



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator¹

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 dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya. Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder.

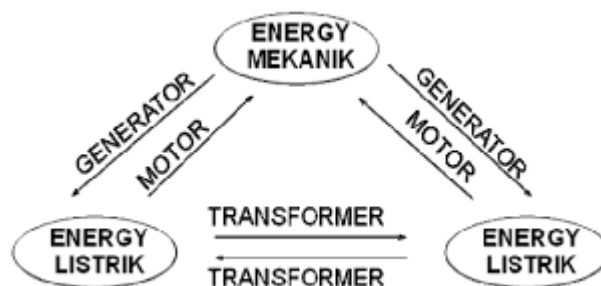
Penggunaan transformator yang handal dan sederhana hal ini memudahkan dipilihnya tegangan yang sesuai tergantung kebutuhan. salah satu yang menjadi penting yaitu penggunaan arus bolak-balik yang sangat banyak baik untuk pembangkit sampai dengan penyaluran tenaga listrik.

Prinsip kerja dari transformator adalah berdasarkan hukum *Ampere* dan *Faraday*, yaitu: arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan medan magnet juga dapat menimbulkan arus listrik. Jika pada kumparan transformator diberi arus bolak-balik maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah. Maka akan terjadi induksi disisi primer. Sisi sekunder akan menerima garis gaya magnet dari sisi primer dengan jumlah yang berubah-ubah. Kemudian di sisi sekunder akan timbul juga induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan.

¹ Prof. Dr. Zuhail M.Sc. EE dan Ir. Zhanggischian, *Prinsip Dasar Elektroteknik*, Hal 631, PT. Gramedia Pusaka Utama, Jakarta.



Dengan demikian maka saluran-saluran transmisi tenaga listrik senantiasa mempergunakan tegangan yang tinggi. Hal ini dilakukan terutama untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi, dengan cara mempergunakan transformator untuk menaikkan tegangan listrik di pusat pembangkit dari tegangan generator yang pada awal transmisi biasanya sebesar 6 kV – 20 kV kemudian tegangan saluran transmisi berikutnya antara 100 kV – 1000 kV, kemudian diturunkan pada ujung terakhir saluran menjadi tegangan yang lebih rendah.



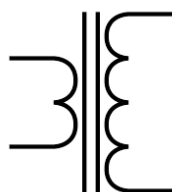
Gambar 2.1 Transformasi Energi

(Zuhal, 1995. Hal 43)

2.2 Jenis-jenis transformator

2.2.1 Step-Up

Transformator step-up adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penaik tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada pembangkit tenaga listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang digunakan dalam transmisi jarak jauh



Gambar 2.4 Lambang Transformator Step-Up



2.2.2 Step-Down

Transformator step-down memiliki lilitan sekunder lebih sedikit dari pada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. Transformator jenis ini sangat mudah ditemui, terutama dalam adaptor AC-DC.



Gambar 2.5 Skema Transformator Step-Down

2.2.3 Auto Transformator

Transformator jenis ini hanya terdiri dari satu lilitan yang berlanjut secara listrik, dengan sadapan tengah. Dalam transformator ini, sebagian lilitan primer juga merupakan lilitan sekunder. Fasa arus dalam lilitan sekunder selalu berlawanan dengan arus primer, sehingga untuk tarif daya yang sama lilitan sekunder bisa dibuat dengan kawat yang lebih tipis dibandingkan transformator biasa.

Keuntungan dari auto transformator adalah ukuran fisiknya yang kecil dan kerugian yang lebih rendah dari pada jenis dua lilitan. Tetapi transformator jenis ini tidak dapat memberikan isolasi secara listrik antara lilitan primer dengan lilitan sekunder.

Selain itu, auto transformator tidak dapat digunakan sebagai penaik tegangan lebih dari beberapa kali lipat (biasanya tidak lebih dari 1,5 kali).

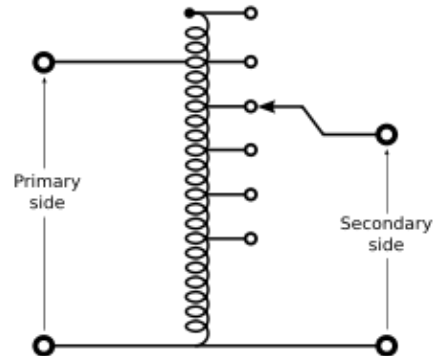


Gambar 2.6 Skema Auto Transformator



2.2.4 Auto Transformator Variabel

Auto transformator variabel sebenarnya adalah auto transformator biasa yang sadapan tengahnya bisa diubah-ubah, memberikan perbandingan lilitan primer-sekunder yang berubah-ubah.



Gambar 2.7 Skema Autotransformator Variabel

2.2.5 Transformator isolasi

Transformator isolasi memiliki lilitan sekunder yang berjumlah sama dengan lilitan primer, sehingga tegangan sekunder sama dengan tegangan primer. Tetapi pada beberapa desain, gulungan sekunder dibuat sedikit lebih banyak untuk mengkompensasi kerugian. Transformator seperti ini berfungsi sebagai isolasi antara dua kalang. Untuk penerapan audio, transformator jenis ini telah banyak digantikan oleh kopling kapasitor.

2.2.6 Transformator pulsa

Transformator pulsa adalah transformator yang didesain khusus untuk memberikan keluaran gelombang pulsa. Transformator jenis ini menggunakan material inti yang cepat jenuh sehingga setelah arus primer mencapai titik tertentu, fluks magnet berhenti berubah. Karena GGL induksi pada lilitan sekunder hanya terbentuk jika terjadi perubahan fluks magnet, transformator hanya memberikan keluaran saat inti tidak jenuh, yaitu saat arus pada lilitan primer berbalik arah.



2.3 Konstruksi Transformator

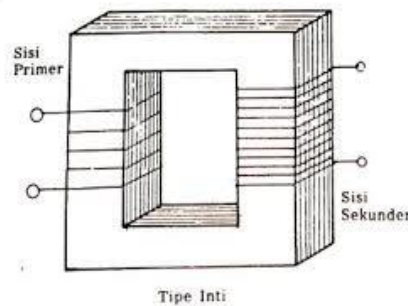
Konstruksi transformator distribusi terdiri dari beberapa bagian:

1. Inti, terbuat dari lempengan-lempengan pelat besi lunak atau baja silikon yang diklem menjadi satu.
2. Belitan, terbuat dari tembaga yang letaknya dibelitkan pada inti dengan bentuk konsentrik atau spiral.
3. Sistem pendinginan, (pada transformator dengan kapasitas besar)
4. Bushing, berfungsi untuk menghubungkan rangkaian dalam dari transformator kerangkaian luar, (pada transformator daya).
5. Arrester, sebagai pengaman trafo terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir dan switching (SPLNse.002/PST/73).

Secara umum transformator dapat dibedakan dua jenis menurut konstruksinya, yaitu:

1. Tipe inti

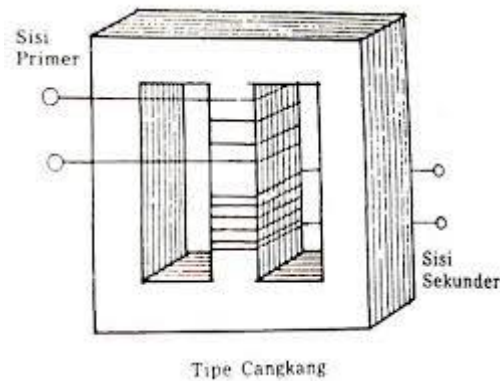
Pada transformator tipe inti, kumparan mengelilingi inti dan konstruksi dari intinya berbentuk huruf L atau huruf U.



Gambar 2.8 Kontruksi Transformator Tipe Inti.

2. Tipe cangkang

Pada transformator tipe cangkang, kumparan atau belitan transformator dikelilingi oleh inti dan konstruksi intinya berbentuk huruf E, huruf I, dan huruf F.



Gambar 2.9 Kontruksi Transformator Tipe Cangkang.

2.4 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum *ampere* dan *faraday* yaitu arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Jika salah satu kumparan pada trafo dialiri arus listrik, maka timbul gaya garis magnet yang berubah-ubah. Kumparan sekunder akan menerima garis gaya magnet dari kumparan primer yang besarnya berubah-ubah dan di kumparan sekunder juga timbul induksi yang diakibatkan antara dua ujung kumparan terdapat beda tegangan. Jumlah garis gaya (Φ , *fluks*) yang masuk kumparan sekunder adalah sama dengan garis gaya yang keluar dari kumparan primer.

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \text{ dan } e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{-N_1 \frac{d\phi}{dt}}{-N_2 \frac{d\phi}{dt}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Jadi

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

Dimana :

e_1 = ggl induksi / tegangan sesaat pada kumparan primer (V).

e_2 = ggl induksi / tegangan sesaat pada kumparan sekunder (V).

E_1 = ggl induksi / tegangan efektif pada kumparan primer (V).

E_2 = ggl induksi / tegangan efektif kumparan sekunder (V).



N_1 = jumlah lilitan kumparan primer.

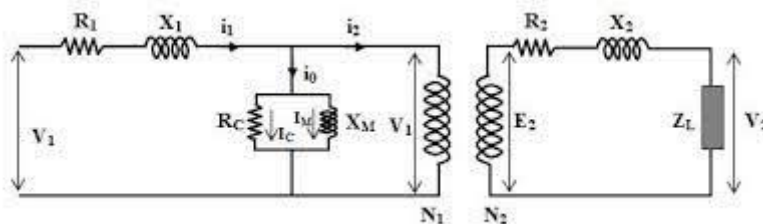
N_2 = jumlah lilitan kumparan sekunder

$\frac{d\phi}{dt}$ = perubahan fluks magnet

2.5 Rangkaian Ekivalen Transformator ²

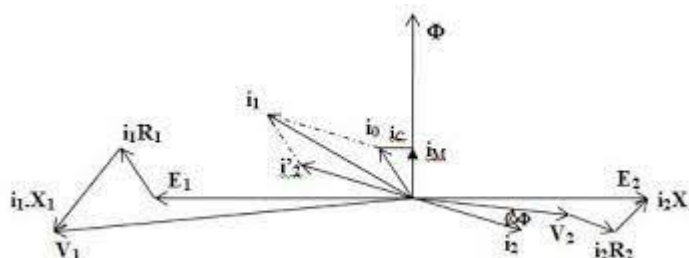
Tidak seluruh fluks (ϕ) yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M merupakan Fluks Bersama (ϕ_M), sebagian darinya hanya mencakup kumparan primer (ϕ_1) atau mencakup kumparan sekunder (ϕ_2) saja. Dalam model rangkaian ekivalen yang dipakai untuk menganalisis kerja suatu transformator, adanya fluks bocor ϕ_1 dan ϕ_2 ditunjukkan sebagai reaktansi X_1 dan X_2 .

Sedang rugi tahanan ditunjukkan dengan R_1 dan R_2 . Dengan demikian model rangkaian dapat dituliskan seperti gambar 2.10



Gambar 2.10 Rangkaian Ekivalen Transformator

Dari rangkaian di atas dapat dibuat vektor diagramnya sebagai terlukis pada gambar berikut ini.



Gambar 2.11 Vektor diagram rangkaian pengganti

² Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Hal 22, ITB, 1991



Dari model rangkaian diatas dapat pula diketahui hubungan penjumlahan vektor :

$$V_1 = E_1 + I_1 X_1 \dots\dots\dots(2.4)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2 \dots\dots\dots(2.5)$$

atau

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = A \text{ atau } E_1 = a \cdot E_2 \dots\dots\dots(2.6)$$

Hingga:

$$E_1 = a(I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2) \dots\dots\dots(2.7)$$

Karena

$$\frac{I'_2}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \text{ atau } I_2 = a \cdot I'_2 \dots\dots\dots(2.8)$$

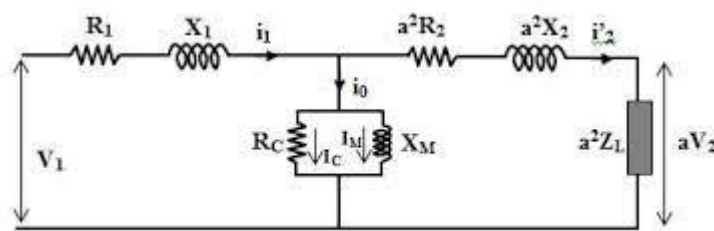
maka

$$E_1 = a^2 I'^2 Z_L + a^2 I'^2 X_2 \dots\dots\dots(2.9)$$

Dan

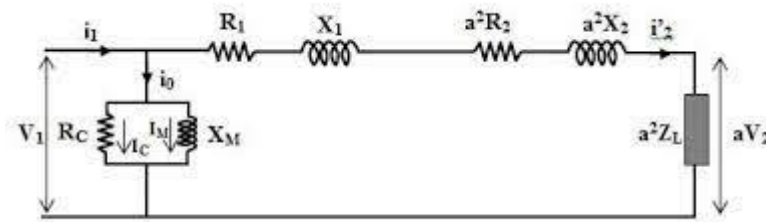
$$V_1 = a^2 I'^2 Z_L + a^2 I'^2 R_2 + a^2 I'^2 X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \dots\dots\dots(2.10)$$

Persamaan terakhir mengandung pengertian bahwa apabila parameter rangkaian sekunder dinyatakan dalam harga rangkaian primer, harganya perlu dikalikan dengan faktor a. Sekarang model rangkaian menjadi seperti terlihat pada gambar berikut ini.



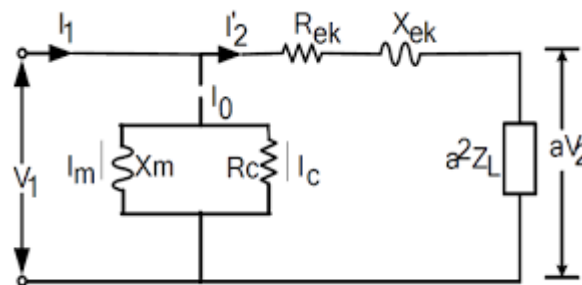
Gambar 2.12 Rangkaian pengganti dilihat dari sisi primer

Untuk memudahkan analisis (perhitungan), model rangkaian tersebut dapat diubah. Apabila semua parameter sekunder dinyatakan dalam harga rangkaian primer, harganya perlu dikalikan dengan faktor \$a^2\$, dimana \$a = E_1/E_2\$. Sekarang model rangkaian menjadi sebagai terlihat pada gambar berikut.



Gambar 2.13 Parameter sekunder pada rangkaian primer

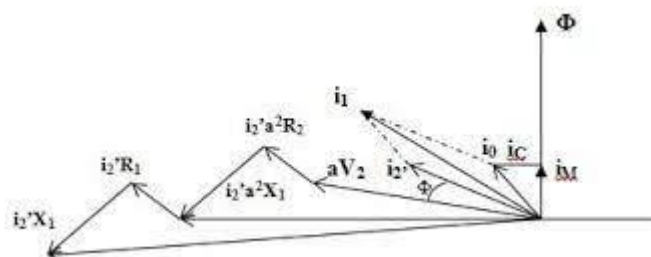
Sehingga rangkaian di atas dapat diubah seperti gambar di bawah ini :



Gambar 2.14 Hasil akhir penyederhanaan rangkaian ekuivalen transformator

Parameter transformator yang terdapat pada model rangkaian (rangkaian ekuivalen) R_c , X_m , R_{ek} dan X_{ek} dapat ditentukan besarnya dengan dua macam pengukuran yaitu pengukuran beban nol dan pengukuran hubungan singkat.

Vektor diagram rangkaian di atas untuk beban dengan faktor kerja terkebelakang dapat dilukiskan pada gambar berikut ini.

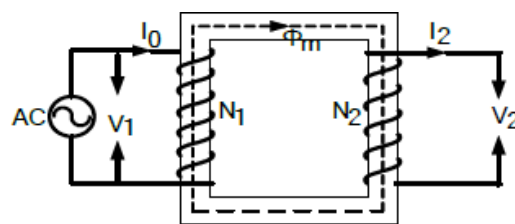


Gambar 2.15 Vektor diagram rangkaian pengganti

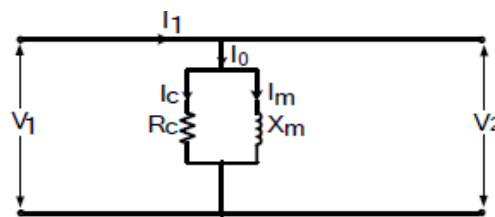


2.6. Keadaan Transformator Tanpa Beban³

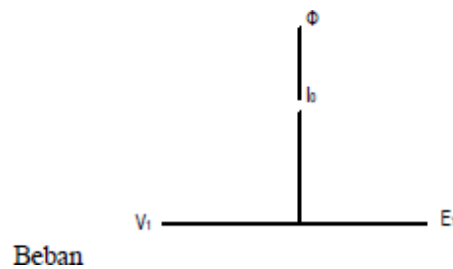
Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang *sinusoidal*, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga *sinusoidal* dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni. I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 . Arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal.



Gambar 2.16 Transformator dalam keadaan tanpa beban

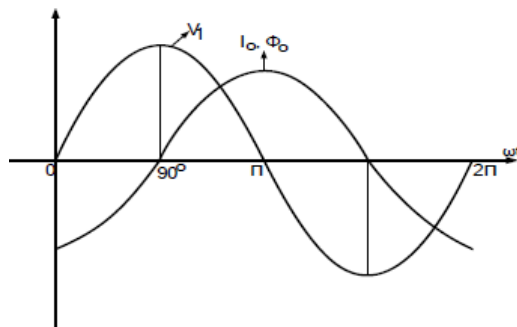


Gambar 2.17 Rangkaian ekivalen transformator dalam keadaan tanpa beban



Gambar 2.18 vektor transformator dalam keadaan tanpa beban

³ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Hal 17, ITB, 1991



Gambar 2.19 Gambar gelombang I_0 tertinggal 90° dari V_1

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (Hukum Faraday)

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.11)$$

Karena

$$\phi = \phi_{max} \cos \omega t \text{ (weber)} \dots\dots\dots(2.12)$$

maka

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\omega\phi_{max} \cos \omega t)}{dt} \dots\dots\dots(2.13)$$

hingga

$$e_1 = -N_1 \omega \phi_{max} \cos \omega t \dots\dots\dots(2.14)$$

$$e_1 = -N_1 \omega \phi_{max} \cos (\omega t - 90^\circ) \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \phi) \dots\dots\dots(2.15)$$

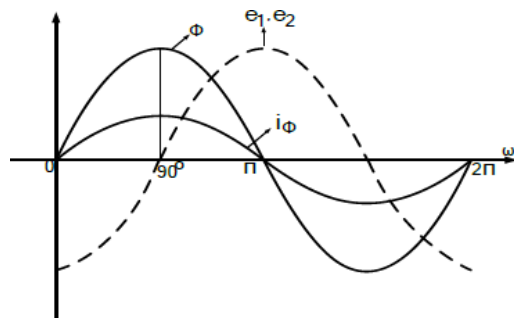
dimana :

e_1 = gaya gerak listrik (*Volt*)

N_1 = jumlah belitan di sisi primer (*Turn*)

ω = kecepatan sudut putar (*Rad/Sec*)

Φ = fluks magnetik (*Weber*)



Gambar 2.20 Gambar Gelombang e_1 , Tertinggal 90° Dari Φ



Harga efektif e_1 :

$$e_1 = \frac{N_1 \omega \phi_{max}}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (2.16)$$

$$e_1 = \frac{N_1 2 \pi f \phi_{max}}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (2.17)$$

$$e_1 = \frac{N_1 2 \times 3,14 f \phi_{max}}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (2.18)$$

$$e_1 = \frac{N_1 6,28 f \phi_{max}}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$e_1 = 4,44 N_1 f \phi_{max} \text{ (Volt)} \dots \dots \dots (2.20)$$

Pada rangkaian sekunder fluks (Φ) bersama juga menimbulkan :

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots \dots \dots (2.21)$$

$$e_2 = -N_2 \omega \phi_{max} \cos \omega t \text{ (Volt)} \dots \dots \dots (2.22)$$

Harga efektifnya e_2 :

$$e_2 = 4,44 N_2 f \phi_{max} \text{ (Volt)} \dots \dots \dots (2.23)$$

Sehingga perbandingan antara rangkaian primer dan sekunder adalah :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots \dots \dots (2.24)$$

dimana :

E_1 = ggl induksi di sisi primer (Volt)

E_2 = ggl induksi di sisi sekunder (Volt)

N_1 = jumlah belitan sisi primer (Turn)

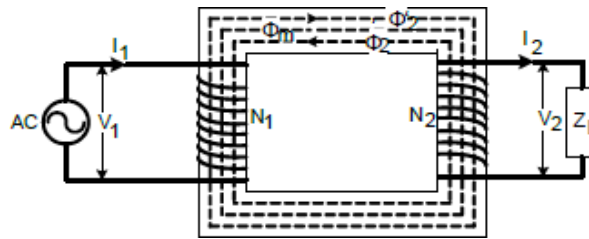
N_2 = jumlah belitan sisi sekunder (Turn)

a = faktor transformasi

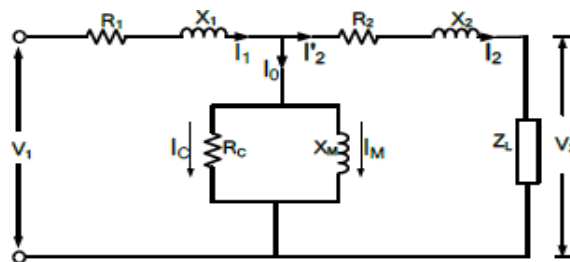
2.7. Keadaan Transformator Berbeban⁴

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan ZL, I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana

⁴ Prof. Dr. Zuhkal M.Sc. EE dan Ir. Zhanggischan, *Prinsip Dasar Elektroteknik*, Hal 631, PT. Gramedia Pusaka Utama, Jakarta



Gambar 2.21 Trafo Dalam Keadaan Berbeban



Gambar 2.22 Rangkaian Ekuivalen transformator dalam keadaan 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. Agar *fluks* bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus I_2' , yang menentang *fluks* yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi : (Bastanna, 2009)

$$I_1 = I_0 + I_2' \text{ (Ampere)} \dots \dots \dots (2.25)$$

Bila komponen arus rugi inti (I_c) diabaikan, maka $I_0 = I_m$, sehingga :

$$I_1 = I_m + I_2 \text{ (Ampere)} \dots \dots \dots (2.26)$$

dimana:

I_1 = arus pada sisi primer (Ampere)

I_2 = arus yg menghasilkan Φ_2 (Ampere)

I_0 = arus penguat (Ampere)

I_m = arus pemagnetan (Ampere)

I_c = arus rugi-rugi inti (Ampere)



Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar Φ_m yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_m , maka berlaku hubungan :

$$N_1 I_m = N_1 I_1 - N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.27)$$

$$N_1 I_m = N_1 (I_m + I_2') - N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.28)$$

$$N_1 I_2' = N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.29)$$

Karena I_m dianggap kecil, maka $I_2' = I_1$.

Sehingga :

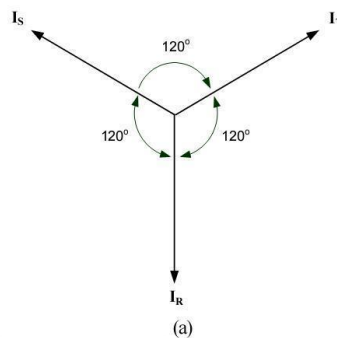
$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.30)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots(2.31)$$

2.8 Ketidakseimbangan Beban ⁵

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang pada beban adalah suatu keadaan dimana:

1. Ketiga vektor arus / tegangan adalah sama besar
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain, seperti yang terlihat pada Gambar 2.23 di bawah ini :



Gambar 2.23 Vektor Diagram Arus Keadaan Seimbang

⁵ Badaruddin, 2012, Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon. Laporan Penelitian Teknik Elektro Fakultas Teknik. Jakarta. Penerbit : Universitas Mercubuana

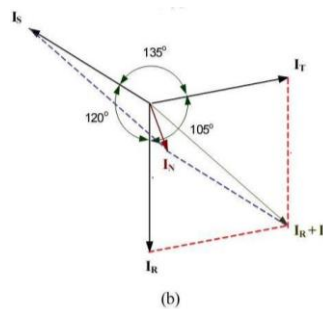


Terlihat dari gambar diatas, dalam keadaan seimbang vektor arus seperti pada gambar. Penjumlahan dari ketiga vektor arus I_R , I_S , dan I_T sama dengan nol maka arus netral pada transformator tidak muncul. Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan setimbang tidak terpenuhi.

Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga 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 tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.5 di bawah ini :



Gambar 2.24 Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang

Terlihat dari gambar diatas, dalam keadaan tidak seimbang vektor arus seperti pada gambar. Penjumlahan dari ketiga vektor arus I_R , I_S , dan I_T tidak sama dengan nol maka arus netral pada transformator akan muncul berpengaruh dari besar ketidakseimbangannya.

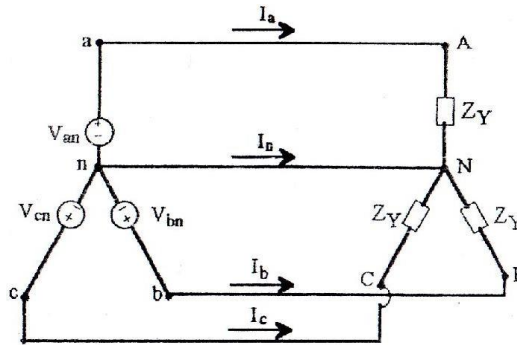
2.9 Arus Netral

Arus netral merupakan arus yang mengalir pada kawat netral pada transformator distribusi dengan sistem tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral akan muncul ketika terjadi dua keadaan sebagai berikut:

1. Kondisi beban tidak seimbang.
2. Karena adanya arus harmonisa akibat beban non-linear.



Arus yang muncul merupakan arus bolak-balik untuk sistem tiga fasa empat kawat. Arus yang mengalir tersebut adalah penjumlahan dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris , seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 2.25 Hubungan Y-Y

Pada gambar diatas, dapat diturunkan persamaan:

$$I_{aA} = \frac{V_{an}}{Z_Y} = \frac{V_{an} \angle 0^\circ}{Z_Y \angle 0^\circ} = I_R \angle -\theta^\circ$$

$$I_{bB} = \frac{V_{bn}}{Z_Y} = \frac{V_{bn} \angle -120^\circ}{Z_Y \angle 0^\circ} = I_S \angle (\theta - 120^\circ)$$

$$I_{cC} = \frac{V_{cn}}{Z_Y} = \frac{V_{cn} \angle 120^\circ}{Z_Y \angle 0^\circ} = I_T \angle (-\theta + 120^\circ)$$

Arus netral pada hubungan diatas didapatkan :

$$I_N = -(I_R + I_S + I_T) \dots \dots \dots (2.32)$$

$$I_N = -(I_R \angle 0^\circ + I_S \angle 120^\circ + I_T \angle 120^\circ) \dots \dots \dots (2.34)$$

$$I_N = -\{I_R (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) + I_S (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) + I_T (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ)\} \dots \dots \dots (2.35)$$

Jumlah arus dalam saluran sama dengan arus netral yang akan melewati kembali kawat netral. Jika sistem dikatakan seimbang setiap arus fasanya maka arus netral akan bernilai nol. Sedangkan sistem tidak seimbang, maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem atau disebut memiliki nilai arus netral tersebut.



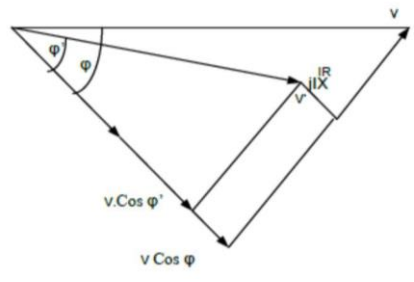
2.9.1 Penyaluran dan Susut Daya pada Keadaan Arus Seimbang

Jika diketahui daya sebesar P melewati saluran dengan penghantar netral. Apabila dalam penyaluran daya setiap arus fasa dalam keadaan seimbang, besarnya daya dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$P = 3 [V] [I] \cos \varphi \dots\dots\dots(2.36)$$

Penyusutan daya pada saluran akan terjadi jika daya yang berada diujung terima lebih kecil dari besar daya P.

Pada Gambar 2.8 berikut penyusutan daya dapat terlihat menggunakan diagram fasor tegangan saluran.



Gambar 2.26 Diagram Fasa Tegangan Saluran Daya Model Fasa Tunggal

Diagram diatas merupakan asumsi pemusatan kapasitif yang kecil sehingga bisa diabaikan. Oleh karena itu besar dari arus ujung kirim sama dengan arus ujung terima. Jika tegangan dinotasikan V' dan faktor daya pada ujung terima phi', maka persamaan untuk daya ujung terima, yaitu:

$$P' = 3 [V'] [I] \cos \dots\dots\dots(2.37)$$

Selisih antara P pada persamaan (2.36) dan P' pada persamaan (2.37) memberikan susut daya saluran, yaitu :

$$Pl = P - P' \dots\dots\dots(2.38)$$

$$= 3 [V] [I] \cos \varphi - 3 [V'] [I] \cos \varphi' \dots\dots\dots(2.39)$$

$$= 3 [I] \{ [V] \cos \varphi - [V'] \cos \varphi' \} \dots\dots\dots(2.40)$$

Dimana:

Pl = Susut daya saluran (Watt)

P = Daya pada ujung pengirim (Watt)



P' = Daya pada ujung terima (Watt)

Dengan R adalah tahanan kawat penghantar tiap fasa, oleh karena itu persamaan berubah menjadi :

$$P_l = 3 [I] R \dots\dots\dots(2.41)$$

2.9.2 Penyaluran dan Susut Daya pada Keadaan Arus Tidak Seimbang

Dalam penyaluran daya yang sama tapi tidak dalam keadaan seimbang, maka besar dari arus-arus fasa dinyatakan dalam koefisien a, b, dan c. Jika diketahui besaran arus fasa (I) dan daya (P) dalam keadaan seimbang.

$$[I_R] = a [I] \dots\dots\dots(2.42)$$

$$[I_S] = b [I] \dots\dots\dots(2.43)$$

$$[I_T] = c [I] \dots\dots\dots(2.44)$$

Walaupun besar dari arus setiap fasa berbeda tetapi faktor daya dari ketiga fasa R, S, dan T dianggap sama.

Dengan ini besar daya yang disalurkan sebagai berikut:

$$P = 3 (a + b + c) [V] [I] \cos \varphi \dots\dots\dots(2.45)$$

maka dari persamaan tersebut dapat diperoleh persyaratan koefisien a, b, dan c adalah

$$a + b + c = 3 \dots\dots\dots(2.46)$$

Dimana pada keadaan seimbangan, nilai a = b = c = 1, maka untuk mencari % ketidakseimbangan digunakan persamaan :

$$\% \text{ketidakseimbangan} = \frac{\{|I_a - 1| + |I_b - 1| + |I_c - 1|\}}{3} \times 100\% \dots\dots\dots(2.47)$$

2.9.3 Faktor Daya

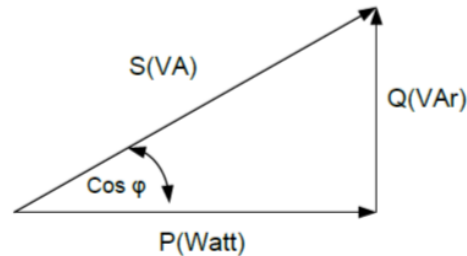
Pengertian faktor daya (cos φ) adalah perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S). Dari pengertian tersebut, faktor daya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

Faktor daya = (Daya Aktif / Daya Semu)

$$Q = \frac{p}{s}$$



$$Q = \frac{(V.I.\cos \varphi)}{V.I}$$



Gambar 2.27 Segitiga Daya

$$\text{Daya Semu} = V.I (VA) \dots\dots\dots(2.48)$$

$$\text{Daya Aktif} = V.I \cos \varphi (\text{Watt})\dots\dots\dots(2.49)$$

$$\text{Daya Reaktif} = V.I \sin \varphi (\text{VAr}) \dots\dots\dots(2.50)$$

2.10. Rugi-Rugi Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Pada Penghantar Netral Akibat pembebanan di tiap fasa yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran pentanahan netral terdapat nilai tahanan dan dialiri arus, maka kawat netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada trafo tidak seimbang. Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral sebesar :

$$P_N = I_N^2 \times R_N \dots\dots\dots (2.51)$$

Dimana :

P_N = Losses yang timbul pada penghantar netral (watt)

I_N = Arus yang mengalir melalui kawat netral (Ampere)

R_N = Tahanan pada kawat netral (Ohm)



2.11 Efisiensi Transformator⁶

Untuk setiap mesin atau peralatan listrik, efisiensi ditentukan oleh besarnya rugi-rugi yang selama operasi normal. Efisiensi dari mesin-mesin berputar / bergerak umumnya antara 50-60 % karena ada rugi gesek dan angon. Transformator tidak memiliki bagian yang bergerak / berputar, maka rugi-rugi ini tidak muncul.

Transformator tidak bergerak, tetapi memiliki rugi-rugi walaupun tidak sebesar pada peralatan listrik seperti mesin-mesin atau peralatan bergerak lainnya. Transformator daya saat ini rata-rata dirancang dengan besar efisiensi minimal 95 % .

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Secara sistematis ditulis :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.52)$$

$$P_{in} = P_{out} + R_{ugi} - r_{ugi} \dots \dots \dots (2.53)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + R_{ugi} - R_{ugi}} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.54)$$

Dimana

η = Efisiensi

P_{out} = daya keluar (*watt*)

P_{in} = daya masuk (*watt*)

2.13 Hubungan Tiga Fasa Dalam Transformator⁷

2.13.1 Hubungan Wye (Y)

Hubungan bintang ialah hubungan trafo tiga fasa, dimana ujung-ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyaluran dari ujung-ujung lilitan merupakan titik netral. Arus transformator tiga phasa denfan kumparan dihubung bintang yaitu : I_A , I_B , I_C masing-masing berbeda 120 derajat.

⁶ Rijono, Drs. Yon., "Dasar Teknik Tenaga Listrik", Yogyakarta : Andi, 2004.

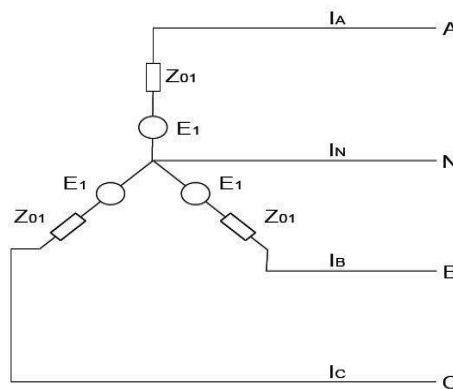
⁷ Lister E. C., 1988, Mesin dan Rangkaian Listrik, Jakarta, Penerbit : Erlangga



Didalam hubungan bintang terdapat arus yang disebut dengan arus phasa. Hanya ada satu penyebutan arus yaitu arus line ke netral disebut arus phasa. Sehingga besar arus line adalah sama dengan arus phasa.

Untuk tegangan yang ada dihubungan bintang dapat diperoleh 2 macam tegangan yaitu

1. Tegangan phasa yaitu antara phasa dan netral
2. Tegangan line yaitu line dan line



Gambar 2.28 Hubungan Wye

Dari gambar dapat diketahui sebagai berikut,

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L} \text{ (ampere)}$$

$$I_{L-L} = I_{ph} \text{ (ampere)} \dots \dots \dots (2.55)$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \text{ (volt)}$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3} V_{PH} \text{ (volt)} \dots \dots \dots (2.56)$$

Dimana

V_{L-L} = Tegangan phasa-phasa

V_{PH} = Tegangan phasa

I_L = arus netral(Ampere)

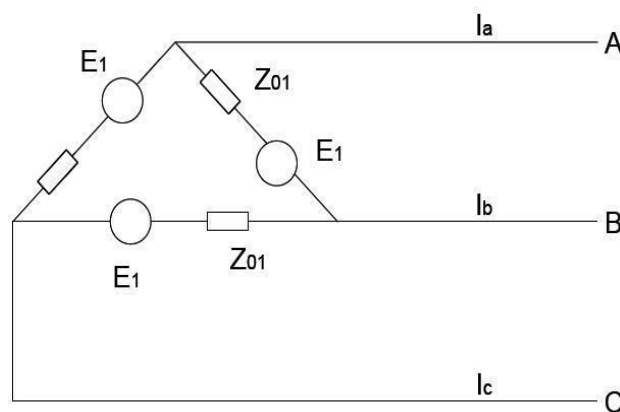
I_{PH} = arus phasa (Ampere)



2.13.2 Hubungan delta (Δ)

Hubungan segitiga adalah suatu hubungan transformator tiga fasa, dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung fasa mula ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama. Tegangan transformator 3 fasa tiga fasa dengan kumparan dihubungkan segitiga yaitu V_A , V_B , V_C masing-masing berbeda 120 derajat.

Didalam hubungan delta terdapat 2 arus yang biasa disebut dengan arus line dan arus fasa berbeda dengan hubungan bintang yang memiliki 2 tegangan dihubungkan delta hanya memiliki satu tegangan yaitu tegangan line.



Gambar 2.29 hubungan delta

Dari gambar dapat diketahui sebagai berikut,

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L} \text{ (ampere)}$$

$$I_{L-L} = \sqrt{3} I_{ph} \text{ (ampere)} \dots \dots \dots (2.57)$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \text{ (volt)}$$

$$V_{L-L} = V_{PH} = E_1 \text{ (volt)} \dots \dots \dots (2.58)$$

Dimana

V_{L-L} = Tegangan line to line

V_{ph} = Tegangan fasa

I_L = arus line (Ampere)

I_{ph} = Arus Fasa (Ampere)



2.14 Persamaan Yang Digunakan dalam perhitungan

2.14.1 Perhitungan Arus Beban Penuh dan Arus Hubung Singkat

Telah diketahui bahwa daya transformator distribusi bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots \dots \dots (2.59)$$

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Primer Transformator (kV)

I = Arus Jala-jala (A)

Dengan demikian untuk menghitung arus beban penuh (full load) dapat menggunakan rumus :

$$I_{fl} = \frac{S}{\sqrt{3}V} \dots \dots \dots (2.60)$$

I_{fl} = Arus Beban Penuh (A)

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Sekunder Transformator (kV)

Sedangkan untuk menghitung arus hubung singkat pada transformator digunakan rumus :

$$I_{SC} = \frac{S \cdot 100}{\%Z \sqrt{3}V} \dots \dots \dots (2.61)$$

I_{SC} = Arus Hubung Singkat (A)

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Sekunder Transformator (kV)

%Z = Persen Impedansi Transformator

Dengan demikian untuk menghitung persentase pembebanannya adalah sebagai berikut

$$\%b = \frac{I_{ph}}{I_{FL}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.62)$$

% b = Persentase Pembebanan (%)

I_{ph} = Arus Fasa (A)

I_{FL} = Arus Beban Penuh (A)



2.14.2 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

$$I_{rata - rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots(2.63)$$

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

$$a = \frac{I_R}{I} \dots\dots\dots(2.64)$$

$$b = \frac{I_S}{I} \dots\dots\dots(2.65)$$

$$c = \frac{I_T}{I} \dots\dots\dots(2.66)$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

$$= \frac{\{|I_a - 1| + |I_b - 1| + |I_c - 1|\}}{3} \times 100\% \dots\dots\dots(2.67)$$

2.14.3 Perhitungan Losses (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Netral

Pada Penghantar Netral Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S dan fasa T) mengalirlah arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan losses (rugi-rugi).

Dan losses pada penghantar netral dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_N = I_N^2 \times R_N \dots\dots\dots(2.68)$$

P_N = Losses yang timbul pada penghantar netral (Watt)

I_N = Arus yang mengalir melalui kawat netral (Ampere)

R_N = Tahanan pada kawat netral (Ω)