

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

2.1.1. Penelitian Terkait

Penelitian oleh Ehsan et al. menekankan bahwa penggunaan *relay diferensial* numerik dalam sistem kelistrikan sangat penting untuk melindungi berbagai perangkat seperti generator, *transformator*, dan saluran transmisi [4]. Penelitian ini menunjukkan bahwa prosedur pengujian yang tepat untuk *relay diferensial* sangat penting untuk mencegah kesalahan operasional, yang dapat mengarah pada pemutusan sistem daya yang sehat. Selain itu, artikel oleh Usman dan Faruque membahas aplikasi teknologi synchrophasor yang dapat diintegrasikan dengan *relay diferensial* untuk meningkatkan kesadaran situasional di sistem kelistrikan[5]. Dengan demikian, integrasi alat ini dapat membantu dalam deteksi kesalahan dan lokasi fault.

Penggunaan teknik pelacakan arus diferensial juga telah dievaluasi dalam konteks perlindungan *transformator* oleh Hajar, yang menganalisis pengaturan *relay diferensial* pada generator di PT PJB UBJ O&M PLTU Rembang (Hajar, 2019). Di dalam studi ini, pentingnya pengaturan yang tepat diidentifikasi sebagai faktor krusial untuk meningkatkan keandalan generator. Hal ini konsisten dengan temuan lainnya bahwa pengujian berbasis data dapat meningkatkan keamanan dan keandalan sistem perlindungan [6].

Untuk meningkatkan efektivitas, teknik baru seperti yang diusulkan oleh Xu et al. mengidentifikasi pemrograman ulang pengaturan *relay* berdasarkan pengkondisian arus fault [7]. Mereka menggambarkan keterbatasan tradisional dalam mengatasi saturasi CT (current transformer) dan memberi penekanan pada kebutuhan untuk strategi pemrograman adaptif yang lebih canggih untuk

meningkatkan kinerja *relay diferensial* dalam kondisi transien yang rumit, seperti pada saat inrush current [8],[9].

Dalam hal pelacakan dan peluncuran pengujian, Hao et al. juga menekankan pentingnya memetakan lintasan diferensial pada kurva pengaturannya, yang menunjukkan bahwa metode baru diperlukan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang performa *relay* dalam kondisi transien[8]. Ini dapat diintegrasikan dengan teknik berbasis perangkat keras, seperti FPGA yang dibahas oleh Im et al., yang menawarkan pendekatan pemrosesan paralel untuk pengoperasian *relay* dan perlindungan yang lebih cepat [10].

faktor kualitas tegangan menjadi pertimbangan penting dalam penyaluran tenaga listrik seperti pada penelitian seperti pada penelitian Anthony Z et al. Faktor penyebab terjadinya drop tegangan pada penyulang ialah panjang penyulang, tingginya beban reaktif, dan faktor lainnya. Sehingga kualitas tegangan yang ada pada penyulang mengalami drop tegangan sehingga membuat tegangan pada penyulang tersebut tidak ideal.[11]

Perkembangan terkini pada *relay diferensial* dipengaruhi oleh dua tren utama, yakni digitalisasi pengukuran dan komunikasi antar perangkat, serta penerapan teknik pemrosesan sinyal dan algoritma cerdas. *Relay* digital atau numerik modern menyediakan algoritma proteksi diferensial yang lebih kompleks, seperti percentage restraint dengan adaptasi waktu nyata, deteksi saturasi CT, serta pembagian beban berdasarkan sinyal fase, di samping kemampuan pencatatan arus dan fase dengan resolusi tinggi guna analisis pasca-kejadian. Integrasi protokol IEC 61850 dan GOOSE mempercepat penerapan *relay diferensial* terdistribusi, contohnya dalam proteksi diferensial antar terminal multi-terminal atau proteksi bus terdistribusi, dengan latensi rendah dan interoperabilitas antar vendor. Isu teknis utama yang menjadi fokus penelitian adalah penanganan kondisi non-gangguan yang kerap menyebabkan operasi salah (maloperation), seperti arus inrush *transformator* yang mengandung harmonisa kedua, saturasi CT pada gangguan besar, kesalahan

rasio dan fase pada CT, serta distorsi harmonik akibat beban non-linier. Teknik konvensional, termasuk deteksi harmonisa kedua untuk memblokir operasi inrush, masih digunakan secara luas. Namun, penelitian terbaru mengembangkan metode yang lebih tahan terhadap gangguan, antara lain transformasi wavelet untuk ekstraksi fitur transient, teknik deteksi saturasi berbasis model nonlinier CT, pemfilteran adaptif, serta pendekatan berbasis pembelajaran mesin seperti neural networks, SVM, dan random forest untuk mengklasifikasikan kondisi gangguan dan non-gangguan.

Secara keseluruhan, penelitian terkini menunjukkan bahwa inovasi dalam teknologi dan metode pengujian mengenai *relay diferensial* tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan keandalan operasional, tetapi juga untuk memastikan implementasi yang efisien dan efektif dalam perlindungan sistem kelistrikan modern. Transformator Tenaga

Transformator merupakan peralatan mesin listrik statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, yang dapat mentransformasikan energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah ataupun sebaliknya, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya dengan nilai frekuensi yang sama besar[1].

pada gardu induk sendiri terdapat terdapat beberapa peralatan untuk menunjang penyaluran energi listrik yang terbagi menjadi beberapa jenis dan pada setiap peralatan memiliki karakteristik yang berbeda-beda juga, pada peralatan yang ada di gardu induk tersebut juga perlu adanya pemeriksaan rutin maupun pemeliharaan untuk beberapa peralatan yang ada padagardu induk mudah mengalami kerusakan, hal tersebutlah yang melatarbelakangi perlunya pemeliharaan pada perlengkapan gardu tersebut [12]. karakteristik yang berbeda-beda. Kondisi operasional yang terus-menerus ini mengakibatkan perlunya pemeriksaan rutin maupun pemeliharaan, terutama bagi peralatan yang memiliki tingkat penyusutan tinggi. Urgensi pemeliharaan ini didasari oleh risiko kerusakan dini yang dapat mengganggu penyaluran energi.

Semakin tinggi tingkat pembebanan trafo maka semakin tinggi temperatur minyak trafo dan hal tersebut mampu menimbulkan tegangan tembus dari minyak trafo akan semakin mengecil. Dan kenaikan temperatur juga memberikan penurunan kualitas isolasi dari minyak *transformator* yang terpasang pada *transformator* daya[13] perlunya pemeliharaan pada perlengkapan gardu tersebut. Secara khusus pada *transformator* daya, kondisi termal menjadi indikator utama kesehatan alat karena semakin tinggi tingkat pembebanan trafo maka semakin tinggi temperatur minyak trafo.

Salah satu faktor yang menyebabkan menurunnya mutu dan ketersediaan pelayanan daya listrik adalah gangguan terhadap minyak *transformator*, yaitu penyebabnya bisa dari beban *transformator* yang tinggi, lama pemakaian dari *transformator* dan adanya kadar air yang tinggi pada *transformator*. [14] maka dapat disimpulkan trafo merupakan peralatan utama yang penting dalam penyaluran energi listrik. Namun peralatan ini masih perlu diberikan pengamanan berupa sistem proteksi salah satunya adalah *relay differential*.



Gambar 2.1 *Transformator* Daya

Pada transformstor ada yang dinamakan arus nominal trafo, Arus nominal suatu *transformator* didefinisikan sebagai arus maksimum yang dapat dilalui oleh *transformator* dalam kondisi operasi normal tanpa menimbulkan kerusakan.

Besaran arus ini dihitung berdasarkan daya *transformator* serta tegangan operasionalnya. Rumus untuk menentukan arus nominal (I_n) pada *transformator* sistem tiga fasa, baik pada sisi primer maupun sekunder, dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \quad (2.1)$$

Dimana:

I = arus nominal (ampere)

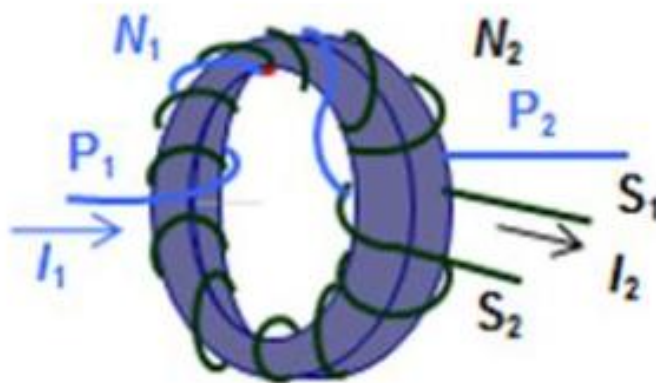
S = daya trafo (VA atau kVA atau MVA)

V = tegangan fasa – fasa (volt)

$\sqrt{3}$ = faktor sistem 3 fasa (≈ 1.732)

2.1.2. Transformator Arus

Trafo Arus yang sering disebut (*Current Transformer-CT*).peralatan tersebut berfungsi untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik disisi primer (TT ,TET, dan TM) berskala besar. Dalam melakukan transformasi dari besaran arus yang besar dari jaringan system transmisi atau distribusi menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan proteksi dan pengukuran.[15]

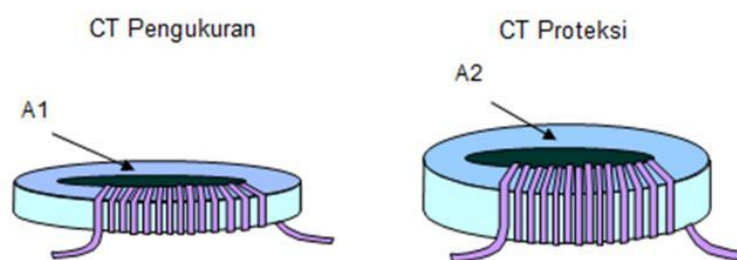


Gambar 2.2 Prinsip Kerja CT

Pada gambar 2.2 dapat kita ketahui bahwasannya prinsip kerja dari Trafo arus berdasarkan hukum induksi elektromagnetik faraday, dimana

Ketika arus mengalir melalui belitan primer, maka inti besi akan teraliri arus dan menghasilkan medan magnet. Medan magnet pada inti besi yang berubah ubah akan menginduksikan tegangan pada belitan sekunder besaran arus pada belitan sekunder sesuai dengan perbandingan lilitan (turn ratio) antara belitan primer dan belitan sekunder

2.1.3.1. Fungsi Trafo Arus



Gambar 2.3 CT Pengukuran dan CT Proteksi

Gambar 2.3 menunjukkan 2 fungsi CT. Secara fungsi trafo arus dibagi dua yaitu :

1. Trafo arus pengukuran

Trafo arus pengukuran untuk keperluan metering memiliki tingkat ketelitian yang tinggi dalam daerah operasionalnya (daerah pengenalan) yaitu antara 5% hingga 120% dari arus nominal, sesuai dengan kelasnya, serta tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan dengan trafo arus yang digunakan untuk proteksi. Trafo arus pengukuran dirancang agar lebih cepat mencapai kejenuhan dibandingkan trafo arus proteksi, sehingga konstruksinya menggunakan luas penampang inti yang lebih kecil.

2. Trafo arus proteksi

Transformator arus untuk proteksi memiliki tingkat ketelitian yang tinggi saat terjadi gangguan, di mana arus yang

mengalir mencapai beberapa kali lipat dari arus nominalnya, serta menunjukkan tingkat kejenuhan yang cukup signifikan.

2.1.3.2. *Ratio Transformator Arus*

Ratio CT adalah perbandingan antara arus primer (arus sebenarnya disistem daya) dengan arus sekunder (yang dapat dibaca di alat ukur *relay* dan meter) dengan rumus sebagai berikut:

$$CT\ Ratio = \frac{I_{primer}}{I_{sekunder}} \quad (2.2)$$

Dengan demikian, ratio *transformator* harus diterapkan dengan teliti agar jumlah arus di persimpangan kedua sebisa mungkin sama atau setidaknya mendekati sama. Dalam memilih rasio *transformator*, arus rating memiliki peran penting sebagai batas yang harus dipertimbangkan. Berikut cara mencari arus rating trafo:

$$I_{rat} = 110\% \times I_{nominal} \quad (2.3)$$

Dimana:

I_{rat} = Arus rating (ampere)

$I_{nominal}$ = Arus nominal trafo (ampere)

Setelah menemukan I_{rat} dan $I_{nominal\ trafo}$ berikutnya dilakukan perhitungan nilai rasio CT yang bertujuan untuk menentukan rasio CT yang paling sesuai dengan pemilihan rasio CT yang paling mendekati nilai error mismatch pada CT yang telah dipasang.

$$Rasio\ CT_1(ideal) = rasio\ CT_2 \times \frac{V_s}{V_p} \quad (2.4)$$

$$Rasio\ CT_2(ideal) = rasio\ CT_1 \times \frac{V_p}{V_s} \quad (2.5)$$

Dimana:

Rasio CT = Nilai CT terpasang (ampere)

V_p = Tegangan dibagian sisi primer (volt)

V_s = Tegangan dibagian sisi sekunder (volt)

2.1.3.1. **Error Mismatch**

Dalam operasi *differential relay*, *error mismatch* pada *Current Transformer* (CT) merupakan masalah yang signifikan yang dapat mempengaruhi kinerja proteksi *transformator*. *Error* ini dapat terjadi akibat perbedaan rasio CT atau kesalahan dalam pengukuran yang disebabkan oleh saturasi inti CT. Ketika terjadi saturasi, CT tidak dapat mereproduksi arus dengan akurat, dan hasilnya adalah arus diferensial (I_d) yang muncul menjadi tidak valid. Hal ini dapat menyebabkan *relay* salah memicu (*false tripping*) atau gagal untuk mendeteksi gangguan yang sesungguhnya [9]. *Error Mismatch* merupakan kesalahan atau perbedaan arus diferensial yang timbul dalam kondisi normal (tanpa adanya gangguan di dalam zona proteksi). Perbedaan ini disebabkan oleh ketidaksesuaian atau variasi kecil antara sinyal arus sekunder yang diterima oleh relai dari kedua sisi peralatan yang dilindungi, seperti sisi Primer dan Sekunder Trafo. Berikut rumus *error Mismatch* :

$$Error\ Missmatch = \frac{I_{sec\ tinggi} - I_{sec\ rendah}}{I_{sec\ rendah}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Namun, akibat adanya *Error Mismatch*, akan timbul arus diferensial kecil (I_d) yang tidak bernilai nol, meskipun tidak terdapat gangguan. Nilai *Error Mismatch* ini harus dihitung dan diakomodasi oleh Arus Setting (atau Slope) pada relai agar terhindar dari *false trip*.

2.1.3.2. **Arus Sekunder CT**

Arus sekunder pada *Current Transformer* (CT) memiliki peranan krusial dalam perhitungan pengaturan *differential relay* untuk proteksi *transformator*. CT dirancang untuk mengonversi arus besar dari saluran listrik menjadi arus yang lebih kecil dan dapat diukur secara akurat. Pada *differential relay*, arus sekunder CT

(I_n) digunakan sebagai referensi untuk menentukan titik trip *relay* ketika terindikasi adanya gangguan. Penyesuaian arus sekunder yang tepat memerlukan pemahaman yang mendalam mengenai rasio *transformator* arus (CT) serta kondisi operasional *transformator* tersebut, disertai dengan evaluasi rutin guna menjamin kinerja optimal sistem proteksi. Arus sekunder CT dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$I_1 = \frac{\text{Rasio } CT_s}{\text{Rasio } CT_p} \times I_n \quad (2.7)$$

$$I_2 = \frac{\text{Rasio } CT_s}{\text{Rasio } CT_p} \times I_n \quad (2.8)$$

Dimana:

I_1 = Arus sekunder CT sisi primer (ampere)

I_2 = Arus sekunder CT sisi sekunder (ampere)

CT_p = Nilai CT sisi primer (ampere)

CT_s = Nilai CT sisi sekunder (ampere)

I_n = Arus nominal trafo (ampere)

2.1.3. Relay Differential

Rele diferensial merupakan suatu rele yang prinsip kerjanya berdasarkan kesimbangan (*balance*), yang membandingkan arus-arus sekunder *transformator* arus terpasang pada terminal terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan.[16]



Gambar 2.4 Relay Differential MICOM P643 Numerik

pada gambar 2.4 merupakan *relay differential* yang digunakan pada sistem proteksi *transformator* di gardu induk ngagel *relay* ini cukup falmiliar dang banyak digunakan pada *transformator* di PT PLN (Persero).

Relay diferensial merupakan salah satu metode proteksi yang krusial untuk *transformator*, dimana pengukuran arus dilakukan dalam satuan per unit (p.u.) guna mempermudah analisis serta perbandingan antar parameter. Konversi ke satuan p.u. dilakukan melalui rumus berikut:

$$I_{1(p.u)} = \frac{I_{actual}}{I_{base}} \quad (2.9)$$

Nilai dalam satuan per unit didefinisikan sebagai hasil pembagian antara nilai parameter aktual (I_1) dengan nilai dasar (I_{base}), yang umumnya ditetapkan berdasarkan kapasitas *transformator* dan karakteristik sistem yang bersangkutan. Penggunaan satuan p.u. mempermudah insinyur dalam membandingkan arus yang mengalir pada sisi primer dan sekunder *transformator*, serta mendukung pengaturan parameter *relay* secara lebih efektif.

2.1.3.1. Prinsip Kerja Relay Differential

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4, *Relay* MiCOM P643 berfungsi untuk melindungi *transformator* dari gangguan internal, seperti arus hubung singkat antar lilitan, fase ke fase, maupun fase ke tanah di dalam zona proteksi. Berdasarkan Hukum Kirchoff I, yang menyatakan bahwa jumlah arus yang masuk ke suatu titik sama dengan jumlah arus yang keluar, prinsip ini menjadi dasar kerja *differential relay*. *Relay* tersebut menggunakan parameter input dari dua buah CT pada sisi primer dan sekunder *transformator* untuk membandingkan arus yang masuk dan keluar. Apabila tidak terdapat gangguan di dalam zona proteksi, maka arus dari kedua CT akan setara setelah dilakukan penyesuaian rasio, sehingga *relay* tidak akan bekerja. Sebaliknya, apabila terdapat perbedaan signifikan akibat

gangguan internal, maka *relay* akan mendeteksi arus diferensial dan mengirimkan perintah trip kepada PMT.

2.1.3.2. Karakteristik Relay Differential

Karakteristik relay *diferensial* (Differential Relay) memperlihatkan hubungan antara arus diferensial (I_d) dan arus bias (I_b) yang digunakan untuk menetapkan kapan relay harus mengoperasikan pemutusan (trip) atau menahan operasi (restrain) terhadap suatu gangguan. Karakteristik tersebut esensial untuk membedakan gangguan internal dari gangguan eksternal dalam suatu zona proteksi, misalnya pada *transformator* daya, generator, atau busbar.

2.1.3.3. Arus differential

Arus diferensial merupakan arus yang timbul akibat selisih antara arus yang mengalir melalui sisi primer dan sekunder pada *transformator*, yang menjadi prinsip kerja utama relay diferensial dalam melindungi sistem distribusi listrik dari gangguan. Untuk menjamin fungsi perlindungan relay diferensial secara efektif, pengukuran arus diferensial yang akurat sangatlah penting, yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_{diff} = I_2 - I_1 \quad (2.10)$$

Dimana:

I_{diff} = Arus differential (p.u)

I_1 = Arus yang dibaca pada sisi primer relay (ampere)

I_2 = Arus yang dibaca pada sisi sekunder relay (ampere)

2.1.3.4. Arus restrain

Arus Restrain (I_{rest}) merupakan arus yang berfungsi untuk menghalangi (restrain) relai agar tidak beroperasi (trip) ketika arus diferensial (I_d) yang kecil muncul akibat kondisi normal, kesalahan

ketidak cocokan, atau ketika terjadi gangguan di luar zona proteksi (gangguan eksternal). Arus restrain dalam differential relay berperan sebagai referensi untuk membedakan antara kondisi normal dan gangguan dalam sistem proteksi. Arus ini merupakan nilai minimum yang dibutuhkan agar relay tidak melakukan pemutusan akibat fluktuasi arus yang minor atau gangguan ringan, sehingga mencegah terjadinya false tripping. Dengan menetapkan nilai arus restrain yang tepat, relay dapat beroperasi secara lebih selektif dan efisien dalam mendeteksi gangguan yang sesungguhnya.

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (2.11)$$

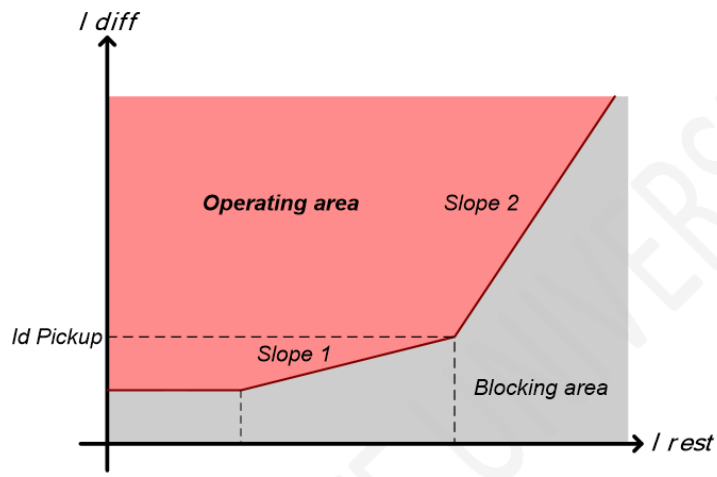
Dimana:

I_1 = Arus yang dibaca pada sisi primer relay (p.u)

I_2 = Arus yang dibaca pada sisi sekunder relay (p.u)

I_r = Arus penahan (p.u)

2.1.3.5. Setting karakteristik (Percent slope)



Gambar 2.5 Slope Differential Relay

Dalam proteksi elektrik utama *transformator*, sebagaimana dijelaskan pada Gambar 2.5, terdapat dua slope dalam differential

relay, yaitu slope 1 dan slope 2, yang masing-masing memiliki fungsi dan pengertian sebagai berikut:

- 1) Slope 1 berperan untuk memastikan sensitivitas relay terhadap gangguan internal dengan arus yang relatif kecil. Slope ini mengatasi ketidaksempurnaan minor yang dapat terjadi bahkan dalam kondisi normal, meliputi:- Ketidakcocokan rasio trafo arus (CT Ratio Mismatch).- Arus magnetisasi trafo arus yang rendah (CT Magnetizing Current).- Perubahan posisi tap pada trafo (Tap Changer). Slope 1 menyediakan zona aman di mana arus diferensial (I_{diff}) yang kecil tidak akan menyebabkan relay untuk trip, namun tetap mempertahankan sensitivitas yang memadai dalam mendeteksi gangguan internal yang sesungguhnya. Nilai slope ini umumnya rendah, berkisar antara 10% hingga 30%, guna menjaga kepekaan relay.
- 2) Slope 2 berfungsi sebagai proteksi tambahan untuk mencegah *relay trip* akibat gangguan eksternal yang sangat besar. Pada saat terjadi gangguan eksternal, arus yang mengalir melalui *transformator* akan meningkat secara signifikan. Arus yang tinggi tersebut dapat mengakibatkan saturasi pada salah satu atau kedua CT (*Current Transformer*). Saturasi CT merupakan kondisi dimana inti besi CT mengalami kejenuhan, sehingga CT tidak mampu mentransformasikan arus primer yang besar secara akurat pada sisi sekundernya. Akibatnya, arus diferensial (I_{diff}) palsu akan timbul dan berpotensi menyebabkan *relay* melakukan trip secara keliru (*false trip*). Slope 2 dirancang untuk mengatasi permasalahan ini dengan memiliki kemiringan yang lebih curam (biasanya di atas 50%), sehingga apabila arus *restraining* (I_{rest}) sangat tinggi (yang mengindikasikan gangguan eksternal), arus diferensial yang besar akibat saturasi CT tidak akan mencapai ambang batas trip.

Setting slope percent pada *relay diferensial* berfungsi untuk menetapkan karakteristik bias arus yang mempertahankan stabilitas operasi relay saat menghadapi variasi arus dalam kondisi normal maupun gangguan. Bias ini dirancang guna mencegah pemutusan yang tidak diinginkan akibat fluktuasi beban yang wajar atau arus magnetisasi pada *transformator*. *slope percent* diatur dengan menghitung persentase arus berdasarkan pengaturan yang merujuk pada arus nominal, sehingga dapat memberikan pembatasan yang memadai demi menjaga keandalan operasi relay. Berikut rumus yang dapat digunakan untuk mencari *slope*

$$Slope\ 1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \quad (2.12)$$

$$Slope\ 2 = (\frac{I_d}{I_r} \times 2) \times 100\% \quad (2.13)$$

Dimana:

Slope 1 = Batas ambang kemampuan kumparan penahan 1

Slope 2 = Batas ambang kemampuan kumparan penahan 2

Desain yang optimal untuk *slope percent* tidak hanya mengupayakan keseimbangan antara deteksi gangguan dan pemicu false trips, tetapi juga berperan dalam meningkatkan efisiensi serta efektivitas sistem perlindungan *transformator* secara menyeluruh.

2.1.3.6. Arus setting differential

Arus setting pada *relay diferensial* merupakan elemen krusial yang menentukan momen di mana *relay* akan dioperasikan untuk memutus aliran listrik saat terjadi gangguan. Pengaturan ini dirancang agar dapat membedakan antara arus normal yang mengalir melalui *transformator* dengan arus yang mengindikasikan adanya permasalahan. Oleh karena itu, sangat penting untuk menetapkan nilai arus setting yang tepat dan dapat disesuaikan

dengan kondisi operasional sistem. Berikut merupakan rumus yang dapat digunakan untuk menentukan arus setting relay differential :

$$I_{set\ 1} = \% slope\ 1 \times I_{restrain} \quad (2.14)$$

$$I_{set\ 2} = \% slope\ 2 \times I_{restrain} \quad (2.15)$$

Dimana:

$I_{set\ 1}$ = Arus setting pada differential relay sisi primer (p.u)

$I_{set\ 2}$ = Arus setting pada differential relay sisi sekunder (p.u)

2.1.4. Gangguan Sistem Kelistrikan

Sistem tenaga listrik yang kompleks dan terintegrasi, mulai dari pembangkitan energi, penyaluran melalui *transformator* step-up serta saluran transmisi tegangan tinggi, hingga distribusi kepada konsumen, tidak dapat lepas dari berbagai jenis gangguan. Gangguan pada sistem kelistrikan merupakan kondisi abnormal yang dapat menghentikan atau mengganggu aliran listrik secara sementara maupun permanen.

Kejadian tersebut dapat terjadi pada berbagai komponen, mulai dari pembangkit listrik, jaringan transmisi, hingga saluran distribusi ke konsumen, baik rumah tangga maupun industri. Kondisi tidak normal ini berdampak pada kontinuitas pasokan listrik, berpotensi merusak sistem dan peralatan, serta dapat menimbulkan pemadaman atau bahkan risiko kebakaran. Oleh karena itu, penanganan gangguan harus dilaksanakan secara tepat dengan mengidentifikasi penyebab dan melakukan perbaikan yang sesuai guna mengembalikan sistem ke kondisi normal. Selain itu, mitigasi juga merupakan langkah penting untuk mencegah terjadinya gangguan serupa di masa mendatang.

2.1.4.1. Gangguan Ditinjau Dari Sifatnya

Gangguan pada sistem tenaga listrik, apabila ditinjau berdasarkan sifatnya, dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu:

1. Gangguan bersifat sementara, yaitu gangguan yang akan hilang dengan sendirinya apabila pemutus tenaga (PMT) dalam keadaan terbuka hanya dalam waktu singkat, kemudian dapat dihubungkan kembali, yang disebut dengan pemutusan dan penyambungan kembali sistem (reclose).
2. Gangguan bersifat permanen, yaitu gangguan yang tetap ada meskipun pemutus tenaga (PMT) telah terbuka dalam waktu singkat dan telah berupaya untuk menghubungkan kembali sistem, sehingga memerlukan tindakan perbaikan guna mengatasi gangguan tersebut.

2.1.4.2. Gangguan Berdasarkan Sumbernya

Gangguan pada sistem tenaga listrik berdasarkan asalnya, khususnya yang terjadi pada *transformator* tenaga, dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu:

1. Gangguan internal didefinisikan sebagai segala bentuk anomali atau kegagalan teknis yang terjadi dalam zona proteksi *transformator*, yang dibatasi oleh posisi pemasangan Current Transformer (CT) primer dan sekunder. Gangguan tersebut umumnya disebabkan oleh kegagalan isolasi pada komponen internal *transformator*, seperti kegagalan isolasi antar belitan (inter-turn fault), hubung singkat antar fasa, maupun gangguan hubung singkat fasa ke tanah pada belitan. Mengingat lokasinya yang berada di dalam tangki utama, gangguan internal memiliki sifat sangat destruktif dan berpotensi menyebabkan kerusakan struktural yang signifikan serta menimbulkan risiko kebakaran apabila tidak segera terdeteksi dan diisolasi oleh sistem proteksi diferensial. Oleh karena itu, kecepatan dan selektivitas relay dalam merespons gangguan di zona ini menjadi faktor yang sangat penting untuk menjaga integritas aset *transformator* di Gardu Induk.
2. Gangguan eksternal adalah gangguan yang terjadi di luar zona proteksi *transformator*, namun masih berada dalam sistem tenaga

listrik yang terhubung dengan *transformator* tersebut. Meskipun gangguan tidak terjadi langsung pada *transformator*, gangguan eksternal yang berskala besar dapat menyebabkan aliran arus berlebih melalui *transformator*, yang pada akhirnya dapat membebani atau merusaknya. Oleh karena itu, perlindungan terhadap gangguan ini menjadi sangat penting bagi *transformator*.

2.1.5. Arus Hubung Singkat

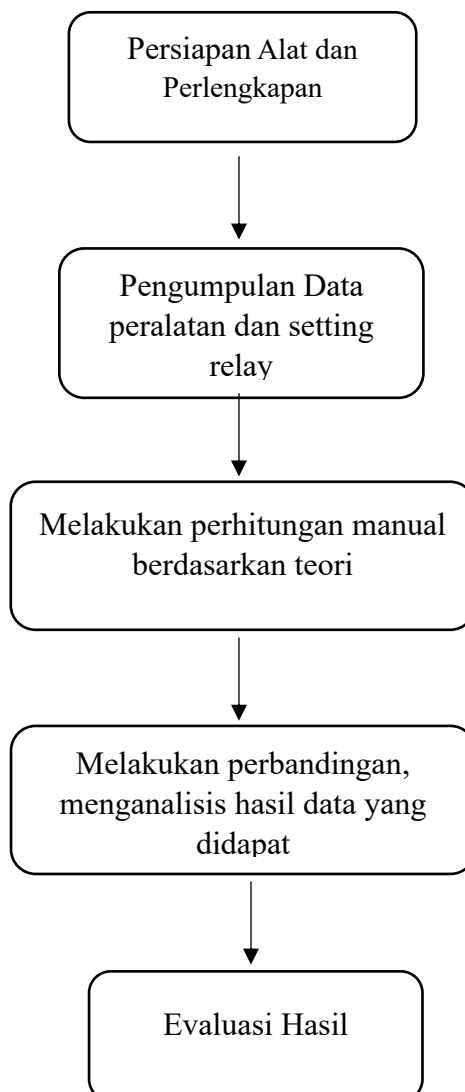
Arus hubung singkat merupakan suatu kondisi abnormal dalam sistem tenaga listrik di mana arus yang mengalir melampaui kapasitas normal suatu rangkaian, umumnya disebabkan oleh hubungan yang tidak terduga antara konduktor ataupun antara konduktor dengan tanah. Kondisi tersebut menimbulkan lonjakan arus yang berpotensi merusak peralatan serta infrastruktur listrik. Merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Anshar dan Budiman, menjelaskan bahwa gangguan hubung singkat dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, seperti hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah, yang semuanya dapat menimbulkan arus gangguan yang besar dan merusak jika tidak ditangani dengan sistem pelindung yang memadai[17]. Fenomena ini diatur oleh Hukum Ohm dan Teorema Thevenin. Jika V_{th} adalah tegangan Thevenin di titik gangguan dan Z_{th} adalah impedansi Thevenin (impedansi total sistem yang dilihat dari titik gangguan), maka arus gangguan (I_f) yang mengalir adalah:

$$I_f \approx \frac{V_{th}}{Z_{th}} \quad (2.16)$$

Karena Z_{th} (impedansi internal sistem) jauh lebih kecil daripada impedansi beban normal, I_f menjadi ratusan hingga ribuan kali lebih besar daripada arus beban normal.

Arus hubung singkat yang terjadi pada sistem kelistrikan berfungsi sebagai input bagi relay diferensial untuk beroperasi, baik pada kondisi arus hubung singkat internal maupun eksternal. Arus hubung singkat internal merupakan sinyal yang valid dan harus segera mendapatkan respons TRIP dari relay diferensial, sedangkan arus hubung singkat eksternal dan arus inrush merupakan sinyal gangguan yang perlu dikendalikan melalui fitur restrain (meliputi persentase slope dan penghambatan harmonik) guna menjaga stabilitas kerja relay.

2.2. Kerangka Pemikiran



Gambar 2.6 Kerangka Pemikiran

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, tahap persiapan alat dan perlengkapan, di mana seluruh peralatan pengujian, dokumen teknis, serta software pendukung disiapkan untuk memastikan proses berjalan sesuai standar. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data peralatan dan setting relay, meliputi pengambilan data rating trafo, karakteristik arus nominal, rasio CT, serta nilai-nilai setting relay yang terpasang di lapangan. Data yang telah dikumpulkan kemudian digunakan untuk melakukan perhitungan manual berdasarkan teori, dengan tujuan menentukan nilai setting relay yang ideal sesuai prinsip kerja proteksi diferensial dan karakteristik *transformator*. Setelah itu, dilakukan perbandingan dan analisis hasil antara data aktual dengan hasil perhitungan teoritis guna mengetahui tingkat keakuratan dan keandalan sistem proteksi dalam menghadapi gangguan eksternal.

Tahap akhir adalah evaluasi hasil, yaitu menilai kesesuaian antara hasil analisis dan standar proteksi yang berlaku, serta memberikan rekomendasi perbaikan atau penyesuaian setting relay agar sistem proteksi diferensial dapat bekerja optimal dan selektif terhadap gangguan yang terjadi di luar zona proteksi trafo.