

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Dalam penelitian ini, penulis melakukan tinjauan pustaka terhadap berbagai sumber yang relevan sebagai bahan referensi. Sumber tersebut dapat berupa jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang berkaitan dengan topik penelitian. Beberapa referensi penting yang telah dikumpulkan penulis antara lain adalah sebagai berikut:

1. Penelitian oleh E. S. Nasution, F. I. Pasaribu, dan M. H. Hidayat (2021) berjudul *“Studi Proteksi Sistem Tenaga Listrik Pada Trafo 1600 kVA Menggunakan Current Relay IWU 2-3”* membahas penerapan dan analisis sistem proteksi pada transformator daya berkapasitas 1600 kVA dengan menggunakan relay arus tipe IWU 2-3. Penelitian ini menjelaskan bagaimana relay arus mendeteksi gangguan seperti arus lebih atau hubung singkat pada transformator serta bagaimana pengaturan relay mempengaruhi kinerja proteksi, sehingga dapat meningkatkan keandalan dan keamanan operasi transformator. Penelitian ini relevan sebagai bahan referensi untuk penelitian *Analisis Sistem Proteksi Transformator dengan Menggunakan Relay Diferensial pada PLTD Ampenan* karena memiliki kesamaan fokus pada proteksi transformator, memberikan dasar teori tentang relay proteksi, serta menyajikan metodologi evaluasi kinerja proteksi yang dapat dijadikan acuan.
2. Penelitian oleh F. Fahrizal, S. Subhan, dan T. Hasanuddin (2022) berjudul *“Studi Kinerja Sistem Proteksi Generator Pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Tapak Tuan”* membahas analisis kinerja sistem proteksi pada generator yang digunakan di PLTD Tapak Tuan. Penelitian ini menjelaskan mekanisme proteksi generator terhadap gangguan seperti hubung singkat, arus lebih, dan fluktuasi beban, serta mengevaluasi efektivitas sistem proteksi yang diterapkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem proteksi yang baik dapat meningkatkan keandalan dan keamanan operasi generator pada PLTD. Penelitian ini relevan untuk dijadikan bahan referensi pada penelitian *Analisis Sistem Proteksi Transformator dengan Menggunakan Relay Diferensial pada PLTD Ampenan* karena memiliki kesamaan konteks pada proteksi peralatan

utama pembangkit tenaga diesel, memberikan gambaran metodologi evaluasi proteksi, serta memperkuat landasan teori mengenai pentingnya proteksi dalam menjaga kontinuitas dan keandalan sistem tenaga listrik.

3. Penelitian oleh G. Harindah (2024) berjudul *“Implementasi Pemeliharaan Prediktif Berbasis Analisis Getaran Menggunakan Standar ISO 10816 pada Mesin Diesel di PLTD Tobelo”* membahas penerapan metode pemeliharaan prediktif pada mesin diesel di PLTD Tobelo dengan menggunakan analisis getaran sesuai standar ISO 10816. Penelitian ini menjelaskan prosedur pengukuran dan analisis getaran untuk mendeteksi kondisi mesin diesel secara dini, sehingga dapat mencegah kerusakan serius dan meningkatkan keandalan operasional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemeliharaan prediktif dapat meningkatkan umur mesin diesel dan menurunkan frekuensi gangguan. Penelitian ini relevan untuk dijadikan referensi dalam penelitian *Analisis Sistem Proteksi Transformator dengan Menggunakan Relay Diferensial pada PLTD Ampenan* karena memberikan gambaran pentingnya strategi pemeliharaan dan proteksi yang tepat pada peralatan utama pembangkit tenaga diesel, serta memperkuat landasan teori mengenai upaya menjaga kontinuitas dan keandalan sistem tenaga listrik.
4. Penelitian oleh D. R. Anggraini, Y. Fitrianingsih, dan A. A. Akbar (2020) berjudul *“Analisis Tingkat Kebisingan dan Persebarannya Menggunakan Metode Noise Mapping pada PLTD Siantan, Kalimantan Barat”* membahas evaluasi tingkat kebisingan yang dihasilkan oleh operasional Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) menggunakan metode *noise mapping*. Penelitian ini menjelaskan proses pengukuran dan analisis persebaran kebisingan untuk mengetahui dampak lingkungan dari operasional PLTD serta memberikan rekomendasi pengelolaan kebisingan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemantauan dan analisis kebisingan dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan operasional pembangkit. Penelitian ini relevan sebagai bahan referensi untuk penelitian *Analisis Sistem Proteksi Transformator dengan Menggunakan Relay Diferensial pada PLTD Ampenan* karena memberikan perspektif tambahan terkait aspek operasional PLTD secara keseluruhan, memperkuat landasan teori,

dan membantu memahami pentingnya proteksi dan pemeliharaan dalam menjaga performa serta keberlanjutan operasi pembangkit tenaga diesel.

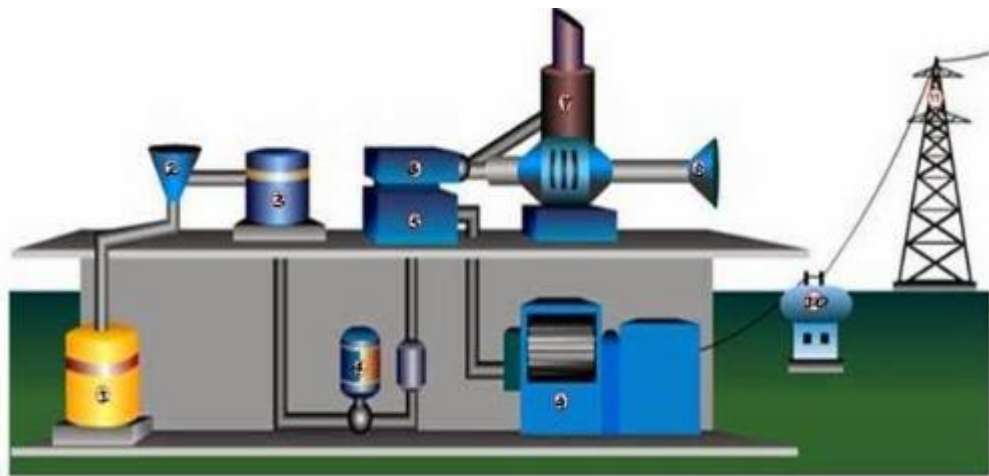
Meskipun penelitian-penelitian sebelumnya telah membahas mengenai proteksi transformator menggunakan relay arus, proteksi generator pada PLTD, serta aspek pemeliharaan prediktif dan dampak lingkungan pada PLTD, belum ada penelitian yang secara spesifik dan mendalam yang menganalisis kinerja Sistem Proteksi Transformator Daya dengan berfokus pada implementasi Relay Diferensial di PLTD Ampenan. Oleh karena itu, penelitian ini akan berfokus pada Setting Relay Diferensial yang digunakan sebagai proteksi utama transformator daya, khususnya dalam konteks operasi dan karakteristik gangguan khas pada pembangkit listrik tenaga diesel di PLTD Ampenan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi setting dan evaluasi kinerja yang lebih akurat untuk menjamin keandalan dan keamanan transformator daya di PLTD Ampenan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Mesin diesel merupakan salah satu sumber energi utama dalam berbagai aplikasi industri, yang bekerja dengan mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi mekanik yang bermanfaat[4]. Sebagai perangkat mekanis, mesin ini tidak terlepas dari potensi kerusakan, sehingga diperlukan upaya riset untuk mengembangkan sistem deteksi dini dan pemantauan kondisi mesin secara efektif. Di sisi lain, listrik adalah kebutuhan pokok bagi masyarakat, di mana ketersediaan pasokan listrik yang berkelanjutan dan berkualitas tinggi sangat berpengaruh terhadap peningkatan taraf hidup. Salah satu solusi dalam memenuhi kebutuhan tersebut adalah melalui Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), yang memanfaatkan bahan bakar diesel untuk menghasilkan listrik dan menjadi sumber energi andal bagi sektor perumahan, industri, maupun komersial. PLTD sangat sesuai diterapkan pada daerah dengan keterbatasan akses energi lain, karena mampu beroperasi pada berbagai tingkat beban, menyediakan pasokan energi yang stabil, serta memiliki keunggulan dalam hal keandalan dan daya tahan jangka panjang. Oleh karena itu, PLTD banyak dipilih terutama di sektor industri yang memerlukan suplai listrik kontinu dan dapat diandalkan[5].

Salah satu pembangkit listrik yang dimiliki oleh PT PLN adalah Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)[6]. PLTD PLN ialah Pembangkit Listrik Tenaga Diesel milik atau dikelola oleh PLN (Perusahaan Listrik Negara) yang berfungsi untuk membangkitkan energi listrik dengan menggunakan mesin diesel sebagai penggerak generator. PLTD ini umumnya digunakan di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik besar, sebagai sumber energi utama di wilayah terpencil, atau sebagai pembangkit cadangan ketika terjadi gangguan pasokan dari sistem interkoneksi. PLTD PLN juga kerap difungsikan sebagai pembangkit cadangan (backup power) ketika beban puncak atau saat terjadi gangguan pada sistem kelistrikan utama.



Gambar 2. 1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

(Sumber : <https://www.edukasikini.com/2024/09/cara-kerja-pltd-pembangkit-listrik.html>)

2.2.2 Transformator

Transformator adalah perangkat listrik yang mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat lain melalui kopling magnetik dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator daya berfungsi untuk mengubah besaran tegangan dan arus listrik sehingga aliran energi dapat ditransmisikan dengan lebih efisien. Pada pembangkit listrik, transformator ini umumnya menggunakan konfigurasi step-up yang langsung dihubungkan dengan terminal keluaran generator[7]. Tegangan keluaran generator yang relatif rendah kemudian dinaikkan menjadi tegangan yang lebih tinggi, umumnya berada pada rentang 11 kV hingga 30 kV, sebelum masuk ke dalam sistem transmisi. Hal ini dilakukan agar rugi-rugi daya selama penyaluran listrik dapat diminimalkan[8].

Transformator adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator merupakan komponen vital dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi sebagai penghubung utama dalam proses transmisi dan distribusi energi listrik, sehingga gangguan pada transformator dapat menurunkan keandalan sistem dan menimbulkan kerugian besar. Di Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Ampenan, transformator memiliki peran penting dalam proses penyesuaian tegangan agar sesuai dengan kebutuhan pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Untuk melindungi transformator dari gangguan internal seperti hubung singkat lilitan, kerusakan isolasi, atau gangguan antar fasa, digunakan sistem proteksi dengan relay diferensial yang bekerja dengan membandingkan arus masuk dan keluar transformator, serta memutuskan hubungan jika terdapat perbedaan melebihi ambang batas. Penerapan dan analisis sistem proteksi transformator menggunakan relay diferensial pada PLTD Ampenan sangat penting untuk meminimalkan waktu padam, meningkatkan keandalan, serta menjaga kestabilan pasokan listrik bagi konsumen[9].

Transformator adalah alat listrik yang dapat mengubah tegangan arus bolak-balik dari suatu tingkat ke tingkat yang lain melalui gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dimana perbandingan tegangan antara sisi sekunder dan sisi primer berbanding lurus dengan jumlah lilitan serta berbanding terbalik dengan arus yang mengalir[10]. Pada dasarnya, transformator terdiri dari dua lilitan, yaitu lilitan primer dan lilitan sekunder, yang dililitkan pada inti besi sebagai media fluks magnet. Ketika arus bolak-balik mengalir pada lilitan primer, terbentuk medan magnet yang berubah-ubah dan menginduksi tegangan pada lilitan sekunder sesuai hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik. Fungsi utama transformator dalam sistem tenaga listrik adalah menaikkan (step-up) atau menurunkan (step-down) tegangan agar sesuai dengan kebutuhan proses pembangkitan, transmisi, dan distribusi energi listrik[11].

Sementara itu, pada sisi jaringan transmisi hingga distribusi, transformator biasanya berfungsi sebagai step-down, yaitu menurunkan tegangan tinggi dari sistem agar sesuai dengan kebutuhan pengguna. Misalnya, tegangan transmisi 150 kV diturunkan menjadi 20 kV pada gardu distribusi, lalu kembali diturunkan menjadi 220/380 V untuk konsumen akhir. Dengan demikian, transformator daya berperan penting tidak hanya dalam menaikkan tegangan di sisi pembangkit, tetapi juga dalam

menyesuaikan tegangan pada berbagai tahap penyaluran agar pasokan listrik tetap aman, stabil, dan sesuai kebutuhan.



Gambar 2. 2 Transformator 10 MVA 20/6,3 kV PLTD)

(Dokumentasi : Pribadi, September 2025)

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, yang ditemukan oleh Michael Faraday. Prinsip ini menyatakan bahwa perubahan fluks magnet dalam suatu lilitan kawat akan menginduksi gaya gerak listrik (ggl) pada lilitan kawat lainnya yang berada dalam medan magnet tersebut. Transformator terdiri dari dua lilitan utama, yaitu lilitan primer dan lilitan sekunder, yang dililitkan pada inti besi bersama. Ketika arus bolak-balik (AC) mengalir pada lilitan primer, arus tersebut menghasilkan fluks magnet yang berubah-ubah di inti besi. Fluks magnet ini kemudian memotong lilitan sekunder dan menginduksi tegangan di lilitan sekunder. Besarnya tegangan yang dihasilkan pada lilitan sekunder bergantung pada perbandingan jumlah lilitan antara lilitan primer dan lilitan sekunder[12].

2.2.3 Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan (sumber), maka akan mengalir arus bolak balik I_1 pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, arus I_1 menimbulkan fluks magnet yang berubah-ubah pada intinya. Akibat adanya fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan primer akan timbul GGL induksi.

Pada PLTD Ampenan terdapat transformator daya dengan kapasitas 10.000 KVA. Transformator daya berperan untuk menaikan tegangan listrik keluaran dari generator sebelum akhirnya disalurkan melalui jaringan transmisi. Dalam hal ini

transformator *step-up* menaikkan tegangan 6,3 kV dari output generator menjadi 20 kV, kemudian didistribusikan melalui kawat penghantar (tipe kabel) AAAC 300 sqmm untuk disalurkan ke Busbar 20 kV di PLTD Ampenan yang kemudian disalurkan ke Interconector 2 GI Ampenan.

2.2.3.1 Arus di Sisi Primer Transformator dan di Sisi Sekunder Transformator.

Arus di sisi primer transformator dapat ditentukan yaitu :

$$I_p = \frac{V_{sn}}{V_{pn}} \times I_s \dots\dots\dots (2-1)$$

Untuk tegangan di sisi primer :

$$V_p = \frac{V_s}{V_{sn}} \times V_{pn} \dots\dots\dots (2-2)$$

Arus di sisi primer dapat pula dihitung dengan cara, terlebih dahulu menentukan nilai daya semu menggunakan persamaan faktor daya :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots (2-3)$$

$$S = \sqrt{3} \times V_s \times I_s \dots\dots\dots (2-4)$$

Maka nilai arus di sisi primer adalah :

$$I_s = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_p} \dots\dots\dots (2-5)$$

dalam hal ini :

I_s = Arus sisi sekunder transformator (A)

V_s = Tegangan sisi sekunder transformator (V)

I_p = Arus sisi primer transformator (A)

V_p = Tegangan sisi primer transformator (V)

V_{sn} = Tegangan nominal pada sisi sekunder transformator (V)

V_{pn} = Tegangan nominal pada sisi primer transformator (V)

S = Daya semu (MVA)

P = Daya reaktif (MVar)

Q = Daya aktif (MW)

2.2.4 Jenis–Jenis Gangguan pada Transformator

Transformator dapat mengalami berbagai jenis gangguan yang berdampak pada keandalan operasi sistem tenaga listrik. Gangguan internal umumnya disebabkan oleh kerusakan komponen di dalam transformator, seperti hubung singkat antar lilitan, kerusakan isolasi, atau hubungan antar fasa. Gangguan ini sangat berbahaya karena berpotensi menimbulkan kerusakan permanen pada belitan dan inti besi, sehingga memerlukan proteksi yang sensitif dan cepat seperti relay diferensial agar kerusakan tidak berkembang menjadi lebih parah.

Selain gangguan internal, transformator juga dapat mengalami gangguan eksternal yang berasal dari kondisi sistem di luar peralatan. Contoh gangguan eksternal antara lain hubung singkat pada jaringan distribusi, beban lebih yang berlangsung lama, serta pengaruh surja petir. Walaupun gangguan eksternal tidak merusak bagian dalam transformator secara langsung, dampaknya tetap dapat menurunkan performa transformator jika tidak ditangani dengan proteksi yang sesuai. Karena itu, identifikasi kedua jenis gangguan ini penting sebagai dasar analisis proteksi transformator di PLTD Ampenan.

Data gangguan diperoleh dari catatan historis gangguan dan hasil wawancara dengan petugas operasi dan pemeliharaan PLTD Ampenan. Gangguan yang dicatat meliputi gangguan internal dan eksternal yang berpotensi mempengaruhi kinerja transformator.

Tabel 2. 1 Rekapitulasi Jenis Gangguan Transformator di PLTD Ampenan

No	Jenis Gangguan	Kategori
1	Hubung singkat antar lilitan	Internal
2	Gangguan antar fasa	Internal
3	Beban lebih	Eksternal
4	Gangguan hubung singkat jaringan	Eksternal

Berdasarkan data tersebut, gangguan yang terjadi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu gangguan internal dan gangguan eksternal transformator.

Tabel 2. 2 Klasifikasi Jenis Gangguan Transformator

No	Jenis Gangguan	Kategori	Dampak terhadap Transformator
1	Transformator mengeluarkan asap	Internal	Risiko kerusakan belitan dan isolasi
2	Tap changer rusak	Internal	Gangguan pengaturan tegangan
3	Trip diferensial transformator	Internal	Pemutusan sistem untuk pengamanan
4	Kabel 20 kV terkupas	Eksternal	Potensi hubung singkat
5	Over current auxiliary transformer	Eksternal	Beban lebih sistem pendukung

Gangguan internal merupakan gangguan paling berbahaya karena terjadi langsung di dalam transformator. Gangguan ini menyebabkan ketidakseimbangan arus yang besar dan tidak dapat dibatasi oleh impedansi jaringan luar. Jika tidak segera diamankan, gangguan internal dapat merusak belitan dan isolasi transformator secara permanen.

Gangguan eksternal berasal dari luar transformator, seperti kerusakan isolasi kabel atau gangguan pada sistem pendukung. Walaupun dampaknya relatif lebih kecil dibanding gangguan internal, gangguan eksternal tetap berpotensi memicu kerja proteksi apabila berlangsung dalam waktu lama.

Data log gangguan diperoleh dari file Excel operasional dan catatan gangguan (service request) yang mencatat kejadian gangguan pada transformator dan sistem terkait. Data ini digunakan untuk mengidentifikasi jenis gangguan yang pernah terjadi serta frekuensi terjadinya gangguan yang berhubungan dengan kinerja sistem proteksi transformator.

Tabel 2. 3 Rekapitulasi Data Log Gangguan Transformator

Kode			
No	Service Request	Deskripsi Gangguan	Indikasi Proteksi
1	SR145082	Transformator mengeluarkan asap	Gangguan internal
2	SR169163	kWh meter auxiliary transformer error	Gangguan pendukung
3	SR170615	Auxiliary transformer indikasi over current	Proteksi arus lebih
4	SR171976	Kabel 20 kV generator transformer terkupas	Gangguan eksternal
5	SR172883	Tap changer transformator rusak	Gangguan internal

No	Kode		Indikasi Proteksi
	Service Request	Deskripsi Gangguan	
		Temperatur phasa	
6	SR173190	input trafo meningkat	Proteksi temperatur
		Transformator trip	
7	SR173215	indikasi over pressure	Proteksi tekanan
		Relay diferensial	
8	SR173230	transformator bekerja	Proteksi diferensial
9	SR91164	Trip diferensial transformator	Proteksi diferensial

Tabel 2.3 menampilkan rekapitulasi data log gangguan transformator yang diperoleh dari file Excel operasional dan catatan service request. Data ini memberikan gambaran nyata mengenai jenis gangguan yang pernah terjadi selama transformator beroperasi di PLTD Ampenan. Gangguan yang tercatat mencakup gangguan internal, gangguan eksternal, serta gangguan pada sistem pendukung transformator.

Beberapa gangguan seperti transformator mengeluarkan asap, kerusakan tap changer, serta trip diferensial transformator termasuk dalam kategori gangguan internal yang berpotensi menyebabkan kerusakan serius pada transformator. Gangguan jenis ini sangat berbahaya karena terjadi di dalam peralatan utama dan memerlukan respon proteksi yang sangat cepat.

Sementara itu, gangguan eksternal seperti kabel 20 kV terkelupas atau gangguan pada auxiliary transformer menunjukkan adanya pengaruh kondisi lingkungan dan peralatan pendukung terhadap kinerja transformator. Adanya kejadian relay diferensial bekerja dan trip diferensial transformator menunjukkan bahwa sistem proteksi telah mendeteksi kondisi abnormal dan melakukan pemutusan untuk mengamankan peralatan. Data log gangguan ini menjadi dasar penting dalam mengevaluasi keandalan dan efektivitas sistem proteksi transformator.

2.2.4.1 Menghitung Arus Nominal Transformator

Sebelum menentukan arus nominal transformator, perlu dipahami bahwa pada sistem tenaga listrik tiga fasa, besarnya arus yang mengalir pada setiap fasa bergantung pada daya semu dan tegangan kerja transformator. Secara prinsip, daya semu merupakan hasil kali antara tegangan dan arus pada sistem tiga fasa yang dikalikan dengan faktor akar tiga. Oleh karena itu, arus nominal transformator dapat diperoleh dengan membandingkan antara daya transformator dan hasil kali antara tegangan kerja serta konstanta tiga fasa tersebut. Dengan perhitungan ini, dapat diketahui besar arus nominal yang menjadi acuan untuk menentukan ukuran kabel, pengaman, dan peralatan lainnya agar sesuai dengan kapasitas kerja transformator.

2.2.4.2 Menghitung Arus pada Current Transformer (CT)

Current Transformer (CT) digunakan untuk menurunkan arus besar pada sisi primer menjadi arus yang lebih kecil di sisi sekunder, sehingga dapat diukur atau digunakan sebagai input sistem proteksi tanpa membahayakan peralatan ukur. Prinsip dasar kerja CT didasarkan pada perbandingan jumlah lilitan antara sisi primer dan sisi sekunder. Arus pada CT diperoleh dengan membagi arus nominal transformator dengan rasio CT yang digunakan. Perhitungan ini penting untuk memastikan bahwa nilai arus yang masuk ke alat ukur atau relai proteksi sesuai dengan standar dan tidak melebihi batas kerja peralatan tersebut.

Menghitung Arus Nominal Transformator

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots \dots \dots (2.1)$$

I_n atau arus nominal merupakan arus yang mengalir pada masing-masing jaringan (tegangan tinggi dan tegangan rendah). Arus *rating* berfungsi sebagai batas pemilihan rasio CT.

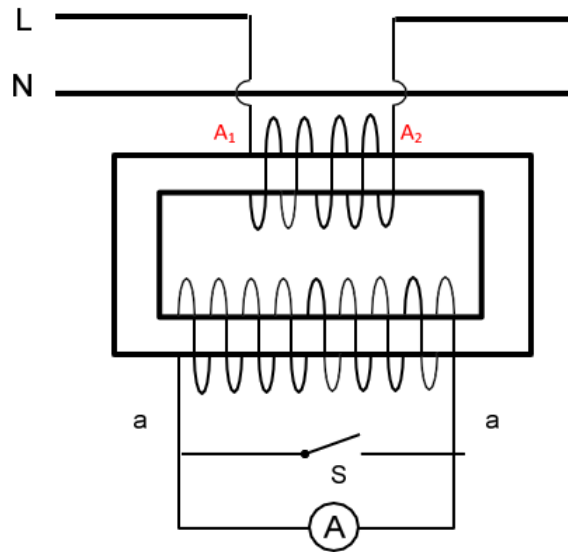
$$I_{rating} = 110\% \times I_{nominal} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

I_n = arus nominal (A)

S = daya transformator (VA)

V = tegangan kerja (V)



Gambar 2. 3 Rangkaian penyambungan transformator arus

2.2.4.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat

1. Arus Hubung Singkat Sisi Primer (Generator)

$$I_{sc,p} = \frac{I_{n,p}}{Z_{pu}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

$I_{sc,p}$ = Arus gangguan Primer (A)

$I_{n,p}$ = arus nominal Primer (A)

Z_{pu} = Impedansi dalam sistem per unit

2. Arus Hubung Sisi Sekunder (Jaringan)

$$I_{sc,s} = \frac{I_{n,s}}{Z_{pu}} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

$I_{sc,s}$ = Arus gangguan sekunder (A)

$I_{n,s}$ = arus nominal sekunder (A)

Z_{pu} = Impedansi dalam sistem per unit

3. Arus Gangguan Maksimum (dengan Faktor X/R)

$$I_{peak} = \sqrt{2} \times I_{sc} \times (1 + e^{-\frac{R}{X}\pi}) \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

I_{peak} = Arus puncak (A)

I_{sc} = arus hubung singkat simetris (A)

X/R= Rasio reaktansi terhadap resistansi sistem

e = Bilangan eksponensial (2,718)

π = 3,14

4. Hitung Arus Pickup Relay

$$I_{pickup} = 0,2 \times I_{n, secondary} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana :

I_{pickup} = Arus setting relay

$I_{n, secondary}$ = Arus nominal sekunder CT

0,2 = Faktor sensitivitas

2.2.5 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Sistem proteksi tenaga listrik adalah sekumpulan perangkat dan metode yang dirancang untuk mendeteksi gangguan atau kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik, lalu mengambil tindakan yang tepat untuk meminimalkan kerusakan peralatan, menjaga keselamatan operasi, dan memastikan kontinuitas pasokan listrik[13]. Tujuan utama sistem proteksi adalah melindungi peralatan seperti generator, transformator, saluran transmisi, dan peralatan distribusi dari kerusakan akibat gangguan seperti hubung singkat, arus lebih, kegagalan isolasi, atau gangguan lain yang dapat mengganggu kestabilan sistem. proteksi adalah suatu metode atau sistem yang digunakan untuk mencegah atau membatasi kerusakan peralatan akibat gangguan, sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listrik dapat tetap terjaga[14].

2.2.6 Relay Proteksi

Relay proteksi adalah perangkat otomatis dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mendeteksi kondisi gangguan atau abnormal pada sistem, kemudian mengirimkan sinyal untuk memutuskan aliran listrik melalui pemutus sirkuit (*circuit breaker*)[15]. Relay proteksi bekerja dengan memantau parameter listrik seperti arus, tegangan, frekuensi, dan sudut fasa, lalu membandingkan nilai tersebut dengan batas atau setting yang telah ditentukan.



Gambar 2. 4 Relay Proteksi

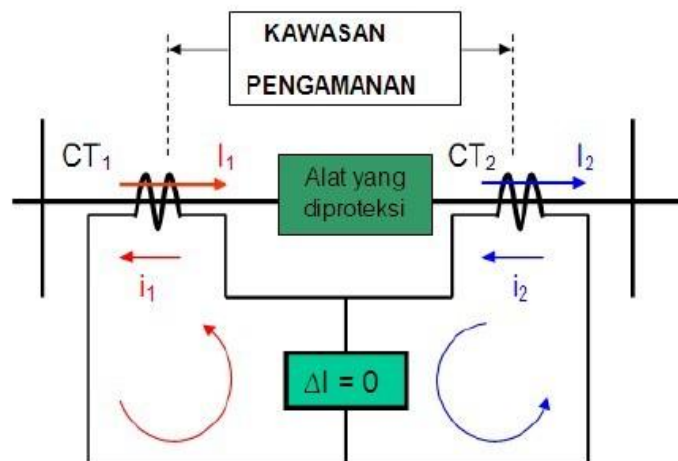
(Dokumentasi : Pribadi, September 2025)

- a. Relay Arus Lebih (*Overcurrent Relay*)
 1. Mengoperasikan proteksi ketika arus yang mengalir melebihi nilai batas yang telah ditentukan.
 2. Digunakan untuk melindungi saluran transmisi, transformator, dan peralatan lainnya dari kerusakan akibat arus lebih.
- b. Relay Tegangan Lebih (*Overvoltage Relay*)
 1. Mengoperasikan proteksi ketika tegangan melebihi nilai ambang batas tertentu.
 2. Berguna untuk mencegah kerusakan peralatan akibat tegangan berlebih.
- c. Relay Tegangan Kurang (*Undervoltage Relay*)
 1. Mengaktifkan proteksi jika tegangan turun di bawah nilai tertentu.
 2. Penting untuk menjaga operasi peralatan agar tetap aman ketika terjadi penurunan tegangan.
- d. Relay Diferensial (*Differential Relay*)
 1. Menggunakan prinsip perbandingan arus masuk dan arus keluar suatu peralatan (misalnya transformator atau generator).
 2. Sangat sensitif terhadap gangguan internal dan digunakan untuk proteksi transformator daya, generator, dan mesin besar lainnya.
- e. Relay Waktu (*Time-Overcurrent Relay*)
 1. Mengoperasikan proteksi dengan delay waktu tertentu ketika arus lebih terdeteksi.

2. Digunakan untuk selektivitas proteksi, sehingga gangguan di bagian tertentu tidak mempengaruhi sistem secara keseluruhan.
- f. Relay Frekuensi (*Frequency Relay*)
1. Mengoperasikan proteksi ketika frekuensi sistem listrik naik atau turun dari nilai normal.
 2. Digunakan untuk menjaga kestabilan sistem tenaga listrik.
- g. Relay Arus Hubung Tanah (*Earth Fault Relay*)
1. Mengoperasikan proteksi ketika terdeteksi adanya arus hubung tanah.
 2. Umumnya digunakan untuk melindungi sistem distribusi dan transformator.

2.2.7 Relay Differensial

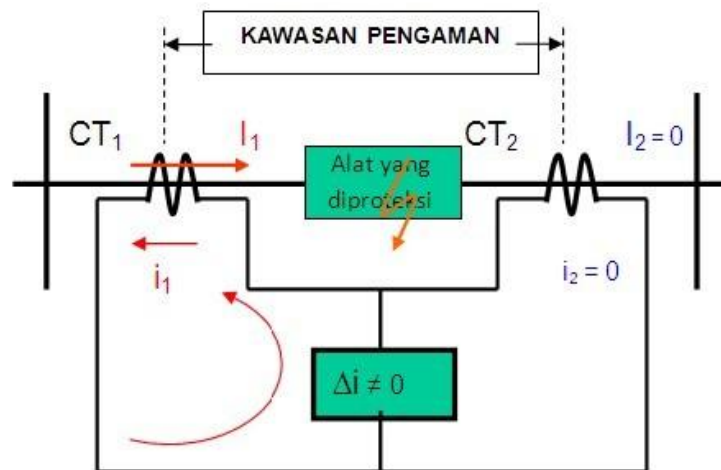
Relay diferensial adalah perangkat proteksi yang bekerja berdasarkan prinsip perbandingan arus masuk dan arus keluar suatu peralatan listrik, seperti transformator atau generator. Prinsip kerjanya adalah mendeteksi adanya perbedaan arus (*differential current*) yang menandakan gangguan internal pada peralatan tersebut. Pada kondisi normal, arus yang masuk ke peralatan sama dengan arus yang keluar (dengan toleransi rugi-rugi kecil). Namun, jika terjadi gangguan internal seperti hubung singkat antar lilitan atau kerusakan isolasi, maka terjadi perbedaan arus yang signifikan[16]. Relay diferensial akan mendeteksi perbedaan ini dan segera memerintahkan *circuit breaker* untuk memutus aliran listrik, sehingga mencegah kerusakan lebih lanjut.



Gambar 2. 5 Rangkaian Sederhana Relay Differential

(Sumber : Jurnal Homepage <https://etnik.rifainstitute.com>)

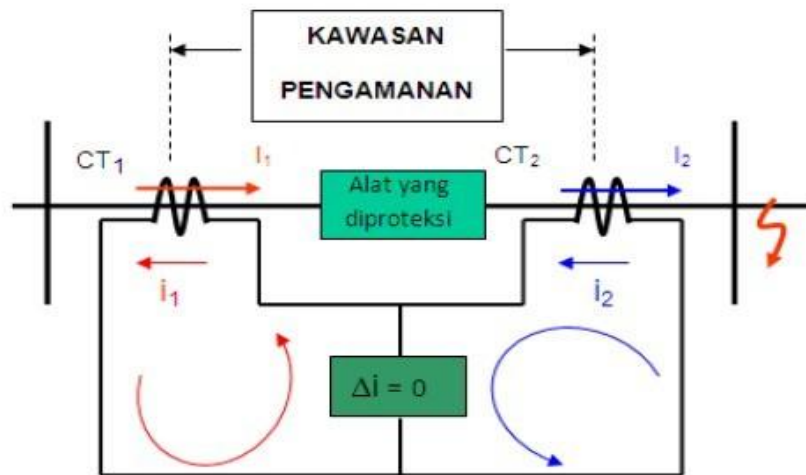
Dari gambar 2.5 dapat dilihat bahwa dengan memilih rasio trafo arus yang tepat dan sesuai, dalam kondisi normal arah arus I_1 dan I_2 adalah berlawanan dan mempunyai besar yang sama sehingga relay diferensial tidak dialiri arus. Jadi relay ini bekerja apabila terjadi perbedaan arus antara kedua sisi sekunder trafo arus.



Gambar 2. 6 Relay Differential dengan Gangguan di Daerah Pengaman

(Sumber : Jurnal Homepage <https://etnik.rifainstitute.com>)

Jika relay diferensial dipasang sebagai proteksi suatu peralatan dan terjadi gangguan didaerah pengamanannya maka relay diferensial harus bekerja, seperti terlihat pada gambar 2.6. Pada saat CT_1 mengalir arus I_1 maka pada CT_2 tidak ada arus yang mengalir ($I_2 = 0$), disebabkan karena arus gangguan mengalir pada titik gangguan sehingga pada CT_2 tidak ada arus yang mengalir, maka sisi sekunder CT_2 tidak ada arus yang mengalir ($I_2 = 0$), yang mengakibatkan $i_1 \neq i_2$ ($\Delta i \neq 0$) sehingga relay diferensial bekerja.



Gambar 2. 7 Relay Diferensial dengan Gangguan di Luar Daerah Pengaman

(Sumber : Jurnal Homepage <https://etnik.rifainstitute.com>)

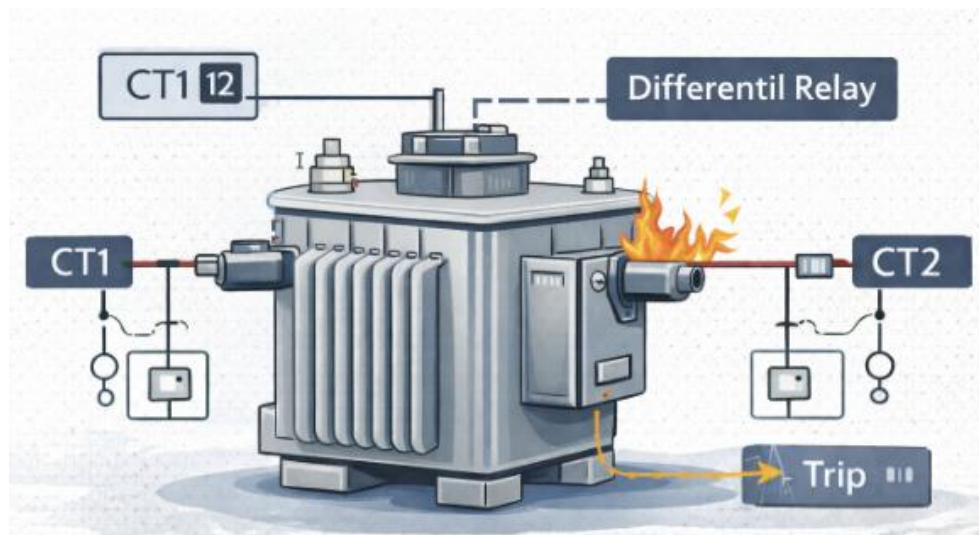
Apabila terjadi gangguan di luar daerah pengamanannya maka relay diferensial tidak bekerja seperti pada gambar 2.7. Pada saat sisi primer kedua CT dialiri arus I₁ dan I₂ yang sangat besar karena gangguan hubung singkat, besar dan arah arus pada sekunder CT₁ dan CT₂ menunjukkan perbandingan nilai arus pada relay yang besarnya sama ($i_1 = i_2$) atau dengan kata lain tidak ada selisih perbandingan nilai arus yang mengalir pada relay sehingga relay tidak bekerja. Sirkulasi arus gangguan di luar daerah pengaman kerja relay diferensial hanya berpengaruh pada besarnya arus yang mengalir pada sisi sekunder kedua CT tapi dengan besar perubahan arus ($i_1 = i_2$). Arah arus i_1 dan i_2 juga tidak berubah sehingga relay diferensial tidak bekerja karena tidak ada perbedaan arus ($\Delta i = 0$)

Di Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) seperti PLTD Ampenan, relay diferensial dipasang pada transformator daya step-up yang menghubungkan generator diesel dengan sistem transmisi. Fungsi utama relay diferensial adalah untuk melindungi transformator daya dari gangguan internal, menjaga kontinuitas pasokan listrik dengan meminimalkan waktu gangguan, serta meningkatkan keandalan sistem dengan mengurangi dampak kerusakan pada peralatan lain[17]. Keunggulan relay diferensial pada PLTD meliputi sensitivitas yang tinggi terhadap gangguan internal, respons yang cepat sehingga mengurangi risiko kerusakan besar, serta selektivitas tinggi yang hanya memutus bagian sistem yang terganggu tanpa memengaruhi bagian lainnya. Namun,

perangkat ini memiliki keterbatasan, yakni memerlukan pemasangan dan pengaturan yang tepat, serta sensitif terhadap kesalahan pengukuran arus atau gangguan eksternal tertentu, sehingga memerlukan kalibrasi dan pemeliharaan secara berkala.

2.2.8 Proteksi Transformator

Proteksi transformator merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik karena transformator adalah peralatan utama yang memiliki nilai investasi tinggi dan berperan langsung terhadap kontinuitas pasokan energi listrik. Gangguan yang terjadi pada transformator, baik gangguan internal maupun eksternal, dapat menyebabkan kerusakan serius, waktu padam yang lama, serta kerugian operasional yang besar. Oleh karena itu, diperlukan sistem proteksi yang andal, cepat, dan selektif untuk mengamankan transformator dari berbagai kemungkinan gangguan.



Gambar 2. 8 Proteksi Transformator

(Sumber : <https://id.mfgrobots.com/mfg/it/1006029104.html>)

Secara umum, tujuan utama proteksi transformator adalah untuk mendeteksi gangguan secepat mungkin dan mengisolasi bagian yang terganggu dari sistem sebelum kerusakan berkembang menjadi lebih parah. Proteksi transformator juga harus mampu membedakan antara kondisi gangguan yang berbahaya dan kondisi operasi normal seperti pembebanan tinggi atau arus inrush saat transformator pertama kali dioperasikan.

Beberapa jenis proteksi yang umum digunakan pada transformator daya antara lain proteksi diferensial, proteksi arus lebih, proteksi hubung tanah, proteksi tekanan (Buchholz relay), proteksi temperatur minyak dan belitan, serta proteksi overfluxing. Masing-masing jenis proteksi memiliki fungsi dan karakteristik tersendiri, namun saling

melengkapi dalam satu sistem proteksi yang terkoordinasi. Dalam praktiknya, proteksi diferensial digunakan sebagai proteksi utama terhadap gangguan internal, sedangkan proteksi lainnya berfungsi sebagai proteksi pendukung dan cadangan.

2.2.9 Current Transformer (CT)

Current Transformer (CT) adalah transformator instrumen yang digunakan untuk menurunkan arus besar pada sistem tenaga listrik menjadi arus kecil yang aman untuk diukur dan diproses oleh peralatan proteksi maupun alat ukur. Dalam sistem tenaga listrik, arus pada sisi primer transformator daya dapat mencapai ratusan hingga ribuan ampere, sehingga tidak mungkin langsung dihubungkan ke relay proteksi. Oleh karena itu, CT digunakan sebagai perantara untuk mengonversi arus besar tersebut menjadi arus standar, umumnya 1 A atau 5 A pada sisi sekunder.



Gambar 2. 9 Curent Transformator

(Sumber : <https://selectswitches.com/product/current-transformers/>)

Prinsip kerja CT didasarkan pada induksi elektromagnetik, di mana perbandingan arus antara sisi primer dan sisi sekunder sebanding dengan perbandingan jumlah lilitan. Rasio CT dinyatakan dalam bentuk, misalnya 300/5 A, yang berarti bahwa ketika arus primer sebesar 300 A mengalir, maka arus sekunder yang keluar dari CT adalah 5 A. Pemilihan rasio CT harus disesuaikan dengan arus nominal transformator agar relay proteksi dapat bekerja secara akurat dan tidak mengalami saturasi.

Dalam sistem proteksi diferensial transformator, CT memegang peranan yang sangat penting karena akurasi pengukuran arus primer dan sekunder sangat menentukan nilai arus diferensial yang dihitung. Kesalahan rasio CT, perbedaan kelas akurasi CT di

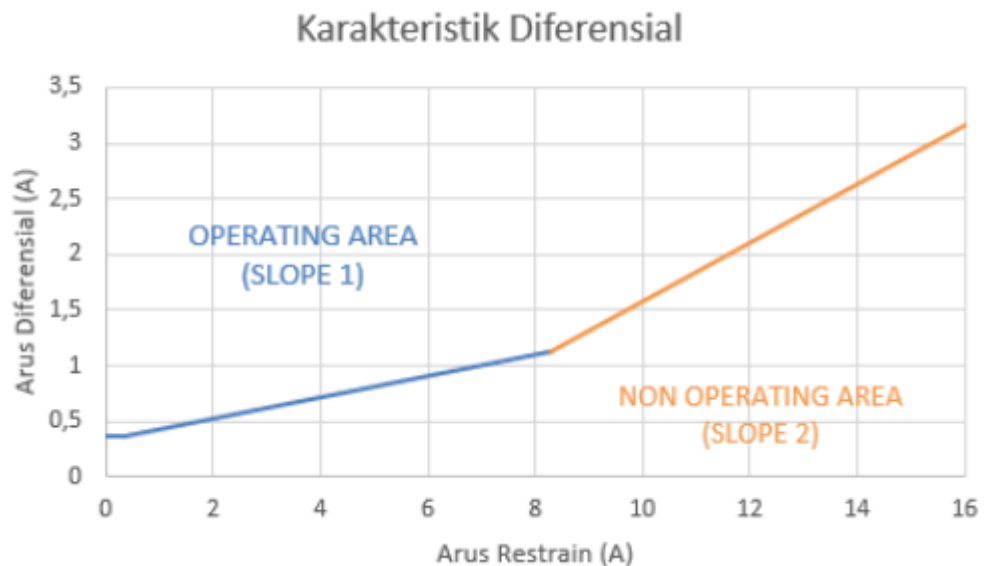
sisi primer dan sekunder, atau kondisi saturasi CT dapat menyebabkan munculnya arus diferensial palsu yang berpotensi menimbulkan trip yang tidak diperlukan.

2.2.10 Prinsip Kerja Proteksi Diferensial Transformator

Proteksi diferensial merupakan sistem proteksi utama untuk transformator daya yang bekerja berdasarkan prinsip keseimbangan arus. Pada kondisi operasi normal, arus yang masuk ke transformator dari sisi primer akan sama dengan arus yang keluar dari sisi sekunder setelah dikoreksi dengan rasio tegangan dan rasio CT. Dalam kondisi ini, arus diferensial yang terdeteksi oleh relay mendekati nol, sehingga relay tidak memberikan perintah trip.

Namun, apabila terjadi gangguan internal seperti hubung singkat antar lilitan atau kerusakan isolasi, maka keseimbangan arus antara sisi primer dan sekunder akan terganggu. Perbedaan arus inilah yang disebut sebagai arus diferensial. Jika nilai arus diferensial melebihi nilai ambang batas (pickup) yang telah ditentukan, relay diferensial akan bekerja dan memerintahkan pemutus tenaga untuk memutuskan transformator dari sistem.

Keunggulan utama proteksi diferensial adalah tingkat sensitivitas dan selektivitasnya yang sangat tinggi. Relay hanya akan bekerja pada gangguan yang terjadi di dalam zona proteksinya, yaitu di dalam transformator itu sendiri.



Gambar 2. 10 Kurva Differential Relay

(Sumber : https://www.researchgate.net/figure/Differential-Relay-with-Dual-Slope-Characteristic_fig4_282502847)

2.2.11 Arus Diferensial dan Arus Penahan (Restraint Current)

Dalam praktiknya, relay diferensial modern tidak hanya membandingkan selisih arus primer dan sekunder, tetapi juga mempertimbangkan arus penahan (restraint current). Arus penahan merupakan nilai rata-rata arus primer dan sekunder yang digunakan untuk menstabilkan kerja relay agar tidak mudah bekerja pada kondisi tertentu yang bukan merupakan gangguan internal.

Penggunaan arus penahan bertujuan untuk mencegah relay diferensial bekerja secara tidak tepat pada kondisi seperti arus inrush, saturasi CT, atau gangguan eksternal yang besar. Dalam kondisi tersebut, meskipun terdapat selisih arus, relay diferensial tidak langsung bekerja karena nilai arus penahan masih berada dalam batas toleransi.

Karakteristik kerja relay diferensial umumnya dinyatakan dalam bentuk kurva slope, yang menunjukkan hubungan antara arus diferensial dan arus penahan.

2.2.12 Karakteristik Operasi Relay Diferensial dan Perhitungan Arus Restraint

Relay diferensial transformator bekerja berdasarkan prinsip keseimbangan arus antara sisi primer dan sisi sekunder. Pada kondisi operasi normal, arus yang masuk ke transformator sama dengan arus yang keluar setelah dikoreksi oleh rasio transformator dan rasio Current Transformer (CT). Oleh karena itu, arus diferensial yang terdeteksi oleh relay mendekati nol sehingga relay tidak bekerja.

Namun, dalam kondisi gangguan internal, terjadi ketidakseimbangan arus yang menyebabkan munculnya arus diferensial. Relay diferensial akan bekerja apabila gaya magnetomotif pada kumparan operasi (*operating coil*) lebih besar dibandingkan gaya magnetomotif pada kumparan penahan (*restraint coil*).

Besarnya gaya magnetomotif pada kumparan operasi sebanding dengan:

$$N_o(I_a1' - I_a2')$$

Sedangkan gaya magnetomotif pada kumparan penahan sebanding dengan:

$$N_r \left(\frac{I_a1' + I_a2'}{2} \right)$$

Dengan demikian, relay akan bekerja jika:

$$\left[N_o(I_a1' - I_a2') \right]^2 > \left[N_r \left(\frac{I_a1' + I_a2'}{2} \right) \right]^2$$

Jika disederhanakan, kondisi operasi relay menjadi:

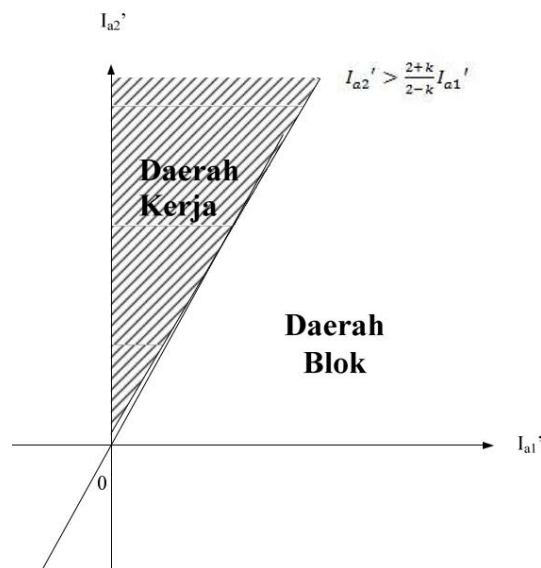
$$| I_a1' - I_a2' | > k \left| \frac{I_a1' + I_a2'}{2} \right|$$

dimana:

k = perbandingan jumlah lilitan kumparan restraint terhadap kumparan operasi.

Persamaan ini menunjukkan bahwa relay diferensial tidak hanya mempertimbangkan selisih arus, tetapi juga dipengaruhi oleh arus rata-rata sistem sebagai faktor stabilisasi. Hal ini bertujuan untuk mencegah kerja relay akibat gangguan eksternal, kesalahan rasio CT, atau fenomena saturasi CT.

Karakteristik operasi relay diferensial biasanya ditampilkan dalam bentuk kurva slope, yaitu hubungan antara arus diferensial dan arus penahan. Semakin besar arus restrain, semakin besar pula arus diferensial yang dibutuhkan agar relay bekerja. Hal ini meningkatkan stabilitas sistem proteksi.



Gambar 2. 11 Karakteristik Operasi Relay Diferensial

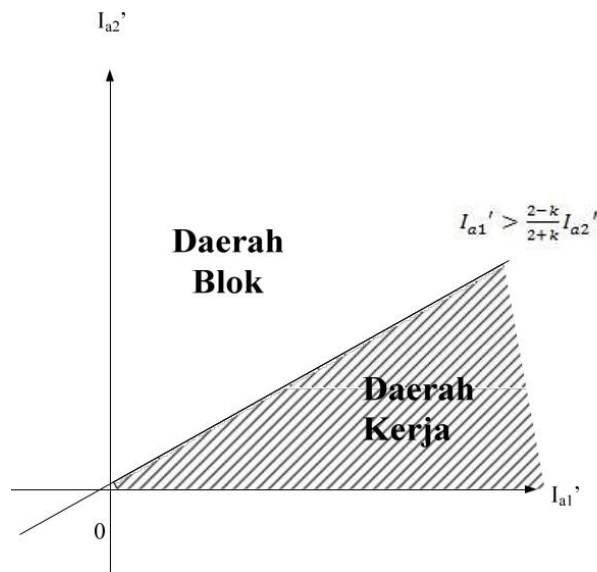
(Sumber : <https://id.scribd.com/doc/61786925/materi-relai-diferensial>)

2.2.13 Evaluasi Selektivitas Relay Diferensial

Selektivitas merupakan salah satu kriteria utama dalam sistem proteksi tenaga listrik. Selektivitas menunjukkan kemampuan sistem proteksi untuk memutus hanya bagian sistem yang mengalami gangguan tanpa mempengaruhi bagian lain yang masih dalam kondisi normal.

Pada proteksi transformator, relay diferensial harus mampu membedakan antara gangguan internal dan gangguan eksternal. Gangguan internal harus segera diputus

karena berpotensi merusak transformator, sedangkan gangguan eksternal harus ditahan agar tidak menyebabkan pemutusan yang tidak diperlukan.



Gambar 2. 12 Karakteristik Operasi Relay Diferensial

(Sumber : <https://id.scribd.com/doc/61786925/materi-relai-diferensial>)

Evaluasi selektivitas relay diferensial dilakukan dengan membandingkan arus diferensial yang dihitung dengan nilai arus pickup relay. Arus diferensial dihitung berdasarkan selisih arus antara sisi primer dan sekunder transformator, sedangkan arus pickup merupakan nilai ambang batas minimum agar relay bekerja.

Kriteria selektivitas relay diferensial dapat dinyatakan sebagai berikut:

1. Jika:

$$I_{diff} > I_{pickup}$$

maka relay bekerja dan sistem dianggap selektif terhadap gangguan internal.

2. Jika:

$$I_{diff} < I_{pickup}$$

maka relay tidak bekerja dan sistem dianggap stabil terhadap gangguan eksternal.

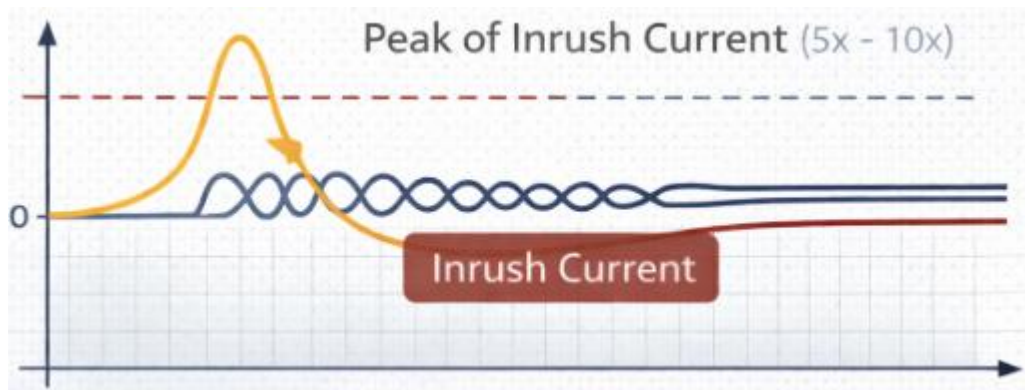
Evaluasi ini penting untuk memastikan bahwa relay diferensial hanya bekerja pada gangguan yang berada di dalam zona proteksi transformator. Selain itu, analisis selektivitas juga digunakan untuk menilai keandalan sistem proteksi dalam mencegah trip palsu yang dapat mengganggu kontinuitas operasi pembangkit.

Dalam penelitian ini, evaluasi selektivitas dilakukan berdasarkan data pengukuran arus transformator, hasil perhitungan manual, serta simulasi menggunakan perangkat lunak

ETAP. Hasil perhitungan dibandingkan dengan setting relay eksisting untuk mengetahui apakah proteksi sudah bekerja secara optimal.

2.2.14 Inrush Current pada Transformator

Inrush current adalah arus masuk sesaat yang sangat besar yang terjadi ketika transformator pertama kali dihubungkan ke sumber tegangan. Arus ini dapat mencapai 5 hingga 10 kali arus nominal transformator dan berlangsung dalam waktu singkat. Inrush current terjadi akibat kondisi inti besi transformator yang belum termagnetisasi secara seimbang.



Gambar 2. 13 Inrush Current

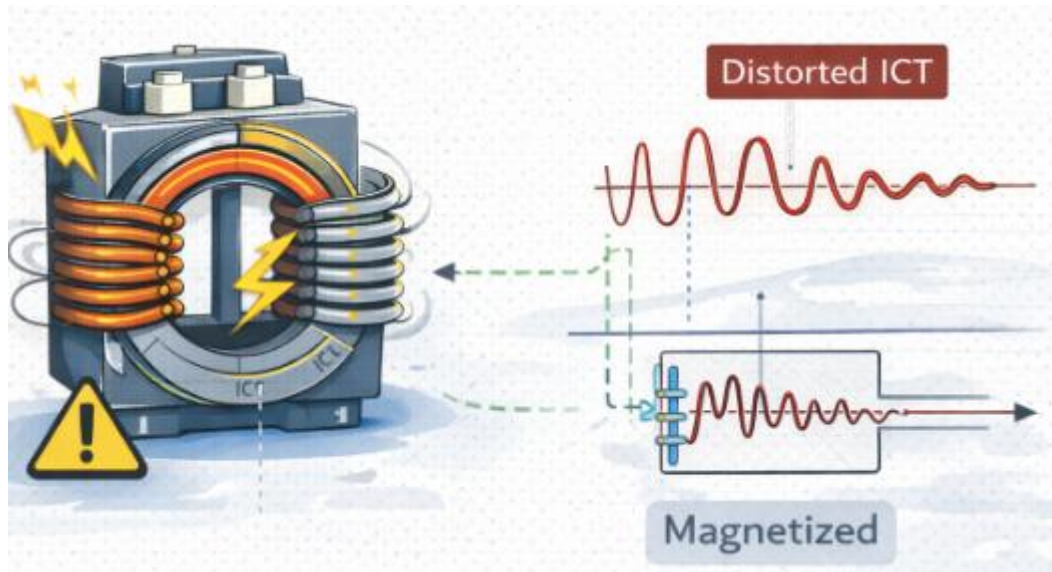
(Sumber : <https://professional-electrician.com/technical/what-are-inrush-currents-chauvin-arnoux>)

Fenomena inrush current sering menimbulkan masalah pada sistem proteksi diferensial karena dapat menyebabkan ketidakseimbangan arus antara sisi primer dan sekunder, sehingga berpotensi memicu kerja relay diferensial secara salah. Untuk mengatasi hal ini, relay diferensial modern dilengkapi dengan fitur penahan harmonisa.

2.2.15 Saturasi Current Transformer (CT Saturation)

Saturasi CT adalah kondisi di mana inti besi CT tidak mampu lagi menahan fluks magnet yang meningkat akibat arus primer yang sangat besar, sehingga bentuk gelombang arus sekunder menjadi terdistorsi dan tidak lagi proporsional terhadap arus primer.

Saturasi CT dapat menimbulkan kesalahan pengukuran arus yang berdampak langsung pada kinerja relay proteksi, khususnya relay diferensial. Jika salah satu CT mengalami saturasi sementara CT lainnya tidak, maka akan muncul selisih arus yang besar di relay diferensial, meskipun gangguan sebenarnya terjadi di luar zona proteksi.

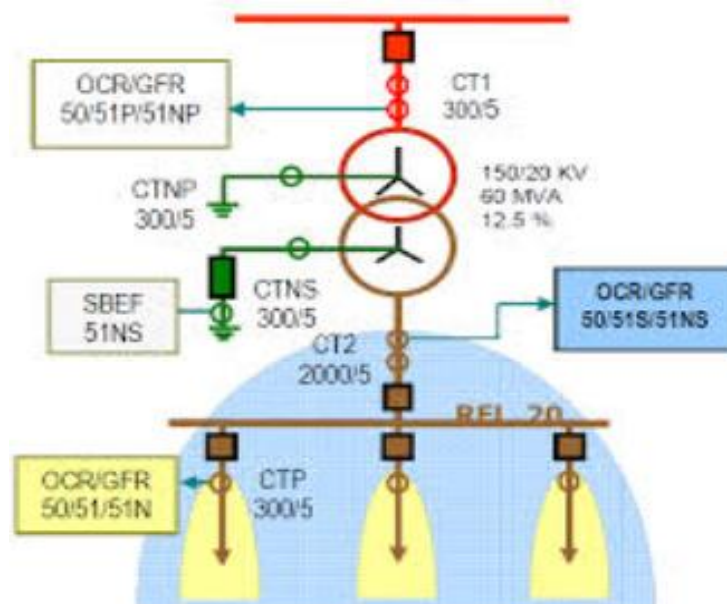


Gambar 2. 14 Saturasi Current Transformer

(Sumber : <https://www.electronicinfos.com/2023/06/burden-and-saturation-of-ctcurrent.html>)

2.2.16 Koordinasi Proteksi Transformator

Koordinasi proteksi adalah proses penyesuaian setting berbagai perangkat proteksi agar dapat bekerja secara selektif, cepat, dan andal. Dalam sistem proteksi transformator, koordinasi dilakukan antara relay diferensial sebagai proteksi utama dengan relay arus lebih, relay hubung tanah, dan proteksi cadangan lainnya.



Gambar 2. 15 Kordinasi Proteksi Transformator

(Sumber : <https://id.scribd.com/doc/81611983/3-2-Jenis-Proteksi-Trafo-060905>)

Dengan koordinasi yang baik, gangguan dapat diisolasi hanya pada bagian sistem yang terganggu tanpa mempengaruhi bagian sistem lainnya.

2.2.17 Keandalan Sistem Proteksi

Keandalan sistem proteksi adalah kemampuan sistem proteksi untuk bekerja secara konsisten dan benar dalam mendeteksi serta mengamankan gangguan. Keandalan ini mencakup tiga aspek utama, yaitu kepekaan, selektivitas, dan kecepatan respon.

Dalam konteks transformator PLTD Ampenan, keandalan sistem proteksi sangat penting karena transformator merupakan peralatan utama yang menentukan kontinuitas operasi pembangkit.

2.2.18 Peran Perangkat Lunak ETAP dalam Analisis Sistem Proteksi

ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) merupakan perangkat lunak simulasi sistem tenaga listrik yang banyak digunakan secara luas dalam dunia industri, pendidikan, dan penelitian untuk melakukan analisis kelistrikan secara komprehensif. ETAP dirancang untuk membantu perencana, operator, dan peneliti dalam memodelkan, mensimulasikan, serta mengevaluasi kinerja sistem tenaga listrik mulai dari tingkat pembangkitan, transmisi, hingga distribusi. Dengan dukungan antarmuka grafis berbasis diagram satu garis (single line diagram), ETAP memungkinkan pengguna untuk merepresentasikan sistem tenaga listrik secara visual dan interaktif sesuai dengan kondisi nyata di lapangan.

Dalam konteks sistem proteksi transformator, ETAP memiliki peran yang sangat penting karena mampu mengintegrasikan data teknis peralatan, karakteristik relay proteksi, serta parameter operasi sistem ke dalam satu model simulasi. Melalui ETAP, berbagai skenario gangguan dapat diuji tanpa harus mengganggu operasi sistem nyata, sehingga risiko terhadap peralatan dan kontinuitas pasokan listrik dapat dihindari. Hal ini menjadikan ETAP sebagai alat bantu yang sangat efektif dalam mengevaluasi kinerja sistem proteksi dan memverifikasi kesesuaian setting relay proteksi terhadap karakteristik sistem yang dilindungi.

Salah satu fitur utama ETAP yang relevan dalam penelitian ini adalah modul Load Flow Analysis (analisis aliran daya). Modul ini digunakan untuk menghitung distribusi daya aktif dan daya reaktif, tegangan bus, arus saluran, serta faktor daya pada setiap titik dalam sistem. Dengan menggunakan modul ini, dapat diketahui kondisi pembebanan transformator pada berbagai skenario operasi, apakah masih berada dalam

batas nominal atau sudah mendekati kondisi overload. Informasi ini sangat penting dalam analisis proteksi transformator karena tingkat pembebanan berpengaruh langsung terhadap temperatur operasi, umur isolasi, serta sensitivitas sistem proteksi terhadap gangguan.



Gambar 2. 16 Gambar Etap

(Sumber : <https://jendeladenngabei.blogspot.com/2013/11/belajar-software-etap-proteksi-setting.html>)

Selain itu, ETAP juga menyediakan modul Short Circuit Analysis (analisis hubung singkat) yang digunakan untuk menghitung arus gangguan pada berbagai titik dalam sistem tenaga listrik. Modul ini mendukung berbagai standar perhitungan, seperti IEC dan ANSI/IEEE, sehingga hasil perhitungan dapat disesuaikan dengan standar yang digunakan di lapangan. Dalam konteks proteksi transformator, hasil perhitungan arus hubung singkat sangat penting untuk menentukan apakah setting relay proteksi, termasuk relay diferensial dan relay arus lebih, sudah memadai untuk mendeteksi gangguan secara cepat dan selektif. Dengan mengetahui besarnya arus gangguan yang mungkin terjadi, dapat ditentukan nilai arus pickup relay serta karakteristik kurva proteksi yang sesuai.

Fitur lain yang sangat relevan adalah modul Protection & Coordination yang memungkinkan pengguna untuk memodelkan berbagai jenis relay proteksi, seperti relay diferensial, relay arus lebih, relay hubung tanah, dan relay tegangan. Dalam modul ini, pengguna dapat memasukkan parameter setting relay, seperti arus pickup, time dial, slope characteristic, dan faktor penahan (restraint), kemudian mensimulasikan respon relay terhadap berbagai kondisi gangguan. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk kurva koordinasi waktu-arus (Time-Current Characteristic / TCC), sehingga dapat

dievaluasi apakah relay proteksi utama dan relay cadangan sudah terkoordinasi dengan baik.

Dalam sistem proteksi transformator, koordinasi antara relay diferensial sebagai proteksi utama dan relay arus lebih sebagai proteksi cadangan sangat krusial. ETAP memungkinkan dilakukan analisis koordinasi ini secara visual dan kuantitatif. Melalui kurva TCC, dapat dilihat apakah relay diferensial bekerja lebih cepat dibanding relay cadangan pada gangguan internal, serta apakah relay cadangan tetap mampu bekerja apabila relay utama gagal beroperasi. Dengan demikian, ETAP membantu memastikan bahwa sistem proteksi tidak hanya sensitif, tetapi juga selektif dan andal.

Selain untuk analisis kondisi steady-state dan gangguan, ETAP juga memiliki modul Transient Stability Analysis yang dapat digunakan untuk menganalisis respon sistem terhadap gangguan dinamis, seperti pelepasan beban besar, gangguan hubung singkat sesaat, atau pemutusan transformator dari sistem. Prinsip analisisnya tetap relevan dalam konteks PLTD karena dapat memberikan gambaran mengenai stabilitas sistem setelah terjadi gangguan dan pemutusan peralatan utama seperti transformator daya.

Dalam penelitian ini, ETAP digunakan sebagai alat bantu untuk memverifikasi hasil perhitungan manual yang telah dilakukan pada Bab IV, khususnya dalam perhitungan arus nominal, arus hubung singkat, serta evaluasi kinerja sistem proteksi diferensial transformator. Dengan membandingkan hasil simulasi ETAP dengan data pengukuran lapangan dan data historis gangguan, dapat diperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai kesesuaian setting relay diferensial yang digunakan di PLTD Ampenan. Apabila terdapat perbedaan signifikan antara hasil simulasi dan kondisi nyata, maka hal tersebut dapat dijadikan dasar untuk melakukan evaluasi dan penyesuaian setting proteksi.

Keunggulan utama penggunaan ETAP dalam analisis sistem proteksi transformator adalah kemampuannya dalam meminimalkan risiko kesalahan perhitungan dan meningkatkan akurasi analisis. Perhitungan manual sering kali membutuhkan banyak asumsi dan berpotensi menimbulkan kesalahan, terutama pada sistem yang kompleks. Dengan ETAP, seluruh parameter sistem dapat dimodelkan secara terintegrasi, sehingga interaksi antar peralatan dapat dianalisis secara lebih realistis. Selain itu, ETAP juga menyediakan basis data peralatan listrik yang

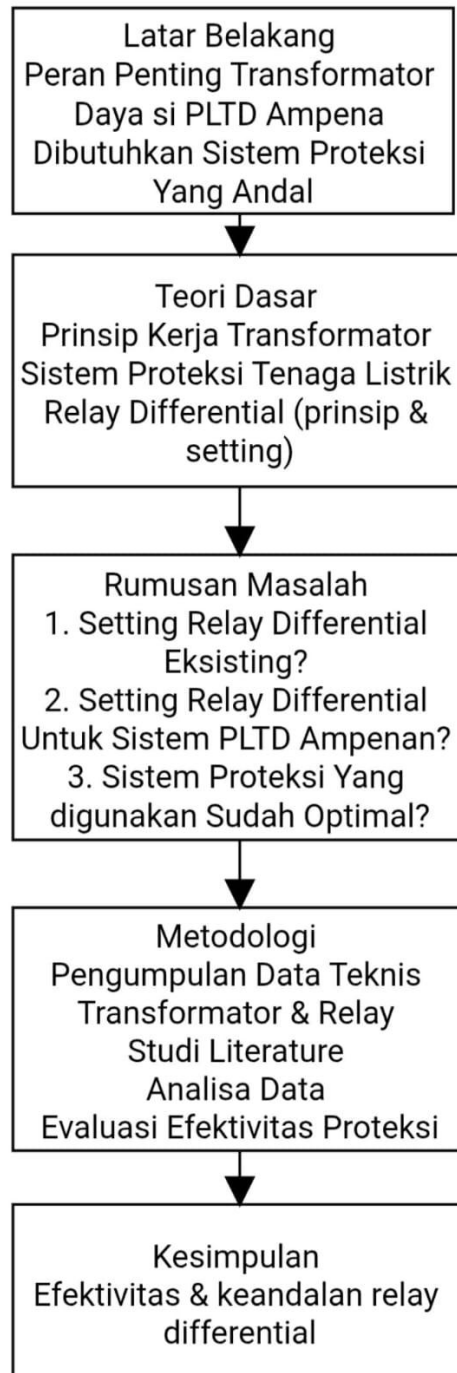
memudahkan pengguna dalam memilih spesifikasi transformator, CT, relay, dan circuit breaker sesuai dengan kondisi lapangan.

Namun demikian, penggunaan ETAP tetap memerlukan ketelitian dalam memasukkan data teknis peralatan dan parameter sistem. Hasil simulasi yang akurat sangat bergantung pada keakuratan data input yang digunakan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, data spesifikasi transformator, data rasio CT, data setting relay proteksi, serta data konfigurasi jaringan diperoleh langsung dari dokumen teknis dan hasil observasi lapangan di PLTD Ampenan. Dengan cara ini, hasil simulasi ETAP diharapkan dapat merepresentasikan kondisi sistem yang sebenarnya.

Secara keseluruhan, ETAP merupakan alat bantu yang sangat efektif dalam mendukung analisis sistem proteksi transformator. Penggunaan ETAP tidak hanya membantu memverifikasi hasil perhitungan manual, tetapi juga memberikan gambaran visual mengenai kinerja sistem proteksi dan koordinasi antar relay. Dengan memanfaatkan ETAP, penelitian ini dapat menghasilkan evaluasi yang lebih komprehensif dan andal terhadap kinerja sistem proteksi relay diferensial di PLTD Ampenan, serta memberikan dasar yang kuat untuk rekomendasi peningkatan keandalan sistem proteksi di masa mendatang.

2.3 Kerangka Pemikiran

Terdapat kerangka pemikiran pada penelitian ini yang menjelaskan alur berpikir mulai dari latar belakang, teori dasar, rumusan masalah, metodologi hingga kesimpulan. Kerangka ini digunakan sebagai acuan dalam menganalisis sistem proteksi transformator dengan relay diferensial pada PLTD Ampenan.



Gambar 2. 17 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini diawali dari latar belakang, yaitu pentingnya peran transformator daya di PLTD Ampenan dalam proses penyaluran energi listrik sehingga dibutuhkan sistem proteksi yang andal untuk mencegah kerusakan akibat gangguan. Selanjutnya, pada bagian teori dasar, penelitian ini berlandaskan pada prinsip kerja transformator, sistem proteksi tenaga listrik, prinsip serta pengaturan relay diferensial, dan jenis-jenis gangguan yang dapat terjadi pada transformator. Berdasarkan

teori tersebut, diturunkan rumusan masalah yang meliputi empat poin utama: prinsip kerja dan fungsi relay diferensial, jenis gangguan transformator beserta cara relay mendeteksinya, analisis kinerja sistem proteksi, serta optimalisasi relay diferensial dalam menjaga keandalan sistem. Untuk menjawab rumusan masalah tersebut digunakan metodologi penelitian berupa pengumpulan data teknis transformator dan relay, studi literatur, analisis data gangguan serta kinerja relay, dan evaluasi efektivitas proteksi. Dari alur tersebut diharapkan diperoleh kesimpulan berupa gambaran efektivitas dan keandalan relay diferensial dalam melindungi transformator di PLTD Ampenan serta kontribusinya terhadap kontinuitas penyaluran energi listrik.