

PENGGUNAAN RELE DIFERENSIAL SEBAGAI PROTEKSI GANGGUAN TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA DI GARDU INDUK LANGSA

Miftahul Ima, Ezwarsyah, Salahuddin, Andik Bintoro, Asri

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh Lhokseumawe, Muara Satu, Aceh Utara, Aceh, Indonesia
E-mail : miftahul.200150118@mhs.unimal.ac.id

Abstrak— Salah satu perangkat proteksi yang dipasang pada transformator daya adalah rele diferensial. Rele diferensial berfungsi sebagai pengaman pada transformator yang bertujuan untuk mencegah kegagalan proteksi dan meningkatkan kualitas operasional dari sistem transmisi. Pada penelitian ini menggunakan data di Gardu Induk Langsa, data tersebut dihitung secara matematis untuk menentukan rasio *current transformer*, *error mismatch*, dan parameter-parameter rele diferensial saat kondisi normal dan saat kondisi gangguan. Rasio CT yang terpasang pada trafo di sisi tegangan primer 150 kV adalah 300:1 A, sementara pada sisi tegangan sekunder 20 kV adalah 2000:1 A. Pemilihan rasio tersebut didasarkan pada perhitungan arus rating, yaitu 254,034 A untuk sisi tegangan primer 150 kV dan 1905,256 A untuk sisi tegangan sekunder 20 kV. Hasil dari simulasi rele diferensial yaitu rele diferensial dapat bekerja apabila arus diferensial lebih besar dari arus setting maka rele diferensial akan bekerja secara optimal dengan memerintahkan *Circuit Breaker* (CB) untuk trip. Arus setting yang didapat dari hasil perhitungan yaitu 0,1159 A dari 0,3 A yang diset pada rele dan diharapkan dengan setting tersebut sistem proteksi transformator dapat bekerja dengan optimal.

Kata Kunci : *Transformator Daya, Proteksi, Rele Diferensial*

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan penyaluran listrik yang andal telah mendorong upaya untuk meningkatkan efisiensi sistem proteksi dalam infrastruktur tenaga listrik. Komponen-komponen utama dalam sistem penyaluran tenaga listrik meliputi pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Karena seringkali terdapat jarak yang signifikan antara pembangkit dan konsumen, penggunaan transformator daya menjadi krusial. Transformator berperan dalam mengatur tegangan listrik untuk mengurangi kerugian daya selama proses penyaluran. Namun, penggunaan transformator sering ada gangguan yang dapat mengganggu kinerjanya. Untuk mengatasi gangguan dibutuhkan sistem proteksi yang handal dan setting yang tepat untuk memastikan transformator dapat beroperasi dengan lancar dalam sistem tenaga listrik[1]

Perlindungan transformator sangat penting untuk mencegah kerusakan akibat gangguan hubung singkat. Salah satu metode perlindungan yang digunakan adalah penggunaan relai diferensial, yang memantau perbedaan arus antara sisi primer dan sekunder transformator. Relai

diferensial berperan sebagai alat pengaman yang sangat responsif terhadap gangguan arus, dengan tujuan untuk mengatasi kerusakan pada transformator secepat mungkin.

Saat kondisi berjalan normal, aliran arus melalui peralatan listrik yang dilindungi membentuk lingkaran pada kedua sisi transformator. Namun, jika terjadi gangguan di dalam wilayah kerja rele diferensial, perbedaan arus antara kedua sisi akan dihitung, dan jika perbedaan ini signifikan, relai akan memberikan perintah kepada pemutus sirkuit (*circuit breaker*) untuk memutus aliran arus, mengaktifkan perlindungan transformator[2].

Pada Gardu Induk (GI) Langsa, yang merupakan titik awal dalam penyaluran tenaga listrik di wilayah Kota Langsa, dilengkapi dengan dua transformator daya, yaitu satu dengan kapasitas 60 MVA dan yang lainnya dengan kapasitas 30 MVA. Salah satu sistem proteksi yang digunakan pada transformator daya di gardu induk Langsa tersebut adalah rele diferensial.

II. DASAR TEORI

a. Transformator Daya

Transformator daya merupakan suatu perangkat listrik yang digunakan untuk mentransfer daya dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya dengan mengubah tegangan tanpa mempengaruhi frekuensi. Secara sederhana, transformator terdiri dari kumparan dan induktansi timbal balik. Kumparan primer menerima daya, sedangkan kumparan sekunder terhubung ke arah beban. Kumparan-kumparan ini biasanya dililit pada inti yang terbuat dari bahan magnetik laminasi[2].

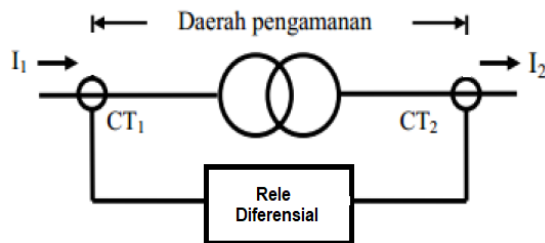
Untuk mengatasi peningkatan beban yang terjadi, diperlukan peningkatan kapasitas transformator distribusi. Proses peningkatan kapasitas transformator dapat berdampak pada keandalan sistem tenaga listrik, yang pada akhirnya memengaruhi kinerja sistem proteksi tenaga listrik[4].

Gangguan yang terjadi pada transformator daya dapat terjadi di dalam transformator atau di dalam daerah pengamanan utama transformator tetapi juga ada gangguan di luar daerah pengamanan transformator. Gangguan di luar daerah pengamanan transformator daya dapat merupakan beban lebih, hubungan singkat fasa ke tanah maupun gangguan antar fasa. Untuk kondisi gangguan di luar daerahnya maka digunakan rele arus lebih dengan perlambatan waktu. Gangguan di dalam transformator dapat terjadi karena diakibatkan gangguan satu fasa atau antar fasa

pada sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah di terminal luar, hubung singkat antar lilitan di sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah, gangguan tanah pada lilitan tersier atau hubung singkat antar belitan di lilitan tersier.

b. Proteksi Rele Diferensial

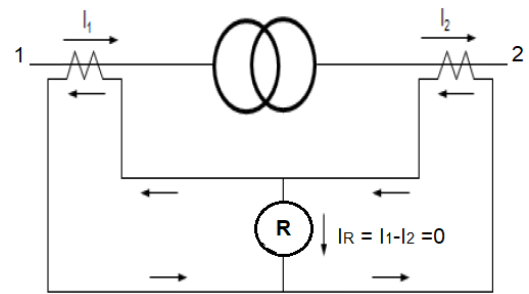
Salah satu perangkat pelindung yang diterapkan dalam sistem tenaga listrik adalah rele proteksi diferensial. Rele diferensial beroperasi dengan prinsip keseimbangan, membandingkan arus sekunder dari transformator arus (CT) yang terhubung ke terminal peralatan atau instalasi listrik yang ingin dilindungi. Fungsinya meliputi perlindungan peralatan seperti generator, transformator daya, busbar, dan saluran transmisi. Relai ini memiliki responsivitas tinggi dan selektivitas karena membandingkan arus pada kedua sisi saluran melalui transformator arus sebagai perantara[5]. Gambar 1. memperlihatkan prinsip dasar kerja rele diferensial sebagai proteksi utama suatu transformator daya, dari gambar tersebut mengamankan gangguan yang terjadi pada bagian internal transformator.



Gambar 1. Rele Diferensial

Fungsi proteksi rele diferensial merupakan alat pengaman utama pada transformator daya, fungsinya adalah mengamankan transformator dari gangguan hubung singkat yang terjadi di dalam transformator yaitu hubung singkat antara kumparan dengan kumparan atau antara kumparan dengan tangki, rele diferensial arus membandingkan arus yang melalui daerah pengamanan harus bekerja kalau terjadi gangguan di daerah pengamanan, dan tidak boleh bekerja dalam keadaan normal atau gangguan di luar daerah pengamanan, rele ini merupakan unit pengamanan harus mempunyai selektifitas mutlak.

Prinsip kerja rele diferensial ini adalah dengan cara membandingkan dua besaran arus pada sisi primer dan arus pada sisi sekunder pada transformator arus (CT) serta arus yang masuk ke rele. Kerja rele diferensial ini dibantu oleh dua buah transformator arus (CT) dimana dalam keadaan normal, transformator arus yang pertama dan transformator yang kedua dibuat suatu ratio sedemikian rupa, sehingga arus pada kedua transformator arus tersebut sama besar. Kondisi kerja rele diferensial ini terjadi dalam tiga keadaan, yaitu dalam keadaan normal, keadaan gangguan diluar daerah proteksi dan gangguan didalam daerah proteksi. Gambar 2. memperlihatkan kondisi kerja rele diferensial dalam kondisi normal atau tanpa ada gangguan baik internal transformator maupun dari luar transformator daya.



Gambar 2. Rele Diferensial dalam kondisi normal

III. METODELOGI

Pada penelitian ini akan dianalisa secara perhitungan sistem proteksi diferensial berdasarkan data dari Gardu Induk Langsa dan akan melakukan juga simulasi menggunakan software Etap untuk kondisi gangguan didalam dan diluar daerah proteksi rele diferensial.

a. Data Transformator

Berikut ini data transformator dan setting proteksi rele diferensial existing pada transformator dari Gardu Induk Langsa, Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Data Spesifikasi Transformator Daya

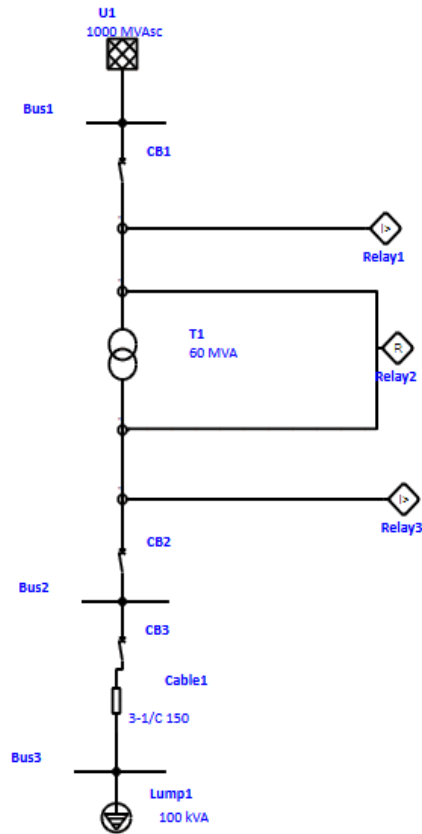
Merek	Siemens
Tipe	7SR1205
Nomor Seri	GF1602500981
Tegangan Sisi Primer	150 KV
Tegangan Sisi Sekunder	20 KV
Frekuensi	50 Hz
Impedansi	12,275 Ohm
Kapasitas Daya	60 MVA

Tabel 2. Data Spesifikasi Setting Rele Diferensial

Merek	Schneider
Tipe	P521
Nomor Seri	36123732/03/12
Arus Setting	0,3
Arus Nominal	1A
Slope 1	30%
Slope 2	70%

b. Perhitungan

Untuk menentukan rasio CT, langkah awalnya adalah melakukan perhitungan arus rating. Arus rating berperan sebagai batas dalam pemilihan rasio CT atau IN. Pada Gambar 3. memperlihatkan diagram segaris dari sistem tenaga listrik pada Gardu Induk Langsa yang akan di analisa perhitungan setting rele diferensial sebagai proteksi transformator daya.



Gambar 3. Single Line Diagram

Perhitungan arus rating menggunakan rumus :

$$I_{rating} = 110\% \times I_{nominal}$$

Dimana :

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

I_n = Arus Nominal (A)

S = Daya pada Transformator (MVA)

V = Tegangan pada sisi primer dan sekunder (KV)

Arus Nominal pada sisi tegangan primer 150 KV

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_p}$$

$$I_n = \frac{60.000.000}{\sqrt{3} \times 150.000}$$

$$I_n = \frac{60.000.000}{259.807,62}$$

$$I_n = 230,940 \text{ A}$$

Arus nominal pada sisi tegangan sekunder 20 KV

$$I_{N2} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_s}$$

$$I_{N2} = \frac{60.000.000}{\sqrt{3} \times 20.000}$$

$$I_{N2} = \frac{60.000.000}{34.641,03}$$

$$I_{N2} = 1732,051 \text{ A}$$

Arus rating di sisi tegangan primer 150 KV

$$I_{rat} = 110\% \times I_{nominal}$$

$$I_{rat} = 110\% \times 230,940 \text{ A}$$

$$I_{rat} = 254,034 \text{ A}$$

Arus rating di sisi tegangan primer 20 KV

$$I_{rat} = 110\% \times I_{nominal}$$

$$I_{rat} = 110\% \times 1732,051 \text{ A}$$

$$I_{rat} = 1905,256 \text{ A}$$

Pada perhitungan arus mismatch dilakukan dengan membandingkan perbandingan antara rasio ideal dari transformator arus (CT) dengan rasio CT yang umum tersedia di pasaran, dengan persyaratan bahwa kesalahan tidak boleh melebihi 5% dari rasio CT yang sudah ditentukan, kemudian dengan menggunakan rumus berikut :

$$Error \text{ Mismatch} = \frac{CT \text{ ideal}}{CT \text{ terpasang}} \%$$

Dimana :

$$\frac{CT2}{CT1} = \frac{V2}{V1}$$

CT (ideal) = Trafo Arus (ideal)

$V1$ = Tegangan pada bagian sisi tinggi

$V2$ = Tegangan pada bagian sisi rendah

Error Mismatch disisi tegangan tinggi 150 KV :

$$CT_1 (ideal) = CT_2 \times \frac{V2}{V1} = \frac{2000}{1} \times \frac{20}{150} = 2000 \times 0,1333 = 266,6 \text{ A}$$

$$Error \text{ Mismatch} = \frac{266,6}{300} \% = 0,886 \%$$

Error Mismatch disisi tegangan rendah 20 KV :

$$CT_2 (ideal) = CT_1 \times \frac{V1}{V2} = \frac{300}{1} \times \frac{150}{20} = 300 \times 7,5 = 2250 \text{ A}$$

$$Error \text{ Mismatch} = \frac{2250}{2000} \% = 1,125 \%$$

Arus sekunder CT merupakan arus yang dikeluarkan CT atau *outgoing*.

$$I_{sekunder} = \frac{1}{rasio \text{ CT}} \times I_n$$

Arus sekunder CT pada sisi tegangan tinggi 150 KV :

$$I_{sekunder} = \frac{1}{300} \times 230,940 \text{ A}$$

$$I_{sekunder} = 0,7698 \text{ A}$$

Arus sekunder CT pada sisi tegangan rendah 20 KV :

$$I_{sekunder} = \frac{1}{2000} \times 1732,051 \text{ A}$$

$$I_{sekunder} = 0,8860 \text{ A}$$

Untuk perhitungan arus diferensial dilakukan dengan menghitung perbedaan arus antara nilai sekunder transformator arus (CT) pada sisi tegangan tinggi dengan nilai arus sekunder CT pada sisi tegangan rendah.

Rumus untuk menentukan arus diferensial yaitu :

$$I_{dif} = I_2 - I_1$$

Dimana :

I_{dif} = Arus Diferensial

I_1 = Arus Sekunder CT1

I_2 = Arus Sekunder CT2

Perhitungan arus diferensial :

$$I_{dif} = 0,8860 - 0,7698$$

$$I_{dif} = 0,1162 \text{ A}$$

Untuk Perhitungan arus *restrain* dilakukan dengan cara menjumlahkan nilai arus sekunder CT1 dan CT2, kemudian hasilnya dibagi 2.

$$I_r = \frac{I1+I2}{2}$$

$$I_r = \frac{0,7689 + 0,8860}{2}$$

$$I_r = 0,8279 \text{ A}$$

Untuk menghitung nilai *setting slope* dapat diperoleh dengan cara membandingkan antara arus diferensial dan arus *restrain*. Adapun *Slope 1* dapat memberikan informasi tentang arus diferensial dan arus *restrain* dalam kondisi normal dan memastikan bahwa rele dapat berfungsi saat terjadi gangguan internal dengan arus gangguan yang kecil. Sementara *slope 2* berfungsi untuk mencegah pelepasan rele saat terjadi gangguan eksternal dengan arus gangguan yang besar.

Perhitungan *Slope 1*

$$Slope 1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\%$$

$$Slope 1 = \frac{0,1162}{0,8279} \times 100\%$$

$$Slope 1 = 14 \%$$

Perhitungan *slope 2*

$$Slope 2 = \left(\frac{I_r}{I_d} \times 2 \right) \times 100\%$$

$$Slope 2 = \left(\frac{0,1162}{0,8279} \times 2 \right) \times 100\%$$

$$Slope 2 = 28 \%$$

Arus setting diperoleh dengan mengalikan nilai *slope* dengan arus *restrain*. Nilai arus setting ini akan dibandingkan dengan arus diferensial selama proses pengoperasian.

$$I_{set} = \% slope \times I_{restrain}$$

$$I_{set} = 14\% \times 0,8279 \text{ A}$$

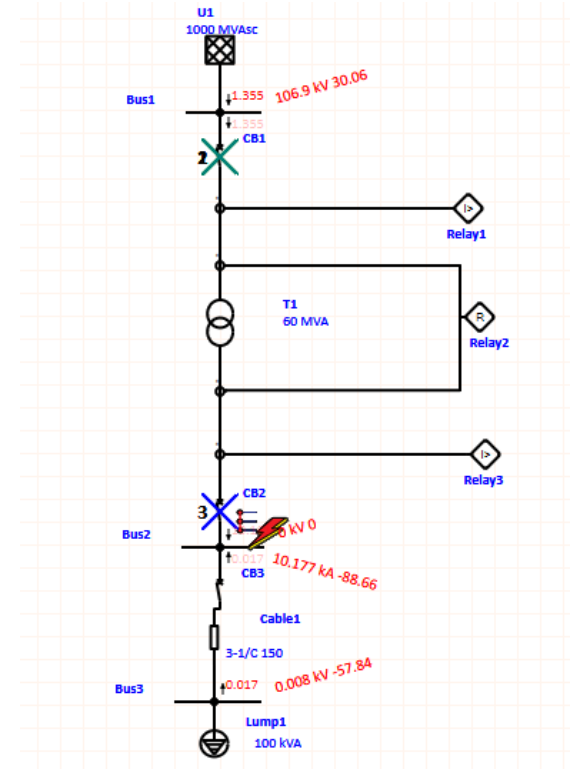
$$I_{set} = 0,14 \times 0,8279 \text{ A}$$

$$I_{set} = 0,1159 \text{ A}$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Kondisi Gangguan *Eksternal*

Pada Gambar 4. diagram segaris sistem menggunakan software yang memberikan gambaran tentang bagaimana sistem merespon dan menanggapi gangguan yang berasal dari faktor *eksternal*, untuk memahami kerja sistem proteksi untuk kehandalan sistem. Simulasi menggunakan Etap Power Station dengan kondisi gangguan yang berasal dari luar daerah pengaman rele diferensial.



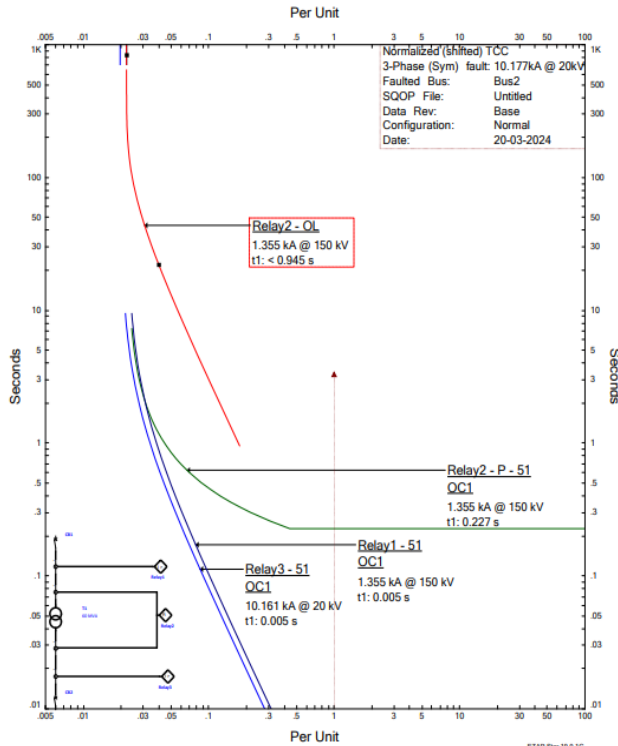
Gambar 4. Diagram segaris simulasi gangguan *Eksternal*

Tabel 5. Waktu operasi rele pada gangguan *Eksternal*

Nama	Arus Gangguan (kA)	Trip CB	Waktu (ms)
Relay 1	1.355	CB 1	65.0
Relay 2	1.355	CB 1	287
Relay 3	10.161	CB 2	105

Dari simulasi yang telah dilakukan, apabila terjadi gangguan pada bus 2 atau diluar daerah pengaman dari rele diferensial, dan ketika terjadi gangguan 3 fasa pada bus 2 maka CB 2 akan bekerja terlebih dahulu lalu setelah itu CB 1 akan bekerja dan terbuka. Pada tabel tersebut dapat dilihat bahwa waktu operasi rele gangguan pada keadaan *eksternal* yang bekerja hanya rele 1 dan rele 3 yang dimana rele tersebut adalah rele *Over Current Relay* (OCR), dan rele 2 adalah rele diferensial. Hal ini menunjukkan bahwa rele 1 mendeteksi adanya gangguan sebesar 1.355 kA yang membutuhkan waktu 65.0 ms untuk membuka CB 1. Pada rele 3 mendeteksi adanya gangguan sebesar 10.161 kA, sehingga membutuhkan waktu 105 ms untuk membuka CB 2. Dalam simulasi ini rele diferensial tidak dapat bekerja karena gangguannya berada di luar daerah pengaman dari rele diferensial.

Pada Gambar 5. menunjukkan kurva koordinasi rele yang bekerja pada sumber gangguan yang terjadi diluar daerah pengamannya atau *eksternal*.



Gambar 5. Kurva koordinasi rele pada gangguan *Eksternal*

Dari kurva tersebut terlihat bahwa pada rele 2, arus gangguan yang terjadi sebesar 1.355 kA, dan waktu yang dibutuhkan rele tersebut untuk membuka CB adalah 0,227 s. Pada rele 3 arus gangguan yang terjadi sebesar 10.161 kA yang membutuhkan waktu untuk membuka CB nya adalah 0,005 s. Pada rele 1 arus gangguan yang terjadi sebesar 1.355 kA, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk membuka CB pada rele 1 sebesar 0,005 s. Dari kurva waktu juga dapat dilihat bahwa rele 3 bekerja lebih dahulu dan kemudian rele 2 dan setelah itu baru rele 1 akan bekerja memproteksi gangguan tersebut.

b. Kondisi Gangguan Internal

Pada Gambar 6. ini memperlihatkan kondisi tentang bagaimana sistem merespons dan menanggapi gangguan yang berasal dari faktor *internal* dalam rangka memahami kinerja keseluruhan dan kehandalan sistem.

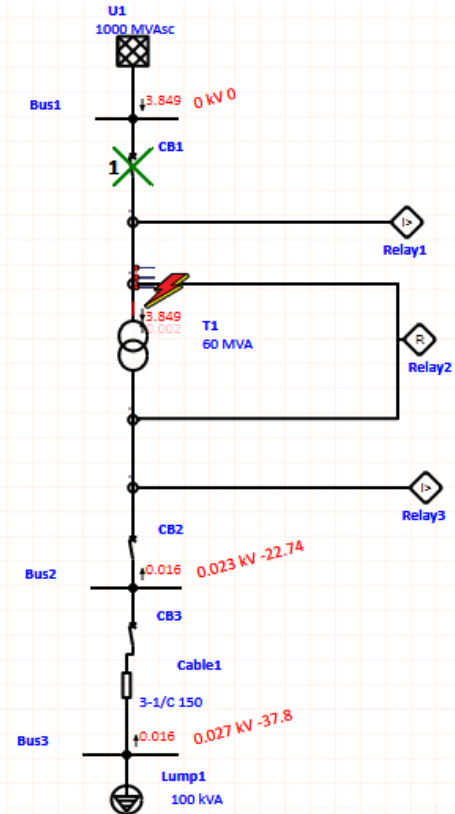
Dibawah ini adalah tabel yang menunjukkan waktu operasi rele yang bekerja pada saat gangguan *internal*.

Tabel 6. Waktu operasi rele pada gangguan *internal*

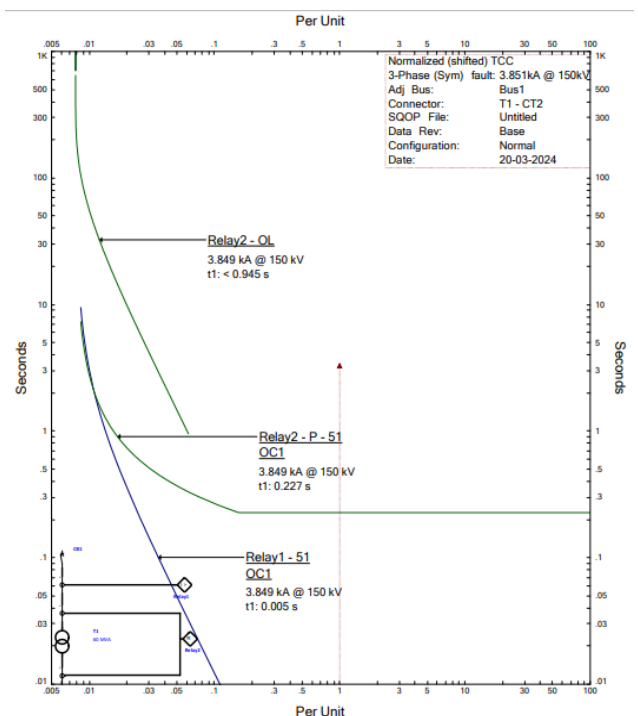
Nama	Arus Gangguan (kA)	Trip CB	Waktu (ms)
Relay 1	3.849	CB 1	65.0
Relay 2	3.849	CB 2	327

Dari simulasi tersebut terlihat bahwa apabila terjadi gangguan di daerah pengaman dari rele diferensial, maka relai diferensial akan aktif hanya saat terdeteksi adanya gangguan di zona internal trafo. Hasil analisis menunjukkan bahwa relai diferensial berdasarkan simulasi pada gambar tersebut adalah relay 2 yang mendeteksi adanya gangguan

sebesar 3.849 kA, dan mengakibatkan penundaan waktu pembukaan CB 2 selama 327 ms, serta CB 1 selama 65.0 ms pada rele 1, untuk dicatat bahwa rele diferensial tidak akan bekerja jika kondisi gangguan terjadi di luar zona proteksinya atau gangguan terjadi pada bagian *eksternal*.



Gambar 6. Diagram segaris simulasi gangguan *Internal*



Gambar 7. Kurva koordinasi rele pada gangguan *Internal*

Pada Gambar 7. menunjukkan kurva koordinasi rele yang bekerja pada sumber gangguan yang terjadi didalam daerah pengamanan (*internal*). Pada rele 2 terlihat adanya gangguan yang terjadi sebesar 3.849 kA, dan waktu yang dibutuhkan oleh rele 2 untuk membuka CB adalah 0.227 s. Pada relay 1 arus gangguan yang terjadi sebesar 3.849 kA, sehingga pada relay tersebut membutuhkan waktu untuk membuka CB sebesar 0.005 s. Pada kurva koordinasi tersebut rele 2 adalah rele diferensial yang akan bekerja apabila terjadi gangguan di zona *internal* pada transformator.

c. Pembahasan Hasil Perhitungan

Pembahasan yang diperoleh berdasarkan hasil perhitungan, di mana nilai rasio CT yang dipilih untuk sisi tegangan tinggi adalah 300 A dengan pembacaan 1 A. Sementara itu, pada CT yang dipasang pada transformator di sisi tegangan rendah, nilai rasionya adalah 2000 A dengan pembacaan CT sebesar 1 A. Pada perhitungan arus *mismatch*, langkah pertama yang harus dilakukan adalah dengan membandingkan rasio CT ideal dengan rasio CT yang tersedia di pasaran., dengan syarat bahwa kesalahan tidak boleh melebihi 5% dari rasio CT yang dipilih. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai CT₁ ideal adalah 266,6 A, dengan *error mismatch* sebesar 0,886%. Sedangkan, *error mismatch* pada CT₂ adalah sebesar 1,125%, dengan perhitungan nilai CT ideal sebesar 2250 A. Arus sekunder CT adalah arus yang dihasilkan oleh CT itu sendiri, sementara arus diferensial merupakan selisih antara arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah. Selanjutnya, perhitungan slope dilakukan dengan membagi arus diferensial dengan arus *restain*. Slope 1 digunakan untuk menentukan arus diferensial dan arus *restain* pada kondisi normal, sedangkan slope 2 diperlukan untuk mencegah keterlibatan rele diferensial akibat gangguan *eksternal* dengan arus gangguan yang lebih besar. Hal ini dilakukan untuk menghindari saturasi pada salah satu CT.

d. Hasil Simulasi

Dalam simulasi gangguan kondisi *eksternal*, dapat diamati bahwa hanya rele 1 dan rele 3 yang bekerja, di mana keduanya merupakan rele *Over Current Relay* (OCR). Rele 2, yang merupakan relai diferensial, tidak terpicu. Rele 1 mendeteksi adanya gangguan sebesar 1.355 kA dan memerlukan waktu 65,0 ms untuk membuka CB 1. Sementara itu, rele 3 mendeteksi adanya gangguan sebesar 10.161 kA dan merespon dengan membuka CB 2 dalam waktu 105 ms. Dalam simulasi ini, relai diferensial tidak beroperasi karena gangguannya terjadi di luar daerah pengamanan dari rele diferensial.

Hasil simulasi gangguan *internal* 3 fasa di daerah yang dilindungi oleh rele diferensial menunjukkan bahwa rele diferensial akan memberikan respons saat gangguan terjadi di dalam zona transformator. Berdasarkan analisis, rele diferensial atau rele 2 mendeteksi gangguan sebesar 3.849 kA, dengan waktu penundaan pembukaan CB 2 sekitar 327 ms, dan waktu pembukaan CB 1 pada rele 1 sekitar 65,0 ms. Perlu dicatat bahwa saat terjadi gangguan *eksternal*, rele

diferensial tidak akan beroperasi. Dalam situasi seperti ini, rele arus lebih (*Over Current Relay*) dipasang untuk menangani dan menginstruksikan Pemutus Sirkuit (CB) untuk melakukan trip saat terjadi gangguan di zona *eksternal* transformator.

V. KESIMPULAN

Dari hasil analisa penggunaan rele diferensial sebagai proteksi pada transformator daya 60 MVA di Gardu Induk Langa, dapat disimpulkan hal sebagai berikut :

1. Saat terjadi gangguan maka rele diferensial akan aktif hanya saat terdeteksi adanya gangguan di zona *internal* transformator. gangguan internal 3 fasa di daerah yang dilindungi oleh rele diferensial menunjukkan bahwa rele diferensial akan merespon dan memproteksi daerah gangguan.
2. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai arus *setting* yang diperoleh adalah 0,1159 A, namun pada *setting* rele diferensial ditetapkan sebesar 0,3 A. Oleh karena itu, rele diferensial akan aktif ketika nilai arus diferensial melebihi arus *setting* yang telah ditetapkan, dan sebaliknya.
3. Waktu operasi rele jika gangguan terjadi *eksternal* yang bekerja hanya rele 1 dengan gangguan sebesar 1.355 kA dengan waktu 65.0 ms untuk membuka CB 1, dan rele 3 yang adalah rele *Over Current Relay* (OCR) dengan gangguan sebesar 10.161 kA dengan waktu 105 ms untuk membuka CB 2, dan rele 2 adalah rele diferensial. Sedangkan waktu operasi rele gangguan pada keadaan *internal* rele 2 yang mendeteksi adanya gangguan sebesar 3.849 kA, dan mengakibatkan penundaan waktu pembukaan CB 2 selama 327 ms, serta CB 1 selama 65.0 ms pada rele 1.
4. Saat gangguan pada kondisi *eksternal* rele diferensial tidak bekerja karena gangguan 3 fasa berada di luar daerah pengamanan dari rele diferensial, untuk kondisi ini rele *Over Current Relay* (OCR) bekerja untuk memerintahkan *Circuit Breaker* (CB) untuk trip saat gangguan terjadi di zona *eksternal* transformator daya.

REFERENSI

- [1] E. S. Nasution, F. I. Pasaribu, and M. Arfianda, "Rele Diferensial Sebagai Proteksi pada Transformator Daya pada Gardu Induk," *Ready Start*, vol. 02, no. 1, pp. 179–186, 2019.
- [2] Anang Dasa Novfowan, Mochammad Mieftah, and Heri Sungkowo, "Analisis Koordinasi Relai Proteksi Transformator I 150/20kV GI Bumicokro Akibat Uprating Daya 50MVA Menjadi 60MVA," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 2, pp. 112–117, 2023, doi: 10.33795/elposys.v10i2.2521.
- [3] H. Danny, H. K., Mujiman, wiwik, "Analisis Penambahan Transformator Daya Baru (60 MVA) Untuk Menambahkan Suplai Daya Area Distribusi Pada Gardu Induk Kentungan 150 KV," *J. Elektr.*, vol. 4 (1), no. 1, pp. 65–73, 2019.

- [4] U. P. Nasional, “MENGATASI OVERLOAD PADA TRANSFORMATOR GARDU,” vol. 2, pp. 82–91, 2023.
- [5] T. M. R. Wahyudin SN, Retno Aita Diantari, “Analisa Proteksi Differensial Pada Generator,” *J. Energi Kelistrikan*, vol. 9, no. 1, pp. 84–92, 2017, [Online]. Available: <https://media.neliti.com/media/publications/269605-analisa-proteksi-differensial-pada-gener-b4759d15.pdf>
- [6] S. Hardi, M. Adam, and I. Arisandy, “Analisis Kerja Rele Overall Diferensial Pada Generator Dan Transformator PLTG Paya Pasir PT. PLN Persero,” *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 58–65, 2020, doi: 10.30596/rele.v2i2.4418.
- [7] M. Munir, N. H. Rohiem, W. S. Pambudi, and ..., “Analisa Kinerja Relay Differensial pada Gardu Induk Surabaya Selatan Sebagai Sistem Proteksi dari Gangguan Arus Hubung Singkat Transformator Menggunakan ...,” *KLIK Kaji. Ilm. ...*, vol. 3, no. 6, pp. 879–886, 2023, doi: 10.30865/klik.v3i6.681.