

**Daftar Isi**

1. Judul .....	1
2. Latar Belakang.....	1
3. Rumusan Masalah .....	2
4. Batasan Masalah.....	2
5. Tujuan.....	2
6. Manfaat.....	2
7. Sistematika Pembahasan .....	2
8. Tinjauan Pustaka .....	3
8.1 Saluran Transmisi.....	3
8.2 Klasifikasi Saluran Transmisi .....	5
8.2.1 Saluran Transmisi Pendek .....	5
8.2.2 Saluran Transmisi Menengah .....	6
8.2.3 Saluran Transmisi Panjang .....	7
8.3 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan .....	8
8.4 Metode Step By Step.....	12
8.5 Sistem High Voltage Direct Current (HVDC) .....	15
8.5.1 Konfigurasi Sistem HVDC .....	15
8.5.2 Komponen Sistem Transmisi HVDC .....	17
9. Metode Penelitian .....	19
9.1 Studi Literatur .....	19
9.2 Pengambilan Data Model Jaringan .....	20
9.3 Pembuatan Rangkaian Simulasi Transmisi AC dan HVDC .....	22
9.4 Menentukan Jenis Gangguan dan Letak Gangguan .....	23
9.5 Simulasi Program Kestabilan Transien Menggunakan PSSE.....	23
9.6 Membandingkan Hasil Simulasi Kestabilan Transien .....	24
10. Rencana Kegiatan .....	24
11. Daftar Pustaka.....	24



**Daftar Gambar**

Gambar 8-1 Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Pendek..... 6

Gambar 8-2 Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Menengah..... 7

Gambar 8-3 Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Panjang..... 7

Gambar 8-4 Representasi arah perputaran momen putar mekanis dan elektrik..... 9

Gambar 8-5 Rangkaian RC..... 14

Gambar 8-6 Rangkaian RL..... 14

Gambar 8-7 HVDC Monopolar link..... 15

Gambar 8-8 HVDC Bipolar link..... 16

Gambar 8-9 HVDC Homopolar link ..... 16

Gambar 8-10 Sistem Operasi transmisi HVDC Bipolar..... 17

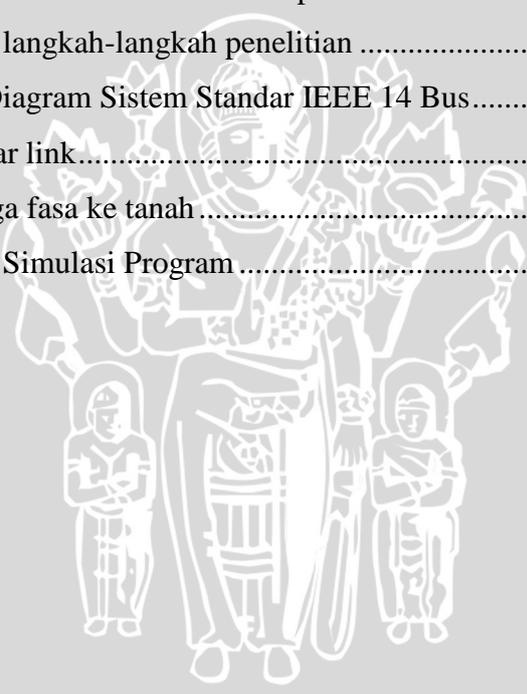
Gambar 9-1 Diagram Alir langkah-langkah penelitian ..... 19

Gambar 9-2 Single Line Diagram Sistem Standar IEEE 14 Bus..... 20

Gambar 9-3 HVDC Bipolar link..... 22

Gambar 9-4 Gangguan tiga fasa ke tanah..... 23

Gambar 9-5 Diagram Alir Simulasi Program ..... 24



**Daftar Tabel**

Tabel 9.1 Data Pembangkitan Sistem Standar IEEE 14 Bus.....20

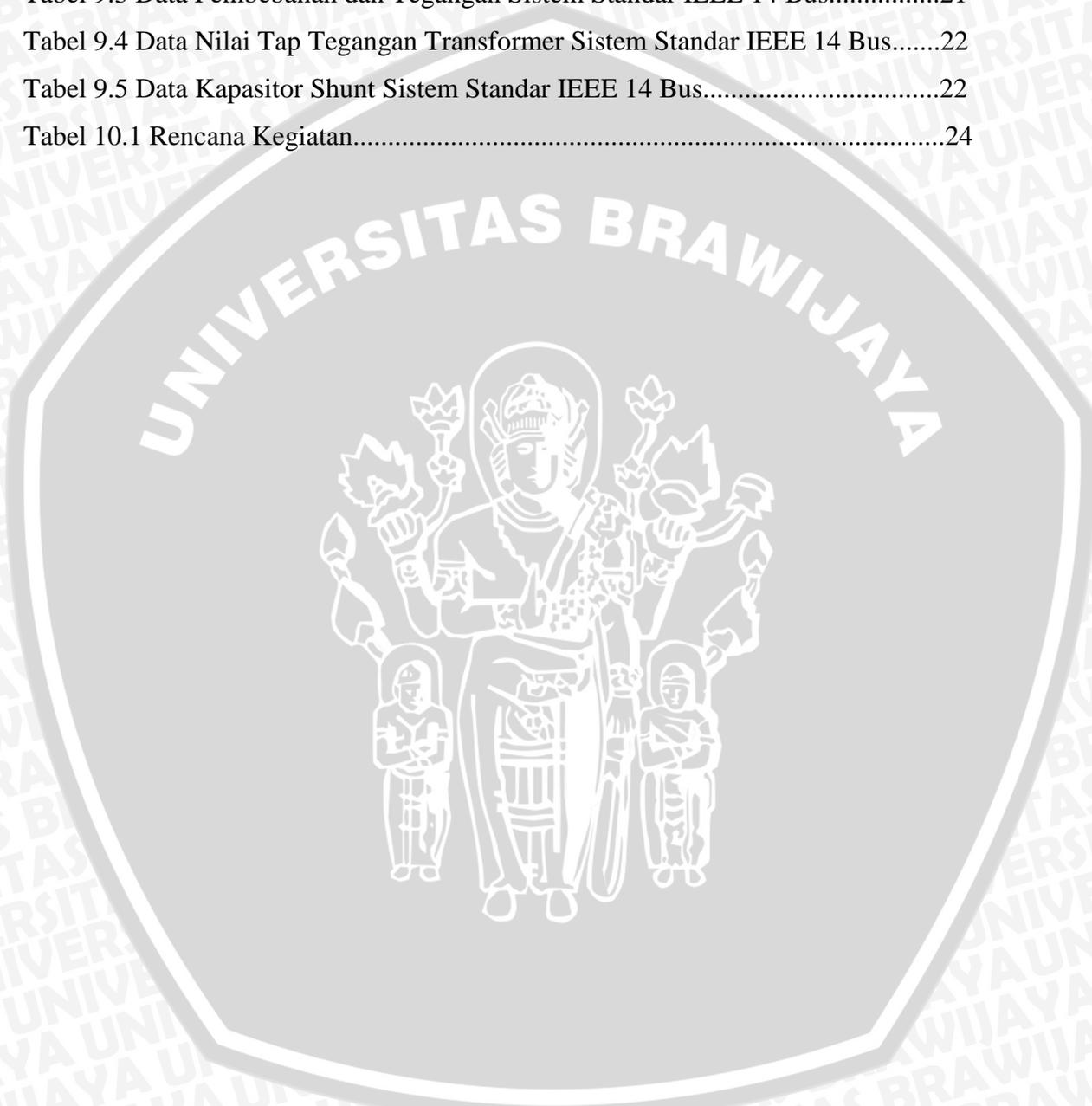
Tabel 9.2 Data Saluran Sistem Standar IEEE 14 Bus.....21

Tabel 9.3 Data Pembebanan dan Tegangan Sistem Standar IEEE 14 Bus.....21

Tabel 9.4 Data Nilai Tap Tegangan Transformer Sistem Standar IEEE 14 Bus.....22

Tabel 9.5 Data Kapasitor Shunt Sistem Standar IEEE 14 Bus.....22

Tabel 10.1 Rencana Kegiatan.....24



## 1. Judul

Analisis Kestabilan Peralihan pada Sistem Transmisi *High Voltage Direct Current* (HVDC)

## 2. Latar Belakang

Indonesia adalah negara berpenduduk terpadat nomor empat di dunia. Semakin padat penduduknya, maka kebutuhan energi listrik pun semakin tinggi. Energi listrik yang dihasilkan saat ini masih belum memenuhi kebutuhan listrik masyarakat secara menyeluruh. Kebutuhan listrik yang terus meningkat juga tidak diikuti dengan penemuan alat baru yang dapat mengkonversi energi listrik dalam jumlah yang lebih besar. Padahal kehidupan masyarakat sangat bergantung pada pemanfaatan energi listrik.

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 dibangkitkan dari pusat tenaga listrik. Karena letak pembangkit jauh dari beban, energi listrik mengalami rugi-rugi yang signifikan pada saluran transmisi.

Pada saluran transmisi tentunya juga tidak terlepas dari gangguan sistem. Di masa sekarang telaah kestabilan peralihan merupakan analisis utama untuk telaah perilaku dinamis elektromekanis sistem-daya. 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*). Sistem transmisi di Indonesia masih menggunakan sistem transmisi jenis arus bolak-balik atau transmisi AC. Dalam perkembangan saluran transmisi, sudah banyak menggunakan saluran transmisi arus searah atau transmisi HVDC. 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 untuk mengevaluasi daya sebesar 7000 MW. (Panjaitan, 2012:15)

HVDC memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan sistem transmisi AC, yaitu : kerugian corona lebih rendah, diperlukan isolasi yang lebih sedikit, dan drop

tegangan rendah. Selain itu biaya tiang listrik, isolator, kabel dan konduktor yang rendah sehingga sistem ini lebih ekonomis. Yang terutama, efek kulit, rugi-rugi dielektrik, rugi-rugi induktansi dan rugi-rugi surja, gangguan sinyal komunikasi, masalah sinkronisasi dan stabilitas tidak ditemukan dalam sistem transmisi HVDC (Behraves, 2012:300-303).

Berdasarkan karakteristiknya, transmisi HVDC dapat dijadikan alternatif transmisi di Indonesia. Dalam skripsi ini akan dilakukan pembelajaran 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.

### 3. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah yang diambil adalah : Bagaimana pengaruh penggunaan sistem transmisi HVDC terhadap kestabilan peralihan sistem tenaga listrik.

### 4. Batasan Masalah

Dalam kajian ini ada beberapa batasan masalah:

1. Tidak membahas teknologi elektronika daya dalam proses penyearahan arus
2. Konfigurasi sistem yang dianalisis adalah sistem standar IEEE 14 bus
3. Menggunakan perangkat lunak PSSE

### 5. Tujuan

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

### 6. 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.

### 7. Sistematika Pembahasan

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 transien 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.

## 8. Tinjauan Pustaka

### 8.1 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)

Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem yang tetap stabil ketika 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. Serta sistem dapat kembali ke keadaan

semula. Batas stabilitas sistem adalah daya-daya maksimum yang dialirkan sistem tanpa kehilangan stabilitas sistem.

Permasalahan utama dari kestabilan saluran transmisi disebabkan oleh adanya gangguan. Begitu pentingnya untuk mengenali jenis gangguan pada sistem. Umumnya gangguan pada sistem tenaga listrik berasal dari banyak faktor. Gangguan-gangguan besar tersebut dapat berupa : hubung singkat pada jaringan transmisi, hilangnya pembangkit atau beban yang signifikan dari sistem tenaga listrik, ataupun putusnya hubungan antara dua buah subsistem dalam sistem tenaga listrik.

Gangguan dapat menimbulkan kerusakan besar pada sistem tenaga listrik. Gangguan pada sistem tiga fasa 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). Jika gangguan yang terjadi sangat besar, diatas kemampuan sistem yang bekerja, maka dapat memungkinkan sistem kehilangan kestabilan. 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*).

Stabilitas peralihan atau stabilitas *transient* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan (*swing*) pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis belum bekerja. Stabilitas dinamis adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah ayunan pertama (setelah periode stabilitas peralihan). sistem tersebut mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru. Stabilitas tetap atau stabilitas *steady state* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil (fluktuasi beban).

Salah satu pelajaran penting yang harus dicakup pada pemodelan Sistem Tenaga Listrik adalah Stabilitas Peralihan (Iyambo, dkk.,2007:1). Di masa sekarang telaah kestabilan peralihan merupakan analisis utama untuk telaah perilaku dinamis elektromekanis sistem-daya. 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).

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 peralihan.

Pengertian hilangnya sinkronisasi adalah ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan beban, yang menimbulkan suatu keadaan peralihan, yaitu rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi, membuat percepatan atau perlambatan pada rotor tersebut. Bila torsi tersebut cukup besar, maka mesin sinkron tersebut akan kehilangan sinkronisasinya. Sebagai contoh, jika terjadi ketidakseimbangan yang disebabkan adanya daya pembangkit yang berlebihan, maka sebagian besar dari energi yang berlebihan tersebut akan diubah menjadi energi kinetik yang mengakibatkan percepatan, sudut rotor bertambah besar. Meskipun kecepatan rotor bertambah besar, tidak berarti bahwa sinkronisasi dari mesin tersebut akan hilang. Faktor yang menentukan adalah perbedaan sudut rotor atau perbedaan daya tersebut diukur terhadap referensi putaran sinkronisasi.

Faktor-faktor utama dalam masalah stabilitas adalah:

1. Faktor mekanis dapat berupa:

- Torsi *input prime* beban.
- Inersia dari *prime mover* dan generator.
- Inersia motor dan sumbu beban.
- Torsi input sumbu beban.

2. Torsi listrik berupa:

- Tegangan internal dari generator sinkron.
- Reaktansi sistem.
- Tegangan internal dari motor sinkron.

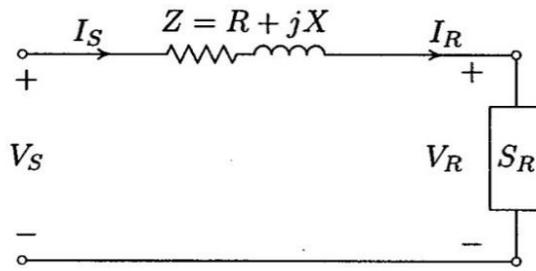
## 8.2 Klasifikasi Saluran Transmisi

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

### 8.2.1 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 ekivalen suatu saluran transmisi pendek diperhatikan dalam Gambar 8.1.



Gambar 8-1 Rangkaian Ekivalen Saluran Transmisi Pendek

Sumber: Saadat (1999:143)

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

$$I_S = I_R \quad (8-1)$$

Tegangan pada ujung pengirim adalah

$$V_S = V_R + Z I_R \quad (8-2)$$

Dimana  $Z = R + jX$

$$I_R = \frac{S^* R(3\phi)}{3V_R^*} \quad (8-3)$$

dengan

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

$I_S$  = arus pada ujung pengirim

$I_R$  = arus pada ujung penerima

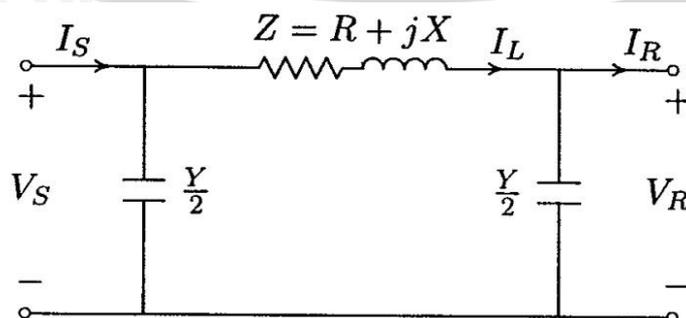
$V_S$  = tegangan saluran terhadap netral pada ujung pengirim

$V_R$  = tegangan saluran terhadap netral pada ujung penerima

$Z$  = impedansi seri keseluruhan sistem

### 8.2.2 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, Gambar 8.2.



Gambar 8-2 Rangkaian Ekivalen Saluran Transmisi Menengah

Sumber: Saadat (1999:148)

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

$$V_S = (V_R \frac{Y}{2} + I_R) Z + V_R \tag{8-4}$$

$$V_S = (\frac{ZY}{2} + 1) V_R + Z I_R \tag{8-5}$$

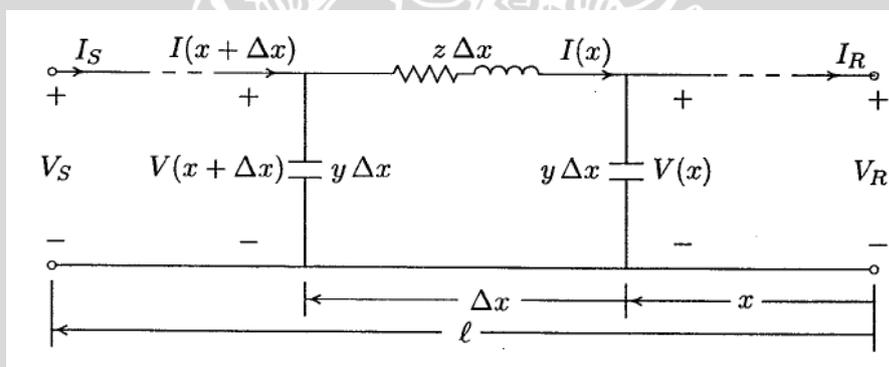
$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \tag{8-6}$$

Dengan memasukkan  $V_S$  pada persamaan (8-5) ke dalam persamaan (8-6) maka didapatkan

$$I_S = V_R Y (1 + \frac{ZY}{4}) + (\frac{ZY}{2} + 1) I_R \tag{8-7}$$

### 8.2.3 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 8.3 dalam bentuk satu fasa dengan panjang  $l$  km.



Gambar 8-3 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):

$$V(x + \Delta x) = V(x) + z \Delta x I(x) \tag{8-8}$$

Sehingga didapat persamaan turunan:

$$\frac{dV(x)}{dx} = z I(x) \tag{8-9}$$



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

$$I(x) = \frac{1}{z} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{y}{z} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (8-10)$$

$$= \sqrt{\frac{y}{z}} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x})$$

Persamaan tegangan dan arus dapat dituliskan dalam bentuk yang lebih sederhana

$$V = V_R \cosh \gamma x + I_R Z_C \sinh \gamma x \quad (8-11)$$

$$I = I_R \cosh \gamma x + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma x \quad (8-12)$$

### 8.3 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 :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (8.13)$$

simbol-simbol di atas mempunyai arti sebagai berikut :

$J$  = Momen kelembaman total dari massa rotor dalam  $kg \cdot m^2$

$\theta_m$  = Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam (*stationary*), dalam radian mekanis

$t$  = Waktu, dalam detik

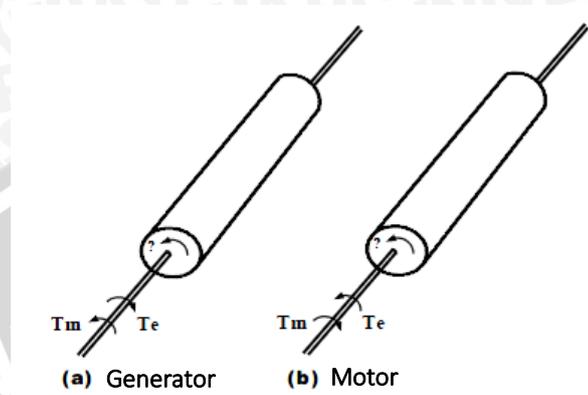
$T_a$  = Momen putar percepatan bersih, dalam  $Nm$

$T_m$  = Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran, dalam  $Nm$

$T_e$  = Momen putar listrik atau elektromagnetis bersih, dalam  $Nm$

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 8.1. 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 8-4 Representasi arah perputaran momen putar mekanis dan elektris  
 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  $T_m$  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 (8.13) akan terbalik tandanya seperti ditunjukkan dalam Gambar 8.4. 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 :

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \tag{8.14}$$

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 (8.14) terhadap waktu diperoleh

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (8.15)$$

Dan penurunan kedua menghasilkan :

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (8.16)$$

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 (8.16) kedalam persamaan (8.13) diperoleh :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (8.17)$$

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

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (8.18)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (8.18) kedalam persamaan (8.17) diperoleh :

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (8.19)$$

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 (8.19) diperoleh  $M$  dinyatakan dalam joule-detik per-radian dan dapat dituliskan dengan :

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad W \quad (8.20)$$

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 (8.20) lebih banyak dipilih. Untuk keperluan studi kestabilan, dibutuhkan data mesin, konstanta yang berhubungan dengan kelembaman, yaitu konstanta  $H$  yang didefinisikan sebagai :

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam Mega Joule pada kecepatan serempak}}{\text{Rating dalam MVA}} \quad (8.21)$$

Dan  $H$  sebagai :

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = MJ/MVA \quad (8.22)$$

di mana

$H$  = Konstanta yang berhubungan dengan kelembaman.

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

Dengan menyelesaikan untuk  $M$  pada persamaan (8.10) diperoleh :

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \text{ MJ/radian mekanis} \quad (8.23)$$

dan dengan mensubstitusi persamaan (8.23) kedalam persamaan (8.20) diperoleh :

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (8.24)$$

Dengan  $\delta_m$  pada pembilang persamaan (8.24) dinyatakan dalam radian mekanis sedangkan  $\omega_{sm}$  pada penyebut dinyatakan dalam radian mekanis per detik. Oleh karena itu dapat ditulis :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (8.25)$$

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. Persamaan (8.27) menjadi :

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ per unit} \quad (8.26)$$

Bila  $\delta$  dinyatakan dalam radian listrik sedangkan :

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ per unit} \quad (8.27)$$

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  $\omega$ ,  $\omega_s$  :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \text{ per unit} \quad (8.28)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (8.29)$$

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 rumusan 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.

#### 8.4 Metode Step By Step

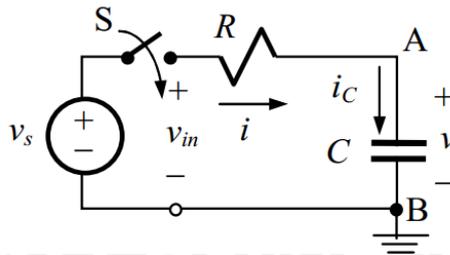
Yang dimaksud dengan analisis transien adalah analisis rangkaian yang sedang dalam keadaan peralihan atau keadaan transien. Gejala transien atau gejala peralihan adalah perubahan yang terjadi secara tiba-tiba. Gejala ini merupakan salah satu peristiwa dalam rangkaian listrik yang perlu kita perhatikan. Peristiwa ini biasanya berlangsung hanya beberapa saat namun jika tidak ditangani secara baik dapat menyebabkan terjadinya hal-hal yang sangat merugikan berupa kerusakan peralatan. (Sudirham, 2010:1) Respon Transien merupakan respon dari sistem sesaat setelah terjadi gejala transien. Apakah sistem dapat kembali stabil kepada keadaan mantap atau biasa disebut steady state.

Dalam sistem penyaluran energi, pemutusan dan penyambungan sistem tenaga listrik merupakan hal yang sering terjadi. Hal ini terjadi ketika awal penghubungan beban listrik dengan sumber listrik, juga bisa terjadi ketika ada gangguan pada sistem tenaga listrik. Operasi-operasi tersebut dapat menyebabkan terjadinya lonjakan tegangan yang biasa disebut tegangan lebih. Tegangan lebih seperti ini akan merambat sepanjang saluran transmisi berbentuk gelombang berjalan dan akan sampai ke beban-beban yang terhubung pada sistem tersebut. Piranti-piranti elektronik akan menderita karenanya. Di samping melalui saluran transmisi, gangguan juga mengimbaskan tegangan secara induktif maupun kapasitif pada peralatan-peralatan. Semua kejadian itu merupakan peristiwa-peristiwa peralihan.

Kita mengetahui bahwa kapasitor dan induktor adalah piranti-piranti dinamis dan rangkaian yang mengandung piranti-piranti jenis ini kita sebut rangkaian dinamis. Piranti dinamis mempunyai kemampuan untuk menyimpan energi dan melepaskan energi yang telah disimpan sebelumnya. Hal demikian tidak terjadi pada resistor, yang hanya dapat menyerap energi. Oleh karena itu, pada waktu terjadi operasi penutupan ataupun pemutusan rangkaian, perilaku rangkaian yang mengandung kapasitor maupun induktor berbeda dengan rangkaian yang hanya mengandung resistor saja.

Karena hubungan antara arus dan tegangan pada induktor maupun kapasitor merupakan hubungan linier diferensial, maka persamaan rangkaian yang mengandung elemen-elemen ini juga merupakan persamaan diferensial. Persamaan diferensial ini dapat berupa persamaan diferensial orde pertama dan rangkaian yang demikian ini disebut rangkaian atau sistem orde pertama. Jika persamaan rangkaian berbentuk persamaan diferensial orde kedua maka rangkaian ini disebut rangkaian atau sistem orde kedua.

Salah satu contoh rangkaian orde pertama dalam keadaan peralihan adalah rangkaian RC seri seperti pada Gambar 8-5. Pada awalnya saklar S pada rangkaian ini terbuka; kemudian pada saat  $t = 0$  ia ditutup sehingga terbentuk rangkaian tertutup terdiri dari sumber  $V_s$  dan hubungan seri resistor R dan kapasitor C. Jadi mulai pada  $t = 0$  terjadilah perubahan status pada sistem tersebut dan gejala yang timbul selama terjadinya perubahan itulah yang kita sebut gejala perubahan atau gejala transien.



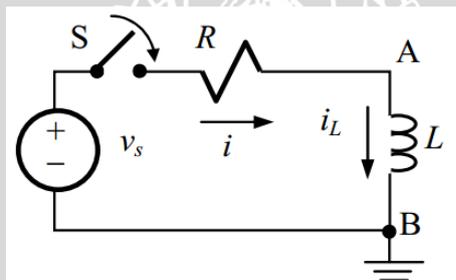
Gambar 8-5 Rangkaian RC

Gejala transien ini merupakan tanggapan rangkaian seri RC ini setelah saklar ditutup, yaitu pada  $t > 0$ .

$$-v_s + iR + v = -v_s + RC \frac{dv}{dt} + v = 0$$

$$RC \frac{dv}{dt} + v = v_s \tag{8.30}$$

Contoh lain rangkaian orde pertama adalah rangkaian RL seri seperti pada Gambar 8-6. Saklar S ditutup pada  $t = 0$  sehingga terbentuk rangkaian tertutup RL seri.



Gambar 8-6 Rangkaian RL

$$v_s - Ri + v_L = v_s + Ri - L \frac{di}{dt} = 0$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = v_s \tag{8.31}$$

Untuk menunjukkan waktu sesaat setelah saklar ditutup, maka digunakan notasi  $(0^+)$ , dan waktu sesaat sebelum saklar ditutup, digunakan notasi  $(0^-)$ . Pada kondisi awal (initial condition), tegangan kapasitor tidak bisa mengubah secara instan, dan arus dalam induktor tidak dapat mengubah secara instan. Dinyatakan dengan persamaan:

$$v_c(0^-) = v_c(0^+) \tag{8.32}$$

$$i_L(0^-) = i_L(0^+) \tag{8.33}$$

Untuk mendapatkan nilai dari  $v_c$  dan  $i_L$  dapat menggunakan persamaan:

$$x(t) = K_1 + K_2 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \tag{8.34}$$



Dengan nilai  $K_1 = \text{nilai } v_c \text{ atau } i_L$  ketika sebelum terjadi gangguan (keadaan normal), sedangkan  $K_2 = x(0^+) - K_1$ . Nilai  $\tau = CR_{th}$  pada rangkaian RC, sedangkan  $\tau = L/R_{th}$  untuk rangkaian RL.

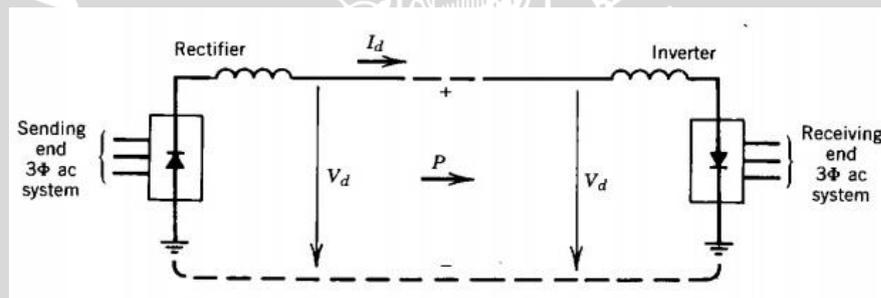
### 8.5 Sistem High Voltage Direct Current (HVDC)

Transmisi HVDC memiliki keuntungan dibandingkan transmisi AC (Alternating Current) pada kondisi tertentu. Secara ekonomis pada transmisi DC membutuhkan dua konduktor per sirkuit sedangkan AC membutuhkan tiga konduktor. Untuk jumlah daya kirim yang sama melalui ukuran konduktor yang sama, rugi yang dihasilkan transmisi DC lebih kecil daripada transmisi AC. Dengan mengabaikan efek kulit pada transmisi AC maka rugi yang dihasilkan 33 persen lebih besar daripada rugi transmisi DC.

#### 8.5.1 Konfigurasi Sistem HVDC

Berdasarkan jumlah konduktor maka *HVDC links* diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu sebagai berikut:

##### 8.5.1.1 Monopolar link

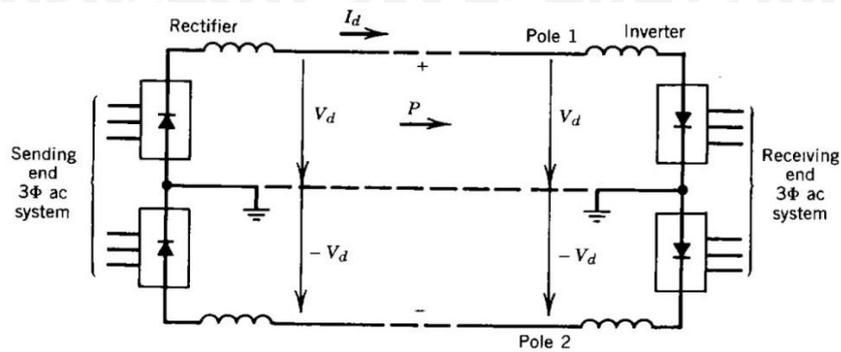


Gambar 8-7 HVDC Monopolar link

Sumber : Gönen (1988:332)

*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.

### 8.5.1.2 Bipolar link

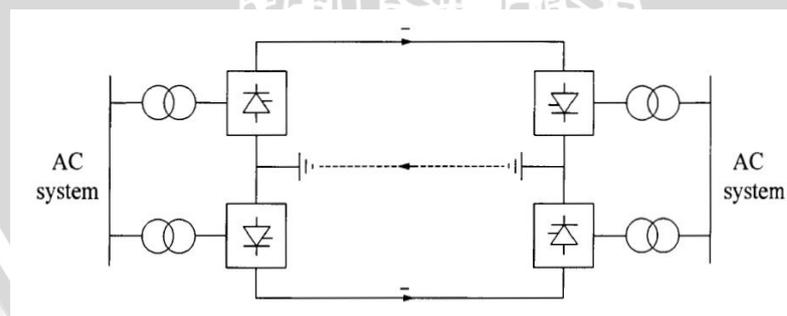


Gambar 8-8 HVDC Bipolar link

Sumber: Gönen (1988:332)

*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.

### 8.5.1.3 Homopolar link



Gambar 8-9 HVDC Homopolar link

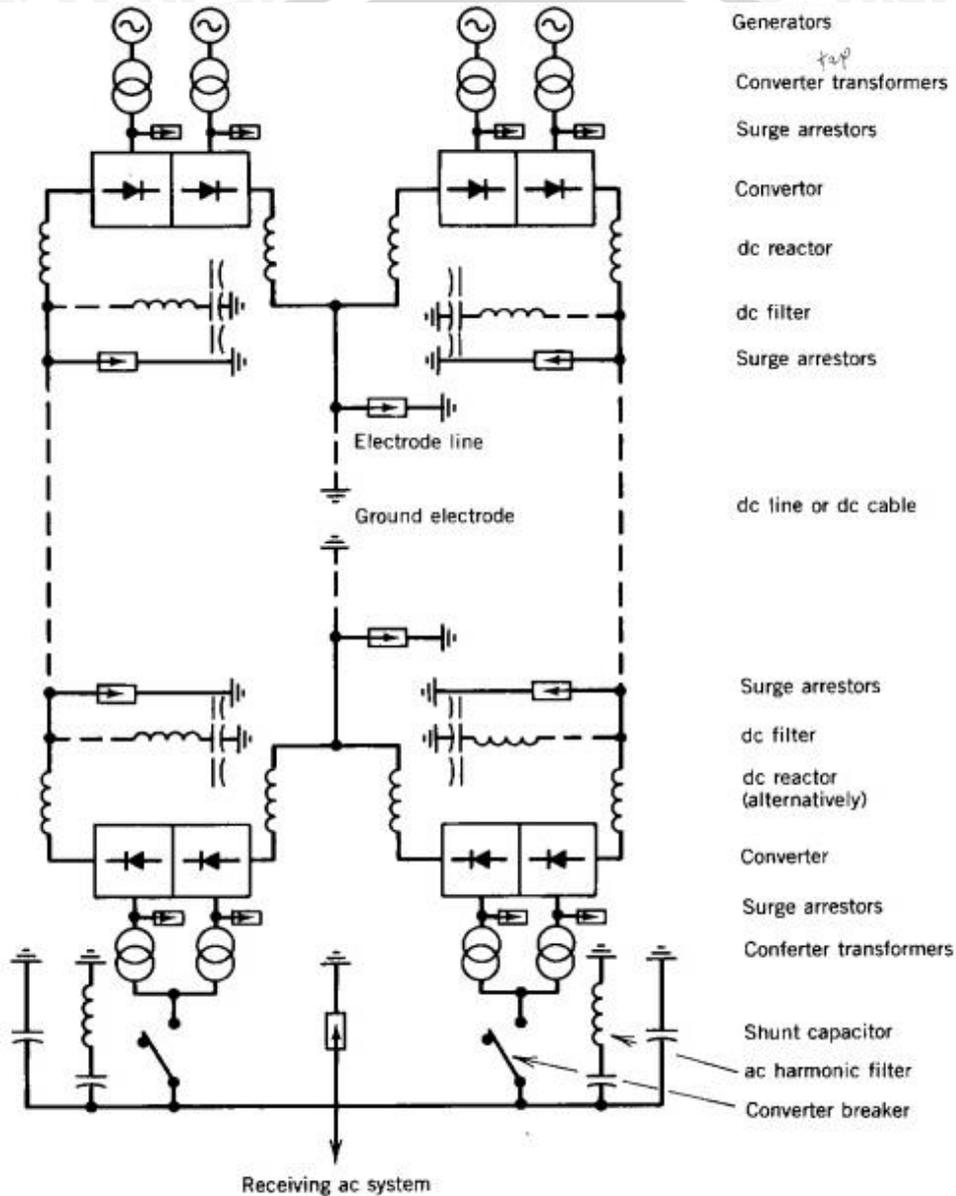
Sumber: Kundur (1994:466)

*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.

### 8.5.2 Komponen Sistem Transmisi HVDC

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



Gambar 8-10 Sistem Operasi transmisi HVDC *Bipolar link*

Sumber: Gönen (1988:333)

Berikut ini dijelaskan fungsi dari komponen pembentuk sistem HVDC:

#### 1. Converters

Proses utama yang terjadi di dalam sistem HVDC adalah perubahan arus listrik AC menjadi arus DC (*Direct Current*) yang terjadi pada sisi pengirim dan perubahan arus DC menjadi arus AC pada sisi penerima. Untuk melakukan proses tersebut, maka digunakan konverter dan terdiri dari *valve bridges* dan transformator dengan *tap changer*.

## 2. *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 kegagalan komutasi pada *inverter*
- Mencegah arus menjadi diskontinyu pada beban lampu
- Membatasi arus puncak pada *rectifier* jika terjadi *short circuit* pada transmisi DC

## 3. *Harmonic Filter*

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

## 4. *Reactive Power Supplies*

*DC converter* menyerap daya reaktif. Dalam kondisi mantap atau *steady state*, daya reaktif yang diserap sekitar 50 persen dari daya aktif yang dikirim. Sedangkan dalam kondisi transien, konsumsi daya reaktif bisa menjadi lebih besar. Sumber daya reaktif atau *Reactive Power Supplies* ini terletak di dekat konverter. Untuk sistem AC, biasanya digunakan kapasitor shunt, kondenser sinkron atau *Static Var Compensator* (SVC). Kapasitor yang terdapat pada filter AC juga merupakan bagian dari *Reactive Power Supplies*.

## 5. *Electrodes*

Kebanyakan *DC link* dirancang agar menggunakan 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.

## 6. *DC Lines*

Merupakan saluran udara atau kabel. Saluran DC ini hanya memiliki 2 kabel, yaitu kabel positif dan negatif. Jumlah konduktor lebih sedikit daripada saluran transmisi AC.

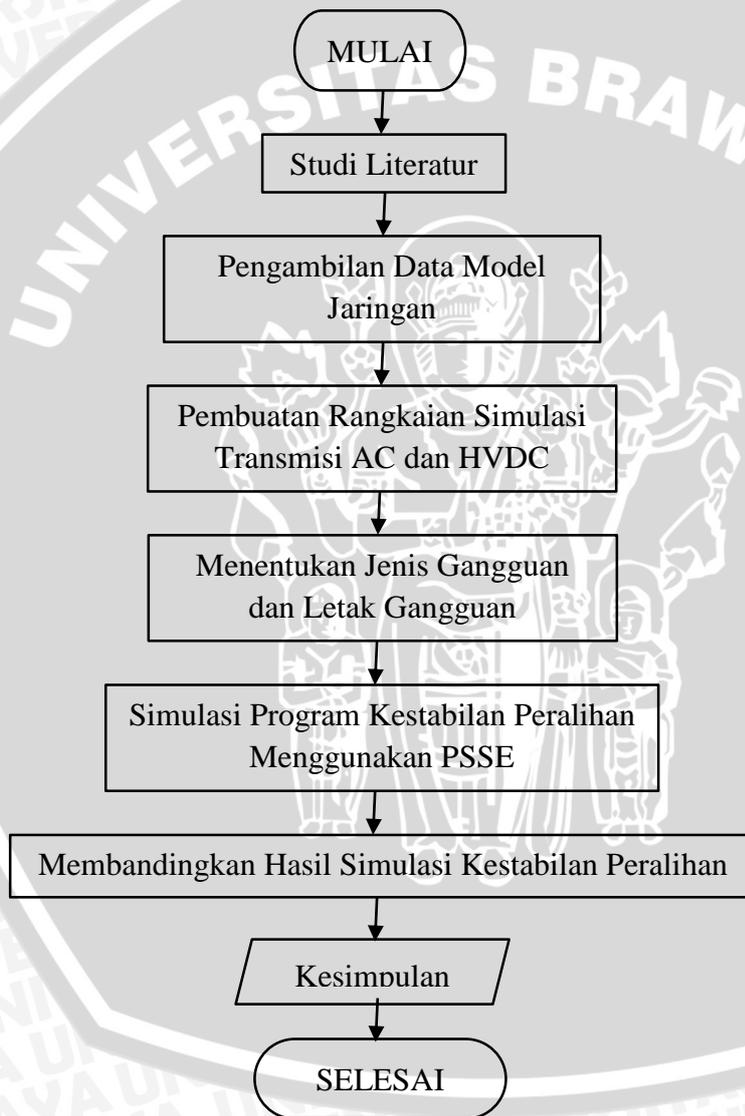
Hal ini merupakan salah satu kelebihan dari sistem transmisi AC yang minimal harus memiliki 3 saluran, karena jumlah fasa nya ada 3.

### 7. AC Circuit Breakers

Untuk membersihkan kegagalan pada transformator dan untuk menarik DC link dari pengoperasian, circuit breaker digunakan pada sisi AC. Bila terjadi kegagalan DC, alat ini tidak berfungsi, karena akan diatasi dengan cepat oleh pengendalian konverter.

### 9. Metode Penelitian

Metodologi yang digunakan untuk pembahasan dalam skripsi ini yaitu sebagai berikut:



Gambar 9-1 Diagram Alir langkah-langkah penelitian

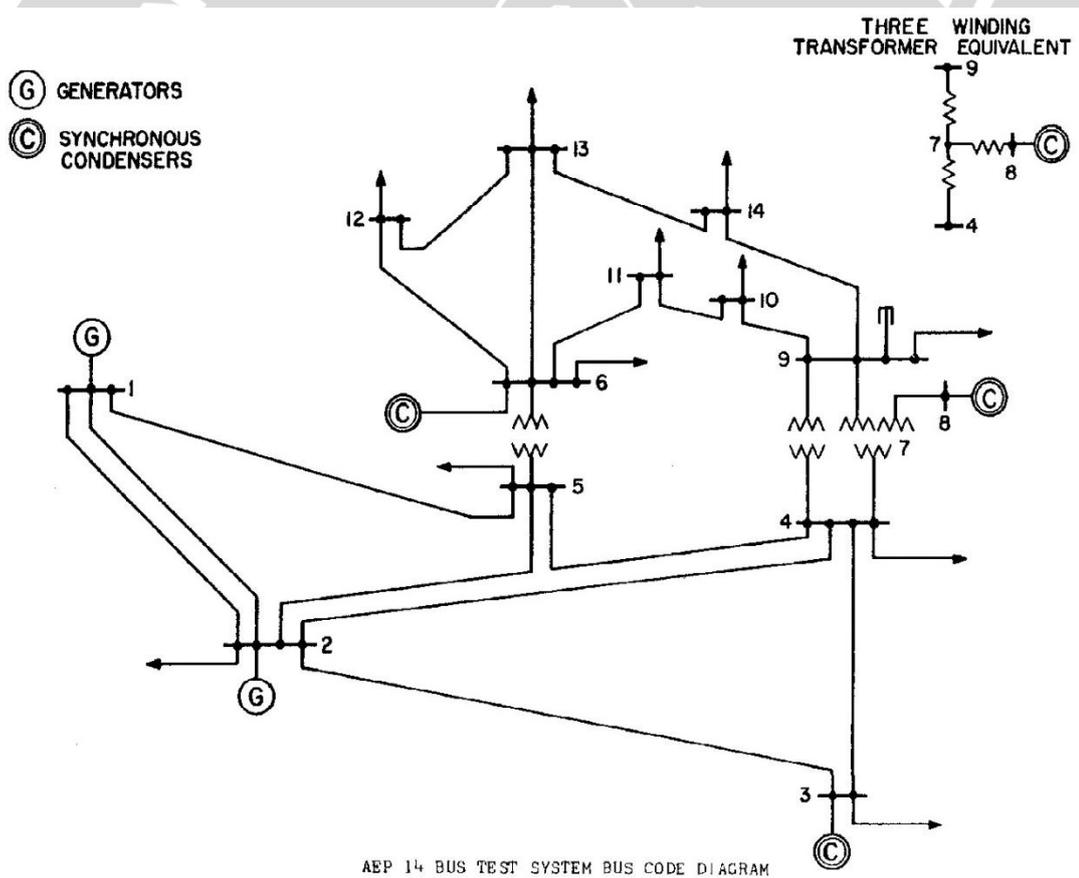
#### 9.1 Studi Literatur

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.

## 9.2 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. Pada analisis ini akan menggunakan Sistem Standar IEEE 14 Bus yang digunakan untuk simulasi. Sumber data sistem standar IEEE 14 bus berasal dari jurnal “*Indices to Detect Hopf Bifurcation in Power Systems*” (Mithulanathan, N. 2000:1518-1523). Berikut ini Single Line Diagram Sistem Standar IEEE 14 Bus:



Gambar 9-2 Single Line Diagram Sistem Standar IEEE 14 Bus

Sumber: (Mithulanathan, N. 2000:1518-1523)

Berikut ini ditampilkan data pembangkitan daya nyata dan daya reaktif pada sistem standar IEEE 14 bus.

Tabel 9.1 Data Pembangkitan Sistem Standar IEEE 14 Bus

No. Bus	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVAR)	Q <sub>G</sub> min (MVAR)	Q <sub>G</sub> max (MVAR)
1	114.170	-16.900	0.000	10.000
2	40.000	0.000	-42.000	50.000
5	0.000	0.000	23.400	40.000

Sumber: (Mithulananthan, N. 2000:1518-1523)

Berikut ini ditampilkan data saluran sistem standar IEEE 14 bus yang terdiri dari impedansi saluran (R dan X) serta suseptansi (B) masing-masing dalam per unit (p.u).

Tabel 9.2 Data Saluran Sistem Standar IEEE 14 Bus

No Saluran	Bus Awal	Bus Tujuan	R (p.u)	X (p.u)	1/2 B (p.u)	Rating MVA
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0264	120
2	1	5	0.05403	0.22304	0.0219	65
3	2	3	0.04699	0.19797	0.0187	36
4	2	4	0.05811	0.17632	0.0246	65
5	2	5	0.05695	0.17388	0.017	50
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0173	65
7	4	5	0.01335	0.04211	0.0064	45
8	4	7	0	0.20912	0	55
9	4	9	0	0.55618	0	32
10	5	6	0	0.25202	0	45
11	6	11	0.09498	0.1989	0	18
12	6	12	0.12291	0.25581	0	32
13	6	13	0.06615	0.13027	0	32
14	7	8	0	0.17615	0	32
15	7	9	0	0.11001	0	32
16	9	10	0.03181	0.0845	0	32
17	9	14	0.12711	0.27038	0	32
18	10	11	0.08205	0.19207	0	12
19	12	13	0.22092	0.19988	0	12
20	13	14	0.17093	0.34802	0	12

Sumber: (Mithulananthan, N. 2000:1518-1523)

Berikut adalah data pembebanan pada masing-masing bus, beserta tegangan dan sudut tiap bus ditunjukkan pada Tabel 9.3

Tabel 9.3 Data Pembebanan dan Tegangan Sistem Standar IEEE 14 Bus

No. Bus	Tegangan		Beban	
	Magnitude	Derajat	P (MW)	Q (MVAR)
1	1.060	0	0	0
2	1.045	0	21.7	12.7
3	1.010	0	94.2	19.7
4	1	0	47.8	-3.9
5	1	0	7.6	1.6
6	1	0	11.2	7.5
7	1	0	0	0

8	1	0	0	0
9	1	0	29.5	16.6
10	1	0	9	5.8
11	1	0	3.5	1.8
12	1	0	6.1	1.6
13	1	0	13.8	5.8
14	1	0	14.9	5

Sumber: (Mithulananthan, N. 2000:1518-1523)

Berikut adalah data nilai tap tegangan Transformer pada Tabel 9.4

Tabel 9.4 Data Nilai Tap Tegangan Transformer Sistem Standar IEEE 14 Bus

Bus Awal	Bus Tujuan	Nilai Tap Tegangan (p.u)
4	7	0.978
4	9	0.969
5	6	0.932

Sumber: (Mithulananthan, N. 2000:1518-1523)

Berikut adalah data kapasitor shunt pada Tabel 9.5

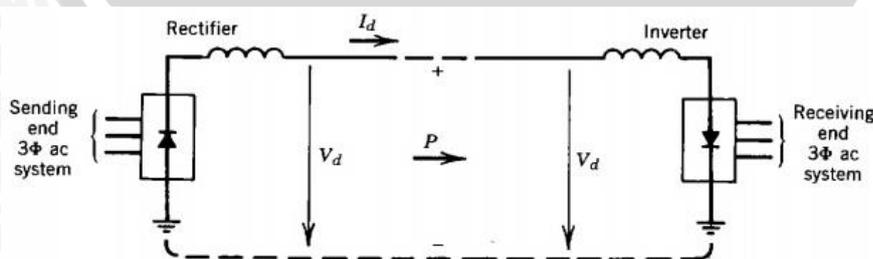
Tabel 9.5 Data Kapasitor Shunt Sistem Standar IEEE 14 Bus

No Bus	B (p.u)
9	0.19

Sumber: (Mithulananthan, N. 2000:1518-1523)

### 9.3 Pembuatan Rangkaian Simulasi Transmisi AC dan HVDC

Pembuatan rangkaian simulasi Transmisi AC dan HVDC menggunakan perangkat lunak PSSE. Untuk Sistem Transmisi AC sistem seperti single line Gambar 9.2, sedangkan Sistem Transmisi HVDC, sistem DC link yang digunakan adalah *monopolar link*. Satu konduktor pada *monopolar link* mengalirkan tegangan dengan polaritas positif atau polaritas negatif. Sistem DC link jenis ini dipilih karena menghasilkan ripple yang sedikit. 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.



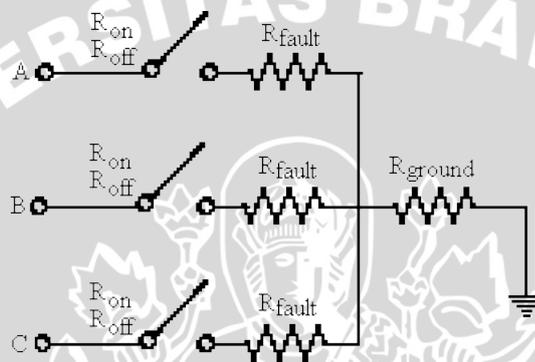
Gambar 9-3 HVDC *monopolar link*

Sumber: Gönen (1988:332)

#### 9.4 Menentukan Jenis Gangguan dan Letak Gangguan

Sebagai keperluan awal analisis kestabilan peralihan, perhitungan aliran beban (*load flow*) perlu di selesaikan untuk menentukan kondisi mantap dari jaringan (Hashim, dkk.,2012:483). Setelah sistem dibuat, untuk menganalisis kestabilan peralihan, diperlukan penentuan jenis gangguan dan letak gangguan pada sistem. Gangguan pada sistem tiga fasa 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).

Untuk menganalisis kestabilan transien, gangguan yang akan disimulasikan adalah gangguan tiga fasa ke tanah pada beberapa lokasi pada sistem tenaga listrik (Dandawate, 2013:1385).

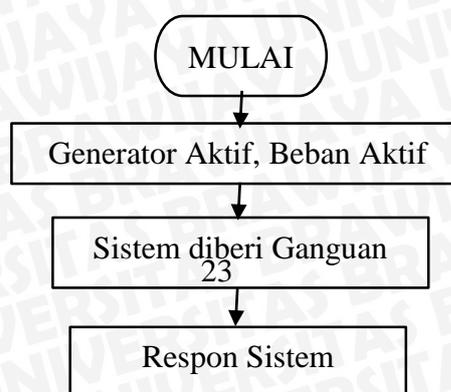


Gambar 9-4 Gangguan tiga fasa ke tanah

Gangguan ini dipilih karena gangguan ini merupakan gangguan yang besar. Gangguan ini akan disimulasikan terhadap Sistem Standar IEEE 14 Bus. Lama gangguan diberikan selama 50ms. Letak gangguan pada Sistem Transmisi HVDC yaitu pada terminal DC sebelum rectifier dan terminal DC sesudah inverter.

#### 9.5 Simulasi Program Kestabilan Transien 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. Ketika terjadi gangguan besar, kemungkinan yang terjadi adalah kecepatan generator sinkron pada sisi pembangkitan akan berubah. Kemungkinan terburuknya adalah terputusnya beban atau blackout. Simulasi dilakukan menggunakan bantuan komputer dengan perangkat lunak PSSE, pemodelan-pemodelan seperti yang sudah dijelaskan



Gambar 9-5 Diagram Alir Simulasi Program

**9.6 Membandingkan Hasil Simulasi Kestabilan Transien**

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.

**10. Rencana Kegiatan**

Pelaksanaan kegiatan ini direncanakan dalam waktu empat bulan dengan kegiatan setiap bulannya ditunjukkan dalam Tabel 10.1.

NO	KEGIATAN	BULAN KE-			
		I	II	III	IV
1.	Seminar Proposal	■			
2.	Studi Literatur	■	■	■	
3.	Penyusunan Sistem		■	■	
4.	Melakukan pengujian berupa simulasi dan analisis sistem		■	■	■
5.	Penyusunan Laporan			■	■
6.	Seminar Hasil				■

Tabel 10.1 Rencana Kegiatan

**11. Daftar Pustaka**

Behraves, V., Abbaspour, N. 2012. *New Comparison of HVDC and HVAC Transmission system*. IJEIR 1(3):2277 – 5668.

Cekdin, C., Barlian, T. 2013. *Transmisi Daya Listrik*. Yogyakarta: Andi.



- Dandawate, S.B., Shaikh, S.L. 2013. *Analysis of Effect on Transient Stability of Interconnected Power System by Introduction of HVDC Link*. IJERA 3(3):1383-1387.
- El-Hawary, M.E. 1995. *Electrical Power Systems Design and Analysis*. New York: IEEE Press, Inc.
- Gönen, T. 1988. *Electrical Power Transmission System Engineering Analysis and Design*. California: John Wiley & Sons. Inc.
- Hashim, N., Hamzah, N., Abdul Latip M.F. 2012. *Transient Stability Analysis of the IEEE 14-Bus Test System Using Dynamic Computation for Power Systems (DCPS)* IEEE Trans, pp 481-486.
- IEEE Power Systems Test Case Achieve. Available: [http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg\\_tca14bus.htm](http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm)
- Iyambo, P.K., Tzoneva, R. 2007. *Transient Stability Analysis of the IEEE 14-Bus Electric Power System*. IEEE Trans, pp 1-8.
- Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Control*. California: Mcgraw Hill, Inc.
- 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.

