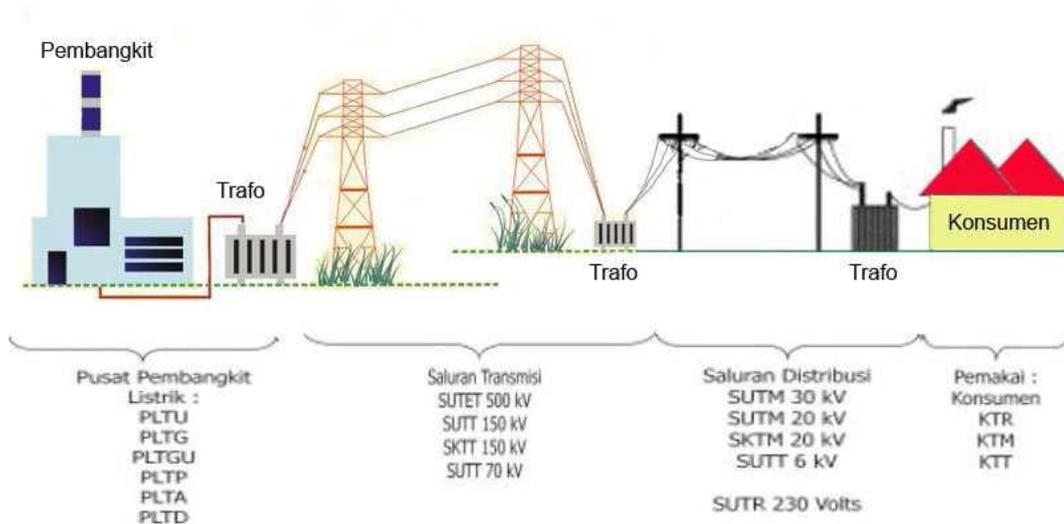


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Tenaga Listrik<sup>10</sup>

Secara umum sistem tenaga listrik terdiri atas komponen tenaga listrik yaitu pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi dan sistem distribusi. Ketiga bagian ini merupakan bagian utama pada suatu rangkaian sistem tenaga listrik yang bekerja untuk menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik yang dihasilkan di pusat pembangkit listrik akan disalurkan melalui saluran transmisi kemudian melalui saluran distribusi akan sampai ke konsumen. Berikut ini penjelasan mengenai bagian utama pada sistem tenaga listrik pada umumnya, yaitu :

<sup>10</sup> Anonim, - . *BAB 2 Landasan Teori*.

<http://library.binus.ac.id/eColls/eThesiscoll/Bab2/201421058MTIF%20Bab2001.pdf>.

(Diakses pada tanggal 15 April 2021).



### **2.1.1 Pusat Pembangkit Listrik (*Power Plant*)**

Pusat pembangkit listrik merupakan tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, dimana terdapat turbin sebagai penggerak awal (*PrimeMover*) dan generator yang membangkitkan listrik dengan mengubah tenaga turbin menjadi energi listrik. Biasanya dipusat pembangkit listrik juga terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain : transformer, yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11,5kV) menjadi tegangan transmisi atau tegangan tinggi (150kV) dan juga peralatan pengamanan dan pengatur. Secara umum, jenis pusat pembangkit dibagi kedalam dua bagian besar yaitu pembangkit hidro yaitu PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) dan pembangkit thermal diantaranya yaitu PLTU (Pusat Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pusat Listrik Tenaga Gas), PLTN (Pusat Listrik Tenaga Nuklir), dan PLTGU (Pusat Listrik Tenaga Gas Uap).

### **2.1.2 Transmisi Tenaga Listrik**

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkitan listrik hingga saluran distribusi listrik sehingga nantinya dapat tersalurkan pada pengguna listrik.

### **2.1.3 Sistem Distribusi**

Sistem distribusi ini adalah sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pengguna listrik dan pada umumnya berfungsi dalam hal penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat. Sub sistem ini terdiri dari : pusat pengatur atau gardu induk, gardu hubung, saluran tegangan menengah atau jaringan primer (6 kV dan 20 kV) yang berupa saluran udara atau kabel bawah tanah, saluran tegangan rendah atau jaringan sekunder (380 V dan 220 V), gardu distribusi tegangan yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan baik tegangan menengah ataupun tegangan rendah, dan trafo.



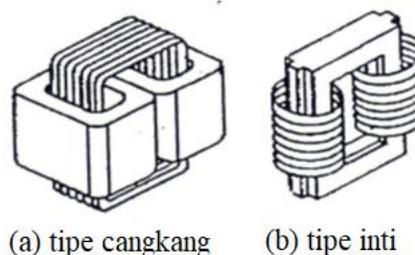
## 2.2 Pengertian Transformator<sup>3</sup>

Transformator adalah suatu alat listrik yang digunakan untuk mentransformasikan daya atau energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem 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 tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator daya.
2. Transformator distribusi.
3. Transformator pengukuran (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 2.2 Tipe Kumparan Transformator

### 2.2.1 Transformator Satu Fasa

Teras besi yang dipakai untuk melilitkan kumparan primer maupun kumparan sekunder dipilih dari plat-plat besi dari bahan feromagnetis, yang ditumpuk menjadi satu dan diisolasi satu sama lain oleh minyak sirlack; untuk menghindari terjadinya arus pusar (Eddy Current) didalam teras.

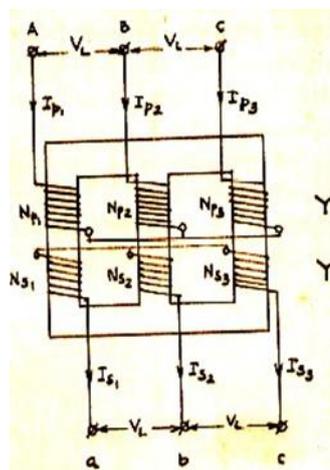
<sup>3</sup> Prasetyo, Haryoto. 2020. *Buku PLN Pusat Pendidikan dan Pelatihan*. Jakarta: PT. PLN (PERSERO).



### 2.2.2 Transformator Tiga Fasa

Transformator yang banyak digunakan untuk jaringan distribusi tegangan tinggi adalah transformator tiga phase. Pada dasarnya transformator tiga phase ini terdiri dari tiga buah transformator, satu phase dengan tiga buah teras besi yang dipasang pada satu kerangka. Dari tiga teras besi ini ditemoatkan masing-masing sepasang kumparan yakni kumparan primer dan kumparan sekunder. Dengan demikian seluruhnya akan terdapat tiga buah kumparan primer dan tiga buah kumparan sekunder. Dari ketiga kumparan primer maupun ketiga kumparan sekunder dapat dihubungkan secara hubungan bintang (*star connection*) dan dihubungkan segitiga (*delta connection*).

Seperti halnya transformator satu phase maka azas kerja dari transformator tiga phase ini pada prinsipnya sama saja. Hanya pada transformator tiga phase arus yang dihubungkan pada kumparan primer berbentuk arus bolak-balik dari tiga buah kawat phase masing-masing sama besarnya dan bergeseran sudut sebesar  $120^\circ$  tiap phasesnya, yang menimbulkan fluks magnetik  $\phi$  didalam teras besi juga berbeda phase  $120^\circ$ . Karena fluks magnetik yang dibangkitkan merupakan fluks magnetik bersama (mutual fluks)  $\phi$  m, maka pada tiap-tiap kumparan akan dibangkitkan gaya gerak listrik (electro motive force) induksi yang masing-masing berbeda  $120^\circ$  juga.

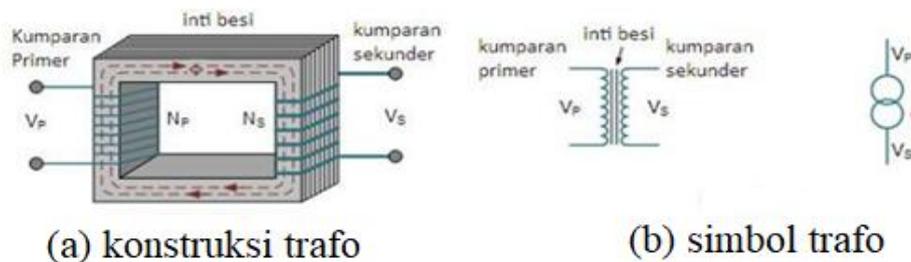


Gambar 2 3 Rangkaian Transformator Tiga fasa



### 2.3 Komponen Utama Transformator<sup>7</sup>

Transformator sering juga disebut trafo memiliki konstruksi dan simbol seperti pada gambar berikut ini:



Gambar 2.4 Konstruksi dan simbol transformator

Dimana:

$N_p$  = Jumlah lilitan primer

$N_s$  = Jumlah lilitan sekunder

$V_p$  = Tegangan primer

$V_s$  = Tegangan sekunder

Komponen utama transformator daya terdiri dari bagian-bagian diantaranya: inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, tangki konservator, peralatan bantu pendinginan transformator, tap changer dan alat pernapasan (*dehydrating breather*).

#### 2.3.1 Inti besi

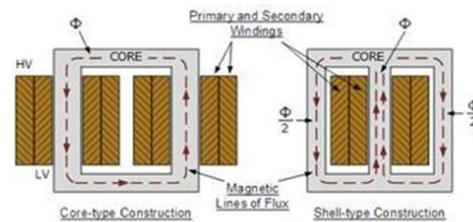
Sebuah trafo terdiri dari kumparan dan inti besi. Biasanya terdapat dua buah kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kedua kumparan ini tidak berhubungan secara fisik tetapi dihubungkan oleh medan magnet. Untuk meningkatkan induksi magnetik antara 2 kumparan maka ditambahkan inti besi seperti pada gambar 2.4. Inti besi pada trafo dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1. Inti besi tipe shell (*Shell Core Transformator*)
2. Inti besi tipe tertutup (*Closed Core Transformator*)

Kedua jenis inti besi dapat dilihat seperti pada gambar dibawah ini:

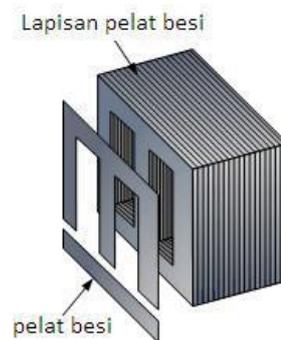
<sup>7</sup> Djukarna.2013.Transformator.

<https://djukarna.wordpress.com/2013/10/21/transformator/>. (Diakses pada tanggal 15 April 2021).



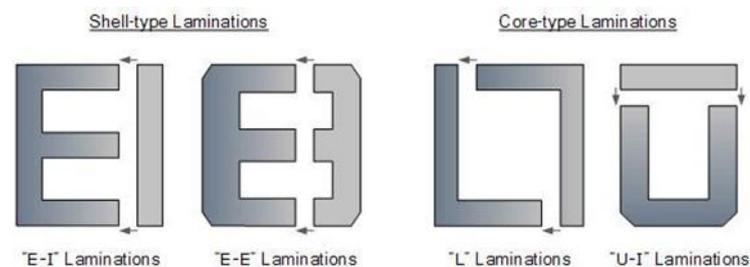
Gambar 2.5 Inti trafo

Pada trafo dengan inti besi berbentuk shell, kumparan dikelilingi oleh inti besi. Fluks magnetik pada inti besi tipe shell akan terbelah dua. Sementara kumparan primer dan kumparan sekunder digulung bersamaan. Untuk trafo yang memiliki inti besi tipe tertutup. Tidak ada pembagian fluks magnetik. Kumparan primer dan kumparan sekunder terpisah dan dihubungkan dengan inti besi. Inti besi trafo tidak dibuat berbentuk besi tunggal, tetapi dibuat dari pelat besi yang berlapis-lapis. Bentuk lapisan pelat besi pada inti trafo dapat dilihat seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2.6 Inti besi berlapis pada trafo

Cara menghubungkan lapisan inti besi juga bermacam-macam. Beberapa cara yang umum digunakan dapat dilihat seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2.7 Cara menghubungkan lapisan inti besi pada trafo



### 2.3.2 Kumparan transformator

Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan atau gulungan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumparan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagai bagian dari bahan isolasi, minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus, sedangkan sebagai pendingin minyak transformator harus mampu meredam panas yang ditimbulkan, sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mampu melindungi transformator dari gangguan.



Gambar 2.8 Kumparan transformator

### 2.3.3 Bushing<sup>1</sup>

Bushing adalah sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator merupakan alat penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan luar. Bushing sekaligus berfungsi sebagai penyekat/isolator antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.



Gambar 2.9 Bushing

<sup>1</sup> Cahyono, Bambang,dkk. 2014. Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga PT. PLN (Persero). Jakarta: PT. PLN (Persero).



Secara garis besar bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu:

1. Isolasi

Berdasarkan media isolasi bushing terbagi menjadi dua (IEC 60137 tahun 2008) yaitu:

- a. Bushing kondenser, bushing kondenser umumnya dipakai pada tegangan rating bushing 72,5 kV keatas.
- b. Bushing non kondenser, bushing non kondenser umumnya digunakan pada tegangan rating 72,5 kV kebawah.

2. Konduktor

Terdapat jenis-jenis konduktor pada bushing yaitu *hollow conductor* dimana terdapat besi pengikat atau penegang di tengah lubang konduktor utama, konduktor pejal dan *flexible lead*.

3. Klem koneksi

Klem koneksi merupakan sarana pengikat antara stud bushing dengan konduktor penghantar di luar bushing.

4. Asesori

Asesoris bushing terdiri dari indikasi minyak, seal atau gasket dan tap pengujian. Seal atau gasket pada bushing terletak dibagian bawah mounting flange.



Gambar 2.10 Indikator level minyak bushing



*Gambar 2.11 Gasket/seal antara flange bushing dengan body trafo*



*Gambar 2.12 Tap pengujian*

#### **2.3.4 Tangki Konservator**

Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan relai bucholz yang akan menyerap gas produksi akibat kerusakan minyak. Untuk menjaga agar minyak tidak terkontaminasi dengan air, ujung masuk saluran udara melalui saluran pelepasan/venting dilengkapi media penyerap uap air pada udara, sering disebut dengan silica gel dan dia tidak keluar mencemari udara disekitarnya.



*Gambar 2.13 Tangki konservator*



### 2.3.5 Peralatan Bantu Pendinginan Transformator

Peralatan bantu pendinginan transformator berfungsi untuk menjaga agar transformator bekerja pada suhu rendah. Pada inti besi dan kumparan – kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Maka panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, ini akan merusak isolasi, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut transformator perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator. Secara alamiah media pendingin (minyak isolasi) mengalir karena perbedaan suhu tangki minyak dan sirip-sirip transformator (Radiator). Untuk mempercepat pendinginan transformator dilengkapi dengan kipas yang dipasang di radiator transformator dan pompa minyak agar sirkulasi minyak lebih cepat dan pendinginan lebih optimal.

Tabel 2 1 Macam-macam pendingin pada trafo<sup>1</sup>

No.	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Trafo		Diluar Trafo	
		Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1.	AN			Udara	
2.	AF				Udara
3.	ONAN	Minyak		Udara	
4.	ONAF	Minyak			Udara
5.	OFAN		Minyak	Udara	
6.	OFAF		Minyak		Udara
7.	OFWF		Minyak		Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

<sup>1</sup> Cahyono, Bambang,dkk. 2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga PT. PLN (Persero)*. Jakarta: PT. PLN (Persero).



Gambar 2.14 Radiator

### 2.3.6 Tap Changer

*Tap Changer* berfungsi untuk menjaga tegangan keluaran yang diinginkan dengan input tegangan yang berubah-ubah. Kualitas operasi tenaga listrik jika tegangan nominalnya sesuai ketentuan, tapi pada saat operasi dapat saja terjadi penurunan tegangan sehingga kualitasnya menurun, untuk itu perlu alat pengatur tegangan agar tegangan selalu pada kondisi terbaik, konstan dan berkelanjutan. Ditinjau dari cara pengoperasiannya, tap changer terdiri dari dua tipe yaitu on-load yang bekerja secara otomatis jika merasakan tegangan kurang/lebih dan off-load yang dapat dipindah tap hanya jika trafo tidak berbeban/bertegangan.

### 2.4 Prinsip Kerja Transformator<sup>9</sup>

Prinsip kerja dari trafo melibatkan bagian-bagian utama pada trafo, yaitu: kumparan primer, kumparan sekunder dan inti trafo. Kumparan tersebut mengelilingi inti besi dalam bentuk lilitan. Apabila kumparan pada sisi primer trafo dihubungkan dengan suatu sumber tegangan bolak-balik sinusoidal ( $V_p$ ), maka akan mengalir arus bolak-balik yang juga sinusoidal ( $I_p$ ) pada kumparan tersebut. Arus bolak-balik ini akan menimbulkan fluks magnetik ( $\Phi$ ) yang sefasa dan juga sinusoidal di sekeliling kumparan. Akibat adanya inti trafo yang menghubungkan kumparan pada sisi primer dan kumparan pada sisi sekunder, maka fluks magnetik

---

<sup>9</sup> Nafiar, Rizky. 2015. Prinsip Kerja Transformator.  
<https://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-transformator/> (Diakses pada tanggal 15 April 2021).



akan mengalir bersama pada inti trafo dari kumparan primer menuju kumparan sekunder sehingga akan membangkitkan tegangan induksi pada sisi sekunder trafo.

$$V_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

$V_s$  = Tegangan induksi pada sisi sekunder

$N_s$  = Jumlah belitan pada sisi sekunder

$\frac{d\phi}{dt}$  = Perubahan fluks terhadap waktu

Dari persamaan tersebut diketahui bahwa tegangan induksi yang terbangkitkan pada kumparan trafo berbanding lurus dengan jumlah lilitan kumparan pada inti trafo. Selain itu, tegangan induksi juga dapat terbangkitkan apabila ada perubahan fluks terhadap waktu, jika fluks yang mengalir adalah konstan maka tegangan induksi tidak dapat terbangkitkan.

Setiap trafo juga memiliki suatu besaran yang dinamakan perbandingan transformasi, untuk menunjukkan perbandingan lilitan atau perubahan level tegangan dan arus pada sisi primer dan sekunder yang ditransformasikan pada trafo tersebut.

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban  $Z_L$ , maka akan mengalir  $I_2$  pada kumparan sekunder trafo, dimana besarnya  $I_2$  dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_L} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

$I_2$  = Arus

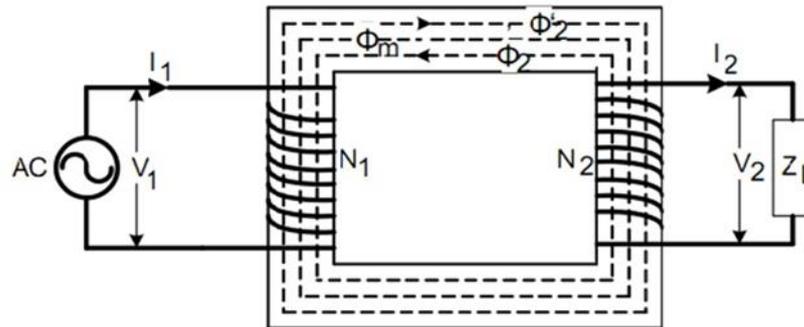
$V_2$  = Tegangan

$Z_L$  = Beban

Arus beban  $I_2$  ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) atau fluks yang cenderung berlawanan dengan fluks bersama ( $\Phi$ ) yang telah ada akibat arus pemagnetan pada sisi primer. Agar fluks bersama tersebut nilainya tidak berubah



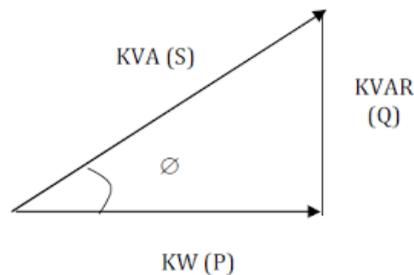
akibat pengaruh ggm yang berlawanan, maka pada kumparan primer harus mengalir arus  $I_2$  dan menimbulkan fluks  $\Phi_2'$  yang menentang fluks akibat arus beban  $I_2$ .



Gambar 2.15 Trafo berbeban

## 2.5 Daya Listrik

Karena beban ( $Z$ ) membentuk pergeseran sudut terhadap tegangan maka arus beban ( $I_b$ ) yang mengalir pun membentuk sudut yang sama searah dengan sudut dari  $Z$  sebesar  $\phi$ . Hal ini berakibat timbulnya tiga macam daya, yaitu daya aktif (watt), daya reaktif (VAR) dan daya semu (VA).



Gambar 2 16 Segitiga Daya

### 2.5.1 Daya Aktif

Daya aktif biasanya disebut juga daya nyata yaitu daya yang secara langsung digunakan oleh beban untuk diubah ke energi lain seperti energi panas, energi cahaya dan sebagainya. Daya ini dapat diserap oleh beban yang berupa tahanan murni atau beban yang mengandung komponen tahanan seperti lampu pijar, elemen pemanas, motor-motor listrik dan lainnya. Daya aktif diukur dalam satuan watt (W). Untuk 1 fasa :

$$P = V \times I \times \cos \phi \dots \dots \dots (2.3)$$



Untuk 3 fasa :

$$P = \sqrt{3} \cdot VI \cos \theta \dots\dots\dots(2.4)$$

$$P_1 = P_2 \rightarrow V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana:

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

### 2.5.2 Daya Reaktif

Daya reaktif disebut juga daya buta dimana daya ini tidak dapat dipakai secara langsung oleh beban untuk diubah menjadi energi lain, tetapi berupa daya magnetisasi yang dapat membangkitkan fluksi magnet pada peralatan listrik induksi seperti transformator, motor-motor listrik dan lainnya yang mengandung reaktansi. Daya ini menurut sifatnya terdiri dari dua bagian yaitu daya reaktif induktif dan daya reaktif kapasitif. Daya reaktif induktif berbentuk energi magnetis sebagai pembangkit fluksi. Tanpa adanya daya reaktif induktif daya tak dapat ditransfer ke sisi sekunder transformator atau melalui celah udara pada motor induksi. Daya reaktif kapasitif adalah daya reaktif yang dibutuhkan oleh kapasitor, saluran transmisi tegangan tinggi, condenser sinkron dan lain-lain. Satuan daya reaktif adalah Volt Ampere reaktif (VAR), kilo Volt Ampere reaktif (kVAR), Mega Volt Ampere reaktif (MVAR) dan seterusnya.

Untuk 1 fasa :

$$Q = V \times I \times \sin \phi \dots\dots\dots(2.6)$$

Untuk 3 fasa :

$$Q = \sqrt{3} \cdot S \sin \theta = \sqrt{3} \cdot VI \sin \theta \dots\dots\dots(2.7)$$

### 2.5.3 Daya Semu

Perkalian tegangan V dengan arus I dalam kedua besaran ini dalam bentuk bilangan kompleks adalah VI yang dinamakan daya semu dengan simbol S dalam



satuan volt ampere (VA), kilo volt ampere (KVA), mega volt ampere (MVA). Arus I adalah arus konjugate dari I. Jadi,

Untuk 1 fasa :

$$S = V \times I \dots\dots\dots(2.8)$$

Untuk 3 fasa :

$$S = \sqrt{3} \cdot VI \dots\dots\dots(2.9)$$

## 2.6 Rugi-Rugi Pada Transformator<sup>7</sup>

### 2.6.1 Hysterisis Losses

Kerugian histerisis disebabkan oleh gesekan molekul yang melawan aliran gaya magnet di dalam inti besi. Gesekan molekul dalam inti besi ini menimbulkan panas. Panas yang timbul ini menunjukkan kerugian energi, karena sebagian kecil energi listrik tidak dipindahkan, tetapi diubah bentuk menjadi energi panas. Panas yang tinggi juga dapat merusak trafo, sehingga pada trafo-trafo transmisi daya listrik ukuran besar harus didinginkan dengan media pendingin. Umumnya digunakan minyak khusus untuk mendinginkan trafo ini.

Sebuah trafo didesain untuk bekerja pada rentang frekuensi tertentu. Menurunnya frekuensi arus listrik dapat menyebabkan meningkatnya rugi-rugi histerisis dan menurunkan kapasitas (VA) trafo.

Rugi Histerisis dapat dinyatakan sebagai :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt} \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan

$K_h$  = konstanta

$B_{maks}$  = fluks maksimum (weber)

### 2.6.2 Eddy Current Losses

Kerugian karena Eddy current disebabkan oleh aliran sirkulasi arus yang menginduksi logam. Ini disebabkan oleh aliran fluk magnetik disekitar inti besi. Karena inti besi trafo terbuat dari konduktor (umumnya besi lunak), maka arus

<sup>7</sup> Djukarna.2013.Transformator.

<https://djukarna.wordpress.com/2013/10/21/transformator/>. (Diakses pada tanggal 15 April 2021).



Eddy yang menginduksi inti besi akan semakin besar. Eddy current dapat menyebabkan kerugian daya pada sebuah trafo karena pada saat terjadi induksi arus listrik pada inti besi, maka sejumlah energi listrik akan diubah menjadi panas. Ini merupakan kerugian.

Rugi Arus Eddy dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$B_M = \frac{\Phi_M}{A}$$

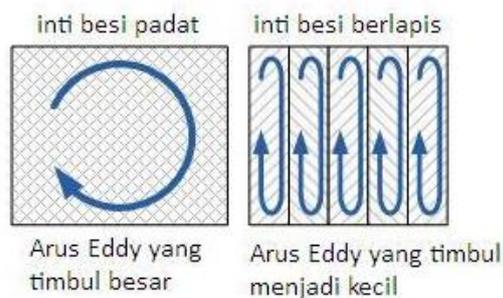
Dimana,

$$\Phi_M = \frac{10^8 \cdot (E_{ff})_2}{4,44 \cdot f \cdot N_2}$$

Dan

$$(E_{ff})_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_M \cdot 10^8 \text{ Volt}$$

Untuk mengurangi arus Eddy, maka inti besi trafo dibuat berlapis-lapis, tujuannya untuk memecah induksi arus Eddy yang terbentuk di dalam inti besi. Perbedaan induksi arus Eddy di dalam inti besi tunggal dengan inti besi berlapis dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.17 Inti besi utuh dan inti besi berlapis

### 2.6.3 Copper Losses

Rugi-rugi tembaga (*copper losses*) terjadi di kedua kumparan. Kumparan primer atau sekunder dibuat dari gulungan kawat tembaga yang dilapisi oleh isolator tipis yang disebut enamel. Umumnya kumparan dibuat dari gulungan kawat yang cukup panjang. Gulungan kawat yang panjang ini akan meningkatkan hambatan dalam kumparan. Pada saat trafo dialiri arus listrik maka hambatan



kumparan ini akan mengubah sejumlah kecil arus listrik menjadi panas yaitu sebesar ( $I^2R$ ). Semakin besar harga R maka semakin besar pula energi panas yang timbul di dalam kumparan. Mutu kawat yang bagus dengan nilai hambatan jenis yang kecil dapat mengurangi rugi-rugi tembaga.

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots(2.12)$$

Besarnya rugi-rugi tembaga pada setiap perubahan beban dapat ditentukan dengan persamaan:

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

$P_{t2}$  = Rugi-rugi tembaga pada saat pembebanan tertentu

$P_{t1}$  = Rugi-rugi tembaga beban penuh

$S_2$  = Beban yang Dioperasikan

$S_1$  = Nilai Pengenal

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah:

$$P_{rugitotal} = \text{Rugi-rugi Cu} + \text{Rugi inti} \dots\dots\dots(2.14)$$

Sebuah trafo yang ideal diasumsikan:

- a. Tidak terjadi rugi-rugi hysteresis
- b. Tidak terjadi induksi arus Eddy
- c. Hambatan dalam kumparan = 0, akibatnya tidak ada rugi-rugi tembaga.

## 2.7 Efisiensi Transformator

Sebuah trafo tidak membutuhkan bagian yang bergerak untuk memindahkan energi dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Ini berarti tidak ada kerugian karena gesekan atau hambatan udara seperti yang terdapat pada mesin – mesin listrik (contoh motor listrik dan generator). Namun di dalam trafo juga terdapat kerugian yang disebut rugi-rugi tembaga (*copper losses*) dan rugi-rugi besi (*iron losses*). Rugi-rugi tembaga terdapat pada kumparan primer dan kumparan sekunder, sedangkan rugi-rugi besi terdapat dalam inti besi. Rugi-rugi ini berupa panas yang dilepaskan akibat terjadinya Eddy current. Tetapi rugi-rugi ini sangat kecil.



Efisiensi sebuah trafo dapat dihitung dengan membandingkan daya yang dikeluarkan di kumparan sekunder dengan daya yang diberikan pada kumparan primer. Efisiensi trafo dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.15)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + R_{ugi\ Total}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana:

$\eta$  = Efisiensi Transformator

$P_{out}$  = Daya keluaran (kumparan sekunder)

$P_{in}$  = Daya masukan (kumparan primer)

Dari persamaan tersebut, efisiensi transformator dapat ditentukan untuk setiap beban dengan pengukuran langsung daya masukannya dan daya keluarannya.

Untuk menentukan besarnya beban yang dioperasikan pada saat efisiensi maksimum, berlaku:

$$W_{ef\ maks} = \sqrt{\frac{R_{ugi-rugi\ besi}}{R_{ugi-rugi\ tembaga\ beban\ penuh}}} \times \text{Beban penuh} \dots \dots \dots (2.17)$$

## 2.8 Penyulang (*Feeder*)

Merupakan konduktor untuk menghubungkan gardu Induk dengan pelanggan. Pada feeder juga dimungkinkan untuk dipasang transformator, pengatur tegangan atau kapasitor. Jenis bahan kawat penghantar yang dipergunakan dalam jaringan distribusi tenaga listrik, antara lain:

### 1. Kawat Penghantar berbahan Logam Murni

Kawat penghantar yang terbuat hanya 1 (satu) jenis bahan saja, yaitu : tembaga atau aluminium. Contoh kawat penghantar berbahan logam murni adalah:

- a. AAC (All Aluminium Conductor), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium
- b. BCC (Bare Copper Conductor), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium



## 2. Kawat Penghantar Berbahan Logam Campuran Kawat

Penghantar yang terbuat lebih dari 1 (satu) jenis bahan saja, yaitu : tembaga dengan alumunium, tembaga dengan baja, alumunium dengan baja. Contoh kawat penghantar berbahan logam campuran adalah:

- a. AAAC (*All Alumunium Alloy Conductor*), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium
- b. ACSR (*Alumunium Conductor Steel Reinforced*), yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja
- c. ACAR (*Alumunium Conductor Alloy Reinforced*). yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

## 2.9 Klasifikasi Jaringan Distribusi

Sistem jaringan distribusi tenaga listrik dapat diklasifikasikan dari berbagai segi, antara lain adalah :

1. Berdasarkan ukuran tegangan
2. Berdasarkan ukuran arus
3. Berdasarkan sistem penyaluran
4. Berdasarkan bentuk jaringan

### 2.9.1. Berdasarkan Ukuran Tegangan<sup>5</sup>

Berdasarkan ukuran tegangan, jaringan distribusi tenaga listrik dapat dibedakan pada dua sistem, yaitu :

#### 1. Sistem jaringan distribusi primer

Sistem jaringan distribusi primer atau sering disebut saluran udara tegangan menengah ini terletak antara gardu induk dengan gardu pembagi, yang memiliki tegangan sistem lebih tinggi dari tegangan terpakai untuk konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah 20 kV.

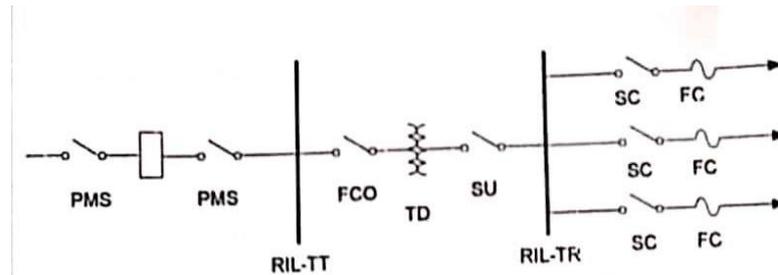
#### 2. Sistem jaringan distribusi sekunder

---

<sup>5</sup> Darman Surwanto. Sistem Distribusi Tenaga Listrik. Edisi Pertama. 2009. UNP



Sistem jaringan distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah, merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik dari gardu-gardu peibagi (gardu distribusi) ke pusat-pusat beban (konsumen tenaga listrik). Besarnya standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini adalah 220/380 V.



Gambar 2.18 Komponen Sistem Distribusi

Keterangan :

- PMS : Pemisah
- PMT : Pemutus
- FCO : Fuse Cut Out
- SC : Saklar Cabang
- FC : Fuse Cabang
- TD : Trafo Distribusi
- SU : Saklar Utama

### 2.9.2 Berdasarkan Ukuran Arus Listrik

Berdasarkan ukuran arus listrik maka sistem jaringan distribusi dapat dibedakan dalam dua macam, yaitu :

#### 1. Jaringan Distribusi AC

Pada jaringan distribusi AC digunakan arus bolak balik ( Alternating Current).

#### 2. Jaringan Distribusi DC

Penggunaan jaringan DC ini dilakukan dengan jalan menyearahkan terlebih dahulu arus bolak-balik ke arus searah dengan alat penyearah



Converter, sedangkan untuk mengubah kembali dari arus bolak-balik ke arus searah digunakan alat Inverter.

### 2.9.3. Berdasarkan Sistem Penyaluran

Berdasarkan sistem penyalurannya, jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu dengan :

- a. saluran udara (*overhead line*)
- b. saluran bawah tanah (*underground cable*)

Saluran udara merupakan sistem penyaluran tenaga listrik melalui kawat penghantar yang ditopang pada tiang listrik. Sedangkan saluran bawah tanah merupakan sistem penyaluran tenaga listrik melalui kabel-kabel yang ditanamkan di dalam tanah.

#### 1. Saluran Udara (*Overhead Lines*)

Saluran udara merupakan jaringan distribusi tenaga listrik yang berisolasi maupun tidak berisolasi yang di pasang, direntangkan diatas tiang penyangga dengan isolator penunjang.

#### 2. Saluran Bawah Tanah (*Underground Lines*)

Saluran bawah tanah merupakan jaringan distribusi tenaga listrik yang ditanam di dalam tanah.

### 2.9.4 Berdasarkan Bentuk Jaringan

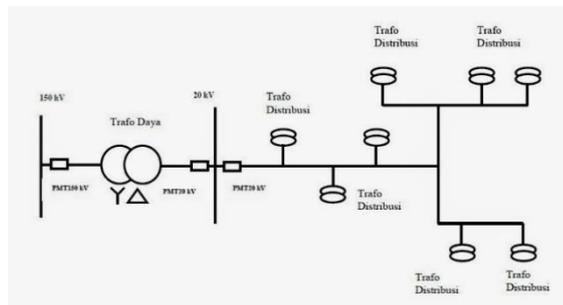
Struktur konfigurasi jaringan distribusi primer, secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai 2 konsep konfigurasi :

#### 1. Sistem Jaringan Radial <sup>2</sup>

Sistem jaringan radial adalah yang paling sederhana dan paling banyak dipakai, terdiri atas fider (feeders) atau rangkaian tersendiri, yang seolah-olah keluar dari suatu sumber atau wilayah tertentu secara radial. Fider itu dapat juga dianggap sebagai terdiri atas suatu bagian utama dari mana saluran samping atau lateral lain bersumber dan dihubungkan dengan transformator distribusi.

---

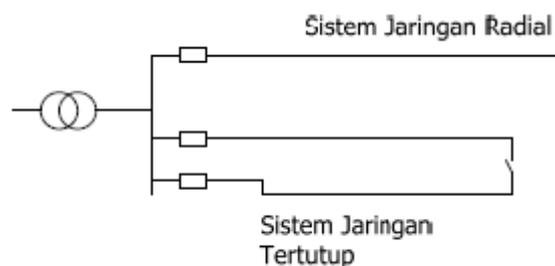
<sup>2</sup> Abdul Kadir. Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik. Jakarta: UI Press 2000. Hal. 5



Gambar 2.19 Skema Saluran Radial

## 2. Sistem Jaringan Tertutup<sup>4</sup>

Jaringan bentuk tertutup yaitu jaringan yang mempunyai alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan. Sehingga bagian yang mengalami pemadaman (*black-out*) dapat dikurangi atau bahkan dihindari.



Gambar 2.20 Pola Jaringan Distribusi Dasar

Berdasarkan kedua pola dasar tersebut, dibuat konfigurasi-konfigurasi jaringan sesuai dengan maksud perencanaannya sebagai berikut :

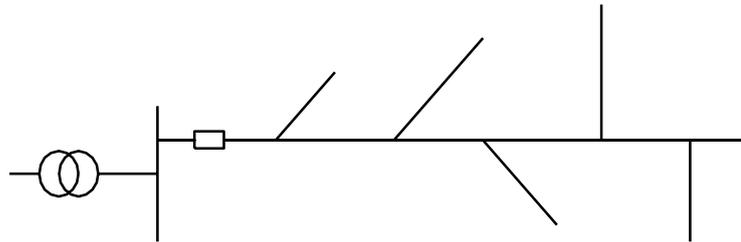
### a. Konfigurasi Tulang Ikan (*Fish-Bone*)

Konfigurasi fishbone ini adalah tipikal konfigurasi dari saluran udara Tegangan Menengah beroperasi radial. Pengurangan luas pemadaman dilakukan dengan mengisolasi bagian yang terkena gangguan dengan memakai pemisah [*Pole Top Switch (PTS)*, *Air Break Switch (ABSW)*] dengan koordinasi relai atau dengan system SCADA. Pemutus balik otomatis PBO (*Automatic Recloser*) dipasang pada saluran utama dan saklar seksi otomatis SSO (*Automatic*

<sup>4</sup> PT PLN (Persero). Kriteria Desain Engineering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. Edisi 1. Jakarta : PT PLN (Persero). 2010. Bab 4 Hal. 3



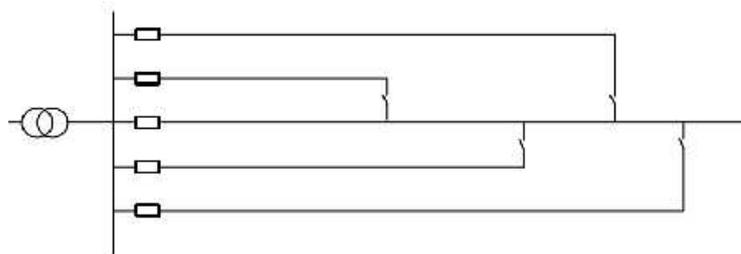
*Sectionalizer*) pada pencabangan.



Gambar 2.21 Konfigurasi Tulang Ikan (*Fishbone*).

b. Konfigurasi Kluster (*Cluster / Leap Frog*)

Konfigurasi saluran udara Tegangan Menengah yang sudah bertipikal sistem tertutup, namun beroperasi radial (*Radial Open Loop*). Saluran bagian tengah merupakan penyulang cadangan dengan luas penampang penghantar besar.



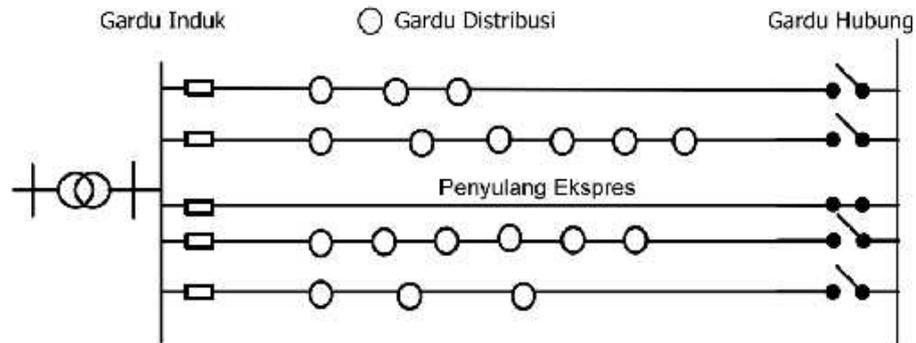
Gambar 2.22 Konfigurasi Kluster (*Leap Frog*)

c. Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*)

Konfigurasi spindel umumnya dipakai pada saluran kabel bawah tanah. Pada konfigurasi ini dikenal 2 jenis penyulang yaitu pengulang cadangan (*standby* atau *express feeder*) dan penyulang operasi (*working feeder*). Penyulang cadangan tidak dibebani dan berfungsi sebagai back-up supply jika terjadi gangguan pada penyulang operasi. Untuk konfigurasi 2 penyulang, maka faktor pembebanan hanya 50%. Berdasarkan konsep *Spindel* jumlah penyulang pada 1 spindel adalah 6 penyulang operasi dan 1 penyulang cadangan sehingga faktor pembebanan konfigurasi spindel penuh adalah 85 %. Ujung-ujung penyulang berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung dengan kondisi penyulang operasi “NO” (*Normally Open*), kecuali penyulang



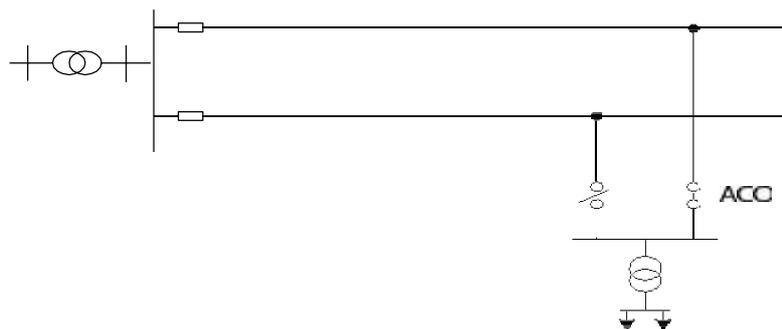
cadangan dengan kondisi “NC” (*Normally Close*).



Gambar 2.23 Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*).

#### d. Konfigurasi Fork

Konfigurasi ini memungkinkan 1(satu) Gardu Distribusi dipasok dari 2 penyulang berbeda dengan selang waktu pemadaman sangat singkat (*Short Break Time*). Jika penyulang operasi mengalami gangguan, dapat dipasok dari penyulang cadangan secara efektif dalam waktu sangat singkat dengan menggunakan fasilitas *Automatic Change Over Switch* (ACOS). Pencabangan dapat dilakukan dengan sadapan *Tee-Off* (TO) dari Saluran Udara atau dari Saluran Kabel tanah melalui Gardu Distribusi



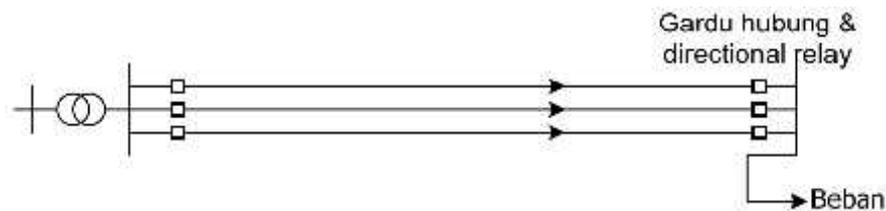
Gambar 2.24 Konfigurasi Fork

#### e. Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*)

Konfigurasi yang terdiri sejumlah penyulang beroperasi paralel dari sumber atau Gardu Induk yang berakhir pada Gardu Distribusi. Konfigurasi ini dipakai jika beban pelanggan melebihi kemampuan



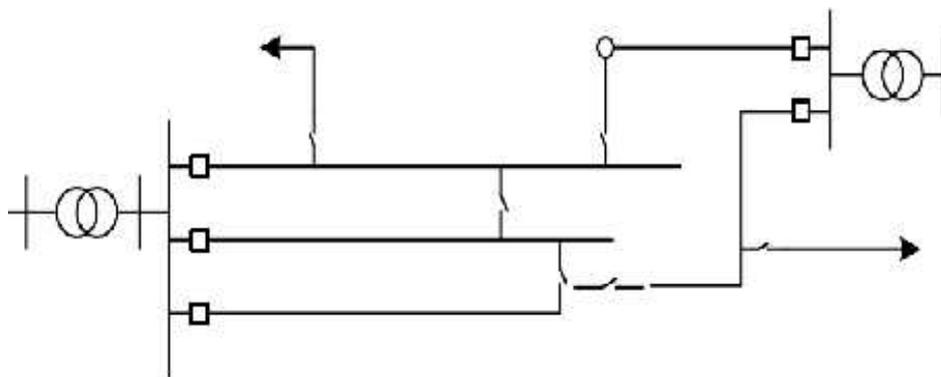
hantar arus penghantar. Salah satu penyulang berfungsi sebagai penyulang cadangan, guna mempertahankan kontinuitas penyaluran. Sistem harus dilengkapi dengan rele arah (*Directional Relay*) pada Gardu Hilir (Gardu Hubung).



Gambar 2.25 Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*)

f. Konfigurasi Jala-Jala (*Grid, Mesh*)

Konfigurasi jala-jala, memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke titik beban. Rumit dalam proses pengoperasian, umumnya dipakai pada daerah padat beban tinggi dan pelanggan-pelanggan pemakaian khusus



Gambar 2.26 Konfigurasi Jala Jala

g. Konfigurasi lain-lain

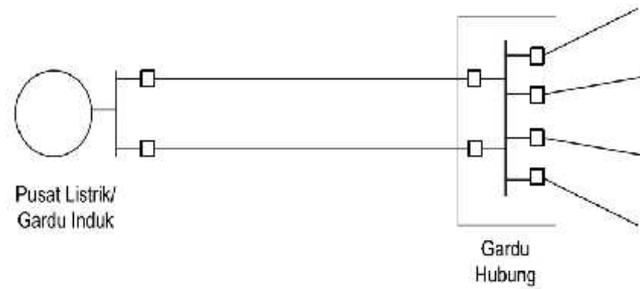
Selain dari model konfigurasi jaringan yang umum dikenal sebagaimana diatas, terdapat beberapa model struktur jaringan yang dapat dipergunakan sebagai alternatif model model struktur jaringan.

1. Struktur Garpu dan Bunga

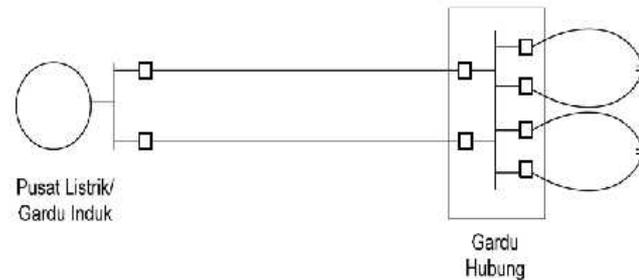
Struktur ini dipakai jika pusat beban berada jauh dari pusat listrik/Gardu Induk. Jaringan Tegangan Menengah (JTM) berfungsi sebagai pemasok, Gardu Hubung sebagai Gardu



Pembagi, sebagai pemutus tenaga, sebagai pengamanan dengan rele proteksi gangguan fasa-fasa dan fasa-tanah pada JTM yang berawal dari Gardu Hubung.



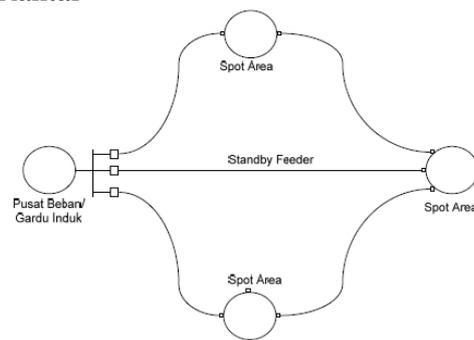
(a) Konfigurasi Struktur Garpu



(b) Konfigurasi Struktur Bunga

Gambar 2.27 Konfigurasi Struktur Garpu dan Bunga

## 2. Struktur Rantai



Gambar 2.28 Konfigurasi Struktur Rantai

Struktur ini dipakai pada suatu kawasan yang luas dengan pusat – pusat beban yang berjauhan satu sama lain.