan perubahan pada daya aktif ( $\Delta P_i^{(k)}$ ) dan daya reaktif ( $\Delta Q_i^{(k)}$ ), sehingga



dalam bentuk singkat dapat ditulis seperti pada persamaan dibawah ini (Hadi Saadat, 1999 : 233) :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2-47)$$

Elemen untuk  $J_1$  yaitu:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-48)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-49)$$

Elemen untuk  $J_2$  yaitu:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-50)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-51)$$

Elemen untuk  $J_3$  yaitu:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-52)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-53)$$

Elemen untuk  $J_4$  yaitu:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin(\theta_{ii}) - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-54)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-55)$$

Pada penjelasan diatas diketahui bahwa nilai harga  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan, maka ini disebut dengan sisa daya (*power residuals*) yang diberikan dengan:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2-56)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2-57)$$

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus adalah:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2-58)$$

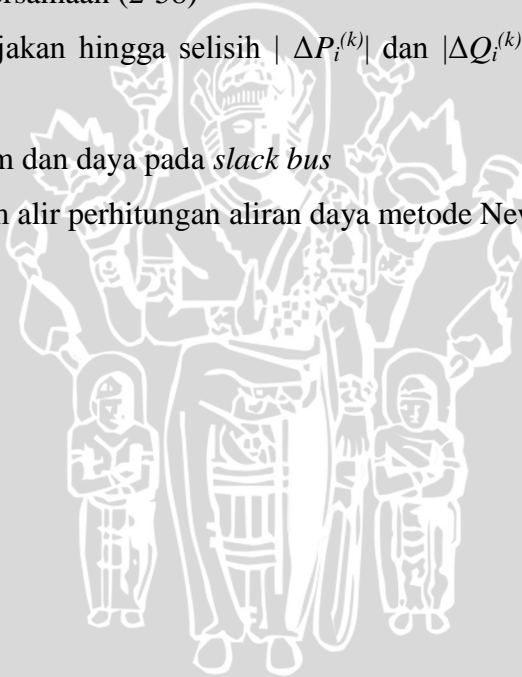
$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2-59)$$

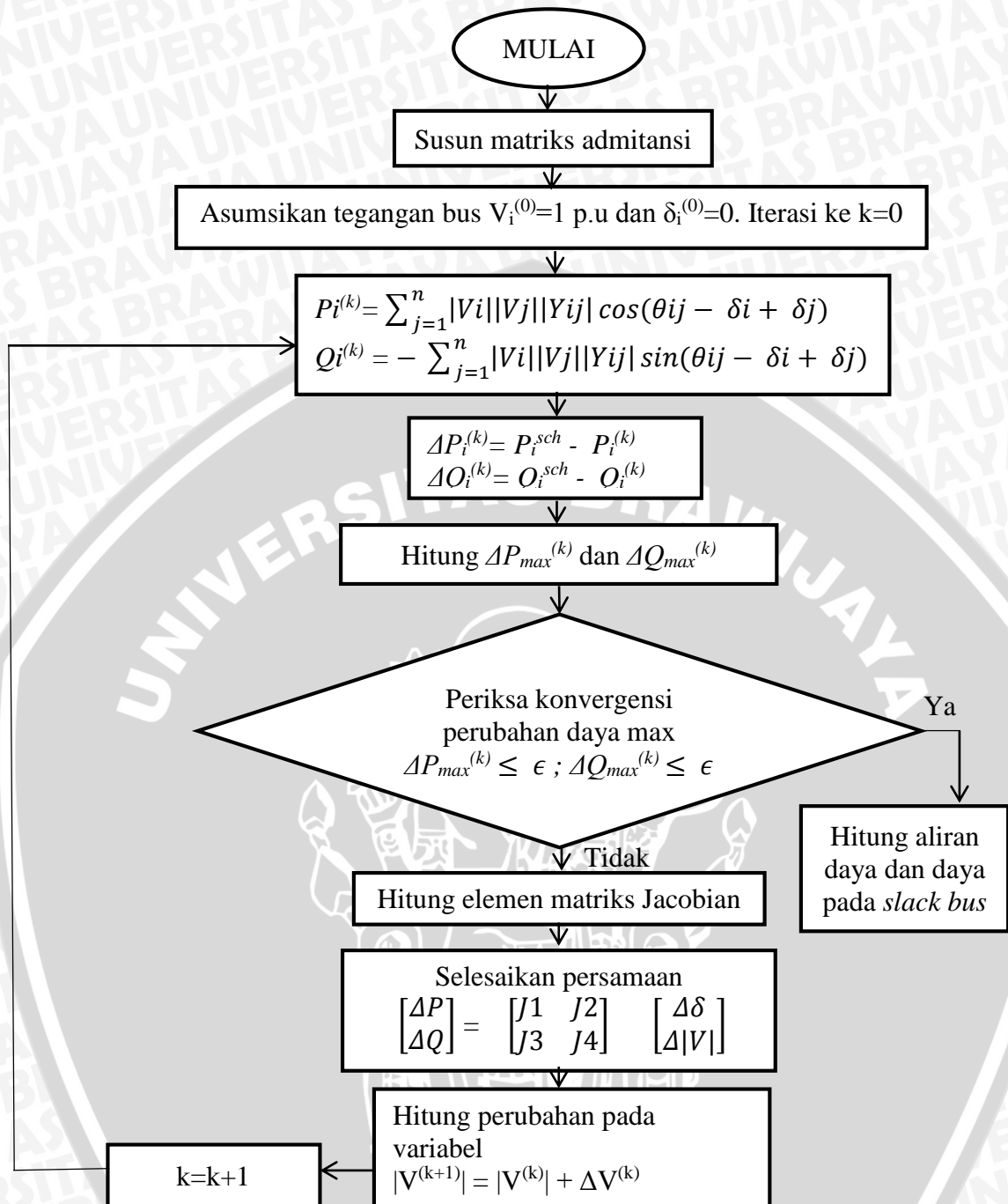
Prosedur penyelesaian masalah dengan menggunakan metode Newton Raphson adalah sebagai berikut (Saadat,1990:235):

1. Pada *load bus* (bus PQ-  $P_i^{sch}$  dan  $Q_i^{sch}$  sudah diketahui), besaran tegangan dan sudut fasa diatur seperti nilai pada *slack bus*, yaitu  $|V_i^{(0)}|=1.0$  dan  $\delta_i^{(0)} = 0^\circ$ .

2. Pada bus PV ( $|V_i|$  dan  $P_i^{sch}$  sudah diketahui), sudut fasa diberi nilai sama dengan sudut pada *slack bus*, yaitu  $\delta_i^{(0)} = 0$ .
3. Untuk *load bus*, nilai  $P_i^{(k)}$  dan  $Q_i^{(k)}$  dihitung dengan persamaan (2-44) dan persamaan (2-45). Nilai  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  dihitung dengan persamaan (2-56) dan persamaan (2-57).
4. Untuk bus PV, nilai  $P_i^{(k)}$  dan  $\Delta P_i^{(k)}$  dihitung dengan persamaan (2-44) dan persamaan (2-56).
5. Elemen matrik Jacobian ( $J_1, J_2, J_3, J_4$ ) dihitung dengan persamaan (2-48) sampai (2-55)
6. Nilai  $\Delta \delta_i^{(k)}$  dan  $\Delta |V_i^{(k)}|$  di hitung dengan persamaan (2-47)
7. Nilai tegangan dan sudut fasa yang baru ( $|V_i^{(k+1)}|$  dan  $\delta_i^{(k+1)}$ ) didapatkan dengan persamaan (2-59) dan persamaan (2-58)
8. Proses akan terus dikerjakan hingga selisih  $|\Delta P_i^{(k)}|$  dan  $|\Delta Q_i^{(k)}|$  kurang dari nilai keakuratan spesifik  $\epsilon$ .
9. Hitung aliran daya sistem dan daya pada *slack bus*

Gambar 2.17 adalah diagram alir perhitungan aliran daya metode Newton Raphson.





Gambar 2.17 Diagram alir Aliran Daya dengan Metode Newton Raphson

Sumber: Murty (2007:114)

### 2.6.1 Metode Analisis Aliran Daya Sistem AC-DC

Untuk melakukan analisis aliran daya pada sistem terintegrasi AC-DC terdapat dua metode, yaitu:

- Metode Kesatuan (*Unified Method*)

Pada metode ini variabel AC dan DC digabungkan. Metode Newton-Raphson digunakan pada metode ini untuk menyelesaikan persamaan. Persamaan Newton-Raphson dituliskan seperti dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta P_t \\ \Delta Q \\ \Delta Q_t \\ R \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \delta_t \\ \Delta V \\ \Delta V_t \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (2-60)$$

Dimana [ J ] adalah matriks Jacobian, yang nilainya dinyatakan dalam persamaan dibawah ini:

$$[J] = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V_t} & \frac{\partial \Delta P}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta P_t}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial V} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial V_t} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V_t} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial V} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial V_t} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial x} \\ \frac{\partial R}{\partial \delta} & \frac{\partial R}{\partial \delta_t} & \frac{\partial R}{\partial V} & \frac{\partial R}{\partial V_t} & \frac{\partial R}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2-61)$$

Variabel R dan x adalah variabel sistem DC. Model DC dapat diringkas sebagai berikut:

$$R(x, V_t) = 0 \quad (2-62)$$

dimana

$$R_1 = V_d - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} akV_t \cos\phi \quad (2-63)$$

$$R_2 = V_d - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} akV_t \cos\phi + R_d I_d \quad (2-64)$$

$$R_3 = f(V_d, I_d) \quad (2-65)$$

$$R_4 = \text{kontrol persamaan}$$

$$R_5 = \text{kontrol persamaan}$$

dan

$$x = [V_d \ I_d \ a \ \alpha \ \phi] \quad (2-66)$$

Variabel x adalah perwakilan 5 variabel milik konverter DC. Penjelasan masing-masing variabel tersebut dinyatakan pada pernyataan di bawah ini:

$V_d$  = Tegangan sistem DC (Volt)

$I_d$  = Arus DC (Ampere)

$a$  = jumlah tap changer

$\alpha$  = Sudut Penyalaan (derajat)

$\Phi$  = sudut antara arus primer fundamental dengan sudut tegangan bus konverter

Untuk mendapatkan nilai variabel sistem yang baru dapat melakukan iterasi k seperti langkah berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\delta_t \\ \Delta V \\ \Delta V_t \\ \Delta x \end{bmatrix}_k = [J]_k^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta P_t \\ \Delta Q \\ \Delta Q_t \\ R \end{bmatrix}_k \quad (2-67)$$

$$\begin{bmatrix} \delta \\ \delta_t \\ V \\ V_t \\ x \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \delta \\ \delta_t \\ V \\ V_t \\ x \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\delta_t \\ \Delta V \\ \Delta V_t \\ \Delta x \end{bmatrix}_k \quad (2-68)$$

b. Metode Sekuensial (*Sequential Method*)

Pada metode ini persamaan AC dan DC diselesaikan secara terpisah. Metode Newton-Raphson digunakan pada metode ini untuk menyelesaikan persamaan. Persamaan Newton-Raphson dituliskan seperti dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta P_t \\ \Delta Q \\ \Delta Q_t \end{bmatrix} = [J_1] \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\delta_t \\ \Delta V \\ \Delta V_t \end{bmatrix} \quad (2-69)$$

Sedangkan persamaan DC nya adalah:

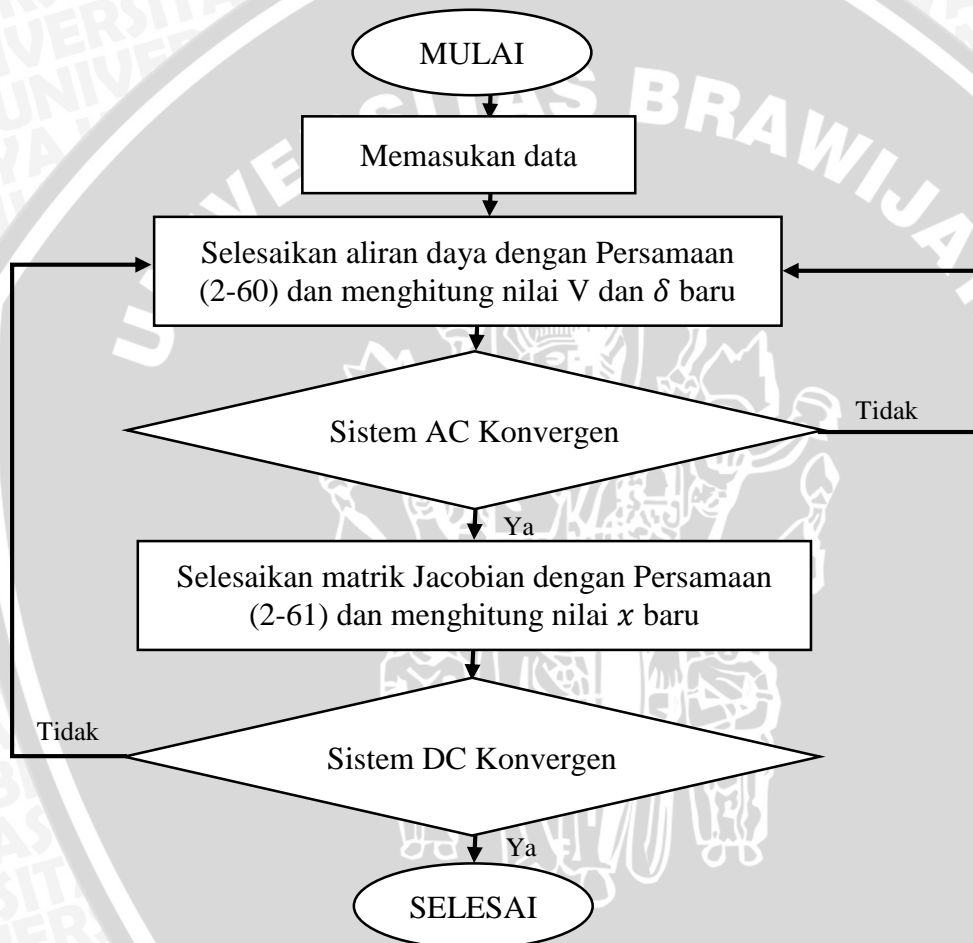
$$[R] = [J_2][\Delta x] \quad (2-70)$$

dimana  $[J_1]$  dan  $[J_2]$  adalah matrik Jacobian, yang nilainya dinyatakan dalam persamaan dibawah ini:

$$[J_1] = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V_t} & \frac{\partial \Delta P}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta P_t}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial V} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial V_t} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V_t} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial V} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial V_t} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2-71)$$

$$[J_2] = - \left[ \frac{\partial R}{\partial x} \right] \quad (2-72)$$

Langkah-langkah penyelesaian dengan metode ini dijelaskan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Diagram alir Aliran Daya Sistem AC-DC Metode Sekuensial

Sumber: Djehaf (2012:10)

## 2.7 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan

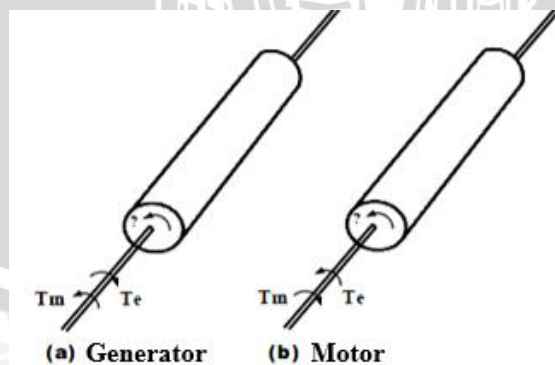
percepatan sudutnya. Dalam sistem unit-unit MKS dan untuk generator serempak, persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk :

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2-73)$$

Variabel di atas dijelaskan sebagai berikut :

- $J$  = Momen kelembaman total dari massa rotor ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )
- $\theta_m$  = Perubahan sudut dari rotor terhadap sumbu diam (radian mekanis)
- $t$  = Waktu (detik)
- $T_a$  = Momen putar percepatan bersih (Nm)
- $T_m$  = Momen putar mekanis (Nm)
- $T_e$  = Momen putar listrik atau elektromagnetis bersih (Nm)

Momen putar mekanis  $T_m$  dan momen putar listrik  $T_e$  dianggap positif untuk generator serempak. Ini berarti bahwa  $T_m$  adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah putaran  $\theta_m$  yang positif seperti ditunjukkan Gambar 2.19. a. Untuk generator yang bekerja dalam keadaan tetap,  $T_m$  dan  $T_e$  adalah sama sedangkan momen putar  $T_a$  sama dengan nol. Dalam keadaan ini tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan serempak. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan penggerak mula dikatakan dalam keadaan serempak dengan mesin lainnya yang bekerja pada kecepatan serempak dalam sistem daya tersebut. Penggerak mulanya mungkin berupa suatu turbin air atau turbin uap dan untuk masing-masing turbin sudah ada model dengan bermacam-macam tingkat kesulitan untuk melukiskan pengaruh pada  $T_m$ .



Gambar 2.19 Representasi arah perputaran momen putar mekanis dan listrik

Sumber: Stevenson (1996:352).

$T$  dianggap konstan pada setiap keadaan kerja yang diberikan. Anggapan ini cukup baik untuk beberapa generator meskipun masukan dari penggerak mulanya diatur oleh regulator (governor). Regulator tidak bekerja sebelum dirasakan perubahan pada kecepatan.

Momen putar elektris  $T_e$  bersesuaian dengan daya bersih celah udara mesin. Dengan demikian adalah daya keluaran total dari generator ditambah dengan rugi-rugi  $|I^2| R$  dalam gulungan jangkar. Dalam motor serempak arah aliran daya berlawanan dengan generator. Oleh karena itu untuk motor,  $T_e$  dan  $T_m$  pada persamaan (2-73) akan terbalik tandanya seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.19. Di sini  $T_e$  adalah daya celah udara yang diberikan oleh sistem tenaga listrik untuk menggerakkan rotor, sedangkan  $T_m$  merupakan momen putar tandingan (*counter torque*) beban dan rugi putaran yang cenderung untuk memperlambat rotor. Karena  $\theta_m$  diukur terhadap sumbu pedoman yang diam pada stator, maka  $\theta_m$  adalah ukuran absolut sudut rotor. Maka  $\theta_m$  akan terus bertambah dengan waktu bahkan pada kecepatan serempak yang konstan. Cara yang lebih mudah untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu pedoman, yaitu dengan memperhatikan kecepatan rotor relatif terhadap kecepatan serempak.

Dengan demikian :

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2-74)$$

Dimana :

$\omega_{sm}$  = Kecepatan serempak mesin dalam radius mekanis per detik

$\delta_m$  = Pergeseran sudut rotor dalam radius mekanis dari sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan serempak dalam radian mekanis

Dengan menurunkan persamaan (2-74) terhadap waktu diperoleh

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2-75)$$

Dan penurunan kedua menghasilkan :

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2-76)$$

Dimana :

$\frac{d\theta_m}{dt}$  = Kecepatan sudut rotor dalam radian mekanis per detik

$\frac{d\delta_m}{dt}$  = Penyimpangan kecepatan rotor dari keadaan rotor keadaan serempak dan unit ukurannya adalah radian mekanis per detik.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-76) kedalam persamaan (2-73) diperoleh :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \text{ Nm} \quad (2-77)$$

Daya adalah perkalian antara momen putar dengan kecepatan sudut, maka :

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (2-78)$$



Dengan mensubstitusikan persamaan (2-78) kedalam persamaan (2-77) diperoleh :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{Nm} \quad (2-79)$$

Di mana

$P_m$  = Masukan daya poros ke mesin dikurangi dengan rugi-rugi perputaran dalam Watt.

$P_e$  = Daya listrik pada celah udaranya dalam Watt.

$P_a$  = Daya percepatan yang memperjelas ketidakseimbangan antara kedua daya dalam Watt.

$J\omega_m$  = Momentum sudut (*angular momentum*) rotor pada kecepatan serempak.

Biasanya rugi-rugi perputaran dan rugi-rugi  $|I^2| R$  jangkar dapat diabaikan sehingga  $P_m$  dapat dianggap sebagai daya yang dicatu oleh penggerak mula, dan  $P_e$  sebagai keseluruhan daya listrik.

Koefisien  $J\omega_m$  adalah momentum sudut rotor (*angular momentum*) pada kecepatan serempak  $\omega_{sm}$ . Momen ini dapat dinyatakan dengan  $M$  dan disebut konstanta kelembaman (inertia constant) dari mesin tersebut. Jelas bahwa unit-unit yang menyatakan  $M$  harus sesuai dengan unit untuk  $J$  dan  $\omega_m$ . Dengan meneliti unit pada masing-masing suku persamaan (2-79) diperoleh  $M$  dinyatakan dalam joule-detik per-radian dan dapat dituliskan dengan :

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{W} \quad (2-80)$$

Meskipun menggunakan  $M$  dalam persamaan ini, koefisien tersebut bukanlah suatu konstanta dalam arti yang sebenarnya karena  $\omega_m$  tidak sama dengan kecepatan serempak pada semua keadaan kerja. Tetapi dalam praktiknya,  $\omega_m$  tidak berbeda dari kecepatan serempak bila mesin stabil. Karena daya lebih memudahkan dihitung dari momen putar, maka persamaan (2-79) lebih banyak dipilih. Untuk keperluan studi kestabilan, dibutuhkan data mesin, konstanta yang berhubungan dengan kelembaman, yaitu konstanta  $H$  yang didefinisikan sebagai :

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam Mega Joule pada kecepatan serempak}}{\text{Rating dalam MVA}} \quad (2-81)$$

Dan  $H$  sebagai :

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2}M\omega_{sm}^2}{S_{mach}} \quad (\text{MJ/MVA}) \quad (2-82)$$

di mana

$H$  = Konstanta yang berhubungan dengan kelembaman.

$S_{mach}$  = Batas kemampuan kerja (*rating*) tiga fasa dalam MVA.

Untuk menyelesaikan  $M$  pada persamaan (2-80), dari persamaan (2-82) diperoleh:

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \text{ (MJ/radian mekanis)} \quad (2-83)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-83) ke dalam persamaan (2-80) diperoleh :

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (2-84)$$

Dengan  $\delta_m$  pada pembilang persamaan (2-84) dinyatakan dalam radian mekanis sedangkan  $\omega_{sm}$  pada penyebut dinyatakan dalam radian mekanis per detik. Oleh karena itu dapat ditulis :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2-85)$$

Di mana :

$\omega_s$  = Kecepatan serempak dalam satuan listrik untuk suatu sistem dengan frekuensi sebesar  $H_z$

Besaran  $\delta$  maupun  $\omega_s$  mempunyai satuan konsisten dalam derajat mekanis, derajat listrik, atau radian.  $H$  dan  $t$  mempunyai satuan konsisten karena megajoule per megavoltampere adalah dalam satuan detik.  $P_a$ ,  $P_m$ , dan  $P_e$  harus dalam satuan dengan dasar yang sama seperti  $H$ . Bila subskrip  $M$  dihubungkan pada  $\omega$ ,  $\omega_s$ , dan  $\delta$ , itu berarti bahwa yang digunakan adalah satuan mekanis. Jika tidak demikian, maka yang dimaksud adalah daya listrik. Persamaannya menjadi :

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ per unit} \quad (2-86)$$

Bila  $\delta$  dinyatakan dalam radian listrik sedangkan :

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ per unit} \quad (2-87)$$

Persamaan ayunan mesin merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) putar mesin serempak. Dalam studi kestabilan, persamaan tersebut adalah persamaan differensial orde kedua yang dapat dituliskan sebagai dua buah persamaan differensial orde pertama di mana  $\omega$ ,  $\omega_s$ :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \text{ per unit} \quad (2-88)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2-89)$$

Dan satuan dari  $\delta$  adalah radian listrik dan derajat listrik. Berbagai bentuk ekuivalen dari persamaan akan digunakan untuk menentukan sebuah mesin dalam sistem daya. Bila persamaan tersebut diselesaikan maka diperoleh persamaan untuk  $\delta$  sebagai fungsi waktu.

Grafik penyelesaian ini disebut kurva ayunan (*swing curve*) mesin, dengan meneliti kurva ayunan semua mesin dalam sistem, maka akan terlihat bahwa mesin akan serempak meskipun terjadi gangguan.

## 2.8 Kestabilan Mesin Majemuk

Metode Kriteria sama luas tidak dapat langsung digunakan dalam sistem-sistem yang memiliki 3 buah mesin atau lebih banyak. Meskipun gejala fisik yang terlihat dalam 2 mesin persis dengan kasus mesin majemuk, tetapi perhitungan angka penambahan jumlah mesin cukup sulit, dan harus dihitung dalam studi kestabilan peralihan. Bila sistem mesin majemuk bekerja dalam keadaan peralihan, maka osilasi antar mesin terjadi di antara mesin tersebut melalui perantara sistem transmisi yang menghubungkannya. Bila setiap mesin dapat dianggap berdiri sendiri sebagai sumber osilasi tunggal, mesin tersebut akan mengirimkan osilasi elektromekanis yang ditentukan oleh kelambanan dan daya sinkronisasinya ke dalam sistem yang saling berhubungan tersebut. Frekuensi khas semacam ini besarnya berkisar antara 1 sampai 2 Hz, dan frekuensi ini ditumpangkan di atas frekuensi nominal dari sistem. Bila banyak rotor mesin secara serentak mengalami osilasi peralihan, lengkung ayunan akan memperlihatkan adanya banyak osilasi tersebut.

Untuk mengurangi kerumitan pembuatan model sistem, biasanya dalam studi kestabilan peralihan mesin majemuk dibuat pengandaian sebagai berikut:

- Masukan daya mekanis ke masing-masing mesin adalah tetap konstan selama keseluruhan periode perhitungan lengkung ayunan.
- Daya redaman dapat diabaikan.
- Setiap mesin boleh diwakili oleh suatu reaktansi peralihan yang konstan yang terhubung seri dengan suatu tegangan-dalam peralihan yang konstan pula.
- Sudut rotor mekanis dari setiap mesin adalah bersamaan dengan  $\delta$ , yaitu sudut fasa listrik dari tegangan dalam peralihan.
- Semua beban boleh dianggap sebagai impedansi shunt ke tanah dengan nilai yang ditentukan oleh keadaan yang berlangsung tepat sebelum keadaan peralihan.

Dalam studi kestabilan, keadaan sistem sebelum gangguan dan konfigurasi jaringannya selama dan setelah terjadinya gangguan harus diketahui. Oleh karena itu, diperlukan 2 langkah pendahuluan, yaitu:

- Kondisi pragangguan kondisi mantap (*steady state*) untuk sistem itu harus dihitung dengan menggunakan analisis aliran daya.

- Representasi saluran pragangguan, saat terjadi gangguan, dan setelah terjadi gangguan perlu ditentukan

Hasil dari kedua langkah pendahuluan ini didapatkan nilai untuk daya aktif dan reaktif, tegangan pada masing-masing terminal generator dan rel beban dengan semua sudutnya. Tegangan dalam peralihan generator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$E' = V_t^* + (X_d' \times I) \quad (2-90)$$

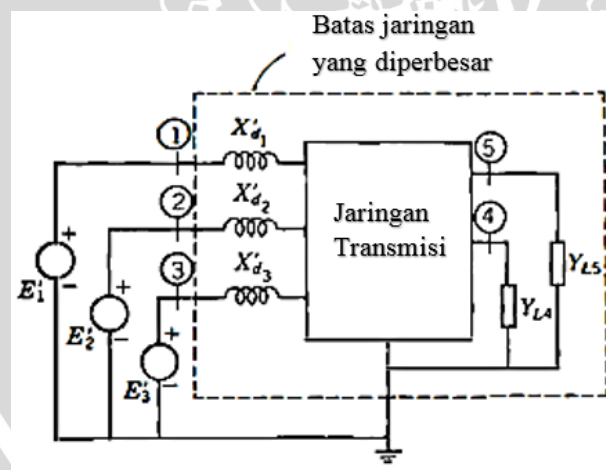
Dimana  $V_t$  adalah tegangan terminal pada bus yang berkesuaian dan  $I$  adalah arus keluaran dari bus yang berkesuaian tersebut.

$$I = \frac{(P-jQ)}{V_t^*} \quad (2-91)$$

Masing-masing beban diubah menjadi admitansi konstan ke tanah pada relnya dengan menggunakan persamaan

$$Y_L = \frac{(P_L - jQ_L)}{|V_L|^2} \quad (2-92)$$

Dimana  $(P_L - jQ_L)$  adalah bebannya dan  $|V_L|$  adalah besarnya tegangan bus yang berkesuaian. Matriks admitansi bus ( $Y_{bus}$ ) digunakan untuk menghitung aliran beban sebelum gangguan, yang meliputi juga reaktansi peralihan generator, dan admitansi beban shunt. Gambar 2.20 menerangkan batas jaringan yang diperbesar dari suatu sistem daya



Gambar 2.20 Jaringan yang diperbesar dari suatu sistem daya

Sumber : Stevenson (1994:376).

Arus yang mengalir ke sistem hanya berasal dari bus internal generator. Langkah pendahuluan yang kedua menentukan matriks admitansi bus yang dibuat berkesuaian dengan keadaan yang mengalami gangguan dan keadaan setelah terjadinya gangguan. Bus yang tidak terdapat generator atau beban (yang berperan sebagai penghubung) dapat dihilangkan (direduksi) untuk mengurangi dimensi matriks sesuai dengan banyaknya

generator. Selama dan setelah terjadi gangguan, aliran daya yang mengalir dari generator menuju sistem dihitung dengan persamaan sudut daya.

## 2.9 Persamaan Sudut Daya

Untuk memudahkan dalam menganalisa stabilitas peralihan, diperlukan beberapa asumsi yang dapat memudahkan analisa stabilitas peralihan tersebut, yaitu :

- Daya mekanik  $P_m$  dari penggerak utama dianggap tetap. Hal ini dapat dilakukan dengan pengendalian dari *governor* dan *prime mover*-nya.
- Daya elektronik  $P_e$  dapat berubah sesuai dengan kecepatan rotor akibat dipercepat, diperlambat atau pada kecepatan sinkron.
- Pada kondisi daya mekanis  $P_m$  dan daya listrik  $P_e$  sama besar, maka mesin berada dalam kecepatan sinkron.
- Perubahan daya listrik  $P_e$  ditentukan oleh konfigurasi jaringan transmisi dan distribusi serta beban dari sistem yang dipasang oleh generator tersebut.

Parameter yang sangat penting dalam menganalisa dan menyelesaikan soal dari stabilitas peralihan ini adalah besaran sudut daya. Karena dengan mengetahui apa yang terjadi pada sudut daya maka keadaan dari stabilitas peralihan system juga dapat diketahui. Dalam analisa dari stabilitas peralihan, sudut daya didefinisikan sebagai besarnya perbedaan sudut fasor antara tegangan pada bus pembangkit dengan tegangan di bus penerima. Suatu sistem yang mengalami gangguan akan membuat sudut daya berubah. Pada saat terjadi gangguan, sudut daya akan membesar dan terus membesar dan akan mengecil jika gangguan sudah dapat distabilkan. Pada jenis stabilitas peralihan yang stabil, bila gangguan sudah selesai atau berakhir maka sudut daya akan kembali pada saat belum terjadi gangguan setelah melalui satu atau beberapa kali ayunan disekitar sudut serempaknya. Untuk dapat menyelesaikan permasalahan perhitungan maka dapat dianalogikan dengan suatu sistem yang terdiri dari pembangkit, jaringan transmisi dan sisi penerima, yang dapat disederhanakan menjadi jaringan 4 kutub seperti pada Gambar 2.21:



Gambar 2.21 Sistem yang dipresentasikan dengan rangkaian 4 kutub

Sumber : B.M. Weedy, B.J. Cory (2001:75)

Pada sistem diatas yang diketahui adalah :

$E1'$  : tegangan peralihan internal dari pembangkit pada bus 1

$E2'$  : tegangan penerima pada infinite bus

Admittansi pada bus dengan jumlah node 2 bila dinyatakan dalam matrix adalah sebagai berikut :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

Jika diketahui :

$$P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{n=1}^N (Y_{kn} \cdot V_n) \quad \text{VA} \quad (2-93)$$

Dengan  $k = 1$  dan  $n = 2$  serta  $E_2' = V$ , maka:

$$P_1 - jQ_1 = E_1' \cdot (Y_{11} \cdot E_1')^* + E_1' \cdot (Y_{12} \cdot E_2')^* \quad \text{VA} \quad (2-94)$$

Dimana :

$$E_1' = | E_1 | \angle \delta_1 \quad \text{Volt}$$

$$E_2' = | E_2 | \angle \delta_2 \quad \text{Volt}$$

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad \Omega^{-1}$$

$$Y_{12} = | Y_{12} | \angle \theta_{12} \quad \Omega^{-1}$$

$$\begin{aligned} E_1' \cdot (Y_{11} \cdot E_1')^* &= | E_1 | \angle \delta_1 \cdot Y_{11}^* \cdot | E_1 | \angle -\delta_1 \\ &= | E_1 | (\cos \delta_1 + j \sin \delta_1) \cdot Y_{11}^* | E_1 | (\cos \delta_1 - j \sin \delta_1) \\ &= Y_{11}^* | E_1 |^2 (\cos^2 \delta_1 + j \sin \delta_1 \cos \delta_1 - j \sin \delta_1 \cos \delta_1 + \sin^2 \delta_1) \\ &= Y_{11}^* | E_1 |^2 (\cos^2 \delta_1 + \sin^2 \delta_1) \\ &= Y_{11}^* | E_1 |^2 \quad \text{VA} \end{aligned} \quad (2-95)$$

Dengan menggunakan cara yang sama seperti sebelumnya diperoleh :

$$\begin{aligned} E_1' \cdot (Y_{12} \cdot E_2')^* &= | E_1 | \angle \delta_1 \cdot Y_{12}^* \cdot | E_2 | \angle -\delta_2 \\ &= Y_{12}^* \cdot | E_1 | \cdot | E_2 | \angle (\delta_1 - \delta_2) \quad \text{VA} \end{aligned} \quad (2-96)$$

Substitusi persamaan (2-95) dan (2-96) ke dalam persamaan (2-94) sehingga didapatkan persamaan :

$$\begin{aligned} P_1 + jQ_1 &= Y_{11}^* | E_1 |^2 + Y_{12}^* \cdot | E_1 | \cdot | E_2 | \angle (\delta_1 - \delta_2) \\ &= G_{11} \cdot | E_1 |^2 - jB_{11} \cdot | E_1 |^2 + | Y_{12} | \angle -\theta_{12} \cdot | E_1 | \cdot | E_2 | \angle (\delta_1 - \delta_2) \\ &= G_{11} \cdot | E_1 |^2 - jB_{11} \cdot | E_1 |^2 + | Y_{12} | \cdot | E_1 | \cdot | E_2 | \angle (\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) \text{VA} \end{aligned}$$

Sehingga:

$$P_1 = G_{11} \cdot | E_1 |^2 + | Y_{12} | \cdot | E_1 | \cdot | E_2 | \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) \quad \text{W}$$

$$jQ_1 = -jB_{11} \cdot | E_1 |^2 + j | Y_{12} | \cdot | E_1 | \cdot | E_2 | \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) \quad \text{VAR}$$

Dimisalkan :

$$\delta = \delta_1 - \delta_2$$

$$\varphi = \theta_{12} - \pi/2$$

Diperoleh  $P_1$  dan  $Q_1$  menjadi :

$$P_1 = G_{11} \cdot |E_1|^2 + |Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \sin(\delta - \varphi) \quad W \quad (2-97)$$

$$Q_1 = -B_{11} \cdot |E_1|^2 - |Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \cos(\delta - \varphi) \quad VAR \quad (2-98)$$

Apabila resistansinya nol, maka  $G_{11} = 0$ . Persamaan (2-97) akan menjadi:

$$P_1 = |Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \sin(\delta - \varphi) \quad W$$

Dimana diketahui  $P_1 = P_e$ ,  $P_{max} = |Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2|$ , dan  $Y_{12}$  diubah menjadi impedansi  $X_{12}$ , maka didapat :

$$P_1 = \frac{|E_1| \cdot |E_2| \cdot \sin(\delta - \varphi)}{|X_{12}|} \quad W \quad (2-99)$$

$$P_e = P_{max} \cdot \sin(\delta - \varphi) \quad W \quad (2-100)$$

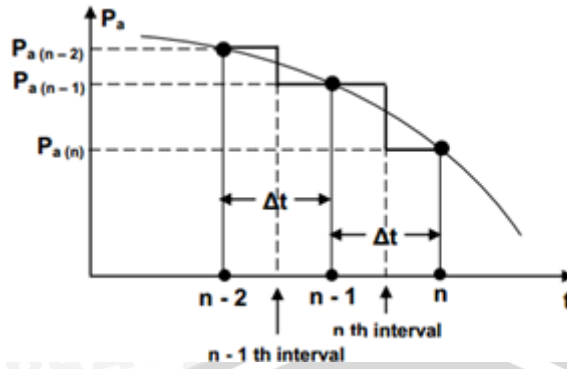
Persamaan (2-97) dan (2-98) diatas adalah persamaan sudut daya yang memperlihatkan daya listrik  $P_e$  dari sistem sebagai fungsi dari sudut daya  $\delta$ .

## 2.10 Metode Step By Step

Untuk sistem-sistem yang besar, program komputer dapat menggambarkan  $\delta$  versus  $t$  untuk semua mesin yang ada. Grafik  $\delta$  versus  $t$  dibuat untuk memperoleh lengkung ayunan mesin tersebut. Sudut  $\delta$  dihitung sebagai fungsi waktu untuk periode yang cukup lama agar dapat melihat peningkatan  $\delta$  tanpa batas atau akan mencapai nilai maksimum dan kemudian mulai mengecil. Ketika  $\delta$  mengalami peningkatan tanpa batas waktu, maka sistem menjadi tidak stabil setelah terjadi gangguan. Sedangkan jika  $\delta$  mencapai nilai maksimum dan kemudian mulai mengecil, hal ini menandakan bahwa sistem dapat kembali stabil setelah terjadi gangguan.

Perhitungan yang presisi harus dibuat dengan posisi gangguan yang akan memperkecil daya yang disalurkan mesin, juga jenis gangguan terberat, sehingga dapat melihat proteksi gangguan pada resiko terburuknya. Ada beberapa metode berbeda untuk menghitung persamaan diferensial orde 2 pada metode step by step ini. Perhitungan terperinci dipraktikkan pada program komputer. Perhitungan yang lebih sederhana dapat dipraktikkan dengan perhitungan dengan tangan. Dalam metode perhitungan dengan tangan, perubahan posisi sudut rotor selama interval waktu yang pendek dihitung dengan asumsi sebagai berikut:

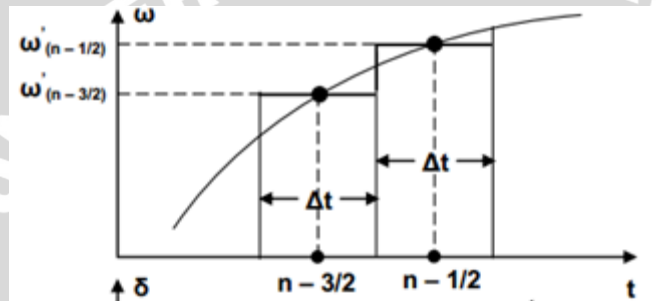
1. Daya percepatan  $P_a$  yang dihitung pada permulaan interval bernilai konstan mulai dari pertengahan interval sebelumnya sampai pertengahan interval tersebut, seperti terlihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Representasi  $P_a$  dengan menggunakan metode step by step

Sumber : Stevenson (1994:382)

- Kecepatan sudut bernilai konstan untuk keseluruhan interval, dan nilainya sama dengan yang dihitung pada tengah-tengah interval tersebut, seperti terlihat pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Representasi  $\omega'$  dengan menggunakan metode step by step

Sumber : Stevenson (1994:382)

Pengandaian ini tidak satupun benar sepenuhnya, karena berubah terus menerus, sedangkan  $P_a$  dan  $\omega'$  adalah fungsi. Semakin kecil interval waktu yang ditinjau, lengkung ayunan yang dihitung akan mendekati lengkung yang sebenarnya. Asumsi di atas dibuat untuk menentukan nilai  $P_a$  dan  $\frac{d\delta}{dt}$  dalam interval waktu tertentu.  $P_a$  dihitung pada awal interval  $n-2$ ,  $n-1$ , dan  $n$ . Lengkung  $P_a$  berbentuk tangga akibat pengandaian bahwa  $P_a$  bernilai konstan di antara titik tengah interval. Demikian pula  $\omega'$ , kecepatan sudut yang berlebihan melebihi kecepatan sudut sinkron ditampilkan sebagai lengkung berbentuk tangga, yang memiliki konstan sepanjang interval, senilai dengan nilai titik tengahnya. Antara koordinat  $n - \frac{3}{2}$  dan  $n - \frac{1}{2}$ , terjadi perubahan pada kecepatan sudut  $\omega'$  disebabkan oleh daya percepatan yang konstan. Perubahan kecepatan ini adalah hasil kali dari percepatan dan interval waktu, karena:

$$\omega' = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_a}{M} \tag{2-101}$$

Perubahan kecepatan sudut  $\omega'$  dinyatakan dalam:



$$\omega' \left( n - \frac{1}{2} \right) - \omega' \left( n - \frac{3}{2} \right) = \frac{d^2\delta}{dt^2} \Delta t \quad (2-102)$$

$$\omega' \left( n - \frac{1}{2} \right) - \omega' \left( n - \frac{3}{2} \right) = \frac{P_{a(n-1)}}{M} \Delta t$$

$$\omega' \left( n - \frac{1}{2} \right) - \omega' \left( n - \frac{3}{2} \right) = \frac{180 f}{H} P_{a(n-1)} \Delta t \quad (2-103)$$

perubahan  $\delta$  pada interval waktu tertentu sama dengan kecepatan sudut yang konstan  $\omega'$  dalam durasi waktu  $x$

$$\Delta\delta_{(n-1)} = \omega' \left( n - \frac{3}{2} \right) \Delta t \quad (2-104)$$

$$\Delta\delta_{(n)} = \omega' \left( n - \frac{1}{2} \right) \Delta t \quad (2-105)$$

$$\left[ \omega' \left( n - \frac{1}{2} \right) - \omega' \left( n - \frac{3}{2} \right) \right] \Delta t = \Delta\delta_{(n)} - \Delta\delta_{(n-1)} \quad (2-106)$$

Substitusi persamaan (2-104) dan persamaan (2-105) kedalam persamaan (2-103), didapatkan persamaan berikut:

$$\Delta\delta_{(n)} - \Delta\delta_{(n-1)} = \frac{180 f}{H} P_{a(n-1)} (\Delta t)^2 \quad (2-107)$$

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + k P_{a(n-1)} \quad (2-108)$$

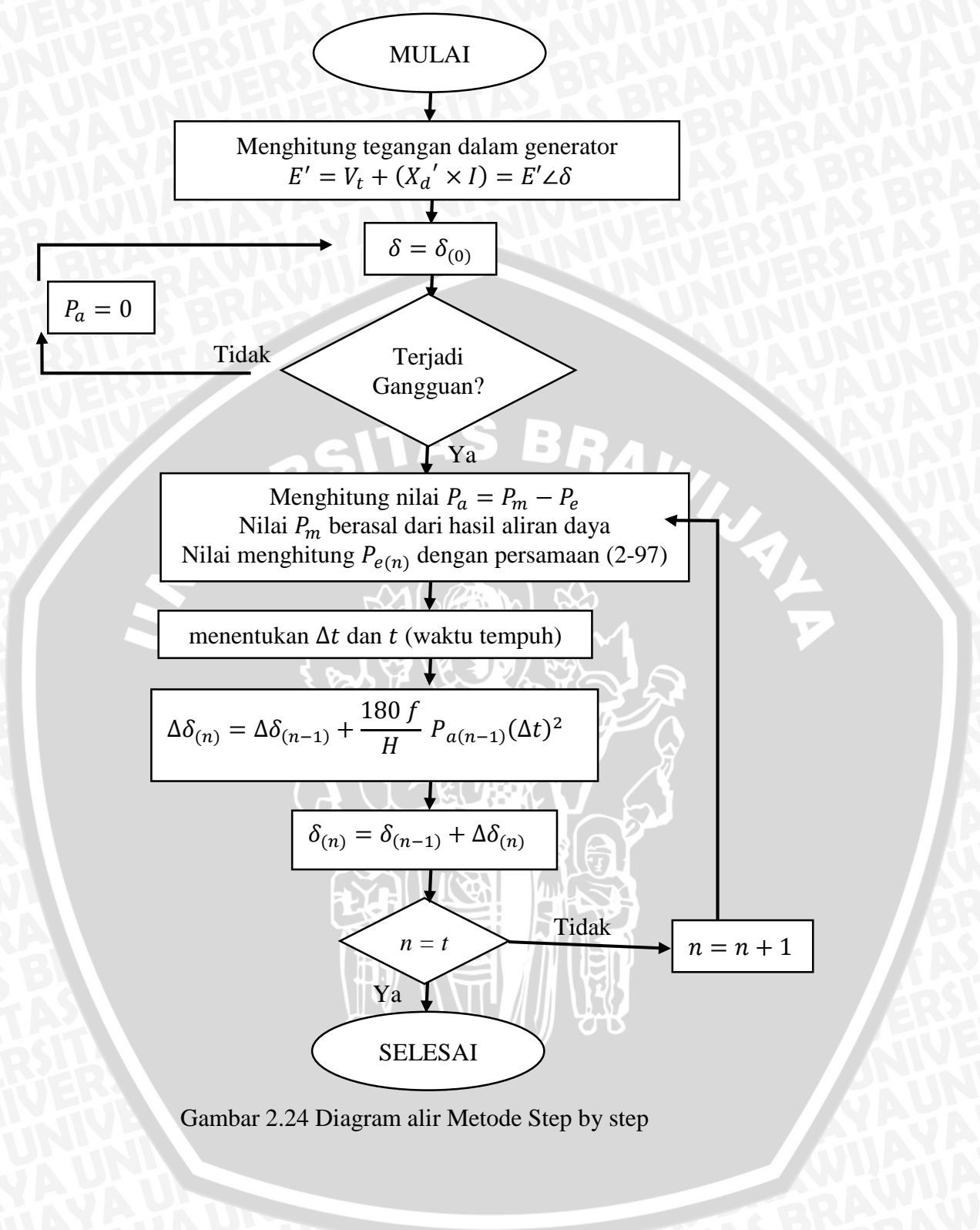
dimana

$$k = \frac{180 f}{H} (\Delta t)^2 \quad (2-109)$$

Sudut torsi  $\delta$  ketika akhir interval  $n$  dapat dihitung :

$$\delta_{(n)} = \delta_{(n-1)} + \Delta\delta_{(n)} \quad (2-110)$$

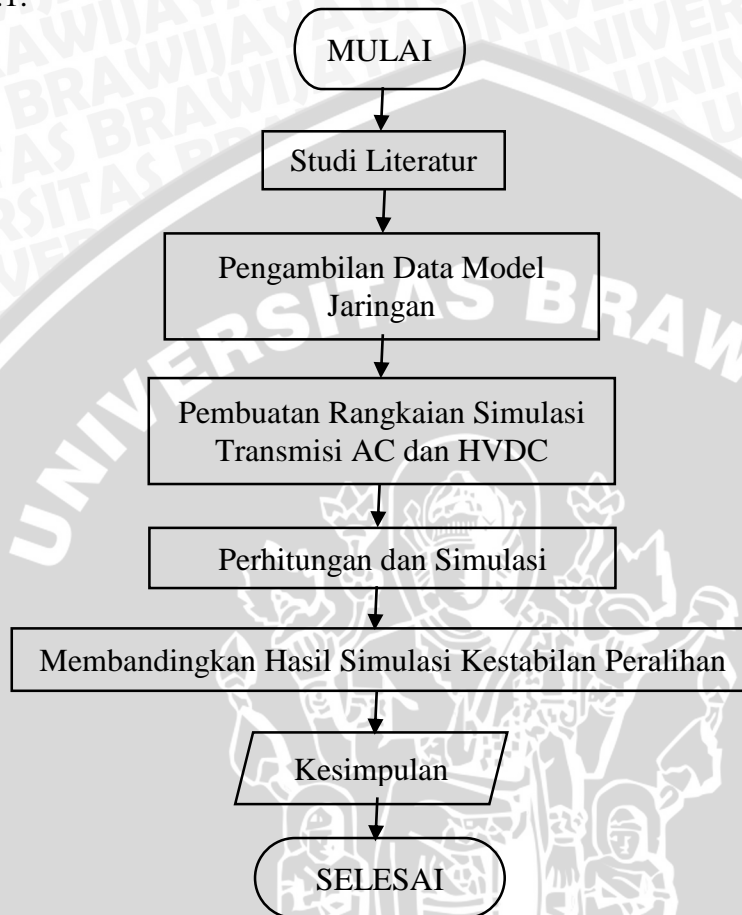
Persamaan (2-108) sangat penting untuk menyelesaikan persamaan ayunan metode step by step dengan seluruh pengandaian yang diperlukan, karena persamaan ini menunjukkan bagaimana menghitung perubahan  $\delta$  dalam suatu interval, jika perubahan interval terdahulu dan daya percepatan pada interval yang sedang ditinjau diketahui. Perubahan sudut momen-putar (*torque angle*) selama interval tertentu sama dengan perubahan sudut momen-putar selama interval terdahulu ditambah dengan daya percepatan pada awal interval dikali dengan  $k$ . Penyelesaian ini berlangsung melalui interval yang cukup banyaknya untuk memperoleh beberapa titik guna membuat grafik lengkung ayunan. Ketelitian yang lebih besar didapatkan bila interval tersebut singkat waktunya. Interval sebesar 0.05 detik biasanya sudah memberikan hasil yang memuaskan. Terjadinya gangguan menyebabkan ketidaksinambungan pada daya percepatan  $P_a$ , yaitu sama dengan nol sebelum gangguan dan menjadi nilai tertentu segera setelah terjadi gangguan. Untuk lebih jelasnya, pada Gambar 2.24 adalah langkah-langkah penyelesaian metode Step by step.



Gambar 2.24 Diagram alir Metode Step by step

## BAB III METODE PENELITIAN

Metodologi yang digunakan untuk pembahasan dalam skripsi ini yaitu seperti terlihat pada Gambar 3.1:



Gambar 3.1 Diagram alir langkah-langkah penelitian

### 3.1 Studi Literatur

Dalam penelitian ini, diperlukan dasar teori yang mendukung, pengetahuan ilmiah serta referensi sebagai dasar argumentasi. Referensi ini bersumber dari buku, jurnal, maupun web browser. Referensi yang ditulis memiliki keterkaitan dengan masalah yang akan dibahas. Untuk lebih jelasnya, pada bab ini berisi teori tentang saluran transmisi, transmisi HVDC, gangguan pada saluran transmisi, kestabilan peralihan pada sistem tenaga listrik, serta penggunaan perangkat lunak untuk menyelesaikan analisis kestabilan peralihan.

### 3.2 Pengambilan Data Model Jaringan

Dalam melakukan analisis, dibutuhkan data model jaringan sistem tenaga listrik yang ingin di analisis. Data-data yang dibutuhkan adalah data bus yang meliputi, data pembangkitan, beban serta saluran antar bus pada sistem transmisi. Simulasi HVDC akan diterapkan pada sistem standart IEEE 30 bus dan sistem transmisi Jawa Bali 500 kV.

### 3.3 Pembuatan Rangkaian Simulasi Transmisi AC dan HVDC

Pembuatan rangkaian simulasi Transmisi AC dan HVDC menggunakan perangkat lunak PSSE. Untuk Sistem Transmisi HVDC, jenis saluran yang digunakan adalah Monopolar HVDC dan Bipolar HVDC. Kedua jenis HVDC ini akan dibandingkan dengan saluran transmisi AC, untuk menguji saluran jenis mana yang lebih tahan terhadap gangguan.

### 3.4 Perhitungan dan Simulasi

#### 3.4.1 Perhitungan

Data-data yang telah diambil, diolah melalui perhitungan sehingga diperoleh data kestabilan peralihan sistem standart IEEE 30 bus dan sistem transmisi Jawa Bali 500 kV. Proses perhitungan dilakukan sesuai urutan dibawah ini :

- 1 Menentukan jumlah bus yang akan digunakan
- 2 Menetapkan bus pembangkit 1 sebagai *slack* bus, bus pembangkit lainnya sebagai bus PV, sedangkan bus beban merupakan bus yang tidak difungsikan sebagai bus PV maupun *slack* bus.
- 3 Menetapkan daya dan tegangan dasar sebagai dasar perhitungan per unit. Untuk sistem standart IEEE 30 bus memiliki daya dasar 100 MVA dan tegangan dasar 132 kV. Sedangkan untuk sistem transmisi Jawa Bali 500 kV memiliki daya dasar 1000 MVA dan tegangan dasar 500 kV.
- 4 Menghitung nilai impedansi dasar ( $Z_{base}$ ) serta mengubah impedansi sistem menjadi satuan per unit.  $Z_{base}$  di hitung dengan persamaan:

$$Z_{base}(\Omega) = \frac{V_{base}(kV)}{I_{base}(kA)}$$

Dengan  $I_{base}$ :

$$I_{base}(kA) = \frac{S_{base}(MVA)}{\sqrt{3} \cdot V_{base}(kV)}$$

Impedansi sistem di rubah menjadi satuan per unit dengan persamaan:

$$\text{impedansi per unit} = \frac{\text{impedansi sebenarnya } (\Omega)}{\text{impedansi dasar } (\Omega)}$$

- Melakukan analisis keadaan tetap (*Steady State*) untuk mendapatkan nilai untuk daya aktif dan reaktif, tegangan pada masing-masing terminal generator dan bus beban dengan semua sudutnya.
- Menghitung tegangan dalam peralihan generator untuk mendapatkan sudut rotor awal masing masing generator dengan persamaan:

$$E' = V_t + (X_d' \times I)$$

Dimana  $V_t$  adalah tegangan terminal pada bus yang berkesuaian, dari hasil analisis keadaan tetap. Nilai  $X_d'$  adalah reaktansi dalam masing-masing generator. Sedangkan  $I$  adalah arus keluaran dari bus yang berkesuaian tersebut, didapatkan dengan persamaan:

$$I = \frac{(P - jQ)}{V_t^*}$$

Maka didapatkan nilai tegangan dalam peralihan masing-masing generator.

$$E_i' = |E_i| \angle \delta_i$$

Nilai sudut rotor awal berhimpitan dengan nilai sudut dari tegangan dalam peralihan.

$$\delta_0 = \delta_i$$

- Mengubah impedansi beban menjadi admitansi konstan ke tanah pada masing-masing busnya, dengan menggunakan persamaan:

$$Y_L = \frac{(P_L - jQ_L)}{|V_L|^2}$$

- Mengubah reaktansi peralihan generator menjadi bentuk admitansi, dengan menggunakan persamaan:

$$Y_d' = \frac{1}{X_d'}$$

- Mengubah impedansi saluran menjadi bentuk admitansi saluran dengan menggunakan persamaan:

$$Y_{sal} = \frac{1}{Z_{sal}}$$

- Menyusun matriks  $Y_{bus}$  sebelum gangguan, saat terjadi gangguan, dan setelah terjadi gangguan.  $Y_{bus}$  terdiri dari admitansi peralihan generator, admitansi beban shunt, dan admitansi saluran. Penyusunan  $Y_{bus}$  ini berdasarkan hubungan antar masing-masing bus, dengan menggunakan persamaan:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

Dengan nilai  $n$  sejumlah bus pada sistem.

11 Mereduksi  $Y_{bus}$  dilakukan untuk menyederhanakan perhitungan.  $Y_{bus}$  direduksi hingga membentuk matriks sejumlah generator.  $Y_{bus}$  yang direduksi adalah  $Y_{bus}$  sebelum gangguan,  $Y_{bus}$  saat terjadi gangguan, dan  $Y_{bus}$  setelah terjadi gangguan.

12 Menghitung aliran daya yang mengalir dari generator menuju sistem, dihitung dengan menggunakan persamaan dari persamaan sudut daya:

$$P_{ei} = G_{ii} \cdot |E_i|^2 + |Y_{ij}| \cdot |E_i| \cdot |E_j| \cdot \sin(\delta_0 - \varphi)$$

Ketika sebelum terjadi gangguan, nilai  $P_e = P_m$ .

13 Menghitung perubahan  $\delta$  tiap waktu menggunakan metode *step by step*:

$$P_a = P_m - P_e$$

Dimana nilai  $P_e = P_{ei}$ , sedangkan nilai  $P_m$  awal didapat dari tabel simulasi aliran daya. Ketika sebelum terjadi gangguan, nilai  $P_a = 0$  karena nilai  $P_e = P_m$ . Hal ini berarti ketika sebelum terjadi gangguan, tidak ada daya percepatan, sudut rotor tidak mengalami perubahan.

14 Mensubstitusikan nilai  $P_a$  ke dalam persamaan:

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + \frac{180 f}{H} P_{a(n-1)} (\Delta t)^2$$

Dari sini diketahui nilai perubahan sudut rotor tiap waktunya.

15 Mensubstitusikan  $\Delta\delta_{(n)}$  kedalam persamaan :

$$\delta_{(n)} = \delta_{(n-1)} + \Delta\delta_{(n)}$$

dengan nilai  $\delta_{(n-1)}$  awal sama dengan nilai  $\delta_0$

16 Selanjutnya, dilakukan iterasi hingga interval waktu yang diinginkan.

17 Menggambarkan grafik sudut rotor generator  $\delta$  terhadap fungsi waktu  $t$

### 3.4.2 Simulasi

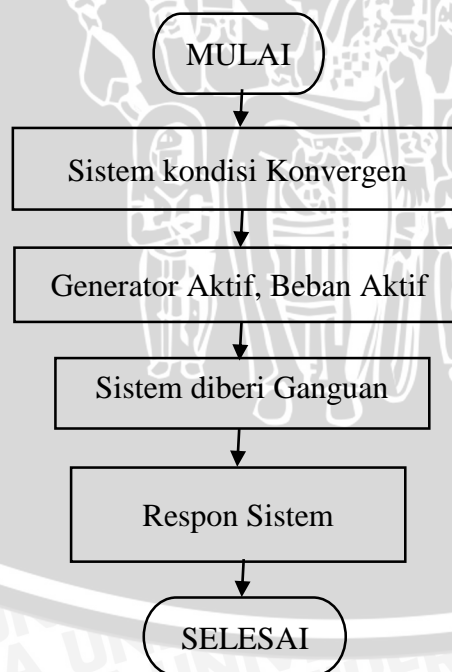
Setelah melakukan perhitungan, simulasi menggunakan program PSSE juga dilakukan untuk membandingkan, sistem transmisi mana yang lebih stabil ketika terjadi gangguan. Berikut ini langkah simulasi yang dilakukan:

- 1 Memasukkan data-data yang telah didapat ke perangkat lunak PSSE.
- 2 Melakukan simulasi aliran daya dengan mengacu pada metode Newton-Raphson sehingga sistem berada pada kondisi konvergen

- 3 Memberikan gangguan hubung singkat tiga fasa pada salah satu bus.
- 4 Melakukan analisis kestabilan peralihan sudut rotor generator setelah terjadi gangguan pada bus.
- 5 Mengganti beberapa saluran AC dengan saluran Monopolar HVDC dan Bipolar HVDC.
- 6 Melakukan langkah simulasi nomer 2 sampai nomer 4 serta menganalisis kestabilan peralihan.
- 7 Membandingkan perubahan sudut rotor masing-masing saluran, ketika sebelum gangguan, saat terjadi gangguan dan setelah terjadi gangguan.

### 3.5 Simulasi Program Kestabilan Peralihan Menggunakan PSSE

Simulasi sistem tenaga listrik yang dilakukan menggunakan model tiga fasa yang terdiri dari generator sinkron, sistem transmisi, trafo, pemutus tenaga, beban, dan gangguan. Pada sistem tenaga listrik tersebut beban yang terjadi dibuat konstan. Setelah sistem dibuat, untuk menganalisis kestabilan peralihan, gangguan yang akan disimulasikan adalah gangguan tiga fasa ke tanah. Letak gangguan berada pada lokasi dekat saluran HVDC yang akan diuji. Berikut ini Diagram Alir Simulasi Program dinyatakan dalam Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram alir Simulasi Program

### 3.6 Membandingkan Hasil Simulasi Kestabilan Peralihan

Setelah dilakukan analisis kestabilan pada kedua sistem tenaga listrik, yaitu transmisi AC dan transmisi HVDC, maka langkah selanjutnya adalah membandingkan hasil analisis kestabilan peralihannya. Hal ini dilakukan untuk menjawab rumusan masalah: Bagaimana pengaruh penggunaan sistem transmisi HVDC terhadap kestabilan peralihan sistem tenaga listrik.





## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Gambaran Umum

Simulasi sistem tenaga listrik yang dilakukan menggunakan model tiga fasa yang terdiri dari generator sinkron, sistem transmisi, trafo, beban, dan gangguan. Sistem tenaga listrik yang mulanya stabil, diberi gangguan pada salah satu bus, sehingga terjadi perubahan kecepatan sudut rotor generator. Simulasi dilakukan menggunakan bantuan komputer dengan perangkat lunak PSSE 34. Ada 2 sistem transmisi yang di simulasikan, yaitu :

1. Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Pembebanan 100% dan 70%
  - a. tanpa saluran transmisi HVDC.
  - b. dengan saluran transmisi HVDC jenis Monopolar antara bus 24 dan 26.
  - c. dengan saluran transmisi HVDC jenis Bipolar antara bus 24 dan 26.

### 4.2 Data Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV

Selain sistem standart IEEE 30 Bus, simulasi HVDC juga diterapkan pada sistem transmisi Jawa Bali 500 kV yang diambil pada tanggal 7 Mei 2013 yang bersumber dari PT PLN (persero). Data sistem transmisi yang digunakan terdiri dari 26 bus, 31 saluran, dan 8 pusat pembangkit yang terhubung ke bus-bus beban melalui saluran transmisi. Sistem Transmisi ini memiliki nilai MVA base senilai 1000 MVA, frekuensi 60 Hz. Bus 26 dijadikan sebagai slack bus dengan tegangan  $1,00\angle 0^\circ$  p.u. Bus-bus tersebut diklasifikasikan sebagai tercantum pada Tabel 4.1.

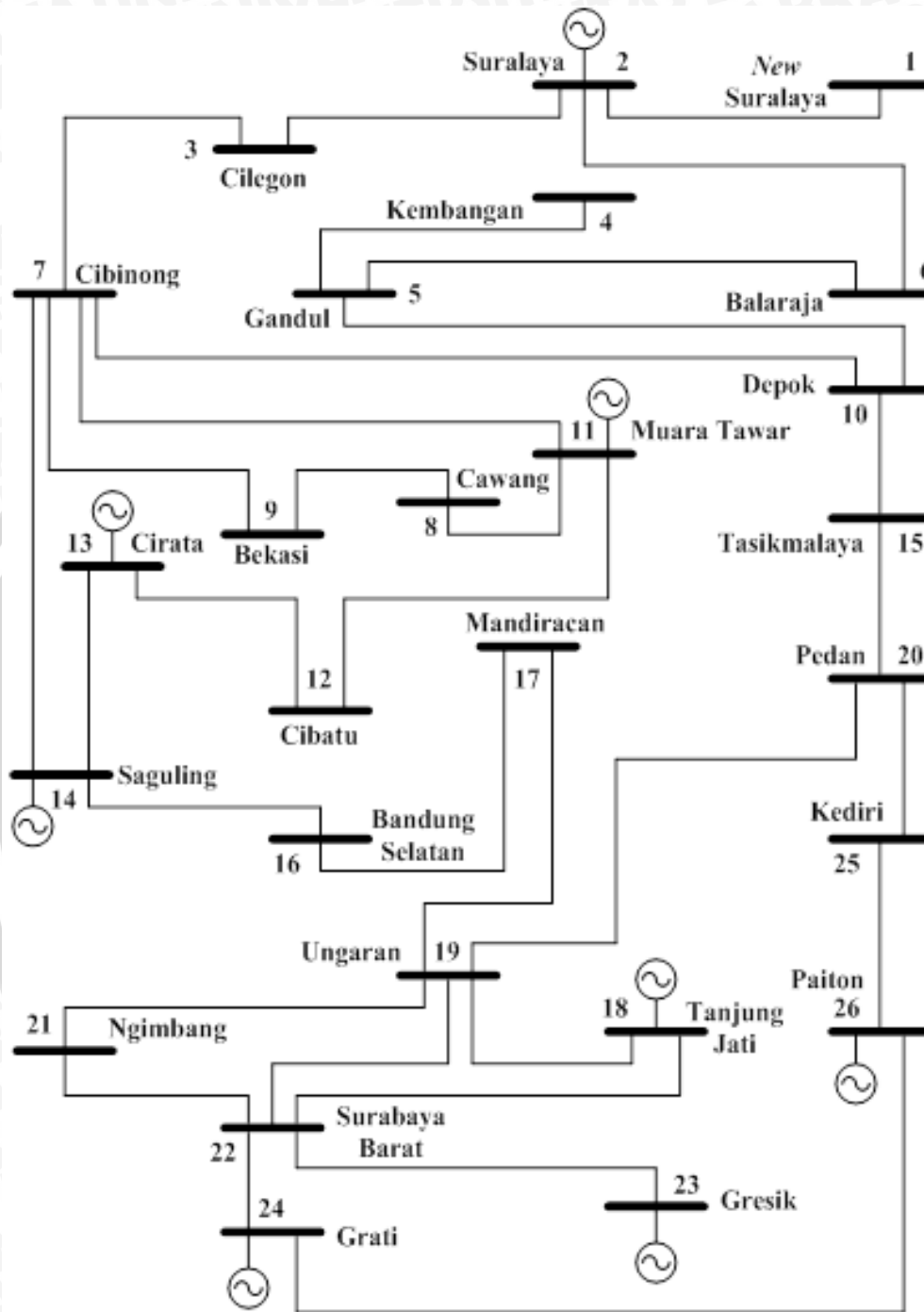
Tabel 4.1 Jenis-jenis Bus pada Sistem Tenaga Listrik Jawa Bali 500 kV

Jenis Bus	Nama Bus	Jumlah Bus
Slack Bus	Suralaya	1
Load Bus	New Suralaya, Cilegon, Kembangan, Gandul, Balaraja, Cibinong, Cawang, Bekasi, Depok, Cibatu, Tasikmalaya, Bandung Selatan, Mandiracan, Ungaran, Pedan, Ngimbang, Surabaya Barat, dan Kediri	18
Generator Bus	Muara Tawar, Cirata, Saguling, Tanjung Jati, Gresik, Grati, dan Paiton	7
	Jumlah	26

Sumber : Supriatna, PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B)

(2013)

Berikut Diagram satu garis dari sistem transmisi Jawa Bali 500kV, ditampilkan pada Gambar 4.1:



Gambar 4.1 Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik Jawa Bali 500 kV

Sumber : Supriatna, PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (2013)

Berikut merupakan data saluran transmisi Jawa Bali 500 kV yang terdiri dari impedansi saluran ( $R$  dan  $X$ ) dan suseptansi ( $B$ ), ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Saluran Transmisi Jawa Bali 500 kV

No. Saluran	No. Bus	Bus Awal	Bus Tujuan	R (p.u.)	X (p.u.)	$\frac{1}{2} B$
1	2-1	Suralaya	New Suralaya	0.000146500	0.001407500	0.0056838370
2	2-3	Suralaya	Cilegon	0.000626492	0.007008760	0.0011414290
3	2-6	Suralaya	Balaraja	0.003677680	0.035333200	0.0002264160
4	3-7	Cilegon	Cibinong	0.013133324	0.146925800	0.0000544495
5	5-4	Gandul	Kembangan	0.001513040	0.016926880	0.0004726210
6	5-6	Gandul	Balaraja	0.002980224	0.028622840	0.0002794970
7	7-14	Cibinong	Saguling	0.004111320	0.045995200	0.0001739310
8	9-7	Bekasi	Cibinong	0.004441880	0.042675400	0.0001874620
9	9-8	Bekasi	Cawang	0.001973648	0.018961840	0.0004219000
10	10-5	Depok	Gandul	0.000347080	0.003334680	0.0023990310
11	10-7	Depok	Cibinong	0.000912400	0.008765920	0.0009126260
12	11-7	Muara Tawar	Cibinong	0.006211600	0.059678000	0.0001340530
13	11-8	Muara Tawar	Cawang	0.005625600	0.054048000	0.0001480170
14	12-11	Cibatu	Muara Tawar	0.002822052	0.027112880	0.0002950630
15	12-13	Cibatu	Cirata	0.002739888	0.026182760	0.0003055450
16	14-13	Saguling	Cirata	0.001474728	0.014168460	0.0005646350
17	14-16	Saguling	Bandung Selatan	0.001957800	0.021902396	0.0003652570
18	15-10	Tasikmalaya	Depok	0.014056160	0.157248040	0.0000508750
19	17-16	Mandiracan	Bandung Selatan	0.006990980	0.067165880	0.0001191080
20	17-19	Mandiracan	Ungaran	0.013478000	0.129490000	0.0000617810
21	19-18	Ungaran	Tanjung Jati	0.006767080	0.075703680	0.0001056750
22	19-20	Ungaran	Pedan	0.009036120	0.086814600	0.0000921505
23	19-21	Ungaran	Ngimbang	0.023479616	0.225580600	0.0000354641
24	20-15	Pedan	Tasikmalaya	0.015311000	0.171286240	0.0000467055
25	21-22	Ngimbang	Surabaya Barat	0.005974972	0.057404600	0.0001393620
26	22-19	Surabaya Barat	Ungaran	0.029792240	0.286229200	0.0000279497
27	22-24	Surabaya Barat	Grati	0.003986360	0.044596600	0.0001793860
28	23-22	Gresik	Surabaya Barat	0.001400560	0.013455720	0.0005945430
29	25-20	Kediri	Pedan	0.010291100	0.115127976	0.0000694880
30	26-24	Paiton	Grati	0.004217728	0.047184760	0.0001695470
31	26-25	Paiton	Kediri	0.010291100	0.115127976	0.0000694880

Sumber : Supriatna, PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (2013)

Data pembebanan pada sistem tenaga listrik 500 kV Jawa Bali yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data Pembebanan Jawa Bali 500 kV

No. Bus	Nama Bus	Kode Bus	Tegangan		Beban	
			Magnitude	Degree	P(MW)	Q(MVAR)
1	New Suralaya	1	1	0	86	34
2	Suralaya	3	1.02	0	142	-56
3	Cilegon	1	1	0	320	-139
4	Kembangan	1	1	0	676	213
5	Gandul	1	1	0	727	47
6	Balaraja	1	1	0	636	253
7	Cibinong	1	1	0	473	350
8	Cawang	1	1	0	343	97
9	Bekasi	1	1	0	1.097	79
10	Depok	1	1	0	536	166
11	Muara Tawar	2	1	0	0	0
12	Cibatu	1	1	0	666	463
13	Cirata	2	1	0	650	270
14	Saguling	2	1.025	0	0	0
15	Tasikmalaya	1	1	0	137	48
16	Bandung Selatan	1	1	0	505	325
17	Mandiracan	1	1	0	339	3
18	Tanjung Jati	2	1	0	380	96
19	Ungaran	1	1	0	838	382
20	Pedan	1	1	0	631	430
21	Ngimbang	1	1	0	262	43
22	Surabaya Barat	1	1	0	983	642
23	Gresik	2	1	0	146	21
24	Grati	2	1.025	0	430	205
25	Kediri	1	1	0	605	197
26	Paiton	2	1	0	593	144
<b>Total</b>					<b>12.196</b>	<b>4.313</b>

Sumber : Supriatna, PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (2013)

Tipe bus : (1) load bus (PQ bus), (2) generator bus (PV bus), and (3) slack bus

Untuk data pembangkitan generator ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Pembangkitan Sistem Jawa Bali 500 kV

No. Bus	Pembangkit	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVAR)	P <sub>G</sub> min (MW)	P <sub>G</sub> max (MW)
2	Suralaya	2962	1554	2666	3258
11	Muara Tawar	1351	703	1216	1486
13	Cirata	365	120	329	402
14	Saguling	647	135	582	712
18	Tanjung Jati	2385	336	2147	2624
23	Gresik	590	111	531	649
24	Grati	325	44	293	358
26	Paiton	3025	551	2723	3328

Sumber : Supriatna, PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (2013)

### 4.3 Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Pembebanan 100%

#### 4.3.1 Saluran AC

##### 4.3.1.1 Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis kestabilan peralihan sistem tenaga listrik. Simulasi aliran daya dilakukan menggunakan metode Newton Rhapson. Hasil simulasi aliran daya ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Simulasi Aliran Daya Saluran AC Pembebanan 100%

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	0.9999	-17.99	86	34	0	0
2	1	-17.98	142	-56	2962	493.6026
3	0.9995	-18.35	320	-139	0	0
4	0.9647	-24.3	676	213	0	0
5	0.9696	-23.62	727	47	0	0
6	0.9768	-21.63	636	253	0	0
7	0.976	-23.42	473	350	0	0
8	0.9802	-24.77	343	97	0	0
9	0.9761	-25.21	1097	79	0	0
10	0.9703	-23.58	536	-166	0	0
11	1	-22.49	0	0	1351	910.0243
12	0.9928	-22.9	666	463	0	0
13	1	-22.37	650	270	365	577.8615
14	1	-21.83	0	0	647	1144.277
15	0.9362	-19.18	137	48	0	0
16	0.9853	-20.93	505	325	0	0
17	0.9702	-16.12	-339	3	0	0
18	1	-0.32	380	96	2385	723.8681
19	0.9504	-9.25	838	382	0	0
20	0.9193	-12.61	631	430	0	0
21	0.9773	-7.54	262	43	0	0
22	0.9886	-6.24	983	642	0	0
23	1	-5.96	146	21	590	823.6552
24	1	-3.37	430	205	325	534.627
25	0.9378	-8.2	605	197	0	0
26	1	0	593	144	3039.886	585.6523
Total					11665	5794

Sumber : Hasil Simulasi

##### 4.3.1.2 Persamaan Sudut Daya

Persamaan Sudut Daya perlu dihitung terlebih dahulu, sebelum melakukan perhitungan kondisi sudut rotor generator. Disini didapatkan nilai tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut rotor awal tiap generator. Nilai pembangkitan masing-masing

pembangkit diperoleh dari tabel 4.40. Berikut ini perhitungan tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut awal tiap generator:

Generator pada bus 11

$$I_{11} = \frac{(P_{11} - jQ_{11})}{V_{11}^*} = \frac{1.351 - j0.9100}{1.000 \angle 22.49^\circ} = 1.6289 \angle -56.454^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} E_{11}' &= V_{11}^* + (X_d' \times I_{11}) \\ &= 1.000 \angle 22.49^\circ + (j0.221 \times 1.6289 \angle -56.454^\circ) \\ &= 1.3550 \angle 25.4102^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\delta_{11} = 25.4102^\circ$$

Generator pada bus 26

$$I_{26} = \frac{(P_{26} - jQ_{26})}{V_{26}^*} = \frac{3.0398 + j0.5856}{1.000 \angle 0^\circ} = 3.0957 \angle -10.905^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} E_{26}' &= V_{26}^* + (X_d' \times I_{26}) \\ &= 1.000 \angle 0^\circ + (j0.221 \times 3.0957 \angle -10.905^\circ) \\ &= 1.3141 \angle 30.7453^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\delta_{26} = 30.7453^\circ$$

Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Tegangan peralihan Saluran AC Pembebanan 100%

No Gen	E' (p.u)	Delta 0 (derajat)
2	1.5446	35.5315
11	1.35507	25.4102
13	1.14795	20.7429
14	1.28364	18.6529
18	1.27872	24.5736
23	1.20839	10.2304
24	1.12723	6.29198
26	1.31413	30.7453

Sumber: Hasil perhitungan

Ybus Reduksi sebelum dan setelah gangguan

-1.1151 - 6.1863i	-0.9678 - 0.8106i	-0.8889 - 0.7232i	-0.9136 - 0.7495i	-0.6862 - 0.3551i	-0.5074 - 0.2147i	-0.4989 - 0.2093i	-0.5584 - 0.2362i
-0.9678 - 0.8106i	-0.9720 - 5.8306i	-0.8691 - 0.9306i	-0.8838 - 0.8921i	-0.6544 - 0.3698i	-0.4841 - 0.2216i	-0.4754 - 0.213i	-0.5313 - 0.2367i
-0.8889 - 0.7230i	-0.8691 - 0.9306i	-0.8379 - 5.7225i	-0.8391 - 1.0558i	-0.6154 - 0.3926i	-0.4561 - 0.2342i	-0.4474 - 0.222i	-0.4992 - 0.2427i
-0.9136 - 0.7495i	-0.8838 - 0.8921i	-0.8391 - 1.0558i	-0.8679 - 5.6931i	-0.6378 - 0.4268i	-0.4734 - 0.2551i	-0.4642 - 0.2411i	-0.5178 - 0.2627i
-0.6862 - 0.3551i	-0.6544 - 0.3698i	-0.6154 - 0.3926i	-0.6378 - 0.4268i	-0.7661 - 6.6619i	-0.5030 - 0.5752i	-0.4865 - 0.5132i	-0.5331 - 0.5194i
-0.5074 - 0.2147i	-0.4841 - 0.2216i	-0.4561 - 0.2342i	-0.4734 - 0.2551i	-0.5030 - 0.5752i	-0.5561 - 6.1395i	-0.4852 - 1.0444i	-0.4950 - 0.8471i
-4.9892 - 0.2093i	-0.4754 - 0.2130i	-0.4474 - 0.222i	-0.4642 - 0.2411i	-0.4865 - 0.5132i	-0.4852 - 1.0444i	-0.5095 - 5.9679i	-0.5146 - 1.1314i
-0.5584 - 0.2362i	-0.5313 - 0.2367i	-0.4992 - 0.2427i	-0.5178 - 0.2627i	-0.5331 - 0.5194i	-0.4950 - 0.8471i	-0.5146 - 1.1314i	-0.6031 - 6.1387i

Ybus Reduksi saat gangguan

-0.9196 - 6.2719i	-0.7788 - 0.8892i	-0.7061 - 0.7920i	-0.7211 - 0.8183i	-0.4244 - 0.3657i	-0.1711 - 0.1363i	-0.0852 - 0.0671i	0
-0.7788 - 0.8892i	-0.7892 - 5.9025i	-0.6925 - 0.9933i	-0.6980 - 0.9546i	-0.4031 - 0.3752i	-0.1629 - 0.1403i	-0.0811 - 0.0691i	0
(1.182 - 131.21)	(5.955 - 97.61)	(1.2109 - 124.88)	(1.1826 - 126.17)	(0.5507 - 137.05)	(0.2151 - 139.26)	(0.1066 - 139.54)	(0.2)
-0.7061 - 0.7920i	-0.6925 - 0.9933i	-0.6674 - 5.7767i	-0.6598 - 1.1095i	-0.3756 - 0.3897i	-0.1524 - 0.1464i	-0.0759 - 0.0722i	0
-0.7211 - 0.8183i	-0.6980 - 0.9546i	-0.6598 - 1.1095i	-0.6794 - 5.7461i	-0.3870 - 0.4195i	-0.1573 - 0.1579i	-0.0784 - 0.0779i	0
-0.4244 - 0.3657i	-0.4031 - 0.3752i	-0.3756 - 0.3897i	-0.3870 - 0.4195i	-0.4620 - 6.5571i	-0.1534 - 0.3355i	-0.0769 - 0.1659i	0
-0.1711 - 0.1363i	-0.1629 - 0.1403i	-0.1524 - 0.1464i	-0.1573 - 0.1579i	-0.1534 - 0.3355i	-0.1960 - 5.7122i	-0.0866 - 0.4594i	0
-0.0852 - 0.0671i	-0.0811 - 0.0691i	-0.0759 - 0.0722i	-0.0784 - 0.0779i	-0.0769 - 0.1659i	-0.0866 - 0.4594i	-0.0826 - 5.1792i	0
0	0	0	0	0	0	0	4.5248i

Perhitungan step by step saat gangguan

$$P_{e26} = 0 \text{ pu}$$

$$P_{m26} = 3.0398 \text{ pu}$$

$$P_{a26} = P_{m26} - P_{e26}$$

$$= 3.0398 - 0$$

$$= 3.0398 \text{ pu}$$

$$k = \frac{180f}{H} (\Delta t)^2$$

$$= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2$$

$$= 0.1276$$

$$kP_{a26} = (0.1276) \cdot (3.0398) = 0.388$$

$$\Delta\delta_{1(26)} = \Delta\delta_{0(26)} + kP_{a26}$$

$$= 0 + 0.388$$

$$= 0.388^\circ$$

$$\delta_{1(26)} = \delta_{0(26)} + \Delta\delta_{1(26)}$$

$$= 30.7435 + 0.388$$

$$= 31.1333^\circ$$

$$P_{e11} = G_{11-11} \cdot |E'_{11}|^2$$

$$+ |Y_{11-2}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_2| \cdot \sin(\delta_{11-2} - \varphi_{112})$$

$$+ |Y_{11-13}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{13}| \cdot \sin(\delta_{11-13} - \varphi_{11-13})$$

$$+ |Y_{11-14}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{14}| \cdot \sin(\delta_{11-14} - \varphi_{11-14})$$

$$+ |Y_{11-18}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{18}| \cdot \sin(\delta_{11-18} - \varphi_{11-18})$$

$$+ |Y_{11-23}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{23}| \cdot \sin(\delta_{11-23} - \varphi_{11-23})$$

$$+ |Y_{11-24}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{24}| \cdot \sin(\delta_{11-24} - \varphi_{11-24})$$

$$P_{e11} = -0.7892 \cdot |1.3550|^2$$

$$+ |1.182| \cdot |1.3550| \cdot |1.5446| \cdot \sin(25.4102 - (-131.21))$$

$$+ |1.2109| \cdot |1.3550| \cdot |1.1479| \cdot \sin(25.4102 - (-124.88))$$

$$+ |1.1826| \cdot |1.3550| \cdot |1.2836| \cdot \sin(25.4102 - (-126.17))$$

$$+ |0.5507| \cdot |1.3550| \cdot |1.2787| \cdot \sin(25.4102 - (-137.05))$$

$$+ |0.2151| \cdot |1.3550| \cdot |1.2083| \cdot \sin(25.4102 - (-139.26))$$

$$+ |0.1066| \cdot |1.3550| \cdot |1.1272| \cdot \sin(25.4102 - (-139.54))$$

$$P_{e11} = -1.4492 + 0.9816 + 0.9335 + 0.9789 + 0.2876 + 0.093 + 0.0422$$

$$P_{e11} = 1.8677 \text{ pu}$$

$$P_{m11} = 1.351 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} P_{a11} &= P_{m11} - P_{e11} \\ &= 1.351 - 1.8677 \\ &= -0.5167 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k &= \frac{180f}{H} (\Delta t)^2 \\ &= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2 \\ &= 0.1276 \end{aligned}$$

$$kP_{a11} = (0.1276) \cdot (-0.5167) = -0.0659$$

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{1(11)} &= \Delta\delta_{0(11)} + kP_{a11} \\ &= 0 + (-0.0659) \\ &= -0.0659^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{1(11)} &= \delta_{0(11)} + \Delta\delta_{1(11)} \\ &= 25.4102 + -0.0659 \\ &= 25.3442^\circ \end{aligned}$$

#### 4.3.1.3 Simulasi Kestabilan Peralihan

Pada simulasi pertama ini, sistem masih menggunakan saluran transmisi AC seluruhnya. Sistem di jalankan selama 1 detik, dan diberi gangguan pada bus 26 selama 0.1 detik. Hasil dari simulasi ditampilkan pada Tabel 4.7.

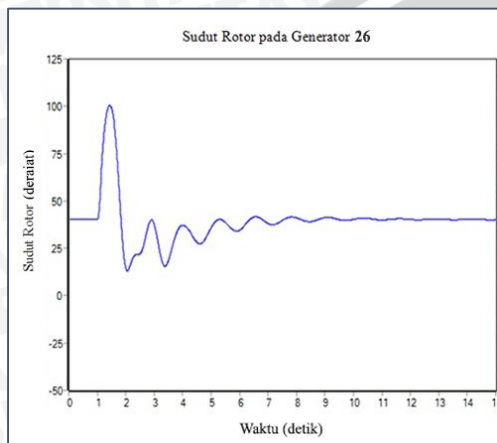
Tabel 4.7 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 AC Pembebanan 100 %

t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	40.1386	-9.1589	8.0	41.0815	-10.5236
1.0	40.1386	-9.1589	8.5	39.1550	-8.4848
1.4	100.5043	27.4003	9.0	41.2637	-10.1077
1.5	90.2293	-30.0778	9.5	40.1191	-9.0052
2.0	13.9731	-5.1449	10.0	40.3295	-9.0302
2.5	22.1396	-2.9411	10.5	40.8093	-9.4425
3.0	37.2812	-12.8242	11.0	40.0094	-8.7045



3.5	18.9955	1.7738	11.5	40.6189	-9.2498
4.0	37.1462	-13.7271	12.0	40.2619	-8.9715
4.5	28.1136	-3.5682	12.5	40.2160	-8.9569
5.0	36.1233	-9.3491	13.0	40.4093	-9.1721
5.5	38.6136	-10.8974	13.5	40.1067	-8.9448
6.0	34.7080	-6.6410	14.0	40.2892	-9.1387
6.5	41.6216	-11.9796	14.5	40.1868	-9.0848
7.0	38.0510	-8.6958	15.0	40.1371	-9.0651
7.5	39.8561	-9.5799			

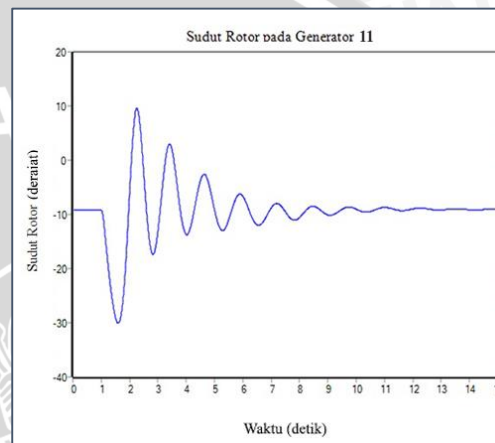
Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.2 Sudut Rotor Generator 26

Saluran AC Pembebanan 100 %

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.3 Sudut Rotor Generator 11

Saluran AC Pembebanan 100 %

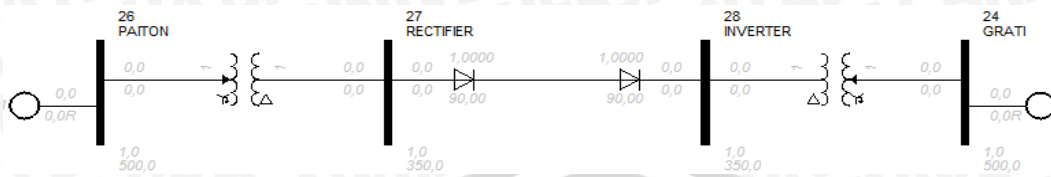
Sumber : Hasil Simulasi

Pada Gambar 4.2, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $40.1385^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga  $100.5043^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-11. Pada Gambar 4.3, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $-9.1589^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 11 mengalami kenaikan hingga  $-30.0778^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-13.

#### 4.3.2 Saluran Monopolar HVDC

Pada rancangan ini saluran transmisi AC yang semula menghubungkan bus 26 ke 24 diganti dengan saluran transmisi DC, seperti Gambar 4.4. Hal itu dikarenakan saluran tersebut merupakan saluran yang menyalurkan daya terbesar pada sistem. Dalam rancangan ini ditambahkan dua bus yaitu, bus 27 (*rectifier*) dan bus 28 (*inverter*). Kedua bus tersebut memiliki level tegangan 350 kV, tegangan masukan *rectifier* diambil dari tegangan jaringan

yang telah diturunkan terlebih dahulu oleh trafo (500/350 kV). Sedangkan tegangan pada transmisi DC adalah sebesar 150 kV, untuk mendapatkan tegangan tersebut dengan mengatur sudut penyalan pada pada *rectifier* ( $\alpha_1$ ) pada *inverter* ( $\alpha_2$ ).



Gambar 4.4 Konfigurasi Saluran HVDC dari Bus 26 ke Bus 24

Sumber: Simulasi Program PSSE

Perhitungan sudut kontrol ditunjukkan pada perhitungan di bawah ini. Hasil dari perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.8.

#### a. Operasi pada Rectifier

Untuk mendapatkan nilai sudut kontrol minimum pada rectifier ( $\alpha_{1min}$ ) dengan perhitungan berikut:

$$V_{d1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{LL} = 1.3505 BTE_{LL}$$

$$V_d = V_{d1} \cos \alpha$$

$$150 = \frac{3\sqrt{2} \times 1 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_1$$

$$150 = 330.8662 \cos \alpha_1$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{150}{330.8662}$$

$$\alpha_1 = 63.0408^\circ$$

Sudut kontrol maksimum ( $\alpha_{1max}$ ) pada rectifier:

$$142.5 = \frac{3\sqrt{2} \times 1 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_1$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{142.5}{330.8662}$$

$$\alpha_1 = 64.4887^\circ$$

#### b. Operasi pada Inverter

Untuk mendapatkan nilai sudut kontrol minimum pada inverter ( $\alpha_{2min}$ ) dengan perhitungan berikut:

$$V_{dc2} = V_{dc1} - I_d \cdot R_j$$

$$V_{dc2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{LL} = 1.3505 BTE_{LL}$$

$$V_d = V_{dc2} \cos \beta$$

$$P_{ac} = P_{dc} = V_d I_d$$

$$V_{dc2} = 150 - \left( \frac{1240}{150} \times 0.016 \right)$$

$$V_{dc2} = 150 - 0.1322$$

$$V_{dc2} = 149.8678$$

$$149.8678 = \frac{3\sqrt{2} \times 1 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_2$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{149.8678}{330.8662}$$

$$\alpha_2 = 63.0665^\circ$$

Sudut kontrol maksimum ( $\alpha_{2max}$ ) pada inverter:

$$V_{dc2} = 142.5 - \left( \frac{1240}{142.5} \times 0.016 \right)$$

$$V_{dc2} = 142.5 - 0.1392$$

$$V_{dc2} = 142.3608$$

$$142.3608 = \frac{3\sqrt{2} \times 1 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_2$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{142.3608}{330.8662}$$

$$\alpha_2 = 64.5154^\circ$$

Tabel 4.8 Parameter Transmisi Monopolar HVDC Transmisi Jawa Bali 500 kV

	Rectifier	Inverter
Bus	27	28
Reaktansi komutasi	0.002 $\Omega$	0.002 $\Omega$
Sudut kontrol minimum	63.0408°	63.0665°
Sudut kontrol maksimum	64.4887°	64.5154°
Regulasi transformator	1.5000	1.5000
Resistansi saluran DC	0.016 $\Omega$	
Set value	1240 MW	

Sumber: Perhitungan

#### 4.3.2.1 Simulasi Aliran Daya

Hasil simulasi aliran daya diperoleh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Simulasi Aliran Daya Monopolar HVDC Pembebanan 100 %

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	0.9999	-17.86	86	34	0	0
2	1	-17.86	142	-56	2962	493.4846
3	0.9995	-18.22	320	-139	0	0
4	0.9648	-24.18	676	213	0	0
5	0.9696	-23.5	727	47	0	0
6	0.9768	-21.51	636	253	0	0
7	0.976	-23.3	473	350	0	0
8	0.9802	-24.65	343	97	0	0

9	0.9762	-25.09	1097	79	0	0
10	0.9703	-23.45	536	166	0	0
11	1	-22.36	0	0	1351	909.9274
12	0.9928	-22.78	666	463	0	0
13	1	-22.25	650	270	365	577.8687
14	1	-21.71	0	0	647	1144.459
15	0.9363	-19.07	137	48	0	0
16	0.9853	-20.8	505	325	0	0
17	0.9702	-15.99	-339	3	0	0
18	1	-0.18	380	96	2385	723.9705
19	0.9504	-9.11	838	382	0	0
20	0.9194	-12.5	631	430	0	0
21	0.9773	-7.35	262	43	0	0
22	0.9886	-6.04	983	642	0	0
23	1	-5.76	146	21	590	824.1741
24	1	-3.15	430	205	325	3893.515
25	0.9379	-8.15	605	197	0	0
26	1	0	593	144	3034.417	3256.243
27	0.9997	-0.01	0	0	0	0
28	1	-3.15	0	0	0	0
Total					11659.42	11823.642

Sumber : Hasil Simulasi

#### 4.3.2.2 Persamaan Sudut Daya

Persamaan Sudut Daya perlu dihitung terlebih dahulu, sebelum melakukan perhitungan kondisi sudut rotor generator. Disini didapatkan nilai tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut rotor awal tiap generator. Nilai pembangkitan masing-masing pembangkit diperoleh dari tabel 4.9. Berikut ini perhitungan tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut awal tiap generator:

Generator pada bus 11

$$I_{11} = \frac{(P_{11} - jQ_{11})}{V_{11}^*} = \frac{1.351 + j0.9099}{1.000 \angle 22.36^\circ} = 1.6288 \angle -56.321^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} E_{11}' &= V_{11}^* + (X_d' \times I_{11}) \\ &= 1.000 \angle 22.36^\circ + (j0.221 \times 1.6288 \angle -56.321^\circ) \\ &= 1.3548 \angle 25.3493^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\delta_{11} = 25.3493^\circ$$

Generator pada bus 26

$$I_{26} = \frac{(P_{26} - jQ_{26})}{V_{26}^*} = \frac{3.034 + j3.256}{1.000 \angle 0^\circ} = 4.4509 \angle -47.02^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} E_{26}' &= V_{26}^* + (X_d' \times I_{26}) \\ &= 1.000 \angle 0^\circ + (j0.221 \times 4.4509 \angle -47.02^\circ) \\ &= 1.8457 \angle 21.3044^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\delta_{26} = 21.3044^\circ$$

Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Tegangan peralihan Monopolar HVDC Pembebanan 100%

No Gen	E' (p.u)	Delta 0 (derajat)
2	1.54332	35.5041
11	1.35482	25.3493
13	1.1480	20.6539
14	1.2839	18.5851
18	1.27673	24.5134
23	1.20798	10.0988
24	1.86329	2.44177
26	1.84576	21.3044

Sumber: Hasil perhitungan

Ybus Reduksi sebelum dan sesudah gangguan

-1.1125	-6.1885i	-0.9655	-0.8127i	-0.8868	-0.7251i	-0.9114	-0.7515i	-0.6848	-0.3571i	-0.5161	-0.2197i	-0.5128	-0.2168i	-0.5346	-0.2292i
-0.9655	-0.8127i	-0.9698	-5.8326i	-0.8672	-0.9324i	-0.8818	-0.89405i	-0.6531	-0.3717i	-0.4923	-0.2261i	-0.4885	-0.2196i	-0.5090	-0.2306i
-0.8868	-0.7251i	-0.8672	-0.9324i	-0.8361	-5.7243i	-0.8373	-1.0576i	-0.6143	-0.3944i	-0.4638	-0.2382i	-0.4596	-0.2279i	-0.4786	-0.2376i
-0.9114	-0.7515i	-0.8818	-0.8940i	-0.8373	-1.0576i	-0.8660	-5.6950i	-0.6367	-0.4286i	-0.4813	-0.2592i	-0.4768	-0.2472i	-0.4965	-0.2574i
-0.6848	-0.3571i	-0.6531	-0.3717i	-0.6143	-0.3944i	-0.6367	-0.4286i	-0.7655	-6.6635i	-0.5100	-0.5769i	-0.4977	-0.5154i	-0.5152	-0.5195i
-0.5161	-0.2197i	-0.4923	-0.2261i	-0.4638	-0.2382i	-0.4813	-0.2592i	-0.5100	-0.5769i	-0.5605	-6.1096i	-0.4906	-0.9970i	-0.5014	-0.9221i
-0.5128	-0.2168i	-0.4885	-0.2196i	-0.4596	-0.2279i	-0.4768	-0.2472i	-0.4977	-0.5154i	-0.4906	-0.9970i	-0.5155	-5.8928i	-0.5285	-1.2493i
-0.5346	-0.2292i	-0.5090	-0.2306i	-0.4786	-0.2376i	-0.4965	-0.2574i	-0.5152	-0.5195i	-0.5014	-0.9221i	-0.5285	-1.2493i	-0.5452	-5.9612i

Ybus Reduksi saat gangguan

-0.9095	-6.2738i	-0.7688	-0.8907i	-0.6962	-0.7930i	-0.7107	-0.8191i	-0.4078	-0.3609i	-0.1331	-0.1138i	-0.0335	-0.0322i	0	0
-0.7688	-0.8907i	-0.7794	-5.9036i	-0.6828	-0.9939i	-0.6877	-0.9550i	-0.3870	-0.3698i	-0.1264	-0.1168i	-0.0317	-0.0329i	0	0
(1.1766Z - 130.79)	(5.9549Z - 97.52)	(1.2058Z - 124.48)	(1.1768Z - 125.75)	(0.5353Z - 136.29)	(0.1722Z - 137.25)	(0.0457Z - 133.93)	(0.20)								
-0.6962	-0.7930i	-0.6828	-0.9939i	-0.6578	-5.7768i	-0.6497	-1.1093i	-0.3601	-0.3836i	-0.1178	-0.1214i	-0.0294	-0.0340i	0	0
-0.7107	-0.8191i	-0.6877	-0.9550i	-0.6497	-1.1093i	-0.6688	-5.7457i	-0.3708	-0.4127i	-0.1214	-0.1307i	-0.0302	-0.0365i	0	0
-0.4078	-0.3609i	-0.3870	-0.3698i	-0.3601	-0.3836i	-0.3708	-0.4127i	-0.4408	-6.5372i	-0.1134	-0.2727i	-0.0259	-0.0741i	0	0
-0.1331	-0.1138i	-0.1264	-0.1168i	-0.1178	-0.1214i	-0.1214	-0.1307i	-0.1134	-0.2727i	-0.1361	-5.5315i	-0.0177	-0.1999i	0	0
-0.0335	-0.0322i	-0.0317	-0.0329i	-0.0294	-0.0340i	-0.0302	-0.0365i	-0.0259	-0.0741i	-0.0177	-0.1999i	-0.0078	-4.8079i	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4.5248i	0

Perhitungan step by step saat gangguan

$$P_{e26} = 0 \text{ pu}$$

$$P_{m26} = 3.0344 \text{ pu}$$

$$P_{a26} = P_{m26} - P_{e26}$$

$$= 3.0344 - 0$$

$$= 3.0344 \text{ pu}$$

$$k = \frac{180f}{H} (\Delta t)^2$$

$$= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2$$

$$= 0.1276$$

$$kP_{a26} = (0.1276) \cdot (3.0344) = 0.3873$$

$$\Delta\delta_{1(26)} = \Delta\delta_{0(26)} + kP_{a26}$$

$$= 0 + 0.3873$$

$$= 0.3873^\circ$$

$$\begin{aligned}\delta_{1(26)} &= \delta_{0(26)} + \Delta\delta_{1(26)} \\ &= 21.3044 + 0.3873 \\ &= 21.6917^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{e11} &= G_{11-11} \cdot |E'_{11}|^2 \\ &+ |Y_{11-2}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_2| \cdot \sin(\delta_{11-2} - \varphi_{11-2}) \\ &+ |Y_{11-13}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{13}| \cdot \sin(\delta_{11-13} - \varphi_{11-13}) \\ &+ |Y_{11-14}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{14}| \cdot \sin(\delta_{11-14} - \varphi_{11-14}) \\ &+ |Y_{11-18}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{18}| \cdot \sin(\delta_{11-18} - \varphi_{11-18}) \\ &+ |Y_{11-23}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{23}| \cdot \sin(\delta_{11-23} - \varphi_{11-23}) \\ &+ |Y_{11-24}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{24}| \cdot \sin(\delta_{11-24} - \varphi_{11-24})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{e11} &= -0.7794 \cdot |1.3548|^2 \\ &+ |1.176| \cdot |1.3548| \cdot |1.5433| \cdot \sin(25.3493 - (-130.79)) \\ &+ |1.2058| \cdot |1.3548| \cdot |1.148| \cdot \sin(25.3493 - (-124.48)) \\ &+ |1.1768| \cdot |1.3548| \cdot |1.2839| \cdot \sin(25.3493 - (-125.75)) \\ &+ |0.5353| \cdot |1.3548| \cdot |1.2767| \cdot \sin(25.3493 - (-136.29)) \\ &+ |0.1722| \cdot |1.3548| \cdot |1.2079| \cdot \sin(25.3493 - (-137.25)) \\ &+ |0.0457| \cdot |1.3548| \cdot |1.8632| \cdot \sin(25.3493 - (-133.93))\end{aligned}$$

$$P_{e11} = -1.4306 + 0.9948 + 0.9423 + 0.989 + 0.2915 + 0.0842 + 0.0408$$

$$P_{e11} = 1.9124 \text{ pu}$$

$$P_{m11} = 1.351 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned}P_{a11} &= P_{m11} - P_{e11} \\ &= 1.351 - 1.9124 \\ &= -0.5614 \text{ pu}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}k &= \frac{180f}{H} (\Delta t)^2 \\ &= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2 \\ &= 0.1276\end{aligned}$$

$$kP_{a11} = (0.1276) \cdot (-0.5614) = -0.0716$$

$$\begin{aligned}\Delta\delta_{1(11)} &= \Delta\delta_{0(11)} + kP_{a11} \\ &= 0 + (-0.0716) \\ &= -0.0716^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_{1(11)} &= \delta_{0(11)} + \Delta\delta_{1(11)} \\ &= 25.3493 + (-0.0716) \\ &= 25.2776^\circ\end{aligned}$$

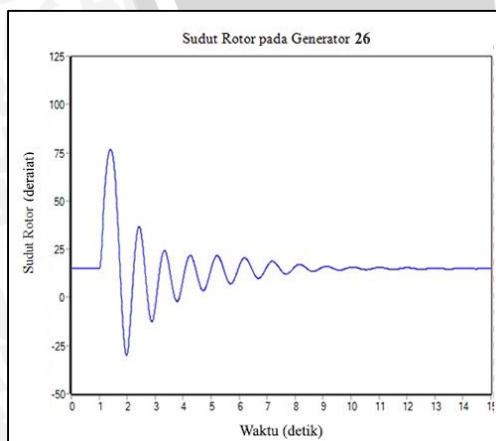
#### 4.6.2.3 Simulasi Kestabilan Peralihan

Pada simulasi ini transmisi HVDC jenis Monopolar menggantikan saluran transmisi yang menghubungkan antara bus 24 dan 26. Sistem di jalankan selama 1 detik, dan diberi gangguan yang sama, yaitu gangguan pada bus 26 selama 0.1 detik. Hasil dari simulasi ditampilkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Monopolar HVDC Pembebanan 100%

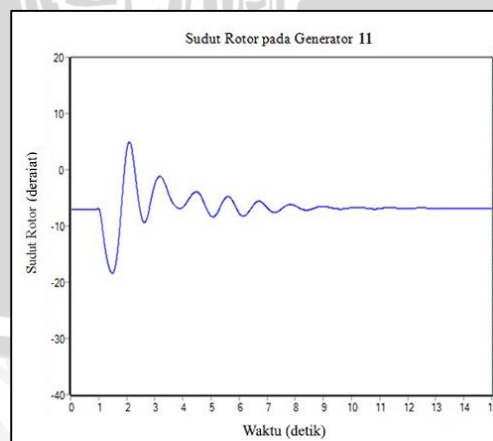
t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	14.9003	-7.0223	8.0	16.0330	-6.4167
1.0	14.8926	-6.9644	8.5	14.1147	-7.0985
1.4	76.7310	-17.8393	9.0	15.7952	-6.5024
1.5	73.6894	-18.3962	9.5	14.2573	-6.9592
2.0	-28.6175	3.9113	10.0	15.6540	-6.7336
2.5	32.6811	-8.0311	10.5	14.3226	-6.8066
3.0	-4.5511	-2.4353	11.0	15.5270	-6.8979
3.5	15.0983	-4.5080	11.5	14.4145	-6.7443
4.0	10.0967	-6.6049	12.0	15.3682	-6.9464
4.5	11.0995	-3.9625	12.5	14.5513	-6.7619
5.0	15.3883	-8.2657	13.0	15.1953	-6.9222
5.5	11.8670	-5.0264	13.5	14.6898	-6.8119
6.0	16.5269	-7.7392	14.0	15.0633	-6.8839
6.5	13.0332	-6.2616	14.5	14.7898	-6.8533
7.0	16.3724	-6.8090	15.0	14.9831	-6.8585
7.5	13.7540	-6.9650			

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.5 Sudut Rotor Generator 26 Monopolar HVDC Pembebanan 100 %

Sumber : Hasil Simulasi



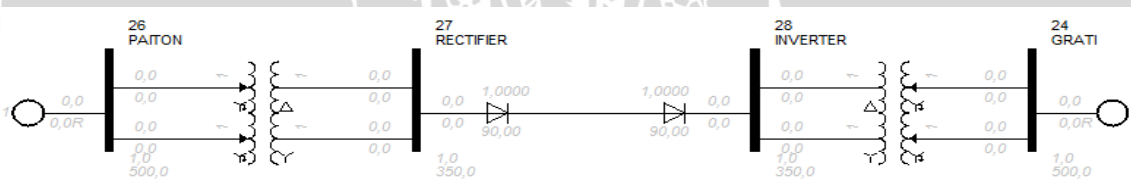
Gambar 4.6 Sudut Rotor Generator 11 Monopolar HVDC Pembebanan 100 %

Sumber : Hasil Simulasi

Pada Gambar 4.5, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $14.9003^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga  $76.7310^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-10. Pada Gambar 4.6, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $-7.0223^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 11 mengalami kenaikan hingga  $-18.3962^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-11.

#### 4.3.3 Saluran Bipolar HVDC

Rancangan ini masih tetap mengganti saluran yang menghubungkan antara bus 26 dan bus 24 dengan saluran Bipolar HVDC. Pada rancangan ini digunakan konfigurasi bipolar link dengan 2 jembatan penyearah yang disusun seri sehingga digunakan 2 buah transformator. Berikut Konfigurasi Saluran Bipolar HVDC dari Bus 26 ke Bus 24 ditampilkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Konfigurasi Saluran HVDC dari Bus 26 ke Bus 24

Sumber: Simulasi Program PSSE

Perhitungan sudut kontrol ditunjukkan pada perhitungan di bawah ini. Hasil dari perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.12.

##### a. Operasi pada Rectifier

Untuk mendapatkan nilai sudut kontrol minimum pada rectifier ( $\alpha_{1min}$ ) dengan perhitungan berikut:

$$V_{d1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{LL} = 1.3505 BTE_{LL}$$

$$V_d = V_{d1} \cos \alpha$$

$$150 = \frac{3\sqrt{2} \times 2 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_1$$

$$150 = 661.7324 \cos \alpha_1$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{150}{661.7324}$$

$$\alpha_1 = 76.8984^\circ$$

Sudut kontrol maksimum ( $\alpha_{1max}$ ) pada rectifier:



$$142.5 = \frac{3\sqrt{2} \times 2 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{125.5}{661.7324}$$

$$\alpha_1 = 77.5642^\circ$$

### b. Operasi pada Inverter

Untuk mendapatkan nilai sudut kontrol minimum pada inverter ( $\alpha_{2\min}$ ) dengan perhitungan berikut:

$$V_{dc2} = V_{dc1} - I_d \cdot R_j$$

$$V_{dc2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{LL} = 1.3505 BTE_{LL}$$

$$V_d = V_{dc2} \cos \alpha_2$$

$$P_{ac} = P_{dc} = V_d I_d$$

$$V_{dc2} = 150 - \left( \frac{620}{150} \times 0.016 \right)$$

$$V_{dc2} = 150 - 0.0661$$

$$V_{dc2} = 149.9338$$

$$149.9338 = \frac{3\sqrt{2} \times 2 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_2$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{149.9338}{661.7324}$$

$$\alpha_2 = 76.9043^\circ$$

Sudut kontrol maksimum ( $\alpha_{2\max}$ ) pada inverter:

$$V_{dc2} = 142.5 - \left( \frac{620}{142.5} \times 0.016 \right)$$

$$V_{dc2} = 142.5 - 0.0696$$

$$V_{dc2} = 142.4304$$

$$142.4304 = \frac{3\sqrt{2} \times 2 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_2$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{142.4304}{661.7324}$$

$$\alpha_2 = 77.5704^\circ$$

Tabel 4.12 Parameter Transmisi Bipolar HVDC Transmisi Jawa Bali 500 kV

	Rectifier	Inverter
Bus	26	24
Reaktansi komutasi	0.002 $\Omega$	0.002 $\Omega$
Sudut kontrol minimum	76.8984°	76.9043°
Sudut kontrol maksimum	77.5642°	77.5704°
Regulasi transformator	1.5000	1.5000
Resistansi saluran DC	0.016 $\Omega$	
Set value	620 MW	

Sumber: Perhitungan

#### 4.3.3.1 Simulasi Aliran Daya

Hasil simulasi aliran daya diperoleh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Simulasi Aliran Daya Bipolar HVDC Pembebanan 100%

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	0.9999	-17.85	86	34	0	0
2	1	-17.85	142	-56	2962	493.4792
3	0.9995	-18.22	320	-139	0	0
4	0.9648	-24.17	676	213	0	0
5	0.9696	-23.49	727	47	0	0
6	0.9768	-21.5	636	253	0	0
7	0.976	-23.29	473	350	0	0
8	0.9802	-24.64	343	97	0	0
9	0.9762	-25.08	1097	79	0	0
10	0.9703	-23.44	536	166	0	0
11	1	-22.35	0	0	1351	909.9229
12	0.9928	-22.77	666	463	0	0
13	1	-22.24	650	270	365	577.8669
14	1	-21.7	0	0	647	1144.482
15	0.9363	-19.06	137	48	0	0
16	0.9853	-20.79	505	325	0	0
17	0.9702	-15.98	-339	3	0	0
18	1	-0.17	380	96	2385	723.9901
19	0.9504	-9.1	838	382	0	0
20	0.9194	-12.5	631	430	0	0
21	0.9773	-7.34	262	43	0	0
22	0.9886	-6.03	983	642	0	0
23	1	-5.75	146	21	590	824.2169
24	1	-3.14	430	205	325	7719.546
25	0.9379	-8.15	605	197	0	0
26	1	0	593	144	3033.879	7991.622
27	0.9997	0	0	0	0	0
28	1	-3.13	0	0	0	0
Total					11658.88	20385.1300

Sumber : Hasil Simulasi

#### 4.3.3.2 Persamaan Sudut Daya

Persamaan Sudut Daya perlu dihitung terlebih dahulu, sebelum melakukan perhitungan kondisi sudut rotor generator. Disini didapatkan nilai tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut rotor awal tiap generator. Nilai pembangkitan masing-masing pembangkit diperoleh dari tabel 4.13. Perhitungan tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut awal tiap generator dilakukan sesuai dengan yang tercantum dalam (Hadi Saadat, 1999:511).

Generator pada bus 11

$$I_{11} = \frac{(P_{11} - jQ_{11})}{V_{11}^*} = \frac{1.351 + j0.90992}{1.000 \angle 22.35^\circ} = 1.62885 \angle -56.311^\circ \text{ pu}$$

$$E_{11}' = V_{11}^* + (X_d' \times I_{11})$$

$$= 1.000 \angle 22.35^\circ + (j0.221 \times 1.62885 \angle -56.311^\circ)$$

$$= 1.3548 \angle 25.3446^\circ \text{ pu}$$

$$\delta_{11} = 25.3446^\circ$$

Generator pada bus 26

$$I_{26} = \frac{(P_{26} - jQ_{26})}{V_{26}^*} = \frac{3.03388 + j7.12692}{1.000 \angle 0^\circ} = 7.7458 \angle -66.941^\circ \text{ pu}$$

$$E_{26}' = V_{26}^* + (X_d' \times I_{26})$$

$$= 1.000 \angle 0^\circ + (j0.221 \times 7.7458 \angle -66.941^\circ)$$

$$= 2.66091 \angle 14.5945^\circ \text{ pu}$$

$$\delta_{26} = 14.5945^\circ$$

Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.14.

Tabel 4.14 Tegangan peralihan Bipolar HVDC Pembebanan 100%

No Gen	E' (p.u)	Delta 0 (derajat)
2	1.54321	35.5018
11	1.3548	25.3446
13	1.14808	20.6465
14	1.28392	18.5794
18	1.27659	24.509
23	1.20796	10.0921
24	2.70609	0.69966
26	2.66091	14.5945

Sumber: Hasil perhitungan

Ybus Reduksi sebelum dan sesudah gangguan

-1.1141	-6.1876i	-0.9669	-0.8118i	-0.8881	-0.7243i	-0.9127	-0.7507i	-0.6857	-0.3562i	-0.5118	-0.2165i	-0.5059	-0.2119i	-0.5468	-0.2346i
-0.9669	-0.8118i	-0.9711	-0.8317i	-0.8683	-0.9316i	-0.8830	-0.8932i	-0.6539	-0.3708i	-0.4882	-0.2232i	-0.4819	-0.2152i	-0.5205	-0.2354i
-0.8881	-0.7243i	-0.8683	-0.9316i	-0.8372	-0.57235i	-0.8384	-1.0568i	-0.6150	-0.3935i	-0.4600	-0.2356i	-0.4534	-0.2239i	-0.4893	-0.2418i
-0.9127	-0.7507i	-0.8830	-0.8932i	-0.8384	-1.0568i	-0.8671	-0.56942i	-0.6374	-0.4277i	-0.4774	-0.2565i	-0.4705	-0.2431i	-0.5075	-0.2617i
-0.6857	-0.3562i	-0.6539	-0.3708i	-0.6150	-0.3935i	-0.6374	-0.4277i	-0.7659	-0.66627i	-0.5064	-0.5756i	-0.4918	-0.5135i	-0.5248	-0.5207i
-0.5118	-0.2165i	-0.4882	-0.2232i	-0.4600	-0.2356i	-0.4774	-0.2565i	-0.5064	-0.5756i	-0.5561	-0.61253i	-0.4845	-1.0220i	-0.5031	-0.8815i
-0.5059	-0.2119i	-0.4819	-0.2152i	-0.4534	-0.2239i	-0.4705	-0.2431i	-0.4918	-0.5135i	-0.4845	-1.0220i	-0.5071	-0.59326i	-0.5292	-1.1852i
-0.5468	-0.2346i	-0.5205	-0.2354i	-0.4893	-0.2418i	-0.5075	-0.2617i	-0.5248	-0.5207i	-0.5031	-0.8815i	-0.5292	-1.1852i	-0.5640	-6.0603i

Ybus Reduksi saat gangguan

-0.9153	-6.2735i	-0.7745	-0.8906i	-0.7018	-0.7932i	-0.7166	-0.8194i	-0.4169	-0.3648i	-0.1530	-0.1292i	-0.0603	-0.0555i	0
-0.7745	-0.8906i	-0.7850	-0.59037i	-0.6883	-0.9943i	-0.6935	-0.9555i	-0.3957	-0.3740i	-0.1454	-0.1326i	-0.0571	-0.0568i	0
(1.1803	-131.01)	(5.9557	-97.57)	(1.2093	-124.69)	(1.1806	-125.97)	(0.5445	-136.61)	(0.1968	-137.62)	(0.0806	-135.15)	(0.20)
-0.7018	-0.7932i	-0.6883	-0.9943i	-0.6632	-0.57774i	-0.6554	-1.1101i	-0.3684	-0.3882i	-0.1356	-0.1379i	-0.0530	-0.0588i	0
-0.7166	-0.8194i	-0.6935	-0.9555i	-0.6554	-1.1101i	-0.6748	-0.57467i	-0.3795	-0.4177i	-0.1398	-0.1485i	-0.0545	-0.0632i	0
-0.4169	-0.3648i	-0.3957	-0.3740i	-0.3684	-0.3882i	-0.3795	-0.4177i	-0.4514	-0.65499i	-0.1316	-0.3109i	-0.0483	-0.1295i	0
-0.1530	-0.1292i	-0.1454	-0.1326i	-0.1356	-0.1379i	-0.1398	-0.1485i	-0.1316	-0.3109i	-0.1574	-0.6377i	-0.0386	-0.3512i	0
-0.0603	-0.0555i	-0.0571	-0.0568i	-0.0530	-0.0588i	-0.0545	-0.0632i	-0.0483	-0.1295i	-0.0386	-0.3512i	-0.0243	-0.50227i	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4.5248i

Perhitungan step by step saat gangguan

$$P_{e26} = 0 \text{ pu}$$

$$P_{m26} = 3.0338 \text{ pu}$$

$$P_{a26} = P_{m26} - P_{e26}$$

$$= 3.0338 - 0$$

$$= 3.0338 \text{ pu}$$

$$k = \frac{180f}{H} (\Delta t)^2$$

$$= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2$$

$$= 0.1276$$

$$kP_{a26} = (0.1276) \cdot (3.0338) = 0.387$$

$$\Delta\delta_{1(26)} = \Delta\delta_{0(26)} + kP_{a26}$$

$$= 0 + 0.387$$

$$= 0.387^\circ$$

$$\delta_{1(26)} = \delta_{0(26)} + \Delta\delta_{1(26)}$$

$$= 14.5945 + 0.387$$

$$= 14.9818^\circ$$

$$P_{e11} = G_{11-11} \cdot |E'_{11}|^2$$

$$+ |Y_{11-2}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_2| \cdot \sin(\delta_{11-2} - \varphi_{11-2})$$

$$+ |Y_{11-13}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{13}| \cdot \sin(\delta_{11-13} - \varphi_{11-13})$$

$$+ |Y_{11-14}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{14}| \cdot \sin(\delta_{11-14} - \varphi_{11-14})$$

$$+ |Y_{11-18}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{18}| \cdot \sin(\delta_{11-18} - \varphi_{11-18})$$

$$+ |Y_{11-23}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{23}| \cdot \sin(\delta_{11-23} - \varphi_{11-23})$$

$$+ |Y_{11-24}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{24}| \cdot \sin(\delta_{11-24} - \varphi_{11-24})$$

$$P_{e11} = -0.7850 \cdot |1.3548|^2$$

$$+ |1.1803| \cdot |1.3548| \cdot |1.5432| \cdot \sin(25.3446 - (-131.01))$$

$$+ |1.2093| \cdot |1.3548| \cdot |1.148| \cdot \sin(25.3446 - (-124.69))$$

$$+ |1.1806| \cdot |1.3548| \cdot |1.2839| \cdot \sin(25.3446 - (-125.97))$$

$$+ |0.5445| \cdot |1.3548| \cdot |1.2765| \cdot \sin(25.3446 - (-136.61))$$

$$+ |0.1968| \cdot |1.3548| \cdot |1.2079| \cdot \sin(25.3446 - (-137.62))$$

$$+ |0.0806| \cdot |1.3548| \cdot |2.7060| \cdot \sin(25.3446 - (-135.15))$$

$$P_{e11} = -1.4409 + 0.9896 + 0.9394 + 0.9857 + 0.2916 + 0.0943 + 0.0986$$

$$P_{e11} = 1.9585 \text{ pu}$$

$$P_{m11} = 1.351 \text{ pu}$$

$$P_{a11} = P_{m11} - P_{e11}$$

$$= 1.351 - 1.9585$$

$$= -0.6075 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{180f}{H} (\Delta t)^2 \\
 &= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2 \\
 &= 0.1276
 \end{aligned}$$

$$kP_{a11} = (0.1276) \cdot (-0.6075) = -0.0775$$

$$\begin{aligned}
 \Delta\delta_{1(11)} &= \Delta\delta_{0(11)} + kP_{a11} \\
 &= 0 + (-0.0775) \\
 &= -0.0775^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{1(11)} &= \delta_{0(11)} + \Delta\delta_{1(11)} \\
 &= 25.3446 + -0.0775 \\
 &= 25.2670^\circ
 \end{aligned}$$

#### 4.3.3.3 Simulasi Kestabilan Peralihan

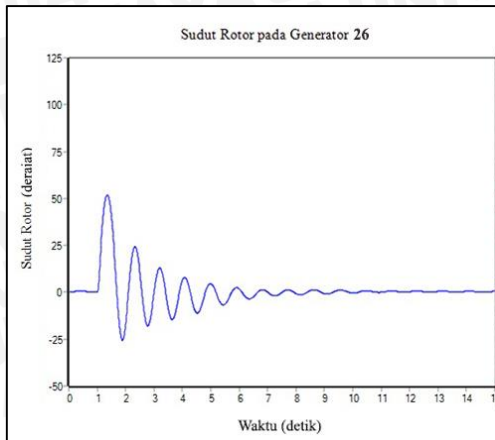
Pada simulasi ini, transmisi Bipolar HVDC dipasang diantara bus 24 dan 26. Sistem di jalankan selama 1 detik, dan diberi gangguan yang sama, yaitu gangguan pada bus 26 selama 0.1 detik. Hasil dari simulasi ditampilkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Bipolar HVDC Pembebanan 100 %

t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	0.3944	-3.5128	8.0	-0.6116	-2.8208
1.0	0.3899	-3.4250	8.5	0.9449	-3.5375
1.4	51.8514	-9.4065	9.0	-0.6852	-2.8570
1.5	39.1191	-11.0378	9.5	1.1115	-3.4120
2.0	-17.0167	0.5647	10.0	-0.3630	-3.0489
2.5	11.2817	-3.2361	10.5	0.8798	-3.2745
3.0	-0.6368	-2.3781	11.0	0.0137	-3.2030
3.5	-8.2614	-0.1017	11.5	0.5613	-3.2077
4.0	6.3292	-4.1811	12.0	0.3373	-3.2833
4.5	-10.9682	0.0575	12.5	0.3525	-3.2045
5.0	4.6825	-4.5837	13.0	0.4757	-3.2949
5.5	-6.3179	-1.3506	13.5	0.2886	-3.2271
6.0	1.8048	-4.0080	14.0	0.4882	-3.2882
6.5	-2.2990	-2.6810	14.5	0.3023	-3.2591

7.0	0.0985	-3.2034	15.0	0.4733	-3.2797
7.5	-0.0444	-3.3964			

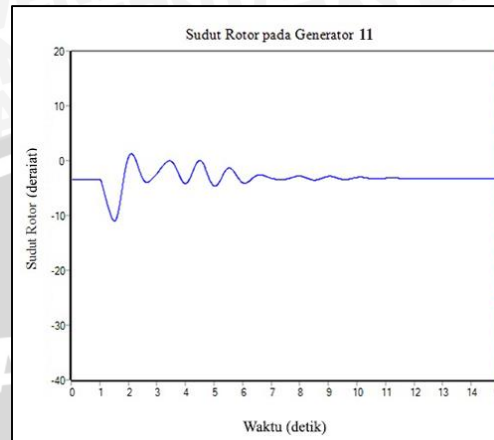
Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.8 Sudut Rotor Generator 26

Bipolar HVDC Pembebanan 100 %

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.9 Sudut Rotor Generator 11

Bipolar HVDC Pembebanan 100 %

Sumber : Hasil Simulasi

Pada Gambar 4.8, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $0.3944^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga  $51.8514^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-10. Pada Gambar 4.9, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $-3.5128^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 11 mengalami kenaikan hingga  $-11.0378^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-10.

#### 4.3.4 Perbandingan Respon Sistem

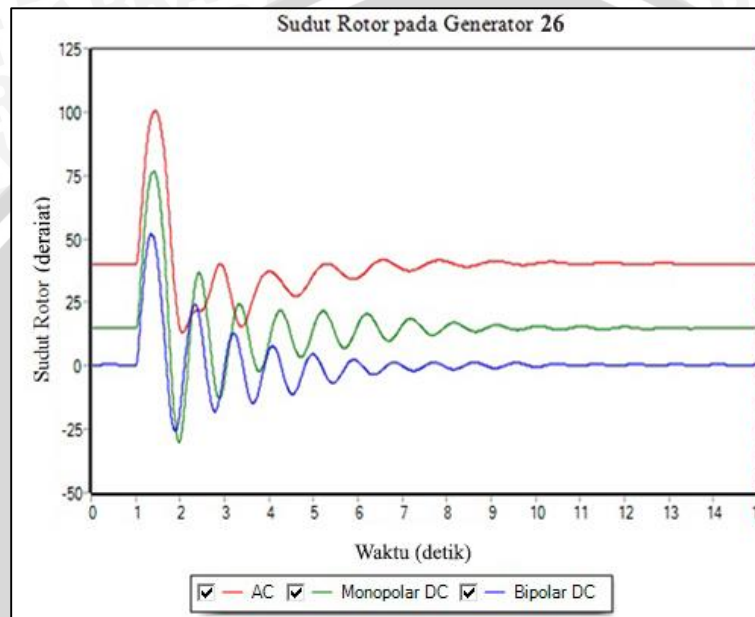
Berikut ini adalah hasil perbandingan Sudut Rotor Generator 26 masing-masing sistem transmisi ditampilkan pada Tabel 4.16:

Tabel 4.16 Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 100%

t (detik)	Jenis Saluran			t (detik)	Jenis Saluran		
	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC		AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
0.0	40.1386	14.9003	0.3944	8.0	41.0815	16.0330	-2.8208
1.0	40.1386	14.8926	0.3899	8.5	39.1550	14.1147	-3.5375
1.4	100.5043	76.7310	51.8514	9.0	41.2637	15.7952	-2.8570
1.5	90.2293	73.6894	39.1191	9.5	40.1191	14.2573	-3.4120
2.0	13.9731	-28.6175	-17.0167	10.0	40.3295	15.6540	-3.0489
2.5	22.1396	32.6811	11.2817	10.5	40.8093	14.3226	-3.2745
3.0	37.2812	-4.5511	-0.6368	11.0	40.0094	15.5270	-3.2030

3.5	18.9955	15.0983	-8.2614	11.5	40.6189	14.4145	-3.2077
4.0	37.1462	10.0967	6.3292	12.0	40.2619	15.3682	-3.2833
4.5	28.1136	11.0995	-10.9682	12.5	40.2160	14.5513	-3.2045
5.0	36.1233	15.3883	4.6825	13.0	40.4093	15.1953	-3.2949
5.5	38.6136	11.8670	-6.3179	13.5	40.1067	14.6898	-3.2271
6.0	34.7080	16.5269	1.8048	14.0	40.2892	15.0633	-3.2882
6.5	41.6216	13.0332	-2.2990	14.5	40.1868	14.7898	-3.2591
7.0	38.0510	16.3724	0.0985	15.0	40.1371	14.9831	-3.2797
7.5	39.8561	13.7540	-0.0444				

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.10 Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 Pembebanan 100%

Sumber : Hasil Simulasi

Dapat kita lihat pada Gambar 4.10 pada saat awal sistem bekerja, transmisi HVDC jenis Bipolar memiliki sudut rotor yang paling kecil dibanding dengan yang lain, yaitu senilai  $0.3944^\circ$ . Sedangkan transmisi HVDC jenis Monopolar memiliki sudut rotor kedua terkecil, senilai  $14.9003^\circ$ . Sudut rotor terbesar dialami oleh saluran transmisi AC senilai  $40.1386^\circ$ . Puncak Sudut Rotor terendah terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Bipolar, yakni senilai  $51.8514^\circ$ . Puncak Sudut Rotor urutan kedua, terjadi pada saluran HVDC jenis Monopolar, yakni senilai  $76.7310^\circ$ . Sedangkan saluran transmisi AC menjadi saluran yang memiliki puncak sudut rotor tertinggi, yakni senilai  $100.5043^\circ$ . Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor tercantum pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor

Saluran Transmisi	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
Sudut awal	$40.1386^\circ$	$14.9003^\circ$	$0.3944^\circ$

Puncak Sudut Rotor	100.5043°	76.7310°	51.8514°
--------------------	-----------	----------	----------

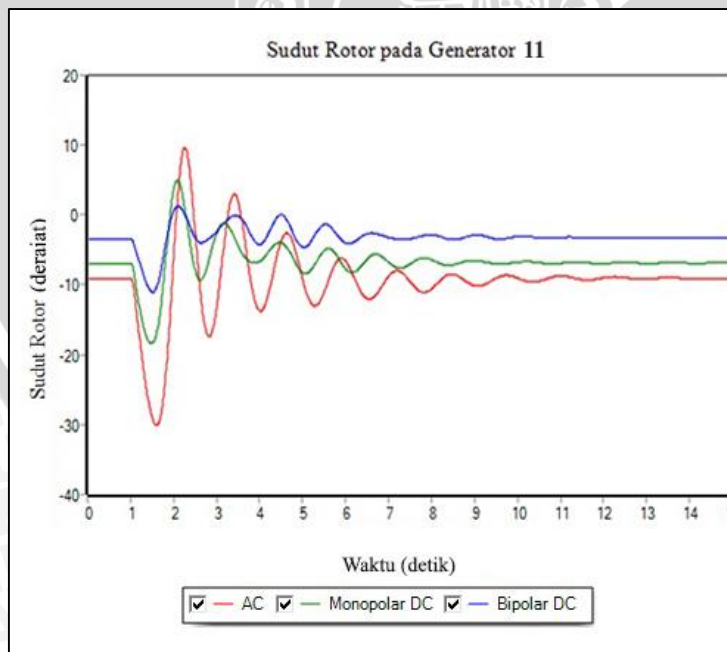
Sumber : Hasil Simulasi

Berikut ini adalah hasil perbandingan Sudut Rotor Generator 11 masing-masing sistem transmisi ditampilkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 100%

t (detik)	Jenis Saluran			t (detik)	Jenis Saluran		
	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC		AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
0.0	-9.1589	-7.0223	-3.5128	8.0	-10.5236	-6.4167	-0.7787
1	-9.1589	-6.9644	-3.4250	8.5	-8.4848	-7.0985	-0.8445
1.4	27.4003	-17.8393	-9.4065	9.0	-10.1077	-6.5024	-0.9010
1.5	-30.0778	-18.3962	-11.0378	9.5	-9.0052	-6.9592	-0.9474
2.0	-5.1449	3.9113	0.5647	10.0	-9.0302	-6.7336	-0.9858
2.5	-2.9411	-8.0311	-3.2361	10.5	-9.4425	-6.8066	-1.0175
3.0	-12.8242	-2.4353	-2.3781	11.1	-8.7045	-6.8979	-1.0482
3.5	1.7738	-4.5080	-0.1017	11.5	-9.2498	-6.7443	-1.0654
4.0	-13.7271	-6.6049	-4.1811	12.0	-8.9715	-6.9464	-1.0813
4.5	-3.5682	-3.9625	0.0575	12.5	-8.9569	-6.7619	-1.0945
5.0	-9.3491	-8.2657	-4.5837	13.0	-9.1721	-6.9222	-1.1048
5.5	-10.8974	-5.0264	-1.3506	13.5	-8.9448	-6.8119	-1.1127
6.0	-6.6410	-7.7392	-4.0080	14.0	-9.1387	-6.8839	-1.1183
6.5	-11.9796	-6.2616	-2.6810	14.5	-9.0848	-6.8533	-1.1238
7.0	-8.6958	-6.8090	-3.2034	15.0	-9.0651	-6.8585	-1.1258
7.5	-9.5799	-6.9650	-3.3964				

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.11 Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 100%

Sumber : Hasil Simulasi





Dapat kita lihat pada Gambar 4.11 pada saat awal sistem bekerja, transmisi HVDC jenis Bipolar memiliki sudut rotor yang paling kecil dibanding dengan yang lain, yaitu senilai  $-3.5128^\circ$ . Sedangkan transmisi HVDC jenis Monopolar memiliki sudut rotor kedua terkecil, senilai  $-7.0223^\circ$ . Sudut rotor terbesar dialami oleh saluran transmisi AC senilai  $-9.1589^\circ$ . Puncak Sudut Rotor terendah terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Bipolar, yakni senilai  $-11.0378^\circ$ . Puncak Sudut Rotor urutan kedua, terjadi pada saluran HVDC jenis Monopolar, yakni senilai  $-18.3962^\circ$ . Sedangkan saluran transmisi AC menjadi saluran yang memiliki puncak sudut rotor tertinggi, yakni senilai  $-30.0778^\circ$ . Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor tercantum pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor

Saluran Transmisi	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
Sudut awal	$-9.1589^\circ$	$-7.0223$	$-3.5128^\circ$
Puncak Sudut Rotor	$-30.0778^\circ$	$-18.3962^\circ$	$-11.0378^\circ$

Sumber : Hasil Simulasi

#### 4.4 Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Pembebanan 70%

##### 4.4.1 Saluran AC

##### 4.4.1.1 Simulasi Aliran Daya

Setelah simulasi dengan pembebanan 100%, simulasi dilakukan juga ketika beban senilai 70% dari beban semula. Hasil simulasi aliran daya ditunjukkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Simulasi Aliran Daya Saluran AC Pembebanan 70%

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1	-11.86	60.2	23.8	0	0
2	1	-11.86	99.4	-39.2	2073.4	293.0672
3	0.9997	-12.12	224	-97.3	0	0
4	0.9765	-16.24	473.2	149.1	0	0
5	0.9799	-15.78	508.9	32.9	0	0
6	0.9847	-14.4	445.2	177.1	0	0
7	0.9841	-15.64	331.1	245	0	0
8	0.9868	-16.58	240.1	67.9	0	0
9	0.9841	-16.88	767.9	55.3	0	0
10	0.9803	-15.75	375.2	116.2	0	0
11	1	-14.99	0	0	945.7	606.2841
12	0.995	-15.29	466.2	324.1	0	0
13	1	-14.93	455	189	255.5	402.5654
14	1	-14.55	0	0	452.9	731.2488

15	0.9597	-12.78	95.9	33.6	0	0
16	0.9907	-13.94	353.5	227.5	0	0
17	0.9823	-10.7	-237.3	2.1	0	0
18	1	-0.01	266	67.2	1669.5	422.9326
19	0.9691	-6.16	586.6	267.4	0	0
20	0.9489	-8.43	441.7	301	0	0
21	0.9853	-5.12	183.4	30.1	0	0
22	0.9924	-4.25	688.1	449.4	0	0
23	1	-4.05	102.2	14.7	413	547.7052
24	1	-2.3	301	143.5	227.5	350.377
25	0.961	-5.56	423.5	137.9	0	0
26	1	0	415.1	100.8	2094.614	345.6255
Total					8132	3700

Sumber : Hasil Simulasi

#### 4.4.1.2 Persamaan Sudut Daya

Persamaan Sudut Daya perlu dihitung terlebih dahulu, sebelum melakukan perhitungan kondisi sudut rotor generator. Disini didapatkan nilai tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut rotor awal tiap generator. Nilai pembangkitan masing-masing pembangkit diperoleh dari tabel 4.54. Perhitungan tegangan dalam peralihan pembangkit, sudut awal tiap generator dilakukan sesuai dengan yang tercantum dalam (Hadi Saadat, 1999:511).

Generator pada bus 11

$$I_{11} = \frac{(P_{11} - jQ_{11})}{V_{11}^*} = \frac{0.9457 + j0.60628}{1.000 \angle 14.99^\circ} = 1.1233 \angle -47.654^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} E_{11}' &= V_{11}^* + (X_d' \times I_{11}) \\ &= 1.000 \angle 14.99^\circ + (j0.221 \times 1.1233 \angle -47.654^\circ) \\ &= 1.22582 \angle 20.33^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\delta_{11} = 20.33^\circ$$

Generator pada bus 26

$$I_{26} = \frac{(P_{26} - jQ_{26})}{V_{26}^*} = \frac{2.0946 + j0.3456}{1.000 \angle 0^\circ} = 2.12294 \angle -9.3698^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} E_{26}' &= V_{26}^* + (X_d' \times I_{26}) \\ &= 1.000 \angle 0^\circ + (j0.221 \times 2.12294 \angle -9.3698^\circ) \\ &= 1.1717 \angle 23.2706^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\delta_{26} = 23.2706^\circ$$

Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.21.

Tabel 4.21 Tegangan peralihan Saluran AC Pembebanan 70%

No Gen	E' (p.u)	Delta 0 (derajat)
2	1.30438	29.4163

11	1.22582	20.33
13	1.10528	15.1723
14	1.18992	14.9767
18	1.15415	18.6519
23	1.13507	7.75298
24	1.08211	4.62536
26	1.1717	23.2706

Sumber: Hasil perhitungan

Ybus Reduksi sebelum dan setelah gangguan

-0.9664	-6.5818i	-0.8281	-1.1772i	-0.7568	-1.0605i	-0.7791	-1.0961i	-0.5859	-0.6393i	-0.5859	-0.6393i	-0.4265	-0.4240i	-0.4797	-0.4758i
-0.8281	-1.1772i	-0.8308	-6.1715i	-0.7349	-1.2439i	-0.7482	-1.2141i	-0.5536	-0.6356i	-0.4093	-0.4256i	-0.4025	-0.4141i	-0.4523	-0.4611i
-0.7568	-1.0605i	-0.7349	-1.2439i	-0.7084	-6.0101i	-0.7086	-1.3515i	-0.5165	-0.6375i	-0.3821	-0.4225i	-0.3753	-0.4076i	-0.4212	-0.4500i
-0.7791	-1.0961i	-0.7482	-1.2141i	-0.7086	-1.3515i	-0.7358	-5.9970i	-0.5352	-0.6783i	-0.3963	-0.4485i	-0.3891	-0.4319i	-0.4365	-0.4757i
-0.5859	-0.6393i	-0.5536	-0.6356i	-0.5165	-0.6375i	-0.5352	-0.6783i	-0.6283	-6.8707i	-0.3975	-0.7373i	-0.3849	-0.6733i	-0.4251	-0.6988i
-0.4332	-0.4325i	-0.4093	-0.4256i	-0.3821	-0.4225i	-0.3963	-0.4485i	-0.3975	-0.7373i	-0.4406	-6.2600i	-0.3765	-1.1645i	-0.3850	-0.9834i
-0.4265	-0.4240i	-0.4025	-0.4141i	-0.3753	-0.4076i	-0.3891	-0.4319i	-0.3849	-0.6733i	-0.3765	-1.1645i	-0.4025	-0.6086i	-0.4037	-1.2660i
-0.4797	-0.4758i	-0.4523	-0.4611i	-0.4212	-0.4500i	-0.4365	-0.4757i	-0.4251	-0.6988i	-0.3850	-0.9834i	-0.4037	-1.2660i	-0.4830	-6.2902i

Ybus Reduksi saat gangguan

-0.7252	-6.5180i	-0.5984	-1.1130i	-0.5391	-0.9941i	-0.5518	-1.0243i	-0.3211	-0.4941i	-0.1289	-0.1888i	-0.0641	-0.0933i	0
-0.5984	-1.1130i	-0.6121	-6.1071i	-0.5278	-1.1776i	-0.5319	-1.1425i	-0.3025	-0.4932i	-0.1216	-0.1886i	-0.0605	-0.0932i	0
(1.2637	-118.26)	(6.1377	-95.72)	(1.2904	-114.14)	(1.2603	-114.96)	(0.5786	-121.52)	(0.2244	-122.81)	(0.1111	-122.97)	(0.0
-0.5391	-0.9941i	-0.5278	-1.1776i	-0.5122	-5.9422i	-0.5038	-1.2784i	-0.2801	-0.4961i	-0.1129	-0.1900i	-0.0562	-0.0939i	0
-0.5518	-1.0243i	-0.5319	-1.1425i	-0.5038	-1.2784i	-0.5221	-5.9183i	-0.2891	-0.5278i	-0.1167	-0.2022i	-0.0581	-0.0999i	0
-0.3211	-0.4941i	-0.3025	-0.4932i	-0.2801	-0.4961i	-0.2891	-0.5278i	-0.3595	-6.6229i	-0.1109	-0.3622i	-0.0554	-0.1792i	0
-0.1289	-0.1888i	-0.1216	-0.1886i	-0.1129	-0.1900i	-0.1167	-0.2022i	-0.1109	-0.3622i	-0.1595	-5.7191i	-0.0675	-0.4626i	0
-0.0641	-0.0933i	-0.0605	-0.0932i	-0.0562	-0.0939i	-0.0581	-0.0999i	-0.0554	-0.1792i	-0.0675	-0.4626i	-0.0713	-5.1803i	-4.5248i
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Perhitungan step by step saat gangguan

$$P_{e26} = 0 \text{ pu}$$

$$P_{m26} = 2.0946 \text{ pu}$$

$$P_{a26} = P_{m26} - P_{e26}$$

$$= 2.0946 - 0$$

$$= 2.0946 \text{ pu}$$

$$k = \frac{180f}{H} (\Delta t)^2$$

$$= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2$$

$$= 0.1276$$

$$kP_{a26} = (0.1276) \cdot (2.0946) = 0.2673$$

$$\Delta\delta_{1(26)} = \Delta\delta_{0(26)} + kP_{a26}$$

$$= 0 + 0.2673$$

$$= 0.2673^\circ$$

$$\delta_{1(26)} = \delta_{0(26)} + \Delta\delta_{1(26)}$$

$$= 23.2706 + 0.2673$$

$$= 23.5379^\circ$$



$$\begin{aligned}
 P_{e11} &= G_{11-11} \cdot |E'_{11}|^2 \\
 &+ |Y_{11-2}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_2| \cdot \sin(\delta_{11-2} - \varphi_{11-2}) \\
 &+ |Y_{11-13}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{13}| \cdot \sin(\delta_{11-13} - \varphi_{11-13}) \\
 &+ |Y_{11-14}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{14}| \cdot \sin(\delta_{11-14} - \varphi_{11-14}) \\
 &+ |Y_{11-18}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{18}| \cdot \sin(\delta_{11-18} - \varphi_{11-18}) \\
 &+ |Y_{11-23}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{23}| \cdot \sin(\delta_{11-23} - \varphi_{11-23}) \\
 &+ |Y_{11-24}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{24}| \cdot \sin(\delta_{11-24} - \varphi_{11-24})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{e11} &= -0.6121 \cdot |1.2258|^2 \\
 &+ |1.2637| \cdot |1.2258| \cdot |1.3043| \cdot \sin(20.33 - (-118.26)) \\
 &+ |1.2904| \cdot |1.2258| \cdot |1.1052| \cdot \sin(20.33 - (-114.14)) \\
 &+ |1.2603| \cdot |1.2258| \cdot |1.1899| \cdot \sin(20.33 - (-114.96)) \\
 &+ |0.5786| \cdot |1.2258| \cdot |1.1541| \cdot \sin(20.33 - (-121.52)) \\
 &+ |0.2244| \cdot |1.2258| \cdot |1.135| \cdot \sin(20.33 - (-122.81)) \\
 &+ |0.1111| \cdot |1.2258| \cdot |1.0821| \cdot \sin(20.33 - (-122.97))
 \end{aligned}$$

$$P_{e11} = -0.9198 + 1.3363 + 1.2476 + 1.2931 + 0.5056 + 0.1873 + 0.0881$$

$$P_{e11} = 3.7385 \text{ pu}$$

$$P_{m11} = 0.94547 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned}
 P_{a11} &= P_{m11} - P_{e11} \\
 &= 0.94547 - 3.7385 \\
 &= -2.7928 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{180f}{H} (\Delta t)^2 \\
 &= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2 \\
 &= 0.1276
 \end{aligned}$$

$$kP_{a11} = (0.1276) \cdot (-2.7928) = -0.3565$$

$$\begin{aligned}
 \Delta\delta_{1(11)} &= \Delta\delta_{0(11)} + kP_{a11} \\
 &= 0 + (-0.3565) \\
 &= -0.3565^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{1(11)} &= \delta_{0(11)} + \Delta\delta_{1(11)} \\
 &= 20.33 + (-0.3565) \\
 &= 19.9734^\circ
 \end{aligned}$$



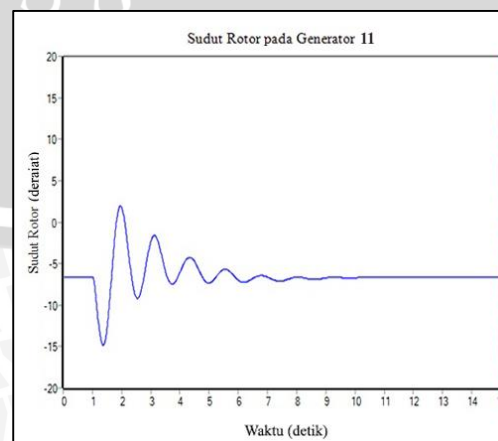
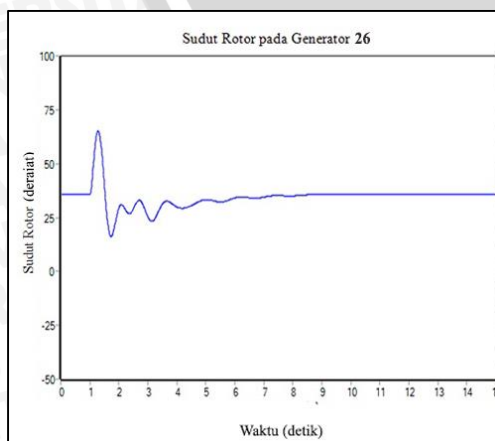
#### 4.4.1.3 Simulasi Kestabilan Peralihan

Pada simulasi ini, sistem masih menggunakan saluran transmisi AC seluruhnya dengan pembebanan sebesar 70%. Sistem di jalankan selama 1 detik, dan diberi gangguan pada bus 26 selama 0.1 detik. Hasil dari simulasi ditampilkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Bipolar AC Pembebanan 70 %

t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	35.7727	-6.6275	8.0	35.0758	-6.6165
1.0	35.7727	-6.6275	8.5	35.5873	-6.8924
1.3	65.28105	-14.7999	9.0	35.5870	-6.7078
1.5	37.1438	-12.1945	9.5	35.7290	-6.6731
2.0	30.0411	1.6231	10.0	35.8734	-6.7106
2.5	29.6419	-9.1240	10.5	35.8416	-6.5877
3.0	24.7999	-2.1163	11.0	35.9577	-6.6466
3.5	31.5576	-6.1278	11.5	35.9284	-6.5889
4.0	29.8219	-5.8678	12.0	35.9528	-6.5963
4.5	30.6088	-4.7978	12.5	35.9577	-6.6047
5.0	33.3466	-7.3419	13.0	35.9308	-6.5883
5.5	32.2743	-5.6761	13.5	35.9371	-6.6117
6.0	34.1768	-7.0226	14.0	35.9069	-6.6044
6.5	34.1787	-6.7610	14.5	35.8962	-6.6157
7.0	34.5383	-6.6322	15.0	35.8780	-6.6211
7.5	35.2142	-7.0769			

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.12 Sudut Rotor Generator 26

Saluran AC Pembebanan 70 %

Sumber : Hasil Simulasi

Gambar 4.13 Sudut Rotor Generator 11

Saluran AC Pembebanan 70 %

Sumber : Hasil Simulasi

Pada Gambar 4.12, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $35.7727^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga  $65.28105^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-9. Pada Gambar 4.13, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $-6.6275^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 11 mengalami kenaikan hingga  $-14.7999^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-10.

#### 4.4.2 Saluran Monopolar HVDC

Pada rancangan ini saluran transmisi AC yang semula menghubungkan bus 26 ke 24 diganti dengan saluran transmisi DC. Untuk gambar konfigurasi yang digunakan sama halnya dengan ketika pembebanan 100%. Hal yang membedakan dalam rancangan ini adalah nilai *set value* (MW) yang mempengaruhi nilai sudut kontrol pada *inverter* ( $\alpha_2$ ). Perhitungan sudut kontrol ditunjukkan pada perhitungan di bawah ini. Hasil dari perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.23.

##### a. Operasi pada Rectifier

Untuk mendapatkan nilai sudut kontrol minimum pada rectifier ( $\alpha_{1min}$ ) dengan perhitungan berikut:

$$V_{d1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{LL} = 1.3505 BTE_{LL}$$

$$V_d = V_{d1} \cos \alpha$$

$$150 = \frac{3\sqrt{2} \times 1 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_1$$

$$150 = 330.8662 \cos \alpha_1$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{150}{330.8662}$$

$$\alpha_1 = 63.0408^\circ$$

Sudut kontrol maksimum ( $\alpha_{1max}$ ) pada rectifier:

$$142.5 = \frac{3\sqrt{2} \times 1 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_1$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{142.5}{330.8662}$$

$$\alpha_1 = 64.4887^\circ$$

### b. Operasi pada Inverter

Untuk mendapatkan nilai sudut kontrol minimum pada inverter ( $\alpha_{2\min}$ ) dengan perhitungan berikut:

$$V_{dc2} = V_{dc1} - I_d \cdot R_j$$

$$V_{dc2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{LL} = 1.3505 BTE_{LL}$$

$$V_d = V_{dc2} \cos \beta$$

$$P_{ac} = P_{dc} = V_d I_d$$

$$V_{dc2} = 150 - \left( \frac{845}{150} \times 0.016 \right)$$

$$V_{dc2} = 150 - 0.0901$$

$$V_{dc2} = 149.9099$$

$$149.9099 = \frac{3\sqrt{2} \times 1 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_2$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{149.9099}{330.8662}$$

$$\alpha_2 = 63.0583^\circ$$

Sudut kontrol maksimum ( $\alpha_{2\max}$ ) pada inverter:

$$V_{dc2} = 142.5 - \left( \frac{845}{142.5} \times 0.016 \right)$$

$$V_{dc2} = 142.5 - 0.0948$$

$$V_{dc2} = 142.4052$$

$$142.4052 = \frac{3\sqrt{2} \times 1 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_2$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{142.4052}{330.8662}$$

$$\alpha_2 = 64.5069^\circ$$

Tabel 4.23 Parameter Transmisi Monopolar HVDC Transmisi Jawa Bali 500 kV

	Rectifier	Inverter
Bus	26	24
Reaktansi komutasi	0.002 $\Omega$	0.002 $\Omega$
Sudut kontrol minimum	63.0408°	63.0583°
Sudut kontrol maksimum	64.4887°	64.5069°
Regulasi transformator	1.5000	1.5000
Resistansi saluran DC	0.016 $\Omega$	
Set value	845 MW	

Sumber: Perhitungan

#### 4.4.2.1 Simulasi Aliran Daya

Hasil simulasi aliran daya ditunjukkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Simulasi Aliran Daya Monopolar HVDC Pembebanan 70%

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1	-11.81	60.2	23.8	0	0
2	1	-11.8	99.4	-39.2	2073.4	293.0343
3	0.9997	-12.06	224	-97.3	0	0
4	0.9765	-16.19	473.2	149.1	0	0
5	0.9799	-15.72	508.9	32.9	0	0
No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
6	0.9847	-14.35	445.2	177.1	0	0
7	0.9841	-15.59	331.1	245	0	0
8	0.9868	-16.52	240.1	67.9	0	0
9	0.9841	-16.83	767.9	55.3	0	0
10	0.9803	-15.69	375.2	116.2	0	0
11	1	-14.94	0	0	945.7	909.9274
12	0.995	-15.24	466.2	324.1	0	0
13	1	-14.87	455	189	255.5	577.8687
14	1	-14.5	0	0	452.9	1144.4590
15	0.9597	-12.73	95.9	33.6	0	0
16	0.9907	-13.88	353.5	227.5	0	0
17	0.9823	-10.64	-237.3	2.1	0	0
18	1	0.05	266	67.2	1669.5	723.9705
19	0.9691	-6.1	586.6	267.4	0	0
20	0.9489	-8.38	441.7	301	0	0
21	0.9853	-5.03	183.4	30.1	0	0
22	0.9924	-4.16	688.1	449.4	0	0
23	1	-3.96	102.2	14.7	413	824.1741
24	1	-2.2	301	143.5	227.5	3893.5150
25	0.961	-5.53	423.5	137.9	0	0
26	1	0	415.1	100.8	2092.083	3256.2430
27	0.9996	0	0	0	0	0
28	1	-2.2	0	0	0	0
Total					8129.583	11623.192

Sumber : Hasil Simulasi

#### 4.4.2.2 Persamaan Sudut Daya

Persamaan Sudut Daya perlu dihitung terlebih dahulu, sebelum melakukan perhitungan kondisi sudut rotor generator. Disini didapatkan nilai tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut rotor awal tiap generator. Nilai pembangkitan masing-masing pembangkit diperoleh dari tabel 4.24. Berikut ini perhitungan tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut awal tiap generator:

Generator pada bus 11



$$I_{11} = \frac{(P_{11} - jQ_{11})}{V_{11}^*} = \frac{0.9457 + j0.60626}{1.000 \angle 14.94^\circ} = 1.1233 \angle -47.603^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} E_{11}' &= V_{11}^* + (X_d' \times I_{11}) \\ &= 1.000 \angle 14.94^\circ + (j0.221 \times 1.1233 \angle -47.603^\circ) \\ &= 1.22565 \angle 20.2989^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\delta_{11} = 20.2989^\circ$$

Generator pada bus 26

$$I_{26} = \frac{(P_{26} - jQ_{26})}{V_{26}^*} = \frac{2.09208 + j4.0419}{1.000 \angle 0^\circ} = 4.5512 \angle -62.634^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} E_{26}' &= V_{26}^* + (X_d' \times I_{26}) \\ &= 1.000 \angle 0^\circ + (j0.221 \times 4.5512 \angle -62.634^\circ) \\ &= 1.9489 \angle 13.7235^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\delta_{26} = 13.7235^\circ$$

Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.25.

Tabel 4.25 Tegangan peralihan Monopolar HVDC Pembebanan 70%

No Gen	E' (p.u)	Delta 0 (derajat)
2	1.30374	29.3888
11	1.22565	20.2989
13	1.10527	15.1237
14	1.18992	14.9423
18	1.15349	18.6132
23	1.13489	7.68438
24	1.86174	1.71141
26	1.9489	13.7235

Sumber: Hasil perhitungan

Ybus Reduksi sebelum dan sesudah gangguan

-1.1014 - 6.6061i	-0.9611 - 1.2068i	-0.8824 - 1.0906i	-0.9079 - 1.1263i	-0.6970 - 0.6641i	-0.5307 - 0.4595i	-0.5274 - 0.4547i	-0.54927 - 0.4768i
-0.9611 - 1.2068i	-0.9618 - 6.2066i	-0.8586 - 1.2795i	-0.8750 - 1.2497i	-0.6623 - 0.6631i	-0.5041 - 0.4538i	-0.5006 - 0.4456i	-0.5211 - 0.4658i
-0.8824 - 1.0906i	-0.8586 - 1.2795i	-0.8252 - 6.0467i	-0.8283 - 1.3881i	-0.6192 - 0.6660i	-0.4716 - 0.4507i	-0.4677 - 0.4387i	-0.4867 - 0.4570i
-0.9079 - 1.1263i	-0.8750 - 1.2497i	-0.8283 - 1.3881i	-0.8586 - 6.0337i	-0.6409 - 0.7079i	-0.4884 - 0.4779i	-0.4843 - 0.4642i	-0.5039 - 0.4831i
-0.6970 - 0.6641i	-0.6623 - 0.6631i	-0.6192 - 0.6660i	-0.6409 - 0.7079i	-0.7252 - 6.9126i	-0.4824 - 0.7751i	-0.4721 - 0.7117i	-0.4892 - 0.7232i
-0.5307 - 0.4595i	-0.5041 - 0.4538i	-0.4716 - 0.4507i	-0.4884 - 0.4779i	-0.4824 - 0.7751i	-0.5114 - 6.2752i	-0.4462 - 1.1602i	-0.4576 - 1.0912i
-0.5274 - 0.4547i	-0.5006 - 0.4456i	-0.4677 - 0.4387i	-0.4843 - 0.4642i	-0.4721 - 0.7117i	-0.4462 - 1.1602i	-0.4706 - 6.0547i	-0.4832 - 1.4172i
-0.54927 - 0.4768i	-0.5211 - 0.4658i	-0.4867 - 0.4570i	-0.5039 - 0.4831i	-0.4892 - 0.7232i	-0.4576 - 1.0912i	-0.4832 - 1.4172i	-0.4987 - 6.1353i

Ybus Reduksi saat gangguan

-0.7916 - 6.5563i	-0.6641 - 1.1546i	-0.5999 - 1.0338i	-0.6132 - 1.0639i	-0.3530 - 0.5103i	-0.1146 - 0.1636i	-0.0278 - 0.0452i	0
-0.6641 - 1.1546i	-0.6771 - 6.1524i	-0.5880 - 1.2210i	-0.5927 - 1.1856i	-0.3340 - 0.5106i	-0.1085 - 0.1638i	-0.0262 - 0.0451i	0
(1.3322 - 199.9)	(6.1896z - 96.28)	(1.3553z - 115.71)	(1.3255z - 116.56)	(0.6101z - 123.19)	(0.1964z - 123.52)	(0.0522z - 120.15)	(0z0)
-0.5999 - 1.0338i	-0.5880 - 1.2210i	-0.5682 - 5.9846i	-0.5603 - 1.3203i	-0.3092 - 0.5126i	-0.1005 - 0.1645i	-0.0241 - 0.0452i	0
-0.6132 - 1.0639i	-0.5927 - 1.1856i	-0.5603 - 1.3203i	-0.5791 - 5.9599i	-0.3185 - 0.5441i	-0.1036 - 0.1746i	-0.0247 - 0.0479i	0
-0.3530 - 0.5103i	-0.3340 - 0.5106i	-0.3092 - 0.5126i	-0.3185 - 0.5441i	-0.3740 - 6.6276i	-0.0916 - 0.3030i	-0.0916 - 0.3030i	0
-0.1146 - 0.1636i	-0.1085 - 0.1638i	-0.1005 - 0.1645i	-0.1036 - 0.1746i	-0.0916 - 0.3030i	-0.1176 - 5.5440i	-0.0125 - 0.0209i	0
-0.0278 - 0.0452i	-0.0262 - 0.0451i	-0.0241 - 0.0452i	-0.0247 - 0.0479i	-0.0195 - 0.0818i	-0.0125 - 0.0209i	-0.0060 - 4.8086i	0
0	0	0	0	0	0	0	-4.5248i

Perhitungan step by step saat gangguan

$$P_{e26} = 0 \text{ pu}$$

$$P_{m26} = 2.092 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned}
 P_{a26} &= P_{m26} - P_{e26} \\
 &= 2.092 - 0 \\
 &= 2.092 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{180f}{H} (\Delta t)^2 \\
 &= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2 \\
 &= 0.1276
 \end{aligned}$$

$$kP_{a26} = (0.1276) \cdot (2.092) = 0.2670$$

$$\begin{aligned}
 \Delta\delta_{1(26)} &= \Delta\delta_{0(26)} + kP_{a26} \\
 &= 0 + 0.2670 \\
 &= 0.2670^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{1(26)} &= \delta_{0(26)} + \Delta\delta_{1(26)} \\
 &= 13.7235 + 0.2670 \\
 &= 13.9905^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{e11} &= G_{11-11} \cdot |E'_{11}|^2 \\
 &+ |Y_{11-2}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_2| \cdot \sin(\delta_{11-2} - \phi_{11-2}) \\
 &+ |Y_{11-13}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{13}| \cdot \sin(\delta_{11-13} - \phi_{11-13}) \\
 &+ |Y_{11-14}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{14}| \cdot \sin(\delta_{11-14} - \phi_{11-14}) \\
 &+ |Y_{11-18}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{18}| \cdot \sin(\delta_{11-18} - \phi_{11-18}) \\
 &+ |Y_{11-23}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{23}| \cdot \sin(\delta_{11-23} - \phi_{11-23}) \\
 &+ |Y_{11-24}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{24}| \cdot \sin(\delta_{11-24} - \phi_{11-24})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{e11} &= -0.6771 \cdot |1.2256|^2 \\
 &+ |1.332| \cdot |1.2256| \cdot |1.3037| \cdot \sin(20.2989 - (-119.9)) \\
 &+ |1.3553| \cdot |1.2256| \cdot |1.1052| \cdot \sin(20.2989 - (-115.71)) \\
 &+ |1.3255| \cdot |1.2256| \cdot |1.1899| \cdot \sin(20.2989 - (-116.56)) \\
 &+ |0.6101| \cdot |1.2256| \cdot |1.1534| \cdot \sin(20.2989 - (-123.91)) \\
 &+ |0.1964| \cdot |1.2256| \cdot |1.1348| \cdot \sin(20.2989 - (-123.52)) \\
 &+ |0.0522| \cdot |1.2256| \cdot |1.8617| \cdot \sin(20.2989 - (-120.15))
 \end{aligned}$$

$$P_{e11} = -1.0172 + 1.361 + 1.275 + 1.3219 + 0.51323 + 0.1613 + 0.0759$$

$$P_{e11} = 3.6925 \text{ pu}$$

$$P_{m11} = 0.9457 \text{ pu}$$

$$P_{a11} = P_{m11} - P_{e11}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.9457 - 3.6925 \\
 &= -2.7468 \text{ pu} \\
 k &= \frac{180f}{H} (\Delta t)^2 \\
 &= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2 \\
 &= 0.1276
 \end{aligned}$$

$$kP_{a11} = (0.1276) \cdot (-2.7468) = -0.3506$$

$$\begin{aligned}
 \Delta\delta_{1(11)} &= \Delta\delta_{0(11)} + kP_{a11} \\
 &= 0 + (-0.3506) \\
 &= -0.3506^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{1(11)} &= \delta_{0(11)} + \Delta\delta_{1(11)} \\
 &= 20.2989 + (-0.3506) \\
 &= 19.9482^\circ
 \end{aligned}$$

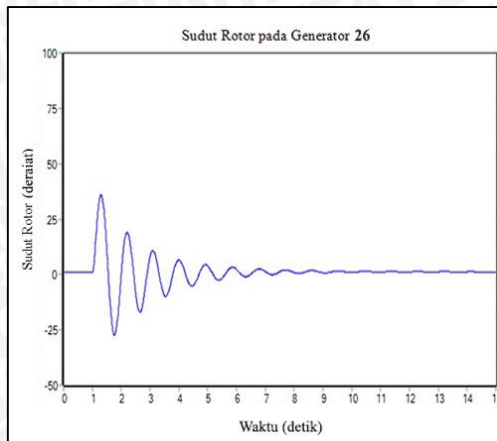
#### 4.4.2.3 Simulasi Kestabilan Peralihan

Pada simulasi yang kedua, transmisi HVDC jenis Monopolar menggantikan saluran transmisi yang menghubungkan antara bus 24 dan 26 dengan pembebanan sebesar 70%. Sistem di jalankan selama 1 detik, dan diberi gangguan yang sama, yaitu gangguan pada bus 26 selama 0.1 detik. Hasil dari simulasi ditampilkan pada Tabel 4.26.

Tabel 4.26 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Monopolar HVDC Pembebanan 70%

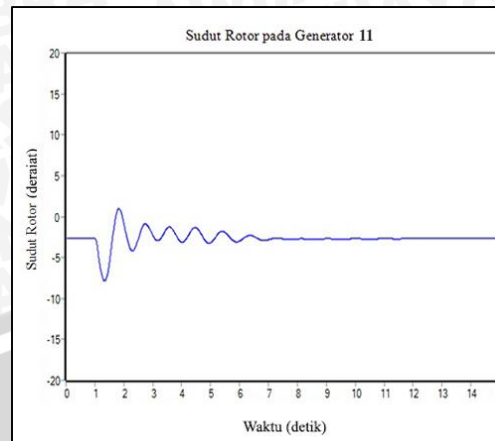
t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	1.1974	-2.6853	8.0	0.8069	-2.7170
1.0	1.1993	-2.6875	8.5	1.6638	-2.8069
1.3	<b>36.0307</b>	<b>-7.8455</b>	9.0	0.7660	-2.6823
1.5	7.1777	-5.1798	9.5	1.6223	-2.7994
2.0	3.0324	-1.1042	10.0	0.9154	-2.6666
2.5	-10.1266	-2.4689	10.5	1.4417	-2.7522
3.0	9.1337	-2.4009	11.0	1.0961	-2.6660
3.5	-9.7579	-1.3447	11.5	1.3009	-2.7027
4.0	6.5522	-3.1148	12.0	1.1892	-2.6674
4.5	-4.9596	-1.3603	12.5	1.2301	-2.6705
5.0	3.8354	-3.1639	13.0	1.2348	-2.6680
5.5	-1.5909	-1.9343	13.5	1.2024	-2.6596
6.0	2.2194	-2.9570	14.0	1.2447	-2.6654
6.5	0.2813	-2.4425	14.5	1.1892	-2.6576
7.0	1.2689	-2.7976	15.0	1.2410	-2.6666
7.5	1.3024	-2.7174			

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.14 Sudut Rotor Generator 26 Monopolar HVDC Pembebanan 70%

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.15 Sudut Rotor Generator 11 Monopolar HVDC Pembebanan 70%

Sumber : Hasil Simulasi

Pada Gambar 4.14, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $1.1974^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga  $36.0307^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-10. Pada Gambar 4.15, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $-2.6853^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 11 mengalami kenaikan hingga  $-7.8455^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-8.

#### 4.4.3 Saluran Bipolar HVDC

Rancangan ini masih tetap mengganti saluran yang menghubungkan antara bus 26 dan bus 24 dengan saluran DC dengan konfigurasi *bipolar link*. Hal yang membedakan dengan konfigurasi dengan pembebanan 100% adalah *set value* (MW), sehingga sudut kontrol pada *inverter* juga berbeda. Hal itu dikarenakan sudut kontrol pada inverter dipengaruhi oleh *set value*. Perhitungan sudut kontrol ditunjukkan pada perhitungan di bawah ini. Hasil dari perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.27.

##### a. Operasi pada Rectifier

Untuk mendapatkan nilai sudut kontrol minimum pada rectifier ( $\alpha_{1min}$ ) dengan perhitungan berikut:

$$V_{d1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{LL} = 1.3505 BTE_{LL}$$

$$V_d = V_{d1} \cos \alpha$$

$$150 = \frac{3\sqrt{2} \times 2 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_1$$

$$150 = 661.7324 \cos \alpha_1$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{150}{661.7324}$$

$$\alpha_1 = 76.8984^\circ$$

Sudut kontrol maksimum ( $\alpha_{1\max}$ ) pada rectifier:

$$142.5 = \frac{3\sqrt{2} \times 2 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{125.5}{661.7324}$$

$$\alpha_1 = 77.5642^\circ$$

### b. Operasi pada Inverter

Untuk mendapatkan nilai sudut kontrol minimum pada inverter ( $\alpha_{2\min}$ ) dengan perhitungan berikut:

$$V_{dc2} = V_{dc1} - I_d \cdot R_j$$

$$V_{dc2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{LL} = 1.3505 BTE_{LL}$$

$$V_d = V_{dc2} \cos \alpha_2$$

$$P_{ac} = P_{dc} = V_d I_d$$

$$V_{dc2} = 150 - \left( \frac{422.5}{150} \times 0.016 \right)$$

$$V_{dc2} = 150 - 0.0450$$

$$V_{dc2} = 149.9950$$

$$149.9950 = \frac{3\sqrt{2} \times 2 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_2$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{149.9950}{661.7324}$$

$$\alpha_2 = 76.9024^\circ$$

Sudut kontrol maksimum ( $\alpha_{2\max}$ ) pada inverter:

$$V_{dc2} = 142.5 - \left( \frac{422.5}{142.5} \times 0.016 \right)$$

$$V_{dc2} = 142.5 - 0.0474$$

$$V_{dc2} = 142.4526$$

$$142.4526 = \frac{3\sqrt{2} \times 2 \times 0.7 \times 350}{\pi} \cos \alpha_2$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{142.4526}{661.7324}$$

$$\alpha_2 = 77.5685^\circ$$

Tabel 4.27 Parameter Transmisi Bipolar HVDC Transmisi Jawa Bali 500 kV

	<b>Rectifier</b>	<b>Inverter</b>
Bus	26	24
Reaktansi komutasi	0.002 $\Omega$	0.002 $\Omega$
Sudut kontrol minimum	76.8984 $^\circ$	76.9024 $^\circ$
Sudut kontrol maksimum	77.5642 $^\circ$	77.5685 $^\circ$
Regulasi transformator	1.5000	1.5000
Resistansi saluran DC	0.016 $\Omega$	
Set value	422.5 MW	

Sumber: Perhitungan

#### 4.4.3.1 Simulasi Aliran Daya

Hasil simulasi aliran daya ditunjukkan pada Tabel 4.28.

Tabel 4.28 Simulasi Aliran Daya Saluran Bipolar HVDC Pembebanan 70%

No. Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1	-11.8	60.2	23.8	0	0
2	1	-11.8	99.4	-39.2	2073.4	293.0315
3	0.9997	-12.06	224	-97.3	0	0
4	0.9765	-16.19	473.2	149.1	0	0
5	0.9799	-15.72	508.9	32.9	0	0
6	0.9847	-14.34	445.2	177.1	0	0
7	0.9841	-15.58	331.1	245	0	0
8	0.9868	-16.52	240.1	67.9	0	0
9	0.9841	-16.82	767.9	55.3	0	0
10	0.9803	-15.69	375.2	116.2	0	0
11	1	-14.93	0	0	945.7	606.2545
12	0.995	-15.23	466.2	324.1	0	0
13	1	-14.87	455	189	255.5	402.5672
14	1	-14.49	0	0	452.9	731.3184
15	0.9597	-12.72	95.9	33.6	0	0
16	0.9907	-13.88	353.5	227.5	0	0
17	0.9823	-10.64	-237.3	2.1	0	0
18	1	0.05	266	-67.2	1669.5	422.9751
19	0.9691	-6.1	586.6	267.4	0	0
20	0.9489	-8.38	441.7	301	0	0
21	0.9853	-5.02	183.4	30.1	0	0
22	0.9924	-4.15	688.1	449.4	0	0
23	1	-3.95	102.2	14.7	413	547.8688
24	1	-2.19	301	143.5	227.5	5255.248
25	0.961	-5.53	423.5	137.9	0	0
26	1	0	415.1	100.8	2091.828	5400.86
27	0.9998	0	0	0	0	0
28	0.9998	-2.19	0	0	0	0
Total					8129.328	13660.124

Sumber : Hasil Simulasi

#### 4.4.3.2 Persamaan Sudut Daya

Persamaan Sudut Daya perlu dihitung terlebih dahulu, sebelum melakukan perhitungan kondisi sudut rotor generator. Disini didapatkan nilai tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut rotor awal tiap generator. Nilai pembangkitan masing-masing pembangkit diperoleh dari tabel 4.28. Perhitungan tegangan dalam peralihan pembangkit dan sudut awal tiap generator dilakukan sesuai dengan yang tercantum dalam (Hadi Saadat, 1999:511).

zGenerator pada bus 11

$$I_{11} = \frac{(P_{11} - jQ_{11})}{V_{11}^*} = \frac{0.9457 + j0.60625}{1.000 \angle 14.93^\circ} = 1.12334 \angle -47.592^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} E_{11}' &= V_{11}^* + (X_d' \times I_{11}) \\ &= 1.000 \angle 14.93^\circ + (j0.221 \times 1.12334 \angle -47.592^\circ) \\ &= 1.22562 \angle 20.2927^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\delta_{11} = 20.2927^\circ$$

Generator pada bus 26

$$I_{26} = \frac{(P_{26} - jQ_{26})}{V_{26}^*} = \frac{2.09208 + j5.40086}{1.000 \angle 0^\circ} = 5.79181 \angle -68.828^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} E_{26}' &= V_{26}^* + (X_d' \times I_{26}) \\ &= 1.000 \angle 0^\circ + (j0.221 \times 5.79181 \angle -68.828^\circ) \\ &= 2.24177 \angle 11.9008^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\delta_{26} = 11.9008^\circ$$

Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.29.

Tabel 4.29 Tegangan peralihan Bipolar HVDC Pembebanan 70%

No Gen	E' (p.u)	Delta 0 (derajat)
2	1.30374	29.3888
11	1.22562	20.2927
13	1.10527	15.1237
14	1.18992	14.9355
18	1.15349	18.6132
23	1.13487	7.67677
24	2.1622	1.16796
26	2.24177	11.9008

Sumber: Hasil perhitungan

Ybus Reduksi sebelum dan sesudah gangguan

-0.9644 - 6.5821i	-0.8263 - 1.1775i	-0.7551 - 1.0608i	-0.7774 - 1.0963i	-0.5847 - 0.6398i	-0.4369 - 0.4358i	-0.4327 - 0.4290i	-0.4678 - 0.4691i
-0.8263 - 1.1775i	-0.8291 - 6.1718i	-0.7334 - 1.2442i	-0.7466 - 1.2144i	-0.5525 - 0.6360i	-0.4128 - 0.4285i	-0.4083 - 0.4186i	-0.4412 - 0.4551i
-0.7551 - 1.0608i	-0.7334 - 1.2442i	-0.7070 - 6.0104i	-0.7071 - 1.3518i	-0.5155 - 0.6379i	-0.3853 - 0.4251i	-0.3807 - 0.4117i	-0.4110 - 0.4446i
-0.7774 - 1.0963i	-0.7466 - 1.2144i	-0.7071 - 1.3518i	-0.7343 - 5.9973i	-0.5342 - 0.6787i	-0.3996 - 0.4512i	-0.3947 - 0.4361i	-0.4260 - 0.4701i
-0.5847 - 0.6398i	-0.5525 - 0.6360i	-0.5155 - 0.6379i	-0.5342 - 0.6787i	-0.6276 - 6.8711i	-0.4003 - 0.7388i	-0.3895 - 0.6756i	-0.4167 - 0.6961i
-0.4369 - 0.4358i	-0.4128 - 0.4285i	-0.3853 - 0.4251i	-0.3996 - 0.4512i	-0.4003 - 0.7388i	-0.4405 - 6.2480i	-0.3755 - 1.1450i	-0.3920 - 1.0161i
-0.4327 - 0.4290i	-0.4083 - 0.4186i	-0.3807 - 0.4117i	-0.3947 - 0.4361i	-0.3895 - 0.6756i	-0.3755 - 1.1450i	-0.3996 - 6.0549i	-0.4175 - 1.3187i
-0.4678 - 0.4691i	-0.4412 - 0.4551i	-0.4110 - 0.4446i	-0.4260 - 0.4701i	-0.4167 - 0.6961i	-0.3920 - 1.0161i	-0.4175 - 1.3187i	-0.4454 - 6.2051i

Ybus Reduksi saat gangguan

-0.7204 - 6.5167i	-0.5938 - 1.1116i	-0.5346 - 0.9926i	-0.5470 - 1.0226i	-0.3142 - 0.4897i	-0.1135 - 0.1755i	-0.0431 - 0.0738i	0
-0.5938 - 1.1116i	-0.6076 - 6.1056i	-0.5234 - 1.1760i	-0.5273 - 1.1408i	-0.2958 - 0.4888i	-0.1069 - 0.1752i	-0.0404 - 0.0735i	0
(1.2603 - 118.1)	(6.1358 - 95.68)	(1.2872 - 113.99)	(1.2567 - 114.8)	(0.5713 - 121.18)	(0.2052 - 121.39)	(0.0839 - 118.82)	(0 ± 0)
-0.5346 - 0.9926i	-0.5234 - 1.1760i	-0.5080 - 5.9405i	-0.4993 - 1.2765i	-0.2737 - 0.4915i	-0.0989 - 0.1762i	-0.0372 - 0.0738i	0
-0.5470 - 1.0226i	-0.5273 - 1.1408i	-0.4993 - 1.2765i	-0.5174 - 5.9162i	-0.2824 - 0.5229i	-0.1021 - 0.1874i	-0.0383 - 0.0784i	0
-0.3142 - 0.4897i	-0.2958 - 0.4888i	-0.2737 - 0.4915i	-0.2824 - 0.5229i	-0.3508 - 6.6127i	-0.0932 - 0.3336i	-0.0319 - 0.1380i	0
-0.1135 - 0.1755i	-0.1069 - 0.1752i	-0.0989 - 0.1762i	-0.1021 - 0.1874i	-0.0932 - 0.3336i	-0.1269 - 5.6419i	-0.0255 - 0.3521i	0
-0.0431 - 0.0738i	-0.0404 - 0.0735i	-0.0372 - 0.0738i	-0.0383 - 0.0784i	-0.0319 - 0.1380i	-0.0255 - 0.3521i	-0.0179 - 0.5224i	0
0	0	0	0	0	0	0	-4.5248i

Perhitungan step by step saat gangguan

$$P_{e26} = 0 \text{ pu}$$

$$P_{m26} = 2.0918 \text{ pu}$$

$$P_{a26} = P_{m26} - P_{e26}$$

$$= 2.0918 - 0$$

$$= 2.0918 \text{ pu}$$

$$k = \frac{180f}{H} (\Delta t)^2$$

$$= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2$$

$$= 0.1276$$

$$kP_{a26} = (0.1276) \cdot (2.0918) = 0.2670$$

$$\Delta\delta_{1(26)} = \Delta\delta_{0(26)} + kP_{a26}$$

$$= 0 + 0.2670$$

$$= 0.2670^\circ$$

$$\delta_{1(26)} = \delta_{0(26)} + \Delta\delta_{1(26)}$$

$$= 11.9008 + 0.2670$$

$$= 12.1678^\circ$$

$$P_{e11} = G_{11-11} \cdot |E'_{11}|^2$$

$$+ |Y_{11-2}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_2| \cdot \sin(\delta_{11-2} - \varphi_{11-2})$$

$$+ |Y_{11-13}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{13}| \cdot \sin(\delta_{11-13} - \varphi_{11-13})$$

$$+ |Y_{11-14}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{14}| \cdot \sin(\delta_{11-14} - \varphi_{11-14})$$

$$+ |Y_{11-18}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{18}| \cdot \sin(\delta_{11-18} - \varphi_{11-18})$$

$$+ |Y_{11-23}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{23}| \cdot \sin(\delta_{11-23} - \varphi_{11-23})$$

$$+ |Y_{11-24}| \cdot |E'_{11}| \cdot |E'_{24}| \cdot \sin(\delta_{11-24} - \varphi_{11-24})$$

$$P_{e11} = -0.6076 \cdot |1.2256|^2$$

$$+ |1.2603| \cdot |1.2256| \cdot |1.3037| \cdot \sin(20.2927 - (-118.1))$$

$$+ |1.2872| \cdot |1.2256| \cdot |1.1052| \cdot \sin(20.2927 - (-113.99))$$

$$+ |1.2567| \cdot |1.2256| \cdot |1.1899| \cdot \sin(20.2927 - (-114.80))$$

$$+ |0.5713| \cdot |1.2256| \cdot |1.1534| \cdot \sin(20.2927 - (-121.18))$$

$$+ |0.2052| \cdot |1.2256| \cdot |1.1348| \cdot \sin(20.2927 - (-121.39))$$

$$+ |0.0839| \cdot |1.2256| \cdot |2.16| \cdot \sin(20.2927 - (-118.82))$$

$$P_{e11} = -0.9127 + 1.3370 + 1.2482 + 1.2937 + 0.5031 + 0.1769 + 0.1456$$

$$P_{e11} = 3.7920 \text{ pu}$$

$$P_{m11} = 0.9457 \text{ pu}$$

$$P_{a11} = P_{m11} - P_{e11}$$

$$= 0.9457 - 3.7920$$



$$\begin{aligned}
 &= -2.8463 \text{ pu} \\
 k &= \frac{180f}{H} (\Delta t)^2 \\
 &= \frac{180(60)}{8.46} (0.01)^2 \\
 &= 0.1276
 \end{aligned}$$

$$kP_{a11} = (0.1276) \cdot (-2.8463) = -0.3633$$

$$\begin{aligned}
 \Delta\delta_{1(11)} &= \Delta\delta_{0(11)} + kP_{a11} \\
 &= 0 + (-0.3633) \\
 &= -0.3633^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{1(11)} &= \delta_{0(11)} + \Delta\delta_{1(11)} \\
 &= 20.2927 + (-0.3633) \\
 &= 19.9293^\circ
 \end{aligned}$$

#### 4.4.3.3 Simulasi Kestabilan Peralihan

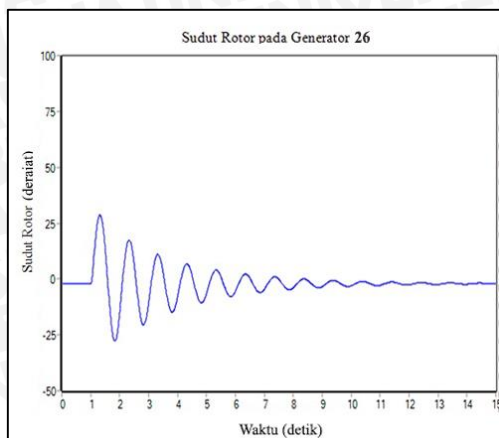
Pada simulasi ini, transmisi Bipolar HVDC dipasang diantara bus 24 dan 26, dengan pembebanan sebesar 70%. Sistem di jalankan selama 1 detik, dan diberi gangguan yang sama, yaitu gangguan pada bus 26 selama 0.1 detik. Hasil dari simulasi ditampilkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4.30 Sudut Rotor Generator 26 dan 11 Bipolar HVDC Pembebanan 70 %

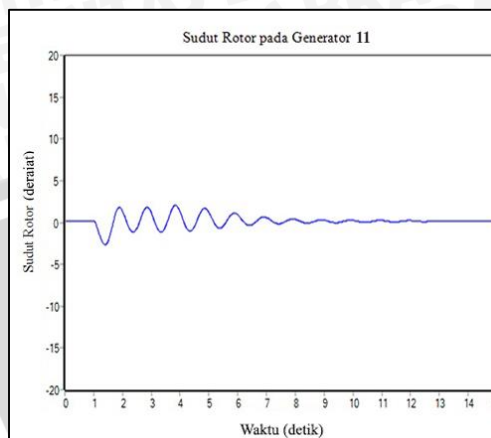
t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)	t (detik)	Gen 26 (derajat)	Gen 11 (derajat)
0.0	-2.0514	0.1696	8.0	-3.8246	0.3814
1.0	-2.0604	0.1730	8.5	-0.6181	-0.0249
1.3	<b>28.6934</b>	<b>-2.6270</b>	9.0	-3.3356	0.2943
1.5	12.0159	-2.1381	9.5	-0.9697	0.0072
2.0	-13.7120	1.3284	10.0	-3.0007	0.2691
2.5	5.7483	-0.6196	10.5	-1.2292	0.0370
3.0	-9.7858	1.1035	11.0	-2.7495	0.2563
3.5	2.3491	-0.3371	11.5	-1.4392	0.0736
4.0	-7.2808	1.2096	12.0	-2.5570	0.2407
4.5	1.6693	-0.4403	12.5	-1.6108	0.1102
5.0	-6.4373	1.2262	13.0	-2.3959	0.2185
5.5	0.9964	-0.3991	13.5	-1.7381	0.1407
6.0	-5.4038	0.9415	14.0	-2.2851	0.2080
6.5	0.4059	-0.2466	14.5	-1.8285	0.1563

7.0	-4.5208	0.6014	15.0	-2.2225	0.2033
7.5	-0.1373	-0.1032			

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.16 Sudut Rotor Generator 26



Gambar 4.17 Sudut Rotor Generator 11

Bipolar HVDC Pembebanan 70%

Bipolar HVDC Pembebanan 70%

Sumber : Hasil Simulasi

Sumber : Hasil Simulasi

Pada Gambar 4.16, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 26 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $-2.0514^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 26 mengalami kenaikan hingga  $28.6934^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-13. Pada Gambar 4.17, ketika awal sistem di jalankan, sistem berjalan stabil. Sudut rotor generator 11 pada mulanya mengalami penyimpang senilai  $0.1696^\circ$  terhadap sumbu tetapnya. Sesaat setelah diberi gangguan pada bus 26, sudut rotor generator 11 mengalami kenaikan hingga  $-2.6270^\circ$ . Sistem kembali stabil setelah mencapai detik ke-12.

#### 4.4.4 Perbandingan Respon Sistem

Berikut ini adalah hasil perbandingan Sudut Rotor Generator 26 masing-masing sistem transmisi ditampilkan pada Tabel 4.31:

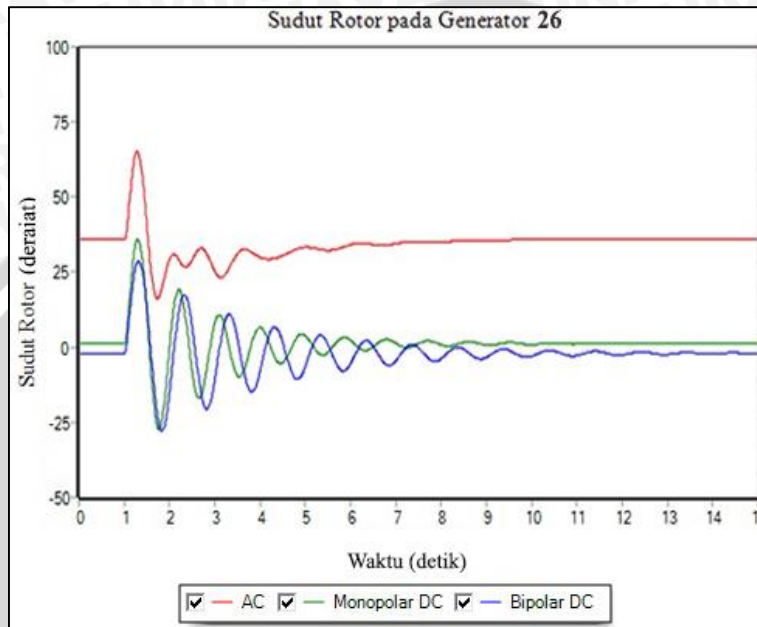
Tabel 4.31 Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 Pembebanan 70%

t (detik)	Jenis Saluran			t (detik)	Jenis Saluran		
	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC		AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
0.0	35.7727	1.1974	-2.0514	8.0	35.0758	0.8069	-3.8246
1.0	35.7727	1.1993	-2.0604	8.5	35.5873	1.6638	-0.6181
1.3	65.2810	36.0307	28.6934	9.0	35.5870	0.7660	-3.3356
1.5	37.1438	7.1777	12.0159	9.5	35.7290	1.6223	-0.9697
2.0	30.0411	3.0324	-13.7120	10.0	35.8734	0.9154	-3.0007
2.5	29.6419	-10.1266	5.7483	10.5	35.8416	1.4417	-1.2292
3.0	24.7999	9.1337	-9.7858	11.0	35.9577	1.0961	-2.7495
3.5	31.5576	-9.7579	2.3491	11.5	35.9284	1.3009	-1.4392
4.0	29.8219	6.5522	-7.2808	12.0	35.9528	1.1892	-2.5570



4.5	30.6088	-4.9596	1.6693	12.5	35.9577	1.2301	-1.6108
5.0	33.3466	3.8354	-6.4373	13.0	35.9308	1.2348	-2.3959
5.5	32.2743	-1.5909	0.9964	13.5	35.9371	1.2024	-1.7381
6.0	34.1768	2.2194	-5.4038	14.0	35.9069	1.2447	-2.2851
6.5	34.1787	0.2813	0.4059	14.5	35.8962	1.1892	-1.8285
7.0	34.5383	1.2689	-4.5208	15.0	35.8780	1.2410	-2.2225
7.5	35.2142	1.3024	-0.1373				

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.18 Perbandingan Sudut Rotor Generator 26 Pembebanan 70%

Sumber: Hasil Simulasi

Dapat kita lihat pada Gambar 4.18 pada saat awal sistem bekerja, transmisi HVDC jenis Monopolar memiliki sudut rotor yang paling kecil dibanding dengan yang lain, yaitu senilai  $1.1974^\circ$ . Sedangkan transmisi HVDC jenis Bipolar memiliki sudut rotor kedua terkecil, senilai  $-2.0514^\circ$ . Sudut rotor terbesar terjadi pada saluran transmisi AC senilai  $35.7727^\circ$ . Puncak Sudut Rotor terendah terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Bipolar, yakni senilai  $28.6934^\circ$ . Puncak Sudut Rotor urutan kedua, terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Monopolar, yakni senilai  $36.0307^\circ$ . Sedangkan saluran transmisi AC menjadi saluran yang memiliki puncak sudut rotor tertinggi, yakni senilai  $65.2810^\circ$ . Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor tercantum pada Tabel 4.32.

Tabel 4.32 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor

Saluran Transmisi	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
Sudut awal	$35.7727^\circ$	$1.1974^\circ$	$-2.0514^\circ$
Puncak Sudut Rotor	$65.2810^\circ$	$36.0307^\circ$	$28.6934^\circ$

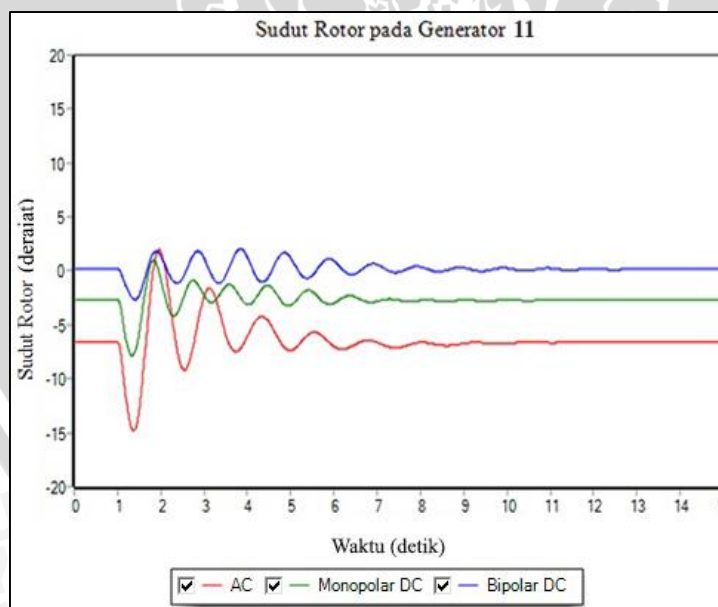
Sumber: Hasil Simulasi

Berikut ini adalah hasil perbandingan Sudut Rotor Generator 11 masing-masing sistem transmisi ditampilkan pada Tabel 4.33:

Tabel 4.33 Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 70%

t (detik)	Jenis Saluran			t (detik)	Jenis Saluran		
	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC		AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
0.0	-6.6275	-2.6853	0.1696	8.0	-6.6165	-2.7170	0.3814
1.0	-6.6275	-2.6875	0.1730	8.5	-6.8924	-2.8069	-0.0249
1.3	-14.7999	-7.8455	-2.6270	9.0	-6.7078	-2.6823	0.2943
1.5	-12.1945	-5.1798	-2.1381	9.5	-6.6731	-2.7994	0.0072
2.0	1.6231	-1.1042	1.3284	10.0	-6.7106	-2.6666	0.2691
2.5	-9.1240	-2.4689	-0.6196	10.5	-6.5877	-2.7522	0.0370
3.0	-2.1163	-2.4009	1.1035	11.1	-6.6466	-2.6660	0.2563
3.5	-6.1278	-1.3447	-0.3371	11.5	-6.5889	-2.7027	0.0736
4.0	-5.8678	-3.1148	1.2096	12.0	-6.5963	-2.6674	0.2407
4.5	-4.7978	-1.3603	-0.4403	12.5	-6.6047	-2.6705	0.1102
5.0	-7.3419	-3.1639	1.2262	13.0	-6.5883	-2.6680	0.2185
5.5	-5.6761	-1.9343	-0.3991	13.5	-6.6117	-2.6596	0.1407
6.0	-7.0226	-2.9570	0.9415	14.0	-6.6044	-2.6654	0.2080
6.5	-6.7610	-2.4425	-0.2466	14.5	-6.6157	-2.6576	0.1563
7.0	-6.6322	-2.7976	0.6014	15.0	-6.6211	-2.6666	0.2033
7.5	-7.0769	-2.7174	-0.1032				

Sumber : Hasil Simulasi



Gambar 4.19 Perbandingan Sudut Rotor Generator 11 Pembebanan 70%

Sumber: Hasil Simulasi

Dapat kita lihat pada Gambar 4.19 pada saat awal sistem bekerja, transmisi HVDC jenis Bipolar memiliki sudut rotor yang paling kecil dibanding dengan yang lain, yaitu

senilai  $0.1696^\circ$ . Sedangkan transmisi HVDC jenis Monopolar memiliki sudut rotor kedua terkecil, senilai  $-2.6853^\circ$ . Sudut rotor terbesar terjadi pada saluran transmisi AC senilai  $-6.6275^\circ$ . Puncak Sudut Rotor terendah terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Bipolar, yakni senilai  $-2.6270^\circ$ . Puncak Sudut Rotor urutan kedua, terjadi pada saluran transmisi HVDC jenis Monopolar, yakni senilai  $-7.8455^\circ$ . Sedangkan saluran transmisi AC menjadi saluran yang memiliki puncak sudut rotor tertinggi, yakni senilai  $-14.7999^\circ$ . Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor tercantum pada Tabel 4.34.

Tabel 4.34 Perbandingan nilai sudut rotor awal dan puncak sudut rotor

Saluran Transmisi	AC	Monopolar HVDC	Bipolar HVDC
Sudut awal	$-6.6275^\circ$	$-2.6853^\circ$	$0.1696^\circ$
Puncak Sudut Rotor	$-14.7999^\circ$	$-7.8455^\circ$	$-2.6270^\circ$

Sumber: Hasil Simulasi





## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis pada pembahasan sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Penggunaan Saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar dapat meningkatkan Kestabilan Peralihan pada Sistem Tenaga Listrik.
2. Penggunaan Saluran Transmisi HVDC dapat mengurangi sudut rotor saat awal sistem bekerja. Hal ini dibuktikan melalui simulasi yang telah dilakukan pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500kV. Sudut rotor awal Generator 26 pada saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar senilai  $0.3944^\circ$ , saluran Transmisi HVDC jenis Monopolar senilai  $14.9003^\circ$ , saluran Transmisi AC senilai  $40.1386^\circ$ . Sedangkan sudut rotor awal Generator 11 pada saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar senilai  $-3.5128^\circ$ , saluran Transmisi HVDC jenis Monopolar senilai  $-7.0223^\circ$ , saluran Transmisi AC senilai  $-9.1589^\circ$ .
3. Penggunaan Saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar dapat mengurangi angka puncak sudut rotor ketika sistem terjadi gangguan. Puncak sudut rotor Generator 26 pada saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar senilai  $51.8514^\circ$ , saluran Transmisi HVDC jenis Monopolar senilai  $76.7310^\circ$ , saluran Transmisi AC senilai  $100.5043^\circ$ . Sedangkan puncak sudut rotor Generator 11 pada saluran Transmisi HVDC jenis Bipolar senilai  $-11.0378^\circ$ , saluran Transmisi HVDC jenis Monopolar senilai  $-18.3962^\circ$ , saluran Transmisi AC senilai  $-30.0778^\circ$ .

### 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian ini, maka penulis memberikan beberapa saran sebagai bahan pertimbangan penelitian selanjutnya, yaitu:

- Penelitian ini hanya membahas tentang pengaruh saluran transmisi HVDC saja. Untuk penelitian selanjutnya, perlu mempertimbangkan pengaruh konverter terhadap perubahan sudut rotor generator
- Penggunaan Program selain PSSE untuk menguji Kestabilan Peralihan pada Sistem Tenaga Listrik
- Penggunaan saluran HVDC jenis yang lain, seperti VSC-HVDC, CCC-HVDC, dan LCC-HVDC, untuk membandingkan kinerja saluran transmisi HVDC.



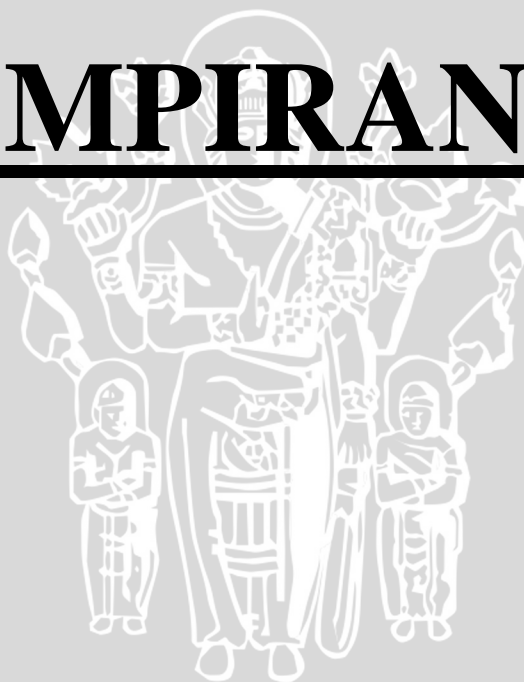


## DAFTAR PUSTAKA

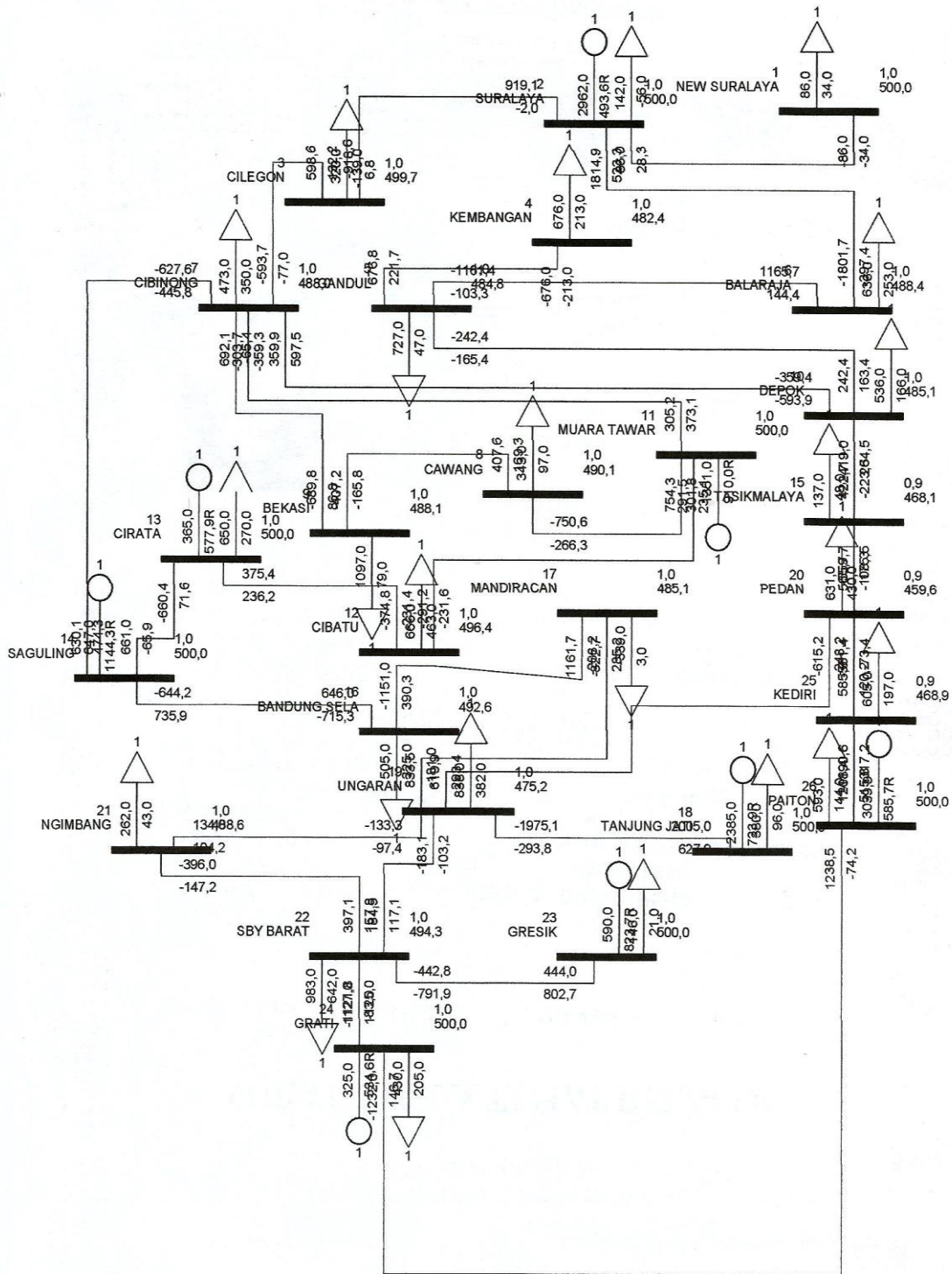
- Arrillaga, J., Y.H. Liu, dan Watson N.R. 2007. *Flexible power transmission- the HVDC options*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Behraves, V., dan N Abbaspour. 2012. "New Comparison of HVDC and HVAC Transmission." *IJEIR 1(3)* 2277 – 5668.
- Cekdin, C., dan T Barlian. 2013. *Transmisi Daya Listrik*. Yogyakarta: Andi.
- Dandawate, S.B., dan S.L. Shaikh. 2013. "Analysis of Effect on Transient Stability of Interconnected Power System by Introduction of HVDC Link." *IJERA 3(3)* 1383-1387.
- Djehaf, M.A. Zidi, S.A., Kobibi, Y.D. 2014. "AC Versus DC Link Comparison Based on Power Flow Analysis of a Multimachine Power System." *Leonardo Journal of Sciences 13(24)* 61.
- El-Hawary, M.E. 1995. *Electrical Power Systems Design and Analysis*. New York: IEEE Press, Inc.
- Ghosh, A, dan G Ledwich. 2002. *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Gönen, T. 1988. *Electrical Power Transmission System Engineering Analysis and Design*. California: John Wiley & Sons. Inc.
- Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Control*. California: McGraw Hill, Inc.
- Machowski, J., dan J.R. Bumby. 2008. *Power System Dynamics Stability and Control*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Mithulanathan, N., C.A. Cañizares, dan J. Reeve. 2000. "Indices to Detect Hopf Bifurcation in Power Systems." *In Proc. of NAPS*.
- Muthusamy, A. 2010. *Selection of Dynamic performance Control Parameters for Classic HVDC in PSS/E*. M.Sc Thesis, Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Panjaitan, B. 2012. *Praktik-praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Andi.
- Saadat, H. 1999. *Power System Analysis*. Singapore: McGraw Hill, Inc.
- Stevenson, W. 1996. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Sudirham, S. 2010. *Analisis Rangkaian Listrik*. Bandung: ITB.
- Weedy, B.M., dan B.J. Cory. 2001. *Electric Power System*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

# UNIVERSITAS BRAWIJAYA

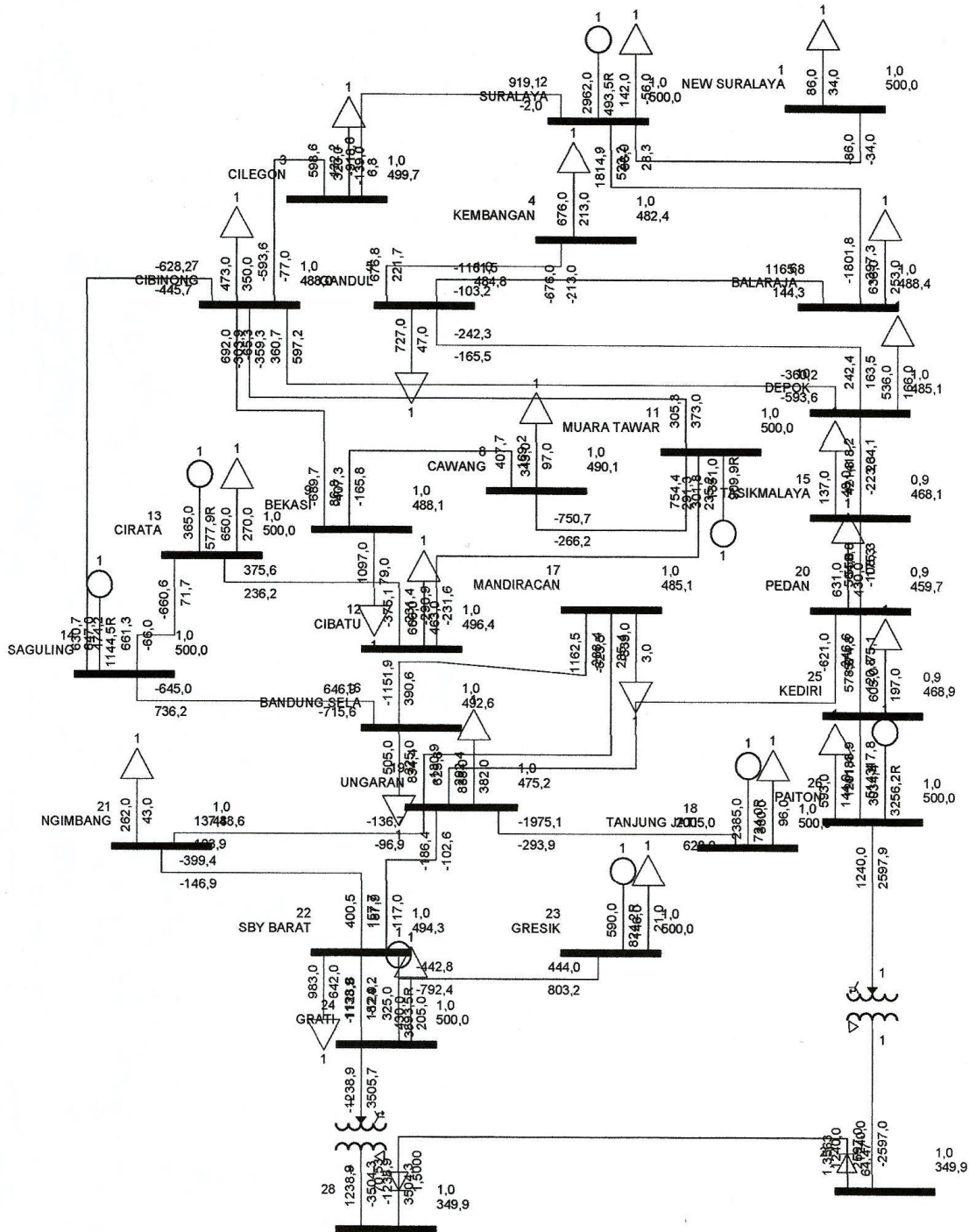
# LAMPIRAN



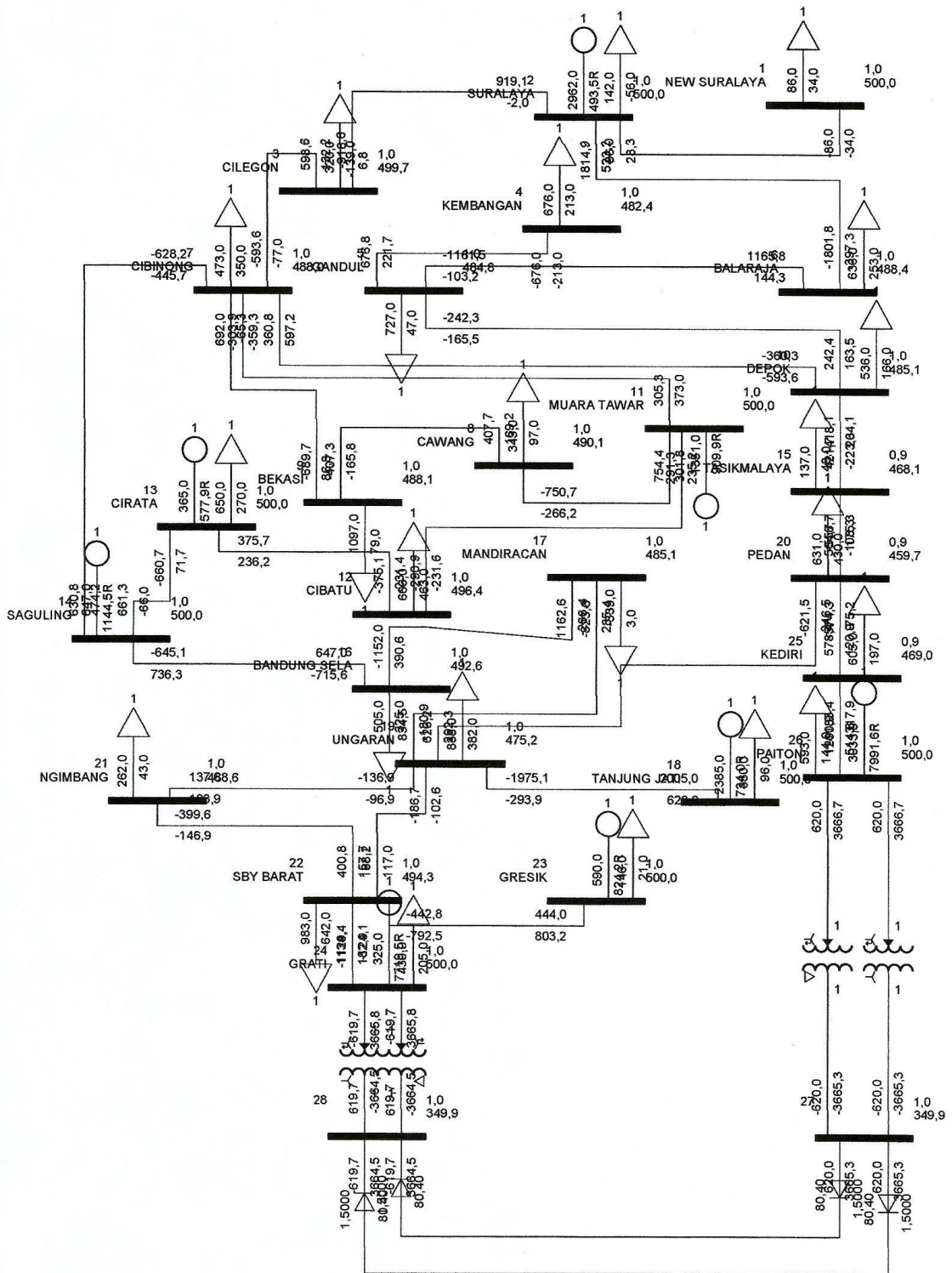
Lampiran 1 Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran AC  
 Pembebanan 100% dalam Program PSSE



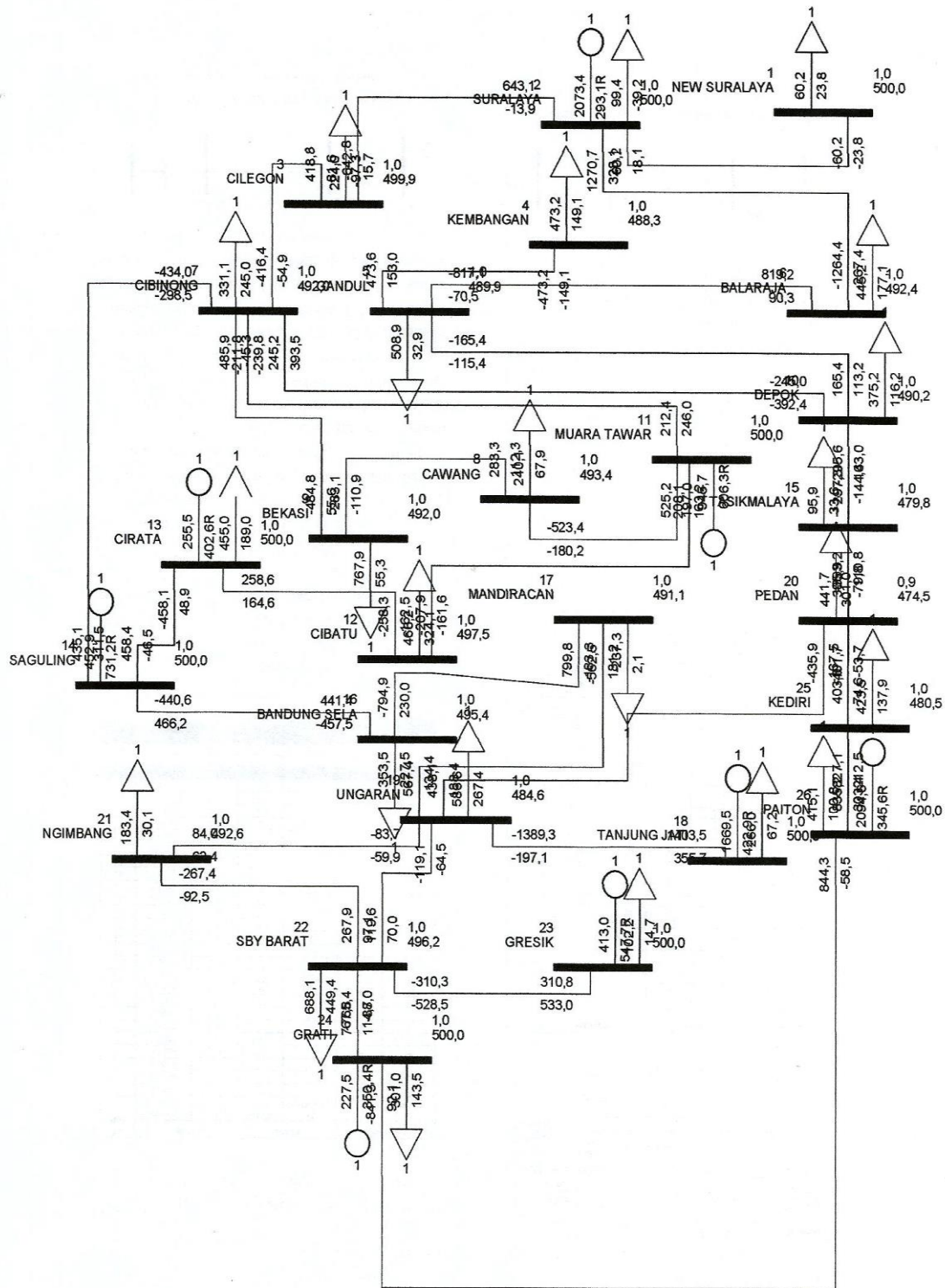
### Lampiran 2 Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran Monopolar HVDC Pembebanan 100% dalam Program PSSE



### Lampiran 3 Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran Bipolar HVDC Pembebanan 100% dalam Program PSSE



### Lampiran 4 Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran AC Pembebanan 70% dalam Program PSSE





Lampiran 6 Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Saluran Bipolar HVDC Pembebanan 70% dalam Program PSSE

