

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

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

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban ; untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain; dan untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian. Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut :

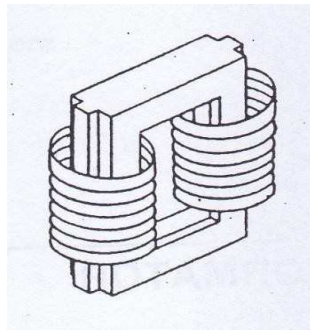
1. Trafo daya dengan frekuensi kerja 50 Hz.
2. Trafo pendengaran dengan frekuensi kerja 20Hz – 20 KHz.
3. Trafo MF dengan frekuensi 455 KHz.
4. Trafo RF dengan frekuensi > 455KHz.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

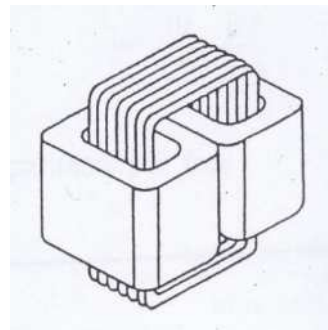
1. Transformator Daya.
2. Transformator Distribusi.
3. Transformator Pengukuran.

Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnetik, 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 2.1 Tipe Inti



Gambar 2.2 Tipe Cangkang¹

2.1.1 Bagian – bagian Transformator

Bagian-bagian pada transformator terdiri dari :

1. Inti besi

Inti besi tersebut berfungsi untuk membangkitkan fluks yang timbul karena arus listrik dalam belitan atau kumparan trafo, sedang bahan ini terbuat dari lempengan-lempengan baja tipis, hal ini dimaksudkan untuk mengurangi panas yang diakibatkan oleh Arus Eddy (*Eddy current*).

2. Kumparan primer dan kumparan sekunder

Kawat email yang berisolasi terbentuk kumparan serta terisolasi baik antar kumparan maupun antara kumparan dan inti besi. Terdapat dua kumparan pada inti tersebut yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder, bila salah satu kumparan tersebut diberikan tegangan maka pada kumparan akan membangkitkan fluks pada inti serta menginduksi kumparan lainnya sehingga pada kumparan sisi lain akan timbul tegangan.

3. Minyak trafo

¹ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, Bandung : 1991. Hal 16.

Belitan primer dan sekunder pada inti besi pada trafo terendam minyak trafo, hal ini dimaksudkan agar panas yang terjadi pada kedua kumparan dan inti trafo akan didinginkan oleh minyak trafo dan selain itu minyak tersebut juga sebagai isolasi pada kumparan dan inti besi.

4. *Isolator bushing*

Pada ujung kedua kumparan trafo baik primer ataupun sekunder keluar menjadi terminal melalui isolator yang juga sebagai penyekat antar kumparan dengan *body* badan trafo.

5. Tangki dan konservator

Bagian-bagian trafo yang terendam minyak trafo berada dalam tangki, sedangkan untuk pemuaian minyak tangki dilengkapi dengan konservator yang berfungsi untuk menampung pemuaian minyak akibat perubahan temperatur.

6. Katub pembuangan dan pengisian

Katub pembuangan pada trafo berfungsi untuk menguras pada penggantian minyak trafo, hal ini terdapat pada trafo diatas 100 kVA, sedangkan katup pengisian berfungsi untuk menambahkan atau mengambil *sample* minyak pada trafo.

7. *Oil level*

Fungsi dari *oil level* tersebut adalah untuk mengetahui minyak pada tangki trafo, *oil level* ini pun hanya terdapat pada trafo diatas 100 kVA.

8. Pernapasan trafo

Karena naik turunnya beban trafo maupun suhu udara luar, maka suhu minyaknya akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki, sebaliknya bila suhu turun, minyak akan menyusut maka udara luar akan masuk kedalam tangki. Kedua proses tersebut diatas disebut pernapasan trafo, akibatnya permukaan minyak akan bersinggungan dengan udara luar, udara luar tersebut lembab. Oleh sebab itu pada ujung pernapasan diberikan alat dengan bahan yang mampu

menyerap kelembaban udara luar yang disebut kristal zat Hygrokopis (Clilicagel).

9. Pendingin trafo

Perubahan temperatur akibat perubahan beban maka seluruh komponen trafo akan menjadi panas, guna mengurangi panas pada trafo dilakukan pendingin pada trafo. Sedangkan cara pendinginan trafo terdapat dua macam yaitu : alamiah/*natural* (Onan) dan paksa/tekanan (Onaf). Pada pendinginan alamiah (*natural*) melalui sirip-sirip radiator yang bersirkulasi dengan udara luar dan untuk trafo yang besar minyak pada trafo disirkulasikan dengan pompa. Sedangkan pada pendinginan paksa pada sirip-sirip trafo terdapat fan yang bekerjanya sesuai *setting* temperaturnya.

10. *Tap changer trafo* (perubahan tap)

Tap changer adalah alat perubah pembanding transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah-ubah. *Tap changer* hanya dapat dioperasikan pada keadaan trafo tidak bertegangan atau disebut dengan “*Off Load Tap Changer*” serta dilakukan secara manual.

2.1.2 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja suatu transformator adalah induksi bersama (*mutual induction*) antara dua rangkaian yang dihubungkan oleh fluks magnet. Dalam bentuk yang sederhana, transformator terdiri dari dua buah kumparan yang secara listrik terpisah tetapi secara magnet dihubungkan oleh suatu alur induksi. Kedua kumparan tersebut mempunyai *mutual induction* yang tinggi. Jika salah satu kumparan dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, fluks bolak-balik timbul di dalam inti besi yang dihubungkan dengan kumparan yang lain menyebabkan atau menimbulkan ggl (gaya gerak listrik) induksi (sesuai dengan induksi elektromagnet) dari hukum faraday.

Berdasarkan hukum Faraday yang menyatakan *magnitude* dari *electromotive force* (emf) proporsional terhadap perubahan fluks terhubung dan hukum Lenz yang menyatakan arah dari emf berlawanan dengan arah fluks sebagai reaksi perlawanan dari perubahan fluks tersebut didapatkan persamaan:

$$e = - \left(\frac{d\Psi}{dt} \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

e = Emf sesaat

Ψ = Fluks terhubung

Dan pada transformator ideal yang dieksitasi dengan sumber sinusoidal berlaku persamaan :

$$E = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot N \cdot f \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

E = Tegangan (rms)

N = Jumlah lilitan

F = Frekuensi (Hz)

Φ_m = Fluks puncak

Atau :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dikarenakan pada transformator ideal seluruh mutual flux yang dihasilkan salah satu kumparan akan diterima seutuhnya oleh kumparan yang lainnya tanpa adanya *leakage flux* maupun *loss* lain misalnya berubah menjadi panas. Atas dasar inilah didapatkan pula persamaan :

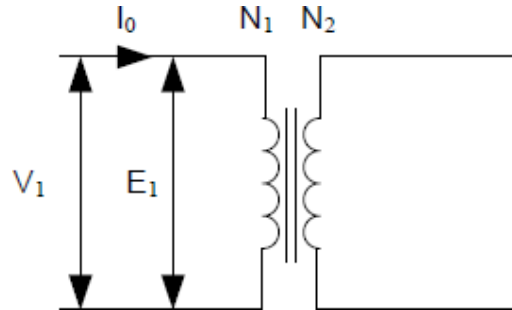
$$P_1 = P_2 \dots\dots\dots (2.4)$$

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots (2.5)$$

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots (2.6)^4$$

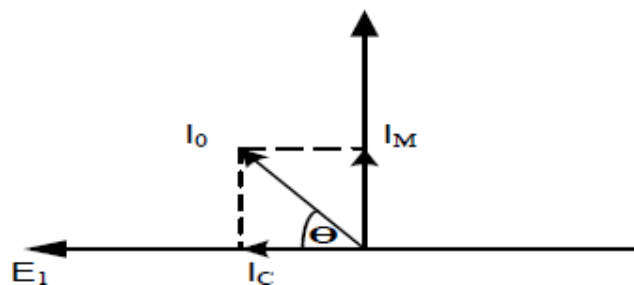
2.1.3 Transformator Tanpa Beban

Transformator disebut tanpa beban jika kumparan sekunder dalam keadaan terbuka (*open circuit*) perhatikan gambar 2.3.



Gambar 2.3 Transformator Tanpa Beban

Dalam keadaan ini, arus I_0 yang mengalir pada kumparan primer adalah sangat kecil. Arus ini disebut arus primer tanpa beban atau arus penguat. Arus I_0 adalah terdiri dari arus pemagnet (I_M) arus tembaga (I_C). Arus I_M inilah yang menimbulkan fluks magnet bersama yang dapat mengakibatkan timbulnya rugi histerisis dan rugi *Eddy Current* (arus pusar). Rugi histerisis dan rugi *Eddy Current* inilah yang menimbulkan rugi inti sedangkan adanya arus tembaga akan menimbulkan rugi tembaga. Secara vektoris hubungan antara arus penguat, fluks magnet bersama dan gaya gerak listrik primer ditunjukkan pada gambar 2.4.²



Gambar 2.4 Hubungan Antara I_0 ϕ dan E_1

² Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI, Yogyakarta : 1997. Hal 6.

Dari gambar 2.4 terlihat bahwa :

$$I_0 = I_C + I_M \dots\dots\dots (2.7)$$

Jika beda fasa antara I_C dan I_0 adalah sebesar θ , maka :

$$I_C = I_0 \cos \theta \dots\dots\dots (2.8)$$

$$I_0 = \sqrt{I_C^2 + I_M^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Pada umumnya $R_C \gg X_M$, sehingga $I_C \ll I_M$ dianggap I_C , maka besar $\theta = 90^\circ$.

Dengan demikian pada trafo tersebut hanya ada rugi inti sebesar :

$$I_M^2 \cdot X_M = I_0^2 \cdot X_M \dots\dots\dots (2.10)^2$$

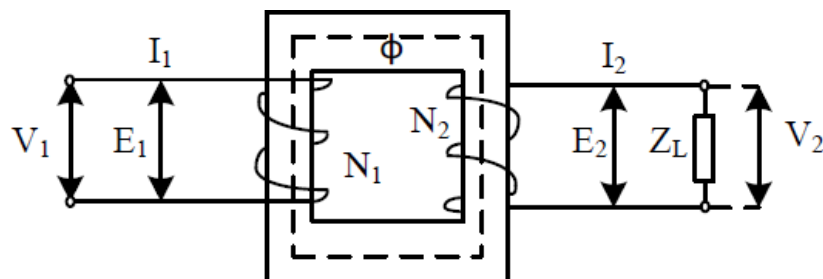
2.1.4 Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana :

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_L} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan $\theta_2 =$ faktor kerja beban

Gambar 2.5 menunjukkan rangkaian transformator dengan keadaan berbeban.



Gambar 2.5 Transformator Berbeban

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (ϕ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan.

² Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI, Yogyakarta : 1997. Hal 7.

Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir I_2' , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_2 = I_0 + I_2' \dots\dots\dots(2.12)$$

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

$$I_1 = I_M + I_2' \dots\dots\dots(2.13)$$

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

$$N_1 \cdot I_M = N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots(2.14)$$

$$N_1 \cdot I_M = N_1 (I_M + I_2') - N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots(2.15)$$

Sehingga,

$$N_1 \cdot I_2' = N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots(2.16)$$

Karena nilai I_M dianggap kecil, maka $I_2' = I_1$

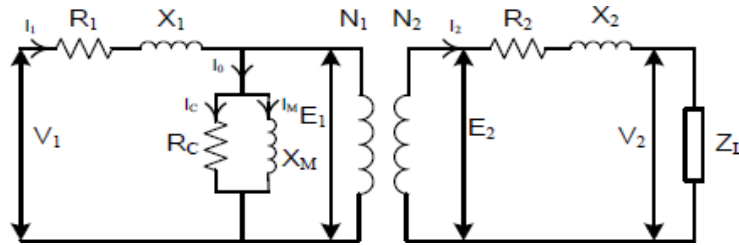
Jadi,

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \text{ atau } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots(2.17)^1$$

2.1.5 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Fluks magnet bersama yang dihasilkan oleh arus pemagnet I_M , tidak seluruhnya tercakup oleh kumparan primer maupun sekunder. Dengan kata lain, terjadi fluks magnet bocor baik pada kumparan primer maupun kumparan sekunder. Adanya fluks magnet bocor pada kumparan primer dinyatakan oleh hambatan primer dan reaktansi primer, sedangkan pada kumparan sekunder dinyatakan oleh hambatan sekunder dan reaktansi sekunder. Dengan demikian rangkaian ekuivalen trafo dapat digambarkan sebagai berikut:

¹ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB , Bandung : 1991. Hal 21.



Gambar 2.6 Rangkaian Ekivalen Transformator¹⁰

Keterangan:

R_1 = hambatan primer

X_1 = reaktansi primer

R_2 = hambatan sekunder

X_2 = reaktansi sekunder

R_C = hambatan inti

X_M = reaktansi magnet

Jika ditinjau pada bagian primer dari gambar 2.6 maka :

$$V_1 = I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot j X_1 + E_1 \dots\dots\dots(2.18)$$

Atau dalam bentuk amplitudo ditulis :

$$V_1 = I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot X_1 + E_1 \dots\dots\dots(2.19)^1$$

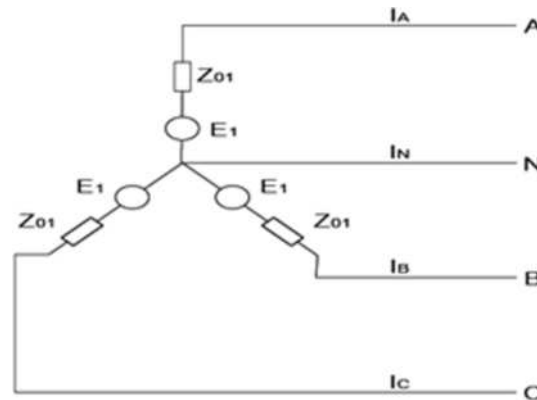
2.1.6 Hubungan Tiga Fasa Dalam Transformator

Secara umum hubungan belitan tiga fasa terbagi atas dua jenis, yaitu hubungan wye (Y) dan hubungan delta (Δ). Masing-masing hubungan belitan ini memiliki karakteristik arus dan tegangan yang berbeda-beda, selanjutnya akan dijelaskan dibawah. Baik sisi primer maupun sekunder masing-masing dapat dihubungkan wye ataupun delta. Kedua hubungan ini dapat dijelaskan secara terpisah, yaitu:

¹ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, Bandung : 1991. Hal 22.

1. Hubungan Wye (Y)

Hubungan ini dapat dilakukan dengan menggabungkan ketiga belitan transformator yang memiliki rating yang sama.



Gambar 2.7 Hubungan Wye (Y)

Dari gambar 2.7 dapat diketahui sebagai berikut :

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L} \text{ (A)} \dots\dots\dots(2.20)$$

$$I_{L-L} = I_{ph} \text{ (A)} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana :

$$I_{L-L} = \text{Arus } line \text{ to } line$$

$$I_{ph} = \text{Arus } line \text{ to } netral$$

Dan

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \text{ (V)} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3V_{ph}} = \sqrt{3E_1} \text{ (V)} \dots\dots\dots(2.23)^3$$

Dimana :

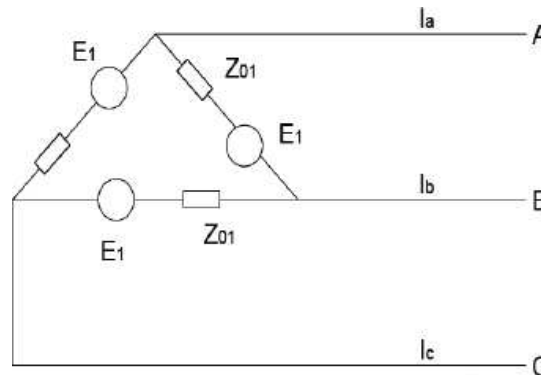
$$V_{L-L} = \text{Tegangan } line \text{ to } line$$

$$V_{ph} = \text{Tegangan } line \text{ to } netral$$

³ Hotdes Lumbanraja, Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator 3 Fasa Hubungan Open-Delta, Penerbit USU, Medan: 2008. Hal 44.

2. Hubungan Delta (Δ)

Hubungan delta ini juga mempunyai tiga buah belitan dan masing-masing memiliki rating yang sama.



Gambar 2.8 Hubungan Delta (Δ)

Dari gambar 2.8 dapat diketahui sebagai berikut :

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L} \text{ (A)} \dots\dots\dots(2.24)$$

$$I_{L-L} = \sqrt{3I_{ph}} \text{ (A)} \dots\dots\dots(2.25)$$

Dimana :

$$I_{L-L} = \text{Arus line to line}$$

$$I_{ph} = \text{Arus line to netral}$$

Dan

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \text{ (V)} \dots\dots\dots(2.26)$$

$$V_{L-L} = V_{ph} \text{ (V)} \dots\dots\dots(2.27)^3$$

Dimana :

$$V_{L-L} = \text{Tegangan line to line}$$

$$V_{ph} = \text{Tegangan line to netral}$$

³ Hotdes Lumbanraja, Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator 3 Fasa Hubungan Open-Delta, Penerbit USU, Medan: 2008. Hal 45.

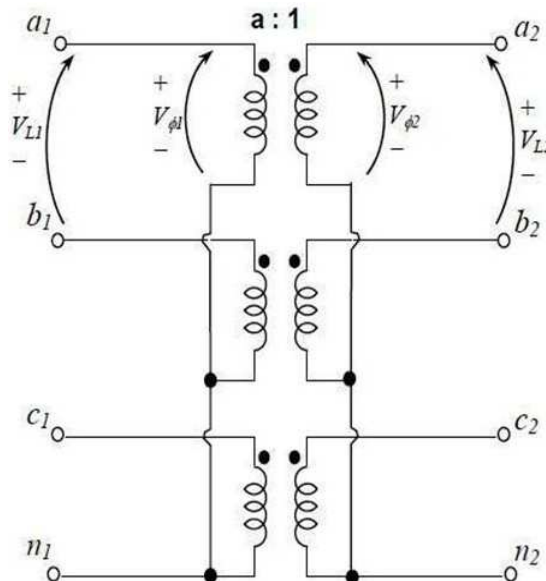
Dengan menetapkan/mengambil sebuah tegangan referensi dan sudut fasa nol, maka dapat ditentukan sudut phasa yang lainnya pada sistem tiga fasa tersebut.

2.1.7 Jenis – jenis Hubungan Belitan Transformator 3 Fasa

Dalam sistem tenaga listrik transformator tiga fasa digunakan karena pertimbangan ekonomis dan efisien. Pada transformator tiga fasa terdapat dua hubungan belitan utama yaitu hubungan delta dan hubungan bintang. Dan ada empat kemungkinan lain hubungan transformator tiga fasa, yaitu :

1. Hubungan Wye – Wye (Y)

Hubungan ini ekonomis digunakan untuk melayani beban yang kecil dengan tegangan transformasi yang tinggi. Hubungan Y-Y pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut ini.



Gambar 2.9 Transformator Hubungan Y-Y

Pada hubungan Y-Y, tegangan primer pada masing-masing fasa adalah :

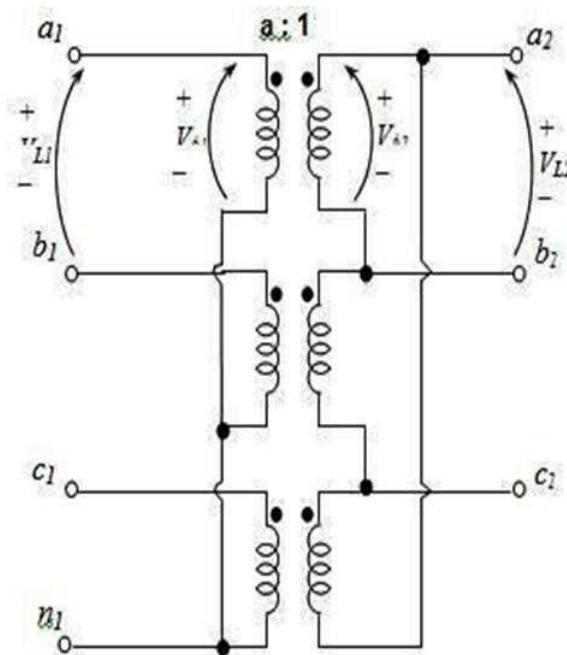
$$V_{L1} = \sqrt{3}V_{\phi 1} \text{ (V)} \dots\dots\dots(2.28)$$

Tegangan fasa primer sebanding dengan tegangan fasa sekunder dan perbandingan belitan transformator. Maka, diperoleh perbandingan tegangan pada transformator adalah :

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3V_{\Phi P}}}{\sqrt{3V_{\Phi S}}} = \alpha \dots\dots\dots(2.29)^3$$

2. Hubungan Wye – Delta (Y - Δ)

Digunakan sebagai penurun tegangan untuk sistem tegangan tinggi. Hubungan Y-Δ pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada gambar 2.10 berikut ini



Gambar 2.10 Transformator Hubungan Y - Δ

³ Hotdes Lumbanraja, Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator 3 Fasa Hubungan Open-Delta, Penerbit USU, Medan: 2008. Hal 46.

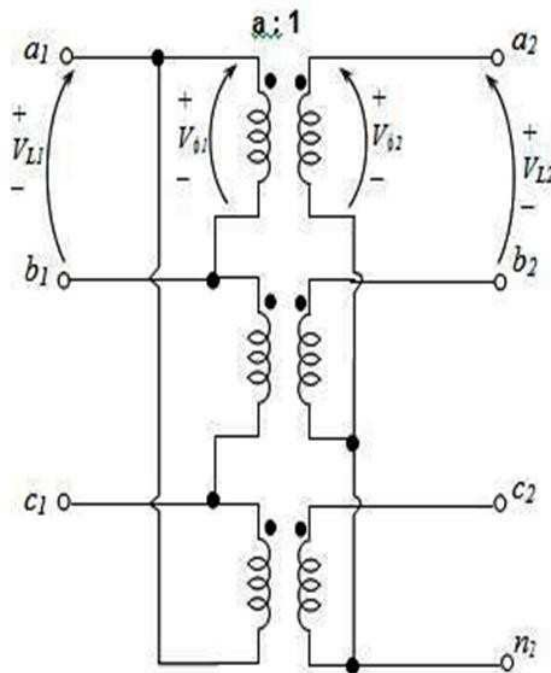
Pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat primer sebanding dengan tegangan phasa fasa $V_{LP} = \sqrt{3V_{\Phi P}}$ dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fasa $V_{LS} = V_{\Phi S}$ sehingga diperoleh perbandingan tegangan pada hubungan ini adalah sebagai berikut :

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3V_{\Phi P}}}{V_{\Phi S}} = \sqrt{3\alpha} \dots\dots\dots(2.30)^3$$

Hubungan ini lebih stabil dan tidak ada masalah dengan beban tidak seimbang dan harmonisa.

3. Hubungan Delta – Wye ($\Delta - Y$)

Umumnya digunakan untuk menaikkan tegangan dari tegangan pembangkitan ke tegangan transmisi. Hubungan $\Delta - Y$ pada transformator tiga fasa ditunjukkan pada gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2.11 Transformator Hubungan $\Delta - Y$

³ Hotdes Lumbanraja, Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator 3 Fasa Hubungan Open-Delta, Penerbit USU, Medan: 2008. Hal 47.

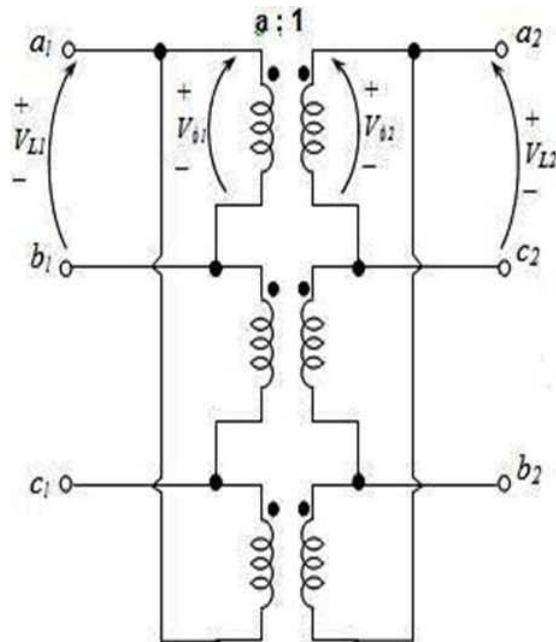
Pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat primer sama dengan tegangan fasa primer $V_{LP}=V_{\phi P}$ dan tegangan sisi sekunder $V_{LS}=\sqrt{3}V_{\phi S}$ Maka perbandingan tegangan pada hubungan ini adalah:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = \frac{\sqrt{3}}{\alpha} \dots\dots\dots(2.31)^3$$

Hubungan ini memberikan keuntungan yang sama dan beda fasa yang sama seperti pada hubungan Y- Δ .

4. Hubungan Delta – Delta ($\Delta - \Delta$)

Hubungan ini ekonomis digunakan untuk melayani beban yang besar dengan tegangan pelayanan yang rendah. Hubungan $\Delta-\Delta$ ini pada transformator tiga fasa ditunjukkan pada gambar 2.12 berikut :



Gambar 2.12 Transformator Hubungan $\Delta - \Delta$

³ Hotdes Lumbanraja, Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator 3 Fasa Hubungan Open-Delta, Penerbit USU, Medan: 2008. Hal 48.

Pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat primer sama dengan tegangan fasa primer $V_{LP}=V\phi P$ dan tegangan sisi sekunder $V_{LS}=V\phi S$ Maka perbandingan tegangan pada hubungan ini adalah:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \alpha \dots\dots\dots(2.32)^3$$

Salah satu keuntungan pemakaian transformator tiga fasa hubungan $\Delta-\Delta$ adalah perbedaan fasa pada hubungan ini tidak ada dan stabil terhadap beban tidak seimbang dan harmonisa. Selain itu keuntungan lain yang dapat diambil adalah apabila transformator ini mengalami gangguan pada salah satu belitannya maka transformator ini dapat terus bekerja melayani beban walaupun hanya menggunakan dua buah belitan.

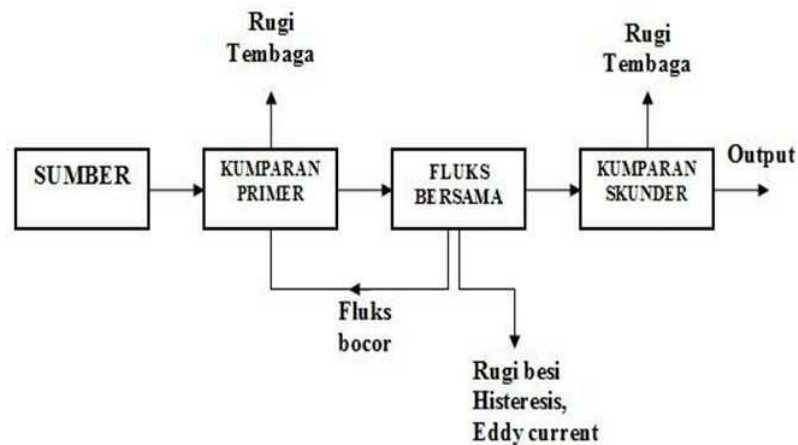
2.1.8 Rugi – rugi Transformator

Menurut Drs. Yon Rijono rugi-rugi daya transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun sekunder. Untuk mengurangi rugi besi haruslah diambil inti besi yang penampangnya cukup besar agar fluks magnet mudah mengalir di dalamnya. Untuk memperkecil rugi tembaga, harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Rugi inti terdiri dari rugi arus Eddy dan rugi histerisis. Rugi arus eddy timbul akibat adanya arus pusar pada inti yang menghasilkan panas. Adapun arus pusar inti ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan-perubahan fluks magnet.

Rugi histerisis merupakan rugi tenaga yang disebabkan oleh fluks magnet bolak-balik pada inti.

Pada Gambar 2.13 di bawah ini adalah diagram rugi-rugi pada transformator:

³ Hotdes Lumbanraja, Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator 3 Fasa Hubungan Open-Delta, Penerbit USU, Medan: 2008. Hal 49.



Gambar 2.13 Diagram Rugi – rugi Transformator

1. Rugi Tembaga (P_{Cu})

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga dapat sebagai:

$$P_{Cu} = I^2 R \dots\dots\dots (2.33)$$

Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban.

2. Rugi Besi (P_i)

Rugi besi terdiri atas:

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

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks} \dots\dots\dots (2.34)$$

Keterangan:

K_h = konstanta (0,26)

B_{maks} = fluks maksimum (weber)

- Rugi arus eddy, yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi. Dirumuskan sebagai :

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{\text{maks}}^2 \dots\dots\dots (2.35)$$

$$BM = \phi MA \dots\dots\dots (2.36)$$

Dimana,

$$\phi M = 108 \cdot (Eff) 24,44 \cdot f \cdot N^2 \dots\dots\dots (2.37)$$

Dan

$$(Eff)^2 = 4,44 \cdot f \cdot N^2 \cdot \phi M \cdot 108 \text{ Volt} \dots\dots\dots (2.38)$$

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah:

$$P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots (2.39)^1$$

Untuk mengetahui rugi-rugi pada transformator dapat dilihat pada tabel 2.1 yang berdasarkan SPLN 50 tahun 1997.

Tabel 2.1 Nilai rugi-rugi transformator

KVA Rating	Rugi besi (watt)	Rugi tembaga (watt)
25	115	700
50	190	1100
100	320	1750
160	400	2000
200	550	2850
315	770	3900
400	930	4600
680	1300	6500
800	1950	10200
1000	2300	12100
1250	2700	15000
1600	3300	18100

¹ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, Bandung : 1991. Hal 34.

2.1.9 Efisiensi Transformator

Efisiensi dinyatakan sebagai :

$$\eta = \frac{P_{Out}}{P_{In}} = \frac{P_{Out}}{P_{Out} + \Sigma_{rugi}} = 1 - \frac{\Sigma_{rugi}}{P_{In}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.40)$$

Keterangan :

- η = Efisiensi (%)
- P_{out} = Daya keluar (Watt)
- P_{in} = Daya masuk (Watt)

Dimana,

$$\Sigma_{rugi} = P_{cu} + P_i \dots\dots\dots (2.41)^1$$

2.2 Rugi Akibat Adanya Arus Pada Penghantar Netral Transformator

Sebagai akibat dari beban yang tidak seimbang tiap-tiap fasa pada sisi sekunder transformator (fasa R, S, dan T) mengalir arus di penghantar netral transformator. Arus yang mengalir pada penghantar netral transformator ini menyebabkan rugi-rugi. Untuk menghitung rugi-rugi pada penghantar netral dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots\dots\dots (2.42)$$

Dimana,

- P_N = rugi rugi pada penghantar netral transformator (watt)
- I_N = arus pada penghantar netral (A)
- R_N = tahanan penghantar netral

¹ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, Bandung : 1991. Hal 35.

2.3 Ketidakseimbangan Beban

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana :

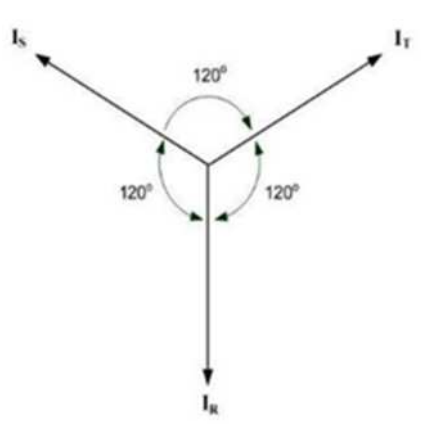
1. Ketiga vektor arus atau tegangan sama besar
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan tidak seimbang tidak terpenuhi.

Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3, yaitu :

1. Ketiga vektor sama besar, tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
2. Ketiga vektor tidak sama besar, tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

Untuk lebih jelasnya dapat digambarkan dengan vektor diagram arus pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Seimbang⁵

⁵ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Effisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254, Polsri, Palembang: 2013.

Gambar 2.14 menunjukkan diagram vektor 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).

Dimana arus yang berlaku pada hubungan Y tersebut:

$$I_A = \frac{V \angle 0^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -\theta \dots\dots\dots (2.43)$$

$$I_B = \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -120^\circ - \theta \dots\dots\dots (2.44)$$

$$I_C = \frac{V \angle -240^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -240^\circ - \theta \dots\dots\dots (2.45)$$

Disubstitusikan pada persamaan 2.46 :

$$\begin{aligned} I_N &= I_A + I_B + I_C \\ &= I \angle -\theta + I \angle -120^\circ - \theta + I \angle -240^\circ - \theta \\ &= I \cos(-\theta) + j I \sin(-\theta) + I \cos(-\theta - 120^\circ) + j I \sin(-\theta - 120^\circ) + I \\ &\quad \cos(-\theta - 240^\circ) + j I \sin(-\theta - 240^\circ) \\ &= I [(\cos(-\theta) + \cos(-\theta - 120^\circ) + \cos(-\theta - 240^\circ))] + j I [\sin(-\theta) + \\ &\quad \sin(-\theta - 120^\circ) + \sin(-\theta - 240^\circ)] \dots\dots\dots (2.46) \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan identitas trigonometri :

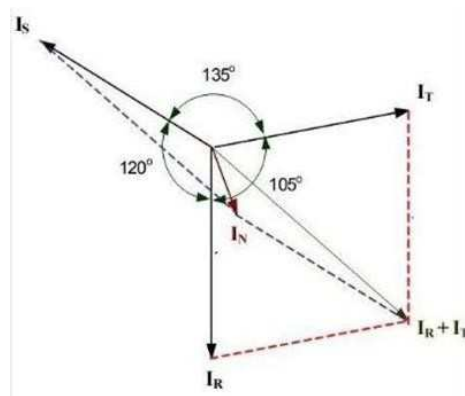
$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \dots\dots\dots (2.47)$$

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta \dots\dots\dots (2.48)^5$$

masukkan identitas trigonometri ke persamaan :

⁵ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator pada Gardu Distribusi U . 254, Polsri, Palembang: 2013.

$$\begin{aligned}
 I_N &= I [\cos(-\theta) + \cos(-\theta) \cos 120^\circ + \sin(-\theta) \sin 120^\circ + \cos(-\theta) \\
 &\quad \cos 240^\circ + \sin(-\theta) \sin 240^\circ] + j I [\sin(-\theta) + \sin(-\theta) \cos 120^\circ - \\
 &\quad \cos(-\theta) \sin 120^\circ + \sin(-\theta) \cos 240^\circ - \cos(-\theta) \sin 240^\circ] \\
 I_N &= I [\cos(-\theta) - \frac{1}{2} \cos(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(-\theta) - \frac{1}{2} \cos(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(-\theta)] \\
 &\quad + j I [\sin(-\theta) - \frac{1}{2} \sin(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(-\theta) - \frac{1}{2} \sin(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(-\theta)] \\
 I_N &= 0 \text{ A (pada saat keadaan beban seimbang) (2.49)}
 \end{aligned}$$



Gambar 2.15 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Tidak Seimbang

Sedangkan pada gambar 2.15 menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.⁵

2.4 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

$$I \text{ rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \text{ (2.50)}$$

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata, maka koefisien a, b, dan c diperoleh dengan :

⁵ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator pada Gardu Distribusi U . 254, Polsri, Palembang: 2013.

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.51)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.52)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.53)^5$$

2.5 Daya Listrik

Daya memiliki arti sebagai energi per satuan waktu (*Von Meier Alexander, 2006*). Daya merupakan jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha di dalam sistem tenaga listrik. Satuan untuk daya listrik umumnya adalah Waatt. Daya pada suatu sistem tegangan bolak-bali (AC) dikenal dengan tiga macam yaitu daya aktif (nyata) dengan simbol (P) satuannya adalah Watt (W), daya reaktif dengan simbol (Q) satuannya adalah *volt ampere reactive* (VAR) dan daya semu dengan simbol (S) satuannya adalah *volt ampere* (VA).

2.5.1 Daya Aktif

Daya aktif adalah daya rata-rata yang sesuai dengan kekuatan sebenarnya ditransmisikan atau dikonsumsi oleh beban (*Von Meier Alexander, 2006*). Beberapa contoh dari daya aktif adalah energi panas, energi mekanik, cahaya dan daya aktif memiliki satuan berupa watt (W). Berikut ini merupakan persamaan daya aktif menurut *Von Meier Alexander* :

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ (1 phasa)} \dots\dots\dots (2.54)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \text{ (3 phasa)} \dots\dots\dots (2.55)$$

Dimana :

P = Daya aktif (watt)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

cos φ = Faktor daya

V_L = Tegangan jaringan (volt)

I_L = Arus jaringan (ampere)

⁵ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator pada Gardu Distribusi U . 254, Polsri, Palembang: 2013.

2.5.2 Daya Reaktif

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar, dan lain-lain. Daya reaktif memiliki satuan berupa volt ampere reactive (VAR). Berikut ini merupakan persamaan daya reaktif menurut Von Meier Alexander :

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \dots\dots\dots (2.56)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \sin \phi \dots\dots\dots (2.57)^4$$

Dimana :

- Q = Daya reaktif (VAR)
- V = Tegangan (volt)
- I = Arus (ampere)
- V_L = Tegangan jaringan (volt)
- I_L = Arus jaringan (ampere)

2.5.3 Daya Semu

Daya semua adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan dan arus dalam suatu jaringan atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif. Daya semu ialah daya yang dikeluarkan sumber alternation current (AC) atau diserap oleh beban. Satuan dari daya semu yaitu vold ampere (VA).

Hubungan daya :

$$P = S \cdot \cos \phi = V \cdot I \cdot \cos \phi$$

$$Q = S \cdot \sin \phi = V \cdot I \cdot \sin \phi$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 \dots\dots\dots (2.58)$$

$S = P + jQ$, mempunyai nilai/besar dan sudut

$$S = S \angle \phi$$

⁴ Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, Rangkaian Listrik, Penerbit ANDI, Yogyakarta : 2013. Hal 74.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \angle \varphi$$

Untuk mendapatkan daya satu phasa, maka dapat diturunkan persamaannya :

$$S = P + jQ$$

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

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

Maka :

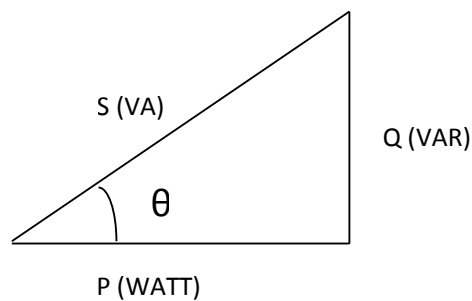
$$S \angle \varphi = V \cdot I \cdot \cos \varphi + j V \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$= V \cdot I (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

$$= V \cdot I \cdot e^{j \varphi}$$

$$= V \cdot I \angle \varphi$$

$$S = V \cdot I \dots\dots\dots (2.59)$$



Gambar 2.16 Segitiga Daya

Tabel 2.2 Persamaan segitiga daya⁴

No.	Nama Daya	Rumus	Satuan
1.	Daya Aktif (P)	$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi$	Watt
2.	Daya Reaktif (Q)	$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi$	VAR
3.	Daya Semu (S)	$S = V \cdot I$	VA

⁴ Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, Rangkaian Listrik, Penerbit ANDI, Yogyakarta : 2013. Hal 75.

2.6 Faktor Daya

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

$$PF = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (2.60)$$

Maka faktor daya PF adalah perbandingan antara daya aktif (W) dengan daya tampak (VA). Faktor daya atau faktor kerja menggambarkan sudut fasa antara daya aktif dan daya semu. Dalam diagram daya, PF adalah cosinus sudut antara daya aktif dan daya tampak (Gambar 2.16).

$$\begin{aligned} PF &= \frac{\text{Daya Aktif (P)}}{\text{Daya Tampak (S)}} \\ &= \frac{kW}{kVA} \\ &= \frac{V \cdot I \cdot \cos \phi}{V \cdot I} \dots\dots\dots (2.61) \end{aligned}$$

Sehingga dapat ditulis menjadi:

$$PF = \cos \phi \dots\dots\dots (2.61)$$

$$P = S \times PF = V \times I \times PF \dots\dots\dots (2.62)^7$$

Efisiensi daya yang lebih adalah ketika P sama atau mendekati S, yaitu ketika $\cos \phi = 1$ atau mendekati 1. Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi, oleh karena itu dalam perbaikan PF diperlukan keseimbangan antara sifat kapasitif dan induktif dalam rangkaian.

2.7 Kapasitor Bank

Kapasitor bank adalah peralatan listrik yang mempunyai sifat kapasitif yang akan berfungsi sebagai penyeimbang sifat induktif. Kapasitas kapasitor diproduksi dalam berbagai kapasitas mulai dari ukuran 5 kVAR sampai 60 kVAR dengan interval tegangan kerja 230 V sampai 525 V tergantung nilai kapasitansi yang diperlukan.

⁷ Ahmad Dani dan Muhammad Hasanuddin, Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Kapasitor Sebagai Kompensator Daya Reaktif, STT Sinar Husni, Sumut: 2018.

2.8 Perbaikan Faktor Kerja

Dalam menentukan kapasitansi kapasitor bank dilakukan terlebih dahulu perhitungan daya reaktif kompensator (Q_c). Pada prinsipnya, dalam perbaikan PF agar nilai $PF \approx 1$, sebuah kapasitor daya ac (kapasitor bank) harus mempunyai nilai daya reaktif kompensator Q_c yang sama dengan nilai daya reaktif Q dari sistem yang akan diperbaiki faktor daya nya, atau dapat ditulis dengan:

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \dots\dots\dots (2.63)$$

$$= V^2 \cdot \frac{1}{X_c} \dots\dots\dots (2.64)$$

$$= V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \dots\dots\dots (2.65)$$

$$C = \frac{Q_c}{V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \dots\dots\dots (2.66)^7$$

Keterangan :

- V = Tegangan (volt)
- Cos ϕ = Faktor daya
- Q_c = Rating kapasitor (kVAR)
- C = Kapasitas kapasitor (μ F)
- f = Frekuensi (Hz)

Untuk menghitung daya reaktif kompensator yang dibutuhkan terhadap perubahan daya reaktif yang diinginkan, digunakan persamaan:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots (2.67)$$

Besarnya nilai rating daya Q_c kapasitor bank yang diperukan untuk mengubah faktor daya dari $\cos \phi_1$ menjadi $\cos \phi_2$ dapat ditentukan dengan:

$$Q_c = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \dots\dots\dots (2.68)^4$$

⁷ Ahmad Dani dan Muhammad Hasanuddin, Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Kapasitor Sebagai Kompensator Daya Reaktif, STT Sinar Husni, Sumut: 2018.

⁴ Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, Rangkaian Listrik, Penerbit ANDI, Yogyakarta : 2013. Hal 93.

