

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. *Literature Review***

Pada bagian *literature review* ini membahas mengenai penelitian–penelitian yang mendukung dan berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan .

Pada penelitian yang pernah dilakukan oleh Chirag. A.Patel .dkk yang berjudul “Load Flow Analysis of IEEE-14 Bus using E-TAP software” yaitu membahas mengenai analisis sistem daya pada sistem bus IEEE 14 menggunakan ETAP , yang dipelajari dan dianalisis adalah mengenai aliran beban . berbagai komponen sistem tenaga seperti generator, trafo , beban saluran transmisi di modelkan dan disimulasikan pada penelitian ini ada 11 beban dalam sistem dengan total 259 MW , dan 81,3 Mvar . disini studi aliran beban digunakan untuk menentukan apakah sistem tetap dalam keadaan normal atau darurat dan dalam batas yang telah ditentukan. Dan menganalisa apakah komponen seperti trafo dan konduktor kelebihan beban . serta menganalisa hubung singkat untuk meneentukan besarnya arus selama terjadi gangguan .

Pada penelitian yang pernah dilakukan oleh Olukayode A. Afolabi yang berjudul “Analysis of the Load Flow Problem in Power System Planning Studies” yaitu membahas mengenai analisis aliran beban dengan berbagai metode yaitu gauss siedel, newton raphson dan fast docupled dan membandingkan metode metode tersebut yang selanjutnya di simulasikan untuk IEEE 11 bus, IEEE 30 bus dan IEEE 57 bus menggunakan matlab dan hasil simulasi membandingkan untuk jumlah iterasi, waktu komputasi, nilai toleransi dan konvergensi . dan pada penelitian ini didapat hasil bahwa metode newton raphson adalah metode paling tepat dikarenakan memiliki jumlah iterasi paling sedikit dan menuju pada nilai yang sesuai.

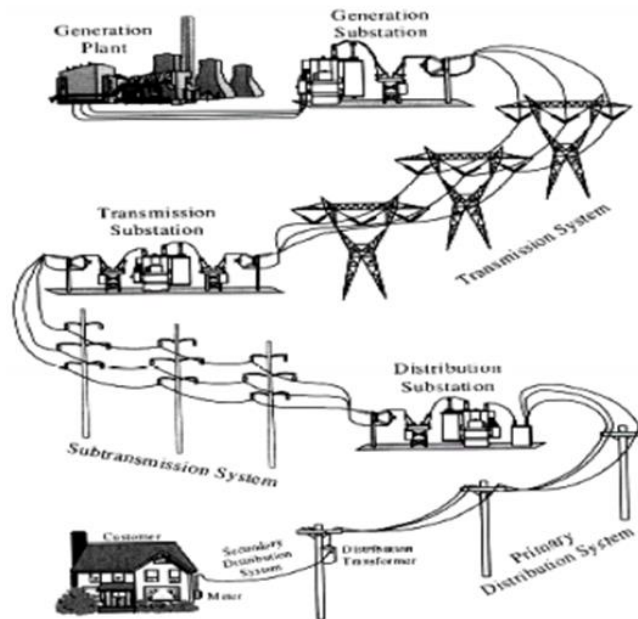
Pada penelitian yang pernah dilakukan oleh Abdulfetah SHOBOLE , Dkk. yang berjudul “Protection Coordination Practice in Electrical Substation Part-1 Overcurrent and Earth Fault Protection - Case Study of Siddik Kardesler Substation (SKS), Istanbul, Turkey” pada penelitian ini membahas mengenai kordinasi

proteksi untuk meningkatkan kualitas dan keandalan sistem tenaga. Pada jurnal ini juga dibahas mengenai proteksi gangguan pembumian dan proteksi arus lebih. Pada jurnal ini juga dijelaskan bahwa gangguan listrik harus segera dihilangkan dalam waktu yang singkat. Dan pada jurnal ini juga dijelaskan beberapa kasus gangguan yang diuji coba pada gardu untuk mengetahui kordinasi proteksinya.

## **2.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

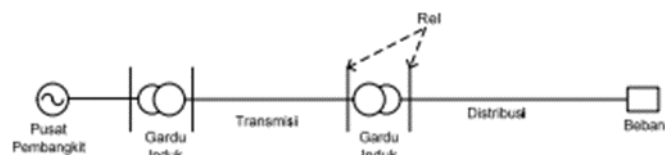
Sistem penyaluran tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik ke konsumen (beban), merupakan hal penting untuk dipelajari. Mengingat penyaluran tenaga listrik ini, prosesnya melalui beberapa tahap, yaitu dari pembangkit tenaga listrik penghasil energi listrik, disalurkan ke jaringan transmisi (SUTET) langsung ke gardu induk. Dari gardu induk tenaga listrik disalurkan ke jaringan distribusi primer (SUTM), dan melalui gardu distribusi langsung ke jaringan distribusi sekunder (SUTR), tenaga listrik dialirkan ke konsumen. Dengan demikian sistem distribusi tenaga listrik berfungsi membagikan tenaga listrik kepada pihak pemakai melalui jaringan tegangan rendah (SUTR), sedangkan suatu saluran transmisi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik bertegangan ekstra tinggi ke pusat-pusat beban dalam daya yang besar (melalui jaringan distribusi).

Pada gambar 2.1 dibawah ini dapat dilihat, bahwa tenaga listrik yang dihasilkan dan dikirimkan ke konsumen melalui Pusat Pembangkit Tenaga Listrik, Gardu Induk, Saluran Transmisi, Gardu Induk, Saluran Distribusi, dan kemudian ke beban (konsumen tenaga listrik).(Suswanto, 2009)



Gambar 2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik  
(Suswanto, 2009)

Sistem pembangkit (generation plant) terdiri dari satu atau lebih unit pembangkit yang akan mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik dan harus mampu menghasilkan daya listrik yang cukup sesuai kebutuhan konsumen. Sistem transmisi berfungsi mentransfer energi listrik dari unit-unit pembangkitan di berbagai lokasi dengan jarak yang jauh ke sistem distribusi, sedangkan sistem distribusi berfungsi untuk menghantarkan energi listrik ke konsumen, seperti ditunjukkan pada gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2.2. Diagram Satu Saluran  
(Suswanto, 2009)

### 2.2.1. Penyaluran Daya Sistem Distribusi

Sedikitnya ada tiga jenis konfigurasi sistem distribusi primer, yang sesuai dengan spesifikasi PLN, adalah :

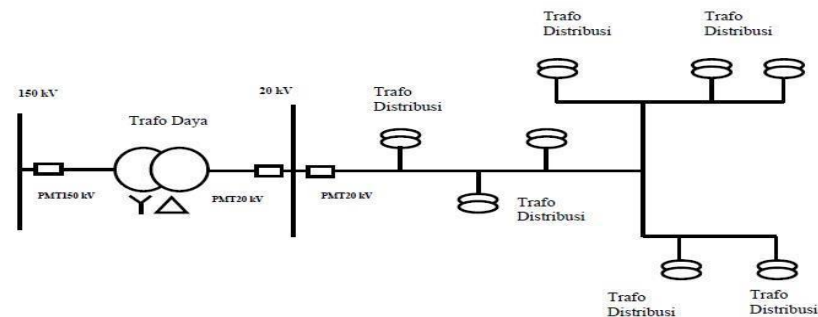
1. Radial
2. Lingkar / Ring (Loop)
3. Spindle

Pemilihan jenis konfigurasi untuk sistem distribusi tegangan menengah tergantung kepada beberapa faktor antara lain kawasan, kapasitas beban, dan peruntukan. Untuk tujuan meningkatkan pelayanan tenaga listrik kepada konsumen modifikasi konfigurasi jaringan dilapangan sering dilakukan dengan harapan dapat melancarkan tugas operasi sistem dengan mempertahankan kontinuitas suplai pada konsumen.

Berikut adalah sedikit penjelasan dengan bentuk-bentuk dari konfigurasi sistem distribusi tegangan menengah :

#### 1. Konfigurasi Sistem Radial

Sistem distribusi dengan pola radial seperti Gambar 2.3 adalah sistem distribusi yang paling sederhana dan ekonomis. Pada sistem ini terdapat beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial.



Gambar 2.3. Konfigurasi Jaringan Radial

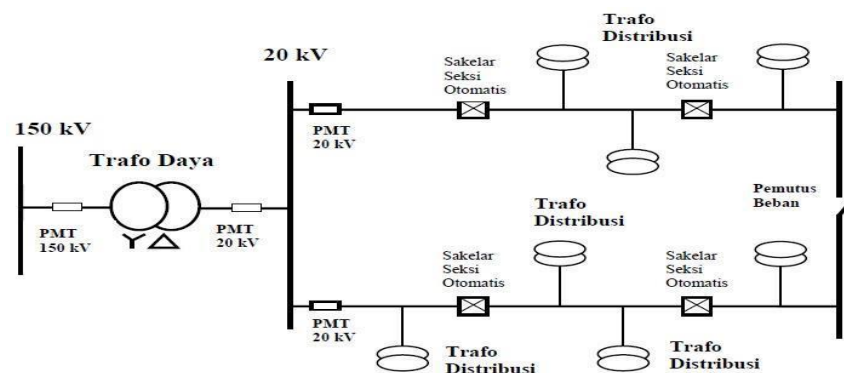
(Ardiansyah, 2010)

Dalam penyulang tersebut dipasang gardu-gardu distribusi untuk konsumen. Gardu distribusi adalah tempat dimana trafo untuk konsumen dipasang. Bisa dalam bangunan beton atau diletakan diatas tiang. Keuntungan dari sistem ini adalah sistem ini tidak rumit dan lebih murah dibanding dengan sistem yang lain.

Namun keandalan sistem ini lebih rendah dibanding dengan sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam. Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada diujung saluran.

## 2. Konfigurasi Sistem Lingkar / Ring (Loop)

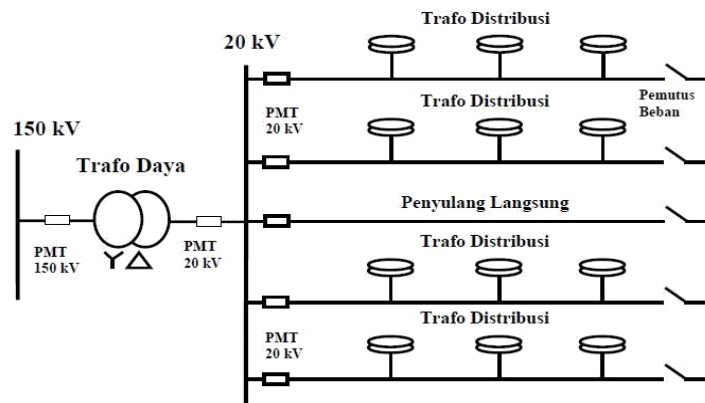
Pada Jaringan Tegangan Menengah Struktur Lingkaran (Loop) seperti Gambar 2.4. dimungkinkan pemasokannya dari beberapa gardu induk, sehingga dengan demikian tingkat keandalannya relatif lebih baik.



Gambar 2.4. Konfigurasi Loop  
(Ardiansyah, 2010)

## 3. Konfigurasi Sistem Spindle

Sistem Spindel seperti pada Gambar 2.5 adalah suatu pola kombinasi jaringan dari pola Radial dan Ring. Spindel terdiri dari beberapa penyulang (feeder) yang tegangannya diberikan dari Gardu Induk dan tegangan tersebut berakhir pada sebuah Gardu (GH).



Gambar 2.5. Konfigurasi Spindle  
(Ardiansyah, 2010)

Pada sebuah sistem spindle biasanya terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan (express) yang akan dihubungkan melalui gardu hubung. Pola spindle biasanya digunakan pada jaringan tegangan menengah (JTM) yang menggunakan kabel tanah/saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM).

Namun pada pengoperasiannya, sistem spindle berfungsi sebagai sistem radial. Di dalam sebuah penyulang aktif terdiri dari gardu distribusi yang berfungsi untuk mendistribusikan tegangan kepada konsumen baik konsumen tegangan rendah (TR) atau tegangan menengah (TM).

### 2.2.2. Representasi Sistem Tenaga

Pada umumnya struktur sistem pembangkitan terdiri dari generator, transformator penaik tegangan, transmisi 150 KV sistem interkoneksi, dan sistem pemakaian sendiri yang terdiri dari beban-beban seperti; motor, statik, dan lumped.

#### a. Generator Sinkron

Generator sinkron atau alternator adalah komponen sistem tenaga yang sangat penting dan hampir semua pembangkitan menggunakan generator sinkron. Generator sinkron digunakan umumnya jenis hubung langsung secara paralel ke jaringan untuk menyediakan daya total dengan jumlah kutub dua. Generator sinkron dihubungkan pada titik yang disebut bus.

b. Transformator Daya

Transformator daya merupakan peralatan tenaga elektrik yang berfungsi menyalurkan tenaga daya elektrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah (transformator *step-down*) maupun tegangan rendah ke tegangan tinggi (transformator *step-up*). Umumnya transformator dilengkapi dengan *tapping* yang dapat diubah-ubah, untuk mengatur atau mengubah tegangan busbar jika diperlukan.

c. Saluran Penghantar

Untuk keperluan analisis dan perhitungan, maka diagram pengganti saluran transmisi dapat dibagi dalam tiga klasifikasi berdasarkan panjang saluran yaitu:

1. Saluran Pendek ( kurang dari 80 km)

Saluran transmisi dimana panjang saluran tersebut kira-kira kurang dari 80

Km maka saluran transmisi dikelompokkan pada saluran pendek. Pada saluran jenis ini efek kapasitansi parallel (*shunt*) nya sangat kecil sekali dan efek tersebut dapat diabaikan tanpa pengaruh yang berarti pada ketelitian perhitungan.

2. Saluran Menengah (antara 80 - 240 km)

Pada umumnya karakteristik saluran menengah ini tidak berbeda jauh dengan karakteristik pada saluran pendek. Efek kapasitansi pada saluran jenis ini harus diperhitungkan.

3. Saluran Panjang ( lebih dari 240 km)

Untuk menganalisis saluran panjang diperlukan suatu ketelitian yang lebih

baik. Harus diperhatikan bahwa parameter rangkaian sebenarnya tidak terpusat menjadi satu, melainkan tersebar secara merata di seluruh panjang.

d. Beban (*Load*)

Pada pusat listrik diperlukan motor-motor yang merupakan beban pemakaian sendiri dengan daya yang besar memerlukan suplai tenaga listrik dengan tegangan menengah, untuk itu pada pusat listrik dengan kapasitas besar selain

diperlukan sistem suplai tenaga listrik AC dengan tegangan rendah juga diperlukan sistem suplai tenaga listrik tegangan menengah.

Besarnya energi listrik yang diperlukan untuk sistem kelistrikan pemakaian sendiri pada umumnya berkisar 1-4% dari produksi energi yang dihasilkan oleh pusat listrik.

Tiga cara merepresentasikan beban dalam sistem tenaga listrik, yaitu:

1. Beban direpresentasikan sebagai daya konstan, disini daya nyata (MW) dan daya reaktif (MVAR) dianggap konstan, representasi ini dipakai untuk studi aliran beban.
2. Beban direpresentasikan sebagai arus konstan.
3. Beban direpresentasikan sebagai impedansi konstan. Kondisi ini sering dipakai untuk merepresentasikan beban dalam studi stabilitas. Bila daya nyata dan daya reaktif diketahui dan menjaga agar besarnya magnitude tetap konstan maka impedansi ( $Z$ ) dapat dihitung.

e. Sistem Ril

Sistem ril sangat penting dalam analisis sistem tenaga, busbar atau bus adalah palang atau batang logam tempat dimana semua konduktor yang masuk dan keluar dihubungkan. Sebuah bus secara elektrikal ekuivalen dengan satu titik dalam rangkaian sistem. Busbar terbagi tiga untuk setiap fasanya. Dalam analisis aliran daya dan hubung singkat terdiri banyak grid, bus merupakan titik penting dimana parameter seperti tegangan dan arus menentukan bagaimana komponen mulai dari pembangkitan seperti generator hingga beban berinteraksi dengan grid.

### 2.3. Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam system tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap



keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

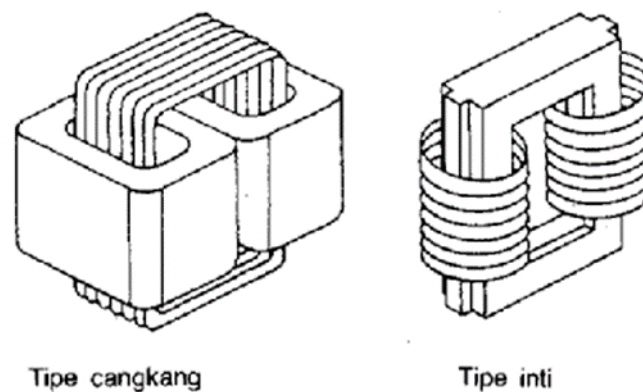
Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian lain dan untuk menghambat arus searah dengan tetap melakukan atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian. (Zuhal, 2000)

Dalam bidang teknik listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran (terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan)

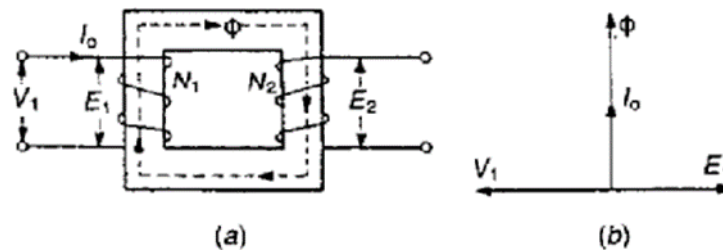
Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnet menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama.

Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti dikenal dua macam transformator yaitu tipe inti dan tipe cangkang.



Gambar 2.6. Transformator Tipe Cangkang dan Tipe Inti  
(Zuhal, 2000)

### 2.3.1. Keadaan Transformator Tanpa Beban



Gambar 2.7. Keadaan Transformator Tanpa Beban  
(Zuhal, 2000)

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan  $V_1$  yang sinusoidal, akan mengalir arus primer  $I_0$  yang juga sinusoidal dan dengan menganggap belitan  $N_1$  reaktif murni.  $I_0$  akan tertinggal  $90^\circ$  dari  $V_1$  Gambar 2.7 (b). Arus primer  $I_0$  menimbulkan fluks ( $\Phi$ ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal.

$$\Phi = \Phi_{maks} \sin \omega t \quad (2.1)$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi  $e_1$  ( Hukum Faraday).

$$e_1 = - N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} e_1 &= - N_1 \frac{d(\Phi_{maks} \sin \omega t)}{dt} \\ &= - N_1 \omega \Phi_{maks} \cos \omega t \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \Phi) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Harga efektifnya:

$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \Phi_{maks}}{\sqrt{2}} = 4,44 N f \Phi_{maks} \quad (2.4)$$

Pada rangkaian sekunder, fluks ( $\Phi$ ) bersama tadi menimbulkan:

$$e_2 = - N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.5)$$

$$e_2 = - N_2 \omega \Phi_{maks} \cos \omega t \quad (2.6)$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f \Phi_{maks} \quad (2.7)$$

sehingga,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.8)$$

dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.9)$$

keterangan:

$E_1$  = ggl induksi di sisi primer (volt)

$E_2$  = ggl induksi di sisi sekunder (volt)

$N_1$  = jumlah belitan sisi primer

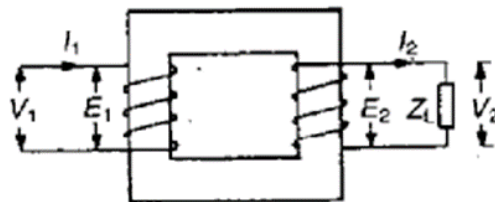
$N_2$  = jumlah belitan sisi sekunder

$\alpha$  = faktor transformasi

Dalam hal ini tegangan induksi  $E_1$  mempunyai kebesaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan tegangan sumber  $V_1$ .

### 2.3.2. Keadaan Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban  $Z_L$  maka  $I_2$  mengalir pada kumparan sekunder, dimana  $I_2 = \frac{V_2}{Z_L}$  dengan  $\theta_2$  = factor kerja beban.



Gambar 2.8. Keadaan Transformator Berbeban  
(Zuhal, 2000)

Arus beban  $I_2$  ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm)  $N_2 I_2$  yang cenderung menentang fluks ( $\Phi$ ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan  $I_M$ . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus  $I'_2$  yang akan menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban  $I_2$  hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi:

$$I_1 = I_0 + I'_2 \quad (2.10)$$

Bila rugi besi diabaikan ( $I_C$  diabaikan) maka  $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I'_2 \quad (2.11)$$

Untuk menjaga agar arus fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan  $I_M$  saja, berlaku hubungan:

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad (2.12)$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I'_2) - N_2 I_2 \quad (2.13)$$

hingga,

$$N_1 I'_2 = N_2 I_2 \quad (2.14)$$

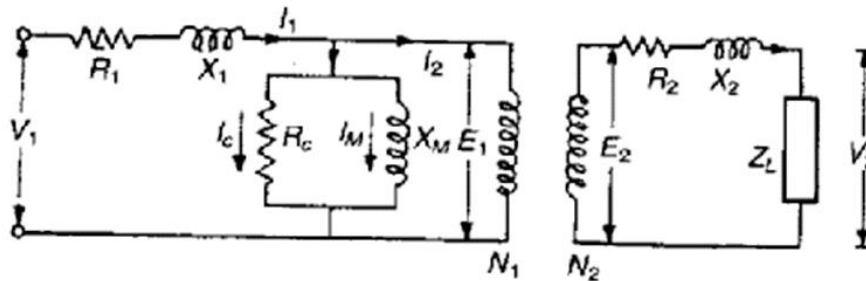
Karena nilai  $I_M$  dianggap kecil maka  $I'_2 = I_1$ , jadi:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \text{ atau } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.15)$$

### 2.3.3. Rangkaian Ekuivalen Transformator

Dalam pembahasan terdahulu kita mengabaikan adanya tahanan dan fluks bocor. Analisis selanjutnya akan memperhitungkan kedua hal tersebut. Tidak seluruh fluks ( $\Phi$ ) yang dihasilkan oleh arus pemagnetan  $I_M$  merupakan Fluks bersama ( $\Phi_M$ ). Sebagian darinya hanya mencakup kumparan primer ( $\Phi_1$ ), atau kumparan sekunder saja ( $\Phi_2$ ). Dalam model rangkaian (rangkaian ekuivalen) yang dipakai untuk menganalisis kerja suatu transformator, adanya fluks bocor  $\Phi_1$  dan  $\Phi_2$  ditunjukkan sebagai reaktansi  $X_1$  dan  $X_2$ . Sedangkan rugi tahanan ditunjukkan

dengan  $R_1$  dan  $R_2$ . Dengan demikian 'model' rangkaian dapat dituliskan seperti pada Gambar 2.9. (Zuhal, 2000)



Gambar 2.9. Rangkaian Ekivalen Transformator

(Zuhal, 2000)

Keterangan:

$R_1$  = Hambatan primer

$X_1$  = Reaktansi Primer

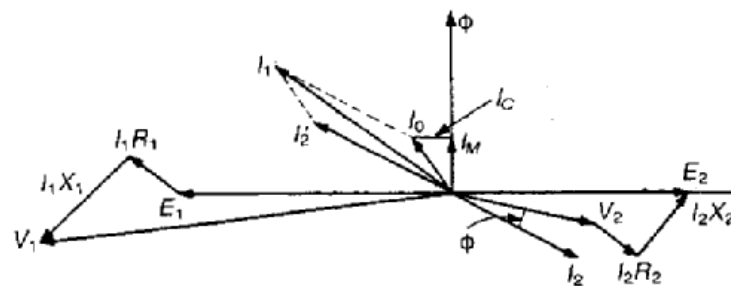
$R_2$  = Hambatan sekunder

$X_2$  = Reaktansi Sekunder

$R_c$  = Hambatan inti

$X_M$  = Reaktansi magnet

Dari model rangkaian pada Gambar 2.9 dapat dibuat vector diagramnya sebagai berikut:



Gambar 2.10. Vektor Diagram Rangkaian Ekivalen Transformator

(Zuhal, 2000)

Dari model rangkaian di atas dapat pula diketahui hubungan perjumlahan vector sebagai berikut:

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad (2.16)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2 \quad (2.17)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \text{ atau } E_1 = \alpha E_2 \quad (2.18)$$

hingga

$$E_1 = \alpha (I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2) \quad (2.19)$$

karena

$$\frac{I'_2}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\alpha} \text{ atau } I_2 = \alpha I'_2 \quad (2.20)$$

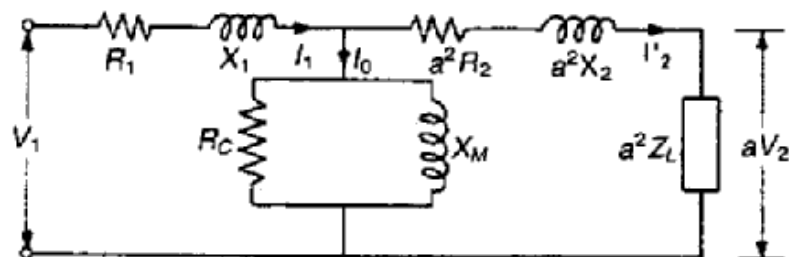
maka

$$E_1 = \alpha^2 I'_2 Z_L + \alpha^2 I'_2 R_2 + \alpha^2 I'_2 X_2 \quad (2.21)$$

Dan

$$V_1 = \alpha^2 I'_2 Z_L + \alpha^2 I'_2 R_2 + \alpha^2 I'_2 X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad (2.22)$$

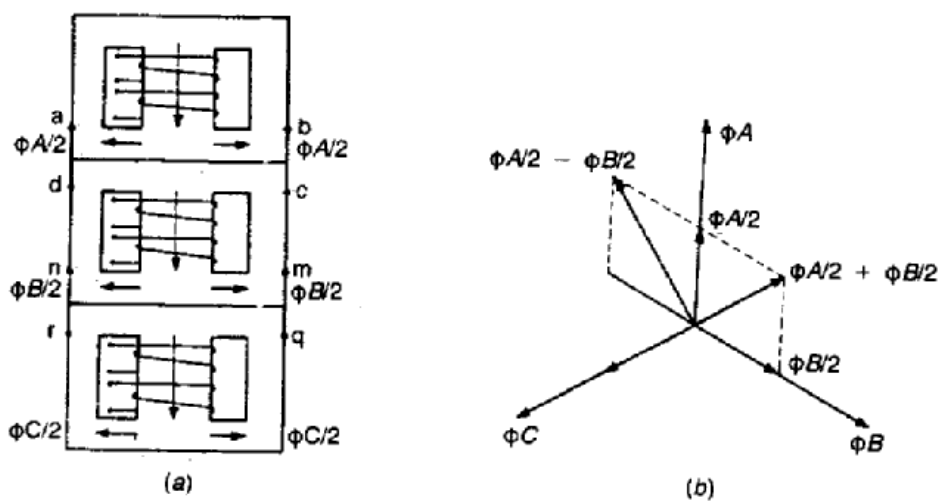
Persamaan terakhir mengandung pengertian bahwa apabila parameter rangkaian sekunder dinyatakan dalam harga rangkaian primer, harga tersebut perlu dikalikan dengan vector  $\alpha^2$ . Sekarang model rangkaian menjadi sebagai berikut:



Gambar 2.11. Rangkaian Vektor Ekuivalen Transformator  
(Zuhal, 2000)

### 2.3.4. Transformator Tiga Fasa

Transformator tiga fasa digunakan karena pertimbangan ekonomi. Dari pembahasan berikut ini akan terlihat bahwa pemakaian inti besi pada transformator tiga fasa akan jauh lebih sedikit dibandingkan dengan pemakaian tiga buah transformator fasa tunggal. Gambar 2.12 (a) menunjukkan tiga buah transformator fasa tunggal tipe cangkang yang disusun ke atas, sedangkan Gambar 2.12 (b) menunjukkan hubungan vektornya.



Gambar 2.12. (a) Rangkaian 3 Buah Transformator Fasa Tunggal

(b) Vektor 3 Buah Transformator Fasa Tunggal

(Zuhal, 2000)

Pada bidang abcd Gambar 2.12 (a) hanya diperlukan mengalir fluks sebesar:

$$\frac{\Phi_A}{2} - \frac{\Phi_B}{2} \quad (2.24)$$

Dan dari vektornya pada Gambar 2.12 (b) diketahui bahwa kebesaran vektor tersebut adalah sebesar:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_A \quad (2.25)$$

Apabila digunakan transformator fasa tunggal pada bagian tersebut akan mengalir fluks sebesar  $\frac{1}{2}\Phi_A$  dan  $\frac{1}{2}\Phi_B$  atau sebesar  $\Phi_A$ . Demikian juga halnya untuk bidang nmqr. Jadi pemakaian inti besi jelas menunjukkan penghematan pada transformator tiga fasa. Penghematan tersebut akan lebih terasa lagi bila kini kita mengubah polaritas transformator sedemikian rupa sehingga arah  $\Phi_B$  ke atas. Dengan arah  $\Phi_B$  ke atas fluks yang mengalir pada bidang abcd menjadi:

$$\frac{\Phi_A}{2} + \frac{\Phi_B}{2} \quad (2.26)$$

Dan besaran vector ini hanya sebesar:

$$\frac{1}{2} \times \Phi_A \text{ ( Gambar 2.12 b)} \quad (2.27)$$

Ditambah lagi dengan system pendingin yang maju, transformator tiga fasa menjadi lebih ekonomis.

### 2.3.5. Hubungan Transformator Tiga Fasa

#### 1. Hubungan Bintang (Y)

Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang yaitu  $I_A$ ,  $I_B$ , dan  $I_C$  masing-masing berbeda fasanya  $120^\circ$ . Untuk beban yang seimbang sebagai berikut:

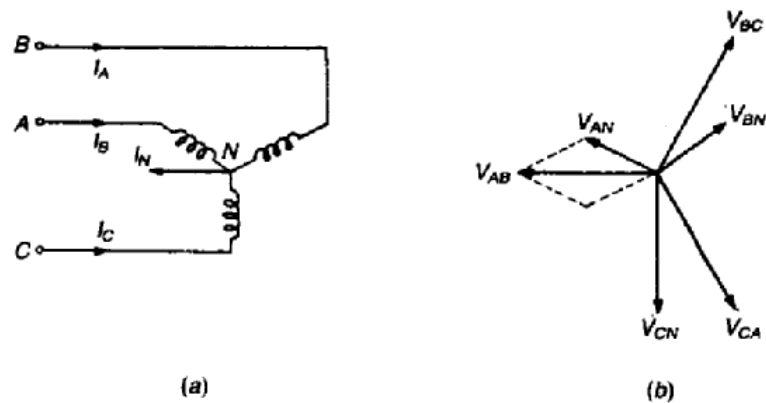
$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (2.28)$$

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{BN} = V_{AN} - V_{BN} \quad (2.29)$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} \quad (2.30)$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} \quad (2.31)$$





Gambar 2.13. (a) Transformator Tiga Fasa Hubung Bintang  
 (b) Vektor Transformator Tiga Fasa Hubung Bintang  
 (Zuhal, 2000)

Dari Gambar 2.13 (a) dan 2.13 (b) diketahui bahwa untuk hubungan bintang berlaku hubungan:

$$V_{AB} = \sqrt{3} V_{AN} \quad (2.32)$$

Atau

$$V_p = \sqrt{3} V_L \quad (2.33)$$

Kemudian

$$I_p = I_L \quad (2.34)$$

$$\text{VA hubungan bintang} = 3V_p I_p \quad (2.35)$$

$$= 3 \left( \frac{V_L}{\sqrt{3}} \right) I_L = \sqrt{3} V_L I_L \quad (2.36)$$

## 2. Hubungan Delta ( $\Delta$ )

Hubungan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta yaitu  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$  masing-masing berbeda  $120^\circ$

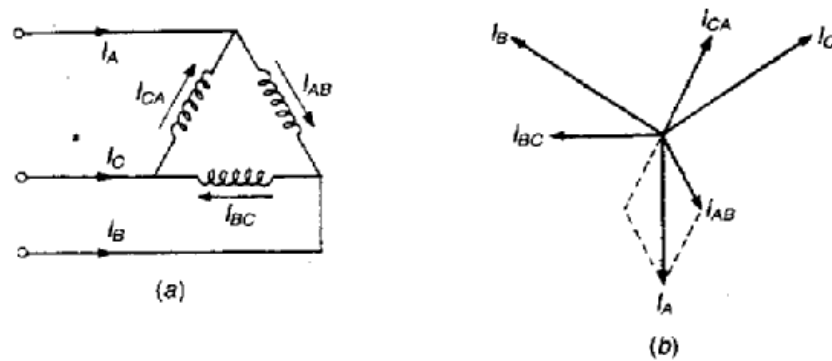
$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \quad (2.37)$$

Untuk beban yang seimbang:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \quad (2.38)$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB} \quad (2.39)$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC} \quad (2.40)$$



Gambar 2.14. (a) Transformator Tiga Fasa Hubung Delta

(b) Vektor Transformator Tiga Fasa Hubung Delta

(Zuhal, 2000)

Dari vektor diagram Gambar 2.14 (b) diketahui bahwa arus  $I_A$  (arus jala-jala) adalah  $\sqrt{3} \times I_{AB}$  (arus fasa). Tegangan jala-jala dalam hubungan delta sama dengan tegangan fasanya.

$$\text{VA hubungan bintang} = V_p I_p \quad (2.41)$$

$$= 3V_L \left(\frac{I_L}{\sqrt{3}}\right) \quad (2.42)$$

$$= \sqrt{3} V_L I_L \quad (2.43)$$

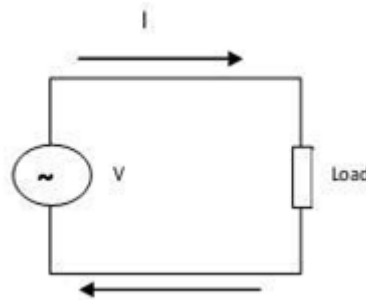
#### 2.4. Pengertian Daya

Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya memiliki satuan Watt, yang merupakan perkalian dari Tegangan (volt) dan arus (ampere). Daya dinyatakan dalam P, Tegangan dinyatakan dalam V dan Arus dinyatakan dalam I, sehingga besarnya daya dinyatakan :

$$P = V \times I$$

$$P = \text{Volt} \times \text{Ampere} \times \cos \varphi$$

$$P = \text{Watt} \quad (2.44)$$



Gambar 2.15. Arah Aliran Arus Listrik  
(Belly, 2010)

#### 2.4.1. Daya Aktif (P)

Daya aktif (*Active Power*) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah Watt. Adapun persamaan dalam daya aktif sebagai berikut :

$$\text{Untuk satu fasa : } P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.45)$$

$$\text{Untuk tiga fasa : } P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.46)$$

Daya ini digunakan secara umum oleh konsumen dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

#### 2.4.2. Daya Reaktif (Q)

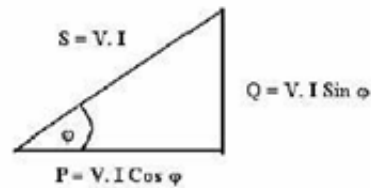
Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator motor, dan lain – lain. Satuan daya reaktif adalah Va.

$$\text{Untuk satu fasa : } P = V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (2.47)$$

$$\text{Untuk tiga fasa : } P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (2.48)$$

#### 2.4.3. Daya Semu (S)

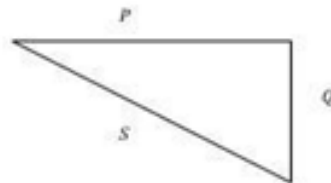
Daya Semu (*Apparent Power*) adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan dan arus dalam suatu jaringan. Satuan daya semu adalah VA.



Gambar 2.16. Penjumlahan Trigonometri Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Daya Semu  
(Belly, 2010)

#### 2.4.4. Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan segitiga yang menggambarkan hubungan matematika antara tipe - tipe daya yang berbeda antara daya semu, daya aktif dan daya reaktif berdasarkan prinsip trigonometri.



Gambar 2.17. Segitiga Daya  
(Belly, 2010)

dimana berlaku hubungan :

$$S = V \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (2.49)$$

#### 2.4.5. Faktor Daya

Faktor daya ( $\cos \varphi$ ) dapat didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya nyata (VA) yang digunakan dalam sirkuit AC atau beda sudut fasa antara V dan I yang biasanya dinyatakan dalam  $\cos \varphi$ .

$$\text{Faktor Daya} = \text{Daya Aktif (P)} / \text{Daya Semu (S)}$$

$$= \text{kW} / \text{kVA}$$

$$= V \cdot I \cdot \cos \varphi / V \cdot I$$

$$= \cos \varphi \quad (2.50)$$

## 2.5. Jatuh Tegangan

Dalam penyediaan tenaga listrik disyaratkan suatu level standard tertentu untuk menentukan kualitas tegangan pelayanan. Secara umum ada tiga hal yang perlu dijaga kualitasnya, yaitu:

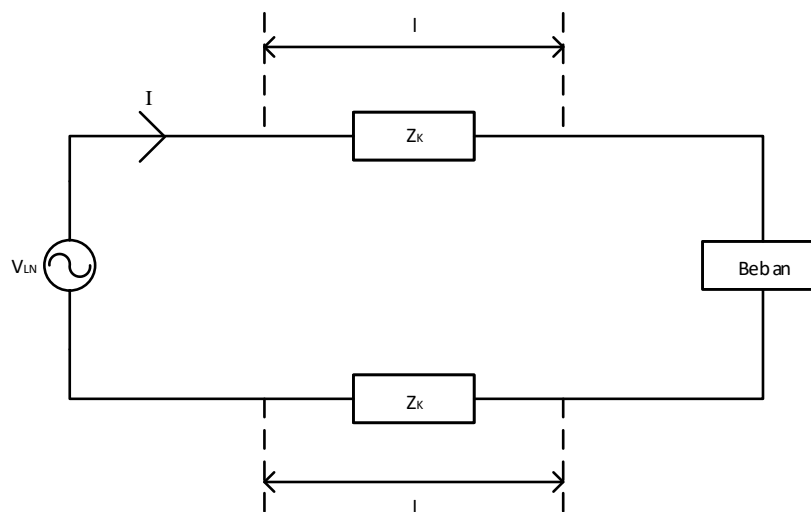
Frekuensi (50 Hz), Tegangan SPLN.No.1; 1985 (220/380 Volt :  $\pm 5\%$ ) dan Keandalan.

Tegangan jatuh merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran Volt dan ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat.

Tegangan jatuh pada penghantar semakin besar jika arus di dalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar R semakin besar pula. Tegangan jatuh penyebab terjadinya penurunan tegangan pada penerima di sisi beban.

Terjadinya tegangan jatuh pada sisi penerima, ada 2 jenis yaitu:

### 1. Tegangan Jatuh Satu Fasa



Gambar 2.18. Tegangan Jatuh Satu Fasa

Gambar 2.18 menjelaskan proses tegangan jatuh yang dianalogikan menggunakan rangkaian ekuivalen.

Dilihat dari Gambar 2.18 maka didapatkan rumus sebagai berikut:

Daya satu fasa:

$$P_{1\phi} = V_{LN} \cdot I \cdot \cos\phi \quad (2.51)$$

Arus Saluran:

$$I = \frac{V_{1\phi}}{\cos\phi} \quad (2.52)$$

Tegangan jatuh:

$$\Delta V = 2 \cdot Z_k \cdot l \cdot I \text{ (Volt)} \quad (2.53)$$

Dengan:

$P_{1\phi}$  = Daya Satu Fasa (W)

$V_{LN}$  = Tegangan Satu Fasa (V)

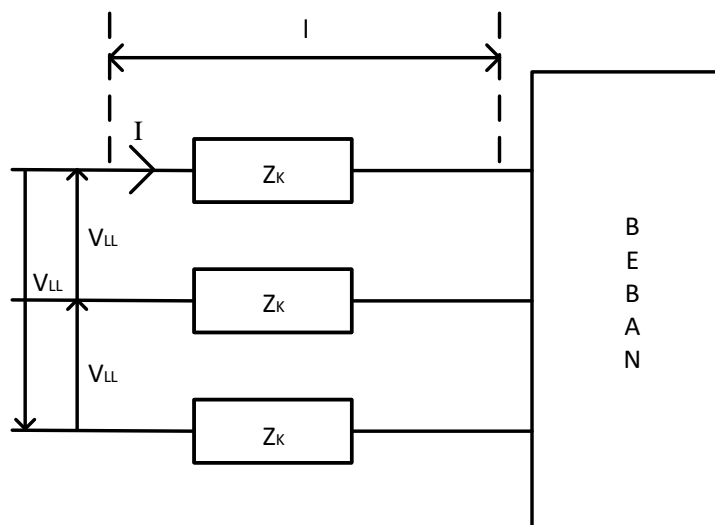
$I$  = Arus dalam Saluran (A)

$Z_k$  = Impedansi Kawat ( $\Omega$ )

$l$  = Panjang Saluran (m)

$\Delta V$  = Tegangan Jatuh (V)

## 2. Tegangan Jatuh Tiga Fasa



Gambar 2.19. Tegangan Jatuh Tiga Fasa

Gambar 2.19 menjelaskan proses tegangan jatuh yang dianalogikan menggunakan rangkaian ekuivalen.

Dilihat dari Gambar 2.19 maka didapatkan rumus sebagai berikut:

Daya Tiga Fasa:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I \cdot \cos\phi \quad (2.54)$$

Arus Saluran:

$$I = \frac{P_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{LL} \cos\phi} \quad (2.55)$$

Tegangan jatuh:

$$\Delta V = Z_k \cdot l \cdot I \text{ (Volt)} \quad (2.56)$$

Tegangan jatuh dalam persen:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \cdot Z_k \cdot l \cdot I}{V_{LL}} \times 100\% \quad (2.57)$$

atau,

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I (R_k \cos\phi + X_k \sin\phi)}{100} \times 100\% \quad (2.58)$$

Dengan:

$P_{3\phi}$  = Daya Tiga Fasa (W)

$V_{LL}$  = Tegangan Tiga Fasa (V)

$I$  = Arus dalam Saluran (A)

$l$  = Panjang Saluran (m)

$\Delta V$  = Tegangan Jatuh (V)

$Z_k$  = Impedansi Kawat ( $\Omega$ )

$R_k$  = Resistansi Kawat ( $\Omega$ )

$X_k$  = Reaktansi Kawat ( $\Omega$ )

## 2.6. Studi Aliran Daya

Studi aliran daya adalah studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya, tegangan dan dapat dilanjutkan untuk studi hubung singkat serta rugi-rugi (losses) pada sistem dalam kondisi operasi tunak. Analisis aliran daya terkait dengan keadaan operasi seluruh sistem tenaga termasuk didalamnya terdapat jaringan generator, transmisi, dan beban yang dapat merepresentasikan sebuah area. Selain untuk perencanaan operasi, perhitungan aliran daya digunakan untuk evaluasi keamanan, dan keandalan sistem tenaga menjadi optimal.

Keberhasilan operasi sistem tenaga tergantung dari:

- a. Kemampuan sistem dalam mensuplai beban dan minimnya rugi-rugi daya.
- b. Besaran tegangan bus mendekati nilai nominalnya.

- c. Generator beroperasi dalam batas daya reaktif dan daya aktifnya.
- d. Transmisi dan transformator tidak terbebani berlebihan untuk waktu lebih lama dari yang telah ditentukan.

Dari empat faktor diatas sangat penting menentukan tegangan dan aliran daya dalam sebuah sistem tenaga untuk kondisi dan beban tertentu. Dalam analisis sistem tenaga diasumsikan sistem seimbang (keadaan operasi normal) dan perubahan jaringan konstan, dan tap transformator tetap. Karena pada busbar secara umum ditentukan dalam daya aktif dan daya reaktif, sehingga permasalahan aliran daya merupakan persamaan aljabar nonlinier bersama antara tiap bus. Karena persamaan nonlinier maka diperlukan teknik numerik untuk menyelesaikannya. Harga yang terpenting dari perhitungan adalah tegangan pada bus, mengandung harga besaran dan elemen waktu atau sudut fasa. Setelah tegangan diketahui, arus dan lain-lainnya dapat dihitung. Oleh karena itu dikatakan aliran daya karena merupakan analisis dari mana dan kemana aliran daya mengalir menuju beban. Ada beberapa teknik umum yang digunakan dalam perhitungan aliran daya.

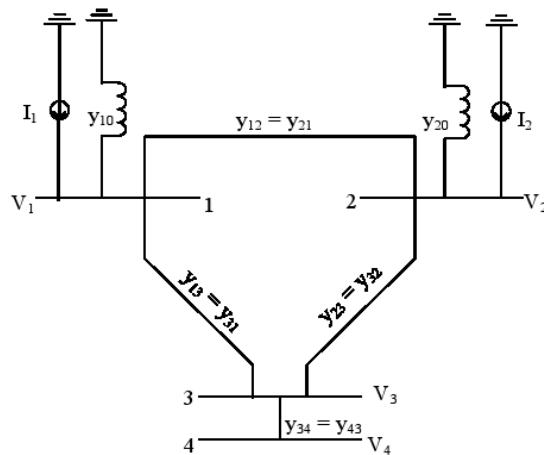
## 2.7. Matriks Admitansi Bus

Untuk mendapatkan persamaan bus-tegangan, dimana impedansinya dinyatakan dalam satuan per unit pada dasar MVA sementara untuk penyederhanaan resistansinya di abaikan. Berdasarkan Hukum Arus Kirchoff impedans-impedans di ubah ke admitansi admitansi, yaitu:

Persamaan:

$$Y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (2.59)$$





Gambar 2.20. Diagram Admittansi Suatu Sistem Ketenagalistrikan  
(Saadat, 2002)

Gambar 2.20 yang diubah menjadi besaran admittansi dan perubahan menjadi sumber-sumber arus. Simpul nol (biasanya dianggap tanah) diambil sebagai referensi, dengan menggunakan hukum arus *kirchoff* pada simpul 1 sampai 4 menghasilkan:

$$\text{Pada bus 1 : } I_1 = y_{10}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3)$$

$$\text{Pada bus 2 : } I_2 = y_{20}V_2 + y_{12}(V_2 - V_1) + y_{23}(V_2 - V_3)$$

$$\text{Pada bus 3 : } 0 = y_{23}(V_3 - V_2) + y_{13}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4)$$

$$\text{Pada bus 4 : } 0 = y_{34}(V_4 - V_3)$$

Dengan menyusun persamaan diatas, maka:

$$I_1 = (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3$$

$$I_2 = -y_{12}V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23})V_2 - y_{23}V_3$$

$$0 = -y_{13}V_1 - y_{23}V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4$$

$$0 = -y_{34}V_3 + y_{34}V_4$$

Impedansi ekspansi, dimana:

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13} \rightarrow \text{Impedansi Bus}$$

$$Y_{22} = y_{20} + y_{12} + y_{23} \rightarrow \text{Admittansi Cabang}$$

$$Y_{33} = y_{13} + y_{23} + y_{34} \rightarrow \text{Admittansi Cabang}$$

$$Y_{44} = y_{34}$$

$$Y_{12} = y_{21} = -y_{12}$$

$$Y_{13} = y_{31} = -y_{13}$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -Y_{23}$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -Y_{34}$$

Persamaan arus untuk 4 bus :

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4$$

$$I_3 = Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4$$

$$I_4 = Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4$$

$$y_{14} = y_{41} = 0 \rightarrow \text{karena tidak adanya hubungan}$$

$$y_{24} = y_{42} = 0 \rightarrow \text{karena tidak adanya hubungan}$$

Dalam Bentuk Matriks:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Matriks Admitansi Bus:

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}$$

Secara umum untuk n-bus, persamaan Arus adalah:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Dengan:

$$I_{\text{bus}} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}_{bus} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

Disederhanakan:

$$\mathbf{I}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus} \mathbf{V}_{bus} \quad (2.61)$$

Dimana  $\mathbf{I}_{bus}$  adalah besaran vektor dari arus *bus* yang diinjeksikan. Arus akan positif saat mengalir menuju *bus*, dan negatif bila mengalir keluar dari *bus*.  $\mathbf{V}_{bus}$  adalah besaran vektor dari tegangan *bus* yang diukur dari simpul referensi.  $\mathbf{Y}_{bus}$  dikenal dengan matriks admitansi *bus*. Komponen diagonal dari tiap simpul adalah jumlah dari admitansi-admitansi yang terhubung padanya. Ini dikenal dengan admitansi sendiri atau driving point admittance, yaitu:

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n Y_{ij} \quad j \neq i \quad (2.62)$$

Komponen diagonal mati (*off-diagonal element*) sama dengan negatif dari admitansi antara simpul-simpul. Ini dikenal dengan admitansi bersama yaitu:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2.62)$$

Jika arus bus diketahui, dan juga dari persamaan (2.61) maka besar tegangan bus k-n dapat diperoleh dengan

$$\mathbf{V}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus}^{-1} \mathbf{I}_{bus} \quad (2.63)$$

## 2.8. Metode Pemecahan Aliran Daya

Mereduksi persamaan aliran daya dapat dilakukan dengan beberapa metode numerik untuk mencari akar persamaan nonlinier, walaupun untuk sistem tenaga yang paling sederhana. Metode pemecahan aliran daya terdiri dari metode Gauss Seidel, metode Newton Raphson, dan metode Fast Decoupled. (Saadat, 2002)

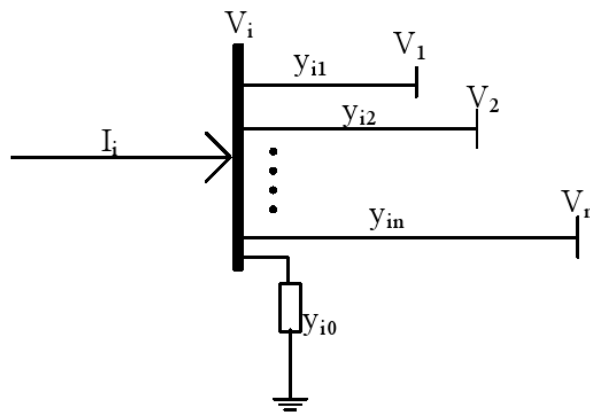
Mempertimbangkan bus jaringan sistem tenaga seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.21 jalur transmisi diwakili oleh rangkaian pengganti  $\pi$  dimana impedansinya telah dikonversi ke admitansi pada umumnya MVA.

Aplikasi dari KCL pada bus ini dihasilkan :

$$\begin{aligned} I_i &= y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\ &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - y_{in}V_n \end{aligned} \quad (2.64)$$

Aplikasi hasil bus ini adalah :

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (2.65)$$



Gambar 2.21. Tipe Bus Pada Sistem Tenaga Listrik Sederhana  
(Saadat, 2002)

Daya nyata dan daya reaktif pada bus  $i$  adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.66)$$

Arus masuk Bus:

$$I_i^* = \frac{P_i + jQ_i}{V_i} \quad (2.67)$$

Atau:

$$I_i = \frac{P_i + jQ_i}{V_i^*} \quad (2.68)$$

Mensubstitusikan persamaan (2.66) dan (2.67) diatas, maka hasilnya

$$\frac{P_i + jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (2.69)$$

Dari hubungan diatas, hasilnya harus dipecahkan dengan teknik iterasi. Persamaan diatas dipecahkan untuk  $V_i$ .

## 2.9. Metode Gauss Seidel

Metode Gauss Seidel juga dikenal sebagai metode perpindahan secara berturut-turut (iterasi), metode ini untuk memecahkan solusi dari persamaan non linier. Persamaan aliran daya biasanya ditulis dalam istilah elemen matriks admitansi bus. Sejak itu elemen diagonal off pada pada matriks admitansi bus  $Y_{bus}$  ditunjukkan oleh persamaan diatas, yaitu  $Y_{ij} = -y_{ij}$  dan elemen diagonal  $Y_{ii} = \sum y_{ij}$ , persamaan menjadi :

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} - \sum_{j \neq i}^n y_{ij} V_j^{(k)}}{\sum_{j=0}^n y_{ij}} \quad j \neq i \quad (2.70)$$

Dimana  $y_{ij}$  merupakan bentuk admitansi dalam satuan per-unit,  $P_{sch}$  dan  $Q_{sch}$  merupakan daya aktif dan reaktif yang dihasilkan dalam satuan per-unit. Persamaan aliran daya biasanya dinyatakan dalam elemen matriks admitansi bus:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} - \sum_{j \neq i}^n y_{ij} V_j^{(k)}}{Y_{ii}} \quad j \neq i \quad (2.71)$$

Dan

$$P_i^{(k+1)} = \Re\{V_i^{*(k)} [V_i^{(k)} + \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)}]\} \quad j \neq 1 \quad (2.72)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im\{V_i^{*(k)} [V_i^{(k)} + \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)}]\} \quad j \neq 1 \quad (2.73)$$

untuk bus PQ:

$$(e_i^{(k+1)})^2 + (f_i^{(k+1)})^2 = |V_i|^2 \quad (2.74)$$

Atau:

$$(e_i^{(k+1)})^2 = \sqrt{|V_i|^2 - (f_i^{(k+1)})^2} \quad (2.75)$$

Dengan  $e_i^{k-1}$  dan  $f_i^{k-1}$  sama dengan komponen nyata dan imajiner tegangan  $V_i^{k-1}$  dalam urutan iterasi. Syarat akurasi ditentukan oleh :

$$\left| \left( e_i^{(k+1)} \right) - e_i^{k-1} \right| \leq \varepsilon \text{ dan } \left( f_i^{(k+1)} \right) - f_i^{k-1} \leq \varepsilon \quad (2.76)$$

Pada umumnya akurasi tegangan sekitar 0,00001 s/d 0,00005 (p.u) dan untuk akurasi daya 0,001 (p.u).

Tabel 2.1. Variable yang Diketahui dan Tidak Diketahui (Saadat, 2002)

Tipe Bus	Variabel yang diketahui	Variabel yang tidak diketahui
Slack Bus	[V]= 1.0 : $\theta = 0^\circ$	P.Q
Generator Bus (PV)	P.[V]	Q. $\theta$
Load Bus (PQ)	P.Q	[V]. $\theta$

Tabel 2.1 menunjukkan variabel yang diketahui dan tidak diketahui berdasarkan tipe bus, penjelasan sebagai berikut:

1. Slack bus

Slack bus sering juga disebut dengan swing bus atau rel berayun. Adapun besaran yang diketahui dari bus ini adalah tegangan (V) dan sudut beban ( $\Theta$ ). Suatu sistem tenaga biasanya di rancang memiliki bus ini yang dijadikan referensi yaitu besaran sudut beban =  $0^\circ$  Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah daya aktif dan reaktif.

2. Generator bus

Generator bus dapat disebut dengan voltage controlled bus karena tegangan pada bus dibuat selalu konstan. Setiap bus generator memiliki daya Megawatt(MW) dan besaran tegangan yang dapat diatur melalui arus eksitasi generator sehingga bus ini sering juga disebut PV bus. Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah Q dan  $\Theta$ .

3. Load bus

Setiap bus yang tidak memiliki generator disebut dengan load bus. Pada bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui sehingga sering juga disebut bus PQ. Daya aktif dan reaktif yang disuplai ke dalam sistem

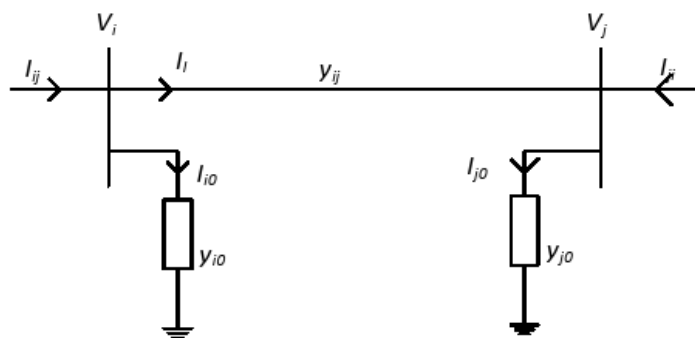
tenaga adalah mempunyai nilai positif, sementara daya aktif dan reaktif yang dikonsumsi bernilai negatif. Besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah tegangan ( $V$ ) dan sudut beban ( $\Theta$ ).

Setelah diketahui variabel-variabel diatas, dari perhitungan dapat diketahui:

1. Besar tegangan dan sudutnya pada tiap bus.
2. Daya aktif dan reaktif pembangkitan pada tiap busbar.
3. Aliran daya pada tiap transmisi beban dan transformator.
4. Pembangkitan daya atau konsumsi peralatan kompensasi setiap *load statis*.
5. Total rugi-rugi daya.
6. Dari variabel yang telah diketahui data tambahan dapat ditentukan seperti arus yang mengalir pada beban *performance* transmisi.

### 2.10. Rugi Daya Dalam Saluran

Setelah melakukan iterasi berulang pada tegangan bus langkah selanjutnya adalah menghitung arus dan rugi-rugi. Perhatikan garis yang menghubungkan dua bus  $i$  dan  $j$  pada Gambar 2.22 arus  $I_{ij}$  saat itu diukur pada bus  $i$  dan ditetapkan pada arah yang positif.



Gambar 2.22. Model Saluran Transmisi Untuk Menghitung Aliran Arus  
(Sunardiyo, 2009)

Aliran arus dari bus  $i$  ke bus  $j$  adalah sebagai berikut:

$$I_{ij} = I_l + I_{i0} = y_{ij} (V_i - V_j) + y_{i0} V_i \quad (2.77)$$

Begitupun pada arah arus  $I_{ij}$  diukur pada bus  $j$  dan ditetapkan pada arah yang positif.

Aliran arus dari bus  $j$  ke bus  $i$  adalah sebagai berikut:

$$I_{ji} = I_i + I_{j0} = y_{ij} (V_j - V_i) + y_{j0} V_j \quad (2.78)$$

Daya kompleks  $S_{ij}$  dari bus  $i$  ke bus  $j$  dan  $S_{ji}$  dari bus  $j$  ke bus  $i$  adalah:

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.79)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.80)$$

Rugi daya dalam saluran bus  $i$  ke bus  $j$  jumlah aljabar dari hasil arus yang ditentukan pada rumus (2.79) dan (2.80) yaitu:

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.81)$$

### 2.11. Klasifikasi Saluran Transmisi

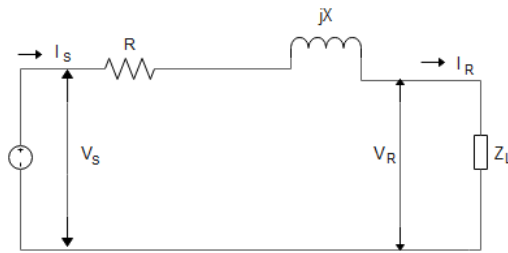
Untuk klasifikasi saluran transmisi biasanya dibagi dalam 3 kelas, yaitu saluran kawat pendek (<80 km), saluran kawat menengah (80-250 km), dan saluran kawat Panjang (>250km).

Sebenarnya klasifikasi di atas sangat relatif. Klasifikasi saluran transmisi harus didasarkan atas besar kecilnya kapasitansi ke tahanan. Jadi bila kapasitansi kecil, dengan demikian arus bocor ke tanah kecil terhadap arus beban, maka dalam hal ini kapasitansi ke tanah diabaikan, dan dinamakan kawat pendek. Tetapi apabila kapasitansi sudah mulai besar sehingga tidak dapat diabaikan, tetapi belum begitu besar sekali sehingga masih dapat dianggap sebagai kapasitansi terpusat (lumped capacitance), dan dinamakan kawat menengah. Bila kapasitansi itu harus dianggap terbagi rata sepanjang saluran, maka dalam hal ini dinamakan kawat panjang. Diagram pengganti saluran transmisi berdasarkan klasifikasi saluran transmisi sebagai berikut:

#### 1. Saluran Pendek

Dalam Gambar 2.23 diberikan diagram pengganti dari saluran pendek. Disini kapasitansi saluran diabaikan.





Gambar 2.23. Diagram Pengganti Saluran Pendek

Keterangan:

$V_S$  = tegangan pada ujung kirim atau ujung generator

$I_S$  = arus pada ujung kirim atau ujung generator

$V_R$  = tegangan pada ujung terima atau ujung beban

$I_R$  = arus pada ujung terima atau ujung beban

$Z = R + j X$  = impedansi saluran

Maka relasi tegangan dan arus,

$$V_S = V_R + ZI_R \quad (2.82)$$

$$I_S = I_R \quad (2.83)$$

Pengaturan tegangan atau *voltage regulation* ( $V_R$ ) didefinisikan sebagai:

$$VR (\%) = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100\% \quad (2.84)$$

Dimana:

$|V_{R(NL)}|$  = tegangan skalar ujung beban pada beban nol

$|V_{R(FL)}|$  = tegangan skalar ujung beban pada beban penuh

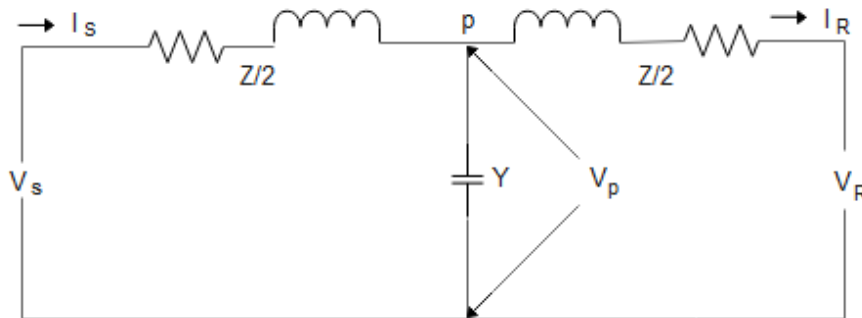
Untuk kawat pendek  $|V_{R(NL)}| = |V_S|$  dan  $|V_{R(FL)}| = |V_R|$  maka,

$$VR (\%) = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_R|} \times 100\% \quad (2.85)$$

## 2. Saluran Menengah

Pada saluran menengah kapasitansi itu dapat dipusatkan pada satu titik (nominal T), atau pada dua titik nominal PI.

*Nominal T* :

Gambar 2.24. Diagram Pengganti Saluran Menengah, Nominal  $PI$ 

Relasi tegangan dan arus:

$$V_S = V_R + I_P Z \quad (2.91)$$

Tetapi,

$$I_P = I_R + V_R \frac{Y}{2} \quad (2.92)$$

Jadi,

$$V_S = V_R + (I_R + V_R \frac{Y}{2}) Z \quad (2.93)$$

$$V_S = (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + Z I_R \quad (2.94)$$

Arus,

$$I_S = I_P + V_S \frac{Y}{2} \quad (2.95)$$

$$I_S = I_R + V_R \frac{Y}{2} + (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + Z I_R \frac{Y}{2} \quad (2.96)$$

$$I_S = (Y + \frac{ZY^2}{4}) V_R + (1 + \frac{ZY}{2}) I_R \quad (2.97)$$

Jadi,

$$V_S = (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + Z I_R \quad (2.98)$$

$$I_S = (Y + \frac{ZY^2}{4}) V_R + (1 + \frac{ZY}{2}) I_R \quad (2.99)$$

Pengaturan tegangan untuk nominal  $PI$  atau  $T$ ,

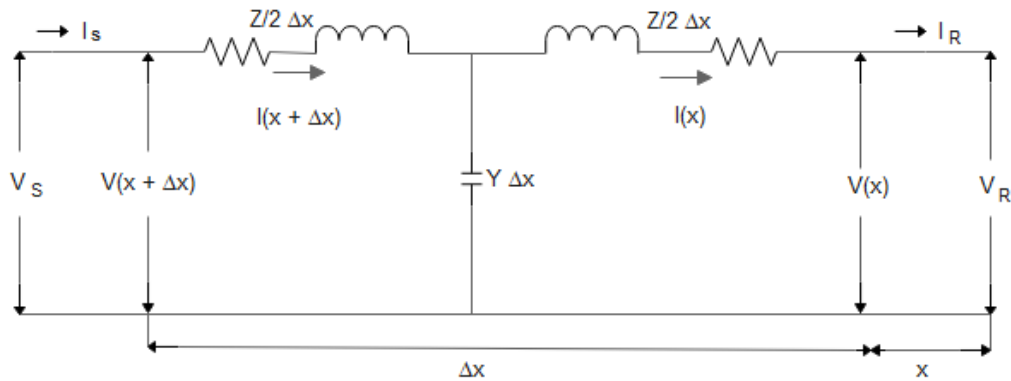
$$V_{R(NL)} = \frac{V_S}{(1 + \frac{ZY}{2})} ; V_{R(FL)} = V_R \quad (2.100)$$

Maka,

$$VR (\%) = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100\% \quad (2.101)$$

$$VR (\%) = \frac{\left| \frac{V_S}{(1 + \frac{ZY}{2})} \right| - |V_R|}{|V_R|} \times 100\% \quad (2.102)$$

### 3. Saluran Panjang



Gambar 2.25. Diagram Pengganti Saluran Panjang

Misalkan  $Z$  = impedansi per satuan panjang

$Y$  = admitansi shunt per satuan panjang

Pandanglah bagian kecil  $\Delta x$ , dari kawat transmisi itu yang jaraknya  $x$  dari ujung terima.

$$\begin{aligned} V(x + \Delta x) &= [1 + \frac{ZY}{2} (\Delta x)^2] V(x) + Z \Delta x [ \frac{ZY}{4} (\Delta x)^2 ] I(x) \\ I(x + \Delta x) &= Y \Delta x V(x) + [ 1 + \frac{ZY}{2} (\Delta x)^2 ] I(x) \end{aligned} \quad (2.103)$$

Atau,

$$\begin{aligned} V(x + \Delta x) - V(x) &= \Delta V(x) = \frac{ZY}{2} (\Delta x)^2 V(x) + Z \Delta x [ 1 + \frac{ZY}{4} (\Delta x)^2 ] I(x) \\ I(x + \Delta x) - I(x) &= \Delta I(x) = Y \Delta x V(x) + \frac{ZY}{2} (\Delta x)^2 I(x) \end{aligned} \quad (2.104)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V(x)}{\Delta x} &= \frac{ZY}{2} V(x) \Delta x + Z [ 1 + \frac{ZY}{4} (\Delta x)^2 ] I(x) \\ \frac{\Delta I(x)}{\Delta x} &= Y V(x) + \frac{ZY}{2} I(x) \Delta x \end{aligned} \quad (2.105)$$

$\Delta V(x)$  dan  $\Delta I(x)$  adalah kenaikan tegangan dan arus bila bergerak dari titik  $x$  ke titik  $(x + \Delta x)$  yaitu sejauh  $\Delta x$ .

Bila  $\Delta x$  dibiarkan menjadi kecil sekali sehingga mendekati nol, maka:

$$\frac{\Delta V(x)}{\Delta x} \text{ mendekati } \frac{dV(x)}{dx} \text{ dan } \frac{\Delta I(x)}{\Delta x}$$

Juga suku-suku yang mengandung  $\Delta x$  akan hilang, jadi persamaan (2.105) menjadi:

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dx} &= Z.I \\ \frac{dI}{dx} &= Y.V\end{aligned}\quad (2.106)$$

Subskrip  $x$  tidak perlu lagi untuk  $V$  dan  $I$  karena relasi diatas berlaku untuk setiap titik. Oleh karena semua suku-suku yang berbeda pada representasi  $PI$  dan  $T$  mengandung  $\Delta x$ , maka hasil yang sama akan diperoleh juga seandainya kita memulai dengan representasi  $PI$ .

Bila persamaan (2.106) dideferensirsekali lagi terhadap  $x$ , maka

$$\begin{aligned}\frac{d^2V}{dx^2} &= Z \frac{dI}{dx} \rightarrow \frac{d^2V}{dx^2} = ZY V \\ \frac{d^2I}{dx^2} &= Y \frac{dV}{dx} \rightarrow \frac{d^2I}{dx^2} = ZY I\end{aligned}\quad (2.107)$$

Misalkan solusi dari persamaan diferensial linier tingkat dua itu:

$$V = A e^{mx}$$

Maka,

$$\begin{aligned}\frac{d^2V}{dx^2} &= A m^2 e^{mx} = ZY A e^{mx} \\ m^2 &= ZY \\ m_1 &= \sqrt{ZY} \\ m_2 &= -\sqrt{ZY}\end{aligned}$$

Maka,

$$V = A_1 e^{\sqrt{ZY} x} + A_2 e^{-\sqrt{ZY} x} \quad (2.108)$$

Dengan jalan yang sama,

$$I = B_1 e^{\sqrt{ZY} x} + B_2 e^{-\sqrt{ZY} x} \quad (2.109)$$

Pada  $x = 0$

$$V = V_R$$

$$I = I_R$$

Dan juga

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dx} \Big|_{x=0} &= Z I_R \\ \frac{dI}{dx} \Big|_{x=0} &= Y V_R \\ \frac{dV}{dx} &= A_1 \sqrt{ZY} e^{\sqrt{ZY} x} - A_2 \sqrt{ZY} e^{-\sqrt{ZY} x}\end{aligned}$$

$$\left. \frac{dV}{dx} \right|_{x=0} = A_1 \sqrt{ZY} - A_2 \sqrt{ZY} = Z I_R \quad (2.110)$$

$$\frac{dI}{dx} = B_1 \epsilon^{\sqrt{ZY} x} - B_2 \sqrt{ZY} \epsilon^{-\sqrt{ZY} x}$$

$$\left. \frac{dI}{dx} \right|_{x=0} = B_1 \sqrt{ZY} - B_2 \sqrt{ZY} = Y V_R \quad (2.111)$$

Untuk  $x = 0$

$$V_{x=0} = V_R = A_1 + A_2 \quad (2.112)$$

$$I_{x=0} = I_R = B_1 + B_2 \quad (2.113)$$

Jadi sekarang telah ada 4 persamaan dengan 4 unsur yang tidak diketahui:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ , yaitu:

$$\begin{aligned} \sqrt{ZY} (A_1 - A_2) &= Z I_R \\ \sqrt{ZY} (B_1 - B_2) &= Y V_R \\ A_1 + A_2 &= V_R \\ B_1 + B_2 &= I_R \end{aligned} \quad (2.114)$$

Dari keempat persamaan itu diperoleh:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2} (V_R + \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R) \\ A_2 &= \frac{1}{2} (V_R - \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R) \\ B_1 &= \frac{1}{2} (I_R + \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R) \\ B_2 &= \frac{1}{2} (I_R - \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R) \end{aligned} \quad (2.115)$$

Maka,

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} (V_R + \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R) \epsilon^{\sqrt{ZY} x} + \frac{1}{2} (V_R - \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R) \epsilon^{-\sqrt{ZY} x} \\ I &= \frac{1}{2} (I_R + \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R) \epsilon^{\sqrt{ZY} x} + \frac{1}{2} (I_R - \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R) \epsilon^{-\sqrt{ZY} x} \end{aligned} \quad (2.116)$$

Karena:

$$\begin{aligned} \cosh x &= \frac{\epsilon^x + \epsilon^{-x}}{2} \\ \sinh x &= \frac{\epsilon^x - \epsilon^{-x}}{2} \end{aligned}$$

maka:

$$\begin{aligned}
 V &= V_R \cosh \sqrt{ZY} x + \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R \sinh \sqrt{ZY} x \\
 I &= I_R \cosh \sqrt{ZY} x + \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R \sinh \sqrt{ZY} x
 \end{aligned} \tag{2.117}$$

Bentuk lain diperoleh dengan mengingat:

$$\begin{aligned}
 \cosh x &= 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \frac{x^6}{6!} + \dots \\
 \sinh x &= x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \frac{x^7}{7!} + \dots
 \end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned}
 V &= \left( 1 + \frac{\sqrt{ZY} x^2}{2} + \frac{Z^2 Y^2 x^4}{24} + \dots \right) V_R + Z x \left( 1 + \frac{\sqrt{ZY} x^2}{6} + \frac{Z^2 Y^2 x^4}{120} \right) I_R \\
 I &= \left( 1 + \frac{\sqrt{ZY} x^2}{2} + \frac{Z^2 Y^2 x^4}{24} + \dots \right) I_R + Y x \left( 1 + \frac{\sqrt{ZY} x^2}{6} + \frac{Z^2 Y^2 x^4}{120} \right) V_R
 \end{aligned} \tag{2.118}$$

Misalkan panjang kawat itu  $l$ , maka pada

$$x = l$$

$$V = V_S$$

$$I = I_S$$

Definisi:

$$\sqrt{\frac{Z}{Y}} = Z_k = \text{impedansi karakteristik} \tag{2.119}$$

Maka pada  $x = l$  dan setelah  $Z_k$  diisikan dalam persamaan (2.116) dan (2.117) diperoleh,

$$\begin{aligned}
 V_S &= \frac{V_R + Z_k I_R}{2} e^{\sqrt{ZY} l} + \frac{V_R - Z_k I_R}{2} e^{-\sqrt{ZY} l} \\
 I_S &= \frac{I_R + \frac{V_R}{Z_k}}{2} e^{\sqrt{ZY} l} + \frac{I_R - \frac{V_R}{Z_k}}{2} e^{-\sqrt{ZY} l}
 \end{aligned} \tag{2.120}$$

Dan,

$$\begin{aligned}
 V_S &= V_R \cosh \sqrt{ZY} l + Z_k I_R \sinh \sqrt{ZY} l \\
 I_S &= I_R \cosh \sqrt{ZY} l + \frac{V_R}{Z_k} \sinh \sqrt{ZY} l
 \end{aligned}$$

Atau:

$$\begin{aligned}
 V_R &= V_S \cosh \sqrt{ZY} l - I_S Z_k \sinh \sqrt{ZY} l \\
 I_R &= I_S \cosh \sqrt{ZY} l - \frac{V_S}{Z_k} \sinh \sqrt{ZY} l
 \end{aligned} \tag{2.121}$$

## 2.12. Pengenalan ETAP Power Station 12.6.0

Dalam perancangan dan analisa sebuah sistem tenaga listrik, sebuah software aplikasi sangat dibutuhkan untuk mempresentasikan kondisi real sebelum sebuah sistem direalisasikan. ETAP (*Electric Transient Program*) merupakan salah satu software aplikasi yang digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga listrik

ETAP mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, dan online untuk pengelolaan data real time. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik.

Analisa sistem tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP antara lain:

1. Analisa Aliran Daya
2. Analisa Hubung Singkat
3. *Arc Flash Analysis*
4. Starting Motor
5. Koordinasi Proteksi
6. Analisa Kestabilan Transien.

ETAP memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan tampilan Gambar single line/diagram satu garis. Program ini dirancang sesuai dengan tiga konsep utama, yaitu:

1. Virtual Reality Operasi

Sistem operational yang ada pada program sangat mirip dengan sistem operasi pada kondisi real nya. Misalnya, ketika Anda membuka atau menutup sebuah sirkuit breaker, menempatkan suatu elemen pada sistem, mengubah status operasi suatu motor, dan untuk kondisi de-energized pada suatu elemen dan sub-elemen sistem ditunjukkan pada gambar single line diagram dengan warna abu-abu.

2. Total Integration Data

Etap Power Station menggabungkan informasi sistem elektrikal, sistem logika, sistem mekanik, dan data fisik dari suatu elemen yang

dimasukkan dalam sistem database yang sama. Misalnya, untuk elemen subuah kabel, tidak hanya berisikan data kelistrikan dan tentang dimensi fisiknya, tapi juga memberikan informasi melalui raceways yang dilewati oleh kabel tersebut. Dengan demikian, data untuk satu kabel dapat digunakan untuk dalam menganalisa aliran beban (load flow analysis) dan analisa hubung singkat (short-circuit analysis) -yang membutuhkan parameter listrik dan parameter koneksi- serta perhitungan ampacity derating suatu kabel -yang memerlukan data fisik routing.

### 3. Simplicity in Data Entry

ETAP Power Station memiliki data yang detail untuk setiap elemen yang digunakan. Dengan menggunakan editor data, dapat mempercepat proses entri data suatu elemen. Data-data yang ada pada program ini telah dimasukkan sesuai dengan data-data yang ada di lapangan untuk berbagai jenis analisa atau desain.

ETAP PowerStation dapat melakukan penggambaran single line diagram secara grafis dan mengadakan beberapa analisa/studi yakni Load Flow (aliran daya), Short Circuit (hubung singkat), motor starting, harmonisa, transient stability, protective device coordination, dan cable derating.

ETAP PowerStation juga menyediakan fasilitas Library yang akan mempermudah desain suatu sistem kelistrikan. Library ini dapat diedit atau dapat ditambahkan dengan informasi peralatan bila perlu.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP PowerStation adalah :

- **One Line Diagram**, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
- **Library**, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail/lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.



- **Standar yang dipakai**, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai.
- **Study Case**, berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

### 2.13. Analisis Aliran Daya (*Load Flow Analysis*)

Percobaan load flow atau aliran daya ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran daya yang berupa pengaruh dari variasi beban dan rugi-rugi transmisi pada aliran daya dan juga mempelajari adanya tegangan jatuh di sisi beban.

Aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik secara garis besar adalah suatu peristiwa daya yang mengalir berupa daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari suatu sistem pembangkit (sisi pengirim) melalui suatu saluran atau jaringan transmisi hingga sampai ke sisi beban (sisi penerima). Pada kondisi ideal, maka daya yang diberikan oleh sisi pengirim akan sama dengan daya yang diterima beban. Namun pada kondisi real, daya yang dikirim oleh sisi pengirim tidak akan sama dengan daya yang diterima beban. Hal ini dipengaruhi beberapa hal:

#### 1. Impedansi di saluran transmisi

Impedansi di saluran transmisi dapat terjadi karena berbagai hal dan sudah mencakup resultan dan hambatan resistif, induktif, dan kapasitif. Hal ini menyebabkan rugi-rugi daya karena terkonversi atau terbuang menjadi energi lain dalam transfer energi.

#### 2. Tipe beban yang tersambung jalur

Ada tiga tipe jenis beban, yaitu resistif, induktif, dan kapasitif. Resultan antara besaran hambatan kapasitif dan induktif akan mempengaruhi PF, sehingga mempengaruhi perbandingan antara besarnya daya yang ditransfer dengan yang diterima,.

Sedangkan untuk melakukan kalkulasi aliran daya, terdapat tiga metoda yang biasa digunakan, berhubungan dengan topik yang penulis bahas maka penulis menggunakan salah satu metoda tersebut, yaitu:

#### 1. Accelerated Gauss-Seidel Method

Hanya butuh sedikit nilai masukan, tetapi lambat dalam kecepatan perhitungan.

$$[P + jQ] = [V^T \ / \ Y_{BUS}^* \ / \ V^*]$$