

## BAB II DASAR TEORI

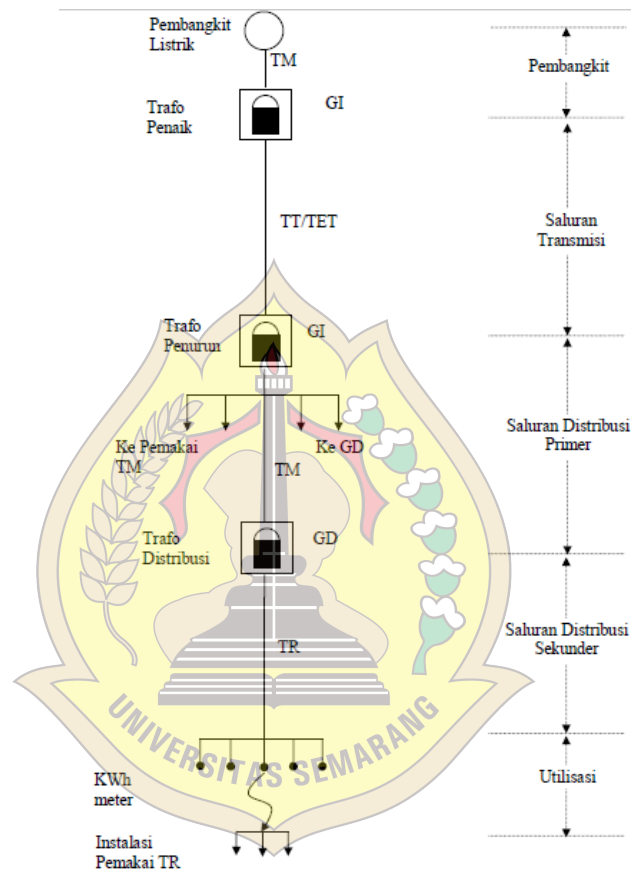
### 2.1 SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK.

Sistem distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik, dimana sistem ini bertujuan untuk mengirimkan energi listrik dari unit pembangkit listrik sampai ke konsumen. Tenaga listrik yang dihasilkan dari unit pembangkit adalah 11 kV sampai 24 kV, kemudian tegangannya dinaikkan oleh gardu induk tegangan tinggi dengan transformator penaik tegangan (*step up*) menjadi 500 kV, kemudian disalurkan melalui transmisi. Tujuan dari dinaikkan tegangan sampai 500 kV adalah untuk mengurangi kerugian daya listrik pada saluran transmisi, Dimana kerugian daya adalah sebanding kuadrat arus yang mengalir. Daya yang sama apabila nilai tegangannya diperbesar maka nilai arus yang mengalir semakin kecil, sehingga kerugian daya semakin kecil pula.

Tegangan yang di transmisikan diturunkan dengan transformator penurun tegangan (*step down*) pada gardu induk distribusi menjadi 20 kV, kemudian disalurkan ke trafo distribusi yang lebih kecil menjadi tegangan rendah yaitu 220/380 V kemudian disalurkan ke konsumen atau pelanggan.

Pada wilayah pusat tegangan tinggi ini diturunkan kembali dengan transformator penurun tegangan (*step down*) yang berakibat apabila ditinjau nilai tegangannya maka mulai dari titik sumber sampai titik beban terdapat bagian saluran yang mempunyai nilai tegangan yang berbeda. Dengan adanya nilai tegangan yang berbeda dapat memunculkan arus netral, dimana nilai arus netral ini

muncul apabila terjadi beban tidak seimbang. Arus netral pada pembebanan transformator berakibat akan ada perbedaan sudut arus dan tegangan yang cukup besar [1].



Gambar 2.1 Gambaran sistem distribusi tenaga listrik dari unit pembangkit sampai ke pelanggan tegangan rendah [1].

## 2.2. JARINGAN TEGANGAN MENENGAH

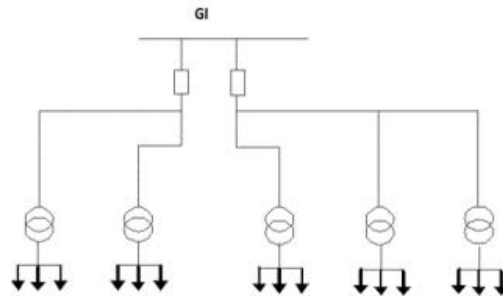
Jaringan tegangan menengah (JTM) adalah jaringan tenaga listrik yang berfungsi mengirimkan tegangan dari gardu induk 20 kV ke trafo distribusi dan diturunkan tegangannya menjadi 220/380 V kepada konsumen sesuai kebutuhan, namun ada juga pelanggan yang membutuhkan langsung 20 kV seperti industri besar. Jaringan ini struktur atau pola sedemikian rupa sehingga dalam pengoperasiannya mudah dan handal.

### 2.2.1. Sistem Jaringan

Dilihat dari fungsi tegangannya, jaringan distribusi dibedakan menjadi 2, yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Jaringan distribusi primer adalah jaringan yang mulai dari trafo gardu induk (GI) ke gardu distribusi, sedangkan jaringan sekunder adalah jaringan saluran trafo gardu distribusi sampai ke konsumen. Ditinjau dari keandalannya, jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi tiga pola [2], yaitu :

#### a. Pola Radial

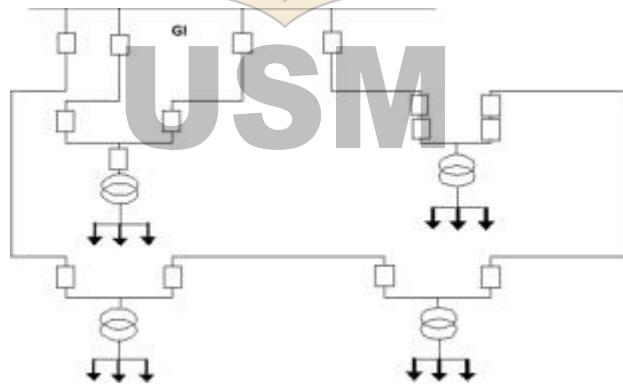
Sistem distribusi dengan pola radial adalah sistem distribusi yang paling sederhana, ekonomis mudah dalam pemeliharaannya, namun pada sistem ini hanya mampu menyalurkan daya dalam satu arah. Apabila terjadi gangguan maka semua beban mengalami pemadaman sampai gangguan dapat terselesaikan. Gambar sistem jaringan pola radial dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Sistem jaringan pola radial.

#### b. Pola Loop

Sistem distribusi dengan pola loop adalah sistem distribusi yang ditandai dengan adanya dua sumber tenaga listrik yaitu sumber utama dan sebuah sumber cadangan, dimulai dari suatu titik pada rel daya yang berkeliling di daerah beban kemudian kembali ke titik rel daya semula jika salah satu sumber mengalami gangguan akan dapat digantikan sumber yang lain (sumber cadangan). Pola ini biasa dipakai pada sistem distribusi yang melayani beban dengan kebutuhan kontinuitas pelayanan yang baik (lebih baik daripada pola radial). Gambar sistem jaringan pola loop dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sistem jaringan pola loop

### c. Pola Spindel

Jaringan pola spindel merupakan pengembangan dari pola radial dan loop terpisah. Beberapa saluran yang keluar dari gardu induk diarahkan menuju suatu tempat yang disebut gardu hubung (GH), kemudian antara GH dan GI terdapat satu jalur khusus yang disebut *express feeder*. Disepanjang saluran kerja dan terhubung secara seri. Saluran kerja yang masuk ke gardu dihubungkan oleh sakelar pemisah, sedangkan saluran yang keluar dari gardu dihubungkan oleh sebuah sakelar beban. Jadi sistem ini dalam keadaan normal bekerja secara radial dan dalam keadaan darurat bekerja secara *loop* melalui saluran cadangan dan GH. Gambar dari sistem jaringan pola spindle dapat dilihat pada gambar 2.4



Gambar 2.4 Sistem jaringan pola spindle

## 2.3. TRANSFORMATOR

Transformator merupakan salah satu alat listrik yang dapat mengubah level tegangan listrik dari satu ke level tegangan listrik lainnya berdasarkan jumlah lilitan atau kumparan yang ada didalam bagian primer dan sekundernya. Apabila salah

satu kumparan di berikan tegangan listrik, maka akan timbul fluksi yang akan menginduksi kumparan lainnya sehingga timbul tegangan di kumparan lainnya. Kerja transformator berdasarkan induksi-elektromagnet. Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator di kelompokkan menjadi tiga, yaitu :

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran, terdiri atas transformator arus dan transformator tegangan.

Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, terdapat dua macam transformator, yaitu tipe inti dan tipe cangkang. Gambarnya dapat dilihat pada gambar 2.5



Gambar 2.5 Transformator tipe inti dan tipe cangkang

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum Ampere dan hukum Faraday, yaitu: arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Jika pada salah satu kumparan pada transformator diberi arus bolak-balik maka jumlah garis gaya magnet akan berubah-ubah akibatnya muncul fluks magnet yang berubah-ubah pula, sehingga pada

kumparan primer akan timbul gerak gaya listrik (GGL) induksi  $e_p$ . besarnya GGL induksi pada kumparan primer didapatkan persamaan 2.1

$$e_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \text{ Volt} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan :

$e_p$  : GGL induksi sesaat pada kumparan primer

$N_p$  : Jumlah lilitan pada kumparan primer

$d\phi$  : Perubahan garis-garis gaya magnet (weber) 1 weber =  $10^8$  maxwell

$dt$  : Perubahan waktu (detik)

Fluksi magnet juga menginduksikan GGL induksi  $e_p$  juga dialami oleh kumparan sekunder, karena merupakan fluks bersama dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi  $e_s$  pada kumparan sekunder [3].

Persamaannya dapat dilihat pada persamaan 2.2

$$e_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ Volt} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

$e_s$  : GGL induksi sesaat pada kumparan sekunder

$N_s$  : Jumlah lilitan pada kumparan sekunder

$d\phi$  : Perubahan garis-garis gaya magnet (weber) 1 weber =  $10^8$  maxwell

$dt$  : Perubahan waktu (detik)

### 2.3.1. Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan asset PLN yang memegang peranan penting dalam distribusi energi listrik, karena yang berhubungan langsung dengan pelanggan. Transformator distribusi ada dua jenis yaitu satu fasa dan tiga fasa, pada umumnya transformator distribusi yang dipergunakan adalah tipe *step down* yang menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 400 V.

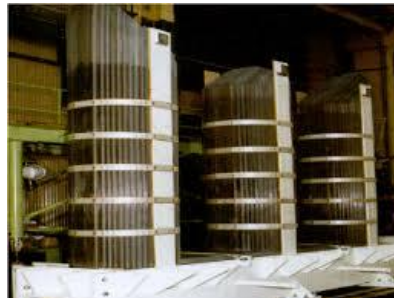
Transformator distribusi mempunyai dua buah kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder, apabila pada kumparan primer dialiri arus listrik bolak-balik, maka akan timbul garis gaya magnet yang kemudian akan menginduksi kumparan sekunder sehingga timbul tegangan pada kumparan sekunder.

Bagian-bagian Transformator sebagai berikut:

a. Inti Besi

Inti besi merupakan komponen utama pada trafo yang terdiri dari lempengan besi tipis yang berisolasi disusun secara berlapis, hal ini dimaksudkan agar dapat mengurangi panas yang diakibatkan oleh arus *eddy* .

Gambar dari inti besi dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Inti Besi Trafo



### b. Kumparan Trafo

Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan atau gulungan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder, apabila salah satu dari kumparan diberikan tegangan maka pada kumparan akan membangkitkan fluksi pada inti dan menginduksi kumparan lainnya, sehingga pada sisilain kumparan akan timbul tegangan. Jumlah dari masing-masing kumparan akan berpengaruh terhadap tegangandan arus yang dihasilkan. Gambar dari kumparan trafo dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Kumparan Trafo

### c. Minyak Trafo

Minyak trafo merupakan salah satu bahan cair pada trafo yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada trafo. Bahan minyak trafo harus mempunyai kemampuan untuk menahan tegangan tembus. Minyak trafo berfungsi sebagai pendingin diharapkan minyak trafo dapat melindungi trafo dari gangguan.

d. *Bushing*

*Bushing* merupakan penghubung trafo ke jaringan luar menjadi terminal melalui isolator dan juga menjadi penyekat antar kumparan dengan badan trafo. Gambar *bushing* dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Bushing* Trafo

e. Tangki Konservator

Tangki Konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap atau udara akibat dari pemanasan trafo karena arus beban.

f. *Oil Level Indicator*

*Oil Level Indicator* merupakan suatu alat *monitoring* untuk menunjukkan tingkat volume minyak transformator apabila minyak mengalami pemuaian atau penurunan volume karena kebocoran.

g. Indikator Suhu Trafo

Indikator Suhu Trafo merupakan suatu alat untuk memonitor suhu transformator.

h. Pendingin Trafo

Transformator bekerja pada inti besi dan kumparan akan menimbulkan panas yang mengakibatkan kenaikan suhu, apabila suhunya berlebihan dapat

merusak isolasi. Untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan, transformator perlu dilengkapi dengan alat pendingin untuk menyalurkan panas ke luar transformator, media yang dapat di gunakan adalah udara atau gas, minyak dan air. Pada cara yang alami untuk mempercepat pendinginan, pada badan transformator juga di lengkapi dengan sirip-sirip.

i. *Tap Changer* Trafo

*Tap Changer* Trafo merupakan suatu alat yang dapat diputar sesuai ketentuan yang dapat merubah nilai ratio antar belitan primer dan sekunder sehingga dengan demikian tegangan output sekunder dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Proses perubahan ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat transformator dalam keadaan berbeban (*on load tap changer*) atau saat transformator tidak dalam keadaan berbeban (*off load tap changer*).

### 2.3.2 Transformator Distribusi Tiga Fasa

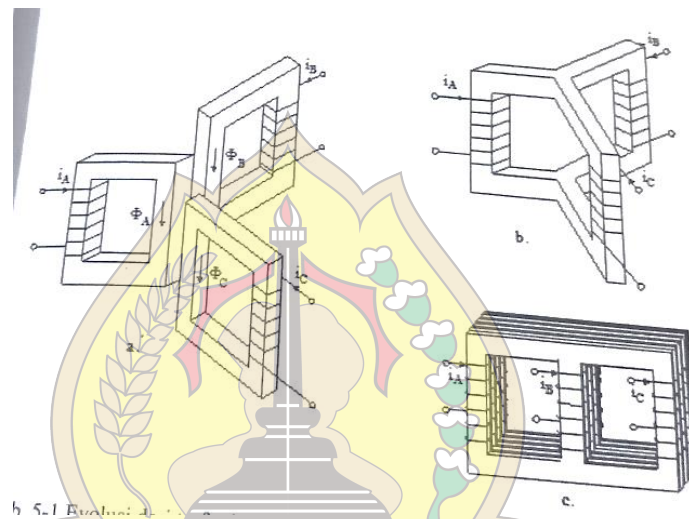
Transformator tiga fasa pada umumnya digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik pada system tiga fasa arus bolak-balik. Pada bagian kumparan atau lilitannya dapat disambung atau dihubungkan secara bintang (Y) atau segitiga ( $\Delta$ ) [1].

a. Konstruksi Transformator Tiga Fasa

Transformator tiga fasa dapat disusun dari tiga buah trafo satu fasa, yang mempunyai kumparan primer dan sekunder yang dililitkan pada bagian inti yang sama (*common*). Trafo tiga fasa yang disusun dengan tiga buah trafo satu fasa tipe inti dapat dilihat pada gambar 2.9a Apabila tegangan induksi dalam masing-masing fasa adalah sinusoida dan simetri, maka *fluksi* yang dihasilkan juga sinusoida dan simetri pula. Jadi apabila setiap kaki dari inti mengalirkan fluksi ini, maka fluksi total yang

mengalir dalam ketiga inti ini sama dengan nol, karena itu ketiga inti yang mengalirkan fluksi total dapat dihilangkan, seperti terlihat pada gambar 2.9b.

Inti yang dibuat dari laminasi-laminasi yang disusun bertingkat, dapat dilihat pada gambar 2.9c merupakan penyempurnaan dari gambar 2.9b [4].



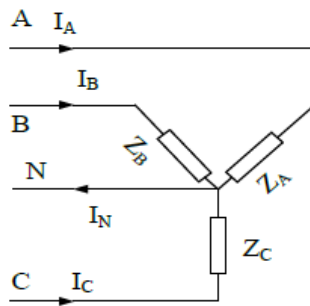
Gambar 2.9 Konstruksi transformator tiga fasa; a. Tiga trafo 1 fasa, b. Lintasan fluksi dihilangkan, c. Konstruksi yang disederhanakan.

#### b. Hubungan Transformator Tiga Fasa [4].

Pada umumnya jenis-jenis hubungan pada transformator tiga fasa ada tiga yaitu:

##### 1. Transformator Tiga Fasa Hubug Bintangatau *Star* (Y)

Transformator tiga fasa hubung bintang adalah hubungan transformator dimana pada ujung awal atau akhir lilitan dipertemukan dalam satu titi dimana titik pertemuan tersebut merupakan titik netral,  $I_A$ ,  $I_B$  dan  $I_C$  masing-masing berbeda fasa  $120^\circ$ . Gambar 2.10 Transformator tiga fasa hubung bintang (Y)



Gambar 2.10 Transformator Tiga Fasa Hubug Bintang atau *Star*(Y)

Dari gambar 2.10 diperoleh persamaan :

$$I_A = I_B + I_C + I_L \dots \dots \dots (2.3)$$

$$I_L = I_{ph} \dots \dots \dots (2.4)$$

$$V_{AB} = V_{BC} + V_{CA} = V_{LL} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3} \times V_{ph} \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan:

$V_{L-L}$  : Tegangan *line to line* (Volt)

$V_{ph}$  : Tegangan fasa (Volt)

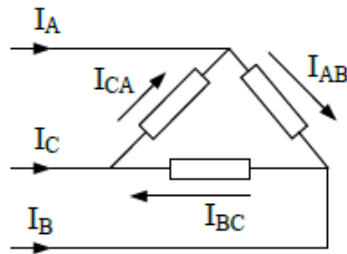
$I_L$  : Arus *line* (Ampere)

$I_{ph}$  : Arus fasa (Ampere)

## 2. Transformator Tiga Fasa Hubug Segitiga atau *Delta* ( $\Delta$ )

Transformator tiga fasa hubung segitiga adalah hubungan transformator dimana cara penyambungan pada lilitannya yaitu ujung akhir lilitan fasa pertama di hubungkan dengan ujung mula fasa kedua, akhir fasa kedua di hubungkan dengan ujung mula fasa ketiga dan ujung akhir fasa ketiga di hubungkan dengan

ujung mula fasa pertama, yaitu  $V_A, V_B, V_C$  masing-masing mempunyai beda fasa sebesar  $120^\circ$



Gambar 2.11. Transformator tiga fasa hubug segitiga atau delta ( $\Delta$ )

Dari gambar 2.11 diperoleh bahwa :

$$I_A = I_B = I_C = I_L \dots \dots \dots (2.7)$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_{ph} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{LL} \dots \dots \dots (2.9)$$

$$V_{LL} = V_{ph} \dots \dots \dots (2.10)$$

Keterangan:

$V_{L-L}$  : Tegangan *line to line* (Volt)

$V_{ph}$  : Tegangan fasa (Volt)

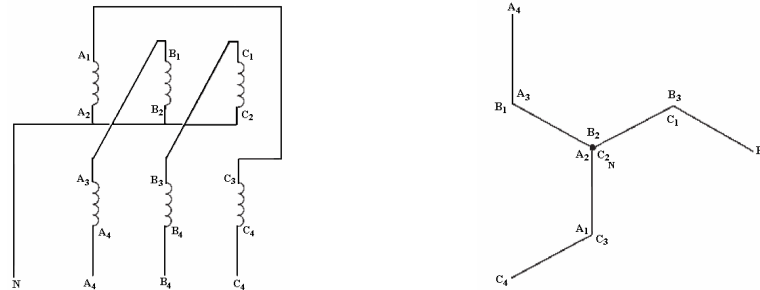
$I_L$  : Arus *line* (Ampere)

$I_{ph}$  : Arus fasa (Ampere)

### 3. Transformator Tiga Fasa Hubug Zig-zag

Transformator tiga fasa hubung zig-zag adalah hubungan transformator dimana pada lilitan sekunder dibuat dalam hubungan *interconnected* (zig-zag), dimana masing-masing lilitan dibagi atas 2 bagian yang sama. Lilitan fasa pertama dibagi

atas lilitan  $a_1$  dan  $b_1$ , fasa kedua lilitan  $a_2$  dan  $b_2$ , sedangkan fasa ketiga  $a_3$  dan  $b_3$ , dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12. Transformator Tiga Fasa Hubug Zig-zag (z)

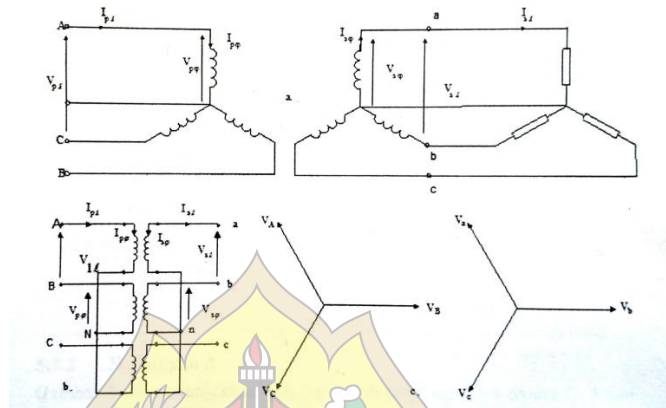
### 2.3.3 Jenis-Jenis Hubungan Transformator [4].

Dalam penghubungan transformator dapat dihubungkan bermacam-macam jenisnya, seperti bintang dan segitiga dengan kombinasi Y-Y, Y- $\Delta$ ,  $\Delta$ -Y,  $\Delta$ - $\Delta$ , atau bahkan dalam kasus tertentu lilitan sekunder dapat dihubungkan secara berliku-liku (zig-zag), sehingga diperoleh kombinasi  $\Delta$ -Z dan Y-Z. Hubungan zig-zag merupakan sambungan bintang istimewa, dimana hubungan ini digunakan untuk mengantisipasi kejadian yang mungkin terjadi apabila dihubungkan secara bintang dengan beban fasanya tidak seimbang. Di bawah ini secara umum akan dijelaskan jenis-jenis hubungan transformator tiga fasa :

#### a. Hubungan Bintang – Bintang (Y-Y)

Pada umumnya transformator dengan hubungan bintang-bintang digunakan pada sistem tiga fasa dengan empat kawat. Apabila hubungan ini digunakan untuk transformator distribusi 20kV/380V, maka tegangan yang diberikan tiga fasa dengan tegangan 380V dan satu fasa dengan tegangan 220V (fasa-netral) tersedia di sisi sekunder, seperti terlihat pada gambar 2.13, hubungan ini tidak menyebabkan suatu

pergeseran antara primer dan sekunder. Namun apabila akhir a, b dan c dihubungkan sehingga membentuk titik netral serta titik A, B dan C dibawa keluar, maka akan terjadi pergeseran sebesar 180° antara sisi primer dan sekunder.



Gambar 2.13 Trafo tiga fasa hubungan Y-Y: a. Diagram, b. Trafo tiga fasa yang dimodifikasi, c. Diagram fasor sisi primer dan sekunder.

Hubungan Y-Y dalam sistem tiga kawat tidak merekomendasikan, gelombang tegangan sinus yang diberikan pada sisi primer, arus eksitasi bukanlah gelombang sinus murni, tetapi masih mengandung harmonisa ketiga. Hubungan Y-Y adalah hubungan yang paling ekonomis untuk transformator tegangan tinggi yang kecil, karena jumlah belitan per fasa dan isolasinya minimum. Dalam hubungan Y-Y tegangan fasa dari sisi primer dinyatakan oleh :

$$V_{P\phi} = V_{Pl} \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$I_{P\phi} = I_{Pl} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$V_{S\phi} = V_{Sl} / \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$I_{S\phi} = I_{Sl} \dots\dots\dots (2.14)$$

Rasio transformasi dalam keadaan beban nol adalah



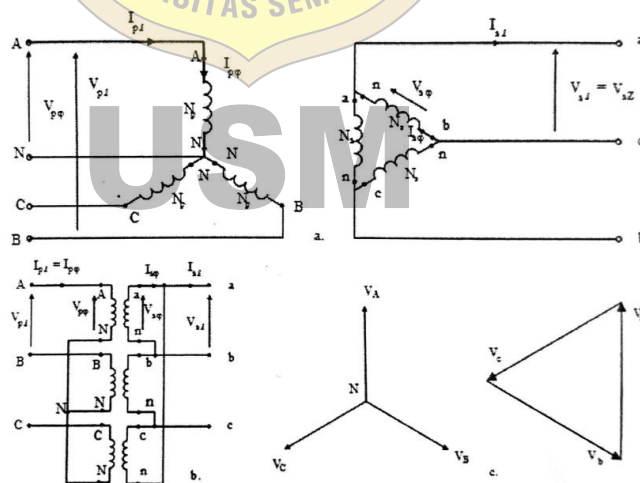
$$a = \frac{V_{P\phi}}{V_{S\phi}} = \frac{V_{Pl}}{V_{Sl}} \dots\dots\dots (2.15)$$

Daya output trafo adalah

$$P_{out} = \sqrt{3} V_S I_S \cos \phi_s \dots\dots\dots (2.16)$$

b. Hubungan Bintang – Segitiga (Y-Δ)

Transformator dengan hubungan bintang – segitiga (Y - Δ) pada umumnya digunakan sebagai trafo *step-down*. Pada sisi primer tegangan *line* adalah  $\sqrt{3}$  kali tegangan fasa, sedangkan arus fasa dan *line* sama besar. Hubungan ini tidak mempunyai komponen harmonisa ketiga, karena hilang dengan sendirinya karena melalui kumparan delta. Kemudian hubungan jenis ini lebih stabil terhadap beban tidak simetris, karena rangkaian delta (Δ) mendistribusikan kembali secara *partial* sesuai ketidakseimbangan yang terjadi. Namun hubungan jenis ini menyebabkan pergeseran fasa antara tegangan sisi primer dan sekunder. Adapun gambar dari transformator hubungan bintang-segitiga dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Trafo tiga fasa hubung bintang-segitiga, a. Diagram, b. Trafo tiga fasa yang dimodifikasi, c. Diagram fasor tegangan sisi primer dan sekunder

Dalam hubungan bintang – segitiga (Y- $\Delta$ ), tegangan fasa dari sisi primer dinyatakan oleh :

$$V_{P\phi} = V_{Pl} / \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$I_{P\phi} = I_{Pl} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$V_{S\phi} = V_{Sl} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$I_{P\phi} = I_{Pl} / \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.20)$$

Rasio transformasi dalam keadaan beban nol adalah :

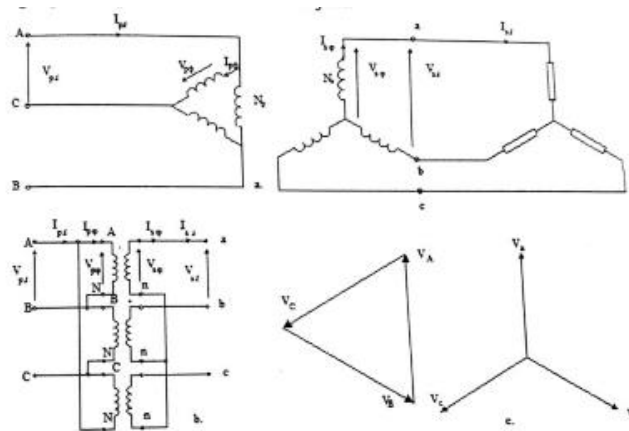
$$a = \frac{V_{P\phi}}{V_{S\phi}} = \frac{V_{Pl} / \sqrt{3}}{V_{Sl}} \dots\dots\dots (2.21)$$

Daya output trafo adalah

$$P_{out} = \sqrt{3} V_S I_S \cos \phi_s \dots\dots\dots (2.22)$$

### c. Hubungan Segitiga - Bintang ( $\Delta$ -Y)

Hubungan jenis ini banyak digunakan pada transformator *step-up*. Dalam sisi primer tegangan *line* dan fasa adalah sama, sedangkan arus *line* sama dengan  $\sqrt{3}$  kali arus fasa. Sedangkan pada sisi sekunder tegangan *line* adalah  $\sqrt{3}$  kali tegangan fasa dan arus *line* sama dengan arus fasa. Hubungan bintang membantu menstabilkan tegangan pada titik netral, pergeseran fasa sebesar  $30^\circ$  antara tegangan sisi primer dan sekunder terjadi. Adapun gambar dari transformator hubungan segitiga-bintang dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Transformator tiga fasa hubung segitiga-bintang: a. Diagram, b.

Trafosformator tiga fasa yang dimodifikasi, c. Diagram fasor sisi primer dan sekunder

Dalam hubungan segitiga-bintang tegangan fasa dari sisi primer dinyatakan oleh :

$$V_{P\phi} = V_{Pl} \dots\dots\dots (2.23)$$

$$I_{P\phi} = I_{Pl} / \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$V_{S\phi} = V_{Sl} / \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$I_{S\phi} = I_{Sl} / \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.26)$$

Rasio transformasi dalam keadaan beban nol adalah :

$$a = \frac{V_{P\phi}}{V_{S\phi}} = \frac{V_{Pl} / \sqrt{3}}{V_{Sl}} \dots\dots\dots (2.27)$$

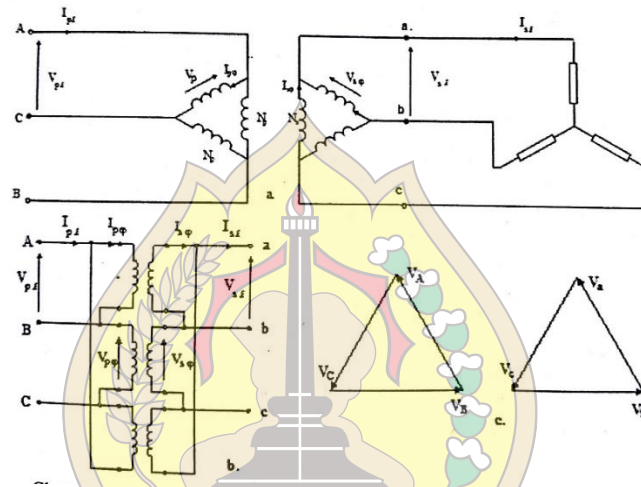
Daya output trafo adalah

$$P_{out} = \sqrt{3} V_s I_s \cos \phi_s \dots\dots\dots (2.28)$$

d. Hubungan Segitiga – Segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ )

Pada transformator yang dihubungkan segitiga-segitiga, tegangan *line* sama dengan tegangan fasa dari tiap sisi. Arus fasanya adalah arus *line* dibagi  $\sqrt{3}$ .

Hubungan segitiga-segitiga. Pada gambar 2.16a menimbulkan pergeseran fasa nol antara tegangan sisi primer dan sekunder, apabila kumparan sekunder dibalik, akan diperoleh pergeseran fasa sebesar  $180^\circ$ . Apabila dua buah transformator dioperasikan secara parallel, maka harus dihubungkan untuk didapat pergeseran fasa yang sama besar. Hubungan Segitiga – Segitiga dapat dilihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16. Trafo tiga fasa hubungan segitiga-segitiga: a. Diagram, b. Trafo tiga fasa yang dimodifikasi, c. Diagram fasor tegangan sisi primer dan sekunder

## 2.4 DAYA

Daya merupakan laju dari sebuah energi yang berubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain, ya. Daya diperoleh karena adanya sebuah elemen yang dilewati arus. Daya disimbolkan dengan P, besarnya daya dapat dapat dinyatakan dalam satuan Watt (W) [10]. Daya listrik dapat dibedakan menjadi tiga yaitu daya aktif, daya semu dan daya reaktif

### 2.4.1 Daya Aktif

Daya aktif yang disimbolkan dengan  $P$  adalah daya yang dibutuhkan oleh beban yang bersifat resistif. Daya nyata memiliki satuan Watt (W) menunjukkan adanya aliran energi listrik dari pembangkit listrik ke jaringan beban untuk di konversi menjadi energi lain. Daya aktif dapat dituliskan dengan persamaan ( 2.29 ) dan (2.30)

$$\text{Satu fasa} \quad P = V \cdot I \cdot \cos \Phi \dots\dots\dots ( 2.29 )$$

$$\text{Tiga fasa} \quad P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \Phi \dots\dots\dots ( 2.30 )$$

### 2.4.2 Daya Semu

Daya semu didapatkan dari hasil perkalian antara tegangan dan arus pada jaringan. Daya semu disimbolkan dengan huruf  $S$  dengan satuan Volt Ampere (VA). Daya semu dapat dituliskan dengan persamaan ( 2.31 ) dan (2.32)

$$\text{Satu fasa} \quad S = V \cdot I \dots\dots\dots ( 2.31 )$$

$$\text{Tiga fasa} \quad S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \dots\dots\dots ( 2.32 )$$

### 2.4.3 Daya Reaktif

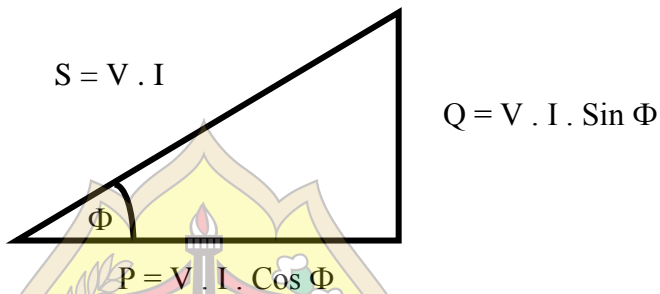
Daya reaktif merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada suatu penghantar dengan daya reaktif itu sendiri. Daya reaktif ini adalah hasil kali antara arus dan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor daya. Daya reaktif disimbolkan dengan huruf  $Q$  dengan satuan *Volt Ampere Reactive* (VAR). Daya reaktif dapat dituliskan dengan persamaan ( 2.33 ) dan (2.34)

$$\text{Satu fasa} \quad Q = V \times I \times \sin \Phi \dots\dots\dots ( 2.33 )$$

Tiga fasa  $Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \Phi$  ..... ( 2.34 )

## 2.5 SEGITIGA DAYA

Segitiga daya merupakan sketsa dari daya aktif, daya reaktif dan daya semu yang menggambarkan hubungan matematika antara tipe-tipe daya yang berbeda. gambar segitiga daya dapat dilihat pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Segitiga daya

Keterangan :

S = Daya semu (VA)

P = Daya aktif (W)

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

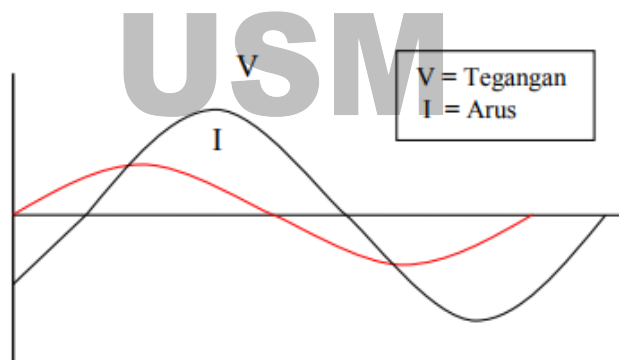
## 2.6 FAKTOR DAYA

Faktor daya merupakan perbandingan antara daya aktif (Watt) dengan daya semu (VA). Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut ini sehingga menjadikan nilai factor daya menjadi lebih kecil. Faktor daya akan selalu lebih kecil atau sama dengan satu. Secara teori apabila setiap beban daya yang dipasang oleh perusahaan listrik mempunyai factor daya dengan nilai satu, maka daya maksimum yang di transfer setara dengan kapasitas sistem pendistribusian. Apabila beban yang

terinduksi jika faktor daya yang diterima berkisar 0,2 hingga 0,5 maka kapasitas jaringan distribusi listrik menjadi tertekan. Sehingga daya reaktif (VAR) diharapkan serendah mungkin untuk keluaran kW yang sama dalam rangka meminimalkan kebutuhan daya total (VA).

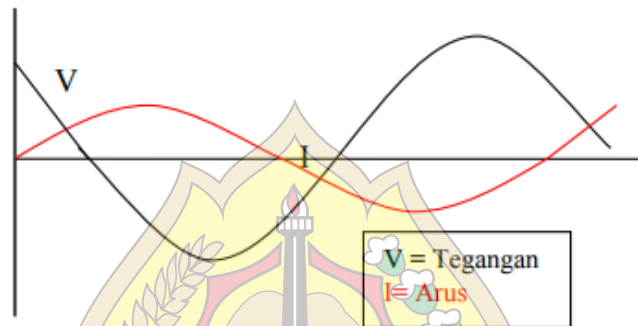
Faktor daya menggambarkan sudut fasa antara daya aktif dan daya semu, nilai factor daya yang rendah akan merugikan, karena akan mengakibatkan arus beban tinggi. Nilai factor daya yang rendah dapat diperbaiki dengan menambahkan kapasitor bank. Didalam sistem tenaga listrik faktor daya ada 2 jenis yaitu faktor daya terdahulu (*leading*) dan faktor daya terbelakang (*lagging*) yang ditentukan oleh jenis beban yang ada pada sistem.

Faktor daya terdahulu (*leading*) menunjukkan kondisi disaat beban bersifat kapasitif dan memberikan daya reaktif dari jaringan. Nilai  $\cos \phi$  pada kondisi *leading* akan bernilai negatif. Kemudian pada gelombang sinus, arus (I) akan mendahului tegangan (V) atau tegangan (V) tertinggal terhadap arus (I) sebesar sudut  $\phi$ . Dapat dilihat pada gambar 2.18.



Gambar 2.18. Faktor daya terdahulu (*leading*)

Faktor daya tertinggal (*lagging*), menunjukkan dimana kondisi disaat beban bersifat induktif dan memerlukan daya reaktif dari jaringan. Nilai  $\cos \phi$  pada kondisi *lagging* akan bernilai positif. Seperti digambarkan pada gelombang sinus dimana arus (I) akan tertinggal dengan tegangan (V). atau tegangan (V) mendahului arus (I) dengan sudut  $\phi$ . Seperti dilihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Faktor daya tertinggal (*lagging*)

## 2.7 KOMPONEN SIMETRIS

Karya Fortescue telah membuktikan bahwa suatu sistem tak seimbang yang terdiri dari  $n$  fasor yang berhubungan dapat diuraikan menjadi  $n$  buah system dengan fasor seimbang yang dinamakan komponen-komponen simetris dari fasor aslinya. Menurut teorema Fortescue, tiga fasor tak seimbang dari sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga system fasor yang seimbang. Komponen-komponennya tersebut adalah: [5].

### 2.7.1 Komponen urutan positif

Terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, mempunyai sudut  $120^\circ$  dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya.



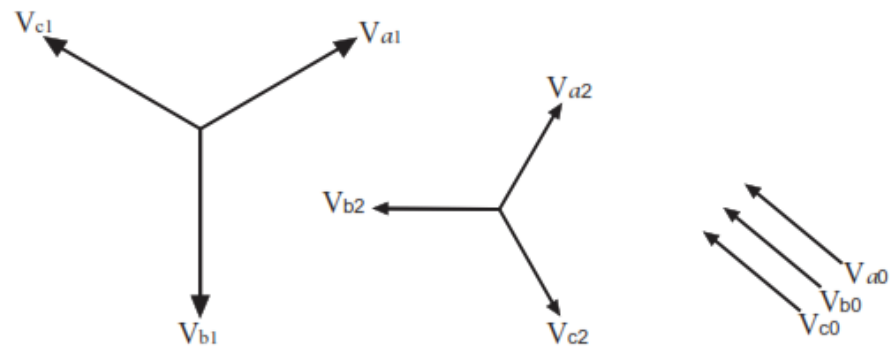
### 2.7.2 Komponen urutan negatif

Terdiri dari tiga fasor yang mempunyai besar sama, yang terpisah satu dengan yang lainnya dalam fasa sebesar  $120^\circ$  dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya.

### 2.7.3 Komponen urutan nol

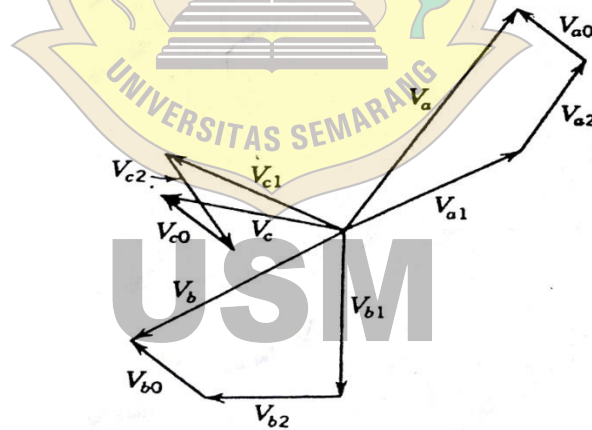
Terdiri dari tiga fasor yang mempunyai besar sama dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor satu dengan yang lain.

Ketiga fasa dinyatakan sebagai a, b dan c, sehingga urutan fasa tegangan dan arus dalam sistem adalah a, b dan c. Jadi, urutan fasa pada komponen urutan positif dari fasor tak seimbang adalah a b c, sedangkan urutan negatif dari fasor tak seimbang adalah a c b. Jika fasor aslinya adalah tegangan, maka tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ . ketiga himpunan komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk komponen urutan positif, subskrip tambahan 2 untuk komponen urutan negatif dan subskrip tambahan 0 untuk komponen urutan nol. Jadi, komponen urutan positif dari  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  adalah  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$ , dan  $V_{c1}$ . Demikian pula dengan komponen urutan negatif adalah  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$ , dan  $V_{c2}$ , sedangkan komponen urutan nol adalah  $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$ , dan  $V_{c0}$ . Adapun gambar komponen-komponen tersebut dapat dilihat pada gambar 2.20.



Gambar 2.20. Tiga himpunan fasor seimbang yang merupakan komponen simetris dari tiga fasor tak seimbang

Komponen-komponen urutan ini dijumlahkan secara grafis sehingga diperoleh tiga fasor tak seimbang, yang dapat dilihat pada gambar 2.21.



Gambar 2.21. Penjumlahan secara grafis komponen-komponen pada gambar 2.20 untuk mendapatkan tiga fasor tak seimbang

Karena setiap fasor yang tak seimbang, yang asli adalah komponen, fasor asli yang dinyatakan dalam suku-suku komponennya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \dots\dots\dots (2.35)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \dots\dots\dots (2.36)$$

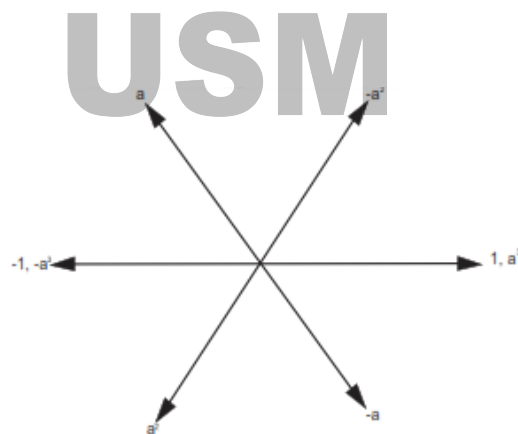
$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \dots\dots\dots (2.37)$$

Komponen simetris terdapat symbol yang dituliskan dengan huruf  $\alpha$  biasanya digunakan untuk menunjukkan operator yang menyebabkan perputaran sebesar  $120^\circ$  dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam. Operator ini adalah bilangan kompleks yang besarnya 1 dan sudutnya  $120^\circ$ , dapat dilihat pada table 2.1 [7].

Tabel 2.1 Fungsi operator  $\alpha$

Pangkat fungsi	Bentuk dalam kutub	Koordinat kartesian
$\alpha$	$1 \angle 120$	$-0,5 + j 0,866$
$\alpha^2$	$1 \angle 240 = 1 \angle -120$	$-0,5 - j 0,866$
$\alpha^3$	$1 \angle 360 = 1 \angle 0$	$1,0 + j 0,0$

berikut ini adalah fasor yang menggambarkan berbagai pangkat dari  $a$  dapat dilihat pada gambar 2.22.



Gambar 2.22 Diagram fasor berbagai pangkat dari  $a$ .

Dengan operator didapat hubungan antara operator satuan dari setiap macam fasor urutan tegangan, yaitu

$$V_{a0} = V_{a0} \dots\dots\dots (2.38)$$

$$V_{b0} = V_{a0} \dots\dots\dots (2.39)$$

$$V_{c0} = V_{c0} \dots\dots\dots (2.40)$$

$$V_{a1} = V_{a1} \dots\dots\dots (2.41)$$

$$V_{b1} = V_{a1} \angle 240^\circ = V_{a1} \cdot a^2 \dots\dots\dots (2.42)$$

$$V_{c1} = V_{a1} \angle 120^\circ = V_{a1} \cdot a \dots\dots\dots (2.43)$$

$$V_{a2} = V_{a2} \dots\dots\dots (2.44)$$

$$V_{b2} = V_{a2} \angle 120^\circ = V_{a2} \cdot a \dots\dots\dots (2.45)$$

$$V_{c2} = V_{a2} \angle 240^\circ = V_{a2} \cdot a^2 \dots\dots\dots (2.46)$$

Dengan cara mensubstitusikan persamaan (2.35), (2.36) dan (2.37) maka didapatkan persamaan :

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \dots\dots\dots (2.47)$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \dots\dots\dots (2.48)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \dots\dots\dots (2.49)$$

Kemudian dapat dituliskan kembali masing-masing persamaan ke dalam bentuk yang biasa, sehingga diperoleh persamaan :

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \dots\dots\dots (2.50)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 V_c) \dots\dots\dots (2.51)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) \dots\dots\dots (2.52)$$

## 2.8 ARUS NETRAL

Arus netral pada sistem distribusi tenaga listrik dikenal sebagai arus yang mengalir pada penghantar netral di sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral ini akan muncul apabila :

- a. Kombinasi beban tidak rata
- b. Karena adanya arus harmonik akibat beban non linear

Arus yang mengalir pada penghantar netral yang merupakan arus bolak-balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris. Arus netral ini berpengaruh terhadap sistem apabila nilai arus netral berlebihan, dalam hal ini dapat mengakibatkan :

- a. Transformator akan mengalami panas berlebihan
- b. Menurunkan kualitas transformator
- c. Terjadinya kegagalan pengawatan pada penghantar netral

Dalam persamaan sebelumnya juga dapat dituliskan untuk setiap himpunan fasor yang berhubungan, dan dapat pula dituliskan untuk arus sebagai pengganti tegangan. Persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \dots \dots \dots (2.53)$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \dots \dots \dots (2.54)$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \dots \dots \dots (2.55)$$

Dengan langkah yang telah di jabarkan dalam menentukan tegangan urutan positif, urutan negatif dan urutan nol sebelumnya, maka arus urutan juga di tentukan dengan cara yang sama, sehingga diperoleh persamaan :

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \dots\dots\dots (2.56)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_a + a I_b + a^2 I_c) \dots\dots\dots (2.57)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \dots\dots\dots (2.58)$$

Dalam sistem tiga fasa, jumlah arus saluran adalah sama dengan arus  $I_n$  dalam jalur kembali lewat netral, sehingga menjadi,

$$I_a + I_b + I_c = I_n \dots\dots\dots (2.59)$$

Dengan membandingkan persamaan (2.51) dengan persamaan (2.54) diperoleh

$$I_n = 3 I_{a0} \dots\dots\dots (2.60)$$

Apabila tidak ada jalur yang melewati netral dari sistem tiga fasa,  $I_n$  adalah nol dan arus saluran tidak mengandung komponen urutan nol, karena beban yang dihubungkan dengan hubungan segitiga ( $\Delta$ ) tidak menyediakan jalur ke netral, oleh karena itu arus saluran yang mengalir ke beban yang dihubungkan segitiga ( $\Delta$ ) tidak mengandung urutan nol.

### 2.8.1 Penyebab Tingginya Arus Netral

Adapun tingginya arus netral dapat disebabkan beberapa faktor, yaitu

- a. Kondisi beban tak seimbang, dimana keadaan tak seimbang ada tiga, yaitu :
  - Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
  - Ketiga vektor tidak sama besar, tetapi, membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
  - Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.

- b. Karena adanya arus harmonik yang diakibatkan oleh beban non-linear.

### 2.8.2 Mengatasi Arus Netral Tinggi

Arus netral yang tinggi dapat diatasi dengan langkah-langkah sebagai berikut, yaitu :

- a. Memperbaiki sambungan kawat netral

Pada sistem distribusi listrik pada umumnya memakai sistem tiga fasa empat kawat, dimana tiga kawat sebagai fasa dan satu kawat sebagai netral. Apabila beban yang di bebani adalah non-linear maka untuk mengatasi panas berlebih pada kawat netral sebaiknya ukuran kawat netral ukurannya diperbesar dari ukuran standarnya. Begitu pula pada panel listrik disarankan untuk diperbesar dari ukuran standarnya sebagai sistem pentanahannya [8].

- b. Pemerataan beban

Pembebanan yang tak seimbang mengakibatkan arus netral traformator menjadi tinggi. Pemerataan beban dilakukan untuk memperbaiki kualitas beban yang dikirim. Terlihat dengan beban seimbang dengan menghasilkan pergeseran sudut antar fasa sebesar  $120^\circ$ . Hal ini berpengaruh terhadap arus netral yang terjadi dimana arus netral akan menjadi nol.

## 2.9 KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN

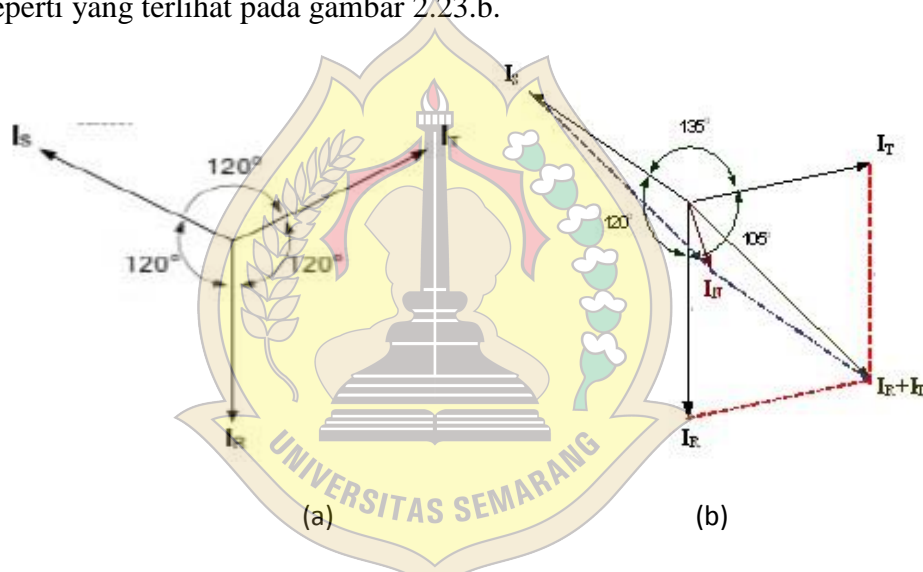
Transformator dikatakan dalam keadaan seimbang apabila dalam suatu keadaan dimana :

- Ketiga vektor arus atau tegangan adalah sama besar.
- Ketiga vektor saling membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain, seperti yang terlihat pada gambar 2.23.a.

Sedangkan transformator dikatakan dalam keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan setimbang tidak terpenuhi.

Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga yaitu :

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain, seperti yang terlihat pada gambar 2.23.b.



Gambar 2.23 (a) Bentuk vektor arus keadaan seimbang, (b) Bentuk vektor arus keadaan tidak seimbang.

Gambar 2.23.a di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang, disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R$   $I_S$   $I_T$ ) adalah sama dengan nol. Sehingga tidak muncul arus netral ( $I_N$ ). Sedangkan pada gambar 2.26.b menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R$   $I_S$   $I_T$ ) adalah tidak sama dengan nol



sehingga muncul arus netral ( $I_N$ ) yang besarnya bergantung pada seberapa besar faktor ketidakseimbangannya [5].

## 2.10 KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN [6].

Ketidakseimbangan tegangan menurut *National Electrical Manufacturers Association (NEMA) Standards Publication MG 1-1998 (Revision 3, 2002)* ketidakseimbangan ini disebabkan oleh perbedaan beban pada salah satu fasa dibandingkan fasa-fasa yang lain. Persamaan untuk menghitung persentase ketidakseimbangan tegangan dapat dilihat pada persamaan 2.61.

$$\% \text{ Unbalance Voltage} = 100\% \frac{\text{Maximum voltage deviation average voltage}}{\text{Average voltage}} \quad (2.61)$$

### 2.10.1. Mengurangi Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan [11].

Tahap-tahap yang mungkin dapat dilakukan untuk mengurangi ketidakseimbangan tegangan diantaranya adalah :

1. Penyeimbangan beban pada instalasi pelanggan.
2. Pemindahan sambungan instalasi pelanggan ke instalasi dengan level hubung singkat yang lebih tinggi.
3. Pemasangan peralatan kompesator (*voltage compensator*).