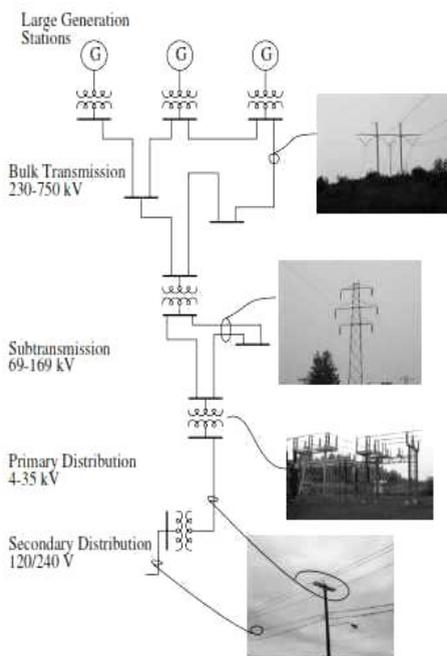


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik terdiri atas lima sub sistem utama, yaitu : pusat pembangkit, transmisi, gardu induk, jaringan distribusi, dan beban.



Gambar 2.1 Gambaran luas infrastruktur listrik  
(Hermawan,2008)

Pada pusat pembangkit terdapat generator dan transformator penaik tegangan (*step-up transformer*). Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik yang dimana pada umumnya generator membangkitkan daya listrik bertegangan rata-rata 11 kV hingga 25 kV. Melalui transformator penaik tegangan energi listrik dinaikan menjadi antara 66 kV hingga 500 kV atau lebih. Pada transmisi tegangan dinaikan dengan tujuan mengurangi jumlah arus yang melewati saluran transmisi sehingga dapat memperkecil kebutuhan luas penampang penghantar yang digunakan. Dengan demikian saluran transmisi bertegangan tinggi akan membawa aliran arus yang rendah dan dapat mengurangi rugi-rugi transmisi.

Tegangan tinggi yang dikirim melewati saluran transmisi akan menuju pusat-pusat beban yang kemudian tegangan tersebut akan diturunkan lagi melalui transformator tegangan (*step-down transformer*) yang ada pada gardu induk menjadi tegangan menengah yaitu 20 kV dan terakhir tegangan akan diturunkan lagi pada jaringan distribusi melalui gardu tiang trafo menjadi tegangan rendah 220/380 V.

## **2.2 Sistem Interkoneksi**

Sistem Interkoneksi adalah suatu sistem kelistrikan

yang terdiri lebih dari satu pusat pembangkit, transmisi dan satu pusat beban yang saling tergabung menjadi satu dan membentuk sistem jaringan (*Network*). Pada jaringan interkoneksi di Indonesia transmisi berdasarkan tegangan kerjanya dibedakan menjadi tiga, yaitu, 70 kV, 150 kV, 500 kV dan sebagainya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Topologi Jaringan Interkoneksi Jawa Timur – Bali (Sutrisna, Kadek Fendy, 2011)

### 2.3 Diagram Segaris (*Single Line*)

Suatu sistem tiga fasa yang simetris selalu dipecahkan per satu fasa dengan menggambarkan diagram segaris (*single line diagram*). Diagram segaris memiliki tujuan

untuk memberikan semua informasi yang perlu dalam bentuk yang sesuai dengan kondisi sistem sebenarnya. Diagram segaris itu berbeda-beda sesuai dengan studi yang akan dilakukan.

Pada persoalan-persoalan dalam sistem tenaga adalah : aliran daya (*load flow*), hubung singkat (*short circuit*), operasi ekonomi, kestabilan peralihan, pengaturan-pengaturan daya reaktif dan tegangan seta pelepasan beban. Dilihat dari batasan waktu, persoalan-persoalan diatas dapat dikelompokkan dalam tiga kelompok keadaan yaitu : keadaan mantap, keadaan peralihan, dan keadaan sub-peralihan.

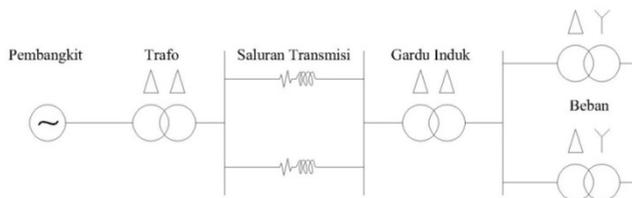
Pada suatu aliran daya dan operasi ekonomi yang dibutuhkan adalah besaran-besaran dalam keadaan mantap, pada studi kestabilan peralihan dibutuhkan besaran-besaran dalam keadaan peralihan dan pada hubung singkat dibutuhkan besaran-besaran dalam keadaan sub-peralihan. Pada studi pengaturan dan pelepasan beban besar, besaran yang dibutuhkan tergantung dari keadaan yang diinginkan, mantap atau peralihan.

Oleh karena itu, representasi sistem tenaga listrik itu digambarkan sesuai dengan studi-studi yang akan dilakukan, dan banyaknya keterangan yang dimasukkan dalam diagram tergantung pada maksud diagram tersebut dibuat. Misalnya dalam studi aliran daya beban-beban dan tahanan-tahanan

harus digambarkan, tempat pemutus tenaga, dan rele tidak penting, jadi tidak perlu digambarkan, juga impedansi hubungan netral ke tanah tidak perlu digambarkan.

Dalam studi hubung singkat, tempat dan spesifikasi pemutus tenaga dan rele harus diberikan, sedangkan tahanan biasanya dapat diabaikan. Demikian juga beban static dapat diabaikan. Pengabaian ini dilakukan untuk menyederhanakan perhitungan, tetapi bila perhitungan dilakukan dengan komputer digital pengabaian ini tidak perlu, dengan demikian diperoleh hasil yang lebih teliti.

Representasi sistem untuk studi kestabilan peralihan hampir sama dengan representasi sistem untuk hubung singkat. Pada studi peralihan digunakan reaktansi peralihan sedangkan pada studi hubung singkat digunakan sub-peralihan. Gambar 2.3 menunjukkan contoh diagram segaris sistem tenaga listrik.



Gambar 2.3 Diagram Segaris Suatu Sistem Listrik  
(Hermawan,2008)

## 2.4 Transformator Tenaga

Transformator tenaga adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator menggunakan prinsip hukum Faraday dan hukum Lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak-balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial.

$$e = \left( \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (2-1)$$

$e$  = emf sesaat (*instabtaneous emf*)

$\phi$  = fluks terhubung (*linked flux*)

Dan pada transformator ideal yang dieksitasi dengan sumber sinusoidal berlaku persamaan:

$$E = 4,44 \varphi_m N f$$

$$E = 4,44 \cdot \varphi_m \cdot N \cdot f \quad (2-2)$$

$E$  = tegangan (rms)

$N$  = jumlah lilitan

$\varphi_m$  = fluks puncak (*peak flux*)

$f$  = frekuensi

dan persamaan :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2-3)$$

Untuk mempermudah analisis dalam pengujian, rangkaian primer dan sekunder dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Loss_2 &= I_2^2 \cdot R_2 \\ &= I_2^2 (I_2^2 / I_2^2) \cdot R_2 \\ &= I_2^2 (I_2 / I_1)^2 \cdot R_2 \\ Loss_2 &= I_2^2 \cdot a^2 \cdot R_2 \end{aligned} \quad (2-4)$$

Dimana  $a$  adalah rasio perbandingan lilitan kumparan sekunder terhadap kumparan primer sehingga resistansi sekunder didapatkan :

$$R_2' = a' \cdot R_2$$

dan reaktansi sekunder didapatkan :

$$X_2' = a' \cdot X_2$$

Rugi hysteresis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$P_H = k_H \cdot f^2 \cdot B_{max}^n \quad (2-5)$$

$P_H$  = rugi hysteresis [w/kg]

$k_H$  = konstanta material inti

$f$  = frekuensi [Hz]

$B_{max}$  = nilai puncak medan magnet [T]

$n$  = nilai eksponensial, tergantung material dan  $B_{max}$

Rugi arus pusar dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot B_{max}^n \quad (2-6)$$

$P_e$  = rugi arus pusar [w/kg]

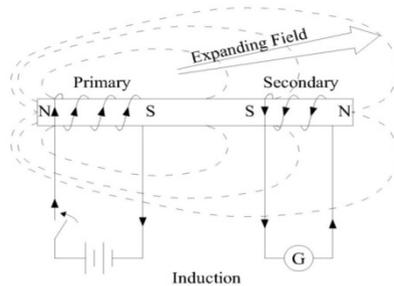
$k_e$  = konstanta material inti

$f$  = frekuensi [Hz]

$t$  = ketebalan material [m]

$B_{max}$  = nilai puncak medan magnet [T]

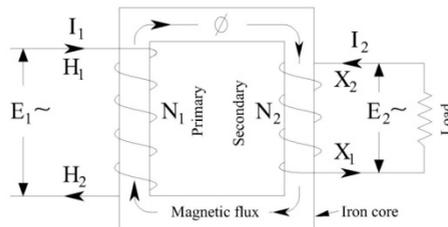
Rugi hysteresis maupun rugi arus pusar bernilai tetap, tidak tergantung pada besarnya beban. Gambar 2.4 menunjukkan simulasi ggl induksi.



Gambar 2.4 Suatu kumparan mengelilingi magnet akan timbul gaya gerak listrik (Panduan Pemeliharaan Trafo Tenaga PT PLN (Persero) P3B, 2003)

Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga didalam besi

akan mengalir flux magnet dan flux magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial. Gambar 2.5 menunjukkan prinsip dasar trafo.



Gambar 2.5 Prinsip dasar dari Transformator (Panduan Pemeliharaan Trafo Tenaga PT PLN (Persero) P3B, 2003)

Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan sebagai jantung dari transmisi dan distribusi. Berdasarkan tegangan operasinya dapat dibedakan menjadi transformator 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut Interbus Transformator (IBT). Transformator 150/20 kV dan 70/20 kV disebut juga trafo distribusi.

### 2.4.1 Konstruksi Trafo Tiga Phasa

Secara umum sebuah transformator tiga phasa mempunyai konstruksi hampir sama, yang membedakanya

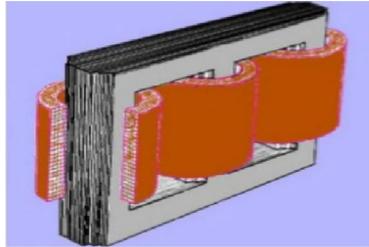
adalah alat bantu dan sistem pengamannya, tergantung pada letak pemasangan, sistem pendinginan, pengoperasian, fungsi dan pemakaiannya. Bagian utama, alat bantu, dan sistem pengaman yang ada pada sebuah transformator daya seperti gambar 2.6 berikut.



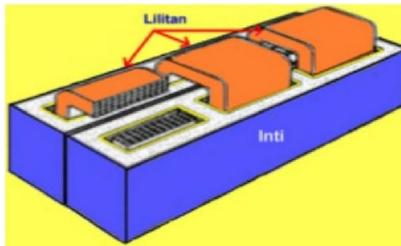
Gambar 2.6 bagian dalam trafo 3 fase (Sumardjati,Prih, 2008)

### **a. Inti Trafo**

Seperti halnya pada transformator satu fasa, inti besi berfungsi sebagai tempat mengalirnya fluks dari kumparan primer ke kumparan sekunder sehingga akan didapatkan induksi medan magnet yang lebih kuat. Berdasarkan cara melilit kumparannya ada dua jenis, yaitu tipe inti dan tipe cangkang. Gambar 2.7 menunjukkan kumparan tipe inti sedangkan gambar 2.8 menunjukkan kumparan tipe cangkang.



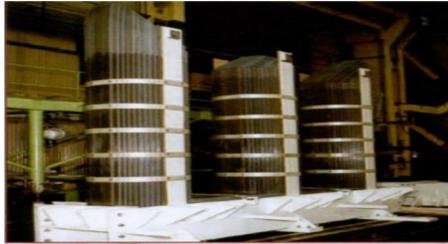
Gambar 2.7 Transformator Tipe Inti (Sumardjati,Prih, 2008)



Gambar 2.8 Transformator Tipe Cangkang (Sumardjati,Prih, 2008)

Inti trafo dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis dari bahan besi silikon (*Grain Oriented Silicon Steel*) yang berisolasi, yang tujuannya adalah untuk mengurangi panassebagai rugi-rugi besi yang ditimbulkan oleh Eddy Current .

Gambar 2.9 merupakan contoh inti besi transformator tenaga.



Gambar 2.9 Prinsip dasar dari Transformator (Panduan Pemeliharaan Trafo Tenaga PT PLN (Persero) P3B, 2003)

### **b. Kumparan Transformator**

Kumparan transformator terdiri dari lilitan kawat berisolasi dan membentuk kumparan. Kawat yang dipakai adalah kawat tembaga berisolasi yang berbentuk bulat atau plat. Kumparan-kumparan transformator diberi isolasi baik terhadap kumparan lain maupun inti besinya. Bahan isolasi berbentuk padat seperti kertas prespa, pertinak, dan lain-nya.

### **c. Minyak Trafo**

Sebagian besar trafo tenaga kumparan-kumparan dan intinya direndam dalam minyak trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai media pemindah panas (disirkulasi) dan bersifat sebagai isolasi (daya tegangan tembus tinggi) sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Minyak trafo harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. Kekuatan isolasi tinggi
2. Penyalur panas yang baik, berat jenis kecil sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat
3. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik
4. Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan

#### **d. Bushing**

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo.

#### **e. Tangki dan Konservator**

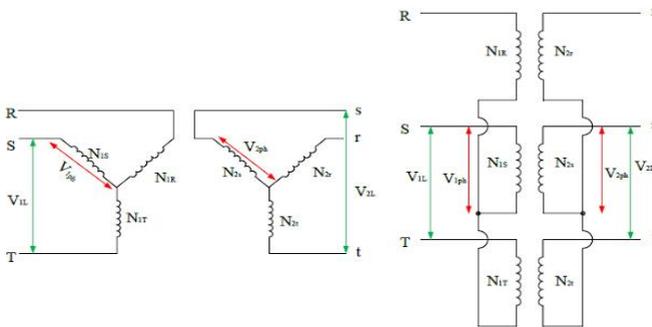
Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo berada (ditempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemuaiian minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.

### **2.4.2 Jenis-Jenis Hubungan Transformator Tiga Phasa**

Dalam pelaksanaanya, tiga buah lilitan phasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubungkan dalam bermacam-macam hubungan, seperti bintang dan segitiga, dengan kombinasi Y-Y, Y- $\Delta$ ,  $\Delta$ -Y,  $\Delta$ - $\Delta$ .

**a. Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y)**

Pada jenis ini ujung-ujung pada masing-masing terminal dihubungkan secara bintang. Titik netral dijadikan menjadi satu. Hubungan dari tipe ini lebih ekonomis untuk arus nominal yang kecil pada transformator tegangan tinggi. Gambar 2.10 menunjukkan contoh hubungan Y-Y.



Gambar 2.10 Transformator 3 fase hubungan Y-Y  
(Theodore. W., 1997)

Perhitungan pada transformator 3 fase hubungan Y-Y  
Sisi primer:

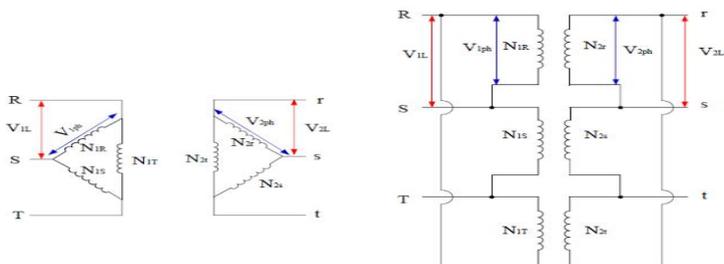
$$V_{ph1} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}} \text{ volt } I_{L1} = I_{ph1} \text{ ampere} \quad (2-7)$$

Sisi sekunder:

$$V_{ph2} = \frac{V_{L2}}{\sqrt{3}} \text{ volt } I_{L2} = I_{ph2} \text{ ampere} \quad (2-8)$$

**b. Hubungan Segitiga-Segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ )**

Pada jenis ini ujung fasa dihubungkan dengan ujung netral kumparan lain yang secara keseluruhan akan terbentuk hubungan delta/segitiga. Hubungan ini umumnya digunakan pada sistem yang menyalurkan arus besar pada tegangan rendah dan yang paling utama saat keberlangsungan dari pelayanan harus dipelihara meskipun salah satu fasa mengalami kegagalan. Gambar 2.11 menunjukkan contoh hubungan  $\Delta$ - $\Delta$ .



Gambar 2.11 Transformator 3 fasa hubungan  $\Delta$ - $\Delta$   
(Theodore. W., 1997)

Perhitungan pada transformator 3 fasa hubungan  $\Delta$ - $\Delta$

Sisi primer:

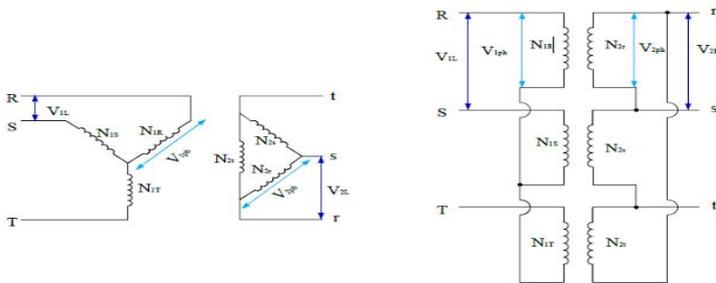
$$V_{L1} = V_{ph1} \text{ volt} \qquad I_{L1} = \sqrt{3} I_{ph1} \text{ ampere} \quad (2-9)$$

Sisi sekunder:

$$V_{L2} = V_{ph2} \text{ volt} \qquad I_{L2} = \sqrt{3} I_{ph2} \text{ ampere} \quad (2-10)$$

**c. Hubungan Bintang-Segitiga (Y-Δ)**

Pada hubungan ini, kumpulan pada sisi primer dirangkai secara bintang dan sisi sekundernya dirangkai segitiga. Umumnya digunakan pada trafo untuk jaringan transmisi dimana tegangan nantinya akan diturunkan (step-down). Perbandingan tegangan jala-jala  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  kali perbandingan lilitan transformator. Tegangan sekunder tertinggal  $30^\circ$  dari tegangan primer. Gambar 2.12 menunjukkan contoh hubungan Y-Δ.



Gambar 2.12 Transformator 3 fase hubungan Y-Δ  
(Theodore. W., 1997)

Perhitungan pada transformator 3 fase hubungan Y-Δ

Sisi primer:

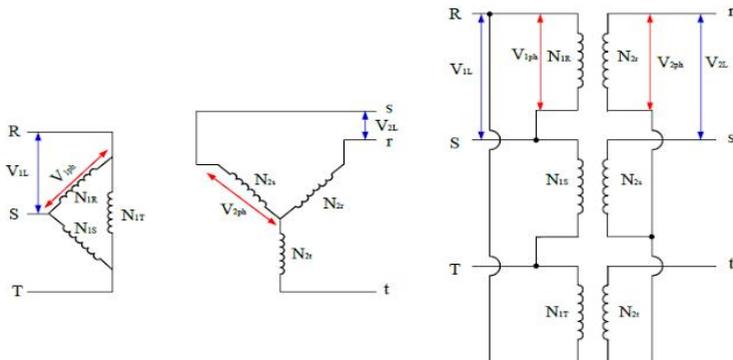
$$V_{ph1} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}} \text{ volt} \qquad I_{L1} = I_{ph1} \text{ ampere} \quad (2-11)$$

Sisi sekunder:

$$V_{ph2} = V_{L2} \text{ volt} \qquad I_{ph2} = \frac{I_{L2}}{\sqrt{3}} \text{ ampere} \qquad (2-12)$$

**d. Hubungan Segitiga-Bintang ( $\Delta$ -Y)**

Pada hubungan ini, sisi primer trafo dirangkai secara delta sedangkan pada sisi sekundernya merupakan rangkaian bintang sehingga pada sisi sekundernya terdapat titik netral. Biasanya digunakan untuk menaikkan tegangan (step-up) pada awal sistem transmisi tegangan tinggi. Dalam hubungan ini perbandingan tegangan 3 kali perbandingan lilitan transformator dan tegangan sekunder mendahului sebesar  $30^\circ$  dari tegangan primernya. Gambar 2.13 menunjukkan contoh hubungan  $\Delta$ -Y.



Gambar 2.13 Transformator 3 fase hubungan  $\Delta$ -Y  
(Theodore. W., 1997)

Perhitungan pada transformator 3 phasa hubungan  $\Delta$ -Y

Sisi primer:

$$V_{L1} = V_{ph1} \text{ volt} \quad I_{ph1} = \frac{I_{L1}}{\sqrt{3}} I_{ph1} \text{ ampere (2-13)}$$

Sisi sekunder:

$$V_{ph2} = \frac{V_{L2}}{\sqrt{3}} \text{ volt} \quad I_{L2} = I_{ph2} \text{ ampere (2-14)}$$

## 2.5 Gardu Induk

Gardu induk merupakan bagian yang tak terpisahkan dari saluran transmisi dan distribusi listrik. Dimana suatu sistem tenaga yang dipusatkan pada suatu tempat berisi saluran transmisi dan distribusi, perlengkapan hubung bagi, transformator, dan peralatan pengaman serta peralatan kontrol. Fungsi utama gardu induk :

- a. Untuk mengatur aliran daya listrik dari saluran transmisi ke saluran transmisi lainnya yang kemudian didistribusikan ke konsumen
- b. Sebagai tempat kontrol
- c. Sebagai pengaman operasi sistem
- d. Sebagai tempat untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi

Dilihat dari segi manfaat dan kegunaan dari gardu induk itu sendiri, maka peralatan dan komponen dari gardu induk harus memiliki keandalan yang tinggi serta kualitas yang tidak

diragukan lagi, atau dapat dikatakan harus optimal dalam kinerjanya sehingga masyarakat sebagai konsumen tidak merasa dirugikan. Rekonstruksi pembangunan gardu induk harus memiliki syarat-syarat yang berlaku dan harus diperhatikan besarnya beban. Maka perencanaan suatu gardu induk harus memenuhi persyaratan sebagai berikut

- a. Operasi, yaitu dalam segi perawatan dan perbaikan mudah
- b. Fleksibel
- c. Kontruksi sederhana dan kuat
- d. Memiliki tingkat keandalan dan daya guna yang tinggi
- e. Memiliki tingkat keamanan yang tinggi

Sedangkan berdasarkan rekonstruksi letak pemasangan gardu induk, maka gardu induk dapat dibedakan atas :

**a. Gardu Induk jenis pasang dalam**

Gardu induk pasang dalam adalah semua komponen yang berada pada gardu induk terpasang didalam, meskipun ada beberapa sejumlah kecil peralatan terpasang di luar. Gardu induk ini dipakai dipusat kota, dimana harga suatu lokasi sangat mahal, biasa digunakan untuk menghindari kebakaran dan gangguan suara. Gambar 2.14 menunjukkan contoh gardu induk pasang dalam.



Gambar 2.14 Gardu Induk jenis pasang dalam (CHEM., 2009)

#### **b. Gardu Induk jenis pasang luar**

Gardu induk pasang luar adalah gardu induk yang terdiri dari peralatan tinggi pasang luar, misalnya transformator, peralatan penghubung. Jenis gardu ini memerlukan lahan yang luas akan tetapi biaya konstruksinya murah dan pendinginannya mudah, gardu induk jenis ini di pasang dipinggiran kota. Gambar 2.15 menunjukkan contoh gardu induk pasang luar.



Gambar 2.15 Gardu Induk jenis pasang luar (Gardu Induk., 2013)

**c. Gardu Induk jenis mobile**

Gardu induk jenis mobile yaitu peralatan gardu induk yang dipasang diatas trailer. Gardu induk ini biasa digunakan jika ada gangguan disuatu gardu lain maka digunakan gardu jenis ini guna pencegahan beban lebih berkala dan juga biasa digunakan pada pemakaian sementara dilokasi pembangunan tenaga listrik. Gardu ini tidak dapat dijadikan sebagai gardu utama melainkan sebagai gardu induk cadangan (sebagai penghubung yang dapat berpindah-pindah). Gambar 2.16 menunjukkan contoh gardu induk mobile.



Gambar 2.16 Gardu Induk jenis mobile (Cundoko., 2015)

## 2.6 Saluran Transmisi

Saluran Transmisi merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik dari generator station/ pembangkit listrik sampai distributor station hingga sampai konsumen pengguna listrik. Tenaga listrik di transmisikan oleh suatu bahan konduktor.

Berdasarkan sistem transmisi dan kapasitas tegangan yang disalurkan terdiri:

1. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30kV-150kV
2. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 30kV-150kV
3. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTET) 200kV-500kV
4. Saluran Udara Tegangan Ultra Tinggi (SUTUT) >500kV

Untuk saluran transmisi tegangan tinggi, dimana jarak antara menara/tiang berjauhan, maka dibutuhkan kuat tarik

yang lebih tinggi. Oleh karena itu digunakan kawat penghantar ACSR. Kawat penghantar aluminium, terdiri dari berbagai jenis yaitu AAC (*All-Aluminium Conductor*), AAAC (*All-aluminium Alloy Conductor*), ACSR (*Aluminium Conductor, Steel-Reinforced*), ACAR (*Aluminium Conductor, Alloy-Reinforced*).

Dalam saluran transmisi tegangan sisi kirim  $V_S$  dan arus  $I_S$  saling terhubung dengan tegangan akhir sisi terima  $V_R$  dan arus  $I_R$  dan akan melewati parameter A, B, C, dan D seperti

$$V_S = AV_R + BI_R \text{ Volts} \quad (2-15)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \text{ Amp} \quad (2-16)$$

jika dalam bentuk matriks

$$\begin{matrix} V_S \\ I_S \end{matrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{matrix} V_R \\ I_R \end{matrix} \quad (2-17)$$

Parameter A, B, C, dan D adalah parameter yang dipengaruhi oleh konstanta saluran transmisi R, L, C, dan G. Parameter ABCD pada umumnya adalah bilangan kompleks. A dan D tidak memiliki dimensi. B mempunyai ohm unit dan C memiliki satuan *Siemens*. Untuk mengidentifikasi konstanta ABCD juga bisa  $AD - BC = 1$  Untuk memudahkan

membedakan impedansi seri total dan jarak impedansi per-unit digunakan notasi sebagai berikut :

$z = \gamma + j\omega L\Omega/m$ , jarak impedansi seri per unit

$y = G + j\omega CS/m$ , jarak admitansi paralel per unit

$Z = z l \Omega$ , total impedansi seri

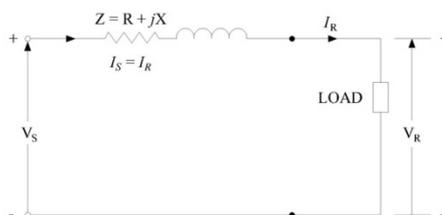
$Y = y l S$ , total admitansi paralel

$L = m$ , jarak saluran

Catatan untuk konduktansi paralel  $G$  biasanya diabaikan untuk sistem transmisi *overhead* (Das. D., 2006)

### 2.6.1 Transmisi Jarak Pendek

Saluran transmisi yang memiliki jarak saluran dibawah 80 km dapat dikategorikan jenis saluran transmisi jarak pendek. Nilai kapasitansi pada saluran dapat diabaikan tanpa mempengaruhi nilai *error* yang ditimbulkan. Model saluran pendek pada basis perfasa ditunjukkan pada gambar 2.17 (Das .D., 2006)



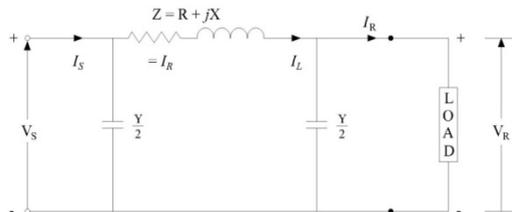
Gambar 2.17 Model saluran jarak pendek (Das. D., 2006)

Hubungan antara akhir pengiriman, akhir penerimaan, tegangan dan arus dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{V_S}{I_S} = \begin{matrix} 1 & Z & V_R \\ 0 & 1 & I_R \end{matrix} \quad (2-18)$$

### 2.6.2 Transmisi Jarak Menengah

Saluran transmisi yang memiliki jarak lebih dari 80 km dan kurang dari 250 km dikategorikan saluran jarak menengah dan arus pengisian saluran menjadi lumayan besar dan *shunt capacitance* bisa dipertimbangkan menjadi *lumped* pada setiap akhir dari saluran. Untuk tegangan akhir pengiriman dan arus untuk model nominal dapat digambarkan seperti gambar 2.18 berikut:



Gambar 2.18 Saluran jarak menengah (Das .D., 2006)

Dari KCI, arus pada impedansi seri didesain oleh  $I_L$  yaitu

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2}V_R \quad (2-19)$$

Dari KVL, tegangan akhir pengiriman adalah

$$V_S = V_R + ZI_L \quad (2-20)$$

Dari rumus 2-8 dan 2-9 didapatkan

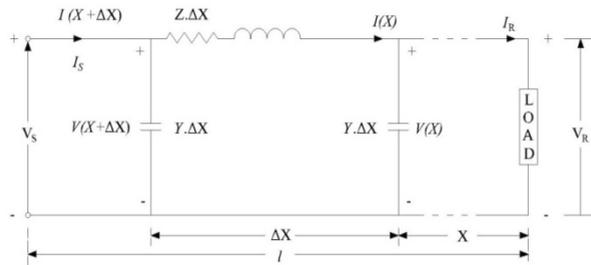
$$V_S = 1 + \frac{ZY}{2}V_R + ZI_R \quad (2-21)$$

Arus akhir pengiriman adalah

$$I_S = I_L + \frac{Y}{2}V_S \quad (2-22)$$

### 2.6.3 Transmisi Jarak Jauh

Saluran transmisi yang memiliki jarak lebih dari 250 km dikategorikan saluran jarak jauh. Untuk saluran jarak pendek dan menengah, model akurasi didapatkan dengan mengasumsi parameter saluran menjadi *lumped*. Untuk solusi akurasi parameter harus diambil sebagai bentuk yang didistribusikan sepanjang jarak sebagai hasil yang mana tegangan dan arus akan bervariasi dari poin ke poin pada saluran (Das. D., 2006). Gambar 2.19 menunjukkan satu fasa saluran yang didistribusi jarak/km.



Gambar 2.19 Permodelan saluran transmisi jarak jauh dengan parameter yang didistribusikan (Das. D., 2006)

Dari KVL. Bisa dituliskan

$$V_{x+\Delta x} = z \cdot \Delta x \cdot I_x + V_x$$

$$\frac{V_{x+\Delta x} - V_x}{\Delta x} = z \cdot I_x \quad (2-23)$$

$$\Delta x = 0$$

$$\frac{dV(x)}{dx} = z \cdot I(x) \quad (2-24)$$

Dari KCL, dapat dituliskan

$$I_{x+\Delta x} = I_x + y \cdot \Delta x \cdot V_{x+\Delta x}$$

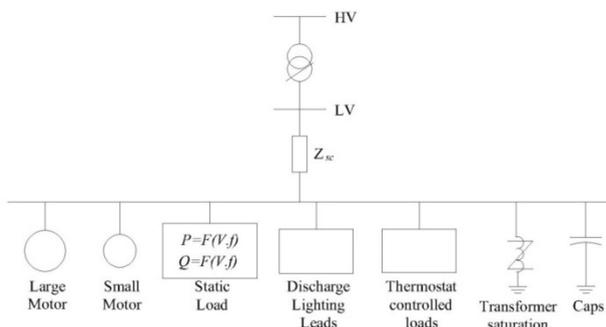
$$\frac{I_{x+\Delta x} - I_x}{\Delta x} = y \cdot V_{x+\Delta x} \quad (2-19)$$

$$\frac{dI(x)}{d(x)} = y \cdot V(x) \quad (2-25)$$

## 2.7 Beban

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik yang stabil pada sebuah sistem memiliki kemampuan untuk menyesuaikan *output* kelistrikan pada unit pembangkitan menuju beban listrik secara terus menerus. Pada dasarnya, jenis karakteristik beban mempunyai pengaruh penting terhadap kestabilan sistem. Pemodelan beban sangat rumit dikarenakan bus beban direpresentasikan pada studi stabilitas yang disusun oleh peralatan dengan jumlah yang besar seperti lampu, lemari pendingin, pemanas, kompresor, motor, tungku peleburan, dan yang lainnya. Komposisi beban yang tepat sangat sulit untuk diperkirakan. Perubahan komposisi tergantung pada banyak faktor termasuk waktu, kondisi cuaca, dan keadaan ekonomi.

Pada stabilitas sistem tenaga dan studi aliran daya, praktek yang umum adalah untuk mempresentasikan karakteristik kumpulan beban sebagaimana dijumpai dari *pointtransfer* daya dalam jumlah yang sangat besar. Pemodelan beban secara umum diklasifikasikan menjadi 2 kategori besar yaitu beban statis dan beban dinamis (Kundur. P., 1994). Contoh pemodelan beban pada gambar 2.20 berikut:



Gambar 2.20 Gabungan beban model statis dan dinamis  
(Kundur. P., 1994)

## 2.7. Pelepasan Beban (*Load Shedding*)

Load shedding ialah suatu bentuk tindakan pelepasan beban yang terjadi secara otomatis ataupun manual untuk pengamanan operasi dari unit-unit pembangkit dan saluran transmisi dari kemungkinan terjadinya padam total (*Black out*). Pembangkit tenaga listrik dan saluran transmisi pada suatu sistem tenaga seringkali mendapat gangguan yang tidak dapat diperkirakan dan dihindari, misalnya dengan terjadinya pembebanan secara tiba-tiba karena ada beban melebihi kapasitas dibebankan ke sistem atau dapat juga dengan terjadinya Trip satu unit pembangkit (Generator) atau lepasnya saluran transmisi pada interkoneksi jaringan. Pada perencanaan pelepasan beban dapat ditentukan terlebih

dahulu beban-beban yang akan dilepaskan, dimana dibagi dalam dua kategori yaitu :

### **1. Beban-beban yang penting (*Essential Load*)**

Yang dimaksud dengan beban-beban yang penting ialah beban-beban yang memegang peranan dalam proses suatu produksi dimana bila terjadi suatu gangguan dapat menyebabkan berhentinya operasional pabrik, merusak / mengurangi mutu dan hasil produksi tersebut.

### **2. Beban-beban yang kurang penting (*Non Essential Load*)**

Yang dimaksud dengan beban-beban yang kurang penting adalah beban-beban yang tidak mempunyai pengaruh langsung terhadap proses pengolahan produksi, seperti perangkat untuk pengisian ke kapal (*Loading Crane*), perkantoran, perumahan, perbengkelan, dan lain sebagainya. Pelepasan beban dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu secara manual (*Manual Load Shedding*), dan secara otomatis (*Automatic Load Shedding*).

#### **a. Manual Load Shedding**

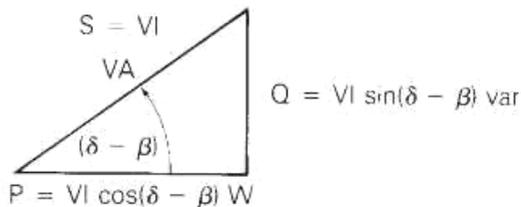
Pelepasan beban secara manual hanya digunakan dalam keadaan yang tidak begitu penting atau pada saat control *load shedding* tidak bekerja sebagaimana mestinya (tidak dalam keadaan normal). Bila ditinjau dari kekurangan cara ini yaitu harus mempekerjakan tenaga operator yang

banyak, dilepaskanya beban yang kadang-kadang melebihi beban yang seharusnya dilepaskan, dan adanya faktor keterlambatan dalam tindakan operator (*Human Error*).

### b. Automatic Load Shedding

Sistem pelepasan beban otomatis seringkali perpanjangan relay pengaman generator seperti *Under Frequency Relay* (UFR). Relay ini digunakan untuk mendeteksi adanya perubahan frekuensi generator dan system sampai kepada batas-batas tertentu.

## 2.8 Segitiga Daya



Gambar. 2.21 Segitiga daya (Boylestad, 2010)

Daya listrik dibagi menjadi 3 elemen yang dapat diketahui masing-masing elemen dari daya tersebut adalah

a. Active power (P) :  $P = V I \cos \varphi$  (Watt) (2-26)

b. Reactive power (Q) :  $Q = V I \sin \varphi$  (Var) (2-27)

c. Total power (S) :  $S = V I$  (VA) (2-28)

Untuk mendefinisikan total power, misalnya diketahui tegangan pada rangkaian AC yaitu  $V = V \angle \delta$ , dan arus yang mengalir pada elemen beban sebesar  $I = I \angle \beta$ . Maka untuk total power  $S$  yang dihasilkan :

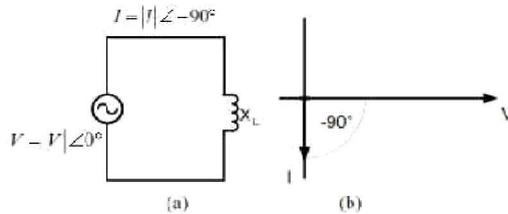
$$\begin{aligned} S = VI^* &= [V \angle \delta][I \angle \beta]^* = VI \angle \delta - \beta \\ &= VI \cos(\delta - \beta) + j VI \sin(\delta - \beta) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Dari pernyataan daya semu ( $S$ ), maka dapat dinyatakan :

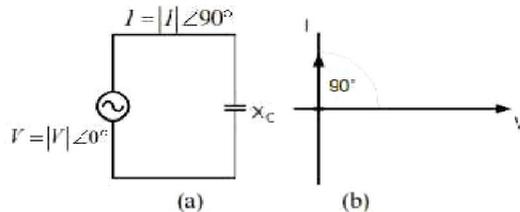
- Sebuah resistor (nilai positif) menyerap daya nyata (positif)  $P_R = V^2 / R$  (ol, Watt), dan daya reaktifnya nol  $Q_R = 0$  var.
- Sebuah induktor menyerap daya nyata nol  $P_L = 0$  (Watt), dan daya reaktifnya,  $Q_L = V^2 / X_L$  (var).
- Sebuah kapasitor menyerap daya nyata nol  $P_C = 0$  (Watt), dan negative reaktif,  $Q_C = -V^2 / X_C$  (var). Bisa di artikan sebuah kapasitor mengirim positif daya reaktif,  $+V^2 / X_C$ .

Daya aktif dari rangkaian AC diperoleh dari perkalian tegangan dan komponen arus yang sefase. Jika sebuah beban induktif murni ( $L$ ) dihubungkan dengan sumber  $V$  (Volt) akan menghasilkan arus *lagging*, yaitu arus  $I$  tertinggal atau terbelakang  $90^\circ$  Terhadap  $V$ . Sebaliknya jika sebuah beban kapasitif murni ( $C$ ) dihubungkan dengan sumber  $V$  (volt) akan menghasilkan arus *leading*, yaitu arus  $I$  mendahului  $90^\circ$  terhadap  $V$ . Dalam suatu rangkaian beban, gambar 2.22 untuk

a) rangkaian AC dengan beban induktif, b) Diagram fasor rangkaian beban kapasitif, menunjukkan rangkaian dan diagram *phasor* suatu beban yang disuplai sumber V.



Gambar. 2.22A Rangkaian dengan beban induktif (Boylestad, 2010)



Gambar. 2.22B Rangkaian dengan beban kapasitif (Boylestad, 2010)

Faktor daya dikatakan “*lagging*” apabila beban induktif sedangkan “*leading*” apabila beban kapasitif.

## 2.9 Jatuh Tegangan

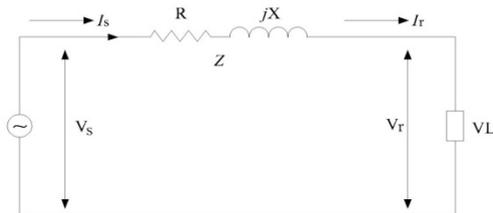
Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang

hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran Volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti (*PT.PLN (Persero),2010*).

Tegangan jatuh secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Tegangan jatuh ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Tegangan jatuh  $V$  pada penghantar semakin besar jika arus  $I$  di dalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar  $R_l$  semakin besar pula. Tegangan jatuh merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada di bawah tegangan nominal yang dibutuhkan. Dalam pembahasan ini yang dimaksudkan dengan jatuh tegangan ( $\Delta V$ ) adalah selisih antara tegangan kirim ( $V_S$ ) dengan

tegangan terima ( $V_R$ ), maka jatuh tegangan dapat didefinisikan seperti gambar 2.23 berikut:

$$\Delta V = (V_S) - (V_R) \quad (2-30)$$



Gambar 2.23 Rangkaian pengganti distribusi listrik (Boylestad, 2010)

Dimana :

$V_s$  = tegangan pada pangkal pengiriman

$V_r$  = tegangan pada ujung penerimaan

$I_s = I_r = I$  = arus pada saluran

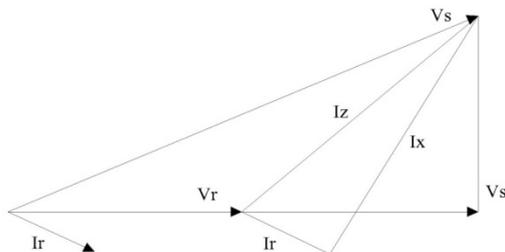
$Z = R + jX$  = impedansi saluran

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen ( $V_r$ ) akan lebih kecil dari tegangan kirim ( $V_s$ ), sehingga tegangan jatuh ( $V_{drop}$ ) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan

(receiving end) tenaga listrik. Tegangan jatuh relatif dinamakan regulasi tegangan  $V_R$  (voltage regulation) dan dinyatakan oleh rumus :

$$V_R = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \quad (2-31)$$

Untuk menghitung jatuh tegangan, diperhitungkan reaktansinya, maupun faktor dayanya yang tidak sama dengan satu, maka berikut ini akan diuraikan cara perhitungannya. Dalam penyederhanaan perhitungan, diasumsikan beban-bebannya merupakan beban fasa tiga yang seimbang dan faktor dayanya ( $\cos \phi$ ) antara 0,6 s/d 0,85 . Secara vektor seperti gambar 2.24 berikut.



Gambar 2.24 Secara vektor  $\Delta V = V_r - V_s'$  (Boylestad, 2010)

Jatuh tegangan dapat dihitung berdasarkan rumus pendekatan hubungan sebagai berikut :

$$V_s = V_s' \text{ maka}$$

$$\Delta V = V_s' - V_r$$

$$\Delta V = I R \cos \varphi + I jX \sin \varphi$$

$$\Delta V = I (R \cos \varphi + jX \sin \varphi) \quad (2-32)$$

Dimana:

$\Delta V$  = Tegangan jatuh (volt)

$V_r$  = Tegangan reaktif (volt)

$I$  = Arus penghantar fasa (Ampere)

$R$  = Resistansi/tahanan penghantar (Ohm/km)

$jX$  = Reaktansi saluran (Ohm/km)

$\theta$  = Sudut daya (beda sudut antara  $I$  dan  $E$ )

Maka :

Untuk saluran 1 fasa

$$\Delta V = I \cdot L (R \cos \theta + jX \sin \theta) \quad (2-33)$$

Untuk saluran 3 fasa

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I \cdot L (R \cos \theta + jX \sin \theta) \quad (2-34)$$

Besar kecilnya jatuh tegangan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu :

- a. Tahanan saluran
- b. Arus saluran

- c. Faktor daya ( $\cos \varphi$ )
- d. Panjang saluran

## 2.10 Study Aliran Daya

Studi aliran daya (*load flow*) digunakan untuk menentukan tegangan, arus, daya aktif atau daya reaktif di berbagai macam titik/bus pada jaringan listrik dalam kondisi operasi normal (Stevenson, 1994). Selain dipergunakan untuk perencanaan pengembangan sistem listrik pada masa mendatang, juga dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi sistem kelistrikan yang sudah ada (Gupta, 1998). Hasil perhitungan aliran daya dapat digunakan untuk menelaah berbagai persoalan yang berhubungan dengan jaringan tersebut, yaitu meliputi hal-hal yang berhubungan dengan operasi jaringan yaitu : (Saadat, 1999)

- a. Pengatur tegangan (*voltage regulation*), perbaikan faktor daya (*power factor*) jaringan, kapasitas kawat penghantar, termasuk rugi-rugi daya.
- b. Perluasan atau pengembangan jaringan, yaitu menentukan lokasi yang tepat untuk penambahan bus beban baru dan unit pembangkit atau gardu induk baru.
- c. perencanaan jaringan, yaitu kondisi jaringan yang diinginkan pada masa mendatang untuk melayani

pertumbuhan beban karena kenaikan terhadap kebutuhan tenaga listrik.

### 2.10.1 Klasifikasi Bus

Di dalam studi aliran daya, bus-bus dibagi dalam 3 macam, yaitu :

a. Bus Beban (*Load Bus*)

*Load bus* biasanya disebut P-Q, karena besaran-besaran yang diketahui adalah P dan Q, sedangkan besaran V dan  $\delta$  tidak diketahui.

b. Bus Kontrol (*Control Bus*)

*Generator Bus* biasanya disebut bus P-V, dimana hanya besaran P dan V saja yang diketahui, sedangkan besaran  $\delta$  dan Q tidak diketahui. Bus ini memiliki kendala untuk daya reaktif (Q) yang melalui bus. Jika kendala ini tidak dipenuhi dalam perhitungan iterasinya, maka bus ini diganti menjadi *load bus*. Tetapi jika daya reaktif memenuhi kendala tersebut dalam perhitungan iterasinya, maka bus tersebut akan dihitung kembali sebagai generator bus. Besarnya daya reaktif yang dihitung disini dibatasi pada :

$$Q_{\min} \leq Q_{\text{gen}} \leq Q_{\max}$$

c. Bus Ayun (*Slack Bus*)

Besaran-besaran yang diketahui dalam *slack bus* adalah  $V$  dan  $\delta$ , dimana biasanya bernilai nol ( $\delta = 0$ ). Selama perhitungan aliran daya, besaran  $V$  dan  $\delta$  akan tetap dan tidak berubah. Dalam perhitungan aliran daya, besaran  $P$  dan  $Q$  pada bus ini dihitung setelah proses iterasi selesai. Tujuan ditentukannya *slack bus* dalam perhitungan aliran daya adalah untuk memenuhi kekurangan daya (rugi-rugi dan beban) seluruhnya, karena kerugian jaringan tidak dapat diketahui sebelum perhitungan selesai dilakukan.

Tabel 2.1 Klasifikasi Bus

Type Bus	Variabel yang diketahui	Variabel yang tidak diketahui
Slack Bus	$ V , \delta$	$P, Q$
Bus beban	$P, Q$	$ V , \delta$
Bus Kontrol	$P,  V $	$Q, \delta$

Sumber : (Das. D., 2006)

### 2.11 Metode Aliran Daya *Newton-Raphson*

Daya masuk ke dalam bus  $i$  dinyatakan dalam

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (2-35)$$

$$S_i = V_i \cdot I_i^* = \sum_{k=1}^n Y_{1k}^* V_k^* \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2-36)$$

Dimana

$$V_i = V_i' + jV_i''$$

$$Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$$

$$(P_i + jQ_i) = V_i' + jV_i'' \sum_{k=1}^n G_{ik} + jB_{ik} V_i' + jV_i'' V_k' + jV_k'' \quad (2-37)$$

Untuk menyelesaikan studi aliran daya, metode yang sering digunakan adalah metode *Newton-Raphson*.

## 2.12 Keamanan Sistem Tenaga Listrik

Pada sistem tenaga listrik, selain upaya untuk meminimalisasi biaya operasi, faktor penting lainnya adalah menjaga keamanan sistem (*security sistem*) dalam operasinya. Keamanan sistem meliputi kegiatan yang direncanakan untuk mempertahankan operasi sistem apabila terjadi kegagalan komponen sistem. Sebagai contoh, suatu unit pembangkit mungkin harus keluar sistem (*off-line*) karena kegagalan peralatan pembantu. Dengan mempertahankan sejumlah pembangkit cadangan berputar yang sesuai, unit-unit pembangkit yang tersisa pada sistem dapat mengatasi kekurangan daya tanpa turunnya frekuensi yang terlalu rendah atau tanpa perlu melakukan pemutusan beberapa beban (*load shedding*). Dalam pembangkitan dan pengiriman tenaga listrik, apabila suatu saluran transmisi rusak karena terkena badai sehingga menyebabkan saluran terputus, maka saluran

transmisi yang tersisa akan memikul beban yang lebih besar namun masih berada pada batas yang masih diijinkan.

Sekuriti sistem diartikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga untuk menahan gangguan tiba-tiba. Keandalan dan keamanan sistem tenaga listrik dapat dicapai dengan melakukan operasi sistem yang toleran terhadap keluarnya salah satu elemen sistem (*single outage*) atau pun keluarnya lebih dari satu elemen sistem (*multiple outage*). Artinya, dengan keluarnya salah satu elemen sistem (atau lebih) seharusnya tidak menyebabkan keluarnya elemen sistem secara bertingkat (*cascading outage*) yang mengakibatkan pemadaman sebagian atau pemadaman total.

Sebagai contoh dari suatu urutan kejadian yang dapat menyebabkan pemadaman total kemungkinan dapat bermula dari suatu saluran tunggal yang terbuka akibat kegagalan isolasi, saluran transmisi yang tersisa dalam sistem akan mengambil aliran yang mengalir pada saluran yang terbuka. Apabila satu saluran yang tersisa pada saat ini terlalu kelebihan beban, saluran tersebut dapat terputus yang diakibatkan oleh kerja relai sehingga menyebabkan saluran yang tersisa juga mengalami beban lebih. Proses ini disebut dengan istilah gangguan yang bertingkat (*cascading outage*). Suatu sistem tenaga listrik harus mampu untuk mengatasi

gangguan tersebut terutama menghindari kegagalan yang bertingkat.

Sistem dinyatakan berada dalam keadaan operasi yang berhasil atau memuaskan bila (Dirjen Listrik dan Pemanfaatan Energi, 2004) :

1. Frekuensi dalam batas kisaran operasi normal ( $50 \pm 0.2$  Hz), kecuali penyimpangan dalam waktu singkat diperkenankan pada kisaran ( $50 \pm 0,5$  Hz), sedangkan selama kondisi gangguan frekuensi boleh berada pada batas 47.5 Hz sampai 51.5 Hz.
2. Tegangan di Gardu Induk berada dalam batas yang ditetapkan dalam aturan penyambungan yaitu : Tegangan 500 kV adalah  $\pm 5\%$  sedangkan Tegangan 150 kV, 70 kV, 20 kV adalah  $+5\%$  dan  $-10\%$ . Batas-batas ini harus menjamin bahwa tegangan pada semua pelanggan berada pada kisaran yang telah ditetapkan sepanjang pengatur tegangan jaringan distribusi dan peralatan pemasok daya reaktif bekerja dengan baik. Operasi pada batas-batas tegangan ini diharapkan dapat membantu mencegah terjadinya tegangan kollepsi (*voltagecollapse*) dan masalah stabilitas sistem.
3. Tingkat pembebanan saluran transmisi dipertahankan pada batas-batas yang telah ditetapkan dan tingkat pembebanan arusdi semua peralatan jaringan transmisi dan gardu induk

berada dalam batas rating normal untuk semua *single contingency* gangguan peralatan.

4. Konfigurasi sistem sedemikian rupa sehingga semua PMT (*circuit breaker*) jaringan transmisi mampu memutus arus gangguan yang mungkin terjadi dan mengisolir peralatan yang terganggu.

Pada suatu pusat pengatur operasi (*operation control center*), upaya untuk menjaga keamanan sistem bisa dilakukan dalam 3 tahap yaitu :

1. Pemantauan sistem (*system monitoring*),

Sistem monitoring berfungsi untuk memberikan informasi secara *real time* nilai daya yang disalurkan, beban dan pembangkit suatu sistem tenaga listrik yang kemudian akan ditransmisikan ke control center. Sistem pengukuran dan transmisi data, yang disebut sistem telemetri (SCADA), telah berevolusi untuk skema yang dapat memonitor tegangan, arus listrik, dan status pemutus sirkuit, dan switch di setiap gardu dalam sistem jaringan transmisi tenaga listrik. Selain itu, informasi penting lain seperti frekuensi, *output* generator unit dan posisi tap transformator juga bisa telemeterikan. Masalah pemantauan arus listrik dan tegangan pada sistem transmisi sangat penting dalam menjaga keamanan sistem, Dengan memeriksa setiap nilai yang diukur

terhadap batas, operator dapat mengatakan dimana masalah-masalah yang ada dalam sistem transmisi dan diharapkan mereka dapat mengambil tindakan perbaikan untuk menghilangkan kelebihan beban line atau ambang batas tegangan.

2. Analisis kontingensi (*contingency analysis*)

Hasil dari analisis tipe ini dapat memberikan solusi pada sistem agar bisa dioperasikan dengan pertahanan yang baik. Banyak masalah yang bermunculan pada sistem tenaga bisa menyebabkan gangguan fatal dan operator tidak bisa mengambil aksi cukup cepat dikarenakan periode waktunya yang cepat. Sehingga gangguan ini berakhir dengan adanya kegagalan bertingkat. Dikarenakan aspek operasi sistem ini, pengoperasian komputer yang modern dilengkapi dengan program analisis kontingensi yang dapat memodelkan kemungkinan kekacauan sistem sebelum kekacauan tersebut terjadi. Program tersebut didasarkan pada pemodelan sistem tenaga dan digunakan untuk mempelajari kejadian keluarnya komponen dan memperingatkan operator pada setiap potensi beban lebih atau tegangan yang melampaui batas.

3. *Security-constrained optimal power flow*

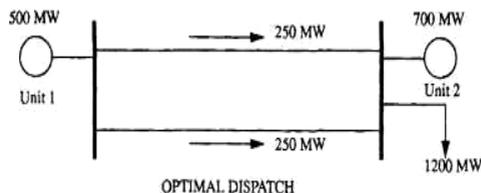
Fungsi keamanan sistem yang ketiga adalah *Security-*

*constrained optimal power flow*. Pada fungsi ini, analisis kontingensi dikombinasikan dengan *optimal power flow* yang mana mencari untuk membuat perubahan pada *optimal dispatch* suatu pembangkitan, jadi saat analisis keamanan dijalankan sudah tidak ada pelanggaran dan kecacauan yang terjadi pada hasil dari kontingensi.

Operasi sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi empat keadaan yaitu (Allen J. Wood, 1996) :

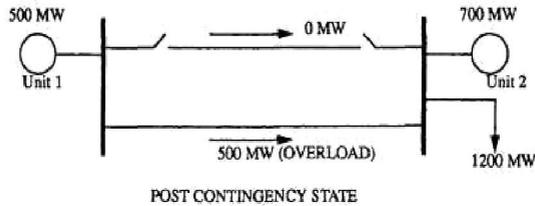
1. Pengiriman yang optimal (Optimal dispatch)

Pada keadaan ini sistem tenaga listrik bekerja pada keadaan optimal serta ekonomis tetapi sistem tidak terjamin dalam keadaan aman gambar 2.25 menunjukkan pengiriman yang optimal.



Gambar 2.25 Keadaan saat *optimal dispatch* (Wood, 1996)

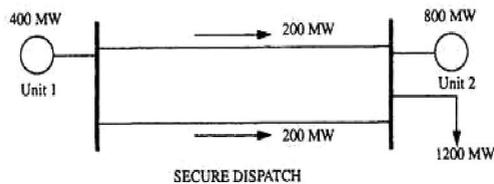
2. Setelah kontingensi (*post contingency*) Keadaan sistem tenaga listrik setelah kontingensi terjadi ditunjukkan pada gambar 2.26 berikut.



Gambar 2.26 Keadaan saat setelah terjadi kontingensi (Wood, 1996)

### 3. Pengiriman yang terjamin (*secure dispatch*)

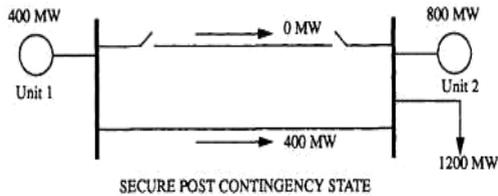
Pada keadaan ini tidak ada kontingensi yang menyebabkan kegagalan, dengan koreksi terhadap parameter sehingga pengiriman energi listrik cukup aman, seperti ditunjukkan pada gambar 2.27.



Gambar 2.27 Keadaan saat *secure dispatch* (Wood, 1996)

### 4. Keadaan terjamin setelah kontingensi (*secure post-contingency*)

Keadaan sistem tenaga listrik setelah kontingensi terjadi dan sistem beroperasi dengan normal seperti ditunjukkan pada gambar 2.28.



Gambar 2.28 Keadaan saat sistem aman setelah terjadi kontingensi (Wood, 1996)

### 2.12.1 Proteksi Sistem Transmisi Listrik

Saluran transmisi listrik merupakan suatu sistem yang kompleks dan mempunyai karakteristik yang berubah-ubah secara dinamis sesuai keadaan sistem itu sendiri. Adanya perubahan karakteristik ini dapat menimbulkan masalah jika tidak segeraantisipasi. Dalam hubungannya dengan sistem proteksi/ pengaman suatu sistem transmisi, adanya perubahan tersebut harus mendapat perhatian yang besar mengingat saluran transmisi memiliki peran yang sangat penting dalam proses penyaluran daya. Masalah-masalah yang timbul pada saluran transmisi, diantaranya yang utama adalah :

a. Pengaruh perubahan frekuensi sistem

Frekuensi dari suatu sistem daya berubah secara terus menerus dalam suatu nilai batas tertentu. Pada saat terjadi gangguan perubahan frekuensi dapat merugikan baik terhadap peralatan ataupun sistem transmisi itu sendiri.

Pengaruh yang disebabkan oleh perubahan frekuensi ini terhadap saluran transmisi adalah pengaruh pada reaktansi. Dengan perubahan frekuensi dari  $\omega_1$  ke  $\omega_1'$  dengan kenaikan  $\Delta\omega_1$ , reaktansi dari saluran akan berubah dari  $X$  ke  $X'$  dengan kenaikan  $\Delta X$ . Perubahan reaktansi ini akan berpengaruh terhadap pengukuran impedansi sehingga impedansi yang terukur karena adanya perubahan pada nilai komponen reaktansinya akan berbeda dengan nilai sebenarnya.

b. Pengaruh dari ayunan daya pada sistem

Ayunan daya terjadi pada sistem paralel pembangkit (generator) akibat hilangnya sinkronisasi salah satu generator sehingga sebagian generator menjadi motor dan sebagian berbeban lebih dan ini terjadi bergantian atau berayun. Adanya ayunan daya ini dapat menyebabkan kestabilan sistem terganggu. Ayunan daya ini harus segera diatasi dengan melepaskan generator yang terganggu. Pada saluran transmisi adanya ayunan daya ini tidak boleh membuat kontinuitas pelayanan terganggu, tetapi perubahan arus yang terjadi pada saat ayunan daya bisa masuk dalam jangkauan sistem proteksi sehingga memutuskan aliran arus pada saluran transmisi.

c. Pengaruh gangguan pada sistem transmisi

Saluran transmisi mempunyai resiko paling besar bila mengalami gangguan, karena ini akan berarti terputusnya kontinuitas penyaluran beban. Terputusnya penyaluran listrik dari pusat pembangkit ke beban tentu sangat merugikan bagi pelanggan terutama industri, yang menyebabkan terganggunya kegiatan operasi di industri tersebut. Akan tetapi adakalanya gangguan tersebut tidak dapat dihindari. Oleh karena itu diperlukan usaha untuk mengurangi akibat adanya gangguan tersebut atau memisahkan bagian yang terganggu dari sistem. Gangguan pada saluran transmisi merupakan 50% dari seluruh gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Diantara gangguan tersebut gangguan yang terbesar adalah gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, yaitu sekitar 85% dari total gangguan pada transmisi saluran udara. Sistem proteksi sistem tenaga listrik adalah pengisolasian kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik untuk meminimalisir pemadaman dan kerusakan yang lebih lanjut.

### **2.12.2 Peralatan Proteksi Pada Sistem Transmisi Listrik**

Proteksi pada sistem transmisi adalah seperangkat peralatan yang merupakan sistem dan terdiri dari komponen-komponen berikut :

a. Relay Arus Lebih

Merupakan relay Pengaman yang bekerja karena adanya besaran arus dan terpasang pada Jaringan Tegangan tinggi, Tegangan menengah juga pada pengaman Transformator tenaga. Rele ini berfungsi untuk mengamankan peralatan listrik akibat adanya gangguan phasa-phasanya.

b. Relay Hubung Tanah

Merupakan relay Pengaman yang bekerja karena adanya besaran arus dan terpasang pada jaringan Tegangan tinggi, Tegangan menengah juga pada pengaman Transformator tenaga.

c. Relay Diferensial

Relay diferensial ini berfungsi untuk mengamankan transformator tenaga terhadap gangguan hubung singkat yang terjadi didalam daerah pengaman transformator, yang disambung ke instalasi trafo arus ( CT ) dikedua sisi.

d. Relay Jarak

Memiliki karakteristik :

1. Dapat menentukan arah letak gangguan .
2. Gangguan didepan relai harus bekerja.
3. Gangguan dibelakang relai tidak boleh bekerja
4. Dapat menentukan letak gangguan.
5. Gangguan di dalam daerahnya relai harus bekerja.

6. Gangguan diluar daerahnya relai tidak boleh bekerja.
7. Dapat membedakan gangguan dan ayunan daya.

e. Kawat Tanah

Kawat tanah atau overhead grounding adalah media pelindung kawat fasa dari sambaran petir. Kawat ini dipasang diatas kawat fasa dengan sudut perlindungan sekecil mungkin karena dianggap petir menyambar diatas kawat. Pada umumnya *ground wire* terbuat dari kawat baja (*steel wire*) dengan kekuatan St 35 atau St 50, tergantung dari spesifikasi yang ditentukan oleh PLN.

f. Pemutus Tenaga ( PMT )

Adalah alat untuk memisahkan / menghubungkan satu bagian instalasi dengan bagian instalasi lain, baik instalasi dalam keadaan normal maupun dalam keadaan terganggu. Batas dari bagian-bagian instalasi tersebut dapat terdiri dari satu PMT atau lebih.

g. SakelarPemisah (PMS) atau *Disconnect Switch* (DS)

Berfungsi untuk mengisolasikan peralatan listrik dari peralatan lain atau instalasi lain yang bertegangan.

h. *DC System Power Supply*

*DC System Power Supply* merupakan pencatu daya cadangan yang terdiri dari Battery Charger, sebagai peralatan yang mengubah tegangan AC ke DC, dan Battery, sebagai penyimpan daya cadangan. Sebagai

peralatan proteksi, DC System Power Supply merupakan peralatan yang sangat vital karena jika terjadi gangguan dan kontak telah terhubung, maka DC System Power Supply akan bekerja yang menyebabkan CB membuka. Charger sebenarnya adalah sumber utama dari DC power supply, karena charger adalah alat untuk merubah AC power menjadi DC power (*rectifier*).

Dalam perencanaan sistem proteksi, maka untuk mendapatkan suatu sistem proteksi yang baik diperlukan persyaratan-persyaratan sebagai berikut :

1. *Sensitif*

Suatu relay proteksi bertugas mengamankan suatu alat atau suatu bagian tertentu dari suatu sistem tenaga listrik, alat atau bagian sistem yang termasuk dalam jangkauan pengamanannya. Relay proteksi mendeteksi adanya gangguan yang terjadi di daerah pengamanannya dan harus cukup sensitif untuk mendeteksi gangguan tersebut dengan rangsangan minimum dan bila perlu hanya mentriapkan pemutus tenaga (PMT) untuk memisahkan bagian sistem yang terganggu, sedangkan bagian sistem yang sehat dalam hal ini tidak boleh terbuka.

Relay dikatakan sensitif apabila dapat bekerja dengan masukan dari besaran yang dideteksi kecil. Jadi relay

dapat bekerja pada awal kejadian. Hal ini memberikan keuntungan dimana kerusakan peralatan yang diamankan akibat gangguan menjadi kecil.

Namun demikian relay harus stabil artinya, relai harus dapat memberikan antara arus gangguan atau arus beban maksimum.

2. *Selektif*

Selektivitas dari relay proteksi adalah suatu kualitas kecermatan pemilihan dalam mengadakan pengamanan. Bagian yang terbuka dari suatu sistem oleh karena terjadinya gangguan harus sekecil mungkin, sehingga daerah yang terputus menjadi lebih kecil. Relay proteksi hanya akan bekerja selama kondisi tidak normal atau gangguan yang terjadi didaerah pengamanannya dan tidak akan bekerja pada kondisi normal atau pada keadaan gangguan yang terjadi diluar daerah pengamanannya.

3. *Cepat.*

Makin cepat relay proteksi bekerja, tidak hanya dapat memperkecil kemungkinan akibat gangguan, tetapi dapat memperkecil kemungkinan meluasnya akibat yang ditimbulkan oleh gangguan.

4. *Handal.*

Dalam keadaan normal atau sistem yang tidak pernah

terganggu relay proteksi tidak bekerja selama berbulan-bulan mungkin bertahun-tahun, tetapi relay proteksi bila diperlukan harus dan pasti dapat bekerja, sebab apabila relay gagal bekerja dapat mengakibatkan kerusakan yang lebih parah pada peralatan yang diamankan atau mengakibatkan bekerjanya relay lain sehingga daerah itu mengalami pemadaman yang lebih luas. Untuk tetap menjaga keandalannya, maka relay proteksi harus dilakukan pengujian secara periodik.

5. *Ekonomis.*

Dalam menentukan relai pengaman yang akan digunakan harus ditinjau tehnologi ekonomisnya. Misalkan untuk sistem distribusi tegangan menengah yang radial tidak diperlukan relai rumit dan sangat cepat bekerjanya, atau misalnya trafo distribusi yang hanya 1000 kVA menggunakan relai diferensial. Dengan biaya yang sekecilnya-kecilnya diharapkan relay proteksi mempunyai kemampuan pengamanan yang sebesar-besarnya.

6. *Sederhana.*

Perangkat relay proteksi diisyaratkan mempunyai bentuk yang sederhana dan fleksibel. Misalkan pengaman untuk sistem tegangan ekstra tinggi tidak boleh hanya dengan pengaman yang sederhana, misalnya hanya

dengan relai arus lebih saja, tetapi harus menggunakan relai jarak dengan intertripping dan ganda.

### 2.13 Analisis Kontingensi

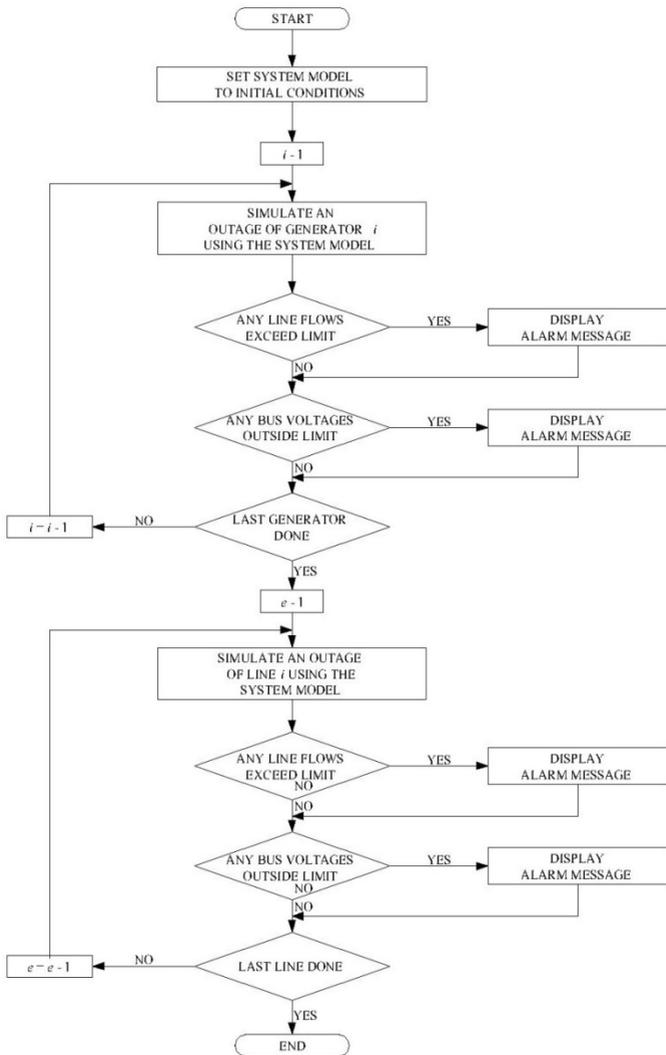
Kontingensi adalah suatu kejadian yang disebabkan oleh kegagalan atau pelepasan dari satu atau lebih generator dan/atau transmisi. Istilah ini berkaitan erat dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk melayani beban bila terjadi gangguan pada salah satu komponennya. Karena adanya kontingensi, sehingga lebih dari satu saluran digunakan untuk menyalurkan daya listrik ke beban., walaupun sebenarnya dalam keadaan normal. Analisis kontingensi adalah komponen sangat penting dari fungsi pengujian system keamanan dan merupakan sebagai kelanjutan hasil program *load flow* untuk mempertimbangkan berbagai kondisi yang mungkin terjadi dalam sistem dimasa yang akan datang dengan pengoperasian sistem yaitu untuk mengatasi terjadinya kasus-kasus yang ditimbulkan oleh kontingensi saluran transmisi.

Analisis ini digunakan sebagai alat studi untuk analisis kejadian kontingensi secara *off-line*, dan sebagai alat *on-line* untuk menunjukkan operator bagaimana efek dari *outage* yang akan datang. Hal ini memungkinkan operator untuk lebih baik dipersiapkan untuk menghadapi *outage* dengan

menggunakan scenario pemulihan yang telah direncanakan sebelumnya. Setelah kontingensi terjadi, masalah sistem tenaga bisa diukur dari :

- a. Tidak sama sekali : saat sistem tenaga dapat diseimbangkan kembali setelah kontingensi, tanpa adanya beban berlebih pada semua elemen.
- b. Keras : saat beberapa elemen seperti saluran dan transformator menjadi terbebani lebih dan mempunyai resiko kerusakan.
- c. Kritis : saat sistem tenaga menjadi tidak stabil dan akan dengan cepat menjadi kacau.

Bagaimana analisis kontingensi dapat dilaksanakan dideskripsikan dengan jalan yang mudah seperti gambar 2.29 :



Gambar 2.29 Contoh prosedur analisis kontingensi (Wood, 1996)

Dalam hal ini sangat penting operator sistem dan perencana system untuk dapat mengevaluasi bagaimana aliran daya dalam saluran dan tegangan bus akan diubah menjadi *steady-state* yang baru. Beban berlebihan yang disebabkan terlalu banyak arus dalam saluran harus dapat dicegah dan tegangan yang terlalu tinggi atau terlalu rendah membuat system menjadi rentan untuk terjadi *outage* bertingkat. Besarnya dampak kemungkinan keluarnya komponen dapat dianalisa dengan analisis kontingensi atau program evaluasi kontingensi. Ketelitian yang tinggi tidak dibutuhkan dalam analisis kontingensi sejak kepentingan utama dalam mengetahui apakah ketidakamanan atau kondisi rentan yang ada pada *steady-state* segala *outage* tersebut. Demikian, untuk menguji efek keluarnya saluran dan keluarnya transformer pada tegangan bus dan aliran saluran pada jaringan, perkiraan teknik AC *power-flow* pada umumnya dikerjakan sejak mereka bisa memberikan solusi cepat pada banyak kasus pengujian yang mana perlu dijalankan (Grainger dan Stevenson, 1994).

#### **2.14 Metode Line MVA Performance Indeks ( $PI_{MVA}$ )**

Kondisi beban sangat berpengaruh terhadap aliran daya di tiap saluran yang berbeda, dan performa system. *Line MVA Performance Indeks* ( $PI_{MVA}$ ) adalah metode untuk

mengindikasikan peringkat *overloads* pada saluran. Didefinisikan oleh (K. Verma dan K. R Niazi, 2012) :

$$PI_{MVA} = \sum_{i=1}^{N_L} \frac{W_{Li} S_i^{post}}{M S_i^{max}}^M \quad (2-38)$$

$PI$  = Performansi indeks

$S_i^{post}$  = Post-contingency MVA aliran dari saluran  $i$

$S_i^{max}$  = Kemampuan MVA dari saluran  $i$

$N_L$  = Jumlah line dalam sistem tenaga listrik

$W_{Li}$  = Faktor *real non-negative weighting* (=1)

$M$  = Urutan eksponen untuk *penalty function* (=2)

## 2.15 Electrical Transient Analyzer Program (ETAP)

ETAP merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik. Fitur yang terdapat didalamnya bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik.

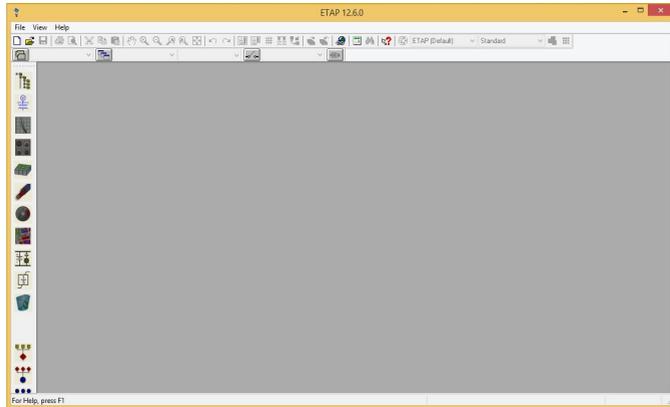
ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*one line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk

analisis, antara lain: aliran daya, hubung singkat, starting motor, *transient stability*, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diubah langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

## Membuat simulasi *single line diagram* menggunakan ETAP 12

### 1. Menjalankan program ETAP 12

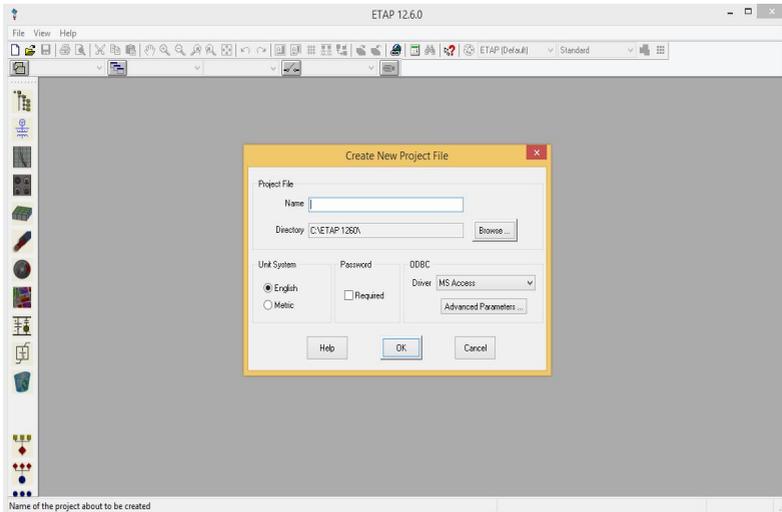
Program ETAP 12 yang sudah di *install* pada komputer dapat digunakan dengan klik 2x pada ikon *software* ETAP 12 pada *desktop* setelah itu akan terlihat tampilan seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.30 Tampilan pertama program ETAP 12

### 2. Membuat *Project Baru*

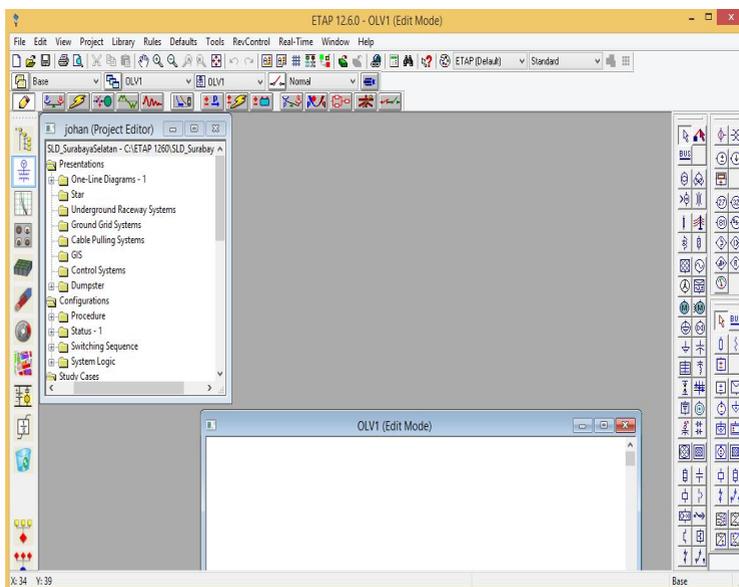
Untuk membuat *project* yang baru maka klik pada *file>new project* akan muncul tampilan seperti gambar di bawah ini, kemudian pada kolom isikan *project file name* sesuai keinginan.



Gambar 2.31 Pengisian *Project file name*

### 3. Membuat *Single Line Diagram*

Setelah pengisian *project file name* dan klik Ok akan muncul halaman kosong yang akan dibuat untuk menggambar *single line diagram* dan memodelkan komponen pada sistem interkoneksi 150 kV Surabaya Selatan.



Gambar 2.32 Tampilan Utama ETAP 12

Pada gambar diatas terdapat ruang untuk menggambar *single line* diagram dengan menggunakan *template* jenis komponen yang terdapat pada *toolbar* sebelah kanan. Sebelum menggambar *single line* diagram pada menu *project* kita atur terlebih dahulu pada menu *project>standart* yang menjadi acuan kita, dengan *standart* IEC, dan *frequency* 50 Hz. Pembuatan simulasi *single line* diagram, bus – bus yang diberi penamaan dengan kondisi *real* sesuai dengan konfigurasi jaringan 150 kV Surabaya Selatan.

#### 4. Permodelan Parameter Transformator

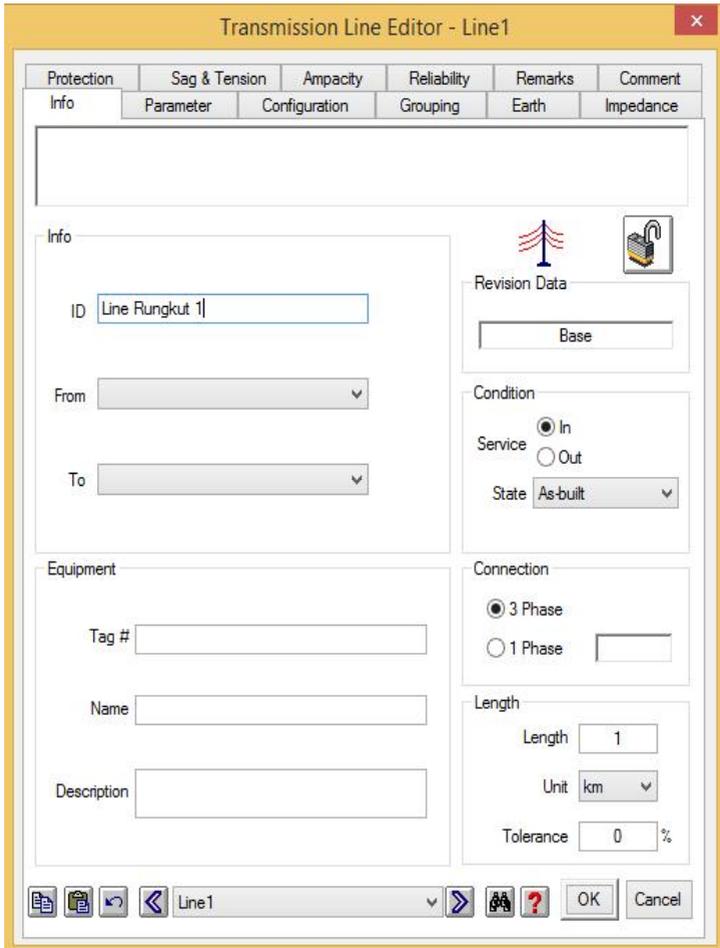
Untuk memodelkan parameter dari transformator yang dimasukkan adalah nilai tegangan pada tiap sisi kumparan trafo, selain itu juga mengisi daya masing – masing trafo. Contoh permodelan parameter seperti gambar dibawah ini.

Gambar 2.33 Pemodelan Parameter Transformator

## 5. Permodelan Parameter Saluran Transmisi

Pembuatan *single line* diagram sistem interkoneksi 150 kV Surabaya Selatan memiliki saluran transmisi dengan tegangan

150 kV. Pada gambar dibawah ini ditunjukkan tampilan parameter saluran yang harus diisikan pada *software* ETAP 12



Gambar 2.34 Pemodelan Parameter Transmisi

.....(Halaman ini sengaja dikosongkan ).....