

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Untuk membantu pembuatan Proyek Akhir ini, dibutuhkan adanya beberapa referensi yang dapat menjadi acuan penulis dalam melakukan penelitian.

Devita Amalia. Optimalisasi Pengukuran Arus oleh *Current Transformer* untuk Meminimalisir Susut Energi pada Pabrik Baja Pt. Inti General Yaja Steel Daerah Semarang Barat, Gema Teknologi Vol. 18 No. 1. 2014. Melakukan penelitian tentang cara mengurangi susut energi yang terjadi karena kurang tepatnya pemilihan APP seperti rasio, kelas akurasi dan *burden* trafo arus (CT) maupun trafo tegangan (PT) pada pelanggan khusus tegangan menengah di pabrik baja PT. Inti General Yaja Steel daerah Semarang Barat.

Sarimun N, Wahyudi. 2011. Buku Saku Pelayanan Teknik (Yantek). Depok: Garamond. Membahas tentang trafo arus (CT) dan trafo tegangan (PT) serta memilih rasio trafo arus (CT) dan trafo tegangan (PT) serta menghitung kesalahan arus dan tegangan sesuai dengan IEC 60044-1 dan IEC 60044-2.

2.2 Landasan Teori

Salah satu peralatan listrik pendukung proteksi dan pengukuran adalah trafo arus (CT) dan trafo tegangan (PT), dimana trafo arus (CT) adalah peralatan listrik yang dipergunakan dalam rangkaian arus bolak-balik, yang dapat memperkecil arus besar menjadi arus kecil, dipergunakan untuk pengukuran atau proteksi dan trafo tegangan (PT) adalah peralatan listrik yang dapat menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah.

Fungsi trafo arus (CT) adalah untuk memperoleh arus yang sebanding dengan arus yang hendak dipergunakan, dan untuk memisahkan sirkuit dari sistem yang arusnya hendak diukur (yang

selanjutnya di sebut sirkuit primer) terhadap sirkuit dimana instrumen tersambung (yang selanjutnya disebut sirkuit sekunder dengan arus sebesar 1A atau 5A yang dipergunakan untuk pengukuran atau proteksi).

Fungsi trafo tegangan adalah mentransformasikan nilai tegangan yang tinggi pada sisi primer ke nilai tegangan yang rendah di sisi sekunder yang digunakan untuk pengukuran (metering) dan proteksi, mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, yaitu memisahkan instalasi pengukuran dan proteksi dari tegangan tinggi.

Berbeda dari transformator tenaga dimana arus dan tegangannya tergantung beban disisi sekunder, tetapi pada trafo arus (CT) dan trafo tegangan (PT) arus dan tegangannya tidak tergantung beban sisi sekunder, melainkan semata-mata tergantung dari arus dan tegangan disisi primernya. Pada trafo arus dan trafo tegangan sisi sekunder dapat mempunyai satu belitan atau beberapa belitan, tergantung dari desain atau kebutuhan pemakaiannya.

Karena pengukuran energi yang dominan adalah pemakaian arus dan tegangannya, dimana arus dan tegangan yang diukur melebihi arus dan tegangan nominal yang terdapat di kWhmeter untuk itu dibutuhkan suatu peralatan *instrument transformers* yang dapat menurunkan arus dan tegangan.

Yaitu trafo arus (CT) dan trafo tegangan (PT). Pada bab ini menjelaskan tentang trafo arus dan trafo tegangan serta tujuannya adalah agar dapat diketahui besar rugi-rugi energi yang terjadi pada trafo arus dan trafo tegangan dengan menggunakan dua rasio yang berbeda namun dengan daya yang sama serta mana yang lebih baik untuk digunakan PLN.

2.2.1 Rugi-Rugi Energi

Rugi-rugi energi adalah sejumlah energi yang hilang dalam proses pengaliran energi listrik mulai dari gardu induk sampai dengan konsumen atau dapat diperinci menjadi jumlah energi kWh yang hilang atau menyusut terjadi karena sebab-sebab teknik

maupun non teknik pada waktu penyediaan dan penyaluran energi.

2.2.2 Macam-Macam Rugi-Rugi

Dilihat dari penyebab terjadinya, secara garis besar rugi-rugi pada jaringan distribusi dapat digolongkan ke dalam :

1. Rugi-Rugi Teknis

Rugi-rugi yang terjadi sebagai akibat adanya impedansi pada peralatan pembangkitan maupun peralatan penyaluran transmisi dan distribusi sehingga terdapat daya yang hilang berupa panas.

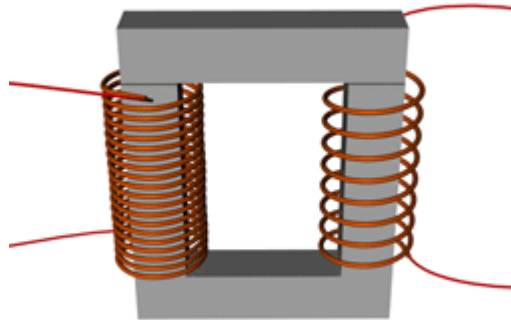
2. Rugi-Rugi Non Teknis

Rugi-rugi yang disebabkan oleh kesalahan dalam pembacaan alat ukur, kesalahan kalibrasi di alat ukur dan kesalahan akibat pemakaian yang tidak sah (pencurian) atau kesalahan-kesalahan yang bersifat administratif lainnya.

2.2.3 Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan yang dapat mengubah tenaga listrik dari suatu level tegangan ke level tegangan lainnya. Trafo biasanya terdiri atas dua bagian inti besi atau lebih yang dibungkus oleh belitan - belitan kawat tembaga. Prinsip pengubahan level tegangan dilakukan dengan memanfaatkan banyaknya jumlah belitan pada inti trafo. Bila salah satu kumpulan belitan, biasanya disebut belitan primer (N_1), diberikan suatu tegangan yang berubah-ubah, maka akan menghasilkan mutual fluks yang berubah-ubah dengan besar amplitude yang tergantung pada tegangan, frekuensi tegangan, dan jumlah lilitan kawat tembaga di belitan primer. Mutual fluks yang terjadi akan terhubung dengan belitan lain yang disebut sisi sekunder (N_2) dan akan menginduksi suatu tegangan yang berubah-ubah di dalamnya dengan nilai tegangan yang

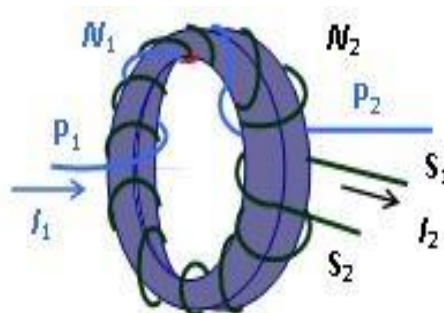
bergantung pada jumlah lilitan pada belitan sekunder. Dengan mengatur perbandingan jumlah lilitan antara sisi primer dan sekunder, maka akan dapat ditentukan rasio tegangan ataupun sering disebut rasio trafo.



Gambar 2.1 Transformator

2.2.4 Trafo Arus

Current transformer (CT) atau trafo arus yaitu peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik disisi primer (TET, TT dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi.



Gambar 2.2 Trafo Arus

2.2.5 Fungsi Trafo Arus

Fungsi dari trafo arus adalah

1. Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.
3. Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1A dan 5A.

2.2.6 Jenis Trafo Arus

1. Trafo Arus Pengukuran

Trafo arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi. Penggunaan trafo arus pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARh-meter, dan $\cos \phi$ meter.

2. Trafo Arus Proteksi

Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi. Penggunaan trafo arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak.

2.2.7 Prinsip Kerja Trafo Arus

Prinsip kerja trafo arus adalah bila pada kumparan primer mengalir arus I_1 , maka pada kumparan timbul gaya gerak magnet sebesar $N_1 I_1$. Gaya gerak ini memproduksi fluks pada inti, dan fluks ini membangkitkan gaya gerak listrik pada kumparan

sekunder. Bila 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. Pada trafo arus biasa dipasang burden pada bagian sekunder yang berfungsi sebagai impedansi beban, sehingga trafo tidak benar-benar short circuit. Apabila trafo adalah trafo ideal, maka berlaku persamaan :

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots 2.1$$

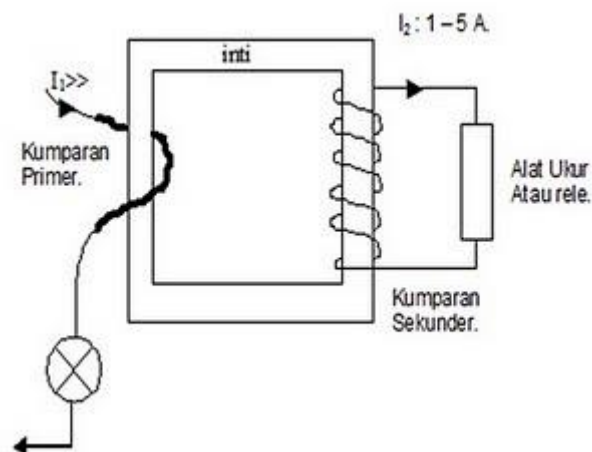
Dimana,

N_1 : Jumlah belitan kumparan primer

N_2 : Jumlah belitan kumparan sekunder

I_1 : Arus kumparan primer

I_2 : Arus kumparan sekunder



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Trafo Arus

2.2.8 Rasio Trafo Arus

Sesuai dengan namanya, trafo arus adalah merupakan peralatan yang mengubah besaran arus dari besar ke kecil sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan.

Untuk sistem tenaga listrik berdaya besar diperlukan trafo arus untuk merubah nilai nominal arus sistem menjadi lebih kecil sehingga bisa terbaca oleh peralatan proteksi ataupun pengukuran (metering). Peralatan proteksi dan metering tersebut biasanya hanya menerima nilai arus dengan dua nilai nominal yaitu 0-1 A (untuk kelas peralatan 1 A) dan 0-5 A (untuk kelas peralatan 5 A).

Peralatan proteksi dan metering hanya akan membaca nilai keluaran trafo arus (dari terminal sekunder trafo arus) kemudian menghitung/merubahnya kembali sebagai pembacaan sisi primer (nilai arus yang mengalir sebenarnya). Nilai perhitungan yang dilakukan oleh peralatan proteksi dan metering didasarkan pada nilai rasio dari sebuah trafo.

Untuk menentukan besaran nilai CT yang akan digunakan, seorang perancang harus mengetahui nilai beban penuh dari sistem pembangkitan, transmisi maupun distribusi.

Apabila nilai nominal arus primer CT sudah diketahui, maka selanjutnya adalah pemilihan nilai nominal arus sekunder CT. Nilai nominal arus sekunder CT harus disesuaikan dengan kelas peralatan yang akan digunakan.

Pada CT dengan rasio misal 400/5A berarti CT harus mengeluarkan nilai arus sebesar $\pm 5A$ pada sisi sekundernya apabila sisi primer CT dialiri arus sebesar $\pm 400A$ (besar kecil tegangan primer tidak mempengaruhi arus CT).

Setiap CT mempunyai akurasi kelas kesalahan pembacaan (%error) yang berbeda-beda. Semakin kecil nilai kesalahan pembacaan (%error) CT maka semakin baik kelas akurasi sebuah CT.

2.2.9 Kesalahan Ukur Trafo Arus

Standar IEC 60044-1 telah mendefinisikan secara khusus tentang hal tersebut diatas, yaitu: kesalahan arus atau kesalahan

perbandingan adalah kesalahan yang ditimbulkan oleh transformer dalam melakukan pengukuran disebabkan karena adanya kenyataan bahwa aktual perbandingan transformasi adalah tidak sama dengan *perbandingan* transformasi pengenal (*Rated Transformation Ratio*).

Kesalahan Arus (*Current Error*) atau kesalahan perbandingan (*Ratio Error*) diekspresikan dalam persen (%) dan diformulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Kesalahan Arus \%} = \frac{(K_n I_s - I_p)}{I_p} \times 100\% \dots\dots\dots 2.2$$

Kesalahan Arus atau Kesalahan Perbandingan

Dimana:

1. K_n adalah Perbandingan transformasi pengenal (*Rated Transformation Ratio*).
2. I_p adalah arus primer sebenarnya (*Actual Primary Current*).
3. I_s adalah arus sekunder sebenarnya (*Actual Secondary Current*) pada saat I_p mengalir disisi primer dan kondisi pengukuran terjadi.

2.2.10 Trafo Tegangan

Potential transformer atau trafo tegangan merupakan peralatan pada sistem tenaga listrik yang digunakan untuk mentransformasikan dari tegangan tinggi ke tegangan rendah guna pengukuran atau proteksi dan sebagai isolasi antara sisi tegangan yang diukur / diproteksikan dengan alat ukurnya / proteksinya.

2.2.11 Fungsi Trafo Tegangan

Fungsi dari trafo tegangan yaitu :

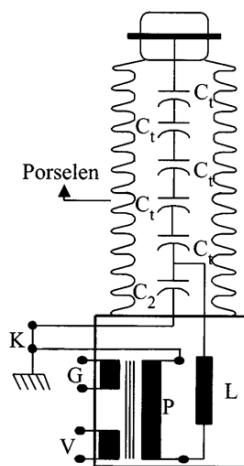
1. Mentransformasikan besaran tegangan sistem dari yang tinggi ke besaran tegangan listrik yang lebih rendah sehingga dapat digunakan untuk peralatan proteksi dan pengukuran yang lebih aman, akurat dan teliti.

2. Mengisolasi bagian primer yang tegangannya sangat tinggi dengan bagian sekunder yang tegangannya rendah untuk digunakan sebagai sistem proteksi dan pengukuran peralatan dibagian primer.
3. Sebagai standarisasi besaran tegangan sekunder (100, $100/\sqrt{3}$, $110/\sqrt{3}$ dan 110 volt) untuk keperluan peralatan sisi sekunder.

2.2.12 Jenis Trafo Tegangan

Trafo tegangan dibagi menjadi dua jenis yaitu :

1. Trafo tegangan magnetik (*magnetik voltage transformer*), disebut juga Trafo tegangan induktif. Terdiri dari belitan primer dan sekunder pada inti besi yang prinsip kerjanya belitan primer menginduksikan tegangan kebelitan sekundernya.
2. Trafo tegangan kapasitif (*capacitive voltage transformer*), Trafo tegangan ini terdiri dari dua bagian yaitu *capacitive voltage divider* (CVD) dan *inductive intermediate voltage transformer* (IVT). CVD merupakan rangkaian seri 2 (dua) kapasitor atau lebih yang berfungsi sebagai pembagi tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan rendah pada primer, selanjutnya tegangan pada satu kapasitor ditransformasikan oleh IVT menjadi tegangan sekunder.



Gambar 2.4 Trafo Tegangan

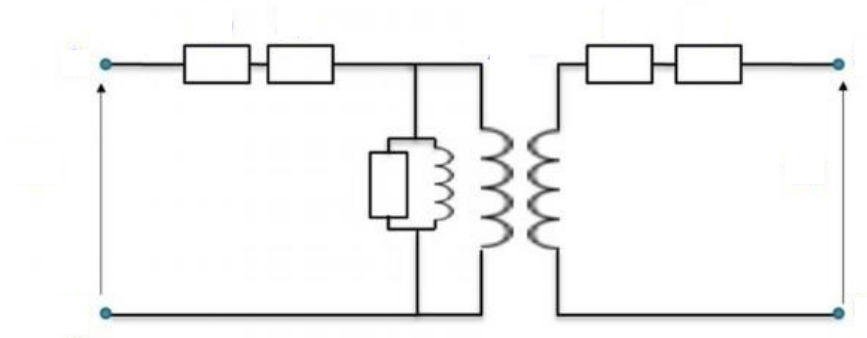
2.2.13 Prinsip Kerja Trafo Tegangan

Trafo tegangan bekerja berdasarkan prinsip elektomagnetik. 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 trafo tidak mempunyai rugi-rugi (trafo ideal) berlaku persamaan :

$$N_1 \times E_1 = N_2 \times E_2 \text{ atau } \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots 2.3$$

dimana :

- N_1 : Jumlah belitan kumparan primer
- N_2 : Jumlah belitan kumparan sekunder
- E_1 : Tegangan kumparan primer
- E_2 : Tegangan kumparan sekunder



Gambar 2.5 Prinsip Kerja Trafo Tegangan

2.2.14 Kesalahan Ukur Trafo Tegangan

Trafo tegangan biasanya dibebani oleh rangkaian impedansi yang terdiri dari relai-relai proteksi, peralatan meter dan kawat (penghubung dari terminasi PT ke instrumen proteksi maupun meter). Kesalahan pengukuran PT (ϵ) berdasarkan IEC-186 adalah sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{K_T.V_S - V_P}{V_P} \times 100\% \dots\dots\dots 2.4$$

Dimana :

- K_T : perbandingan rasio pengenalan
- V_P : tegangan primer aktual (Volt)
- V_S : tegangan sekunder aktual (Volt)

2.2.15 KWh Meter

Pada dasarnya fungsi utama dari kWh meter ialah untuk menghitung pemakaian energi listrik. Dengan perkembangan teknologi yang luar biasa, maka kWh meter berkembang menjadi suatu alat ukur otomatis yang bisa mengirimkan hasil pengukurannya kepada perusahaan listrik yang bersangkutan.

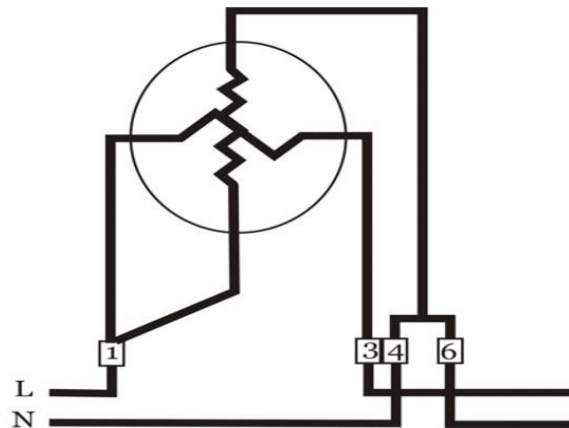
KWh meter bekerja menggunakan metode induksi medan magnet dimana medan magnet tersebut menggerakkan piringan yang terbuat dari aluminium. Pengukur watt atau kilo watt, yang pada umumnya disebut watt meter atau Kwatt meter disusun sedemikian rupa, sehingga kumparan tegangan dapat berputar dengan bebasnya, dengan jalan demikian tenaga listrik dapat diukur, baik dalam satuan watt *hour* ataupun dalam kWh. KWh meter pada umumnya terbagi menjadi 2 jenis, yaitu kWh meter 1 fasa dan kWh meter 3 fasa. Namun, untuk pengukuran pemakaian energi pada pelanggan khusus tegangan menengah (TM) kWh meter dilengkapi dengan pemasangan trafo arus (CT) dan trafo tegangan (PT).

1. KWh Meter 1 Fasa

KWh meter 1 fasa merupakan suatu alat ukur yang banyak dipakai baik di lingkungan perumahan atau pelanggan umum. Berikut merupakan gambar dari kWh meter 1 fasa dan wiring diagramnya :



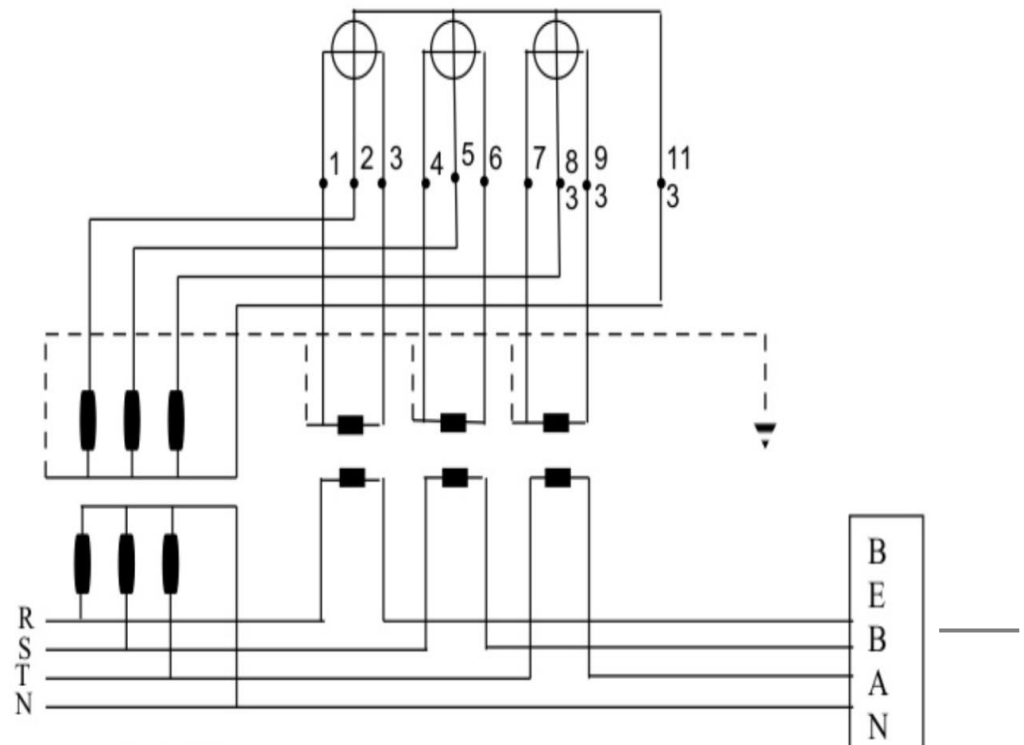
Gambar 2.6 KWh Meter 1 Fasa



Gambar 2.7 Wiring Diagram KWh Meter 1 Fasa

2. KWh Meter 3 Fasa

Kwh meter 3 fasa merupakan kWh meter yang dipasang untuk pelanggan atau konsumen 3 fasa. Dimana kWh meter 3 fasa tersebut terbagi menjadi 2 jenis yaitu kWh meter 3 fasa secara langsung dan kWh meter 3 fasa secara tidak langsung. KWh meter 3 fasa secara langsung yaitu kWh meter yang tidak dilengkapi dengan trafo arus (CT) dan trafo tegangan (PT), sedangkan kWh meter 3 fasa secara tidak langsung yaitu kWh meter yang dilengkapi dengan trafo arus (CT) dan trafo tegangan (PT). Berikut merupakan gambar wiring kWh 3 fasa secara tidak langsung :



Gambar 2.8 Diagram Pengawatan kWh meter fasa tiga, 4 kawat sambungan melalui trafo arus dan trafo tegangan, tarif tunggal.

3. Cara Kerja KWh Meter 3 Fasa

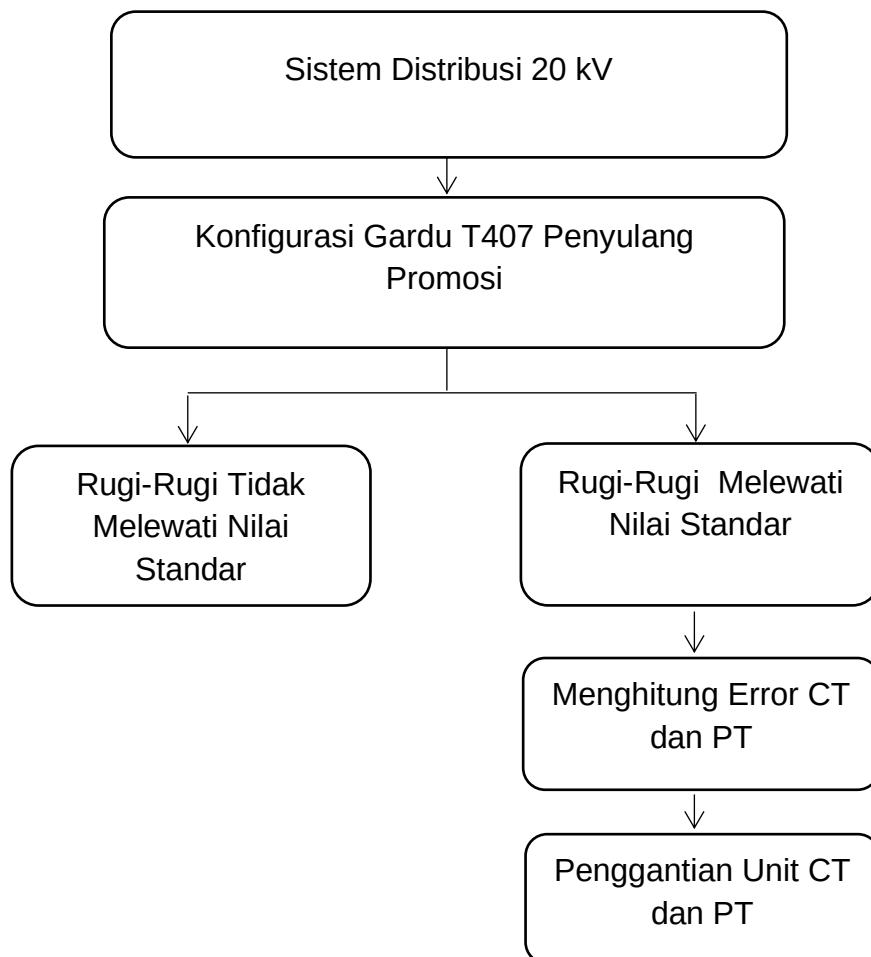
Arus beban pada I menghasilkan fluks bolak balik Φ_c , yang kemudian melewati piringan aluminium dan menginduksinya. Akibatnya timbul tegangan dan Eddy Current. Selain itu kumparan tegangan Bp juga menghasilkan fluks bolak balik Φ_p yang melintas arus IF, sehingga piringan mendapatkan gaya, dan resultan dari torsi membuat piringan tersebut menjadi berputar.

Torsi putaran sebanding dengan fluks Φ_p serta arus IF dan harga cosinus dari sudut diantaranya. Akibat Φ_p dan IF sebanding dengan tegangan E serta arus beban I, maka torsi motor sebanding dengan $EI \cos \theta$, yakni daya aktif yang diberikan menuju ke beban. Oleh sebab itu kecepatan putaran piringan sebanding dengan daya aktif yang digunakan.

Semakin besar daya aktif yang digunakan, kecepatan putaran piringan juga semakin besar, begitu juga sebaliknya. Dari situlah kita dapat menghitung besarnya tagihan listrik yang harus dibayar setiap bulannya. Besarnya pemakaian listrik dikalikan dengan tarif dasar listrik atau yang biasa disebut dengan TDL, ditambah biaya abonemen dan juga pajak.

2.3 Kerangka Pemikiran

Untuk mempermudah pemahaman yang dilakukan di dalam penelitian, maka digunakan flow chart seperti ditunjukkan oleh tabel 2.1 sebagai berikut :



Gambar 2.9 Diagram Alur Penelitian