

BAB II LANDASAN TEORI

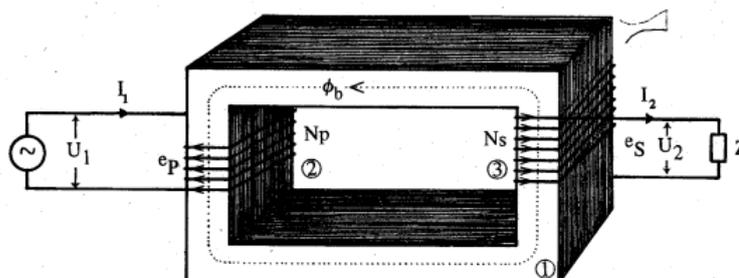
2.1. Transformator

Transformator atau yang biasa disingkat dengan trafo adalah alat untuk mengubah energi listrik pada satu tingkat tegangan menjadi energi listrik pada tingkat tegangan lain melalui aksi medan magnet. Hal tersebut memiliki peran yang sangat penting dalam kehidupan modern dengan memungkinkan transmisi tenaga listrik jarak jauh yang ekonomis (Chapman, 2012).

Penggunaan transformator sangat beragam, mulai dari bidang sistem tenaga sampai bidang elektronika. Dalam sistem tenaga, implementasi penggunaan biasanya di peruntukan pada sistem transmisi dan distribusi. Di mana tugas dari transformator tersebut yaitu menaikkan dan menurunkan tegangan sesuai kebutuhan. Karena dalam sistem transmisi dan distribusi memperhitungkan efektivitas agar terhindar dari rugi-rugi daya akibat dari penyulang yang tidak pendek (Tobi, 2018).

2.1.1. Bagian-bagian Transformator

Secara sederhana transformator terdiri dari 3 komponen utama yaitu inti, kumparan primer dan kumparan sekunder.



Gambar 2. 1 Bagian-bagian Transformator

(Sumanto, 1991)

Gambar 2.1 memperlihatkan bagian-bagian dari transformator di antaranya:

1. Inti/teras/*kern*
2. Gulungan primer, dihubungkan dengan sumber listrik
3. Gulungan sekunder, dihubungkan dengan beban

2.1.2. Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja dengan prinsip apabila kumparan primer dialiri arus bolak balik akan mengakibatkan munculnya fluks magnet pada kumparan primer dan menyebabkan induksi sehingga timbul juga fluks pada kumparan sekunder yang mengakibatkan mengalirnya arus pada kumparan sekunder. (Nugraha et al., 2022)

Akibat adanya fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan primer akan timbul GGL induksi E_p .

Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah :

$$E_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \quad (2.1)$$

Di mana

E_p : GGL induksi pada kumparan primer

N_p : Jumlah lilitan kumparan primer

$d\phi$: perubahan garis-garis gaya magnet dalam satuan weber

(1 weber = 10^8 maxwell)

dt : perubahan waktu dalam satuan detik

Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi E_p juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (*mutual fluks*). Dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi E_s pada kumparan sekunder.

Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah :

$$E_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \quad (2.2)$$

Di mana

E_s : GGL induksi pada kumparan sekunder

Dari persamaan 2.1 dan 2.2 di atas akan didapatkan perbandingan lilitan berdasarkan perbandingan GGL induksi yaitu:

$$a = \frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.3)$$

Di mana

a : adalah nilai perbandingan lilitan transformator (*turn ratio*)

Apabila,

$a < 1$, maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan

$a > 1$, maka transformator berfungsi untuk menurunkan tegangan

Fluks pada saat t dinyatakan dengan persyaratan $\phi(t) = \phi_m \sin \omega t$, (di mana ϕ_m adalah harga fluks maksimum dalam satuan weber) sehingga GGL induksi pada kumparan primer adalah :

$$E_p = -N_p \frac{d\phi}{dt}$$

$$E_p = -N_p \frac{d\phi_m \sin \omega t}{dt}$$

$$E_p = -N_p \omega \phi_m \sin \omega t$$

$$E_p = N_p \omega \phi_m \sin \left(-\frac{\omega t}{2} \right) \quad (2.4)$$

Dari persamaan 2.4 dapat dibuktikan bahwa, fluks magnet fungsi sinus akan menimbulkan GGL induksi fungsi sinus. GGL induksi akan ketinggalan 90% terhadap fluks magnet.

GGL induksi kumparan primer maksimum adalah $(E_p)_{maks} = N_p \omega \Phi_m$ dan besarnya tegangan efektif dapat dihitung dengan persamaan E_p dapat dihitung dengan persamaan

$$E_p = \frac{(\varepsilon_p)_{maks}}{\sqrt{2}}$$

$$E_p = \frac{N_p \omega \Phi_m}{\sqrt{2}}$$

$$E_p = \frac{2\pi f N_p \Phi_m \sqrt{2}}{2}$$

$$E_p = 3,14 \cdot 1,41 f N_p \Phi_m$$

$$E_p = 4,44 f N_p \Phi_m \quad (2.5)$$

Dengan cara yang sama, didapatkan

$$E_s = 4,44 f N_s \Phi_m \quad (2.6)$$

Apabila transformator dianggap ideal, sehingga dianggap tidak terdapat rugi-rugi daya (*lossis*), maka daya *input* (P_i) dapat dianggap sama dengan daya *output* (P_o) maka

$$V_p I_p = V_s I_s$$

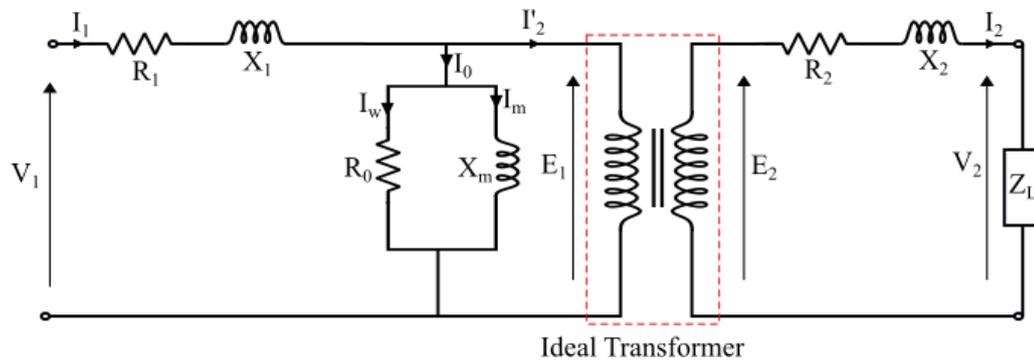
$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{V_s}{V_p} \quad (2.7)$$

Maka untuk transformator ideal berlaku

$$a = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.8)$$

Transformator memiliki rangkaian ekuivalen yang terdiri dari beberapa besaran yang saling berkaitan seperti persamaan 2.5 dan persamaan 2.6. GGL

induksi kumparan primer dan GGL induksi kumparan sekunder diibaratkan pada transformator ideal dalam rangkaian ekuivalen transformator di bawah ini.



Gambar 2. 2 Rangkaian Ekuivalen Transformator

(Saini, 2021)

Dari gambar 2.2 di atas R_1 adalah resistansi lilitan primer X_1 adalah reaktansi bocor lilitan primer dan R_2 adalah resistansi lilitan sekunder X_2 adalah reaktansi bocor lilitan sekunder.

Berhubung Z_L harus diperhatikan, maka tegangan sekunder dapat dirumuskan:

$$V_2 = E_2 - (R_2 + jX_2)I_2 = E_2 - I_2 Z_2 \quad (2.9)$$

Tegangan primer dapat dihitung dengan menambahkan rugi-rugi R_1 dan X_1 , yaitu:

$$V_1 = -E_1 + (R_1 + jX_1)I_1 = -E_1 + I_1 Z_1 \quad (2.10)$$

Total arus primer yang ditarik dari suplai sama dengan jumlah fasor arus tanpa beban dan arus yang diperlukan untuk menyuplai arus beban melalui lilitan sekunder.

$$I_1 = I_0 + I_2' \quad (2.11)$$

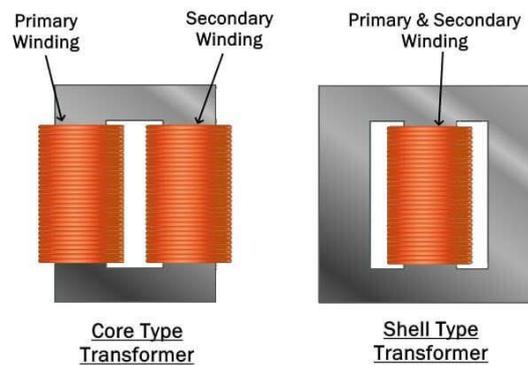
2.1.3. Jenis-jenis Transformator

Jenis-jenis transformator dapat dibagi menjadi beberapa macam, tergantung dari letak kumparan terhadap inti, perbandingan transformasi, konstruksi inti

transformator, pendinginan transformator, jenis fasa tegangan dan kegunaan (Sumanto, 1991).

A. Letak kumparan terhadap inti

1. *Core type* (jenis inti), bila kedudukan kumparan mengelilingi inti
2. *Shell type* (jenis cangkang), bila kumparan dikelilingi inti



Gambar 2. 3 Konstruksi transformator *core type* & *shell type*
(Neupane, 2020)

B. Perbandingan transformasi

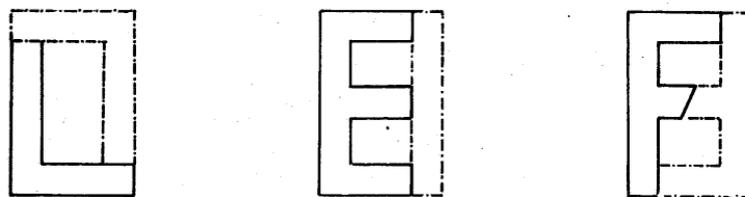
Perbandingan yang dimaksud di sini yaitu perbandingan antara banyaknya kumparan primer dan kumparan sekunder.

1. Transformator penaik tegangan, bila GGL induksi sekunder lebih besar dari GGL induksi primer
2. Transformator penurun tegangan, bila GGL induksi primer lebih besar dari GGL induksi sekunder

C. Konstruksi inti transformator

1. Bentuk L, inti transformator disusun dari pelat-pelat berbahan feromagnetik yang berbentuk huruf L yang disusun saling isi mengisi.
2. Bentuk E, inti transformator disusun dari pelat-pelat berbahan feromagnetik yang berbentuk huruf E yang disusun saling isi mengisi.

3. Bentuk F, inti transformator disusun dari pelat-pelat berbahan feromagnetik yang berbentuk huruf F yang disusun saling mengisi.



Gambar 2. 4 Bentuk Konstruksi Inti Transformator huruf L, E, dan F
(Sumanto, 1991)

D. Jenis fasa tegangan

1. Transformator satu fasa, bila transformator digunakan untuk memindahkan tenaga listrik satu fasa
2. Transformator tiga fasa, bila transformator digunakan untuk memindahkan tenaga listrik satu fasa

E. Cara pendinginan transformator

Tabel 2. 1 Jenis Transformator Berdasarkan Cara Pendinginan
(Sumanto, 1991)

Cara Pendinginan	Jenis	Singkatan
Alam	<i>Air natural cooling</i> (Pendinginan tidak menggunakan bantuan apa pun, kecuali udara biasa)	AN
	<i>Oil-immersed natural cooling</i> (Transformator dimasukkan dalam minyak transformator)	ON
	<i>Oil immersed forced-oil circulation with natural cooling</i> (Transformator dimasukkan dalam minyak yang dialirkan)	OFN
Pendingin buatan (udara)	<i>Oil-immersed forced-oil-circulation with air-blast cooling</i> (Transformator dimasukkan dalam minyak yang dialirkan dengan udara dihembuskan)	OFB
	<i>Oil-immersed air-blast cooling</i>	OB

	(Transformator dimasukkan dalam minyak dengan udara dihembuskan)	
	<i>Air-blast cooling</i> (Pendinginan dengan udara dihembuskan)	AB
Pendingin buatan (air)	<i>Oil-immersed water cooling</i> (Transformator dimasukkan dalam minyak, pendinginan dibantu juga dengan air)	OW
	<i>Oil-immersed forced-oil-circulation with water cooling</i> (Transformator dimasukkan dalam minyak yang dialirkan, pendinginan dibantu juga dengan air)	OFW

F. Vektor Arah Jam

1. Standard kelompok sambungan trafo 3 fasa dengan jam 12 atau jam 0

BEDA FASE	SIMBOL VEKTOR	DIAGRAM VEKTOR TEGANGAN		SAMBUNGAN BELITAN
		PRIMER	SEKUNDER	
0°	YyO			
	DdO			
	DzO			

Gambar 2. 5 Sambungan trafo 3 fasa dengan jam 12 atau jam 0

(Sumanto, 1991)

2. Standard kelompok sambungan trafo 3 fasa dengan jam 6

BEDA FASE	SIMBOL VEKTOR	DIAGRAM VEKTOR TEGANGAN		SAMBUNGAN BELITAN
		PRIMER	SEKUNDER	
180°	YY6			
	Dd6			
	Dz6			

Gambar 2. 6 Sambungan trafo 3 fasa dengan jam 6

(Sumanto, 1991)

3. Standard kelompok sambungan trafo 3 fasa dengan jam 1

BEDA FASE	SIMBOL VEKTOR	DIAGRAM VEKTOR TEGANGAN		SAMBUNGAN BELITAN
		PRIMER	SEKUNDER	
-30°	Dy I			
	Yd I			
	Yz I			

Gambar 2. 7 Sambungan trafo 3 fasa dengan jam 1

(Sumanto, 1991)

4. Standard kelompok sambungan trafo 3 fasa dengan jam 11

BEDA FASE	SIMBOL VEKTOR	DIAGRAM VEKTOR TEGANGAN		SAMBUNGAN BELITAN
		PRIMER	SEKUNDER	
$+30^\circ$	Dy II			
	Yd II			
	Yz II			

Gambar 2. 8 Sambungan trafo 3 fasa dengan jam 11

(Sumanto, 1991)

2.2. Hubungan Pada Transformator Tiga Fasa

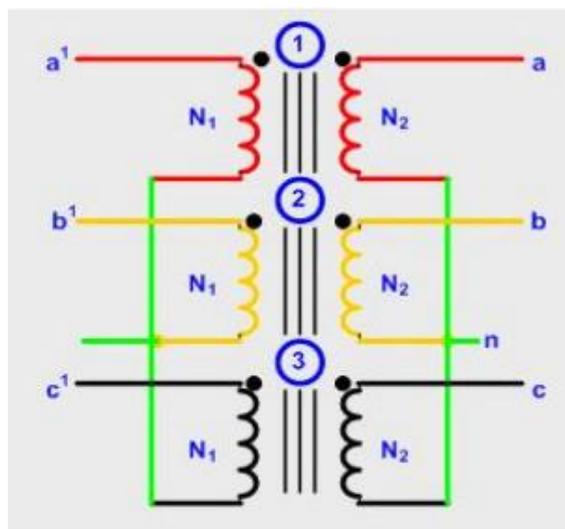
Hubungan pada transformator tiga fasa sangat beragam tergantung dengan kebutuhan penggunaannya, berikut merupakan ragamnya.

2.2.1. Transformator 3 Fasa Hubungan Bintang Bintang

Sesuai dengan namanya, transformator jenis ini pada masing-masing terminalnya dihubungkan secara bintang dan titik netralnya dijadikan satu. Hubungan ini akan lebih ekonomis untuk arus nominal yang kecil.

Perhitungan pada hubungan bintang-bintang (Supriyadi, 2017).

$$a = \frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi p}}{\sqrt{3}V_{\phi s}} \quad (2.12)$$



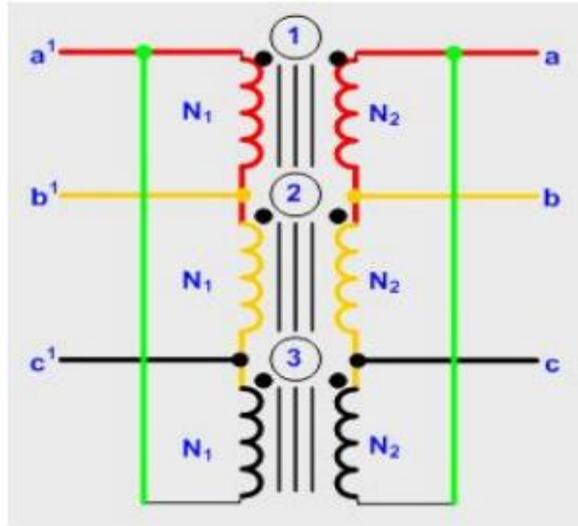
Gambar 2. 9 Transformator Hubungan Bintang Bintang
(Supriyadi, 2017)

2.2.2. Transformator 3 Fasa Hubungan Segitiga Segitiga

Pada transformator jenis ini pada masing-masing terminalnya dihubungkan secara delta sehingga hanya terdapat tiga kawat penghantar fasa tanpa adanya kawat penghantar netral. Penggunaan hubungan ini biasanya pada sistem dengan penyaluran arus yang besar pada tegangan yang rendah (Supriyadi, 2017).

Perhitungan pada hubungan bintang-bintang.

$$a = \frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi p}}{V_{\phi s}} \quad (2.13)$$



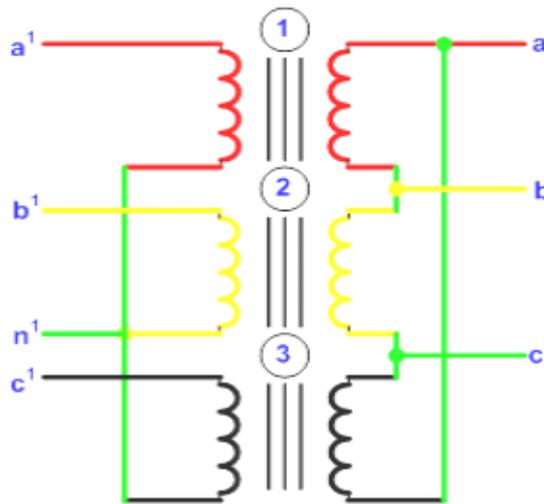
Gambar 2. 10 Transformator Hubungan Segitiga Segitiga
(Supriyadi, 2017)

2.2.3. Transformator 3 Fasa Hubungan Bintang Segitiga

Pada transformator jenis ini pada sisi primernya dirangkai secara bintang sementara pada sisi sekundernya dirangkai secara delta. Penggunaan hubungan ini biasanya pada sistem distribusi untuk menurunkan tegangan menengah ke tegangan rendah yang akan dihubungkan langsung ke beban (Supriyadi, 2017).

Perhitungan pada hubung bintang segitiga.

$$\sqrt{3}a = \frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi p}}{V_{\phi s}} \quad (2.14)$$



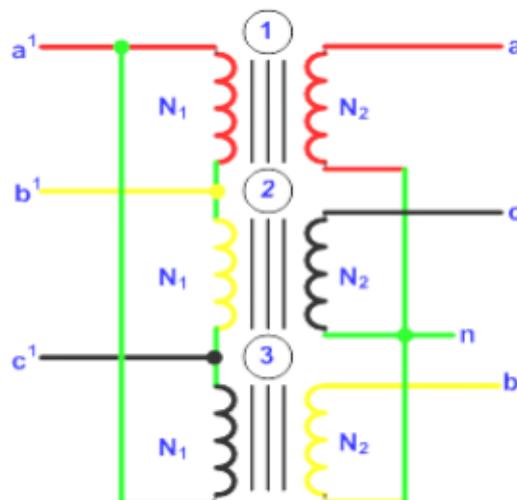
Gambar 2. 11 Transformator Hubungan Bintang Segitiga
(Supriyadi, 2017)

2.2.4. Transformator 3 Fasa Hubungan Segitiga Bintang

Pada transformator jenis ini pada sisi primernya dirangkai secara delta sementara pada sisi sekundernya dirangkai secara bintang. Penggunaan hubungan ini biasanya pada sistem transmisi untuk menaikkan tegangan sebelum disalurkan ke penyulang (Supriyadi, 2017).

Perhitungan pada hubung segitiga bintang.

$$\frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi p}}{\sqrt{3}V_{\phi s}} \tag{2. 15}$$

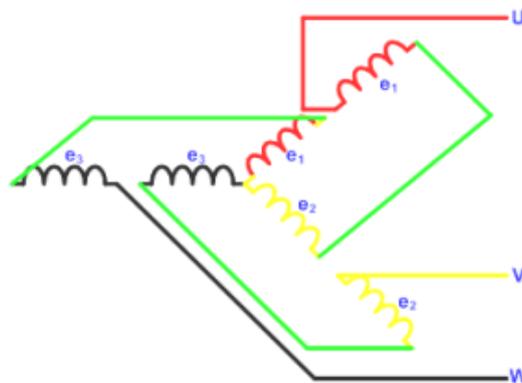


Gambar 2. 12 Transformator Hubungan Segitiga Bintang
(Supriyadi, 2017)

2.2.5. Transformator 3 Fasa Hubungan Zig-Zag

Mayoritas transformator dihubungkan dengan bintang. Namun harus ada syarat yang dipenuhi agar tidak terjadi tegangan di titik bintang yang tidak diinginkan yaitu dengan cara beban yang dihubungkan harus seimbang.

Untuk menghindari terjadinya tegangan di titik bintang, yaitu dengan menghubungkan sisi sekunder dalam hubungan zig-zag dimana terdapat enam kumparan yang dihubungkan secara khusus. Penyambungan khusus tersebut dilakukan supaya arus berlawanan dan menjadikan tegangan bintang menjadi 0. (Supriyadi, 2017)



Gambar 2. 13 Transformator Hubungan Zig-zag
(Supriyadi, 2017)

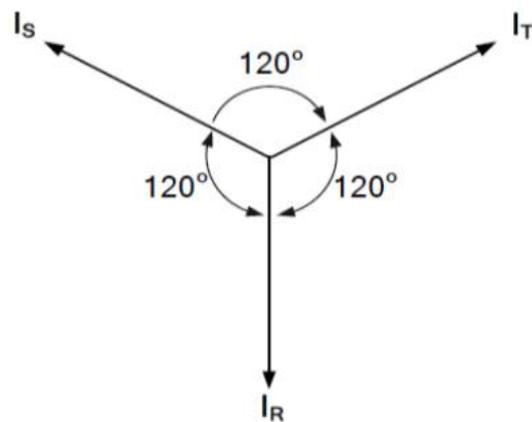
2.3. Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban merupakan keadaan ketika syarat dari beban seimbang tidak bisa terpenuhi. Beban agar bisa disebut seimbang harus memenuhi syarat berikut yaitu:

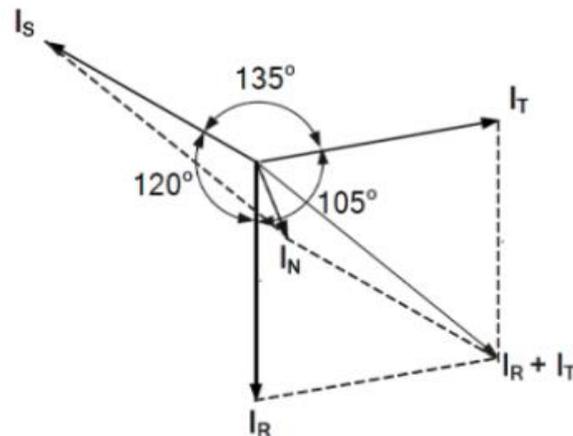
1. Ketiga vektor tegangan/arus sama besar
2. Ketiga vektor tegangan/arus saling membentuk sudut 120°

Ketidakseimbangan beban biasanya terjadi pada tiga kemungkinan kondisi yang berhubungan dengan syarat beban seimbang yaitu:

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



Gambar 2. 14 Vektor Diagram Arus Seimbang
(Mutiar & Sampurno, 2021)



Gambar 2. 15 Vektor Diagram Arus Tidak Seimbang
(Mutiar & Sampurno, 2021)

Pada Gambar 2.11 menunjukkan diagram vektor arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Sedangkan pada gambar 2.17 menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini 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 (Mutiar & Sampurno, 2021)

Untuk menghitung ketidakseimbangan beban menggunakan rumus di bawah ini:

$$I_{rata-rata} = \frac{|I_R| + |I_S| + |I_T|}{3} \quad (2.16)$$

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

$$I_S = b \times I_{rata-rata}$$

$$I_T = c \times I_{rata-rata}$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Maka rata-rata ketidakseimbangan (dalam %) dapat dirumuskan:

$$Ketidakseimbangan = \frac{\{|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|\}}{3} \times 100\% \quad (2.17)$$

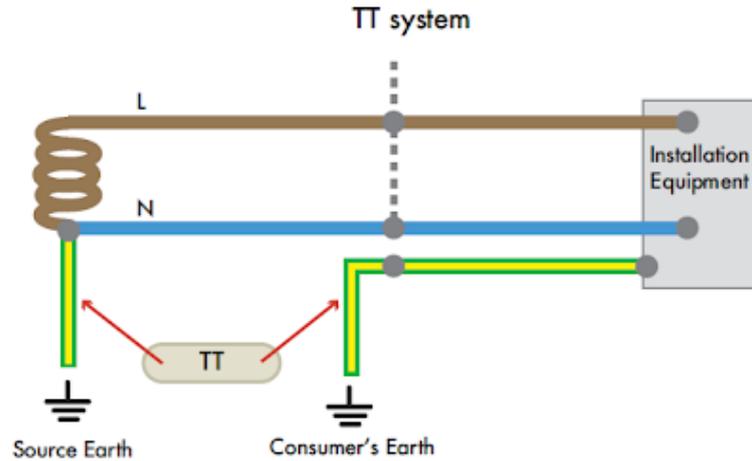
Batasan dari ketidakseimbangan beban diatur oleh standar yang dikeluarkan oleh IEEE yaitu IEEE-446 1995 yang merupakan pembaruan dari IEEE-446 1987. Kisaran batasan ketidakseimbangan beban yang diperbolehkan oleh IEEE-446 1995 yaitu 5% sampai dengan 20%.

2.4. Sistem Pembumian

Jenis-jenis Sistem pembumian diklasifikasikan menjadi 5, berikut merupakan penjelasannya.

2.4.1. Sistem TT (*Terre Terre*)

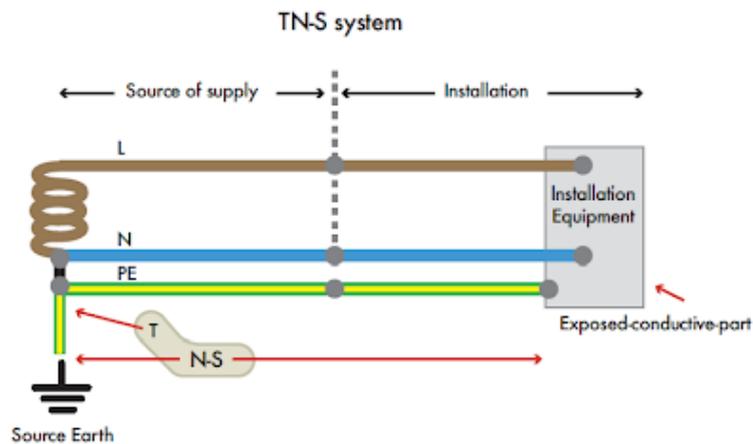
Pada sistem pembumian TT, bagian pembumian netral sumber listrik tidak terhubung langsung dengan pembumian netral pada sisi beban (Arifin, 2022). Untuk lebih memperjelas, sistem pembumian TT dapat dilihat pada gambar 2.16 di bawah.



Gambar 2. 16 Sistem Pembumian TT
(Arifin, 2022)

2.4.2. Sistem TNS (*Terre Neutral Separate*)

Pada sistem pembumian TNS, bagian pembumian netral sumber energi listrik terhubung dengan bumi pada satu titik saja dimana untuk beban listrik tidak dibumikan (Arifin, 2022). Untuk lebih memperjelas, sistem pembumian TNS dapat dilihat pada gambar 2.17 di bawah.

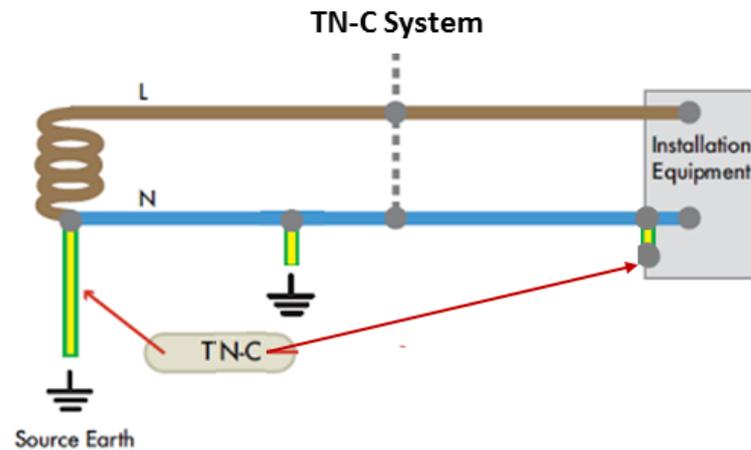


Gambar 2. 17 Sistem Pembumian TNS
(Arifin, 2022)

2.4.3. Sistem TNC (*Terre Neutral Combined*)

Pada sistem pembumian TNC, saluran netral sumber energi listrik terhubung langsung dengan saluran netral beban listrik dan dibumikan pada beberapa

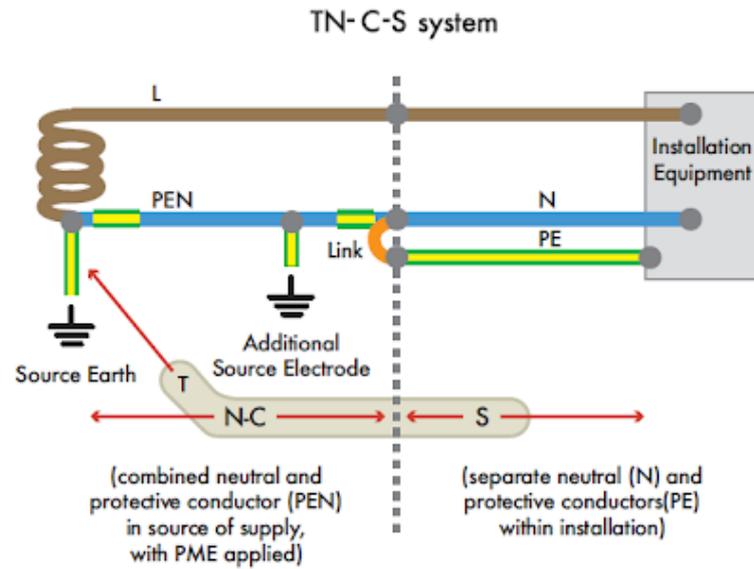
titik (Arifin, 2022). Untuk lebih memperjelas, sistem pembumian TNC dapat dilihat pada gambar 2.18 di bawah.



Gambar 2. 18 Sistem Pembumian TNC
(Arifin, 2022)

2.4.4. Sistem TNCS (*Terre Neutral Combined Separate*)

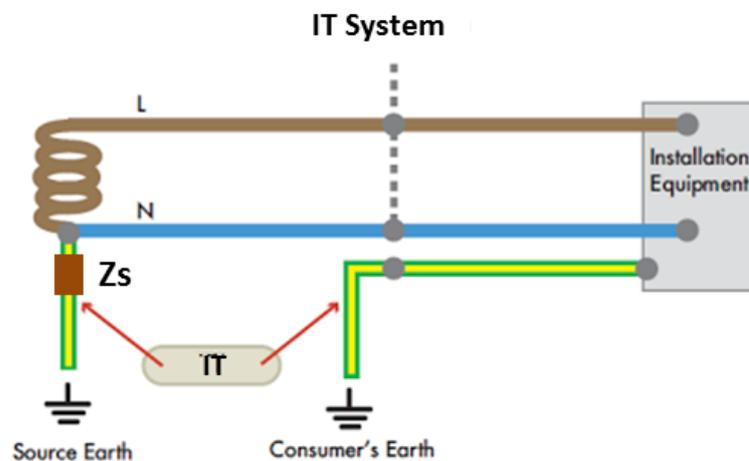
Pada sistem pembumian TNCS, saluran netral dari peralatan distribusi utama (sumber listrik) terhubung dengan bumi dan pembumian pada jarak tertentu disepanjang saluran netral yang menuju konsumen, biasanya disebut sebagai Protective Multiple Earthing (PME). Dengan sistim ini konduktor netral dapat berfungsi untuk mengembalikan arus gangguan pentanahan yang mungkin timbul disisi konsumen (instlasi) kembali kesumber listrik (Arifin, 2022). Untuk lebih memperjelas, sistem pembumian TNCS dapat dilihat pada gambar 2.19 di bawah.



Gambar 2. 19 Sistem Pembumian TNCS
(Arifin, 2022)

2.4.5. Sistem IT (*Isolated Terre*)

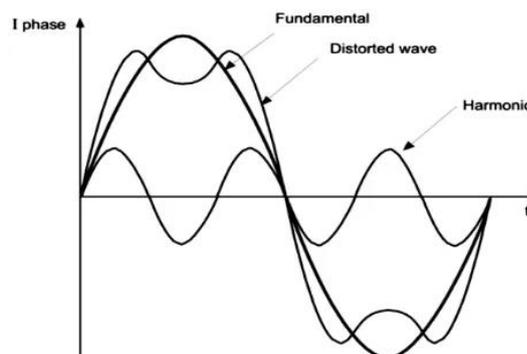
Pada sistem pembumian IT, netral nya isolated (tidak terhubung) dengan bumi. Titik PE tidak terhubung ke saluran netral tetapi langsung dihubungkan ke pembumian. Ditambahkan impedansi Z_s yang nilainya sangat tinggi sekitar 1000 ohm sampai dengan 3000 ohm (Arifin, 2022). Untuk lebih memperjelas, sistem pembumian IT dapat dilihat pada gambar 2.20 di bawah.



Gambar 2. 20 Sistem Pembumian IT
(Arifin, 2022)

2.5. Harmonisa

Secara sederhana harmonisa merupakan gelombang yang terbentuk di mana gelombang tersebut berbeda dengan gelombang fundamentalnya. Adapun penyebab timbulnya gelombang harmonisa karena beban non linear seperti motor listrik, inverter dan komputer. Gelombang-gelombang yang terbentuk tersebut memiliki frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi fundamentalnya. Dimisalkan frekuensi fundamental suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka frekuensi harmonisa keduanya bernilai 100 Hz dan frekuensi harmonisa ketiganya bernilai 150 Hz dan seterusnya. Gelombang-gelombang tersebut kemudian menumpang pada gelombang fundamentalnya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang fundamental dengan gelombang harmoniknya. (Sutjipto & Wijaya Kusuma, 2022)



Gambar 2. 21 Gelombang Fundamental, Gelombang Harmonisa dan Gelombang Terdistorsi

(Dwipayana et al., 2017)

2.3.1. *Total Harmonic Distortion (THD)*

Total Harmonic Distortion atau THD adalah rasio antara nilai rms dari total harmonisa dan nilai rms fundamentalnya yang biasanya dinyatakan dalam %. THD berlaku untuk tegangan dan arus. (Utomo et al., 2021)

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.18)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.19)$$

Dimana	THD_V	: total harmonik distortion tegangan
	THD_I	: total harmonik distortion arus
	V_h	: nilai rms tegangan harmonik ke-h
	I_h	: nilai rms arus harmonik ke-h
	V_1	: nilai rms tegangan pada frekuensi dasar
	I_1	: nilai rms arus pada frekuensi dasar

Batasan dari THD diatur oleh standar yang dikeluarkan oleh IEEE yaitu IEEE-519 2014 yang merupakan pembaruan dari IEEE-519 1992. Di bawah ini merupakan batasan THD tegangan dan THD arus.

Tabel 2. 2 Standar THD Tegangan
(“IEEE Std 519TM-2014,” 2014)

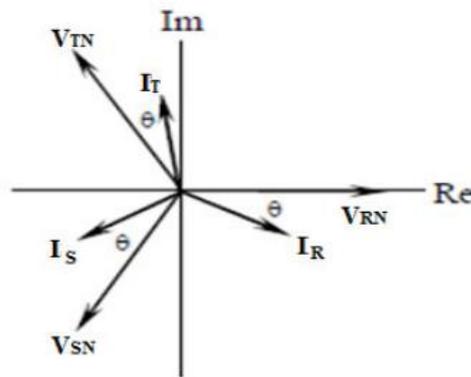
Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total Harmonic Distortion THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Tabel 2. 3 Standar THD Arus
 (“IEEE Std 519™-2014,” 2014)

Maximum harmonic current distortion in percent of I _L						
Individual harmonic order (odd harmonics)						
I _{sc} / I _L	3 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h < 50	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

2.6. Arus Netral

Arus netral pada sistem distribusi merupakan arus yang mengalir pada penghantar netral pada sistem tiga fasa degan hubungan bintang. Kemunculan arus netral dapat disebabkan karena ketidakseimbangan beban dan juga karena adanya arus harmonisa sebagai akibat banyaknya penggunaan beban non linear. (Dwipayana et al., 2017)



Gambar 2. 22 Diagram Fasor Tegangan dan Arus Terhubung Bintang
 (Dwipayana et al., 2017)

Pada gambar 2.10 menunjukkan diagram fasor tegangan dan arus dengan sudut θ , jika diagram fasor tersebut dikatakan seimbang dalam arti $\theta = 120^\circ$ maka:

$$I_R + I_S + I_T = 0 \tag{2. 20}$$

Arus netral yang ideal bernilai 0 karena arus netral diperoleh dari penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa. Maka rumus arus netral adalah:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad (2.21)$$

Arus netral yang tinggi dapat mempengaruhi sistem, berikut ini merupakan pengaruh yang dapat disebabkan oleh arus netral yaitu timbulnya panas berlebih pada transformator, menurunnya kualitas daya. (Dwipayana et al., 2017)

Arus beban tiga fasa dari suatu sistem tidak seimbang dapat diselesaikan menggunakan metode komponen simetris. Tiga fasor tak seimbang dari dapat diuraikan menjadi tiga fasor seimbang. (Setiawan, 2018)

1. Komponen urutan positif, berupa tiga buah fasor yang sama besarnya dengan pergeseran tiap fasornya yaitu 120° dan memiliki urutan fasa yang sama dengan fasor aslinya (RST).
2. Komponen urutan negatif, berupa tiga buah fasor yang sama besarnya dengan pergeseran tiap fasornya yaitu 120° dan memiliki urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya (RTS).
3. Komponen urutan nol, berupa tiga buah fasor yang sama besarnya dengan pergeseran tiap fasornya yaitu 0° antara satu dengan yang lainnya.

Maka akan didapatkan persamaan-persamaan untuk arus-arus fasanya sebagai berikut:

$$I_R = I_1 + I_2 + I_0 \quad (2.22)$$

$$I_S = a_2 I_1 + a I_2 + I_0 \quad (2.23)$$

$$I_T = a I_1 + a_2 I_2 + I_0 \quad (2.24)$$

Persamaan di atas dapat diubah ke dalam bentuk matriks yaitu:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a_2 & a & 1 \\ a & a_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix}$$

Dengan langkah yang telah diuraikan terkait arus-arus urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol, maka akan didapatkan persamaan di bawah ini

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_R + aI_S + a_2I_T) \quad (2.25)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_R + a_2I_S + aI_T) \quad (2.26)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T) \quad (2.27)$$

Persamaan di atas dapat diubah ke dalam bentuk matriks yaitu:

$$\begin{bmatrix} 1 & a & a_2 \\ 1 & a_2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3I_1 \\ 3I_2 \\ 3I_0 \end{bmatrix}$$

Dapat dilihat bahwa arus urutan nol (I_0) merupakan sepertiga dari arus netral, maka akan kita dapatkan persamaan arus netral terhadap arus urutan nol yaitu

$$I_N = 3I_0 \quad (2.28)$$

2.7. Rugi-rugi pada Transformator

Transformator tidak ada yang ideal di lapangan hal tersebut mendasari daya listrik yang masuk ke transformator tidak akan sama dengan daya keluarannya. Hal tersebut disebabkan adanya rugi-rugi yaitu arus yang hilang saat melewati transformator. (Elnizar et al., 2021).

Rugi-rugi transformator dapat dibagi menjadi rugi inti (P_{copper}), rugi tembaga (P_{core}), rugi arus netral (P_{IN}) dan rugi harmonisa (P_{LL}).

Secara umum total rugi-rugi pada transformator dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{\text{losses}} = P_{\text{copper}} + P_{\text{core}} + P_{\text{IN}} + P_{\text{LL}} \quad (2.29)$$

Di mana P_{losses} : Total rugi-rugi transformator (W)

P_{copper} : Rugi-rugi kumparan transformator (W)

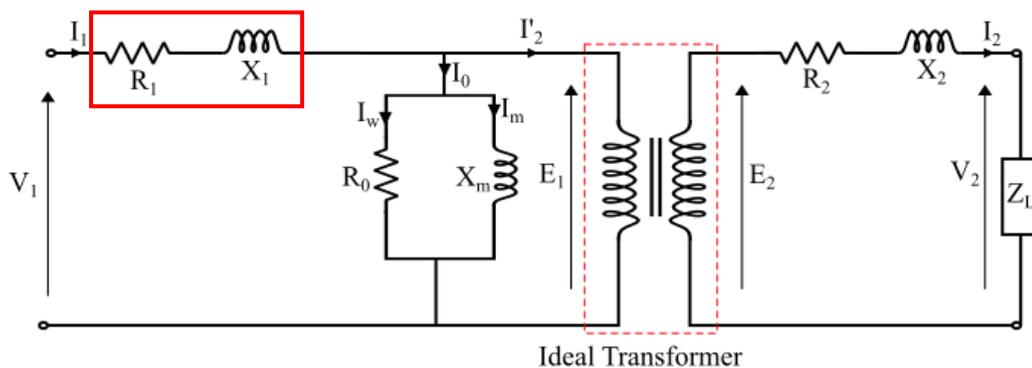
P_{core} : Rugi-rugi inti besi transformator (W)

P_{IN} : Rugi-rugi arus netral (W)

P_{LL} : Rugi-rugi harmonisa (W)

2.6.1. Rugi-rugi Tembaga (*copper losses*)

Rugi yang disebabkan oleh mengalirnya arus pada kawat penghantar tembaga. Rugi-rugi ini berbanding lurus dengan besarnya beban sehingga rugi-rugi akan meningkat seiring meningkatnya arus beban.



Gambar 2.23 Rugi-rugi Tembaga pada rangkaian ekuivalen transformator

(Saini, 2021)

Berikut rumus dari rugi-rugi tembaga atau kumparan:

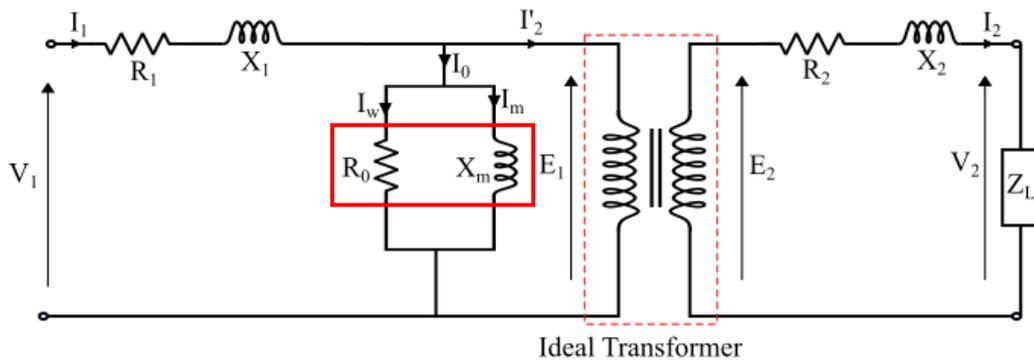
$$P_{\text{cu}} = I_p^2 \times R_1 + I_s^2 R_2 \quad (2.30)$$

Di mana P_{cu} : rugi-rugi tembaga (watt)

- I_p : arus primer (A)
- I_p : arus sekunder (A)
- R_1 : resistansi kumparan primer (Ω)
- R_2 : resistansi kumparan primer (Ω)

2.6.2. Rugi-rugi Inti Besi (core losses)

Rugi-rugi inti pada transformator dibagi kedalam dua bagian yaitu hysteresis dan arus eddy yang dapat diukur melalui percobaan tanpa beban. Rugi hysteresis disebabkan oleh fluks bolak-balik pada inti besi, sementara rugi arus eddy disebabkan oleh arus pusar pada inti besi.



Gambar 2. 24 Rugi-rugi Tembaga pada rangkaian ekuivalen transformator

(Saini, 2021)

Berikut rumus dari rugi-rugi inti besi:

$$P_{fe} = P_h + P_e \tag{2. 31}$$

- Di mana P_{cu} : Rugi inti (Watt)
- P_h : Rugi hysteresis (Watt)
- P_e : Rugi arus eddy (Watt)

1. Rugi-rugi *Hysteresis* (P_h)

$$P_h = K_h \times f \times B_m^2 \tag{2. 32}$$

- Di mana K_h : Konstanta hysteresis

- F : frekuensi (Hz)
 B : Kerapatan fluks maksimum (Tesla)

2. Rugi-rugi Arus Eddy

$$P_e = K_e \times f^2 \times B_m^2 \quad (2.33)$$

- Di mana K_h : Konstanta arus eddy
 F : frekuensi (Hz)
 B : Kerapatan fluks maksimum (Tesla)

2.6.3. Rugi-rugi Akibat Arus Netral

Akibat dari arus yang mengalir pada penghantar netral maka akan menyebabkan rugi-rugi pada transformator distribusi (Zaini et al., 2021).

$$P_N = I_N^2 \times R_N \quad (2.34)$$

Di mana

- P_N : Rugi-rugi pada penghantar netral (Watt)
 I_N^2 : Arus pada penghantar netral (Ampere)
 R_N : Tahanan pada penghantar netral (Ω)

2.6.4. Rugi-rugi Akibat Harmonisa

Harmonisa yang terdapat pada sistem kelistrikan akan meningkatkan rugi-rugi daya pada transformator. Rugi-rugi tersebut merupakan rugi-rugi oleh arus beban yang dilambangkan dengan P_{LL} dan dapat dihitung dengan rumus di bawah ini dengan satuan per unit. (Adi Wirajaya et al., 2019)

$$P_{LL} = \sum I_h^2 + \left(\sum I_h^2 + h^2 \right) \times P_{EC-R}(p.u) \quad (2.35)$$

Di mana

P_{EC-R}	: Eddy Current Loss Factor
h	: Orde harmonisa
I_h	: Arus harmonisa
$\sum I_h^2$: Komponen dari rugi tembaga (I^2R) yang dinyatakan dalam satuan per unit (p.u)
$(\sum I_h^2 + h^2) \times P_{EC-R}$: Faktor rugi arus eddy yang dinyatakan dalam satuan per unit (p.u)

2.8. Uji Validitas dan Reliabilitas

2.8.1. Uji Validitas

Hasil penelitian yang valid yaitu bila mempunyai kesamaan antara data yang terkumpul dengan data yang sesungguhnya terjadi pada objek yang diteliti (Prof. Dr. Sugiyono, 2007). Diperlukan uji validitas yang merupakan pengujian tingkat ketepatan suatu alat ukur yang digunakan dan digunakan untuk mengukur apa yang seharusnya diukur. Untuk menguji ketepatan instrumen penelitian dalam hal ini menggunakan teknik *Pearson Correlation Product Moment*. Analisisnya dengan menghitung koefisien korelasi antara masing-masing nilai hasil pengukuran dengan nilai total dari pengukuran tersebut. Selanjutnya koefisien korelasi yang diperoleh r masih harus diuji signifikansinya dengan membandingkannya dengan r tabel. Bila r hitung $>$ dari r tabel, maka nomor pertanyaan tersebut valid. Nilai-nilai r *product moment* merupakan sebuah tabel angka yang bisa digunakan untuk menguji hasil uji validitas suatu instrumen penelitian.

Tabel 2. 4 Nilai r Product Moment dari banyaknya percobaan

N	r	N	r	N	r	N	r
1	0.997	41	0.301	81	0.216	121	0.177
2	0.950	42	0.297	82	0.215	122	0.176
3	0.878	43	0.294	83	0.213	123	0.176
4	0.811	44	0.291	84	0.212	124	0.175
5	0.754	45	0.288	85	0.211	125	0.174
6	0.707	46	0.285	86	0.210	126	0.174
7	0.666	47	0.282	87	0.208	127	0.173
8	0.632	48	0.279	88	0.207	128	0.172
9	0.602	49	0.276	89	0.206	129	0.172
10	0.576	50	0.273	90	0.205	130	0.171
11	0.553	51	0.271	91	0.204	131	0.170
12	0.532	52	0.268	92	0.203	132	0.170
13	0.514	53	0.266	93	0.202	133	0.169
14	0.497	54	0.263	94	0.201	134	0.168
15	0.482	55	0.261	95	0.200	135	0.168
16	0.468	56	0.259	96	0.199	136	0.167
17	0.456	57	0.256	97	0.198	137	0.167
18	0.444	58	0.254	98	0.197	138	0.166
19	0.433	59	0.252	99	0.196	139	0.165
20	0.423	60	0.250	100	0.195	140	0.165
21	0.413	61	0.248	101	0.194	141	0.164
22	0.404	62	0.246	102	0.193	142	0.164
23	0.396	63	0.244	103	0.192	143	0.163
24	0.388	64	0.242	104	0.191	144	0.163
25	0.381	65	0.240	105	0.190	145	0.162
26	0.374	66	0.239	106	0.189	146	0.161
27	0.367	67	0.237	107	0.188	147	0.161
28	0.361	68	0.235	108	0.187	148	0.160
29	0.355	69	0.234	109	0.187	149	0.160
30	0.349	70	0.232	110	0.186	150	0.159
31	0.344	71	0.230	111	0.185	151	0.159
32	0.339	72	0.229	112	0.184	152	0.158
33	0.334	73	0.227	113	0.183	153	0.158
34	0.329	74	0.226	114	0.182	154	0.157
35	0.325	75	0.224	115	0.182	155	0.157
36	0.320	76	0.223	116	0.181	156	0.156

37	0.316	77	0.221	117	0.180	157	0.156
38	0.312	78	0.220	118	0.179	158	0.155
39	0.308	79	0.219	119	0.179	159	0.155
40	0.304	80	0.217	120	0.178	160	0.154

2.8.2. Uji Reliabilitas

Uji reliabilitas bertujuan untuk mengetahui konsistensi alat ukur, apakah alat pengukuran tersebut dapat tetap konsisten jika pengukurannya dilakukan secara berulang (Prof. Dr. Sugiyono, 2007). Data dikatakan reliabel jika nilai yang terukur konsistensinya tetap. Salah satu metode pengujian reliabilitas menggunakan teknik *Cronbach's Alfa*. Indikasi dasar pengambilan keputusan dalam uji reliabilitas adalah sebagai berikut:

- (1) Jika nilai *Cronbach's Alfa* $> 0,60$ maka hasil pengukuran dinyatakan reliabel atau konsisten.
- (2) Jika nilai *Cronbach's Alfa* $< 0,60$ maka hasil pengukuran dinyatakan tidak reliabel atau tidak konsisten.

2.8.3. Koefisien Korelasi Pearson

Tabel 2. 5 Koefisien Korelasi Pearson
(Prof. Dr. Sugiyono, 2007)

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,00 – 0,199	Sangat Lemah
0,20 – 0,399	Lemah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,00	Sangat Kuat

2.9. Penelitian Terkait

Tabel 2. 6 Penelitian Terkait

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1	Analisis THD dan Peningkatan Arus pada Kawat Netral Akibat Pengoperasian Beban Non Linier yang Tak Seimbang pada Sistem Tenaga Listrik di RSUD Kabupaten Klungkung	I Gusti Ngurah Dwipayana, I Wayan Rinas, I Made Suartika	RSUD Kabupaten Klungkung 2017	Menganalisis ketidakseimbangan beban yang berpengaruh terhadap persentase THD dan Arus netral.
2	Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi Di PT PLN (Persero) Area Sorong	Markus Dwiyanto Tobi Sogen	PT PLN (PERSERO) AREA SORONG 2018	Menghitung losses yang ditimbulkan karena ketidakseimbangan beban pada salah satu trafo distribusi PT PLN (Persero) Area Sorong.
3	Rugi –Rugi Daya Akibat Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Pada Efektifitas Penggunaan Daya Terpasang	I Gede Budiayasa, I Wayan Artha Wijaya, Tjok Gede Indra Partha	Villa Permata Ayung 2021	Menganalisis rugi-rugi daya akibat ketidakseimbangan beban di mana didapatkan kesimpulan bahwa semakin besar arus netral akan menyebabkan semakin besar juga rugi-rugi dayanya
4	Analisis Penyeimbangan Beban Pada Transformator Di	Asep Tri Mulyana Nugraha, Sutisna,	Universitas Siliwangi 2022	Menganalisis pembebanan yang ada pada transformator di Fakultas Pertanian

	Fakultas Pertanian Universitas Siliwangi	Asep Andang, Muhammad Aris Risnandar		Universitas Siliwangi dan melakukan penyeimbangan pembebanan yang bisa mereduksi arus netral dan rugi-rugi daya
--	--	--	--	--