

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah tenaga listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui suatu gandingan magnet. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya.^[1]

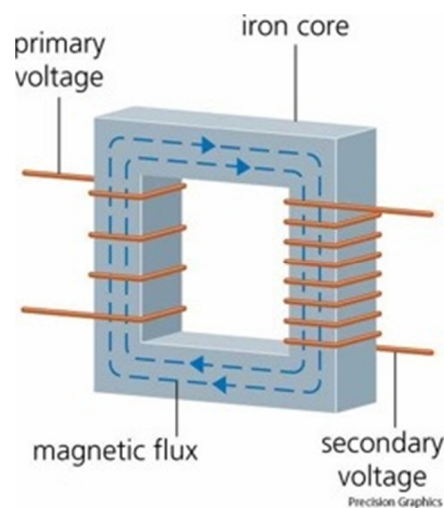
Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator daya ;
2. Transformator distribusi ;
3. Transformator untuk pengukuran.^[18]

A.1. Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua buah kumparan, yakni kumparan primer dan kumparan sekunder yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak – balik, maka fluks bolak -

balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer, maka pada kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi pada kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder. Kemudian arus sekunder akan mengalir jika rangkaian sekunder diberikan beban, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi) seperti pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Prinsip kerja transformator.^[2]

A.2. Bagian utama transformator^[3]

1. Bagian utama transformator, terdiri dari:

- a) Inti besi

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluks yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Terbuat dari lempengan -

lempengan besi tipis yang berisolasi untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus pusar atau arus eddy (*eddy current*).

b) Kumparan transformator

Beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk suatu kumparan dan kumparan tersebut diisolasi, baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan menggunakan isolasi padat seperti karton, pertinax dan lain-lain. Pada transformator terdapat kumparan primer dan kumparan sekunder. Jika kumparan primer dihubungkan dengan tegangan atau arus bolak - balik maka pada kumparan tersebut timbul fluks yang menimbulkan induksi tegangan. Apabila pada rangkaian sekunder ditutup (pada rangkaian beban) maka mengalir arus pada kumparan tersebut, sehingga kumparan ini berfungsi sebagai alat transformasi tegangan dan arus.

c) Minyak transformator

Sebagian besar dari transformator tenaga memiliki kumparan - kumparan dan inti yang direndam dalam minyak transformator. Terutama digunakan pada transformator - transformator tenaga berkapasitas besar. Karena minyak transformator mempunyai sifat sebagai media pemindah panas (disirkulasi), dan sebagai isolasi (karena memiliki daya tegangan tembus tinggi) sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.

Minyak transformator harus memenuhi persyaratan, yaitu :

1. Kekuatan isolasi tinggi ;
2. Penyalur panas yang baik dan berat jenis yang kecil, sehingga partikel - partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat ;
3. Viskositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendinginan menjadi lebih baik ;
4. Titik nyala yang tinggi dan tidak mudah menguap yang dapat menimbulkan bahaya. ;
5. Tidak merusak bahan isolasi padat ;
6. Sifat kimia yang stabil.

d) *Bushing*

Hubungan antara kumparan transformator ke jaringan luar melalui sebuah *bushing*. *Bushing* yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator dan berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.

e) Tangki dan Konservator

Pada umumnya bagian - bagian dari transformator yang terendam minyak transformator berada di dalam tangki. Untuk menampung pemuaiannya pada minyak transformator, tangki dilengkapi dengan sebuah konservator.

A.3 Rugi - Rugi Pada Transformator

Rugi – rugi pada transformator terdiri dari rugi tembaga (P_{cu}), rugi besi (P_i), dan fluks bocor.

A.3.1 Rugi Tembaga (P_{cu})

Rugi yang disebabkan arus mengalir pada kawat tembaga yang terjadi pada lilitan sekunder. Arus ini mengalir ketika transformator diberikan beban. Rumus rugi tembaga sebagai berikut :

$$P_{cu} = I^2 R \quad (2-1)$$

Keterangan :

P_{cu} : Rugi Tembaga

I : Arus

R : Hambatan ^[4]

A.3.2 Rugi Besi (P_i)

Rugi besi terdiri atas :

- a) Rugi histerisis (P_h), yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak – balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai berikut :

$$P_h = K_h f B_{maks} \quad (2-2)$$

Keterangan :

P_h : Rugi histerisis

K_h : konstanta material inti

f : frekuensi (Hz)

B_{maks} : Kerapatan fluks maksimum ^[4]

- b) Rugi arus eddy (P_e) , yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi.

Dirumuskan sebagai :

$$P_e = K_h f^2 t^2 B_{maks} \quad (2-3)$$

Keterangan :

P_e : Rugi arus eddy (W/kg)

K_h : konstanta material inti

f : frekuensi (Hz)

t : ketebalan material (m)

B_{maks} : Kerapatan fluks maksimum

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah :

$$P_i = P_h + P_e \quad (2-4)$$

Rugi histerisis maupun rugi arus eddy bernilai tetap, tidak bergantung pada besarnya beban. ^[4]

A.3.3 Fluks bocor

Kebocoran fluks terjadi karena ada beberapa fluks yang tidak menembus inti besi dan hanya melewati salah satu kumparan transformator saja. Fluks yang bocor ini akan menghasilkan induktansi diri pada lilitan primer dan sekunder sehingga akan berpengaruh terhadap nilai daya yang disuplai dari sisi primer ke sisi sekunder transformator. ^[5]

B. Transformator Arus

Transformator arus (*Current Transformer*) merupakan jenis transformator yang digunakan untuk pengukuran besar arus listrik.^[19] Muatan listrik yang bergerak menghasilkan sebuah arus listrik. Satuan arus listrik adalah ampere, yang didefinisikan sebagai laju pergerakan muatan melewati suatu titik acuan tertentu (menembus suatu bidang acuan tertentu) sebesar satu coulomb perdetik. Besar arusnya sebagai berikut :

$$I = \frac{d\phi}{dt} \quad (2-5)$$

Keterangan :

I : arus listrik

dφ : perubahan fluks

dt : perubahan waktu^[17]

B.1. Fungsi Transformator Arus

Current Transformer berfungsi untuk :

1. Melakukan pengukuran besar arus listrik AC pada sistem tenaga listrik ;
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, yaitu memisahkan instalasi pengukuran dan proteksi dari tegangan tinggi ;
3. Memungkinkan standarisasi rating arus untuk peralatan sisi sekunder.^[6]

B.2. Prinsip Kerja Transformator Arus

Pada dasarnya prinsip kerja *Current Transformer* sama dengan transformator daya. Jika pada kumparan primer mengalir arus I_1 , maka

pada kumparan primer timbul gaya gerak magnet sebesar $N_1 I_1$. Gaya gerak magnet ini memproduksi fluks pada inti, kemudian membangkitkan gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan sekunder. Jika terminal kumparan sekunder tertutup, maka pada kumparan sekunder mengalir arus I_2 , arus ini menimbulkan gaya gerak magnet $N_2 I_2$ pada kumparan sekunder. Bila transformator tidak mempunyai rugi-rugi (transformator ideal) berlaku persamaan :

$$N_1 \times I_1 = N_2 \times I_2 \quad (2-6)$$

Atau

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2-7)$$

Keterangan :

N_1 : Jumlah belitan kumparan primer

N_2 : Jumlah belitan kumparan sekunder

I_1 : Arus kumparan primer

I_2 : Arus kumparan sekunder.^[19]

B.3 Klasifikasi Transformator Arus

Dalam pemakaian sehari - hari, *Current Transformer* dibagi menjadi beberapa jenis. Adapun pembagian jenis *Current Transformer* adalah sebagai berikut :

- Jenis *Current Transformer* menurut jumlah lilitan primer, yaitu :

1. Jenis *Wound*

Biasa digunakan untuk pengukuran pada arus rendah, *burden* yang besar, atau pengukuran yang membutuhkan ketelitian tinggi.

2. Jenis Bar

Konstruksinya mampu menahan arus hubung singkat yang cukup tinggi sehingga memiliki faktor termis dan dinamis arus hubung singkat yang tinggi.^[19]

- Jenis *Current Transformer* menurut jumlah rasio, yaitu :

1. Jenis Rasio Tunggal

Rasio tunggal adalah *Current Transformer* dengan satu kumparan primer dan satu kumparan sekunder.

2. Jenis Rasio Ganda

Rasio ganda diperoleh dengan membagi kumparan primer menjadi beberapa kelompok yang dihubungkan secara seri atau paralel.^[19]

- Jenis *Current Transformer* menurut jumlah inti, yaitu :

1. Inti Tunggal

Digunakan apabila sistem membutuhkan salah satu fungsi saja, yaitu untuk pengukuran atau proteksi.

2. Inti Ganda

Digunakan apabila sistem membutuhkan arus untuk pengukuran dan proteksi sekaligus.^[19]

- Jenis *Current Transformer* menurut konstruksi isolasi, yaitu :
 1. Isolasi Epoksi-Resin

Biasa dipakai hingga tegangan 110 kV. Memiliki kekuatan hubung singkat yang cukup tinggi karena semua belitan tertanam pada bahan isolasi.
 2. Isolasi Minyak-Kertas

Isolasi minyak kertas ditempatkan pada kerangka porselen. Untuk tegangan tinggi yang digunakan pada gardu induk dengan pemasangan luar.
 3. Isolasi Koaksial

Jenis *Current Transformer* dengan isolasi koaksial biasa ditemui pada kabel, bushing transformator, atau pada rel daya berisolasi gas SF₆.^[19]

- Jenis *Current Transformer* menurut tipe pasangan, yaitu :
 1. Pasangan dalam (*indoor*) ;
 2. Pasangan luar (*outdoor*).

- Jenis *Current Transformer* menurut tipe konstruksi, yaitu :
 1. Tipe cincin (*ring / window type*) ;
 2. Tipe cor - coran cast resin (*mounded castresin type*) ;
 3. Tipe tanki minyak (*oil tank type*) ;
 4. Tipe transformator *bushing*.^[6]

B.4 Bagian - bagian dari Transformator Arus

Current Transformer memiliki bagian – bagian sebagai berikut :

1. Bagian atas *Current Transformer* (*transformer head*) ;
2. Peredam perlawanan pemuaian minyak (*oilresistant expansion bellows*)
3. Terminal utama (*primary terminals*) ;
4. Penjepit (*clamps*) ;
5. Inti kumparan dengan belitan berisolasi utama (*core and coil assembly with primary winding and main insulation*) ;
6. Inti dengan kumparan sekunder (*core with secondary windings*) ;
7. Tanki (*tank*) ;
8. Tempat terminal (*terminal box*) ;
9. Plat untuk pentanahan (*earthing plate*).^[6]

B.5 Hubungan dari Transformator Arus

Umumnya hubungan dari *Current Transformer* terdiri dari tiga hubungan, yaitu :

- Hubungan *Current Transformer*.

Hubungan ini terdiri dari sebuah lilitan primer dan sebuah lilitan sekunder, yang mempunyai ratio.

- Hubungan *Current Transformer* dengan dua buah lilitan sekunder.

Hubungan ini terdiri dari sebuah lilitan primer dan dua buah lilitan sekunder yang bekerja masing - masing lilitannya dengan inti ganda

(*double core*). Satu lilitan sekundernya untuk alat pengaman dan satu sisi lagi untuk alat - alat pengukur.

- Hubungan *Current Transformer* dengan dua buah lilitan primer dan dua buah lilitan sekunder.

Hubungan ini terdiri dari dua buah lilitan primer yang sama dan dapat dihubungkan seri atau paralel sedangkan masing - masing lilitan sekunder terpisah.^[6]

B.6. Data Pengenal Transformator Arus ^[19]

Setiap *current transformer* harus dilengkapi dengan spesifikasi pengenal.

Data pengenal *current transformer* terdiri dari :

1. Arus Primer

Arus pengenal pada sisi primer antara lain adalah 50 A, 150 A, 200 A, 300 A, dan seterusnya.

2. Arus Sekunder

Arus pengenal pada sisi sekunder biasanya sebesar 5 A, 2 A, atau 1 A. Arus pengenal sekunder sebesar 2 A dan 1 A biasanya digunakan jika kabel penghubung panjang, sehingga sehingga jumlah impedansi meter dengan impedansi kabel lebih besar daripada burden atau jika jumlah belitan sekunder sedikit sehingga rasio tidak dapat diubah.

3. Frekuensi

Frekuensi pengenal bernilai sama dengan frekuensi system, yaitu 50 Hz atau 60 Hz.

4. Arus Thermal Kontinyu

Arus thermal kontinyu adalah kontinyu tertinggi yang menimbulkan suhu *current transformer* bernilai sama dengan suhu yang diizinkan. Jika pengenal ini tidak diberikan, maka nilainya dapat ditetapkan sama dengan arus pengenal primer.

5. Daya Keluaran

Daya keluaran adalah daya (VA) yang diambil *current transformer* saat arus sekunder bernilai sama dengan arus pengenal sekunder dan impedansi beban yang terhubung di terminal sekunder bernilai sama dengan burden pengenal. Daya keluaran pengenal *current transformer* antara lain adalah 2,5 VA; 3 VA; 7,5 VA; 10 VA; 15 VA; dan 30 VA.

6. Burden

Burden adalah impedansi dan $\cos\phi$ beban yang membuat arus sekunder bernilai sama dengan arus pengenal sekunder saat arus di sisi primer sama dengan arus pengenal primer.

7. Arus thermal waktu singkat

Besar arus thermal waktu singkat ditentukan lebih besar atau sama dengan arus hubung singkat tertinggi yang diperkirakan akan mengalir pada sisi primer *current transformer*, atau tidak boleh kurang dari arus pemutus daya yang bekerja sama dengan *current transformer* tersebut.

8. Arus dinamis waktu singkat

Arus dinamis waktu singkat tidak boleh bernilai kurang dari 2,5 kali arus thermal waktu singkat.

9. Tingkat isolasi

Untuk tegangan pengenalan yang sama, tingkat isolasi *current transformer* sama dengan transformator tegangan.

10. Ketelitian

Kelas ketelitian dan galat yang diizinkan terlihat pada tabel 2.1. berikut ini :

Tabel 2.1. Kelas Ketelitian *Current Transformer*

Kelas	γ (%)	δ (menit)	Arus
0,1	$\pm 0,1$	± 5	100 % arus nominal
0,2	$\pm 0,2$	± 10	
0,5	$\pm 0,5$	± 30	
1,0	$\pm 1,0$	± 60	
3,0	$\pm 3,0$	-	
5,0	$\pm 5,0$	-	

Ketelitian *current transformer* yang digunakan untuk proteksi ditentukan oleh galat komposisi tertinggi yang diizinkan pada saat batas ketelitian arus primer sama dengan yang ditetapkan untuk kelasnya.

C. Kerapatan Fluks Magnet

Kerapatan fluks magnet adalah fluks magnet per satuan luas pada bidang yang tegak lurus dengan fluks magnet tersebut. Kerapatan fluks magnet dinyatakan sebagai berikut :

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (2-8)$$

Keterangan :

B : Kerapatan fluks (T)

ϕ : fluks magnet (weber)

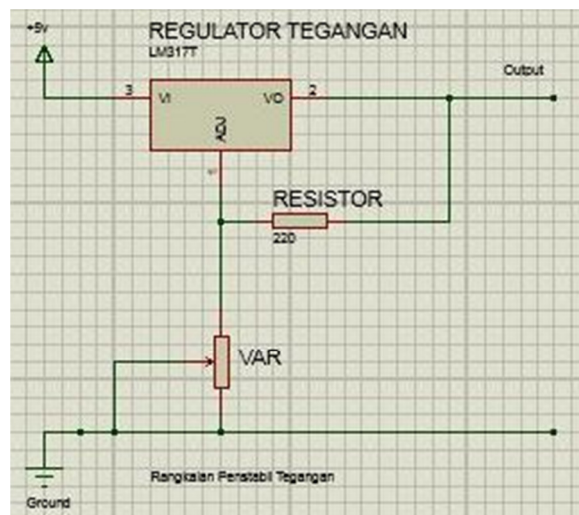
A : luas penampang (m^2)^[17]

D. Pengkondisian Sinyal

Pengkondisian sinyal ini terdiri dari 2 tahap, yaitu rangkaian penstabil tegangan dan rangkaian pengkondisi sinyal.

D.1. Rangkaian Penstabil Tegangan

Rangkaian ini berfungsi untuk membuat tegangan pada sisi *output* rangkaian ini bernilai tetap atau stabil. Berapa pun besar tegangan DC dari sumber tegangan, nilai tegangan pada *output* rangkaian ini tetap bernilai sama. Rangkaian skematik penstabil tegangan seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Skematik rangkaian penstabil tegangan.

Untuk menentukan besar nilai tegangan *output* rangkaian ini dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$V_o = 1,25 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{adj} \times R_2 \quad (2-9)$$

Keterangan :

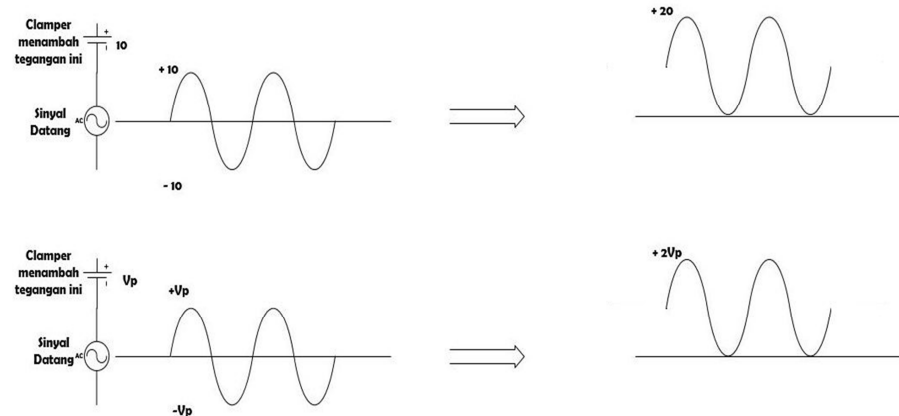
V_o : Tegangan *output* (V)

R_1 dan R_2 : Resistansi resistor (Ω)

I_{adj} : Arus pada kaki *adjustment* IC regulator tegangan (A) ^[14]

D.2. Clamper

Rangkaian *clamper* adalah rangkaian yang digunakan untuk memberikan tegangan *offset* tegangan DC, agar tegangan yang dihasilkan adalah tegangan *input* ditambahkan dengan tegangan DC. Semua *clamper* melakukan penambahan komponen DC pada sinyal. *Clamper* tersusun atas dioda, kapasitor, dan komponen resistif. Pada gambar 2.3., sinyal input adalah gelombang sinus dengan harga puncak ke puncak sebesar 20 V. *Clamper* mendorong sinyal ke atas, sehingga puncak negatif jatuh pada level 0 V. Bentuk sinyal asli tetap dipertahakan.^[16]

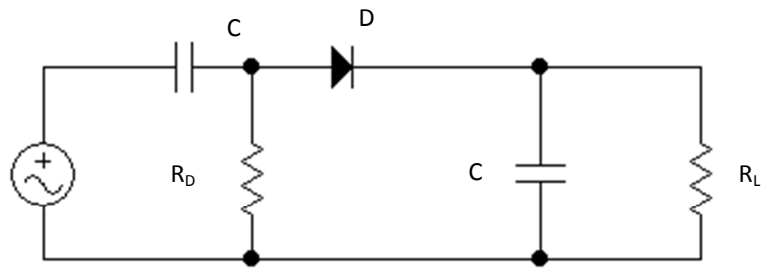


Gambar 2.3. Proses *Clamper*.

D.3. Rangkaian Dioda Tidak Seimbang

Sumber yang dikopel secara kapasitif akan menyebabkan aksi *clamping* yang tidak diinginkan apabila beban tidak seimbang. Beban tidak seimbang yaitu beban yang menyebabkan arus tidak sama selama selang setengah siklus. Seperti pada rangkaian *clamper*, kapasitor bermuatan akan mendorong sinyal AC ke atas atau ke bawah tergantung pada polaritas tegangan kapasitor.

Diantara rangkaian dioda, berikut ini adalah beban – beban tidak seimbang seperti penyearah setengah gelombang, *clipper*, detektor puncak, *clamper*, dan detektor puncak ke puncak. Untuk *clamper* dan detektor puncak ke puncak memang melakukan *clamp* sinyal, oleh karena itu komponen ini bekerja baik dengan sumber yang dikopel secara kapasitif. Untuk mengatasi *clamping* dengan menambahkan resistor kembalinya DC (DC *return* resistor) pada *input* rangkaian tidak seimbang. Gambar rangkaiannya seperti pada gambar 2.4. berikut ini.



Gambar 2.4. Rangkaian resistor kembalinya DC.

Resistor membolehkan kapasitor mengosongkan diri selama diode *off*. Dengan kata lain, muatan yang disimpan pada plat kapasitor dihilangkan selama setengah siklus berikutnya. Besarnya R_D tidaklah kritis. Yang paling utama dalam mencegah aksi *clamping* adalah menjaga agar resistansi pengosongan R_D lebih kecil dari atau sama dengan resistansi yang seri dengan dioda.

$$RD \leq RL \quad (2-10)$$

Jika persyaratan ini terpenuhi, tegangan kapasitor tidak dapat bertambah dengan mencolok dan hanya terjadi sedikit *clamping* saja. Apabila mungkin, maka R_D dibuat lebih kecil dari sepersepuluh R_L .^[16]

$$RD = \frac{1}{10} \times RL \quad (2-11)$$