

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada penelitian terkait ini, penulis mengkaji beberapa penelitian terdahulu mengenai sistem proteksi differensial pada transformator daya yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya dan dapat menjadi dasar dari penelitian yang dilakukan. Beberapa penelitian mengenai sistem proteksi differensial pada transformator daya diantaranya adalah sebagai berikut:

Yuniarto, Arkhan Subari, dan Dinda Hapsari Kusumasturi (2015) dari Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro melakukan penelitian yang berjudul "*Setting Rele Differensial Pada Gardu Induk Kaliwungu Guna Menghindari Kegagalan Proteksi*". Penelitian ini membahas sistem proteksi differensial transformator dengan kapasitas 20 MVA dengan perhitungan matematis nilai *Error Mismatch* pada sisi 150 kV dan 20 kV sebesar 1.129% dan 0.721%. Hasil perhitungan *Error Mismatch* tersebut masih dibawah standar IEC-60044-1 yaitu 5%. Rele differensial yang digunakan pada penelitian ini adalah rele differensial analog BBC 202 dengan rasio CT pada sisi 150 kV adalah 75/1 Ampere dan sisi 20 kV adalah 150/1 Ampere[4].

Era Primawati (2019) melakukan penelitian dengan judul "*Analisa Pengaturan Rele Differensial Pada Trafo III 60 MVA di Gardu Induk Banyudono 150 kV/22 kV*". Penelitian ini membahas tentang sistem proteksi differensial transformator daya dengan kapasitas 60 MVA. Pada penelitian ini rasio CT yang terpasang di sisi primer adalah 300/1 Ampere dan di sisi sekunder adalah 75/1 Ampere. Ketika dilakukan perhitungan arus differensial diperoleh nilai arus 0.018 Ampere dengan nilai *slope 1* sebesar 2,31% dan *slope 2* sebesar 4.63%. Selanjutnya dilakukan simulasi gangguan hubung singkat dengan *software Etap 12.6*. Pada hasil simulasi gangguan hubung singkat sisi 22 kV dengan arus gangguan sebesar 1.963 kA terbaca nilai arus differensial 0.213 Ampere. Nilai tersebut masih dibawah *setting* terpasang pada rele yaitu 0.4 Ampere sehingga rele differensial tidak bekerja[5].

Ulul Fauzani Rohman (2017) yang berjudul "*Analisis Rele Proteksi Differensial Pada Trafo Gardu Induk Konsumen Tegangan Tinggi di Gardu Induk Semen Merah Putih Rembang*". Pada penelitian tersebut objek yang diteliti adalah sistem proteksi differensial pada transformator daya II 20 MVA dengan rasio CT sisi 150 kV adalah 80/1 Ampere sedangkan pada sisi 22 kV adalah 800/1 Ampere. Setelah dilakukan perhitungan matematis diperoleh nilai diperoleh nilai arus differensial sebesar 0.31 Ampere, nilai *slope 1* sebesar 38%, nilai *slope 2* sebesar 76% dan nilai arus *setting* adalah 0.305 Ampere. Pada saat dilakukan simulasi gangguan hubung singkat sisi 22 kV dengan arus gangguan sebesar 4500 Ampere, rele differensial membaca arus sebesar 7.69 Ampere dan memerintahkan CB untuk bekerja[6].

Irine Kartika (2016) dengan judul "*Penerapan Rele differensial Di Transformator 30 MVA*". Pada penelitian tersebut objek yang diteliti adalah transformator daya 30 MVA, dengan tegangan kerja transformator 70/20 kV. Untuk sisi tegangan primer arus nominal dalam perhitungan adalah sebesar 247,435 Ampere sehingga CT yang dipilih di sisi primer adalah 250 Ampere, Untuk sisi tegangan sekunder arus nominal dalam perhitungan adalah sebesar 866.025 Ampere sehingga CT yang dipilih adalah 900 Ampere, pada saat terjadi gangguan internal dengan nilai arus differensial sebesar 1.786 Ampere, rele memerintahkan CB untuk beroperasi karena nilai arus differensial lebih besar daripada nilai *setting* yaitu 0.223 A[7].

Muhammad Irsyam dengan judul "*Analisa Trouble Differensial rele Terhadap Trip CB (Circuit Breaker) 150 kV Transformator 30 MVA PLTGU Panaran*". Penelitian ini membahas proteksi differensial transformator daya pada PLTGU panaran dengan kapasitas 30 MVA dengan tegangan kerja 150/11kV. Pada penelitian ini CT yang digunakan pada bay trafo adalah 150/1 Ampere pada sisi HV dan 2000/1 Ampere pada sisi LV. Setelah dilakukan perhitungan matematis diperoleh nilai arus differensial sebesar 0.0175 Ampere dengan *setting slope 1* sebesar 19.26% dan *slope 2* sebesar 38.53%. Pada penelitian tersebut dilakukan analisa gangguan eksternal yang menyebabkan rele differensial bekerja. Dalam kondisi normal rele differensial tidak boleh bekerja apabila gangguan

terjadi bukan dari zona proteksi rele tersebut. Setelah dilakukan analisa, ditemukan polaritas yang terbalik pada sekunder CT phasa S[8].

Berdasarkan kajian terkait yang telah dipaparkan diatas, perbedaan pada penelitian ini terdapat pada jenis rele yang diteliti, rumus perhitungan, dan metode analisa nilai *setting* rele terpasang dilakukan dengan kurva karakteristik yang disimulasikan pada titik gangguan di dalam zona proteksi rele dan diluar zona proteksi rele dengan program aplikasi Microsoft Excel. Berikut ini adalah perbedaan penelitian terkait dengan analisa pengaturan proteksi rele differensial transformator daya II Gardu Induk Kota Baru:

Tabel 2.1 Perbedaan Penelitian Terkait

No	Penulis	Judul	Keterangan
1.	Yuniarto, Arkhan Subari, dan Dinda Hapsari Kusumasturi (2015), Universitas diponegoro	<i>Setting</i> Rele Differensial Pada Gardu Induk Kaliwungu Guna Menghindari Kegagalan Proteksi	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kapasitas Trafo yang diteliti 20 MVA. 2. Rasio CT yang diteliti pada sisi tegangan tinggi adalah 75/1 ampere, pada tegangan menengah 150/1 ampere. 3. Jenis rele differensial yang diteliti adalah rele analog dengan type BBC202. 4. Analisa yang dilakukan tidak menggunakan kurva karakteristik rele differensial.
2.	Era Primawati (2019), Universitas Muhammadiyah Surakarta	Analisa Pengaturan Rele Differensial Pada Trafo III 60 MVA di Gardu Induk Banyudono	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kapasitas Trafo yang diteliti 60 MVA 2. Rasio CT yang diteliti pada sisi tegangan tinggi adalah 75/1 ampere, pada tegangan menengah 300/1

No	Penulis	Judul	Keterangan
		150KV/22KV	<p>ampere.</p> <p>3. Tegangan kerja trafo daya adalah 150 KV/22KV.</p> <p>4. Analisa yang dilakukan tidak menggunakan kurva karakteristik rele differensial.</p>
3.	Ulul Fauzani Rohman (2017), Universitas Muhammadiyah Surakarta.	Analisis Rele Proteksi Differensial Pada Trafo Gardu Induk Konsumen Tegangan Tinggi di Gardu Induk Semen Merah Putih Rembang	<p>1. Kapasitas Trafo yang diteliti 20 MVA</p> <p>2. Rasio CT yang diteliti pada sisi tegangan tinggi adalah 80/1 ampere, pada tegangan menengah 800/1 ampere.</p> <p>3. Tegangan kerja trafo daya adalah 150 KV/22KV.</p> <p>4. Analisa yang dilakukan tidak menggunakan kurva karakteristik rele differensial.</p>
4.	Irine Kartika (2016), Universitas PGRI Palembang.	Penerapan Rele differensial Di Transformator 30 MVA	<p>1. CT yang diteliti pada penelitian tersebut adalah 250 Ampere disisi primer dan 900 Ampere disisi sekunder. CT tersebut mendekati nilai arus nominal trafo.</p> <p>2. Analisa yang dilakukan tidak menggunakan kurva karakteristik rele differensial.</p>

No	Penulis	Judul	Keterangan
5.	Muhammad Irsyam (2016), Universitas Riau Kepulauan.	Analisa Trouble Differensial rele Terhadap Trip CB (Circuit Breaker) 150 kV Transformator 30 MVA PLTGU Panaran.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sistem proteksi yang diteliti adalah sistem proteksi differensial pada transformator PLTGU. 2. Tegangan Kerja Transformator yang diteliti pada penelitian tersebut adalah 150/11 kV. 3. Pada penelitian tersebut CT yang diteliti pada sisi primer adalah 150/1 Ampere dan sisi sekunder adalah 2000/1 Ampere. 4. Penelitian tersebut menganalisa kinerja rele differensial pada gangguan yang disebabkan oleh kesalahan <i>wiring</i> polaritas CT. 5. Analisa yang dilakukan tidak menggunakan kurva karakteristik rele differensial.
6.	Nanang Prasetyo	Analisa Pengaturan Proteksi Rele Differensial Transformator Daya II Gardu	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tegangan kerja trafo daya adalah 150/20 kV. 2. Rasio CT yang diteliti adalah 300/5 Ampere disisi primer dan 1000/5 Ampere disisi Sekunder,

No	Penulis	Judul	Keterangan
		Induk Kota Baru	<p>beberapa kajian terkait meneliti sistem proteksi differensial dengan CT yang mendekati nilai arus nominal trafo daya. Pada penelitian ini nilai rasio CT tidak mendekati arus nominal trafo daya sisi primer yaitu 115.470 Ampere.</p> <p>3. Rele differensial yang digunakan pada penelitian ini adalah rele differensial Siemens Siprotec 7UT163. Rele ini bekerja berdasarkan persentase arus.</p> <p>4. Analisa dan simulasi menggunakan kurva karakteristik rele differensial pada program aplikasi Microsoft Excel.</p>

2.2 Gardu Induk

Gardu Induk Adalah gardu listrik yang mendapatkan daya dari satuan transmisi atau sub-transmisi suatu sistem tenaga listrik untuk kemudian mengalirkannya ke daerah beban (industri, kota dan sebagainya) melalui saluran distribusi primer. Berikut ini adalah beberapa fungsi gardu induk:

1. Mengubah tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ke tegangan tinggi yang lainnya atau tegangan menengah.

2. Sebagai tempat melakukan pengukuran, pengawasan, operasi serta pengaturan pengamanan sistem tenaga listrik.
3. Sebagai tempat pengaturan daya ke gardu induk lain melalui tegangan tinggi dan gardu distribusi melalui gawai tegangan menengah.



Gambar 2.1. Gardu Induk 150 kV.

Sumber Gambar: www.scadaku.wordpress.com

2.3 Transformator Daya

Transformator bekerja dengan menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum Ampere dan induksi Faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet /fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi. Arus AC yang mengalir pada belitan primer membangkitkan *flux* magnet yang mengalir melalui inti besi yang terdapat diantara dua belitan, *flux* magnet tersebut menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial /tegangan induksi[8].

Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan jantung dari transmisi dan distribusi. Berdasarkan tegangan operasinya transformator daya dapat dibedakan menjadi transformator 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut Interbus Transformator (IBT). Transformator 150/20 kV dan 70/20 kV biasa disebut dengan transformator distribusi. Titik netral Transformator diketanahkan sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan / proteksi, sebagai contoh Transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan Transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan atau

langsung di sisi netral 20 kV. Berikut ini adalah trafo daya 150/20 kV yang ada di Gardu Induk:



Gambar 2.2. Transformator Daya II di gardu induk Kota Baru.
Sumber Gambar: Trafo daya II GI Kota Baru.

2.3.1. Peralatan Utama Transformator Daya

Berikut ini adalah peralatan utama pada trafo daya:

1. Inti Besi

Inti besi (core) berfungsi untuk mempermudah jalan fluks, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang diisolasi untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus pusar atau eddy current.

2. Kumparan Transformator

Kumparan terdiri dari tembaga ataupun aluminium berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak-balik mengalir pada kumparan tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan fluks magnetik.

3. Bushing

Bushing yaitu sebuah isolator yang menyelubungi konduktor dari dalam transformator yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan *tangki* transformator. Pada bushing dilengkapi fasilitas untuk pengujian untuk mengetahui kondisi bushing yang disebut center tap.

4. Tangki Transformator

Tangki transformator berfungsi sebagai tempat diletakkannya belitan dan tempat minyak transformator, tangki transformator terhubung dengan radiator. Radiator merupakan sirip-sirip yang berada mengelilingi transformator, dan

berfungsi untuk media pendingin pada transformator, dengan konstruksi yang berupa sirip-sirip dapat meradiasikan panas yang terdapat pada minyak transformator dan untuk menyalurkan panas dari minyak transformator ke udara.

2.3.2. Peralatan Bantu Transformator Daya

Berikut ini adalah peralatan bantu yang ada pada trafo daya:

1. Pendingin

Suatu sistem peralatan yang digunakan untuk mendinginkan transformator. Kebanyakan peralatan pendingin transformator menggunakan udara dan minyak.

2. Tap Changer

Tap Changer adalah peralatan yang digunakan untuk mengatur tegangan pada sisi sekunder yang diinginkan.

3. Alat Pernafasan (*Dehydration Breather*)

Alat pernafasan adalah peralatan yang digunakan untuk menghalangi uap air masuk kedalam transformator dan digunakan untuk mengeluarkan gas ketika terjadi perubahan temperatur minyak dalam transformator.

2.3.3. Sistem Proteksi Transformator Daya

Sistem proteksi pada transformator daya dibuat seefektif mungkin untuk menghindari gangguan internal maupun eksternal yang menyebabkan kegagalan operasi dan kerusakan peralatan. Berikut ini adalah jenis-jenis rele yang terpasang sebagai pengaman transformator tenaga:

1. Rele Mekanik

Rele mekanik adalah rele yang bekerja berdasarkan perubahan fisika yang terjadi pada transformator daya. Berikut ini adalah jenis - jenis rele mekanik:

a. Rele Bucholz dan Jansen

Rele Bucholz adalah sebuah rele mekanik yang berfungsi sebagai proteksi transformator ketika terjadi pelepasan gas dalam jumlah tertentu didalam transformator. Pelepasan gas dapat terjadi karena adanya percikan api yang timbul didalam main tank transformator dan menyebabkan tekanan yang mengerjakan kontak rele Bucholz. Pada rele Bucholz terdapat dua kontak yang bekerja berdasarkan tekanan gas yang terdeteksi, yaitu kontak alarm dan kontak trip pemutus tenaga. Rele Jansen berfungsi sama dengan rele Buchholz hanya saja rele

Jansen terpasang di kompartemen *on load tap changer* dan mempunyai satu kontak yang berfungsi sebagai kontak trip pemutus tenaga.

b. Rele Tekanan Lebih (*sudden pressure relay*)

Rele tekanan lebih atau lebih dikenal rele *sudden pressure* adalah rele mekanik yang memproteksi transformator ketika terjadi tekanan lebih didalam transformator. Tekanan lebih dapat terjadi ketika terjadi ledakan didalam transformator.

c. Pemadam kebakaran

Pemadam kebakaran atau biasa dikenal dengan *fire prevention* biasanya terdapat pada transformator besar seperti pada *interbus transformator 275 kV* dan 500 kV.

d. Rele *thermis*

Rele *thermis* atau rele suhu adalah rele yang bekerja berdasarkan suhu pada transformator. Rele *thermis* terpasang untuk mendeteksi panas belitan transformator dan oli transformator.

2. Rele Elektrik

Rele elektrik adalah rele yang bekerja secara otomatis untuk mengatur rangkaian kontrol yang terhubung dengan pemutus tenaga apabila terjadi perubahan nilai parameter pada transformator daya. Berikut ini adalah beberapa jenis rele elektrik yang terdapat pada transformator daya:

a. Rele Arus lebih

Rele arus lebih atau biasa disebut *over current rele* (OCR) adalah rele yang bekerja untuk melindungi transformator dari gangguan hubung singkat antar fasa.

b. Rele Gangguan Tanah

Rele gangguan tanah atau biasa disebut *ground fault rele* (GFR) adalah rele yang bekerja jika terjadi gangguan fasa terhadap tanah. Prinsip kerja rele ini sama dengan rele arus lebih.

c. Rele Differensial

Rele differensial adalah rele yang bekerja menggunakan hukum Kirchoff dimana jumlah vektor semua arus yang memasuki rangkaian harus nol. Dengan kata lain rele differensial bekerja pada daerah pengamanan transformator daya

dengan cara membandingkan arus masuk dan arus keluar pada sisi primer dan sekunder transformator daya [1].

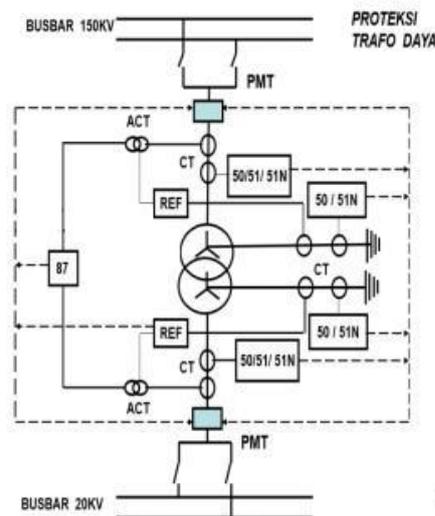
d. Rele *Standby Earth Fault* (SBEF)

Rele ini berfungsi untuk mengamankan NGR (*neutral grounding resistant*) dari kerusakan akibat timbulnya arus hubung singkat atau arus urutan nol yang mengalir ke titik netral transformator secara terus menerus.

e. Rele *Restricted Earth Fault* (REF)

Rele REF merupakan rele yang memiliki fungsi dalam mengamankan transformator bila ada gangguan satu fasa ke tanah yang terjadi di dekat titik netral transformator yang tidak terdeteksi oleh rele differensial.

Perhatikan gambar 2.3. Pada gambar tersebut dapat dilihat skema proteksi rele elektrik pada transformator daya. Kode 50/51N adalah kode untuk rele OCR dan GFR, kode 87 adalah kode untuk rele differensial. Zona Proteksi Rele differensial adalah dari PMT sisi 150 kV sampai dengan PMT sisi 20 kV.



Gambar 2.3. Skema proteksi pada transformator daya[2].

2.4 Transformator Arus

Trafo Arus (*Current Transformer*) atau CT yaitu peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik di sisi primer yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi[9].

Secara umum transformator arus memiliki fungsi untuk mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi. Transformator arus bekerja dengan mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran. Transformator arus memiliki besaran sekunder 1 Ampere dan 5 Ampere.

2.4.1. Jenis Transformator Arus Menurut Kegunaannya

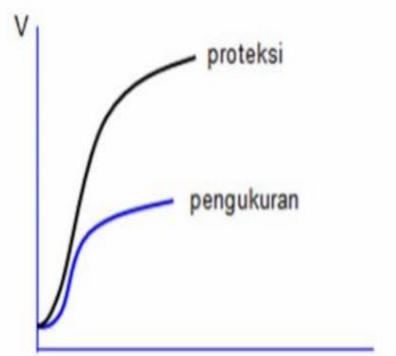
Jenis transformator arus menurut kegunaannya dibedakan menjadi dua yaitu:

1. Trafo arus pengukuran

Trafo arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi. Penggunaan trafo arus pengukuran untuk Ampere meter, Watt meter, dan Cos phi meter[9].

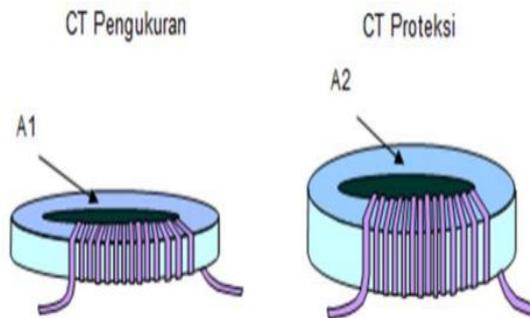
2. Trafo arus proteksi

Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi. Penggunaan trafo arus proteksi untuk rele arus lebih (OCR dan GFR), rele beban lebih, rele diferensial, rele daya dan rele jarak[9]. Perbedaan mendasar trafo arus pengukuran dan proteksi adalah pada titik saturasinya seperti pada gambar kurva saturasi dibawah:



Gambar 2.4. Kurva Kejenuhan CT untuk Pengukuran dan Proteksi[9].

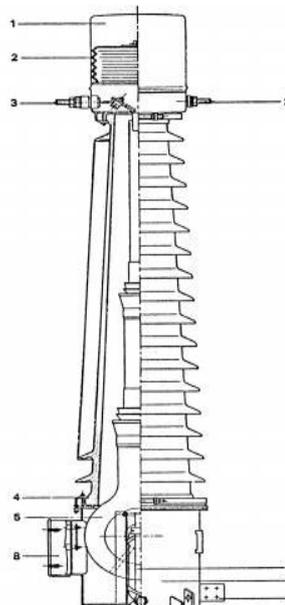
Trafo arus untuk pengukuran dirancang lebih cepat jenuh dibandingkan trafo arus proteksi sehingga konstruksinya mempunyai luas penampang inti yang lebih kecil. Gambar 2.5 adalah perbedaan penampang antara CT pengukuran dan CT proteksi.



Gambar 2.5. Penampang Inti Trafo Arus[9].

2.4.2. Bagian - Bagian Transformator Arus

Pada gambar 2.6 dijelaskan bagian - bagian trafo arus. Trafo arus ini biasanya terpasang di *switchyard* gardu induk. *Trafo arus ini digunakan untuk pengukuran arus tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi serta fungsi proteksi sistem penyaluran tenaga listrik.* Berikut ini adalah komponen trafo arus tipe tangki:



Gambar 2.6. Komponen trafo arus tipe tangki[9].

Komponen Trafo arus tipe tangki meliputi:

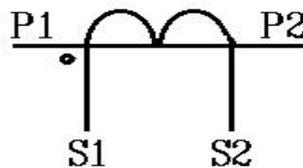
1. Bagian atas Trafo arus (*transformator head*).
2. Peredam pemuaian minyak (*oil resistant expansion bellows*).
3. Terminal utama (*primary terminal*).
4. Penjepit (*clamps*).
5. Inti kumparan dengan lilitan berisolasi utama (*core and coil assembly with primary winding and main insulation*).
6. Inti dengan kumparan sekunder (*core with secondary windings*).
7. Tangki (*tank*).
8. Tempat terminal (*terminal box*).
9. Plat untuk pentanahan (*earthing plate*).

Jenis isolasi pada trafo arus tipe tangki adalah minyak. Trafo arus isolasi minyak banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan.

2.4.3. Konfigurasi Sisi Sekunder Trafo Arus

Berikut ini adalah beberapa konfigurasi sisi sekunder trafo arus:

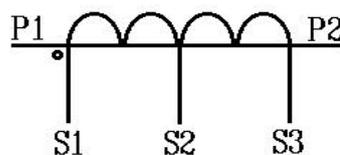
1. Trafo arus tegangan menengah dengan satu sekunder dan rasio tunggal (*Single core single ratio current transformer*).



Gambar 2.7. Belitan CT dengan satu sekunder dan rasio tunggal[10].

Gambar 2.7 diatas merupakan diagram trafo arus yang terdiri dari satu kumparan sekunder dengan rasio tunggal. Terminal sekunder akan memiliki penanda terminal S1 dan S2[10].

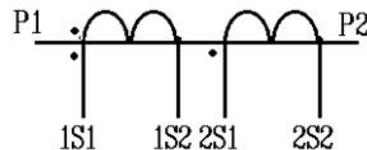
2. Trafo arus tegangan menengah dengan satu sekunder dan rasio ganda (*Single Core Double ratio Current Transformer*).



Gambar 2.8. Belitan CT dengan satu sekunder dan rasio ganda[10].

Terminal sekunder akan memiliki penanda terminal (*marking*) sekunder S1-S2-S3. Apabila sekunder tersebut memiliki lebih dari dua rasio, maka penanda terminal sekundernya menjadi S1-S2-S3-S4 dan seterusnya tergantung dari jumlah rasionya[10].

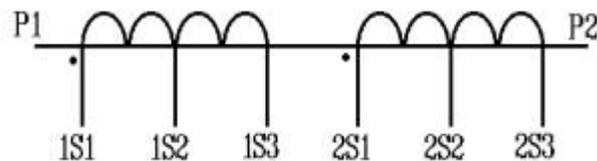
3. Trafo arus tegangan menengah dengan dua sekunder dan rasio tunggal (*Double Core Single rasio Current Transformer*).



Gambar 2.9. Belitan CT dengan dua sekunder dan rasio tunggal[10].

Khusus untuk trafo arus yang memiliki kumparan sekunder lebih dari 1, maka pada setiap sekunder harus diberi nomor urut. Untuk sekunder pertama, maka harus diberi nomor urut 1 di depan penanda terminal S1-S2, nomor 2 untuk sekunder kedua dan seterusnya. Sehingga penanda terminal atau marking sekunder menjadi 1S1-1S2, 2S1-2S2 dan seterusnya[10].

4. Trafo arus tegangan menengah dengan dua sekunder dan rasio ganda (*Double Core Single rasio Current Transformer*).



Gambar 2.10. CT dengan dua sekunder dan rasio ganda[10].

Khusus untuk trafo arus yang memiliki kumparan sekunder lebih dari 1, maka pada setiap sekunder harus diberi nomor urut. Untuk sekunder pertama, maka harus diberi nomor urut 1 di depan penanda terminal S1-S2, nomor 2 untuk sekunder kedua dan seterusnya. Sehingga penanda terminal sekunder menjadi 1S1-1S2, 2S1-2S2 dan seterusnya[10].

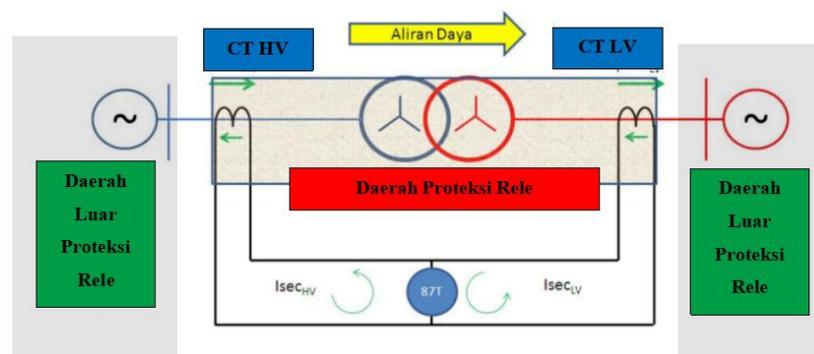
2.5 Sistem Proteksi

Sistem proteksi bertujuan untuk mengidentifikasi gangguan dan memisahkan bagian yang terganggu dari bagian lain yang masih sehat, sekaligus mengamankan bagian yang masih sehat dari kerusakan atau kerugian yang lebih besar. Sistem proteksi terdiri dari rele proteksi, Transformator arus (CT) dan atau

transformator tegangan (PT/CVT), pemutus tenaga (PMT), catu daya yang terintegrasi dalam suatu rangkaian. Untuk efektifitas dan efisiensi, maka setiap peralatan proteksi yang dipasang harus disesuaikan dengan kebutuhan untuk ketahanan peralatan yang dilindungi sehingga peralatan proteksi digunakan sebagai jaminan pengaman peralatan penyaluran tenaga listrik [12].

2.5.1. Rele Differensial Transformator Daya

Rele differensial adalah rele utama pengaman transformator daya. Prinsip dasar rele ini bekerja berdasarkan hukum Kirchoff dimana arus masuk sama dengan arus yang keluar. Parameter input rele differensial diperoleh dari CT sisi tegangan tinggi dan CT sisi tegangan rendah. Rele tersebut bekerja dengan membandingkan arus masuk dan arus keluar yang mengalir pada objek yang dilindungi. Berikut ini adalah zona proteksi rele differensial pada trafo daya:



Gambar 2.11. Zona proteksi rele differensial transformator daya[2].

Perhatikan gambar 2.11 diatas, zona proteksi rele differensial pada transformator daya dimulai dari sisi CT tegangan tinggi (*HV*) di *Switchyard* sampai sisi trafo arus tegangan rendah (*LV*) yang biasanya terletak dalam lemari kubikel.

2..5.2. Setting Rele Differensial

Rele differensial mempunyai beberapa syarat yang harus dipenuhi sebagai pengaman, diantaranya CT yang digunakan harus mempunyai rasio perbandingan yang sama, Sambungan dan polaritas CT sama, dan karakteristik kejenuhan CT_1 dan CT_2 juga harus sama. Untuk itu perlu dilakukan *setting* rele differensial dengan perhitungan pemilihan CT, *setting* rele differensial dan *Error Mismatch* [4].

Pada sistem proteksi differensial transformator daya II gardu induk Kota Baru rele differensial yang digunakan adalah rele Siemens Siprotec 7UT613. Rele differensial Siemens Siprotec 7UT613 adalah jenis rele bias dengan algoritma perlindungan berbasis perangkat lunak untuk mendeteksi gangguan penyaluran tenaga listrik. Rele ini juga bisa digunakan untuk keperluan monitoring sistem scada. Rele differensial Siemens tipe 7UT613 merupakan rele yang dapat mengkondisikan sinyal yang diukur, yaitu konversi arus sesuai dengan grup koneksi transformator daya[3].



Gambar 2.12. Rele Siemens Siprotec 7UT613[3].

Rele 7UT613 mempunyai kestabilan arus yang baik sehingga dapat memerintahkan *circuit breaker* untuk trip seketika, serta dapat digunakan untuk arus pengenal rasio yang berbeda[3]. Berikut ini adalah langkah - langkah untuk menentukan *setting* proteksi differensial trafo daya:

1. Menghitung Arus nominal Trafo Daya (I_n)

Arus nominal (I_n) trafo daya digunakan untuk menentukan besar rasio CT yang digunakan. Berikut ini adalah persamaan untuk menentukan arus nominal (I_n) trafo daya[4]:

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

Keterangan:

I_n : Arus Nominal Trafo Daya (Ampere)

S : Daya Semu Trafo Daya (VA)

V : Tegangan (V)

2. Menghitung Arus *Rating* (I_{rating})

Arus *rating* digunakan untuk menentukan besar rasio CT yang digunakan.

Berikut ini adalah persamaan untuk mencari arus *rating*[4]:

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

Keterangan:

I_{rating} : Arus Rating (Ampere)

I_n : Arus Nominal Trafo Daya (Ampere)

3. Menghitung *Error Mismatch*

Error Mismatch dapat ditentukan dengan membandingkan rasio CT ideal dengan yang ada dipasaran, dengan pertimbangan tidak melebihi 5% dari besar rasio CT yang dipilih. Sebelum mencari *Error Mismatch* harus diketahui nilai CT ideal. Berikut ini adalah persamaan untuk menentukan CT Ideal:

Mencari nilai CT 150 kV yang ideal ($CT_{1 ideal}$)[4] :

$$CT_{1 ideal} = CT_2 \times \frac{V_2}{V_1} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

$CT_{1 ideal}$: Trafo arus ideal sisi 150 kV (Ampere)

V_1 : Tegangan sisi Primer (kV)

V_2 : Tegangan sisi Sekunder (kV)

Mencari nilai CT 20 kV yang ideal ($CT_{2 ideal}$) :

$$CT_{2 ideal} = CT_1 \times \frac{V_1}{V_2} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan:

$CT_{2 ideal}$: Trafo arus ideal sisi 20 kV (Ampere)

V_1 : Tegangan sisi Primer (kV)

V_2 : Tegangan sisi Sekunder (kV)

Mencari nilai *Error Mismatch* CT_1 :

$$Error\ Mismatch\ CT_1 = \frac{CT_{1 ideal}}{CT_{1 terpasang}} \% \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

$CT_{1 ideal}$: Trafo arus ideal sisi 150 kV (Ampere)

$CT_{1 terpasang}$: Trafo arus terpasang sisi 150 kV (Ampere)

Mencari nilai *Error Mismatch* CT_2 :

$$Error\ Mismatch\ CT_2 = \frac{CT_{2 ideal}}{CT_{2 terpasang}} \% \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan:

$CT_2\ ideal$: Trafo arus ideal sisi 20 kV (Ampere)

$CT_2\ terpasang$: Trafo arus terpasang sisi 20 kV (Ampere)

4. Menghitung Arus Nominal Sekunder CT ($I_{n\ CT}$)[4]

Mencari arus nominal CT pada sisi 150 kV ($I_{n\ CT1}$):

$$I_{n\ CT1} = \frac{1}{Rasio\ CT\ Primer} \times I_{n\ trafo\ primer} \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan:

$I_{n\ CT1}$: Arus nominal CT sisi 150 kV.

$I_{n\ trafo\ primer}$: Arus nominal trafo sisi primer.

Mencari arus nominal CT pada sisi 20 kV ($I_{n\ CT2}$):

$$I_{n\ CT2} = \frac{1}{Rasio\ CT\ Primer} \times I_{n\ trafo\ sekunder} \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan:

$I_{n\ CT2}$: Arus nominal CT sisi 20 kV.

$I_{n\ trafo\ sekunder}$: Arus nominal trafo sisi sekunder.

5. Menghitung Arus Differensial (I_{diff}) dan Arus *Restrained* (I_r)[3].

Pada rele proteksi Siemens Siprotec 7UT613 kalkulasi nilai arus differensial dan arus penahan dibedakan sesuai dengan kondisi operasi trafo daya, diantaranya:

a. Ketika arus mengalir normal tanpa gangguan.

Arus yang di baca rele pada sisi 150 kV (I_1) mengalir ke zona proteksi dan arus yang dibaca rele pada sisi 20 kV (I_2) meninggalkan zona proteksi[3] yang dapat didefinisikan:

$$I_2 = - I_1 \dots \dots \dots (2.9)$$

Sehingga arus differensial (I_{diff}) :

$$I_{diff} = |I_1 - I_2| = |I_1 - (-I_1)| = 0 \dots \dots \dots (2.10)$$

Dan arus penahan (I_r) ketika beroperasi normal :

$$I_r = |I_1| + |I_2| = |I_1| + |-I_1| = 2 \cdot |I_1| \dots \dots \dots (2.11)$$

b. Ketika terjadi hubung singkat dengan arus yang sama pada kedua sisi.

Arus yang di baca rele pada sisi 150 kV (I_1) sama dengan arus yang dibaca rele pada sisi 20 kV (I_2) ataupun sebaliknya, berlaku persamaan[3]:

$$I_{diff} = |I_1| + |I_2| = |I_1| + |I_1| = 2 \cdot |I_1| \dots \dots \dots (2.12)$$

Dan arus penahan (I_r) ketika terjadi gangguan hubung singkat dengan arus yang sama pada kedua sisi:

$$I_r = |I_1| + |I_2| = |I_1| + |I_1| = 2 \cdot |I_1| \dots\dots\dots(2.13)$$

c. Ketika terjadi hubung singkat dengan arus mengalir pada satu sisi.

Berlaku persamaan:

$$I_2 = 0 \dots\dots\dots(2.14)$$

Sehingga:

$$I_{diff} = |I_1 + I_2| = |I_1 + 0| = |I_1| \dots\dots\dots(2.15)$$

Dan arus penahan (I_r) ketika terjadi gangguan hubung singkat dengan arus mengalir pada satu sisi:

$$I_r = |I_1| + |I_2| = |I_1| + 0 = |I_1| \dots\dots\dots(2.16)$$

Keterangan:

- I_{diff} : Arus Diferensial (pu).
- I_1 : Arus yang dibaca rele sisi 150 kV (pu).
- I_2 : Arus yang dibaca rele sisi 20 kV (pu).
- I_r : Arus Penahan (pu).

Karena rele differensial yang digunakan adalah rele bias yang bekerja berdasarkan persentase arus, Untuk menentukan nilai I_1 dan I_2 maka berlaku persamaan sebagai berikut:

$$I_{diff} = I_1 - I_2 \dots\dots\dots(2.17)$$

Keterangan:

- I_{diff} : Arus Diferensial (pu)
- I_1 : Arus yang dibaca rele sisi 150 kV (pu)
- I_2 : Arus yang dibaca rele sisi 20 kV (pu)

Mencari arus yang dibaca rele sisi 150 kV (I_1):

$$I_1 = \frac{I_1'}{In_{CT1}} \dots\dots\dots(2.18)$$

Keterangan:

- I_1 : Arus yang dibaca rele sisi 150 kV (pu)
- I_1' : Arus beban CT 150 kV (Ampere)
- In_{CT1} : Arus nominal CT 150 kV (Ampere)

Mencari arus yang dibaca rele sisi 20 kV (I_2):

$$I_2 = \frac{I_{2'}}{In_{CT2}} \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan:

I_2 : Arus yang dibaca rele sisi 20 kV (pu)

$I_{2'}$: Arus beban CT 20 kV (Ampere)

In_{CT2} : Arus nominal CT 20 kV (Ampere)

Sehingga arus differensial (I_{diff}) pada kondisi normal adalah:

$$I_{diff} = \frac{I_{1'}}{In_{CT1}} - \frac{I_{2'}}{In_{CT2}} \dots\dots\dots(2.20)$$

Keterangan:

I_{diff} : Arus Diferensial (pu)

$I_{1'}$: Arus beban CT 150 kV (Ampere)

$I_{2'}$: Arus beban CT 20 kV (Ampere)

In_{CT1} : Arus nominal CT 150 kV (Ampere)

In_{CT2} : Arus nominal CT 20 kV (Ampere)

Arus nominal CT 150 kV dan 20 kV digunakan sebagai arus dasar (I_{base}).

Pembacaan rele berdasarkan satuan per-unit diperoleh dari arus beban (I') yang mengalir dibagi dengan arus dasar (I_{base}). Dalam hal ini arus dasar yang dipakai adalah arus nominal CT (In_{CT}). Sedangkan untuk mencari nilai arus beban CT 150 kV ($I_{1'}$) dan arus beban CT 20 kV ($I_{2'}$) pada sisi terminal sekunder berlaku persamaan sebagai berikut:

$$I_{1'} = \frac{I_{CT1}}{Rasio\ CT150kV} \dots\dots\dots(2.21)$$

$$I_{2'} = \frac{I_{CT2}}{Rasio\ CT20kV} \dots\dots\dots(2.22)$$

Keterangan:

$I_{1'}$: Arus beban CT 150 kV (Ampere)

$I_{2'}$: Arus beban CT 20 kV (Ampere)

I_{CT1} : Arus primer CT 150 kV (Ampere)

I_{CT2} : Arus primer CT 20 kV (Ampere)

6. Menghitung *Slope*[6].

Slope atau *setting* kecuraman merupakan pembagian nilai arus differensial (I_{diff}) dengan nilai arus restrain (I_r) dan menghasilkan persentase *slope 1* dan *slope 2*. Berikut ini adalah persamaan mencari *slope*:

$$Slope_1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \dots\dots\dots(2.23)$$

$$Slope_2 = \frac{I_d}{I_r} \times 2 \times 100\% \dots\dots\dots(2.24)$$

Keterangan:

$Slope_1$: Setting kecuraman 1 (%)

$Slope_2$: Setting kecuraman 2 (%)

I_d : Arus diferensial (pu)

I_r : Arus penahan (pu)

7. Perhitungan Arus Beban Puncak

Untuk melakukan perhitungan nilai differensial pada saat terjadi beban puncak, maka beban trafo yang termonitor harus diubah kedalam bentuk arus terlebih dahulu dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = V \times I_{CT} \times \cos_{phi} \times \sqrt{3} \dots\dots\dots(2.25)$$

Sehingga mencari nilai arus CT (I_{CT}):

$$I_{CT} = \frac{P}{V \times \cos_{phi} \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.26)$$

Keterangan:

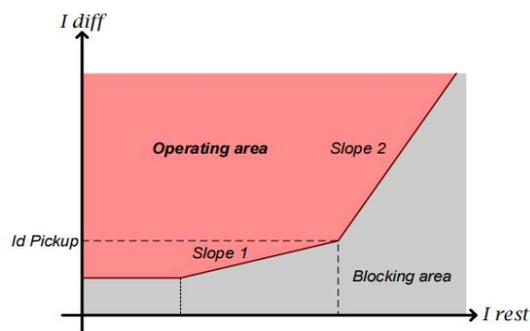
P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I_{CT} = Arus Primer CT (Ampere)

8. Kurva Karakteristik Rele Differensial

Kurva karakteristik differensial diperoleh dengan memasukan parameter nilai setting. Berikut ini adalah kurva karakteristik pada rele differensial:



Gambar 2.13. Kurva Karakteristik rele differensial[2].

Pada gambar 2.13. terdapat parameter pengaturan rele differensial yang dipresentasikan pada suatu kurva karakteristik, antara lain :

a. Arus Differensial (I_{diff})

Pada gambar 2.13 garis Y disimulasikan sebagai arus differensial. Arus differensial diperoleh dari pengurangan arus pada sisi *HV* dengan arus pada sisi *LV*.

b. Arus Penahan (I_{rest})

Pada gambar 2.13 garis X disimulasikan sebagai arus penahan. Beberapa pabrikan mempunyai formula tersendiri dalam menentukan besaran untuk arus *restraint*[2].

Formula pabrikan Alstom, ABB, Toshiba, GE adalah :

$$I_r = \frac{I_{Hv} + I_{Lv}}{2} \dots \dots \dots (2.27)$$

Untuk pabrikan Siemens menggunakan :

$$I_r = I_{Hv} + I_{Lv} \dots \dots \dots (2.28)$$

c. *Slope 1*

Slope 1 adalah *setting* kecuraman 1 yang diperoleh dari pembagian nilai arus differensial (I_{diff}) dengan nilai arus restrain (I_{rest}) .

d. *Slope 2*

Slope 2 adalah *setting* kecuraman 2 yang diperoleh dari pembagian nilai arus differensial (I_{diff}) dengan nilai arus *restrain* (I_{rest}) dikali dua.

e. *Operating Area*

Operating Area adalah daerah rele differensial akan bekerja. Jika kalkulasi nilai arus differensial dan arus penahan berada dititik *operating area*, maka rele akan memerintahkan *circuit breaker* untuk bekerja.

f. *Blocking Area*

Blocking area adalah daerah rele differensial tidak bekerja. Jika kalkulasi nilai arus differensial dan arus penahan berada di titik *blocking area*, maka rele tidak akan bekerja. Besar nilai arus differensial dan arus penahan dapat berubah - ubah sesuai dengan besar nilai arus gangguan dan lokasi gangguan trafo daya.

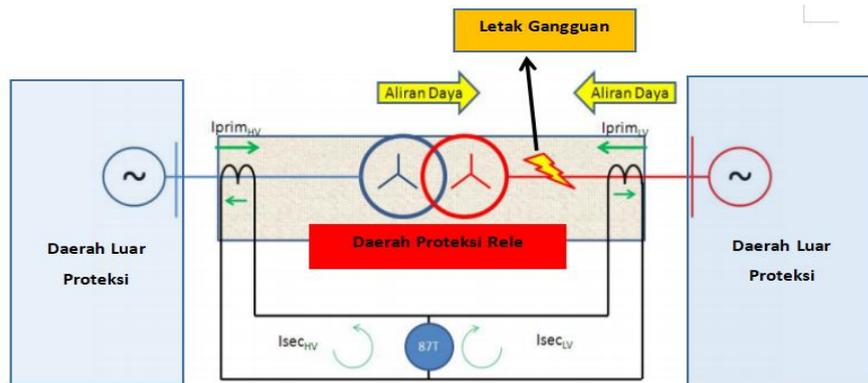
2.6 Gangguan Transformator Daya

Berikut ini adalah macam - macam gangguan trafo daya:

2.6.1. Gangguan Internal

Gangguan internal adalah gangguan yang terjadi di wilayah trafo daya itu sendiri, gangguan ini biasanya mengakibatkan kerusakan trafo daya. Dalam sistem

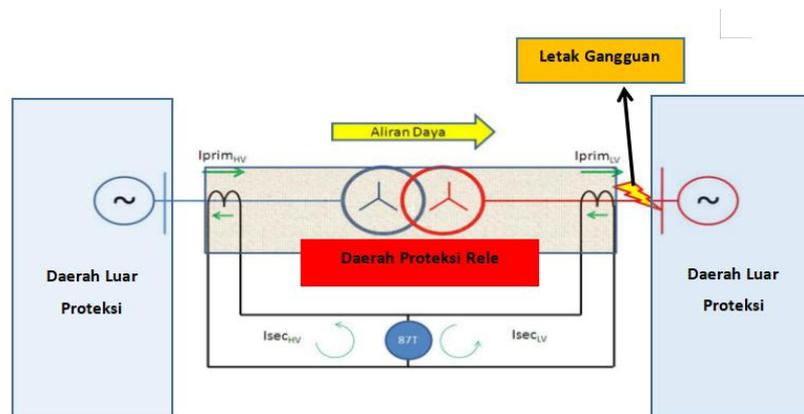
proteksi differensial sendiri daerah pengamanan rele berada diantara titik CT 150 kV sampai dengan CT 20 kV. Apabila terjadi gangguan hubung singkat di dalam daerah pengamanan tersebut rele differensial harus segera memerintahkan *circuit breaker* untuk *trip*. Perhatikan gambar 2.12 dibawah ini, ketika terjadi gangguan internal, aliran daya pada CT sisi LV berubah sehingga rele mendeteksi bahwa nilai arus masuk tidak sama dengan nilai arus yang keluar.



Gambar 2.14. Gangguan internal pada zona proteksi rele differensial[3].

2.6.2. Gangguan Eksternal

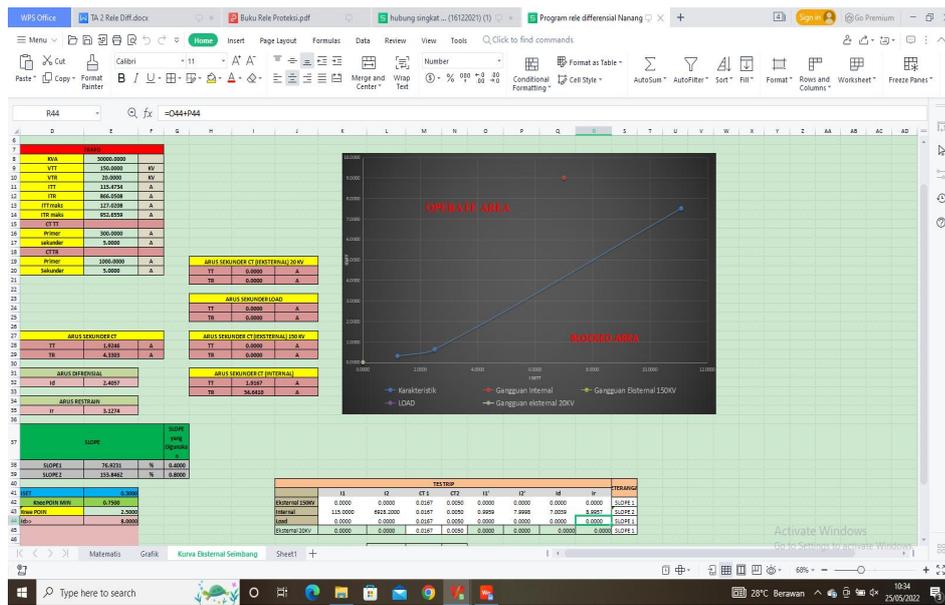
Gangguan eksternal adalah gangguan yang terjadi diluar zona pengamanan rele differensial seperti pada penyulang, busbar 150 kV dan 20 kV, overload beban dan sebagainya. Ketika terjadi gangguan hubung singkat diluar daerah pengamanan rele differensial seharusnya rele tersebut tidak memerintahkan circuit breaker untuk bekerja meskipun nilai gangguan melebihi nilai arus nominal trafo daya. Perhatikan gambar 2.13, ketika terjadi gangguan eksternal aliran daya yang mengalir pada CT sisi HV dan sisi LV tidak berubah dari kondisi normal.



Gambar 2.15. Gangguan eksternal pada zona proteksi rele differensial[3].

2.7. Aplikasi Microsoft Excel

Microsoft Excel adalah sebuah program aplikasi lembar kerja yang memiliki fitur kalkulasi dan pembuatan grafik. Pada penelitian ini Microsoft Excel digunakan untuk menentukan grafik atau kurva karakteristik rele differensial. Dari kurva tersebut dapat diketahui letak titik gangguan internal dan eksternal yang dapat mempresentasikan kinerja dari rele tersebut. Kurva tersebut juga dapat digunakan untuk melihat kinerja rele terhadap beban trafo daya.



Gambar 2.16 Penggunaan Aplikasi Microsoft Excel Untuk Simulasi Proteksi Differential Terhadap Gangguan Trafo Daya.
Sumber Gambar: Dokumentasi Pribadi