

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan studi yang telah dilakukan oleh peneliti lain dengan topik yang relevan dan dijadikan acuan dalam penelitian ini. Kajian ini penting karena memberikan dasar teoritis, gambaran umum permasalahan, serta menunjukkan celah penelitian yang dapat dikembangkan lebih lanjut.

Dengan mengacu pada penelitian terdahulu, penulis dapat memperkuat landasan teori, membandingkan hasil, serta menentukan pendekatan dan metode yang sesuai. Selain itu, kajian ini membantu agar penelitian yang dilakukan lebih fokus, tidak mengulang topik yang sama, dan mampu memberikan kontribusi baru dalam bidang yang dikaji.

Menurut (Kusuma, 2024), *Relay* diferensial merupakan sistem proteksi utama pada transformator yang bekerja berdasarkan prinsip Hukum Kirchhoff I, yaitu arus yang masuk pada suatu titik sama dengan arus keluar dari titik tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perhitungan matematis *setting relay* diferensial dan membandingkannya dengan *setting* eksisting di GI 150kV Cilegon Baru. Metode pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur, dokumentasi teknis, dan wawancara langsung dengan pihak proteksi GI. Hasil perhitungan menunjukkan nilai arus *setting* sebesar 0,24 A dengan *Slope1* sebesar 29,32% dan *Slope2* sebesar 58,64%, yang berbeda dengan *setting* di GI Cilegon Baru, yaitu 0,2 A, 30%, dan 80%. Perbedaan tersebut disebabkan oleh faktor-faktor yang dipertimbangkan dalam perhitungan matematis seperti

CT *mismatch*, arus eksitasi, dan faktor keamanan. Meskipun berbeda, nilai *setting* hasil perhitungan masih dalam batas rekomendasi PLN.

Menurut (Munir, 2023), gangguan hubung singkat pada transformator di Gardu Induk Surabaya Selatan dapat menyebabkan lonjakan arus listrik yang signifikan, yang berpotensi merusak peralatan sistem tenaga listrik. Untuk mencegah kerusakan tersebut, diperlukan sistem proteksi yang andal, salah satunya adalah penggunaan *relay* diferensial. Penelitian ini membandingkan metode penentuan *setting relay* secara numerikal dengan metode algoritma genetika (AG) guna mendapatkan respon *trip* tercepat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode AG mampu mempercepat respon *trip relay* diferensial dibandingkan dengan metode numerikal maupun kondisi eksisting, dengan waktu percepatan sebesar 0.088 detik pada transformator 1 dan 0.047 detik pada transformator 2 dan 3. Hal ini membuktikan bahwa AG merupakan metode optimasi yang efektif dalam meningkatkan kinerja sistem proteksi transformator terhadap gangguan arus hubung singkat.

Menurut (Keumala, 2021), *Relay* diferensial merupakan proteksi utama pada transformator daya karena mampu bekerja tanpa memerlukan koordinasi dengan *relay* lain, sehingga dapat memberikan respon proteksi yang sangat cepat. Penelitian ini dilakukan di PLTMG Sumbagut 2 Peaker Power Plant 250 MW. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketika arus gangguan mencapai 50.000 A, *Relay* diferensial akan merespons dan memutus sirkuit dengan arus *setting* sebesar 0,174 A. Simulasi menggunakan MATLAB dan Simulink juga menunjukkan bahwa waktu respon *relay* diferensial sangat dipengaruhi oleh

lamanya gangguan, di mana semakin lama durasi gangguan, semakin besar amplitudo gelombang arus gangguan yang terdeteksi. Penelitian ini menegaskan pentingnya akurasi *setting relay* diferensial untuk menjaga keandalan transformator dari gangguan internal.

Menurut (Goeritno, 2018) menunjukkan bahwa kinerja *relay* diferensial tidak hanya berfungsi untuk mendeteksi gangguan internal pada transformator daya, tetapi juga secara signifikan meningkatkan keandalan sistem proteksi listrik. Ini sangat penting bagi Gardu Induk, di mana deteksi yang cepat dan akurat terhadap gangguan akan memastikan operasional sistem berjalan dengan aman dan efisien tanpa gangguan yang disebabkan oleh kesalahan deteksi. Dengan meningkatnya keandalan sistem proteksi, risiko kerusakan pada peralatan dan biaya pemeliharaan yang terkait juga akan berkurang secara signifikan.

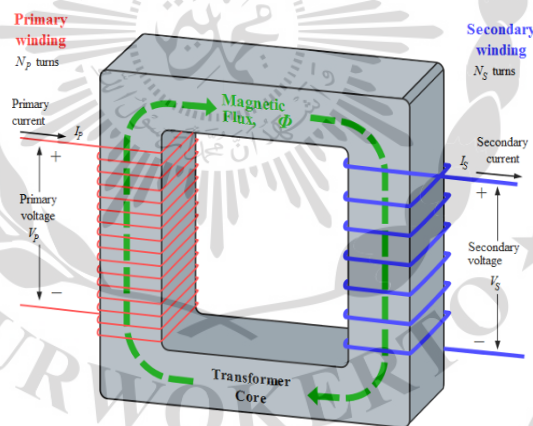
Berdasarkan studi-studi penelitian terdahulu, proteksi transformator di gardu induk, khususnya di Gardu Induk Purbalingga, merupakan aspek yang sangat penting dan perlu mendapatkan perhatian serius. Hal ini disebabkan oleh peran vital transformator sebagai komponen utama dalam penyaluran energi listrik, yang apabila mengalami gangguan dapat berdampak luas terhadap keandalan sistem tenaga secara keseluruhan. Salah satu metode proteksi yang sangat direkomendasikan adalah penggunaan *relay* diferensial, karena memiliki kemampuan mendeteksi gangguan internal pada transformator secara cepat dan akurat. Dengan menggunakan *relay* ini, potensi kerusakan yang lebih luas, seperti merambatnya gangguan ke peralatan lain di dalam gardu, dapat dicegah

sejak dini, sehingga sistem tetap beroperasi secara andal dan efisien. Oleh karena itu, implementasi proteksi diferensial tidak hanya menjadi kebutuhan teknis, tetapi juga menjadi langkah strategis dalam menjaga kontinuitas dan kestabilan pasokan listrik.

B. Landasan Teori

a. Transformator Daya

Transformator daya merupakan perangkat statis yang berfungsi mentransfer energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya dengan mengubah tingkat tegangan tanpa mengubah frekuensinya (Keumala, 2021). Disebut sebagai alat statis karena tidak memiliki bagian yang bergerak, transformator berbeda dengan mesin listrik seperti motor atau generator.



Gambar 2.1 Elektromagnetik Pada Transformator (Keumala, 2021).

Transformator pada Gambar 2.1 prinsip kerjanya didasarkan pada induksi bersama (*mutual induction*) antara dua rangkaian yang terhubung melalui fluks magnetik. Secara umum, transformator terdiri dari dua kumparan yang secara listrik terpisah, tetapi secara magnetis saling berhubungan melalui inti besi. Ketika salah satu kumparan dialiri tegangan AC, fluks magnetik bolak-balik

akan terbentuk dalam inti besi dan menginduksi gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan lainnya sesuai dengan Hukum Faraday.

Transformator daya atau transformator tenaga dapat diklasifikasikan berdasarkan sistem pemasangan dan fungsinya dalam sistem kelistrikan. Berdasarkan sistem pemasangannya, transformator daya dibagi menjadi dua, yaitu transformator yang dipasang di dalam ruangan (*indoor*) dan transformator yang dipasang di luar ruangan (*outdoor*). Sementara itu, jika ditinjau dari fungsi dan penggunaannya, transformator daya dapat dikelompokkan menjadi transformator mesin yang digunakan untuk menyuplai daya ke mesin-mesin listrik, transformator gardu induk yang berperan dalam proses transmisi dan interkoneksi jaringan tegangan tinggi, serta transformator distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari gardu ke konsumen akhir pada tingkat tegangan yang lebih rendah.

b. Transformator Arus (*Current Transformer/CT*)

Transformator arus (*Current Transformer/CT*) pada Gambar 2.2 adalah perangkat listrik yang digunakan untuk mengubah arus besar pada sistem arus bolak-balik (AC) menjadi arus yang lebih kecil, yang aman dan sesuai untuk keperluan pengukuran serta proteksi sistem tenaga listrik. CT berfungsi untuk mengkonversi arus dari sisi primer ke sisi sekunder agar dapat digunakan dalam sistem metering dan proteksi, memberikan isolasi antara rangkaian primer dan sekunder guna melindungi operator dari bahaya listrik, serta memungkinkan standarisasi arus pada peralatan di sisi sekunder agar bekerja sesuai dengan perangkat ukur dan proteksi yang digunakan.



Gambar 2.2 *Current Transformer (CT)* (Tolibin, 2025).

Selain itu, *Current Transformer* juga berperan penting dalam sistem tenaga listrik untuk melakukan pengukuran arus berintensitas tinggi, bahkan hingga ratusan ampere, terutama pada jaringan bertegangan tinggi. CT tidak hanya digunakan untuk mengukur arus, tetapi juga besaran daya dan energi listrik, serta memiliki fungsi vital dalam sistem telemetri dan sebagai bagian dari sistem proteksi (Kondoy, 2020).

Rasio *Current Transformer*

Dalam sistem proteksi transformator, *Current Transformer* dipasang pada sisi primer dan sekunder untuk memantau kondisi arus secara seimbang. Agar sistem proteksi bekerja dengan baik, rasio transformasi dari masing-masing CT harus disesuaikan sehingga arus sekunder memiliki nilai yang sama atau setidaknya mendekati. Perbedaan arus antara kedua sisi dapat menimbulkan selisih arus yang semakin besar ketika terjadi gangguan hubung singkat di luar area perlindungan, yang berpotensi menyebabkan respons proteksi yang tidak tepat. Oleh karena itu, pemilihan rasio CT harus didasarkan pada perhitungan

yang mempertimbangkan *rating* arus, karena *rating* ini menjadi dasar dalam menentukan rasio yang sesuai untuk menjaga keandalan sistem.

Untuk menentukan nilai arus *rating*, dapat digunakan persamaan sebagai acuan perhitungannya. Nilai arus *rating* ini sangat penting dalam proses perancangan sistem proteksi, karena menjadi dasar dalam pemilihan peralatan seperti *Current Transformer* (CT) maupun pemutus tenaga. Sebelum menentukan arus *rating* diperlukan arus nominal terlebih dahulu. Adapun perhitungannya dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

Untuk mencari arus nominal maka digunakan persamaan :

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan :

I_n = Arus Nominal (A)

S = Daya tersalur (MVA)

V = Tegangan pada sisi primer dan sekunder (kV)

I_n atau arus nominal merupakan arus yang mengalir pada masing-masing jaringan (tegangan tinggi dan tegangan rendah)

$$I_{rat} = 110\% \times I_n \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan :

I_{rat} = Arus *Rating* (A)

I_n = Arus Nominal (A)

Error mismatch

Kesalahan *error mismatch* didefinisikan sebagai ketidaksesuaian dalam mendeteksi secara akurat perubahan arus dan tegangan antara sisi primer dan

sekunder transformator, termasuk perbedaan sudut fasa yang terjadi. Kondisi ini umumnya disebabkan oleh perbedaan rasio antara *Current Transformer* (CT) ideal dan CT yang digunakan di lapangan, yang mungkin memiliki spesifikasi berbeda dari nilai teoritis. Untuk menghitung besarnya arus *mismatch*, dilakukan perbandingan antara rasio CT ideal dengan rasio CT aktual yang tersedia di pasaran. Dalam praktiknya, nilai *error* yang ditimbulkan dari perbedaan tersebut tidak boleh melebihi batas toleransi sebesar 5% dari rasio CT yang telah ditentukan, guna memastikan sistem proteksi tetap bekerja secara akurat dan andal.

Adapun untuk menghitung nilai *error mismatch* digunakan persamaan :

$$error\ mismatch = \frac{ct\ ideal}{ct\ terpasang} \% \dots\dots\dots (3)$$

Sebelum mencari nilai *error mismatch* maka tentukanlah nilai CT idealnya dengan persamaan :

$$\frac{CT_2}{CT_1} = \frac{V_1}{V_2} \dots\dots\dots (4)$$

$$Rasio\ CT_{ideal_1} = Rasio\ CT_2 \times \frac{V_2}{V_1} \dots\dots\dots (5)$$

$$Rasio\ CT_{ideal_2} = Rasio\ CT_1 \times \frac{V_1}{V_2} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan :

Rasio CT ideal = Nilai Rasio CT Ideal (A)

V_1 = Tegangan Primer (V)

V_2 = Tegangan Sekunder (V)

Arus Sekunder CT

Arus sekunder pada CT adalah arus yang dihasilkan dan dialirkan keluar dari *Current Transformer*, yang menggambarkan arus primer dalam skala yang lebih kecil dan aman untuk keperluan pengukuran maupun proteksi. Untuk menghitung arus sekunder CT maka digunakan persamaan berikut :

$$I_{\text{Sekunder}} = \frac{1}{\text{rasio CT}} \times I_n \dots \dots \dots (7)$$

c. Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Sistem proteksi adalah suatu sistem pengamanan terhadap peralatan listrik, yang diakibatkan adanya gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi, dan penyebab yang lainnya. Proteksi merupakan pengamanan listrik pada sistem tenaga listrik yang terpasang pada sistem distribusi tenaga listrik, transformator tenaga, transmisi tenaga listrik yang dipergunakan untuk mengamankan sistem tenaga listrik dari gangguan listrik atau beban lebih, dengan cara memisahkan bagian sistem tenaga listrik yang terganggu.

Sistem proteksi pada Sistem Tenaga Listrik berfungsi sebagai mekanisme pengamanan yang dirancang untuk melindungi peralatan listrik serta memutuskan bagian jaringan yang mengalami gangguan, agar tidak merambat dan memengaruhi area lain. Proses pemutusan ini dilakukan berdasarkan sejumlah parameter yang diamati langsung di lapangan, seperti arus, tegangan, frekuensi, daya, sudut fasa, impedansi saluran, dan lainnya. Tujuan utama dari sistem proteksi ini adalah untuk meminimalkan kerusakan pada peralatan akibat gangguan, mengisolasi area yang terkena dampak gangguan agar tidak menjalar

ke bagian sistem yang sehat, serta menjaga keandalan dan kontinuitas operasional sistem tenaga listrik (Munir, 2023).

d. Syarat Sistem Proteksi

Secara umum pengertian sistem proteksi merupakan salah satu cara pencegahan atau membatasi kerusakan peralatan terhadap gangguan, sehingga kelangsungan tenaga listrik dapat dipertahankan. Dalam sistem tenaga listrik, sistem proteksinya adalah perlindungan atau isolasi pada bagian yang memungkinkan akan ada gangguan atau bahaya.

Untuk suatu sistem proteksi harus memenuhi beberapa syarat, antara lain :

1. Selektif (*Selective*)

Sistem proteksi harus mampu bekerja secara selektif, yakni dapat mengidentifikasi secara tepat area atau bagian sistem yang mengalami gangguan. Komponen yang terganggu harus segera dipisahkan, sementara bagian lain yang tidak terpengaruh oleh gangguan harus tetap beroperasi secara normal.

2. Sensitif (*Sensitive*)

Sistem proteksi perlu memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi agar dapat mendeteksi gangguan sedini mungkin. Dengan demikian, kerusakan pada peralatan atau sistem dapat diminimalkan, dan area gangguan dapat segera diisolasi sebelum menimbulkan dampak yang lebih besar.

3. Andal (*Reliable*)

Keandalan merupakan aspek penting dalam sistem proteksi. Sistem ini harus mampu berfungsi dengan baik pada setiap kondisi gangguan yang mungkin terjadi. Meskipun dalam keadaan normal sistem proteksi mungkin tidak beroperasi dalam jangka waktu lama, namun ketika terjadi gangguan, sistem tersebut harus dapat bekerja secara tepat dan efektif.

4. Cepat (*Speed*)

Sistem proteksi juga dituntut untuk memiliki kecepatan kerja sesuai dengan karakteristik yang telah ditentukan. Semakin cepat sistem proteksi merespons gangguan, semakin kecil pula kemungkinan terjadinya kerusakan yang meluas pada peralatan maupun sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

e. Sistem Proteksi Transformator

Proteksi pada transformator daya dirancang untuk mencegah kerusakan akibat peningkatan suhu yang berlangsung dalam jangka waktu tertentu. Untuk menghindari dampak dari gangguan yang terjadi, transformator daya perlu segera diisolasi dari sistem. Setiap gangguan harus ditangani secepat mungkin agar tidak menyebabkan keterlambatan yang dapat memperparah kondisi. Hal ini penting mengingat transformator daya memiliki ukuran yang besar dan nilai ekonomis yang tinggi, sehingga kerusakan padanya akan berdampak signifikan terhadap biaya dan kestabilan sistem. Sebaliknya, transformator dengan kapasitas lebih kecil masih dapat dilindungi menggunakan proteksi arus lebih. Oleh karena itu, kecepatan dan ketepatan dalam merespons gangguan sangat

menentukan keandalan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Dalam sistem pengamanan transformator, terdapat beberapa jenis sistem proteksi yang umum digunakan, seperti *Over Current Relay* (OCR), *Ground Fault Relay* (GFR), proteksi diferensial, *relay* jarak, *relay* direksional, *undervoltage relay*, dan lainnya. *Over Current Relay* berfungsi mendeteksi kelebihan arus pada transformator, namun tidak mampu memantau seluruh karakteristik arus, khususnya arus pada sisi primer dan sekunder. Karena OCR tidak mendeteksi perbedaan arus antara kedua sisi tersebut, maka proteksi terhadap kondisi ini dilakukan oleh sistem proteksi diferensial. *Relay* ini bekerja dengan cara membandingkan arus di sisi primer dan sekunder jika terdapat selisih yang signifikan, maka *relay* akan mengirimkan sinyal ke pemutus sirkuit untuk memutuskan aliran listrik. Proteksi diferensial menjadi salah satu metode utama dalam pengamanan transformator karena sifat kerjanya yang sangat selektif, sehingga dapat beroperasi cepat tanpa perlu disesuaikan dengan perangkat proteksi lain (Ardiansyah, 2024).

f. Gangguan Pada Transformator Daya

Transformator daya berperan mengubah besaran tegangan dan arus listrik menggunakan prinsip magnetik. Sama seperti perangkat kelistrikan lainnya, penting bagi transformator untuk memiliki sistem proteksi yang mampu melindungi unit dari gangguan yang berasal dari internal maupun eksternal (Subianto, 2016).

Gangguan transformator adalah keadaan tidak normal yang menghambat fungsi optimal peralatan, yang pada akhirnya menyebabkan transformator tidak

dapat beroperasi sebagaimana mestinya. Indikasi awal adanya masalah ini sering kali ditandai dengan bunyi alarm yang aktif, diikuti oleh *tripnya relay* pengaman transformator (PMT *trip*), suatu tindakan otomatis yang secara kritis memutuskan penyaluran tenaga listrik demi mencegah kerusakan lebih lanjut. Selain itu, berbagai tanda atau peringatan dari *relay* bantu akan muncul, seperti lampu sinyal blok indikator yang menyala, meter ukur yang menunjukkan pembacaan tidak normal, lampu tanda *relay* atau bendera *relay* yang aktif, bahkan dapat disertai dengan bunyi-bunyian aneh atau bau-bauan tidak sedap yang mengindikasikan masalah internal.

Gangguan Internal

Gangguan internal pada transformator daya adalah kerusakan yang terjadi di dalam komponen utama transformator, seperti lilitan (*winding*), inti besi, sistem isolasi, maupun elemen pendingin internal. Gangguan ini bisa berkembang secara perlahan (*incipient faults*) atau terjadi tiba-tiba dengan dampak yang serius (*electrical faults*). Salah satu bentuk gangguan yang umum adalah hubung singkat antar lilitan, baik pada fasa yang sama maupun antar fasa, yang biasanya disebabkan oleh penurunan kualitas isolasi akibat panas berlebih, penuaan material, atau tegangan lebih sesaat. Selain itu, kebocoran minyak isolasi juga menjadi masalah serius karena dapat mengurangi kemampuan pendinginan dan kekuatan dielektrik, terutama jika minyak mengalami kontaminasi atau penurunan kualitas karena usia. Kerusakan seperti koneksi konduktor yang longgar, penyumbatan saluran pendingin, atau kerusakan pompa

minyak juga termasuk dalam kategori gangguan internal yang dapat mengakibatkan pemanasan berlebih pada transformator.

Gangguan Eksternal

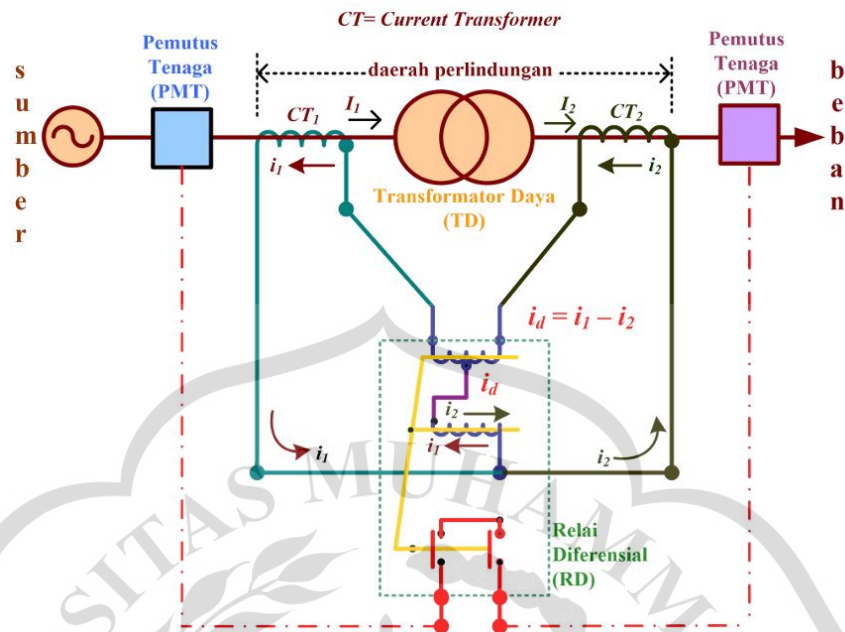
Gangguan eksternal adalah gangguan yang terjadi di luar zona proteksi transformator, namun tetap dapat berdampak besar terhadap kinerja dan keandalannya. Gangguan ini umumnya berasal dari jaringan eksternal seperti penyulang atau sistem transmisi, dan dapat memengaruhi ketahanan kumparan primer, sekunder, maupun tersier. Contoh utamanya adalah hubung singkat pada sisi sekunder atau tersier yang menyebabkan arus gangguan masuk pada transformator (*through fault current*). Jika terjadi berulang dengan arus tinggi, gangguan ini dapat mempercepat kerusakan termal dan mekanis pada belitan, sehingga mengurangi umur operasional transformator. Selain itu, gangguan eksternal juga mencakup pembebanan lebih (*overload*) akibat pertumbuhan beban yang tidak terkendali, tegangan lebih (*overvoltage*) karena surja hubung atau petir, serta gangguan frekuensi tidak normal akibat ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban. Meskipun tidak berasal dari dalam transformator, semua bentuk gangguan ini harus diperhitungkan dalam perancangan sistem proteksi untuk menjaga keandalan transformator (PT PLN (Persero), 2014).

g. Relay Diferensial

Relay diferensial arus bekerja berdasarkan prinsip Hukum Kirchhoff I, yang menyatakan bahwa jumlah arus yang masuk ke suatu titik cabang dalam rangkaian listrik harus sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik tersebut.

Prinsip ini digunakan oleh *relay* diferensial untuk membandingkan arus pada sisi masuk dan keluar dari daerah yang dilindungi (Deuria, 2021).

Relay diferensial merupakan salah satu sistem proteksi utama (*main protection*) yang dirancang untuk melindungi peralatan listrik seperti transformator daya dari gangguan internal, khususnya hubung singkat yang terjadi di dalam zona perlindungan yang dapat diamati pada Gambar 2.3. *Relay* ini bekerja dengan prinsip keseimbangan arus yaitu dengan membandingkan arus sekunder dari *Current Transformer* (CT) yang terpasang di sisi primer dan sekunder peralatan. Jika arus pada kedua sisi tersebut seimbang, sistem dianggap dalam kondisi normal. Namun, apabila terjadi perbedaan arus yang signifikan yang menunjukkan adanya gangguan internal *relay* akan langsung bereaksi dengan mengirimkan sinyal ke pemutus sirkuit (*circuit breaker*) untuk segera memutus aliran listrik dan mencegah kerusakan lanjutan. Penggunaan *relay* diferensial juga memungkinkan deteksi gangguan secara tepat waktu dan akurat, bahkan pada gangguan yang tidak terdeteksi oleh sistem proteksi arus lebih biasa. Hal ini disebabkan karena *relay* diferensial tidak hanya mengandalkan besar arus, tetapi juga memperhitungkan arah dan lokasi aliran arus dalam zona proteksi.

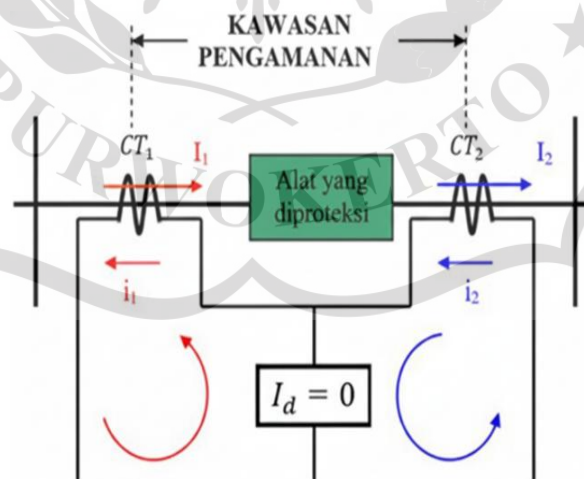


Gambar 2.3 Diagram Skematis Penempatan *Relay* Diferensial (Goeritno, 2018).

Fungsi utama dari *relay* diferensial adalah mengamankan belitan transformator dari potensi kerusakan akibat arus gangguan. Keunggulan dari sistem ini terletak pada tingkat selektivitas dan kecepatan respons yang tinggi. *Relay* diferensial hanya bekerja ketika gangguan terjadi di dalam zona proteksi sedangkan jika gangguan berada di luar zona tersebut, sistem tetap stabil dan *relay* tidak bereaksi. Karena sifat selektif inilah, *relay* diferensial tidak memerlukan koordinasi dengan *relay* jenis lain dan dapat beroperasi tanpa tundaan waktu. Selain pada transformator daya, *relay* ini juga banyak diaplikasikan pada sistem proteksi generator, busbar, dan saluran transmisi, menjadikannya salah satu alat proteksi paling handal untuk berbagai komponen penting dalam sistem tenaga listrik.

Relay Diferensial Pada Keadaan Normal

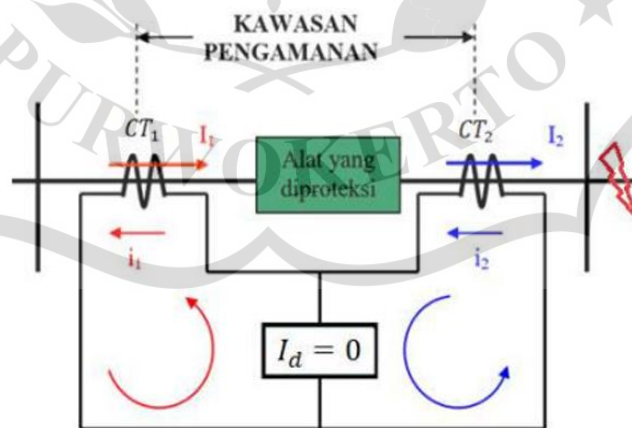
Pada kondisi normal atau saat tidak terjadi gangguan di dalam zona proteksi, arus yang mengalir melalui sisi primer dan sekunder *Current Transformer* (CT) akan seimbang. Seperti terlihat pada Gambar 2.4, CT₁ dan CT₂ masing-masing mendeteksi arus I_1 dan I_2 yang besarnya sama dan sefasa, selama tidak ada gangguan internal. Karena kedua CT memiliki rasio yang identik, maka arus sekunder hasil konversi juga akan sama besar. Dalam keadaan ini, selisih arus (I_d) yang masuk ke sistem *relay* adalah nol, sehingga tidak ada tegangan yang melintasi kumparan (*coil*) *relay* dan tidak ada arus yang mengalir di dalamnya. Akibatnya, *relay* diferensial tidak aktif atau tidak bekerja karena sistem mendeteksi bahwa kondisi operasi masih berada dalam batas normal atau gangguan berada di luar area perlindungan. Zona kerja dari *relay* diferensial terbatas hanya pada area di antara pasangan CT tersebut, sehingga ia tidak merespons gangguan di luar zona tersebut.



Gambar 2.4 Rangkaian *Relay* Diferensial Keadaan Normal (Gozali, 2022).

Relay Diferensial Pada Gangguan di Luar Daerah Proteksi

Gangguan eksternal adalah jenis gangguan yang terjadi di luar zona proteksi dari *relay* diferensial, seperti gangguan hubung singkat pada saluran transmisi atau sistem distribusi yang terletak setelah titik pemasangan CT. Pada kondisi ini, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5, meskipun terjadi gangguan di sisi luar perangkat yang diproteksi, arus yang mengalir melalui CT₁ dan CT₂ tetap memiliki besaran yang sama tetapi arahnya berlawanan. Akibatnya, arus sekunder dari kedua CT juga tetap seimbang ($i_1 = i_2$), sehingga tidak terbentuk arus diferensial ($I_d = 0$) pada rangkaian *relay*. Karena tidak ada perbedaan arus yang terdeteksi, maka *relay* diferensial tidak menganggap situasi tersebut sebagai gangguan dalam zona perlingkungannya, dan tidak akan mengaktifkan pemutusan. Hal ini menegaskan bahwa *relay* diferensial hanya bekerja untuk gangguan internal, dan akan tetap tidak aktif jika gangguan terjadi di luar kawasan yang telah ditentukan sebagai area pengamanan.



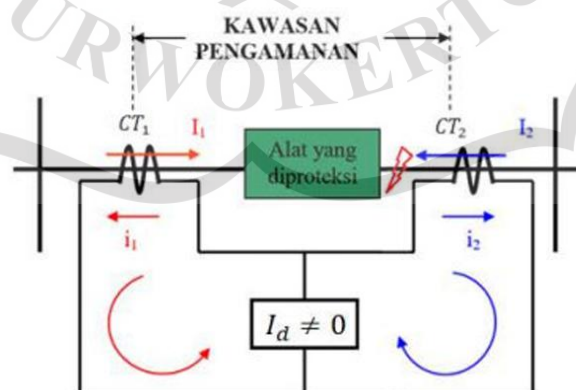
Gambar 2.5 Rangkaian *Relay* Diferensial Gangguan Eksternal (Gozali, 2022).

Relay Diferensial Pada Gangguan di Dalam Daerah Proteksi

Gangguan internal merupakan gangguan yang terjadi di dalam kawasan pengamanan *relay* diferensial. Ketika gangguan terjadi di dalam area ini (seperti yang terlihat pada Gambar 2.6), arus dari kedua sisi *Current Transformer*, yaitu CT_1 dan CT_2 , akan mengalir menuju titik gangguan. Hal ini menyebabkan arus sekunder dari CT_2 (i_2) berbalik arah dari kondisi normalnya, sehingga tidak lagi menyeimbangi arus dari CT_1 (i_1).

Perubahan arah arus ini menyebabkan arus diferensial (I_d) tidak sama dengan nol ($I_d \neq 0$). Ketidakeimbangan ini menjadi indikasi bahwa terdapat gangguan internal pada peralatan yang diproteksi.

Akibatnya, *relay* diferensial akan langsung mengirimkan sinyal *trip* ke pemutus tenaga (PMT) untuk segera memutuskan sambungan listrik guna mencegah kerusakan lebih lanjut pada transformator. Jika gangguan internal ini tidak segera diisolasi, maka transformator dapat mengalami kerusakan serius yang berpotensi merusak sistem secara keseluruhan.



Gambar 2.6 Rangkaian *Relay* Diferensial Gangguan (Gozali, 2022).

h. Konfigurasi *Setting Relay* Diferensial

Dalam penerapan *relay* diferensial pada transformator daya, seringkali muncul kendala terkait ketepatan kinerjanya. Hal ini dapat menyebabkan *relay* tidak bekerja sebagaimana mestinya atau bahkan mengalami kegagalan fungsi. Salah satu penyebab utama dari kesalahan kerja *relay* diferensial adalah perbedaan konfigurasi hubungan antara sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah pada transformator, yang mengakibatkan ketidakseimbangan arus di dalam sistem. Oleh karena itu, sangat penting untuk memahami syarat-syarat yang harus dipenuhi agar *relay* diferensial dapat beroperasi secara optimal. Beberapa di antaranya adalah arus yang masuk ke *relay* harus memiliki nilai yang sama, dan setiap fasa harus memiliki arah yang saling berlawanan.

Relay diferensial beroperasi berdasarkan Hukum Kirchhoff I (Kirchhoff *Current Law*), yang menyatakan bahwa jumlah arus yang masuk ke suatu titik dalam rangkaian listrik harus sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik tersebut. Prinsip ini menjadi dasar dalam mendeteksi adanya gangguan internal pada peralatan seperti transformator. Untuk menganalisis dan menetapkan kerja *relay* diferensial secara akurat, diperlukan perhitungan terhadap beberapa parameter penting, yaitu arus diferensial, arus penahan (*restraint Current*), nilai kemiringan (*Slope*), serta arus *setting*. Nilai-nilai ini akan ditentukan melalui sejumlah persamaan yang akan dijelaskan lebih lanjut.

Arus Diferensial

Arus diferensial adalah arus yang dihasilkan dari selisih antara arus pada sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah transformator, yang masing-masing

diukur oleh *Current Transformer* (CT). Arus ini dihitung dengan membandingkan arus sekunder dari CT di sisi primer (i_1) dan CT di sisi sekunder (i_2). Secara matematis, arus diferensial dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$I_d = |i_2 - i_1| \dots \dots \dots (8)$$

Keterangan:

- I_d = Arus diferensial
- i_2 = Arus sekunder dari CT sisi tegangan rendah
- i_1 = Arus sekunder dari CT sisi tegangan tinggi

Dalam kondisi normal, nilai I_d seharusnya mendekati nol karena arus masuk dan keluar dari transformator berada dalam keadaan seimbang. Namun, apabila $I_d \neq 0$ maka hal ini menandakan adanya ketidakseimbangan arus yang bisa terjadi akibat gangguan internal di dalam zona proteksi. Jika kondisi tersebut terdeteksi, *relay* diferensial akan segera mengirimkan sinyal *trip* ke pemutus tenaga (PMT) atau *circuit breaker* (CB) untuk memutus aliran listrik dan mengisolasi gangguan guna mencegah kerusakan lebih lanjut pada transformator.

Arus *Restraint* (Penahan)

Arus *restraint* merupakan salah satu parameter penting dalam kerja *relay* diferensial yang berfungsi sebagai arus penahan terhadap kesalahan pengukuran atau gangguan yang bukan berasal dari dalam zona proteksi. Arus ini dihitung berdasarkan nilai rata-rata arus sekunder dari CT yang terpasang di sisi tegangan tinggi (primer) dan sisi tegangan rendah (sekunder) transformator. Tujuan utama dari penggunaan arus *restraint* adalah untuk menghindari salah operasi dari *relay*

akibat perbedaan kecil arus (*mismatch*), misalnya karena saturasi CT, kesalahan rasio, atau transien sistem. Saat terjadi perbedaan arus antara CT₁ dan CT₂, arus *restraint* membantu menentukan apakah perbedaan tersebut cukup signifikan untuk dianggap sebagai gangguan internal. Menurut (PT PLN (Persero), 2013) Setiap pabrikan umumnya memiliki persamaan atau metode khusus dalam menetapkan nilai arus *restraint* (*I_r*). Adapun untuk formula pabrikan Alstom, ABB, Toshiba, GE adalah :

$$I_r = \frac{i_1 + i_2}{2} \dots\dots\dots (9)$$

Untuk pabrikan Siemens menggunakan :

$$I_r = i_1 + i_2 \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan :

I_r = arus *restraint*

i₁ = arus sekunder dari CT di sisi primer

i₂ = arus sekunder dari CT di sisi sekunder

Perbedaan perhitungan arus *restraint* antar pabrikan disebabkan oleh perbedaan filosofi proteksi dan algoritma internal yang digunakan. Pabrikan Siemens mendefinisikan arus *restraint* sebagai penjumlahan arus sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah untuk meningkatkan stabilitas *relay* terhadap gangguan luar, kesalahan rasio CT, dan saturasi CT, terutama pada kondisi arus besar.

Selain itu, setiap pabrikan menerapkan karakteristik kemiringan (*slope characteristic*) yang berbeda. Nilai arus *restraint* yang dihitung akan secara langsung memengaruhi titik kerja *slope 1* dan *slope 2*, sehingga menentukan

keseimbangan antara sensitivitas *relay* terhadap gangguan internal dan stabilitas *reley* pada gangguan eksternal. Oleh karena itu, perbedaan perhitungan arus *restraint* merupakan bagian dari strategi desain masing masing pabrikan dan tidak mengubah prinsip dasar proteksi diferensial.

Percent Slope

Percent Slope pada sistem proteksi *relay* diferensial diperoleh dari perbandingan antara arus diferensial (I_d) dengan arus *restraint* (I_r). Nilai *Slope* ini terbagi menjadi dua, yaitu *Slope 1* dan *Slope 2*, yang masing-masing memiliki fungsi berbeda dalam pengoperasian *relay*. *Slope 1* digunakan untuk mengetahui arus diferensial agar *relay* dapat bekerja saat terjadi gangguan internal, sedangkan *Slope 2* berfungsi agar *relay* tidak bekerja saat terjadi gangguan eksternal dengan arus besar (Munir, 2023) .

Dalam proses penentuan nilai kecuraman (*slope*) pada proteksi diferensial, aspek stabilitas *relay* menjadi faktor utama yang harus dipertimbangkan. *Relay* diharapkan tetap tidak bekerja pada kondisi pembebanan tinggi maupun saat terjadi gangguan di luar zona proteksi (*external fault*). Oleh karena itu, penetapan nilai kecuraman (*slope*) harus dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai faktor yang berpotensi memengaruhi kestabilan *relay*. Faktor-faktor kesalahan yang perlu dikompensasi dalam penentuan nilai kecuraman meliputi : Kesalahan sadapan : 10%, kesalahan *Current Transformer* (CT) :10%, ketidaksesuaian (*mismatch*) : 5%, arus eksitasi : 1%, faktor keamanan : 5% (PT PLN (Persero), 2013).

Dengan pengaturan ini, *relay* diferensial dapat bekerja secara selektif merespons gangguan internal dengan cepat, namun tetap stabil saat terjadi gangguan di luar zona proteksi. Prinsip ini membantu meningkatkan keandalan sistem proteksi, terutama dalam menghindari gangguan yang tidak perlu terhadap operasi normal sistem tenaga listrik.

Adapun untuk menentukan *Slope* 1 dan *Slope* 2 maka digunakan persamaan berikut :

$$Slope_1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \dots\dots\dots (11)$$

$$Slope_2 = (Slope_1 \times 2) \dots\dots\dots (12)$$

Keterangan :

I_d = Arus Diferensial

I_r = Arus *Restraint*

Arus Setting (Iset)

Arus *setting* merupakan batas ambang (*threshold*) pada *relay* diferensial yang menentukan kapan *relay* harus diaktifkan untuk memberikan sinyal *trip* ke pemutus tenaga (PMT). Ketika arus diferensial yang terdeteksi melebihi nilai *setting* ini, maka *relay* akan bekerja dan memutuskan jaringan guna melindungi transformator dari kerusakan lebih lanjut. Nilai arus *setting* umumnya diperoleh dari hasil perkalian antara persentase *Slope* dengan arus *restraint*, yaitu arus rata-rata yang mengalir melalui sisi primer dan sekunder transformator tetapi setiap pabrikan memiliki perhitungan yang berbeda beda. Arus *setting* adalah hasil dari nilai persentase *Slope* 1 dikalikan dengan arus penahan (Pratito, 2022) sedangkan menurut (PT PLN (Persero), 2013) arus *setting relay* diferensial

ditentukan menggunakan kisaran 0,2–0,3 kali arus nominal transformator. Dengan membandingkan arus diferensial terhadap arus *setting* inilah *relay* menentukan apakah kondisi tersebut termasuk gangguan internal yang memerlukan tindakan pemutusan.

Persamaan untuk menghitung arus *setting* sebagai berikut :

$$I_{sett} = 0.2-0.3 \times I_n \text{ transformator} \dots\dots\dots (13)$$

Keterangan :

I_{sett} = Arus *setting*

I_n = Arus Sekunder Transformator

i. Harmonik ke 2 (*2nd Harmonic*)

Pembatasan harmonik merupakan metode konvensional untuk mencegah salah operasi *relay* diferensial dengan memanfaatkan perbedaan kandungan harmonik pada arus. Arus *inrush* magnetisasi transformator umumnya memiliki komponen harmonik kedua yang tinggi, sedangkan arus akibat gangguan internal mengandung harmonik kedua yang relatif kecil. Metode ini membandingkan rasio harmonik kedua terhadap komponen fundamental arus diferensial dan memblokir kerja *relay* apabila rasio tersebut melampaui nilai ambang tertentu. Secara umum, pengaturan rasio harmonik kedua berkisar antara 1% hingga 40%, dengan nilai historis sekitar 15%. Pengaturan harus mempertimbangkan keseimbangan antara sensitivitas dan selektivitas agar *relay* mampu mengenali arus *inrush* tanpa menghambat operasi saat terjadi gangguan internal (Aibangbee, 2016).

j. Software ETAP

ETAP (*Electrical Transient and Analysis Program*) merupakan perangkat lunak yang dirancang untuk membantu menyelesaikan berbagai permasalahan dalam sistem tenaga listrik. Perangkat ini dianggap sebagai salah satu alat analisis paling lengkap untuk keperluan desain, pengujian, pemantauan, hingga pengendalian sistem kelistrikan. ETAP dapat dijalankan dalam dua mode, yaitu offline dan online. Pada mode *offline*, ETAP digunakan untuk melakukan simulasi sistem tenaga seperti analisis aliran daya, hubung singkat, koordinasi proteksi, arc flash, starting motor, hingga kestabilan transien. Sedangkan dalam mode online, ETAP mampu terhubung dengan data *real-time* untuk pemantauan kondisi sistem, pengambilan keputusan otomatis, optimasi operasi, hingga pengelolaan energi secara langsung. ETAP merupakan piranti yang sangat fleksibel karena tidak hanya mendukung simulasi, tetapi juga dapat digunakan dalam sistem kendali dan monitoring berbasis data *real-time* (Sukisno, 2022).