

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Berdasarkan latar belakang masalah yang dibahas, peneliti melakukan studi pustaka terlebih dahulu pada penelitian – penelitian yang telah dilakukan sebelumnya untuk membantu peneliti dalam menganalisis dan membahas masalah yang diteliti. Adapun referensi yang digunakan sebagai acuan adalah sebagai berikut

Tammamul Abrar (2017) telah melakukan penelitian tentang Analisis Ketidakseimbangan Beban Dan Rencana Penyeimbangan Beban Dengan Metode “*All Reconnecting*” Di Gardu Distribusi PT. PLN (Persero) Cabang Flores Bagian Barat, berdasarkan penelitian tersebut dapat disimpulkan nilai arus netral pada transformator MR 001 sebelum dilakukan penyeimbangan, pada waktu siang hari (WLBP) adalah sebesar 22 A dengan kerugian finansial sebesar Rp.884.700.00 sedangkan untuk waktu malam hari (WBP) adalah 28A dengan kerugian finansial sebesar Rp.147.450.00. Setelah dilakukan penyeimbangan dengan metode *all reconnecting*, pada waktu siang hari (WLBP) adalah sebesar 1,53A dengan kerugian finansial sebesar Rp.7288.00 sedangkan untuk waktu malam hari (WBP) adalah 0,86A dengan kerugian finansial sebesar Rp.128.00. Total kerugian finansial PT.PLN Persero tiap bulan sebelum dilakukan rencana penyeimbangan adalah Rp.1.294.492.00 dan setelah dilakukan rencana penyeimbangan beban kerugian finansial PT.PLN Persero tiap bulan adalah Rp.269.758.00. Jadi PT. PLN Persero dapat menghemat Rp. 1.024.734.00 tiap bulannya.

Yoakim Simamora Panusur S.M.L. Tobing (2014) telah melakukan penelitian tentang Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Untuk Identifikasi Beban Lebih Dan Estimasi Rugi-Rugi Pada Jaringan Tegangan Rendah, dari penelitian tersebut diperoleh kesimpulan persentase pembebanan tertinggi sebesar 127,02% pada transformator ML 227 dan rugi-rugi jaringan

tegangan rendah pada penyulang yang paling besar yaitu 1,0 kW dan 13,0 kVAR pada transformator ML059.

Rendy F Sibarani, Ir. Syamsul Amien, MS dalam penelitiannya tentang Pengaruh Arus Netral Terhadap Rugi-Rugi Beban Pada Transformator Distribusi PLN Rayon Johor Medan, disimpulkan bahwa ketidakseimbangan beban pada trafo JH128-2 dan trafo JHI129-2 yaitu sebesar 12,66% dan 21,9% pada siang hari dan 18,89% dan 27,90% pada malam hari. Selain itu juga menjelaskan bahwa semakin besar ketidakseimbangan beban maka semakin besar juga rugi-ruginya, ini dilihat dari hasil pengukuran pada siang hari yaitu 0,63% dan 0,98%, pada malam hari yaitu 2,53% dan 2,47%.

Rizky Syahputra Siregar, Raja Harahap (2017), melakukan penelitian tentang Perhitungan Arus Netral, Rugi-Rugi, Dan Efisiensi Transformator Distribusi 3 Fasa 20KV/400V Di PT. PLN (Persero) Rayon Medan Timur Akibat Ketidakseimbangan Beban, disimpulkan bahwa adanya ketidakseimbangan beban pada trafo pertama, kedua, dan ketiga di rayon medan timur menyebabkan timbulnya rugi-rugi transformator semakin besar, dimana PCu dan PN tertinggi sebesar 7,67 kW dan 1,157 kW pada transformator kedua di malam hari, sedangkan PCu dan PN terendah sebesar 0,034 kW dan 0,004 kW pada transformator pertama di pagi hari.

Hamles Leonardo Latupeirissa (2017), dalam penelitiannya tentang Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Daya Pada Trafo Distribusi Gardu KP-01 Desa Hative Kecil, disimpulkan bahwa pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan *losses* daya pada trafo distribusi gardu kp-01 desa hative kecil diperoleh *losses* (rugi) daya akibat adanya arus pada penghantar netral (PN) pada siang hari sebesar 5,52 % dan pada malam hari sebesar 7,12 %. Sedangkan *losses* (rugi) daya akibat arus netral yang mengalir ke tanah (PG) pada siang hari sebesar 9,36 % dan pada malam hari sebesar 12,71 %.

Togar Timoteus Gultom, S.T, M.T. (2017), telah melakukan penelitian tentang Usaha Mengatasi Rugi-Rugi Daya Pada Sistem Distribusi 20 Kv, dari penelitiannya tersebut disimpulkan bahwa gardu distribusi MK 494 diperoleh

ketidakseimbangan beban terbesar 38,633% pada waktu beban puncak dan 34,533% di luar waktu beban puncak dan arus netral terbesar 47,5A pada WBP dan 47A pada LWBP.

## **2.2 Landasan Teori**

### **2.2.1 Sistem Tenaga Listrik**

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan dan bekerja sama untuk melayani kebutuhan energi listrik bagi pelanggan (Slamet Suropto).

### **2.2.2 Pembangkit Tenaga Listrik**

Pembangkit tenaga listrik merupakan salah satu bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mengubah sumber energi lain menjadi sumber energi listrik. Setiap jenis pembangkit memiliki karakteristik dan sifat yang berbeda – berbeda sehingga digunakan sesuai dengan kepentingannya. Pembangkit listrik dapat digolongkan berdasarkan prinsip kerja dan sumber energi yang digunakan yaitu

#### **a. Pembangkit Non Termis**

- Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)
- Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB)
- Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

#### **b. Pembangkit Termis**

- Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)
- Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)
- Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)
- Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)
- Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

### **2.2.3 Saluran Transmisi**

Saluran transmisi merupakan komponen sistem tenaga listrik berupa konduktor yang dipasang antara pusat pembangkit sampai pusat beban untuk mengirimkan energi listrik.

Berdasarkan letaknya, saluran transmisi ada 3 macam yaitu:

- Saluran Udara : saluran transmisi yang berupa kawat atau konduktor tanpa isolasi yang digantung menggunakan isolator pada tower dengan ketinggian tertentu.
- Saluran Bawah Tanah : saluran transmisi yang menggunakan kabel atau konduktor berisolasi yang terpasang di dalam tanah dengan kedalaman tertentu
- Saluran Bawah Laut : saluran transmisi dengan kabel atau konduktor berisolasi yang dipasang di dasar laut

Jika digolongkan berdasarkan level tegangannya, saluran transmisi dibagi menjadi 3 juga yaitu:

- Saluran udara Tegangan Tinggi (SUTT) yang memiliki level tegangan antara 70 kV sampai 150 kV
- Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) memiliki tegangan diatas 150 kV sampai 750 kV
- Saluran Udara Tegangan Ultra Tinggi (SUTUT) memiliki tegangan diatas 750 kV

#### **2.2.4 Gardu Induk**

Gardu induk merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berupa sejumlah peralatan pemutus atau penghubung aliran arus dan trafo penaik/penurun tegangan yang dipasang di antara dua komponen sistem tenaga listrik lainnya. Gardu induk berfungsi untuk memutus dan menghubungkan aliran arus listrik dan menyesuaikan level tegangan sistem-sistem yang dihubungkan.

Berdasarkan penggunaannya, gardu induk pada sistem tenaga listrik dapat dibedakan menjadi 2 yaitu:

- a. Gardu induk pembangkit yaitu gardu induk yang digunakan pada unit pembangkit listrik yang berfungsi untuk menaikkan tegangan dari level tegangan pembangkit ke level tegangan transmisi.
- b. Gardu induk distribusi yaitu gardu induk yang dipasang pada pusat beban untuk menurunkan tegangan dari level tegangan jaringan transmisi ke level tegangan jaringan distribusi

Peralatan – peralatan pada gardu induk yaitu :

- a. Transformator utama  
Transformator ini berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan.
- b. Peralatan penghubung  
Peralatan ini berfungsi untuk memutus arus dan pemisah bagian yang terdapat arus lebih atau gangguan dengan bagian yang masih aman.
- c. Panel hubung dan trafo pengukuran  
Trafo pengukuran disini adalah trafo arus dan trafo tegangan untuk mengukur arus dan tegangan
- d. Peralatan perlindungan  
Arester dan pentanahan untuk menyalurkan arus lebih yang biasanya terjadi karena sambaran petir.
- e. Bangunan sipil  
Bangunan seperti tower, ruang kontrol, dan ruang staf

### **2.2.5 Transformator**

Transformator merupakan komponen sistem tenaga listrik yang digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan. Transformator atau trafo tersusun dari dua lilitan atau kumparan kawat yang dipasang pada sebuah inti besi. Salah satu lilitan yang dihubungkan dengan sumber tegangan masukan disebut dengan kumparan primer. Sedangkan lilitan pada sisi lainnya dihubungkan dengan beban disebut kumparan sekunder.

Prinsip kerja trafo ialah memanfaatkan sifat induksi elektromagnetik yaitu sebagai berikut

- 1) Apabila pada sisi kumparan primer diberi tegangan bolak – balik (AC), maka akan timbul garis gaya magnet (flux) pada inti besi. Karena arusnya bolak balik maka flux yang terbentuk pada inti besi akan mempunyai arah dan jumlah yang berubah – ubah. Jika arus yang mengalir berbentuk sinus maka flux yang terjadi juga akan membentuk sinus.
- 2) Flux magnet yang terjadi akan mengalir melalui inti besi sampai kumparan sekunder.

- 3) Pada kumparan sekunder trafo akan terkena flux magnet yang arahnya berubah – ubah yang menyebabkan timbulnya tegangan induksi pada kumparan sekunder.
- 4) Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban maka pada rangkaian sekunder akan mengalir arus dan juga terdapat tegangan sekunder.
- 5) Perbandingan tegangan pada sisi primer dengan tegangan sisi sekunder tergantung dengan perbandingan jumlah lilitan masing – masing.

### **2.2.6 Jaringan Distribusi**

Jaringan distribusi merupakan salah satu komponen sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menghubungkan antara pusat beban dengan beban atau pelanggan yang dimulai dari gardu induk menuju gardu distribusi melalui kabel penghantar yang biasa terlihat di pinggir jalan yang kemudian di distribusikan ke rumah – rumah melalui jaringan distribusi yang tegangannya lebih rendah.

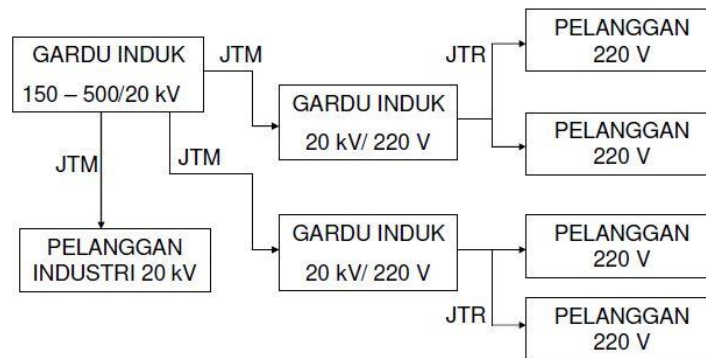
Berdasarkan level tegangannya, jaringan distribusi terbagi 2 golongan yaitu

#### **a. Saluran Tegangan Menengah (TM)**

Jaringan distribusi tegangan menengah biasanya menggunakan sistem 3 fasa 4 kawat dengan tegangan antara fase dengan tanag (netral) 20 kV. Jaringan ini menghubungkan antar gardu induk satu dengan gardu induk lain, gardu induk dengan pelanggan jaringan tegangan menengah, dan gardu induk dengan trafo jaringan tegangan rendah.

#### **b. Saluran Tegangan Rendah (TR)**

Jaringan distribusi tegangan rendah ada yang memakai sistem 3 fasa 4 kawat untuk pelanggan atau beban yang besar. Sedangkan untuk pelanggan atau beban yang kecil digunakan sistem 1 fasa 2 kawat dengan tegangan 220 V dari fasa ke netral. Jaringan ini digunakan untuk menghubungkan antara trafo tegangan menengah ke pelanggan.



Gambar 2.1 Skema jaringan distribusi

Sumber : buku ajar sistem tenaga listrik, slamet suripto

Macam – macam jaringan distribusi bila dibedakan berdasarkan letak salurannya ada 2 yaitu

- Saluran udara (kawat telanjang)

Saluran ini biasanya menggunakan kawat tanpa isolasi yang dipasang pada tiang dengan isolator. Kelebihan jenis ini ialah biaya pembangunannya yang lebih murah dan perawatan yang sederhana. Sedangkan kekurangannya yaitu mengganggu pemandangan dan kurang aman dari gangguan cuaca dan terganggu pepohonan yang tumbuh di sekitar jaringan.

- Saluran bawah tanah (kabel berisolasi)

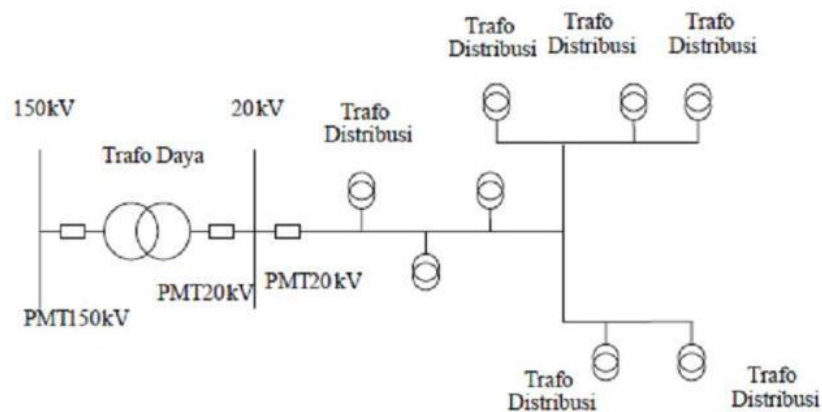
Jenis saluran ini menggunakan kawat yang berisolasi sehingga dari segi biaya lebih mahal dan bila terjadi gangguan akan sulit untuk penanganannya. Akan tetapi dari segi estetika lebih baik karena tidak mengganggu pemandangan dan aman dari gangguan cuaca.

Berdasarkan konfigurasi sistem jaringan distribusi dapat digolongkan menjadi 2 yaitu:

- a. Sistem Radial

Jaringan radial merupakan konfigurasi jaringan yang paling sederhana dan umumnya digunakan di daerah yang tingkat kepadatan penduduknya rendah. Pada sistem ini satu gardu induk digunakan untuk melayani beberapa beban gardu induk lain dimana masing – masing gardu induk tersebut tidak saling

berhubungan, kemudian masing – masing gardu distribusi akan melayani beberapa beban. Sistem radial ini memiliki kelebihan pembangunannya yang relatif lebih murah dan pengelolaannya yang tidak rumit, karena hanya melayani beban satu arah saja. Akan tetapi memiliki kelemahan apabila terjadi gangguan pada suatu titik baik di gardu induk atau pada jaringan, akan mengakibatkan semua beban yang dilalui jaringan tersebut akan terputus.



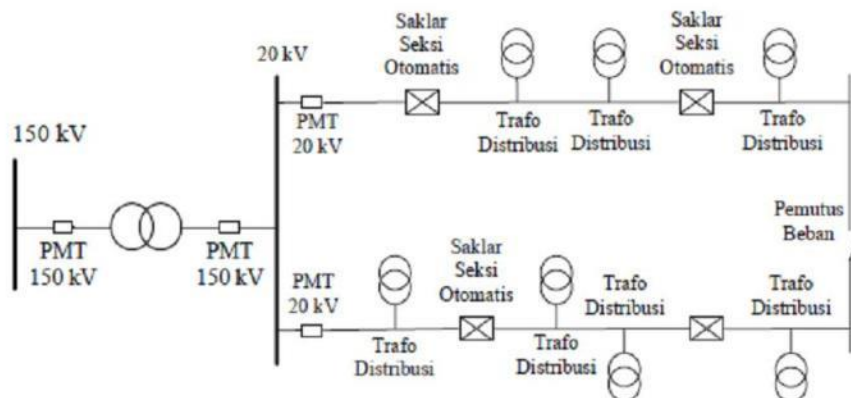
Gambar 2.2 Konfigurasi jaringan radial

Sumber : Buku ajar sistem tenaga listrik, Ir. Slamet suripto

#### b. Sistem ring

Sistem ring atau loop merupakan konfigurasi jaringan yang dapat menggunakan sumber listrik dari beberapa gardu induk karena adanya interkoneksi. Sehingga dengan sistem ini bila terjadi gangguan di suatu titik baik pada gardu induk atau jaringan, beban akan tetap dapat menerima pasokan listrik karena dapat dilayani dari gardu induk lain dengan jaringan yang berbeda. Akan tetapi pembangunan sistem ini relatif lebih mahal karena banyaknya jaringan yang harus dibangun. Selain itu pengelolaannya yang relatif lebih rumit tetapi lebih handal karena tingkat pelayanan tenaga listrik ke pelanggan menjadi lebih baik.





Gambar 2.3 Konfigurasi jaringan Loop

Sumber : Buku ajar sistem tenaga listrik, Ir. Slamet suripto

### 2.2.7 Trafo Distribusi

Trafo distribusi adalah salah satu komponen penting dari jaringan distribusi yang berfungsi untuk menurunkan atau menyesuaikan level tegangan agar sesuai dengan kebutuhan beban atau pelanggan. Pada kumparan trafo distribusi umumnya diletakkan dalam tabung yang berisi minyak yang berguna sebagai pendingin. Trafo distribusi juga memerlukan peralatan pengaman dari gangguan pada jaringan seperti hubung singkat, arus beban lebih dan petir agar trafo tidak rusak. Untuk melindungi trafo dari sambaran petir menggunakan arester dimana salah satu ujungnya dihubungkan ke kawat tegangan menengah dan ujung lainnya dihubungkan ke tanah untuk, sehingga ketika terjadi tegangan lebih karena terkena sambaran petir maka akan di netralkan ke tanah.

Untuk melindungi dari arus lebih menggunakan sekring lebur yang dapat memutus rangkaian bila terjadi gangguan arus lebih atau hubung singkat pada jaringan tegangan rendah.

Trafo distribusi dapat digolongkan berdasarkan kapasitasnya menjadi 3 yaitu

- Tipe tembok

Tipe tembok adalah trafo distribusi yang memiliki bangunan permanen yang terbuat dari beton atau konstruksi lainnya sebagai tempat dipasangnya trafo distribusi. Trafo ini termasuk jenis pasangan dalam karena biasanya semua peralatan switching/proteksi dan transformator distribusi terangkai di dalam bangunan. Untuk kapasitas trafo umumnya diatas 555 KVA sampai 1 MVA

- Tipe dua tiang

Tipe dua tiang adalah trafo distribusi yang seluruh instalasi peralatannya terpasang diantara dua buah tiang beton atau besi. Kapasitasnya di atas 200 KVA sampai 555 KVA

- Tipe satu tiang

Tipe ini biasa disebut trafo cantol dimana trafo terpasang pada satu tiang pada ketinggian tertentu. Untuk kapasitas trafonya yaitu 200 KVA atau lebih kecil.

### 2.2.8 Arus Beban Penuh Transformator

Arus beban penuh transformator adalah kemampuan transformator untuk menghantarkan arus baik pada sisi primer dan sekundernya, besarnya arus beban penuh transformator tergantung dari kapasitas transformator tersebut.

Daya transformator jika dilihat dari sisi tegangan primer nya dapat dihitung dengan rumus :

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

S = Daya transformator (kVA)

V = Tegangan sisi primer transformator (kV)

I = Arus jala – jala (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan persamaan :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

$I_{FL}$  = arus beban penuh transformator (A)

$S$  = daya transformator (kVA)

$V$  = tegangan sisi sekunder (V)

### 2.2.9 Persentase Pembebanan Transformator

Persentase pembebanan transformator sangat erat kaitannya dengan besar kecilnya nilai pembebanan transformator, beban transformator di daerah perkotaan akan berbeda dengan di daerah pedesaan, di pedesaan pembebanan transformator relatif kecil karena tingkat kepadatan penduduk yang sedikit. Persentase pembebanan transformator dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\% \text{Pembebanan Trafo} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{FL}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.3)$$

### 2.2.10 Listrik AC

Listrik AC (*Alternating Current*) adalah listrik yang memiliki besar yang berubah-ubah dan arah arusnya bolak-balik. Berbeda dengan listrik DC (*Direct current*) yang memiliki arah arus hanya searah. Listrik AC umumnya digunakan untuk mengirimkan energi listrik dari pembangkit tenaga listrik hingga beban – beban listrik sedangkan listrik DC biasanya digunakan pada rangkaian elektronika. Penggunaan listrik AC dalam proses pendistribusikan energi listrik dikarenakan jarak dari pembangkit ke beban umumnya sangat jauh sehingga membutuhkan nilai tegangan listrik yang tinggi untuk mengurangi kerugian energi, selain itu untuk membangkitkan listrik tegangan tinggi lebih mudah dilakukan pada listrik bolak-balik (AC). Sedangkan untuk membangkitkan tegangan tinggi pada listrik DC membutuhkan biaya yang relatif lebih mahal daripada listrik AC.

Sistem tenaga listrik AC memiliki tiga jenis beban listrik yang harus ditopang oleh pembangkit listrik yaitu beban resistif, induktif, dan kapasitif. Ketiga jenis beban tersebut memiliki karakteristik yang berbeda – beda.

## 1. Beban Resistif

Beban resistif dihasilkan oleh alat – alat listrik yang memiliki komponen tahanan (resistor) dimana komponen tersebut akan menahan aliran elektron (menghambat arus listrik) yang melewatinya sehingga alat listrik tersebut akan menghasilkan panas. Contoh alat listrik yang bersifat resistif adalah yang memiliki elemen pemanas seperti setrika, *rice cooker*, solder dan lain – lain.

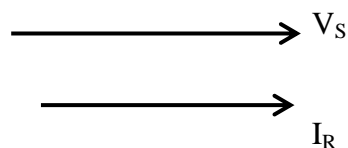
Beban Resistif tidak mempengaruhi gelombang Tegangan dan Arus, sehingga posisi Gelombang Tegangan dan Arus tetap bersamaan.



Gambar 2.4 Rangkaian dan gelombang beban resistif

Sumber : [duniaberbagiilmuuntuksemua.blogspot.co.id](http://duniaberbagiilmuuntuksemua.blogspot.co.id)

Bila dilihat dari sudutnya, hubungan antara tegangan dan arus pada beban resistif adalah searah.



Gambar 2.5 Arah vektor tegangan dan arus beban resistif

## 2. Beban induktif

Beban induktif adalah alat – alat listrik yang memiliki komponen berupa kumparan/lilitan kawat yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet yang dibutuhkan untuk mengoperasikan alat tersebut. Contoh alat beban induktif adalah motor listrik, trafo, dan relay. Beban reaktif tersebut mengakibatkan terhambatnya laju arus sehingga gelombang arus menjadi tertinggal dari gelombang tegangan atau disebut *lagging*.



Gambar 2.6 Rangkaian dan gelombang beban induktif  
 Sumber : duniaberbagiilmuuntuksemua.blogspot.co.id

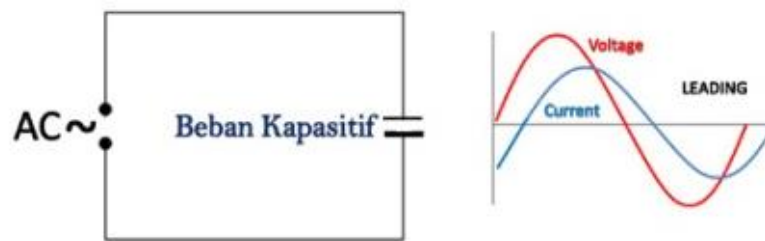
Sedangkan dari segi arah vektornya, pada beban induktif arah arus ( $I_L$ ) dan arah tegangan ( $V_s$ ) adalah



Gambar 2.7 Arah vektor tegangan dan arus beban induktif

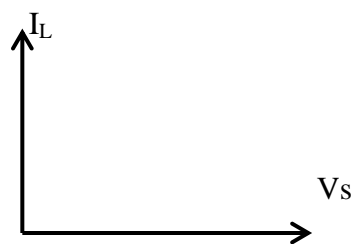
### 3. Beban kapasitif

Beban kapasitif terjadi karena alat listrik yang memiliki kemampuan kapasitansi atau menyerap dan menyimpan energi listrik untuk sementara. Komponen yang memiliki kemampuan tersebut adalah kapasitor. Beban ini mengakibatkan terhambatnya gelombang tegangan sehingga tertinggal dari gelombang arusnya atau disebut *leading*.



Gambar 2.8 Rangkaian dan gelombang beban kapasitif  
 Sumber : duniaberbagiilmuuntuksemua.blogspot.co.id

Jika dilihat dari arah vektornya, hubungan arah arus ( $I_L$ ) dengan arah tegangan ( $V_s$ ) adalah sebagai berikut



Gambar 2.9 Arah vektor tegangan dan arus beban kapasitif

Dalam listrik arus bolak-balik terdapat tiga jenis daya yaitu :

1. Daya Aktif (P)

Daya aktif adalah daya yang sesungguhnya dibutuhkan oleh beban. Satuan daya aktif adalah W (*Watt*) dan dapat diukur dengan menggunakan alat ukur listrik *Wattmeter*. Daya Aktif pada beban yang bersifat *resistansi* (R)

$$P = V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

P = daya aktif (W)

V = tegangan listrik (V)

I = arus listrik (A)

Cos  $\phi$  = faktor daya

## 2. Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif adalah daya listrik yang dibutuhkan beban untuk pembangkitan medan magnet atau daya yang timbul karena beban yang bersifat induktif dan kapasitif. Satuan daya reaktif adalah VAR (Volt Amper Reaktif).

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

Q = daya reaktif (VAR)

V = tegangan listrik (V)

I = arus listrik (A)

Sin  $\varphi$  = faktor reaktif

## 3. Daya semu (S)

Daya semu adalah daya yang diberikan oleh PLN kepada pelanggan, satuan daya semu adalah VA (Volt Amper). Sifat beban semu adalah resistif

$$S = V \times I \dots\dots\dots (2.6)$$

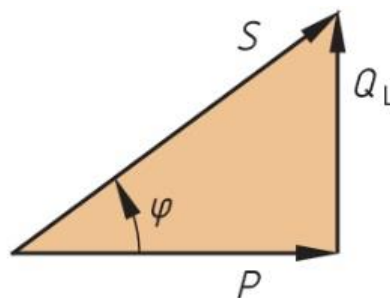
Dimana :

S = Daya Semu (VA)

V = tegangan listrik (V)

I = arus listrik (A)

Dari ketiga jenis daya listrik tersebut maka dapat terbentuk hubungan segitiga daya yaitu



Gambar 2.10 Segitiga daya

Sumber : kusumandarutp.blogspot.co.id

Sehingga dapat ditulis persamaan matematis sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll}
 P^2 = S^2 - Q^2 & Q^2 = S^2 - P^2 & S^2 = P^2 + Q^2 \\
 P = \sqrt{S^2 - Q^2} & Q = \sqrt{S^2 - P^2} & S = \sqrt{P^2 + Q^2}
 \end{array}$$

Dimana :

P = daya aktif (W)

Q = daya reaktif (VAR)

S = daya semu (VA)

Dari segitiga daya tersebut terdapat sudut antara daya semu (S) dan daya aktif (P) yang merupakan  $\cos \phi$  atau disebut faktor daya (*power factor*). Nilai faktor daya yang baik adalah 1 atau mendekati 1. Sehingga sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya nilai dari daya reaktif dan daya semu. daya reaktif atau daya semu yang tinggi akan meningkatkan sudut  $\cos \phi$  maka nilai faktor daya akan semakin rendah menjauhi 1.

$$\cos \phi = P/S \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

$\cos \phi$  = faktor daya

P = daya aktif (W)

S = daya semu (VA)

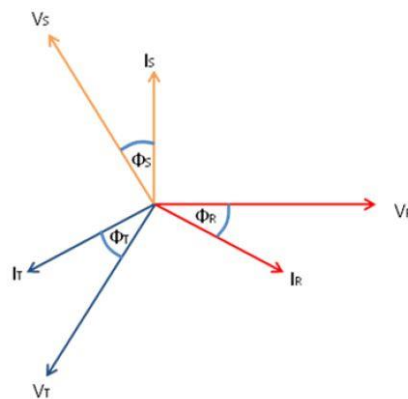
### 2.2.11 Sistem Tiga Fasa

Sistem 3 fasa merupakan salah satu tipe dari sistem polifasa (fasa banyak), metode ini yang umum dipakai untuk menyalurkan energi listrik. Pada sistem 3 fasa dapat menggunakan 4 kawat dengan 3 kawat fasa dan 1 kawat netral kawat netral maupun 3 kawat yang tanpa kawat netral. Ketiga kawat fasa tersebut biasanya diberi kode R, S, dan T. Dalam keadaan beban seimbang, masing – masing kawat fasa memiliki tegangan dan arus yang sama sehingga jika



dilihat dari segi diagram fasor ketiga vektor fasanya akan memiliki keadaan di mana :

- Ketiga vektor arus / tegangan sama besar.
- Ketiga vektor saling membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
- Ketiga fasa memiliki  $\cos \phi$  yang sama besar.



Gambar 2.11 Diagram fasor 3 fasa keadaan beban seimbang

Sumber : Tim CoP Distribusi, Penyeimbangan Beban Gardu Distribusi dengan Metode *All reconnecting*

Gambar 2.8 merupakan diagram vektor saat arus dan tegangan dalam keadaan seimbang. Dapat diperhatikan bahwa jumlah ketiga vektor arusnya ( $I_R$ ,  $I_S$ ,  $I_T$ ) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral ( $I_N$ ). Secara matematis dapat dibuat persamaan

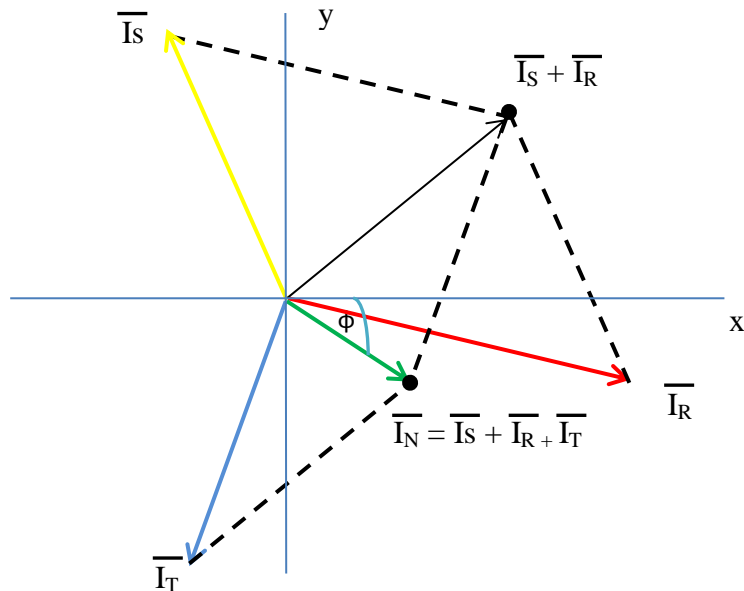
$$0 = \overline{I_R} + \overline{I_S} + \overline{I_T}$$

$$\overline{I_N} = 0$$

### 2.2.12 Ketidakseimbangan Beban pada Sistem Distribusi

Ketidakseimbangan beban adalah keadaan saat nilai tegangan dan arus yang mengalir pada ketiga kawat fasa pada sistem 3 fasa tidak sama. Hal ini terjadi dikarenakan jumlah penggunaan daya, dan waktu pemakaian yang berbeda

– beda pada pelanggan 1 fasa sehingga menyebabkan beban yang ditanggung pada tiap fasanya menjadi berbeda – beda. Ketidakseimbangan beban yang terjadi pada sistem akan menyebabkan timbulnya arus pada penghantar netral yang seharusnya nol.

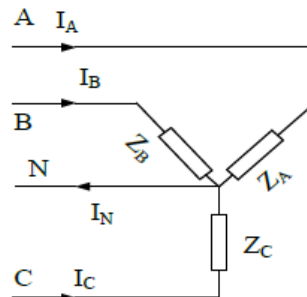


Gambar 2.12 Diagram fasor 3 fasa keadaan beban tidak seimbang

Pada Gambar 2.9 merupakan contoh diagram vektor saat arus tidak seimbang. Dalam keadaan tidak seimbang, jumlah ketiga vektor arusnya ( $I_R$ ,  $I_S$ ,  $I_T$ ) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran sudut yaitu arus netral ( $I_N$ ) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya. Arah vektor berubah – ubah dikarenakan pengaruh beban yang bersifat resistif dan induktif pada pelanggan. Sehingga ketika beban tidak seimbang persamaannya adalah

$$\begin{aligned} \overline{I_R} + \overline{I_S} + \overline{I_T} &\neq 0 \\ \overline{I_N} &\neq 0 \end{aligned}$$

Untuk menghitung arus netral yang timbul akibat beban yang tidak seimbang dapat menggunakan rumus matematis berikut:



Gambar 2.13 Sambungan Y pada transformator

$$I_A = \frac{V_A}{Z_A} \quad I_B = \frac{V_B}{Z_B} \quad I_C = \frac{V_C}{Z_C}$$

Sehingga :

$$I_N = I_A + I_B + I_C \dots\dots\dots (2.8)$$

$$I_N = I_A \angle \phi_1 + I_B \angle \phi_2 + I_C \angle \phi_3 \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

$V_A, V_B, V_C$  = Tegangan tiap fasa (V)

$Z_A, Z_B, Z_C$  = Impedansi tiap fasa ( $\Omega$ )

$I_N$  = Arus netral (A)

$I_A, I_B, I_C$  = Arus tiap fasa (A)

$\angle \phi_1, \angle \phi_2, \angle \phi_3$  = Sudut tiap fasa

### 2.2.13 Persentase Ketidakseimbangan Beban

Nilai beban pada tiap fasa yang tidak sama sangat mempengaruhi nilai persentase ketidakseimbangan beban. Pada penyaluran daya dengan kondisi tidak seimbang, nilai arus tiap fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a, b, dan c sebagai berikut.

$$I_R = a \times I_{\text{rata-rata}}$$

$$\text{maka } a = I_R / I_{\text{rata-rata}}$$

$$I_S = b \times I_{\text{rata-rata}} \quad \text{maka } b = I_S / I_{\text{rata-rata}}$$

$$I_T = c \times I_{\text{rata-rata}} \quad \text{maka } c = I_T / I_{\text{rata-rata}}$$

Dimana :

$I_R, I_S,$  dan  $I_T$  = arus pada fasa R, S, dan T (A)

a, b, dan c = koefisien arus kondisi tidak seimbang tiap fasa

Sedangkan besarnya arus fasa dalam kondisi seimbang sama dengan besarnya arus rata-rata ( $I_{\text{rata-rata}}$ ) dari arus saat kondisi beban tidak seimbang maka dapat menggunakan persamaan matematis sebagai berikut.

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

$I_{\text{rata-rata}}$  = arus rata - rata ketiga fasa (A)

$I_R$  = arus fasa R (A)

$I_S$  = arus fasa S (A)

$I_T$  = arus fasa T (A)

Dalam kondisi beban seimbang, besar nilai koefisiensi a, b, dan c diasumsikan sama dengan 1. Jadi rata-rata ketidakseimbangan beban (%) dapat diketahui dengan persamaan :

$$I_{\text{Ketidakseimbangan}} (\%) = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \dots\dots\dots(2.11)$$

#### 2.2.14 Rugi – rugi Daya (Losses) pada Penghantar Netral

Untuk menghitung rugi –rugi daya (losses) pada penghantar netral dapat menggunakan rumus:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

$P_N$  = losses pada penghantar netral (watt)

$I_N$  = arus yang mengalir pada netral (A)

$R_N$  = tahanan penghantar netral ( $\Omega$ )

### 2.2.15 Rugi – rugi Energi

Untuk mengetahui rugi – rugi energi dapat dihitung dengan mengalikan rugi –rugi daya dengan waktu 24 jam dan 30 hari sehingga dapat ditulis persamaan untuk rugi – rugi energi selama 1 bulan yaitu :

$$W = P \times t \dots\dots\dots(2.13)$$

$$W = P \times 24 \text{ jam} \times 30 \text{ hari}$$

Dimana

W = rugi –rugi energi 1 bulan (Wh)

P = rugi –rugi daya (watt)

t = waktu

Akan tetapi untuk menghitung rugi – rugi energi tidak dapat dilakukan secara akurat karena sifat beban pelanggan yang fluktuatif. Umumnya beban pelanggan dikelompokkan ke dalam 2 zona waktu yaitu waktu beban puncak (WBP) dan waktu luar beban puncak (WLBP). Sehingga untuk menghitung rugi – rugi energi selama 1 bulan dapat menggunakan rumus :

$$W = \frac{(\text{Losses WBP} \times n1 \text{ jam}) + (\text{Losses WLBP} \times n2 \text{ jam})}{1000} \times 30 \text{ hari} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

W = rugi – rugi energi 1 bulan (kWh)

n1 = jumlah jam WBP (Waktu beban puncak) (jam)

n2 = jumlah jam WLBP (Waktu luar beban puncak) (jam)

Sehingga dapat diketahui kerugian segi finansial dalam satu bulan dengan menggunakan rumus:

$$\text{Kerugian 1 bulan (Rp)} = \text{Rugi energi 1 bulan (kWh)} \times \text{Tarif dasar listrik (Rp/kWh)} \dots\dots\dots(2.15)$$

### 2.2.16 Keseimbangan Beban 3 Fasa

Keseimbangan beban pada jaringan 3 fasa dapat terjadi apabila mempunyai beban yang sama. Untuk mencari titik keseimbangan pada jaringan tiga fasa dapat menggunakan rumus matematika linear yaitu nilai *mean* dengan rumus :

$$\underline{X} = (X_1 + X_2 + X_3 + X_n) / n \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

- $\underline{X}$  = arus rata – rata (A)
- X = arus masing – masing fasa (A)
- n = jumlah fasa

Dari perhitungan tersebut akan diperoleh nilai yang harus dipindah atau diterima pada tiap fasa dengan menghitung :

- $I_R - \Sigma X = I_{\text{lepas/terima}}$  (yang harus dilepas atau ditambahkan pada fasa R)
- $I_S - \Sigma X = I_{\text{lepas/terima}}$  (yang harus dilepas atau ditambahkan pada fasa S)
- $I_T - \Sigma X = I_{\text{lepas/terima}}$  (yang harus dilepas atau ditambahkan pada fasa T)

Apabila terdapat fasa yang hasil  $I_{\text{lepas/terima}}$  sangat besar berarti fasa tersebut harus melepas beban sebanyak  $I_{\text{lepas/terima}}$  tersebut, sedangkan pada fasa yang hasilnya lebih sedikit atau bahkan minus (-) berarti fasa tersebut menerima beban dari fasa yang hasil  $I_{\text{lepas/terima}}$  paling besar.