

## **BAB II**

### **SISTEM KINERJA TRANSFORMATOR**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Transformator merupakan peralatan listrik statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk mentransfer energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain tanpa mengubah frekuensi. Perubahan tegangan dan arus pada sisi primer dan sekunder ditentukan oleh perbandingan jumlah lilitan pada masing-masing kumparan. Transformator banyak digunakan dalam sistem pembangkitan, transmisi, dan distribusi tenaga listrik karena memiliki efisiensi yang tinggi serta mampu menyesuaikan tingkat tegangan sesuai kebutuhan sistem (Salam, 2025).

Namun demikian, pada kondisi nyata transformator selalu mengalami rugi-rugi daya. Rugi-rugi tersebut terdiri dari rugi inti yang disebabkan oleh proses magnetisasi inti dan rugi tembaga yang disebabkan oleh resistansi kumparan. Rugi-rugi ini mengakibatkan penurunan efisiensi serta peningkatan temperatur operasi transformator. dijelaskan bahwa pada sistem tenaga listrik tiga fasa, ketidakseimbangan beban dapat menyebabkan timbulnya arus netral. Arus netral yang meningkat akan menambah arus pada kumparan dan berpotensi meningkatkan rugi-rugi tembaga serta pemanasan pada transformator. (Salam 2025)

Kondisi ini perlu diperhatikan karena pemanasan berlebih dapat mempercepat degradasi sistem isolasi dan menurunkan umur pakai transformator. Sebagai acuan teknis, standar IEC (60076-11, 2018): *Power*

Transformers – Dry-Type *Transformers* menetapkan persyaratan desain, batas kenaikan temperatur, serta karakteristik pengujian untuk transformator cast resin, termasuk transformator cast resin. Standar ini menegaskan bahwa kondisi operasi yang tidak seimbang dan adanya arus tambahan, seperti arus netral, dapat memengaruhi kenaikan temperatur dan rugi-rugi pada transformator. Oleh karena itu, analisis kinerja transformator harus memperhatikan kesesuaian terhadap batasan yang ditetapkan dalam standar tersebut.

Berdasarkan kajian teori dalam buku *Electrical Machines* karya (Salam 2025), bahwa pemahaman mengenai prinsip kerja transformator, rugi-rugi daya, dan pengaruh arus netral merupakan dasar penting dalam menganalisis kinerja transformator. Teori-teori tersebut menjadi landasan ilmiah dalam penelitian ini untuk menganalisis pengaruh arus netral terhadap rugi-rugi daya pada transformator serta mengevaluasi dampaknya terhadap efisiensi dan keandalan sistem tenaga listrik.

## **2.2 Transformator**

Transformator merupakan peralatan listrik statis yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya melalui prinsip induksi elektromagnetik tanpa mengubah frekuensi sumber. Proses perpindahan energi terjadi ketika arus bolak-balik yang mengalir pada kumparan primer menghasilkan fluks magnet di dalam inti transformator. Fluks magnet tersebut kemudian menginduksikan gaya gerak listrik pada kumparan sekunder sehingga energi listrik dapat ditransfer sesuai dengan

perbandingan jumlah lilitan pada kedua kumparan (Vahidi & Naghizadeh, 2023).

Dalam pengoperasian yang sebenarnya, transformator tidak dapat terlepas dari rugi-rugi daya yang berasal dari rugi inti (core loss) dan rugi tembaga (copper loss). Rugi-rugi tersebut menyebabkan sebagian energi listrik berubah menjadi panas sehingga efisiensi transformator menurun. Peningkatan temperatur akibat rugi-rugi yang berlangsung secara terus-menerus juga dapat mempercepat penuaan sistem isolasi dan memengaruhi keandalan transformator selama masa operasinya (Vahidi & Naghizadeh, 2023).

Pada sistem tenaga listrik tiga fasa, ketidakseimbangan beban dapat mengakibatkan timbulnya arus pada penghantar netral. Arus netral ini berkontribusi terhadap bertambahnya rugi-rugi tembaga karena meningkatnya arus yang mengalir pada kumparan transformator. Kondisi tersebut dapat meningkatkan temperatur operasi dan menurunkan kinerja transformator, termasuk pada transformator tipe cast resin. Oleh karena itu, pemahaman mengenai prinsip kerja, karakteristik, serta rugi-rugi transformator menjadi dasar yang penting dalam menganalisis pengaruh arus netral terhadap kinerja transformator. (Vahidi, B., & Naghizadeh, 2023)

### 2.3 Transformator cast resin

Transformator cast resin atau *dry-type* transformer adalah transformator yang tidak menggunakan minyak sebagai media isolasi maupun pendingin. Kumparan tegangan tinggi pada transformator ini dibungkus dengan resin epoksi melalui proses pengecoran (cast resin), sedangkan pendinginan dilakukan menggunakan udara alami atau udara paksa. Desain tersebut memberikan ketahanan yang baik terhadap kelembapan, mengurangi risiko kebakaran, serta menjadikan transformator cast resin sesuai untuk digunakan pada gedung komersial, rumah sakit, bandara, pusat data, dan fasilitas industri. Karakteristik dan persyaratan teknis transformator tipe kering diatur dalam IEC 60076-11:2018,



Gambar 2. 1 Trafo Cast Resin

## 1. Kelebihan Trafo Cast Resin :

### a) Perawatan relatif rendah :

Trafo cast resin tidak memerlukan pemeliharaan rutin seperti penggantian minyak trafo, sehingga lebih hemat biaya dalam jangka panjang.

### b) Ramah lingkungan :

Trafo cast resin tidak mengandung minyak, sehingga tidak mencemari lingkungan jika terjadi kebocoran.

### c) Tahan terhadap kelembaban :

Resin epoksi tahan air dan lembab, sehingga trafo cast resin dapat digunakan di lingkungan dengan tingkat kelembaban tinggi.

## 2. Kekurangan Trafo Cast Resin :

### 1) Rugi tembaga meningkat akibat pendinginan yang kurang efektif :

Epoksi memiliki konduktivitas termal yang rendah sehingga pelepasan panas dari belitan tidak sebaik transformator minyak. Kenaikan temperatur belitan menyebabkan tahanan konduktor meningkat, yang secara langsung menaikkan rugi tembaga

### 2) Kenaikan rugi tembaga pada kondisi beban tidak seimbang:

Pada transformator cast resin dengan sistem bintang-netral (Dyn5), ketidakseimbangan beban menyebabkan arus netral mengalir. Arus ini menimbulkan rugi tembaga tambahan pada konduktor netral

### 3) Sensitif terhadap kenaikan temperatur jangka panjang:

Meskipun epoksi memiliki kekuatan mekanis tinggi, paparan

temperatur tinggi secara terus-menerus dapat menyebabkan degradasi sifat mekanik dan listrik, seperti penurunan kekuatan dielektrik dan munculnya retak mikro (micro-cracking).

## **2.4 Komponen pada Trafo**

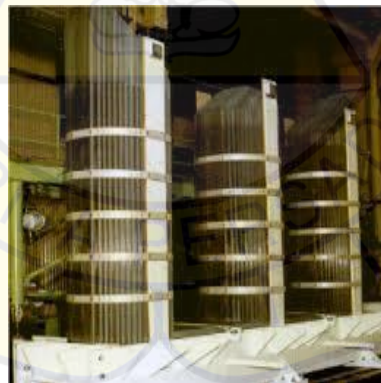
Transformator atau trafo adalah perangkat listrik yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik dalam sistem distribusi daya. Trafo terdiri dari beberapa komponen penting yang bekerja secara sinergis untuk memastikan kinerja optimal. Berikut adalah beberapa komponen utama trafo dan fungsinya (Zhu & Yang, 2021).

### **1. Inti Besi**

Inti besi (core) merupakan komponen utama transformator yang berfungsi sebagai media penghantar fluks magnet antara kumparan primer dan kumparan sekunder. Inti besi umumnya dibuat dari lembaran baja silikon (silicon steel laminations) yang disusun secara berlapis dan dipisahkan oleh lapisan isolasi tipis. Konstruksi tersebut bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi histeresis dan rugi-rugi arus pusar (eddy current losses), sehingga efisiensi transformator dapat ditingkatkan. Selain itu, pemilihan material dan desain inti yang tepat berpengaruh terhadap kinerja, rugi-rugi daya, serta keandalan transformator selama beroperasi (Zhu & Yang, 2021).

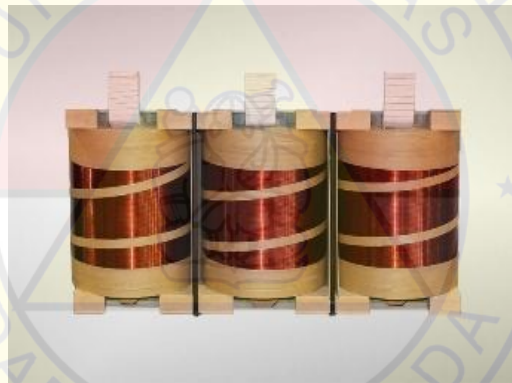
## 2. Kumparan Transformator (Windings)

Kumparan transformator terdiri atas kumparan primer dan kumparan sekunder yang terbuat dari penghantar berisolasi, umumnya menggunakan tembaga atau aluminium. Kumparan primer berfungsi menerima energi listrik dari sumber dan menghasilkan fluks magnet pada inti besi, sedangkan kumparan sekunder menerima induksi elektromagnetik sehingga menghasilkan tegangan keluaran. Besarnya tegangan dan arus yang dihasilkan dipengaruhi oleh perbandingan jumlah lilitan pada kedua kumparan. Oleh karena itu, desain, susunan lilitan, serta jenis konduktor yang digunakan menjadi faktor penting dalam menentukan efisiensi, kemampuan menahan gangguan hubung singkat, dan keandalan transformator (Zhu & Yang, 2021).



Gambar 2. 2 Inti besi trafo

Kumparan transformator terdiri atas lilitan kawat penghantar berisolasi yang membentuk kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer menerima tegangan masukan sehingga menghasilkan fluks magnet pada inti transformator. Fluks magnet tersebut kemudian menginduksi gaya gerak listrik pada kumparan sekunder melalui prinsip induksi elektromagnetik. Perbandingan jumlah lilitan antara kedua kumparan menentukan besarnya tegangan dan arus keluaran, sedangkan kondisi fisik kumparan menjadi faktor penting yang memengaruhi kinerja dan keandalan transformator selama beroperasi (Zhu et al., 2021).



Gambar 2. 3 Kumparan trafo (Transformer cooper)

## 2. Bushing

Bushing merupakan penghubung trafo ke jaringan luar menjadi terminal melalui isolator dan juga menjadi penyekat antar kumparan dengan badan trafo.



Gambar 2. 4 Bushing trafo

### 3. Indikator Suhu Trafo

Indikator Suhu Trafo merupakan suatu alat untuk memonitor suhu transformator.



Gambar 2. 5 Indikator temperatur trafo

### 4. Pendingin Trafo

Transformator bekerja pada inti besi dan kumparan akan menimbulkan panas yang mengakibatkan kenaikan suhu, apabila suhunya berlebihan dapat merusak isolasi. Untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan, transformator perlu dilengkapi dengan alat pendingin untuk menyalurkan panas ke luar transformator, media yang dapat di gunakan

adalah udara atau gas, minyak dan air. Pada cara yang alami untuk mempercepat pendinginan, pada transformator ini dilengkapi juga cooling fan khusus trafo.



Gambar 2. 6 Cooling fan trafo

#### 5. Tap Changer Trafo

Tap Changer Trafo merupakan suatu alat yang dapat diputar sesuai ketentuan yang dapat merubah nilai ratio antar belitan primer dan sekunder sehingga dengan demikian tegangan output sekunder dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Proses perubahan ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat transformator dalam keadaan berbeban (on load tap changer) atau saat transformator tidak dalam keadaan berbeban (off load tap changer). (Zhu et al., 2021).



Gambar 2. 7 Tap changer

## 6. Busduct

Sistem penghantar listrik yang terdiri dari konduktor berisolasi yang disusun dalam satu kesatuan. Busduct berfungsi sebagai saluran distribusi tenaga listrik, menghubungkan berbagai peralatan listrik seperti trafo, panel distribusi, dan peralatan lainnya. (Zhu et al., 2021).



Gambar 2. 8 Busduct trafo

## 2.5 Prinsip Kerja Transformator

Transformator merupakan peralatan listrik statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, arus yang mengalir akan

menghasilkan fluks magnet yang berubah terhadap waktu di dalam inti transformator. Perubahan fluks magnet tersebut kemudian menginduksi gaya gerak listrik pada kumparan sekunder sesuai dengan Hukum Induksi Faraday, sehingga energi listrik dapat dipindahkan dari kumparan primer ke kumparan sekunder tanpa adanya hubungan listrik secara langsung. Besarnya tegangan keluaran ditentukan oleh perbandingan jumlah lilitan antara kumparan primer dan kumparan sekunder, sedangkan frekuensi keluaran tetap sama dengan frekuensi masukan (IEEE, 2025).

Inti transformator, yang umumnya terbuat dari baja silikon berlapis, berfungsi sebagai media penghantar fluks magnet dengan tingkat reluktansi yang rendah sehingga fluks dapat terkonsentrasi dan menghubungkan kumparan primer serta kumparan sekunder secara efektif. Perubahan fluks magnet terhadap waktu akan menginduksikan gaya gerak listrik pada kumparan yang dilalui fluks tersebut. Fenomena ini mengikuti Hukum Faraday, yang secara matematis dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon = - N \frac{d\phi}{dt}, \quad (2.1)$$

Dimana,

$\varepsilon$  = Gaya gerak listrik induksi (V)

N = Jumlah lilitan kumparan

$\phi$  = Fluks magnet (Wb)

Tegangan induksi yang timbul pada kumparan sekunder sebanding dengan jumlah lilitan kumparan tersebut. Hubungan perbandingan

tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder transformator ideal dinyatakan sebagai:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.2)$$

Sedangkan hubungan antara arus primer dan arus sekunder dinyatakan sebagai:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.3)$$

menegaskan bahwa pada transformator ideal, daya listrik yang masuk ke sisi primer akan sama dengan daya listrik yang keluar di sisi sekunder, sehingga dapat dituliskan sebagai:

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

atau

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.5)$$

Berdasarkan prinsip kerja yang dijelaskan dalam buku Transformator, transformator mentransfer energi listrik dari sisi primer ke sisi sekunder melalui medan magnet tanpa adanya hubungan listrik langsung antar kumparan.

## 2.6 Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator

Ketidakseimbangan beban (*unbalanced load*) adalah kondisi ketika besar arus atau tegangan pada ketiga fasa tidak sama, atau sudut fasa antar tegangan tidak tepat  $120^\circ$ . Dengan kata lain, sistem tiga fasa dikatakan tidak seimbang apabila terdapat perbedaan nilai impedansi atau daya antar fasa.,

sistem tenaga listrik tiga fasa yang seimbang terdiri atas tiga tegangan dan arus sinusoidal yang memiliki besar sama dengan pergeseran sudut fasa sebesar  $120^\circ$ . Dalam praktiknya, kondisi ideal tersebut sering kali tidak dapat dipertahankan karena distribusi beban yang tidak merata pada setiap fasa, sehingga menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan beban yang dapat memengaruhi kinerja dan efisiensi sistem tenaga listrik. Yasa, et.al (2024)

$$\%I_{unb} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{avg}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Dengan

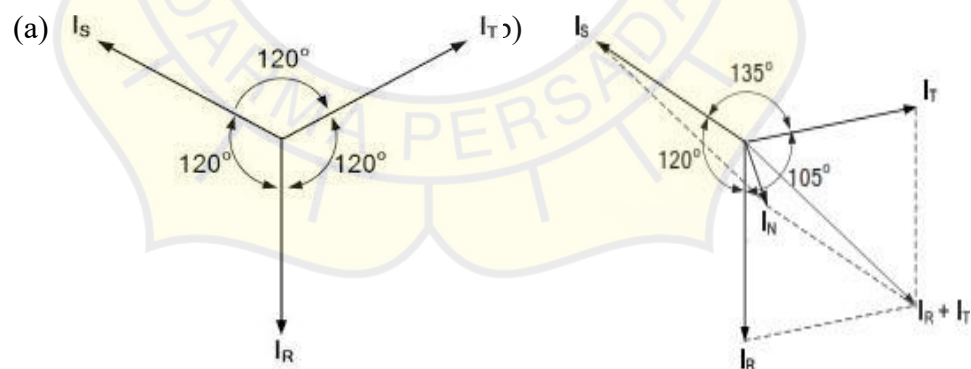
$$I_{rata} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3} \quad (2.7)$$

Dimana,

$I_{max}$  = Arus fasa terbesar (A)

$I_{min}$  = Arus fasa terkecil (A)

$I_{avg}$  = Arus rata-rata ketiga fasa (A)



Gambar 2. 9 Vektor diagram arus (a) seimbang dan (b) tidak seimbang

### **2.6.1 Penyebab Ketidakseimbangan Beban**

1. Distribusi beban satu fasa yang tidak merata pada setiap fasa.
2. Perbedaan karakteristik atau jenis beban yang terhubung pada masing-masing fasa.
3. Gangguan atau ketidaknormalan pada salah satu fasa yang menyebabkan perbedaan arus dan tegangan.

### **2.6.2 Dampak Ketidakseimbangan Beban**

Ketidakseimbangan beban menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap sistem tenaga Listrik, kondisi tidak seimbang dapat menyebabkan:

1. Arus netral meningkat, akibat selisih vektor arus antar fasa yang tidak saling meniadakan.
2. Pemanasan berlebih (overheating) pada belitan transformator dan penghantar netral.
3. Penurunan efisiensi dan umur isolasi transformator.

### **2.6.3 Standar ketidakseimbangan beban**

Dalam praktik operasional sistem distribusi tenaga listrik, distribusi beban antar fasa perlu dijaga agar ketidakseimbangan beban tetap berada dalam batas toleransi. Berdasarkan standar SPLN D3.002-1:2010, ketidakseimbangan beban yang masih diperbolehkan berada pada kisaran maksimal 15% terhadap nilai arus rata-rata. Apabila nilai ketidakseimbangan melebihi batas tersebut, maka akan terjadi peningkatan arus pada salah satu fasa dan arus netral.

Ketidakseimbangan beban pada transformator menyebabkan distribusi arus yang tidak merata pada setiap fasa sehingga menimbulkan arus pada penghantar netral. Kondisi tersebut meningkatkan rugi-rugi daya dan temperatur operasi transformator. Apabila berlangsung secara terus-menerus, kenaikan temperatur dapat mempercepat proses penuaan isolasi, menurunkan efisiensi operasi, serta mengurangi umur pakai transformator (Liliana et al., 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, ketidakseimbangan beban merupakan faktor penting yang harus diperhatikan dalam pengoperasian transformator. Analisis ketidakseimbangan beban menjadi dasar dalam mengevaluasi arus netral dan pengaruhnya terhadap rugi-rugi transformator pada sistem distribusi tenaga listrik.

## **2.7 Transformator Dyn5**

Transformator dengan kelompok vektor Dyn5 merupakan transformator tiga fasa dengan konfigurasi:

- 1) D (Delta) pada sisi primer (tegangan menengah)
- 2) y (Bintang/Wye) pada sisi sekunder (tegangan rendah)
- 3) n (Netral) tersedia pada sisi sekunder
- 4) Pergeseran sudut fasa sebesar  $150^\circ$  ( $5 \times 30^\circ$ )

Konfigurasi Dyn5 banyak diterapkan pada transformator distribusi karena menyediakan titik netral pada sisi sekunder, sehingga mampu

melayani beban tiga fasa dan beban satu fasa secara bersamaan serta mendukung sistem distribusi tegangan rendah.

### **2.7.1 Karakteristik Sisi Primer dan Sekunder Dyn5**

#### **1. Sisi Primer (Delta)**

- a) Tidak memiliki penghantar netral
- b) Arus sirkulasi pada delta dapat meredam komponen ketidakseimbangan tertentu
- c) Tidak langsung terpengaruh oleh ketidakseimbangan beban di sisi sekunder

#### **2. Sisi Sekunder (Bintang–Netral)**

- a) Memiliki titik netral aktif
- b) Arus pada masing-masing fasa dapat berbeda
- c) Ketidakseimbangan beban langsung memunculkan arus netral

Akibat utama konfigurasi Dyn5 adalah ketidakseimbangan beban di sisi sekunder tidak terkompensasi secara penuh, sehingga arus netral muncul sebagai indikator utama kondisi tidak seimbang.”

### **2.7.2 Ketidakseimbangan Beban pada Trafo Dyn5**

Ketidakseimbangan beban terjadi ketika besar beban pada fasa R, S, dan T tidak sama. Pada sistem Dyn5, kondisi ini umumnya disebabkan oleh:

- a) Dominasi beban satu fasa
- b) Distribusi beban yang tidak merata
- c) Penambahan beban tanpa redistribusi fasa

Ketidakseimbangan beban dapat ditunjukkan oleh perbedaan arus antar fasa:

$$I_R \neq I_S \neq I_T \quad (2.8)$$

### 2.7.3 Terbentuknya Arus Netral pada Trafo Dyn5

Pada kondisi seimbang:

$$I_R + I_S + I_T = 0 \quad (2.9)$$

Sehingga:

$$I_N = 0$$

Namun pada kondisi tidak seimbang:

$$I_R + I_S + I_T \neq 0 \quad (2.10)$$

Maka muncul arus netral:

$$I_N = \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_T I_R} \quad (2.11)$$

Dimana:

RST = arus pada masing-masing fasa (A)

I<sub>N</sub> = arus netral (A)

## 2.8 Efisiensi Transformator Cast Resin 2500 kVA

Berdasarkan data teknis yang tercantum dalam katalog ABB, transformator cast resin dengan kapasitas 2500 kVA memiliki rugi-rugi yang terdiri dari rugi inti (*no-load loss*) dan rugi beban (*load loss*).

Rugi inti pada transformator cast resin ABB 2500 kVA berada pada kisaran 4,3–5,0 kW. Rugi ini disebabkan oleh rugi histeresis dan rugi arus eddy pada inti besi transformator dan bersifat relatif konstan, yaitu tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya beban. Sementara itu, rugi beban transformator cast resin ABB 2500 kVA berada pada kisaran 19–21 kW pada kondisi beban penuh dan temperatur referensi 75 °C. Rugi beban ini terutama disebabkan oleh rugi tembaga pada belitan transformator dan besarnya sebanding dengan kuadrat arus pembebanan. (Pansisni, 2019)

Dengan demikian, total rugi-rugi transformator cast resin ABB 2500 kVA pada kondisi nominal berada pada kisaran 23–26 kW. Nilai ini digunakan sebagai acuan teoritis dalam analisis kinerja dan efisiensi transformator. (ABB, 2017, p. 87–89)

Efisiensi transformator didefinisikan sebagai perbandingan antara daya keluaran (*output*) dan daya masukan (*input*), yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.12)$$

### 2.8.1 Rugi tembaga pada belitan fasa

Rugi tembaga pada transformator merupakan rugi daya yang bergantung pada kuadrat arus beban dan nilai resistansi belitan, yang secara matematis dinyatakan sebagai rugi  $I^2R$ . Hal ini menunjukkan bahwa resistansi belitan merupakan parameter penting dalam analisis rugi-rugi dan efisiensi transformator. (Pansisni, 2019) khususnya pada kondisi transformator berbeban. Secara matematis, rugi tembaga pada belitan fasa dinyatakan sebagai:

Rugi tembaga pada belitan fasa dihitung dari arus masing-masing fasa:

$$P_{Cu,fasa} = I_R^2 R_f + I_S^2 R_f + I_T^2 R_f \quad (2.13)$$

atau dapat ditulis:

$$P_{Cu,fasa} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) R_f \quad (2.14)$$

### 2.8.2 Rugi tembaga akibat arus netral

Pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat, ketidakseimbangan beban antar fasa menyebabkan timbulnya arus netral.

Rugi tembaga akibat arus netral dinyatakan dengan persamaan:

$$P_{Cu \text{ netral}} = I_n^2 R_n \quad (2.15)$$

### 2.8.3 Rugi tembaga total

Rugi tembaga total transformator merupakan penjumlahan antara rugi tembaga pada belitan fasa dan rugi tembaga akibat arus netral. Rugi inilah yang digunakan sebagai dasar analisis rugi daya aktual dan perhitungan efisiensi transformator dalam skripsi ini.

$$P_{loss} = \sum_{f=R,S,T} (I_f^2 R_f) + I_n^2 R_n \quad (2.16)$$

Nilai R yang saya gunakan adalah resistansi ekuivalen yang diturunkan dari rugi beban nominal transformator berdasarkan katalog ABB, sehingga digunakan untuk menganalisis pengaruh arus fasa dan arus netral terhadap rugi tembaga dan efisiensi, bukan sebagai data desain pabrikan