

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1. Transformator

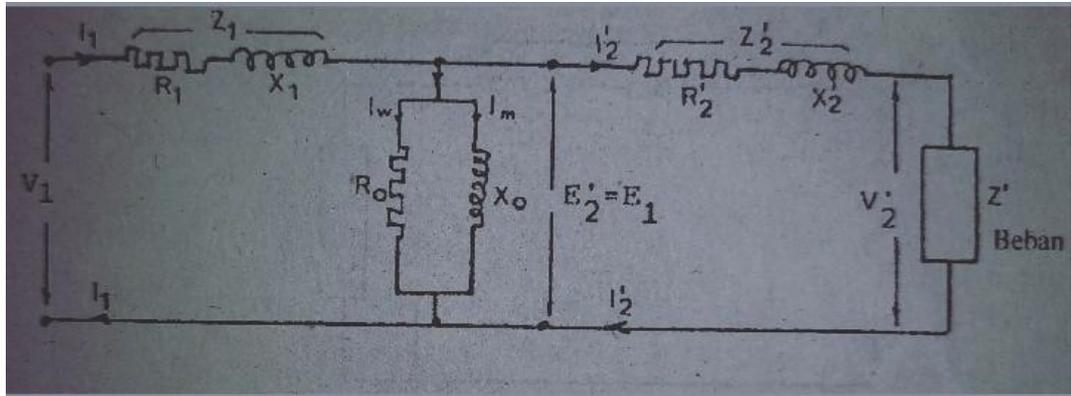
Transformator merupakan suatu alat listrik yang mengubah tegangan arus bolak balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi elektromagnet. Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder.

Penggunaan transformator yang sederhana dan handal memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan serta merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik.

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 berubah-ubah, sehingga pada sisi primer terjadi induksi dan sisi sekunder menerima garis gaya magnet dari sisi primer yang jumlahnya berubah-ubah pula. Maka di sisi sekunder juga timbul induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan.

Sistem transformator tiga fasa dibangun dengan menghubungkan tiga buah transformator satu fasa ke sistem suplai listrik tiga fasa. Ada beberapa konfigurasi rangkaian primer dan sekunder transformator tiga fasa, yaitu : hubungan bintang - bintang, hubungan segitiga-segitiga, hubungan bintang-segitiga dan hubungan segitiga- bintang. Konfigurasi hubungan kumparan transformator tiga fasa akan mempengaruhi arus dan tegangannya. Pengaturan konfigurasi hubungan transformator tiga fasa perlu dilakukan untuk dapat menggunakan transformator tiga fasa secara tepat.

1.2. Rangkaian Ekivalen



Gambar2.1. Rangkaian Ekivalen

Perhitungan tahanan resistan dan reaktansi ekivalen dapat menggunakan rumus di bawah ini :

$$1. R_{ekv} = R_1 + a^2 R_2 \dots \dots \dots (2.1)^3$$

Keterangan :

- R_1 = Resistansi Primere
- a = Nilai perbandingan lilitan Transformator
- R_2 = Resistan Sekunder

$$2. X_{ekv} = X_1 + a^2 X_2 \dots \dots \dots (2.2)^3$$

Keterangan :

- X_1 = Reaktansi primer 1
- a = Nilai perbandingan lilitan Transformator

³ Sumanto, 1991, *Teori Transformator*, Cetak Pertama ANDI OFFSET Yogyakarta Hal 12

- $X_2 =$ Reaktansi sekunder

$$3. a = \frac{V_1}{V_2} \dots \dots \dots (2.3)^3$$

Keterangan :

- $V_1 =$ Tegangan Primer
- $V_2 =$ Tegangan Sekunder

1.3. Prinsip Kerja Transformator

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 (Φ) 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 akan mengalir bersama pada inti trafo dari kumparan primer menuju kumparan sekunder sehingga akan membangkitkan tegangan induksi pada sisi sekunder trafo:

$$V_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \dots \dots \dots (2.4)^3$$

Dimana :

$V_s =$ tegangan induksi pada sisi sekunder

$N_s =$ jumlah belitan pada sisi sekunder

$d\Phi/dt =$ perubahan fluks terhadap waktu

³ Ibid., Hal 6

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 (a), untuk menunjukkan perbandingan lilitan atau perubahan level tegangan dan arus pada sisi primer dan sekunder yang ditransformasikan pada trafo tersebut. Berikut perumusannya:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} = a \dots \dots \dots (2.5)^3$$

Keterangan :

V_p = Tegangan Primer

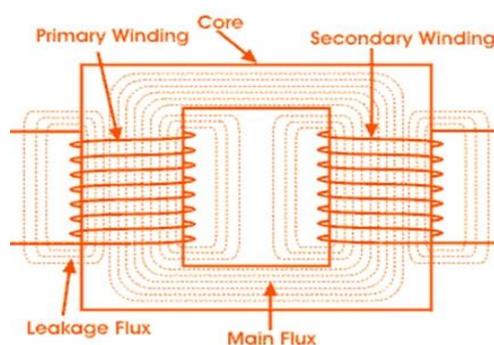
V_s = Tegangan Sekunder

I_p = Arus Primer

I_s = Arus Sekunder

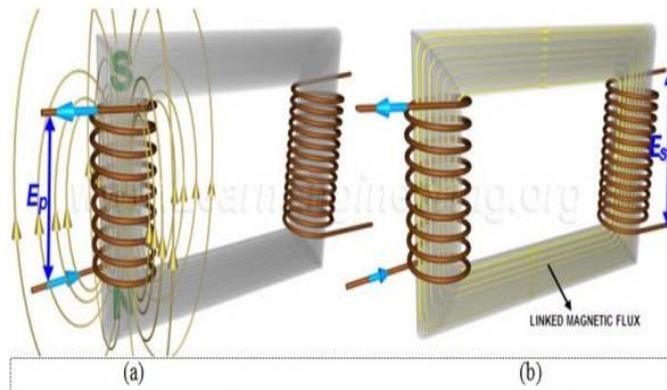
N_p = Jumlah lilitan Primer

N_s = Jumlah lilitan sekunde



Gambar 2.2. Ilustrasi Prinsip kerja transformator.

³ Loc.cit Hal 6



Gambar 2.3. Transformator (a) timbulnya fluks magnetik pada sisi primer, (b) terbangkitnya tegangan induksi pada sisi sekunder akibat fluks bersama.

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:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_L} \dots \dots \dots (2.6)$$

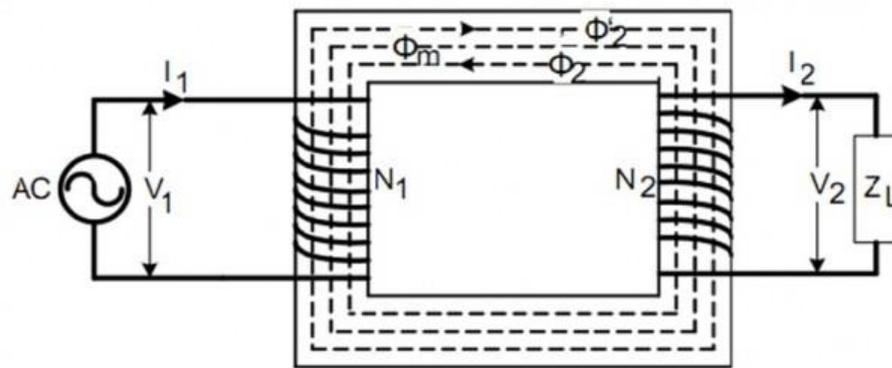
Ketrangan :

I_2 = Arus Sekunder

V_2 = Tegangan Sekunder

Z_L = Beban

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) atau fluks yang cenderung berlawanan dengan fluks bersama (Φ) 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 Φ_2' yang menentang fluks akibat arus beban I_2 .



Gambar 2.4. Ilustrasi trafo berbeban.

Pada transformator ideal, tidak ada energi yang diubah menjadi bentuk energi lain di dalam transformator sehingga daya listrik pada kumparan skunder sama dengan daya listrik pada kumparan primer. Pada transformator Ideal perbandingan antara tegangan sebanding dengan perbandingan jumlah lilitannya. Dengan demikian dapat dituliskan dengan persamaan berikut :

- $P_p = P_s$(2.7)

- $V_p \times I_p = V_s \times I_s$(2.8)

- $\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$(2.9)

- $\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$(2.10)

Keterangan :

P_p = Daya Primer

P_s = Daya sekunder

V_p = Tegangan Primer

V_s = Tegangan Sekunder

I_p = Arus Primer

$I_s =$ Arus Sekunder

$N_p =$ Jumlah lilitan Primer

$N_s =$ Jumlah lilitan sekunder

1.4. Jenis Rugi - rugi

Namun, pada kenyataannya tidak ada transformator yang ideal. Hal ini karena pada transformator selalu ada rugi-rugi yang antara lain sebagai berikut:

1. Rugi Tembaga adalah rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga, dapat di tulis sebagai berikut :

$$P_{cu} = I^2 \times R \dots \dots \dots (2.11)^2$$

Keterangan :

1. $I =$ Arus
2. $R =$ Resistansi pada rangkaian ekivalen

untuk Rugi – rugi inti (P_i), terdiri atas:

2. Rugi histeresis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi, yang dinyatakan sebagai:

$$P_h = K_h \times f \times B_{max} \dots \dots \dots (2.12)^2$$

Keterangan:

1. $K_h =$ konstanta
2. $F =$ Frekuensi

²Kadir Abdul , 1998, *Transmisi Tenaga Listrik*, UNIVERSITAS INDONESIA, Jakarta

3. B_{maks} = fluks maksimum (weber), sedangkan

3. Rugi arus eddy yaitu disebabkan arus pusar pada inti besi. Dirumuskan sebagai berikut:

$$P_e = K_e \times F^2 \times B_{maks}^2 \dots \dots \dots (2.13)^2$$

Keterangan :

1. K_e = Konstanta
2. F = Frekuensi
3. B_{maks} = Fluks maksimum (weber).

Jadi, rugi – rugi Inti adalah

$$P_i = P_h + P_e \dots \dots \dots (2.14)^2$$

Keterangan :

1. P_h = Rugi histeresis
2. P_e = Rugi arus eddy
3. P_i = Rugi inti
4. Rugi total adalah rugi tembaga dengan rugi inti maka dirumuskan sebagai berikut

$$P_{total} = P_{cu} + P_i \dots \dots \dots (2.15)^2$$

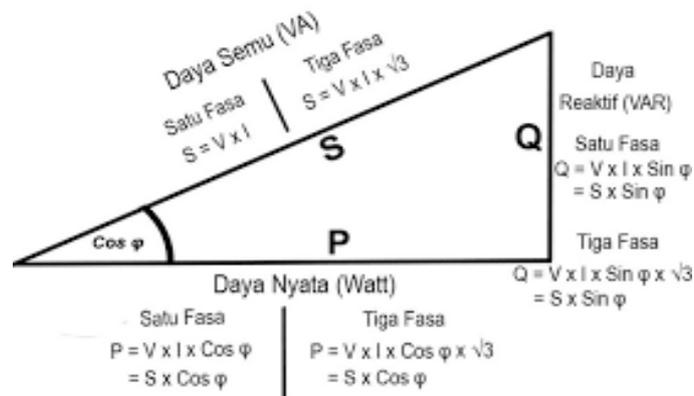
Keterangan :

1. P_{total} = Rugi – rugi total
2. P_{cu} = Rugi Tembaga
3. P_i = Rugi Inti

² Ibid., Hal 11

1.5. Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan trigonometri atau segitiga siku-siku yang digunakan untuk menghitung daya aktif, reaktif serta semu. Sedangkan jika dilihat dari kata daya ini sendiri artinya adalah sekumpulan energi listrik yang terpakai dalam aktivitas atau usaha tertentu.



Gambar 2.5. Segitiga Daya

1.5.1. Daya Nyata

Daya nyata yang disimbolkan dengan (P) adalah daya tenaga listrik yang peruntukannya digunakan untuk mesin atau peralatan listrik. Daya inilah yang membuat beragam mesin bertenaga listrik bisa bergerak atau difungsikan sebagaimana mestinya.

Daya nyata ini akan mengubah sebuah energi menjadi jenis energi lainnya. Misalnya saja saat menggunakan setrika, dimana energi listrik akan diubah menjadi energi panas.

Berikut adalah rumus untuk menghitung daya nyata.

- Line to netral / 1 fasa: $P = V \times I \times \cos \varphi$ (2.16)¹

- Line to line/ 3 fasa: $P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi$(2.17)¹

Keterangan:

P = Daya Nyata (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Amper)

$\cos \varphi$ = Faktor Daya

1.5.2. Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif yang disimbolkan dengan (Q) adalah gabungan dari daya semu yang masuk ke dalam penghantar dengan daya aktif yang memang ada di penghantar itu sendiri.

Umumnya pemanfaatan daya reaktif ini lebih pada daya panas maupun mekanik. Contohnya yakni penggunaan mesin cuci, mesin pompa, kipas angin dan lainnya.

Secara teori, gaya reaktif ini sebenarnya terbilang sulit untuk didefinisikan. Namun untuk mempermudah penjelasannya, daya reaktif ini sering juga disebut sebagai daya imajiner yang terjadi karena adanya beban reaktif. Nah untuk beban reaktif ini nantinya bisa bersifat kapasitif maupun induktif.

¹ Cekdin Cekmas dan Berlian Taufik, 2013, *Rangkaian Listrik*, ANDI OFFSET, YOGYAKARTA
Hal 74

Berikut adalah rumus untuk menghitung daya reaktif berdasarkan jenis fasanya.

- Lineto netral/ 1 fasa : $Q = V \times I \times \sin \varphi$(2.18)¹
- Line to line/ 3 fasa : $Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \varphi$(2.19)¹

Keterangan:

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Amper)

Sin φ = Faktor Daya

1.5.3. Daya Semu

Daya semu yang disimbolkan dengan (S) adalah sekumpulan daya listrik yang berjalan di penghantar distribusi atau transmisi. Jika ada total yang tersedia, nantinya daya tersebut bisa diserap kembali untuk rangkaian AC. Namun bisa jadi daya total tersebut justru akan dihaburkan.

Berikut adalah rumus daya semu sesuai dengan jenis fasanya.

- Line to netral/ 1 fasa : $S = V \times I$ (2.20)¹
- Line to line/3 fasa : $S = \sqrt{3} \times V \times I$(2.21)¹

Keterangan:

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan (Volt)

¹ Ibid., Hal 14

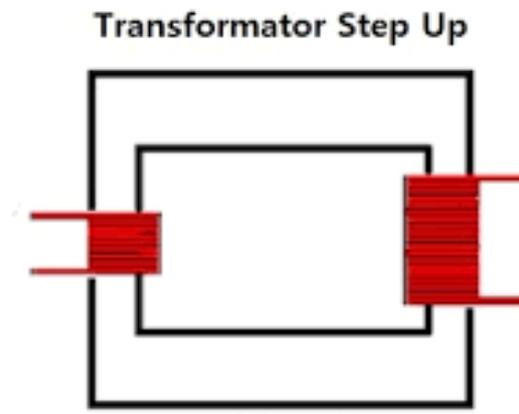
I = Arus yang mengalir pada penghantar (Amper)

1.6. Jenis-Jenis Transformator

Berikut ini jenis jenis transformator yaitu

1. Transformator Step-UP

Jenis transformator step up adalah transformator yang mempunyai lilitan sekunder yang lebih banyak dibandingkan dengan lilitan primer, sehingga dapat berfungsi sebagai penaik tegangan. Pada umumnya, transformator kerap ditemui pada pembangkit tenaga listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang difungsikan dalam transmisi jarak jauh.



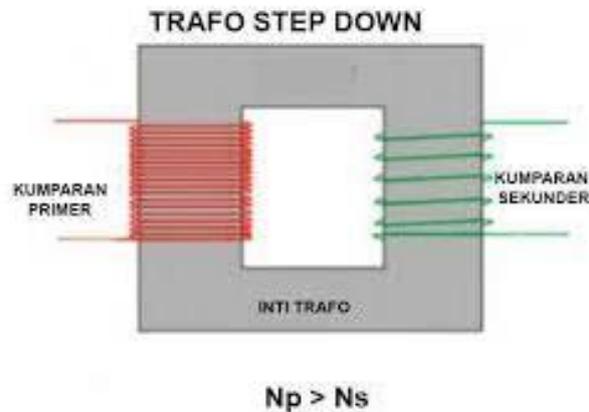
Gambar 2.6 Transformator Step Up

Ciri-Ciri step-up:

1. Jumlah lilitan kumparan primer selalu lebih kecil dari jumlah lilitan kumparan sekunder, ($N_p < N_s$).
2. Tegangan primer selalu lebih kecil dari tegangan sekunder, ($V_p < V_s$).
3. Kuat arus Primer selalu lebih besar dari kuat selalu lebih besar dari kuat arus sekunder, ($I_p > I_s$)

2. Transformator Step Down

Jenis transformator step down adalah jenis yang mempunyai lilitan sekunder lebih sedikit dibandingkan dengan lilitan primer, sehingga jenis transformator ini memiliki fungsi sebagai penurun tegangan. Jenis transformator ini mudah ditemui khususnya pada adaptor AC-DC.



Gambar 2.7 Transformator Step Down

Ciri-ciri step-down:

1. Jumlah lilitan kumparan primer selalu lebih besar dari jumlah lilitan kumparan sekunder, ($N_p > N_s$).
2. Tegangan primer selalu lebih besar dari tegangan sekunder ($V_p > V_s$).
3. Kuat arus primer selalu lebih kecil dari kuat arus sekunder, ($I_p < I_s$)⁵.

1.7. 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. Sebuah trafo ideal akan memiliki efisiensi sebesar 100 %. Artinya semua daya yang diberikan pada kumparan primer dipindahkan ke kumparan sekunder tanpa ada kerugian. Sebuah trafo yang real memiliki efisiensi di bawah 100% dan pada saat beban penuh (full load) efisiensi trafo berkisar pada harga 94 – 96%. Untuk trafo yang bekerja pada tegangan dan frekuensi yang konstan, efisiensi trafo dapat mencapai 98%. Efisiensi trafo dapat dinyatakan :

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \cdot 100\% \dots \dots \dots (2.22)^4$$

Atau

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{in} + \sum \text{Rugi-rugi}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.23)$$

Keterangan :

η : Efisiensi trafo

P_o : Daya output (Watt)

P_i : Daya input (Watt)

⁴ Jurnal Ilmiah “DUNIA ILMU” VOL. 2. NO 4 Desember 2016/ *Studi Efisiensi Transformator Daya Di Gardu Induksi Gis Listrik*

$$\sum Rugi - rugi : rugi \text{ total}$$

1.8. Beban Listrik

Pada umumnya, beban pada sebuah instalasi listrik dibedakan menjadi jenis yaitu:

1. Beban resistif.
2. Beban induktif.
3. Beban kapasitif.

1.8.1. Beban Resistif

Beban resistif adalah sebuah peralatan listrik yang didalamnya terdapat komponen yang bekerja dengan sistem resistansi. Jadi, jenis beban ini hanya mengonsumsi daya aktif. Beban resistif tidak akan mengakibatkan perubahan pada faktor daya, sehingga memiliki nilai $\cos \phi$ yang tetap.

Adapun rumus daya pada beban resistif yaitu:

$$P = V \times I \dots \dots \dots (2.24)^6$$

Keterangan :

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Amper)

⁶ <https://thecityfoundry.com/beban-listrik/> (Badi : Beban Listrik. diakses pada 10 juli 2022)

contoh alat-alat listrik dari beban resistif seperti :

1. Setrika,
2. Solder listrik,
3. Mesin penanak nasi,
4. Lampu dan lainnya.

1.8.2. Beban Induktif

Beban induktif adalah alat listrik yang menggunakan beban induktif biasanya beroperasi dengan prinsip kerja induksi. Tidak hanya itu saja, alat listrik yang menggunakan beban induktif juga memakai kawat penghantar.

Umumnya kawat ini dililitkan pada bagian inti kumparan untuk menghambat laju arus pada rangkaian instalasi listrik.

rumus untuk beban Induktif listrik 1 Phase yakni :

$$P = V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots(2.25)$$

Keterangan :

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Amper)

$\cos \phi$ = Faktor daya nilai < 1

Adapun rumus daya untuk Listrik Arus bolak balik 3 Phase yaitu :

$$P = V \times I \times \cos \phi \times \sqrt{3} \dots\dots\dots(2.26)^6$$

⁶ Ibid., Hal 20

Keterangan :

$P = \text{Daya (Watt)}$

$V = \text{Tegangan (Volt)}$

$I = \text{Arus (Amper)}$

$\text{Cos Phi} = \text{Faktor daya nilai} < 1$

Contoh beban induktif sebagai berikut :

1. Mesin las listrik,
2. Lampu hemat energi,
3. Trafo dan sejenisnya.
4. Motor Listrik

1.8.3. Beban Kapasitif

Beban kapasitif adalah alat-alat listrik yang bekerja dengan beban kapasitif biasanya memiliki kemampuan kapasitansi. kapasitansi yakni tingkat kemampuan penyerapan energi listrik sementara. Jadi daya aktif akan diserap dan sebaliknya daya reaktif ini akan dihilangkan.

rumus untuk beban kapasitif listrik 1 Phase adalah :

$$P = V \times I \times \text{Cos phi} \dots\dots\dots(2.27)$$

Keterangan :

$P = \text{Daya (Watt)}$

$V = \text{Tegangan (Volt)}$

$I = \text{Arus (Amper)}$

Cos Phi = Faktor daya nilai < 1

rumus untuk beban kapasitif listrik 3 Phase adalah

$$P = V \times I \times \text{Cos phi} \times \sqrt{3} \dots\dots\dots(2.28)$$

Keterangan :

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Amper)

Cos Phi = Faktor daya nilai < 1

1.9. Perhitungan Arus Total

Untuk menghitung arus total dari suatu data dapat digunakan perumusan seperti berikut:

$$o \text{ Arus}(A)Total = \frac{I_1+I_2+I_3}{3} \dots\dots\dots(2.29)$$

Keterangan :

1. I_1 = Phasa 1 atau R
2. I_2 = Phasa 2 atau S
3. I_3 = Phasa 3 atau T

1.10. Perhitungan Tegangan Total

Untuk menghitung arus total dari suatu data dapat digunakan perumusan seperti berikut:

$$Tegangan(V) total = \frac{V_1+V_2+V_3}{3} \dots\dots\dots(2.30)$$

Keterangan :

1. V_1 = Tegangan R-S
2. V_2 = Tegangan R-T
3. V_3 = Tegangan S-T

1.11. Faktor Daya

perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu/daya total (VA), atau nilai cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu. Untuk menghitung faktor daya dari suatu data dapat digunakan perumusan seperti berikut:

$$\text{Cost } \phi = \frac{\text{Daya aktif}}{\text{Daya semu}} \dots\dots\dots (2.31)$$