



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

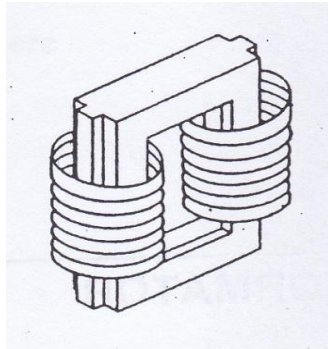
Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

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

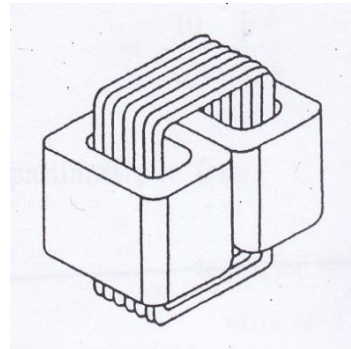
Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnetik, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks



bersama. Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua macam transformator, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.



Gambar 2.1. Tipe Inti¹



Gambar 2.2. Tipe Cangkang²

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.

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

² *ibid*



3. Minyak trafo

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 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 Hygrokopsis (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:

$$e = - \left(\frac{d\Psi}{dt} \right) \dots\dots\dots (2.1)^3$$

Keterangan:

e = emf sesaat (instantaneous emf)

Ψ = fluks terhubung (linked fluks)

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

$$E = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot N \cdot f \dots\dots\dots (2.2)^3$$

Keterangan:

E = tegangan (rms)

N = jumlah lilitan

f = frekuensi

Φ_m = fluks puncak (peak fluks)

atau:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.3)^3$$

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 :

$$P_1 = P_2 \dots\dots\dots (2.4)^3$$

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots (2.5)^3$$

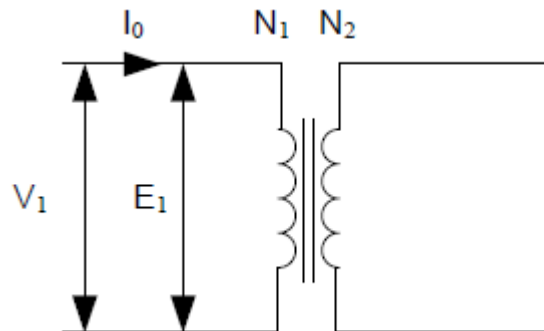
³ Yon Rijono, *Dasar Teknik Listrik*, Penerbit Andi, Yogyakarta: 1997



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

2.1.3 Transformator Tanpa Beban

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



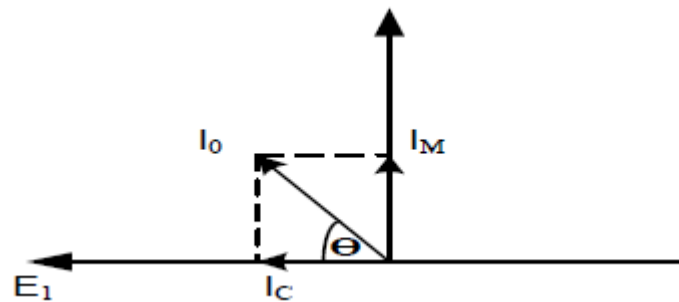
Gambar 2.3 Transformator Tanpa Beban⁵

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.

⁴ Yon Rijono, *Dasar Teknik Listrik*, Penerbit Andi, Yogyakarta: 1997

⁵ *ibid.* Hal 6.

Gambar 2.4 Hubungan Antara $I_0 \phi$ dan E_1 ⁶

Dari gambar 2.4 terlihat bahwa:

$$I_0 = I_C + I_M \dots\dots\dots(2.7)^7$$

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

$$I_C = I_0 \cos \theta \dots\dots\dots(2.8)^7$$

$$I_0 = \sqrt{I_C^2 + I_M^2} \dots\dots\dots(2.9)^7$$

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 :

$$I_M^2 \cdot X_M = I_0^2 \cdot X_M \dots\dots\dots(2.10)^7$$

2.1.4 Transformator Berbeban

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

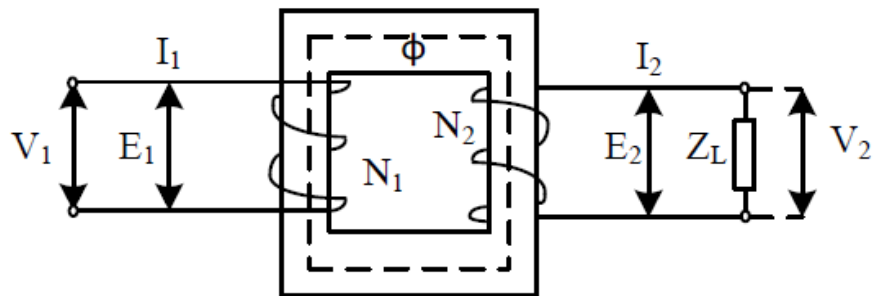
$$I_2 = \frac{V_2}{Z_L} \dots\dots\dots(2.11)^7$$

dengan Θ_2 = faktor kerja beban.

Gambar 2.5 menunjukkan rangkaian transformator dengan keadaan berbeban.

⁶ Yon Rijono, *Dasar Teknik Listrik*, Penerbit Andi, Yogyakarta: 1997. Hal 7.

⁷ Ibid.

Gambar 2.5 Transformator Berbeban⁸

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 I_M . 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 :

$$I_2 = I_0 + I_2' \dots\dots\dots (2.12)^9$$

Bila rugi besi diabaikan (I_C diabaikan) maka $I_0 = I_M$.

$$I_1 = I_M + I_2' \dots\dots\dots (2.13)^9$$

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

$$N_1 \cdot I_M = N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots (2.14)^9$$

$$N_1 \cdot I_M = N_1 (I_M + I_2') - N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots (2.15)^9$$

Sehingga

$$N_1 \cdot I_2' = N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots (2.16)^9$$

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

Jadi,

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \text{ atau } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (2.17)^9$$

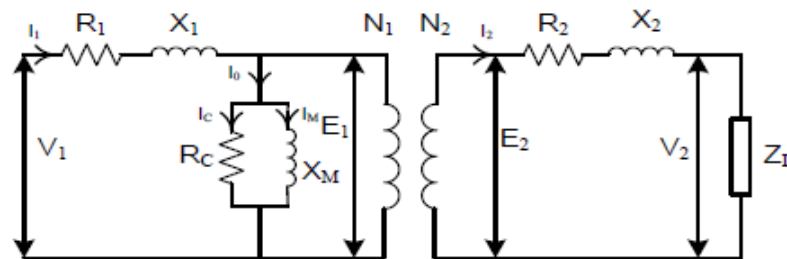
⁸ Zuhal, *Dasar Tenaga Listrik*, Penerbit ITB, Bandung: 1991. Hal 17.

⁹ Ibid.



2.1.5 Rangkaian Ekvivalen 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 ekvivalen trafo dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.6 Rangkaian Ekvivalen 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:

$$V_1 = I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot jX_1 + E_1 \dots \dots \dots (2.18)^{11}$$

Atau dalam bentuk amplitudo ditulis:

$$V_1 = I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot X_1 + E_1 \dots \dots \dots (2.19)^{11}$$

¹⁰ Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik*, Penerbit ITB, Bandung: 1991. Hal 22.

¹¹ Ibid.

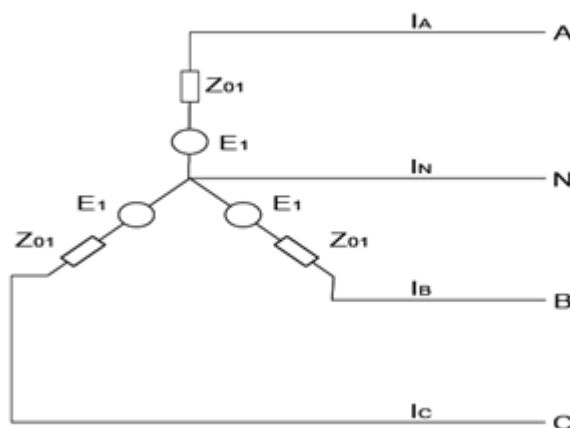


2.1.6 Hubungan Tiga Fasa Dalam Transformator

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. Hubungan Wye (Y)

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



Gambar 2.7 Hubungan Wye (Y)¹²

Dari gambar 2.7 dapat diketahui sebagai berikut:

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L} (A) \dots\dots\dots (2.20)^{13}$$

$$I_{L-L} = I_{ph} (A) \dots\dots\dots (2.21)^{13}$$

Dimana:

I_{L-L} = Arus line to line

I_{ph} = Arus Arus line to netral

¹² Hotdes Lumbanraja, *Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator Tiga Fasa Hubungan Open-Delta*. 2008: Hal 44.

¹³ Ibid.



Dan

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} (V) \dots\dots\dots (2.22)^{15}$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3}V_{ph} = \sqrt{3}E_1 (V) \dots\dots\dots (2.23)^{15}$$

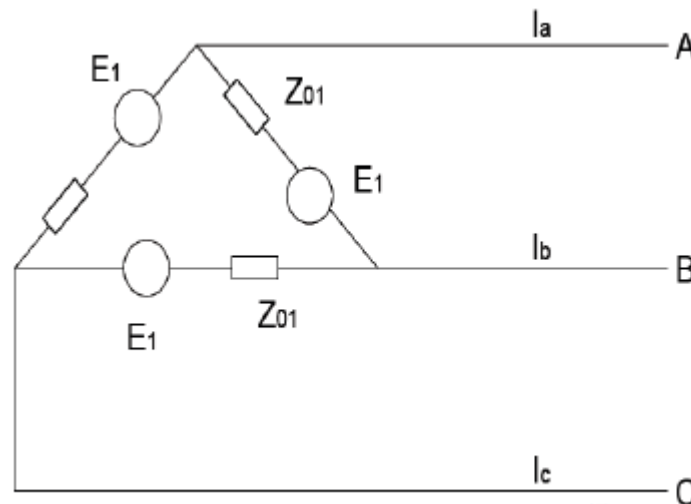
Dimana:

V_{L-L} = Tegangan line to line

V_{ph} = Tegangan line to netral

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)¹⁴

Dari gambar diatas dapat kita ketahui sebagai berikut:

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L} (A) \dots\dots\dots (2.24)^{15}$$

$$I_{L-L} = \sqrt{3}I_{ph} (A) \dots\dots\dots (2.25)^{15}$$

Dimana:

I_{L-L} = Arus line to line

¹⁴ Hotdes Lumbanraja, *Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator Tiga Fasa Hubungan Open-Delta*. 2008: Hal 45.



I_{ph} = Arus Arus line to netral

Dan

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} (V) \dots\dots\dots (2.26)^{15}$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3}V_{ph} = \sqrt{3}E_1 (V) \dots\dots\dots (2.27)^{15}$$

Dimana:

V_{L-L} = Tegangan line to line

V_{ph} = Tegangan line to netral

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

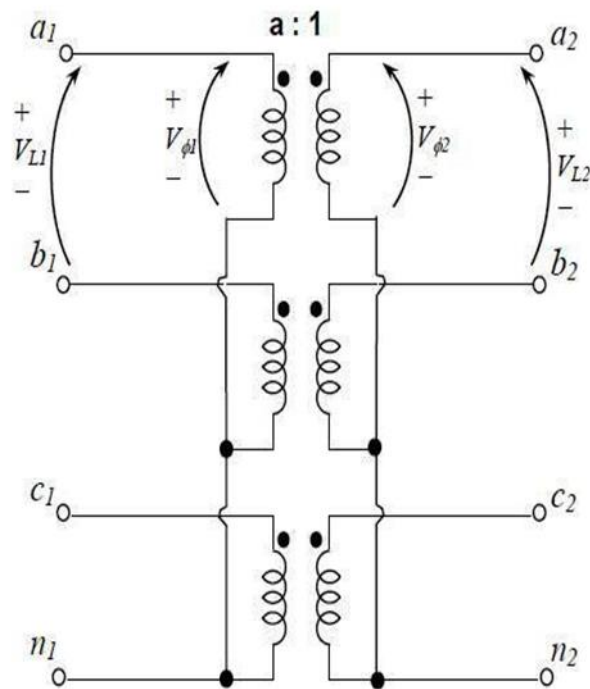
2.1.7 Jenis – jenis Hubungan Belitan Transformator 3 Fasa

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 phasa dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut ini.

¹⁵ Hotdes Lumbanraja, *Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator Tiga Fasa Hubungan Open-Delta*. 2008

Gambar 2.9 Transformator Hubungan Y – Y¹⁶

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

$$V_{L1} = \sqrt{3}V_{\phi 1} \text{ (V)} \dots \dots \dots (2.28)^{16}$$

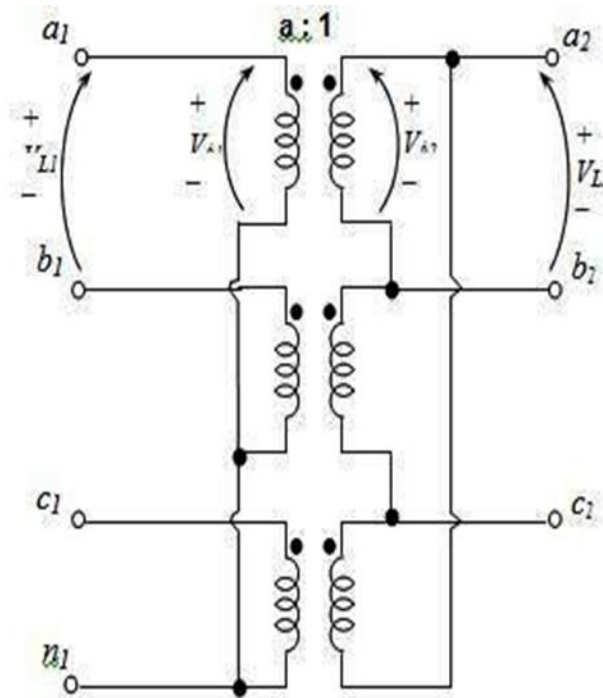
Tegangan fasa primer sebanding dengan tegangan fasa sekunder dan perbandingan belitan transformator. Maka diperoleh perbandingan tegangan pada transformator adalah:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = a \dots \dots \dots (2.29)^{16}$$

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.

¹⁶ Hotdes Lumbanraja, *Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator Tiga Fasa Hubungan Open-Delta*. 2008: Hal 45.

Gambar 2.10 Transformator Hubungan Y - Δ¹⁷

Pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat primer sebanding dengan tegangan phasa fasa $V_{LP} = \sqrt{3}V_{\phi P}$ 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:

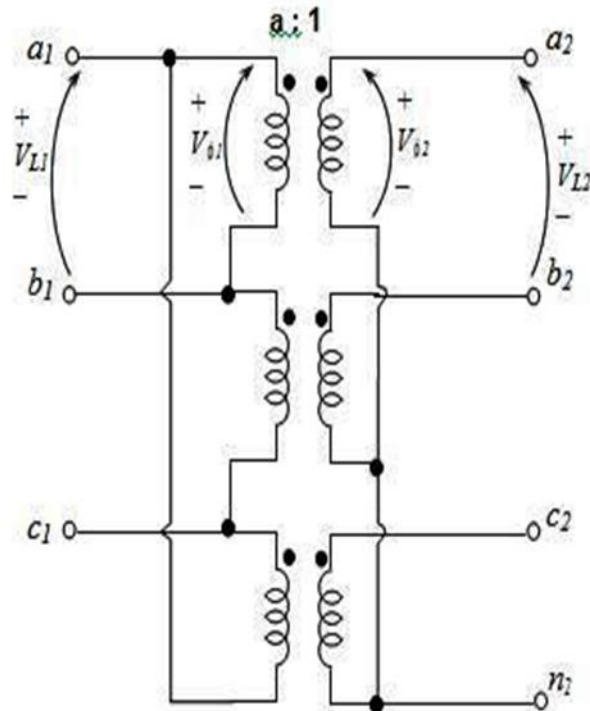
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \sqrt{3}a \dots \dots \dots (2.30)^{17}$$

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

3. Hubungan Delta – Wye (Δ - Y)

Umumnya digunakan untuk menaikkan tegangan dari tegangan pembangkitan ke tegangan transmisi. Hubungan Δ – Y pada transformator tiga fasa ditunjukkan pada gambar 2.11 dibawah ini.

¹⁷ Hotdes Lumbanraja, *Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator Tiga Fasa Hubungan Open-Delta*. 2008: Hal 45.

Gambar 2.11 Transformator Hubungan Δ - Y¹⁸

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:

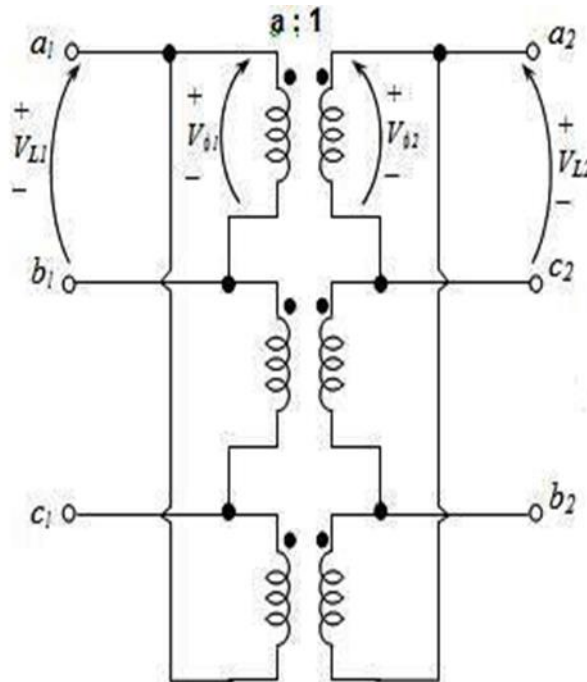
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = \frac{\sqrt{3}}{a} \dots \dots \dots (2.31)^{18}$$

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

4. Hubungan Delta – Delta (Δ - Δ)

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

¹⁸ Hotdes Lumbanraja, *Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator Tiga Fasa Hubungan Open-Delta*. 2008: Hal 46.

Gambar 2.12 Transformator Hubungan $\Delta - \Delta$ ¹⁹

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:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a \dots\dots\dots (2.32)^{19}$$

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

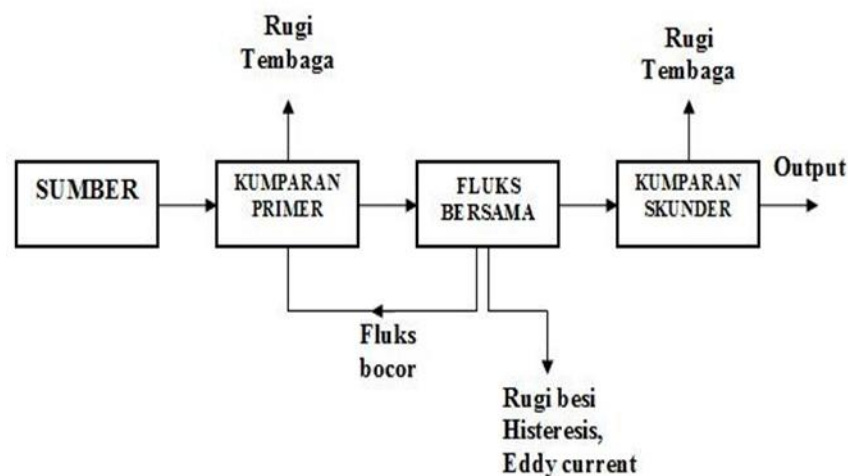
¹⁹ Hotdes Lumbanraja, *Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Efisiensi Transformator Tiga Fasa Hubungan Open-Delta*. 2008: Hal 47.



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.

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



Gambar 2.13 Diagram Rugi – rugi Transformator²⁰

1. Rugi Tembaga (P_{Cu})

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

$$P_{Cu} = I^2 R \dots\dots\dots (2.33)^{20}$$

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

²⁰ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254, 2013



2. Rugi Besi (P_i)

Rugi besi terdiri atas:

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

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt} \dots \dots \dots (2.34)^{21}$$

Keterangan:

K_h = konstanta

B_{maks} = fluks maksimum (weber)

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

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks}^2 \dots \dots \dots (2.35)^{21}$$

$$B_M = \frac{\phi_M}{A} \dots \dots \dots (2.36)^{21}$$

Dimana,

$$\phi_M = \frac{10^8 \cdot (E_{ff})_2}{4,44 \cdot f \cdot N_2} \dots \dots \dots (2.37)^{21}$$

Dan

$$(E_{ff})_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \phi_M \cdot 10^8 \text{ Volt} \dots \dots \dots (2.38)^{21}$$

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah:

$$P_i = P_h + P_e \dots \dots \dots (2.39)^{21}$$

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

²¹ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254, 2013

Tabel 2.1 Nilai Rugi – rugi Transformator Distribusi²²

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

2.1.9 Efisiensi Transformator

Efisiensi dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum rugi} = 1 - \frac{\sum rugi}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.40)^{23}$$

Keterangan:

η = efisiensi (%)

P_{out} = daya keluar (watt)

P_{in} = daya masuk (watt)

Dimana,

$$\sum rugi = P_{Cu} + P_i \dots\dots\dots (2.41)^{23}$$

²² SPLN 50: 1997.

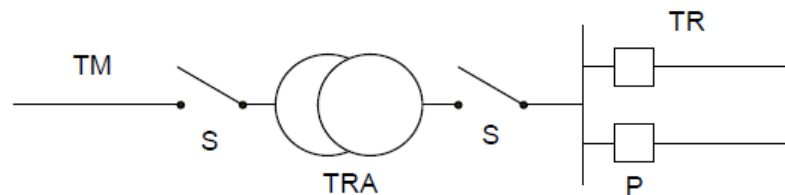
²³ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254, 2013



2.2 Gardu Distribusi

Sebuah gardu distribusi pada dasarnya merupakan tempat memasang transformator distribusi beserta perlengkapannya. Sebagaimana diketahui, transformator distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah (di Indonesia 20 kV) menjadi tegangan rendah (di Indonesia 220/380V). Dengan demikian transformator distribusi merupakan suatu penghubung antara jaringan tegangan menengah dan jaringan tegangan rendah. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa di dalam sebuah gardu distribusi akan “masuk” saluran tegangan menengah dan “keluar” saluran tegangan rendah.

Paling banyak gardu distribusi hanya berisi satu transformator sebagaimana terlihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Skema Gardu Distribusi²⁴

Keterangan:

TRA = Transformator Distribusi

P = Proteksi

S = Saklar atau Pemisah

TM = Tegangan Menengah

TR = Tegangan Rendah

Kabel tegangan menengah memasuki gardu dan melalui sebuah saklar atau pemisah dihubungkan pada transformator. Saklar atau pemisah pada sisi tegangan rendah sering tidak terpasang dan langsung disambungkan pada proteksi yang berupa sekering.

²⁴ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254, 2013: Hal 31.



2.3 Transformator Distribusi

Transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator step- down 20KV/400V. Tegangan fasa ke fasa sistem jaringan tegangan rendah adalah 380 V. Karena terjadi drop tegangan, maka pada rak tegangan rendah dibuat di atas 380 V agar tegangan pada ujung penerima tidak lebih kecil dari 380 V. Pada kumparan primer akan mengalir arus jika kumparan primer dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik, sehingga pada inti transformator yang terbuat dari bahan ferromagnet akan terbentuk sejumlah garis-garis gaya magnet (fluks = ϕ).

Karena arus yang mengalir merupakan arus bolak-balik, maka fluks yang terbentuk pada inti akan mempunyai arah dan jumlah yang berubah-ubah. Jika arus yang mengalir berbentuk sinusoidal, maka fluks yang terjadi akan berbentuk sinusoidal pula. Karena fluks tersebut mengalir melalui inti yang mana pada inti tersebut terdapat belitan primer dan sekunder, maka pada belitan primer dan sekunder tersebut akan timbul ggl (gaya gerak listrik) induksi, tetapi arah ggl induksi primer berlawanan dengan arah ggl induksi sekunder. Sedangkan frekuensi masing-masing tegangan sama dengan frekuensi sumbernya. Hubungan transformasi tegangan adalah sebagai berikut:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots (2.42)^{25}$$

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 = perbandingan transformasi

²⁵ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254, 2013



2.4 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:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots\dots\dots (2.43)^{26}$$

Dimana,

P_N = rugi rugi pada penghantar netral transformator (watt)

I_N = arus pada penghantar netral (A)

R_N = tahanan penghantar netral

2.5 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.

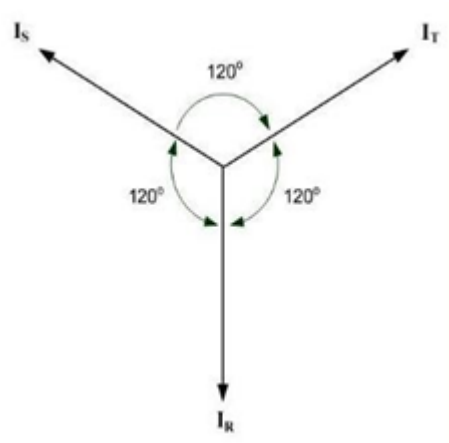
Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3, yaitu :

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

²⁶ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254, 2013



Untuk lebih jelasnya dapat digambarkan dengan vektor diagram arus pada gambar 2. 15.



Gambar 2.15 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Seimbang²⁷

Gambar 2.15 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:

$$I_A = \frac{V \angle 0^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -\theta \dots\dots\dots (2.45)^{27}$$

$$I_B = \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -120^\circ - \theta \dots\dots\dots (2.45)^{27}$$

$$I_C = \frac{V \angle -240^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -240^\circ - \theta \dots\dots\dots (2.45)^{27}$$

Disubstitusikan pada persamaan 2.46:

$$\begin{aligned} I_N &= I_A + I_B + I_C \\ &= I \angle -\theta + I \angle -120^\circ - \theta + I \angle -240^\circ - \theta \\ &= I \cos(-\theta) + jI \sin(-\theta) + I \cos(-\theta - 120^\circ) + jI \sin(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ) \end{aligned}$$

²⁷ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254, 2013.



$$= I[\cos(-\theta) + \cos(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ)] + jI[\sin(-\theta) + \sin(-\theta - 120^\circ) + \sin(-\theta - 240^\circ)] \dots\dots\dots (2.46)^{28}$$

Dengan menggunakan persamaan identitas trigonometri:

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \dots\dots\dots (2.47)^{28}$$

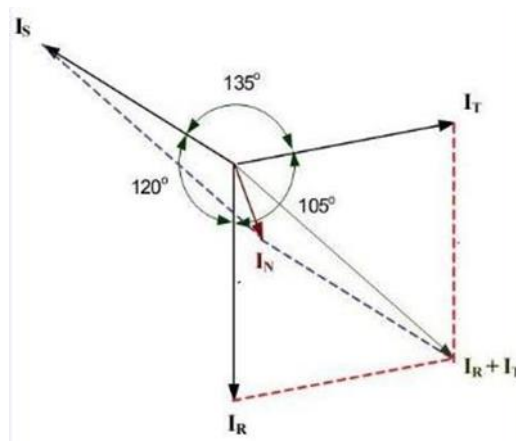
$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta \dots\dots\dots (2.48)^{28}$$

Masukkan identitas trigonometri ke persamaan:

$$I_N = I[\cos(-\theta) + \cos(-\theta) \cos 120^\circ + \sin(-\theta) \sin 120^\circ + \cos(-\theta) \cos 240^\circ + \sin(-\theta) \sin 240^\circ] + jI[\sin(-\theta) + \sin(-\theta) \cos 120^\circ - \cos(-\theta) \sin 120^\circ + \sin(-\theta) \cos 240^\circ - \cos(-\theta) \sin 240^\circ]$$

$$I_N = I \left[\cos(-\theta) - \frac{1}{2} \cos(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(-\theta) - \frac{1}{2} \cos(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(-\theta) \right] + jI \left[\sin(-\theta) - \frac{1}{2} \sin(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(-\theta) - \frac{1}{2} \sin(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(-\theta) \right]$$

$$I_N = 0 \text{ A (pada saat keadaan beban seimbang)} \dots\dots\dots (2.49)^{28}$$



Gambar 2.16 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Tidak Seimbang²⁸

²⁸ Nurul Ambiya, Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254, 2013.



Sedangkan pada gambar 2.16 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.

2.5.1 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots (2.50)^{29}$$

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

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.51)^{29}$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.52)^{29}$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.53)^{29}$$

²⁹ Badaruddin, Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon, 2012: Hal 17.