

UNJUK KERJA RELE DIFFERENSIAL PADA TRANSFORMATOR 150/20 KV TERHADAP GANGGUAN HUBUNG SINGKAT DENGAN ETAP 12.6

Muhammad Agi Haidar^{1*}, Agus Sofwan²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Institut Sains Dan Teknologi Nasional Jl. Moh Kahfi II, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640

Received: 16 Juli 2024

Accepted: 5 Oktober 2024

Published: 12 Oktober 2024

Keywords:

Sistem Tenaga Listrik;

Transformator; Rele

Diferensial; Arus Diferensial;

Arus Hubung Singkat; ETAP

12.6.

Correspondent Email:

agihaidar123@gmail.com

Abstrak. Baik tidaknya sistem kelistrikan dalam skala industri ialah melihat dari baik tidaknya kontinuitas listriknya. Gangguan sistem kelistrikan tersebut bisa berasal dari rusaknya peralatan, dari luar sistem kelistrikan, maupun kesalahan dalam pengoperasiannya. Saat gangguan muncul pada sistem proteksi, sistem harus cepat memutuskan arus gangguannya agar tidak merusak peralatan sistem. Dilakukan pengujian sistem terhadap unjuk rele diferensial pada transformator 150/20 kV terhadap gangguan akibat hubung singkat tiga fasa, fasa ke fasa serta dari fasa menuju ke tanah yang dilaksanakan di gardu induk Jatiranggon transformator 3. Hasil perhitungan menunjukkan hasil sesuai dengan spesifikasi pada transformator, Current Transformator, dan Rele diferensial. Simulasi ETAP menunjukkan hasil sesuai dengan kondisi aktual. analisa perbandingan menunjukkan nilai deviasi tertinggi pada gangguan hubung singkat 3 fasa, yang besaran nilai deviasi untuk simulasi terhadap pengukurannya 8,08%. Hasil menunjukkan pengukuran serta simulasi bisa dijadikan acuan antisipasi gangguan hubung singkat yang akan terjadi. Dari berbagai kondisi, fungsi rele diferensial berfungsi dengan baik.

Abstract. Whether the electrical system is good or not on an industrial scale is seen from the continuity of electricity. Disruption of the electrical system can come from damage to equipment, from outside the electrical system, or errors in operation. When a disturbance appears in the protection system, the system must quickly cut off the fault current so as not to damage the system equipment. System testing was carried out on the performance of differential relays on 150/20 kV transformers against disturbances due to three-phase short circuit, phase to phase and from phase to ground carried out at the Jatiranggon substation transformer 3. The calculation results show the results in accordance with the specifications on the transformer, Current Transformer, and differential relay. ETAP simulation shows the results in accordance with the actual conditions. Comparative analysis shows the highest deviation value in the 3 phase short circuit fault, which is the amount of deviation value for simulation against the measurement of 8.08%. The results show that measurement and simulation can be used as a reference to anticipate short circuit disturbances that will occur. From various conditions, the differential relay functions properly.

1. PENDAHULUAN

Baik atau tidaknya sistem kelistrikan dalam skala industri, ialah melihat dari baik atau

tidaknya kontinuitas listriknya [1]. Dalam rangka menjaga kontinuitas Listrik tersebut, salah satunya ialah dengan mengatasi berbagai gangguan yang muncul [2]. Gangguan tersebut

bisa berasal dari rusaknya peralatan, dari luar sistem kelistrikannya, maupun kesalahan dalam pengoperasiannya [3]. Berbagai gangguan itu bisa diatasi melalui dipasangkannya sistem proteksi yang mumpuni. Sistem ini haruslah bisa bekerja secara cepat guna mengamankan adanya gangguan [4]. Di samping itu, sistem proteksi haruslah selektif, sensitivitasnya baik, serta mempunyai keandalan yang mumpuni dalam mengatasi gangguan [5].

Pada saat gangguan itu muncul pada sistem proteksi, sistem harus cepat dalam memutuskan arus gangguannya, agar tidak sampai merusak peralatan sistem tenaga listrik. Selain itu, juga berfungsi untuk mengatasi gangguan itu supaya tidak menyebar ke sistem tenaga listrik [6]. Kaitannya dengan pengaman terhadap sistem proteksi tenaga listrik ini, salah satunya bisa menggunakan rele diferensial.

Rele diferensial ini ialah sistem proteksi tenaga listrik yang letaknya ada di sistem proteksi transformator [7]. Sistem proteksi rele diferensial bekerja dengan tidak memerlukan koordinasi dengan rele yang lain, dengan begitu pada pengoperasiannya memerlukan waktu yang singkat [8]. Perbedaan rele diferensial dengan yang lain ialah pada sifatnya yang sangatlah selektif serta kecepatannya dalam mengatasi gangguan. Rele diferensial memiliki area pengaman yang dibatasi oleh dua buah CT yakni di satu sisi primer dan satu sisi sekunder. Oleh karena itu, rele diferensial memerlukan analisa unjuk kerja untuk dapat mengatasi gangguan hubung singkat tiga fasa, fasa menuju ke fasa serta dari fasa menuju ke tanah [9].

Pada penelitian ini dilakukan pengujian sistem terhadap unjuk rele diferensial pada transformator 150/20 kV terhadap gangguan akibat hubung singkat tiga fasa, fasa ke fasa serta dari fasa menuju ke tanah yang dilaksanakan di gardu induk Jatiranggon transformator 3. Analisa unjuk kerja ini dilaksanakan dengan tiga tahapan yaitu melalui pengukuran aktual di lapangan dan perhitungan manual serta pada pensimulasiannya ialah memakai software ETAP 12.6. Perolehan dari pengukuran langsung dan hasil perhitungan manual serta hasil simulasi digunakan sebagai acuan untuk menganalisa ketiga hubung singkat ini guna membuat sistem proteksi rele diferensial bekerja secara cepat serta selektif dalam menjalankan fungsinya, yakni pemutusan arus gangguan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Transformator Daya

Transformator daya sendiri merupakan alat listrik statis, yang berperan guna mengalirkan daya dari rangkaian yang satu menuju rangkaian lainnya, melalui perubahan pada tegangannya, tetap tidak merubah frekuensinya [10].

2.2. Transformator Arus

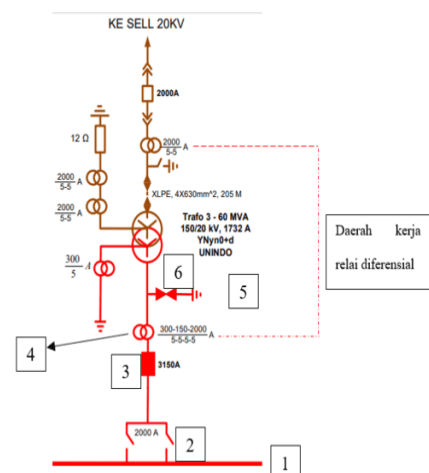
Transformator arus atau yang nama lainnya ialah *Current Transformer* (CT) merupakan sebuah alat kelistrikan yang mempunyai fungsi dalam mentransformasikan arus listrik supaya bisa dipakai guna pengukuran serta rele proteksi. Alat ini dipakai untuk mengukur arus yang besarnya bisa mencapai ratusan bahkan ribuan ampere, yang melewati sebuah jaringan [11].

2.3. Rele Diferensial

Menurut pendefinisian yang diambil dari institute of electrical and electronic engineers, Rele diartikan sebagai alat elektronik yang fungsinya ialah guna menginterpretasikan kondisi masukan pada kondisi yang spesifik serta dalam menyampaikan respon melalui pengoperasian serangkaian kontak, apabila masukan yang diterimanya itu cocok dengan suatu kondisi spesifik [12].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Gardu Induk Jatiranggon Transformator 3 dengan single line diagram sebagai berikut.



Gambar 1 Single Line diagram Transformator 3 gardu induk jatiranggon

Gambar 1 merupakan single Line diagram pada transformator 3. Maka spesifikasi transformator sebagai berikut.

Tabel 1 Spesifikasi Transformator

Data Transformator Daya	
Merk/ Tipe	UNINDO
No. Serial	A971521806
Pabrik	Indonesia
Kapasitas Transformator	60 MVA
Tegangan Sisi Primer	150 Kv
Tegangan Sisi Sekunder	20 Kv
Frekuensi	50 Hz
Impedansi	12,5 %
Tahun Buatan	2017
Tahun Operasional	2018
Minyak	IEC 60076
Frekuensi	50 Hz
Pendingin	ONAN/ ONAF

Berdasarkan tabel 1, transformator yang di gunakan menggunakan tipe step – down. Penelitian ini menggunakan rele diferensial dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 2 Spesifikasi Rele Diferensial

Data Rele Diferensial	
Merk	ALSTROM
Bay	Transformator 3
Arus Nominal	5 A
Arus Setting	0,5 A

Berdasarkan tabel 2, Bay merupakan lokasi rele diferensial. Sistem memiliki current transformator dengan ratio sebagai berikut.

Tabel 3 Ratio Current Transformator

Ratio Current Transformator	
150kV	20Kv
Primer	Sekunder
300 A / 5 A	2000 A / 5 A

Berdasarkan tabel 3, ratio current transformator (CT) adalah 300 A / 5 A pada sisi primer 150kV dan 2000 A / 5 A pada sisi sekunder. Penelitian ini menggunakan 3 data yaitu hasil pengukuran dari pengujian yang dilaksanakan perusahaan, hasil perhitungan menggunakan persamaan berdasarkan spesifikasi perangkat serta menggunakan simulasi ETAP 12.6 dengan tools short circuit analys. Persamaan menggunakan perhitungan sebagai berikut.

$$Inp = \frac{s}{\sqrt{3 \times v1}} \quad (1)$$

$$Ins = \frac{s}{\sqrt{3 \times v2}} \quad (2)$$

Persamaan 1 dan 2 merupakan persamaan untuk menentukan arus nominal pada current transformator dengan Inp yaitu arus nominal primer, Ins arus nominal sekunder, s daya tersalur (MVA) serta v1 tegangan primer dan v2

tegangan sekunder [2]. Selanjutnya adalah persamaan perhitungan arus sekunder pada current transformator sebagai berikut.

$$I_{sekunder} = \frac{1}{Rasio\ CT} \times Inominal \quad (3)$$

Persamaan 3 merupakan persamaan untuk menentukan arus sekunder pada CT dengan rasio CT berdasarkan tabel 3 dan I nominal berdasarkan pada persamaan 1 dan 2 [10]. setelah mendapatkan hasil dari perhitungan 3, dilakukan perhitungan arus diferensial yang berguna mengetahui selisih antara nilai arus primer dan arus sekunder. Tujuan mengetahui nilai arus diferensial adalah sebagai acuan setting rele diferensial pada transformator. Maka persamaannya adalah sebagai berikut.

$$Idif = i2 - i1 \quad (4)$$

Berdasarkan persamaan 4, idif merupakan arus diferensial, i1 merupakan arus sekunder pada sisi primer dan i2 arus sekunder pada sisi sekunder [8]. Berikutnya, perhitungan gangguan hubung singkat 3 fasa, fasa ke fasa dan fasa ke tanah sebagai berikut.

$$I3fasa = \frac{Vph\sqrt{3}}{Z1eki} \quad (5)$$

$$I2fasa = \frac{Vph - ph}{Z1eki + Z2eki} \quad (6)$$

$$Ifasa = \frac{3 \times Vph}{Z1eki + Z2eki + Z0eki} \quad (7)$$

Persamaan 5, 6 dan 7 menunjukan perhitungan gangguan arus hubung singkat tiga fasa, fasa ke fasa dan fasa ke tanah. Dimana I3fasa adalah arus hubung singkat tiga fasa, I2fasa adalah hubung singkat fasa ke fasa, Ifasa adalah hubung singkat fasa ke tanah, Vph adalah tegangan fasa, Z1eki adalah impedansi urutan positif, Z2eki adalah impedansi urutan negatif dan Z0eki adalah impedansi urutan nol [10]. Untuk mengetahui nilai impedansi urutan positif, negatif dan nol maka haruslah mencari nilai reaktansi transformator dengan 100% resistansi menggunakan persamaan berikut.

$$Xt = \frac{kV^2}{MVA} \quad (8)$$

$$Xt1 = Impedansi \times Xt \quad (9)$$

Persamaan 9 dan 8 merupakan persamaan untuk menghitung nilai reaktansi transformator dimana Xt adalah reaktansi transformator, kv2 adalah tegangan dari sisi primer dan sekunder, MVA adalah daya transformator, Xt1 adalah reaktansi urutan positif dan negatif dan impedansi merupakan impedansi transformator sesuai dengan tabel 1 [13].

Guna mengetahui nilai reaktansi urutan nol, transformator yang akan di analisa mempunyai vektor grup $Y_n Y_n 0$ yang artinya di dalam transformatornya tidak terdapat belitan delta. Dengan demikian, nilai X_{T0} ada di kisaran 9 sd $14 \times X_{T1}$, sehingga agar memudahkan perhitungannya, diambil nilai sebesar $10 \times X_{T1}$ [14]. maka perhitungan reaktansi urutan nol adalah sebagai berikut.

$$X_{T0} = 10 \times X_{T1} \quad (10)$$

berdasarkan persamaan 10, X_{T0} merupakan reaktansi transformator urutan nol . setelah mendapatkan reaktansi transformator, dilakukan perhitungan pada impedansi saluran. Menurut SPLN 64:1985 nilai impedansi pada saluran tipe XLPE 4 x 630 mm² adalah $Z_1=Z_2= 0,16 \text{ ohm/km}$, $jX_1= 0,102 \text{ ohm/km}$, $Z_0= 0,3 \text{ ohm/km}$ dan $jX_0= 1,77 \text{ ohm/km}$ [15]. Karena pada penelitian ini hanya membahas gangguan pada jalur transmisi transformator dan panjang saluran hanya 205 Meter. Maka persamaan impedansi saluran adalah sebagai berikut.

$$Z_1 = Z_2 = (0,16 + j0,102) \Omega / \text{km} \times 100 \% \text{ saluran} \times 0,205 \text{ km} \quad (11)$$

Berdasarkan persamaan 11, Z_1 adalah impedansi urutan positif, Z_2 adalah impedansi urutan negatif. Setelah diketahui nilai impedansi saluran, selanjutnya adalah nilai impedansi ekivalen dengan persamaan sebagai berikut.

$$Z_{1eki} = Z_{2eki} = Z_d + X_{T1} + Z_1 \text{ Saluran} \quad (12)$$

Persamaan 12 menunjukan perhitungan impedansi ekivalen yaitu Z_{1eki} adalah impedansi ekivalen urutan positif, Z_{2eki} adalah impedansi ekivalen urutan negatif, Z_d adalah impedansi dasar transformator sesuai pada tabel 1, X_{T1} adalah reaktansi transformator urutan positif, Z_1 saluran adalah impedansi saluran urutan positif [16].

Pada pembahasan ini akan digunakan software ETAP yang bertujuan sebagai pembandingan dari hasil perhitungan yang ada. ETAP sendiri adalah software yang umum dipakai ketika hendak melangsungkan suatu simulasi terkait sistem tenaga listrik [17]. Pembahasan ini menggunakan dua fungsi yaitu, Star – Protective Device Coordinator, short

circuit analysis. short circuit analysis mempunyai tujuan guna melihat gangguan yang terjadi dari fasa – ke fasa maupun dari fasa ke tanah.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Perhitungan CT

Perhitungan matematis di dasari oleh data spesifikasi yang ada serta menggunakan persamaan . untuk perhitungan pertama yaitu menggunakan persamaan 1 dan 2 untuk menghitung arus nominal pada CT. Maka hasil perhitungan arus nominal pada CT adalah 230, 940 A untuk sisi primer 150kV dan 1732,051 A untuk sisi sekunder 20Kv. Hasil perhitungan tersebut menyatakan bahwa arus nominal tidak lebih besar dari rasio CT itu sendiri [18].

Selanjutnya, adalah perhitungan arus sekunder pada CT menggunakan persamaan 3, maka hasil perhitungan arus sekunder pada sisi primer 150kV adalah 3,849 A dan sisi sekunder 20kV adalah 4,33 A. Hasil tersebut menyatakan bahwasanya apabila arus primer yang mengalir pada CT1 sisi tegangan 150 kV, besarnya ialah 300 A dan arus sekunder pada CT1 akan terbaca 5 A. Ditentukannya ratio CT tersebut ialah memahami bahwasanya nilai tersebut nyaris mendekati besaran arus ratingnya [19].

4.2. Arus Diferensial Kondisi Normal

Perhitungan arus diferensial di tujuan untuk menentukan setting dari rele diferensial itu sendiri. Setelah di dapatkan hasil perhitungan arus sekunder CT menggunakan persamaan 3. Selanjutnya dilakukan perhitungan arus diferensial saat kondisi normal menggunakan persamaan 4. Maka hasil perhitungan arus diferensial adalah 0,481 A. Hasil tersebut menunjukan bahwa rele diferensial tidak aktif dan sistem berjalan normal karena setting rele diferensial sesuai pada tabel 2 adalah 0,5 A [20].

4.3. Perhitungan Arus Hubung Singkat

Pada perhitungan arus hubung singkat menggunakan persamaan 5 untuk arus hubung singkat 3 fasa, persamaan 6 untuk arus hubung singkat fasa ke fasa, dan persamaan 7 untuk perhitungan arus hubung singkat fasa ke tanah.

Sebelum itu, haruslah mencari nilai impedansi saluran dengan menggunakan persamaan 11 serta mengacu pada SPLN

64:1985 dan mendapatkan hasil $0,0328 + j0,02091$ pada impedansi saluran urutan positif dan negatif serta $0,0615 + j0,36285$ untuk urutan negatif [15].

Reaktansi transformator sesuai dengan persamaan 8 dan mendapatkan hasil 375Ω pada sisi primer 150kV dan $6,67\Omega$ pada sisi sekunder 20kV. Untuk reaktansi transformator urutan positif 150kV mendapatkan hasil $0,468\Omega$ dan negatif 20kV $0,833\Omega$ dengan menggunakan persamaan 9. Untuk reaktansi urutan nol menggunakan persamaan 10. Maka hasil perhitungan adalah $4,68\Omega$ pada sisi 150kV dan $8,33\Omega$ pada sisi 20kV.

Lalu mencari nilai impedansi ekivalen menggunakan persamaan 12. Hasil perhitungan impedansi ekivalen adalah $0,0615 + j4,218$ pada urutan positif dan negatif. Impedansi ekivalen urutan nol adalah $2,051 + j5,04285$.

Setelah diketahui nilai – nilai tersebut. Maka hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa sesuai dengan persamaan 5 adalah 1,222 kA pada sisi 150kV dan 2,737 kA pada sisi 20kV. Pada arus gangguan fasa ke fasa menggunakan persamaan 6 dengan hasil 1,219 kA pada sisi 150kV dan 2,37 kA pada sisi 20kV. Untuk gangguan fasa ke tanah menggunakan persamaan 7 dan mendapatkan hasil 1,195 kA pada sisi 150kV dan 2,295 kA pada sisi 20kV. Hasil perhitungan tersebut menjadi acuan besarnya arus gangguan dalam 3 kondisi [21].

4.4. Arus Diferensial Gangguan Tiga Fasa

Perhitungan arus diferensial pada gangguan hubung singkat 3 fasa menggunakan persamaan 3 dan 4 dengan merubah nilai $\frac{1}{rasio\ CT} \times Inominal$ jadi $\frac{gangguan\ hubung\ singkat}{rasio\ CT} \times rasio\ CT$ maka hasil perhitungan arus diferensial adalah sebagai berikut.

Tabel 4 Arus Diferensial 3 Fasa

Kondisi	150kV (A)	20kV (A)	Arus Diferensial (A)
150 kV Gangguan dan 20 kV normal	20,36	4,33	16,03
150 kV normal dan 20 kV Gangguan	3,849	6,842	2,99
150 kV dan 20 kV Gangguan	20,36	6,842	13,52

Berdasarkan tabel 4 hasil nilai arus diferensial tiga fasa sisi kondisi 150 kV mengalami gangguan dan 20 kV normal adalah 16,03 A. Kondisi 150 kV normal dan 20 kV mengalami gangguan nilai arus diferensial adalah 2,99 A. Dan kondisi 150 kV dan 20 kV mengalami gangguan adalah sebesar 13,52 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada 3 kondisi tersebut rele diferensial aktif dan berfungsi [22].

4.5. Arus Diferensial Gangguan Fasa ke Fasa

Perhitungan arus diferensial fasa ke fasa menggunakan persamaan 3 dan 4 dengan merubah nilai $\frac{1}{rasio\ CT} \times Inominal$ jadi $\frac{gangguan\ hubung\ singkat}{rasio\ CT} \times rasio\ CT$ maka hasil perhitungan arus diferensial adalah sebagai berikut.

Tabel 5 Arus Diferensial Fasa ke Fasa

Kondisi	150kV (A)	20kV (A)	Arus Diferensial (A)
150 kV Gangguan dan 20 kV normal	20,31	4,33	15,98
150 kV normal dan 20 kV Gangguan	3,849	5,925	2,076
150 kV dan 20 kV Gangguan	23,48	6,842	16,638

Berdasarkan tabel 5 nilai arus diferensial fasa ke fasa sisi kondisi 150 kV mengalami gangguan dan 20 kV normal adalah 15,98 A.

Kondisi 150 kV normal dan 20 kV mengalami gangguan nilai arus diferensial adalah 2,076 A. Dan kondisi 150 kV dan 20 kV mengalami gangguan adalah sebesar 16,638 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada 3 kondisi tersebut rele diferensial aktif dan berfungsi [22].

4.6. Arus Diferensial Gangguan Fasa ke Tanah

Perhitungan arus diferensial fasa ke tanah menggunakan persamaan 3 dan 4 dengan merubah nilai $\frac{1}{\text{rasio Ct}} \times I_{\text{nominal}}$ jadi $\frac{\text{gangguan hubung singkat}}{\text{rasio Ct}} \times \text{rasio CT}$ maka hasil perhitungan arus diferensial adalah sebagai berikut.

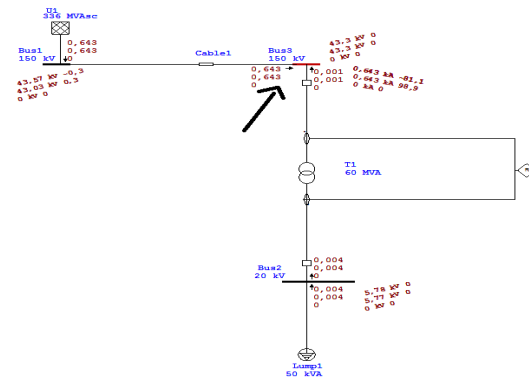
Tabel 6 Arus Diferensial Fasa ke Tanah

Kondisi	150kV (A)	20kV (A)	Arus Diferensial (A)
150 kV			
Gangguan dan 20 kV normal	19,92	4,33	15,59
150 kV normal			
Gangguan dan 20 kV	3,849	5,74	1,891
150 kV			
Gangguan dan 20 kV	23,48	6,842	16,638
Gangguan			

Berdasarkan tabel 6, nilai arus diferensial fasa ke fasa sisi kondisi 150 kV mengalami gangguan dan 20 kV normal adalah 15,59 A. Kondisi 150 kV normal dan 20 kV mengalami gangguan nilai arus diferensial adalah 1,891 A. Dan kondisi 150 kV dan 20 kV mengalami gangguan adalah sebesar 16,638 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada 3 kondisi tersebut rele diferensial aktif dan berfungsi [22].

4.7. Simulasi ETAP 12.6

ETAP ini ditujukan sebagai pembandingan hasil ujicoba short circuit pada aktual di lapangan dan hasil perhitungan. Untuk rangkaian simulasi ETAP, PMT yang terpakai ialah 170 kV untuk sisi 150 kV serta 25 kV untuk sisi 20 kV sudah di paparkan pada bab III dengan menggunakan simulasi load flow analysis. Maka, berikut hasil dari simulasi short circuit analysis.



Gambar 2 Simulasi Short Circuit Analys

Gambar 2 merupakan simulasi short circuit pada transformator 150/20 kV. Hasil menunjukkan bahwa terjadi nya hubung singkat pada bus3 yang ditandai dengan busbar berwarna merah dan ditandai dengan tanda panah hitam yaitu input transformator. Berikut report dari simulasi tersebut.

Tabel 7 short circuit report sisi 150kV

Contribution		3-Phase Fault		Line to Ground Fault		
From Bus	To Bus	%V	kA	% Voltage at From Bus		
		From Bus	Symm.rms	Va	Vb	Vc
Bus 3	Total	0.00	1.286	0.00	100.07	100.22
Bus 1	Bus 3	0.86	1.285	1.14	100.00	100.00
Bus 2	Bus 3	0.05	0.001	0.05	100.07	100.22
U1	Bus 1	100.00	1.285	100.00	100.00	100.00
Lump 1	Bus 2	100.00	0.008	100.00	100.00	100.00
Initial Symmetrical Current (kA, rms)				3-Phase	L-G	L-L
				1.286	1.283	1.114

Berdasarkan tabel 7 nilai yang ditandai dengan warna hijau menunjukkan gangguan pada sisi 150 kV di didapatkan hasil hubung singkat pada 3 fasa sebesar 1,286 kA, Fasa ke fasa sebesar 1,114 kA, dan fasa ke tanah sebesar 1,283 kA. Selanjutnya adalah hasil simulasi short circuit analysis di sisi 20 kV dengan hasil sebagai berikut.

Tabel 8 Short Circuit Report Sisi 20kV

Contribution		3-Phase Fault		Line to Ground Fault		
From Bus	To Bus	%V	kA	% Voltage at From Bus		
		From Bus	Symm.rms	Va	Vb	Vc
Bus 2	Total	0.00	2.844	0.00	91.77	90.82
Bus 3	Bus 2	18.08	2.836	21.91	91.77	90.82
Lump 1	Bus 2	100.00	0.008	100.00	100.07	100.00
Bus 1	Bus 3	18.25	0.378	22.21	91.77	90.75
Initial Symmetrical Current (kA, rms)				3-Phase	L-G	L-L
				2.844	2.444	2.463

Berdasarkan tabel 7 nilai yang ditandai dengan warna hijau merupakan hasil simulasi gangguan hubung singkat sisi 20 kV dengan nilai tiga fasa adalah sebesar 2,844 kA, fasa ke fasa sebesar 2,463 kA dan fasa ke tanah sebesar

2,444 kA. Hasil ini akan dijadikan perbandingan dengan nilai yang sudah ada untuk mengetahui deviasinya.

4.8. Perbandingan Arus Hubung Singkat

Analisa perbandingan hubung singkat dengan menggunakan dari pengukuran lapangan, perhitungan, serta simulasi menggunakan ETAP 12.6. Analisa ini bertujuan mengetahui nilai selisih serta deviasi dari hasil tersebut. Deviasi menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta\% \text{ Hitungan} = \frac{(I_h - I_s)}{I_h} \times 100\%$$

I_h adalah arus perhitungan, I_s adalah arus simulasi [23]. Perbandingan arus hubung singkat terdiri dari arus hubung singkat 3 fasa, fasa ke fasa, dan fasa ke tanah dari sisi 150kV dan 20kV. Maka hasil perbandingan arus hubung singkat 3 fasa adalah sebagai berikut.

Tabel 9 Perbandingan Arus Hubung Singkat Sisi 150kV

Arus gangguan	Data (kA) dan hasil deviasi (%)							
	Hitungan	Simulasi	Deviasi (%)	Pengukuran	Simulasi	Deviasi (%)	Simulasi	Deviasi (%)
3 fasa	1,222	1,286	5,24	1,39	1,286	7,48	1,286	8,08
Fasa – Fasa	1,219	1,114	5,39	1,254	1,114	5,69	1,114	5,38
Fasa – Tanah	1,195	1,283	7,36	1,214	1,283	5,68	1,283	5,37

Berdasarkan Tabel 9 nilai arus hubung singkat 3 fasa pengukuran mendapatkan nilai tertinggi dengan 1,390 kA dengan deviasi terhadap nilai simulasi sebesar 7,48%. Nilai arus hubung singkat fasa ke fasa pengukuran mendapatkan nilai tertinggi dengan 1,254 kA dengan deviasi terhadap nilai pengukuran sebesar 5,38%. Sedangkan pada nilai arus hubung singkat fasa ke tanah, data simulasi mendapatkan nilai tertinggi dengan 1,283 kA serta deviasi terhadap nilai pengukuran sebesar 5,37%.

Selanjutnya adalah gangguan hubung singkat sisi 20 kV dengan contoh perbandingan sebagai berikut.

Tabel 10 Perbandingan Arus Hubung Singkat Sisi 20kV

Arus gangguan	Data (kA) dan hasil deviasi (%)							
	Hitungan	Simulasi	Deviasi (%)	Pengukuran	Simulasi	Deviasi (%)	Hitungan	Deviasi (%)
3 fasa	2,737	2,844	3,76	2,795	2,844	1,72	2,737	2,795
Fasa – Fasa	2,37	2,463	3,77	2,486	2,463	1,92	2,37	2,486
Fasa – Tanah	2,295	2,444	6,09	2,468	2,444	1,69	2,295	2,468

Berdasarkan Tabel 10 bisa didapati untuk nilai arus hubung singkat 3 fasanya dalam simulasi mendapatkan nilai tertinggi dengan 2,844 kA dengan deviasi terhadap nilai hitungan sebesar 3,76%. Nilai arus hubung singkat fasa ke fasa pengukuran mendapatkan nilai tertinggi dengan 2,486 kA dengan deviasi terhadap nilai hitungan sebesar 4,89%. Sedangkan untuk besaran dari arus hubung singkat fasa ke tanah, data pengukuran mendapatkan nilai tertinggi dengan 2,468 kA serta deviasi terhadap nilai pengukuran sebesar 7,54%.

4.9. Perbandingan Arus Diferensial

Perbandingan hasil nilai arus diferensial dari berbagai kondisi ke dalam bentuk deviasi. Analisa ini meliputi data gangguan tiga fasa, fasa ke fasa, serta fasa ke tanah dari perhitungan, pengukuran serta simulasi. Nilai deviasi menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta\% \text{ Hitungan} = \frac{(I_h - I_s)}{I_h} \times 100\%$$

I_h adalah arus perhitungan, I_s adalah arus simulasi [21]. Untuk kondisi yang pertama yaitu kondisi dimana sisi 150kV mengalami gangguan dan sisi 20kV normal. Maka, tabel arus diferensial 150kV gangguan dan 20kV normal adalah sebagai berikut.

Tabel 11 Perbandingan Arus Diferensial 150kV Gangguan dan 20kV Normal

Arus gangguan	Data (A) dan hasil deviasi (%)							
	Hitungan	Simulasi	Deviasi (%)	Pengukuran	Simulasi	Deviasi (%)	Hitungan	Deviasi (%)
3 fasa	16,03	17,1	6,67	18,84	17,1	9,23	16,03	8,78
Fasa – Fasa	15,98	14,24	9,89	13,24	14,24	7,02	15,98	8,45
Fasa – Tanah	15,59	17,05	8,56	16	17,05	6,16	15,59	2,56

Berdasarkan Tabel 11 nilai arus diferensial 3 fasa pengukuran mendapatkan nilai tertinggi dengan 18,84 A dengan deviasi terhadap nilai simulasi sebesar 9,23%. Nilai arus hubung singkat fasa ke fasa hitungan mendapatkan nilai tertinggi dengan 15,98 A dengan deviasi terhadap nilai pengukuran sebesar 8,45%. Sedangkan untuk perolehan besaran arus hubung singkat fasa ke tanahnya, data simulasi mendapatkan nilai tertinggi dengan 17,05 A serta deviasi terhadap nilai pengukuran sebesar 6,16%. Untuk kondisi selanjutnya yaitu kondisi dimana sisi 150 kV normal dan sisi 20kV mengalami gangguan. Untuk contoh perhitungan adalah sebagai berikut.

Tabel 12 Perbandingan Arus Diferensial 150kV Normal dan 20kV Gangguan

Arus gangguan	Data (A) dan hasil deviasi (%)								
	Hitungan	Simulasi	Deviasi (%)	Pengukuran	Simulasi	Deviasi (%)	Hitungan	pengukuran	Deviasi (%)
3 fasa	2,993	3,261	8,22	3,13	3,261	4,01	2,993	3,13	4,37
Fasa – Fasa	2,076	2,311	4,98	2,196	2,311	4,98	2,076	2,196	5,46
Fasa – Tanah	1,891	2,261	8,17	2,396	2,261	5,63	1,891	2,396	9,42

Berdasarkan Tabel 12 nilai arus diferensial 3 fasa simulasi mendapatkan nilai tertinggi dengan 3,261 kA dengan deviasi terhadap nilai hitungan sebesar 8,22%. Nilai arus hubung singkat fasa ke fasa simulasi mendapatkan nilai tertinggi dengan 2,311 kA dengan deviasi terhadap nilai hitungan sebesar 4,98%. Sedangkan untuk besaran nilai dari arus hubung singkat fasa ke tanahnya, data simulasi mendapatkan nilai tertinggi dengan 2,396 kA serta deviasi terhadap nilai pengukuran sebesar 5,63%.

Untuk kondisi selanjutnya yaitu kondisi dimana sisi 150 kV dan sisi 20 kV mengalami gangguan. Untuk contoh perhitungan adalah sebagai berikut.

Tabel 13 Perbandingan Arus Diferensial 150kV dan 20kV Gangguan

Arus gangguan	Data (A) dan hasil deviasi (%)								
	Hitungan	Simulasi	Deviasi (%)	Pengukuran	Simulasi	Deviasi (%)	Hitungan	pengukuran	Deviasi (%)
3 fasa	16,638	14,32	8,78	16,19	14,32	8,54	16,638	16,19	2,69
Fasa – Fasa	14,385	16,259	8,07	11,525	16,259	8,84	14,385	11,525	9,58
Fasa – Tanah	13,7	15,27	6,97	25,05	15,27	9,93	13,7	25,05	9,96

Berdasarkan Tabel 13 nilai arus diferensial 3 fasa hitungan mendapatkan nilai tertinggi dengan 16,638 kA dengan deviasi terhadap nilai simulasi sebesar 8,78%. Nilai arus hubung singkat fasa ke fasa simulasi mendapatkan nilai tertinggi dengan 16,259 kA dengan deviasi terhadap nilai hitungan sebesar 8,07%. Sedangkan untuk besaran nilai dari arus hubung singkat fasa ke tanahnya, data simulasi mendapatkan nilai tertinggi dengan 15,27 kA serta deviasi terhadap nilai hitungan sebesar 6,97%.

5. KESIMPULAN

Hasil perhitungan menunjukkan hasil yang sesuai dengan spesifikasi pada transformator, Current Transformator, dan Rele diferensial. Simulasi ETAP menunjukkan hasil yang sesuai dengan kondisi aktual. 3. Hasil analisa perbandingan menunjukkan bahwa nilai deviasi tertinggi ada pada gangguan hubung singkat 3 fasa, yang besaran nilai deviasi untuk simulasi terhadap pengukurannya ialah 8,08%. Hasil tersebut menunjukkan pengukuran serta simulasi bisa dijadikan acuan terhadap antisipasi gangguan hubung singkat yang akan terjadi. Dari berbagai kondisi, fungsi rele diferensial berfungsi dengan baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih ditujukan kepada PT. PLN (Persero) yang telah mengizinkan untuk pengambilan data serta berbagi ilmu pengetahuan. Terimakasih kepada bapak agus sofwan yang telah berkontribusi dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Tanjung, “Analisis Kinerja Sistem Kelistrikan Fakultas Hukum Universitas Lancang Kuning Pekanbaru,” *J. Teknol.*, vol. 8,

- no. 1, pp. 75–82, 2015.
- [2] W. SN, R. A. Diantari, and T. M. Rahmatullah, “Analisa Proteksi Differensial Pada Generator Di Pltu Suralaya,” *Energi & Kelistrikan*, vol. 9, no. 1, pp. 84–92, 2018, doi: 10.33322/energi.v9i1.51.
 - [3] L. H. Gunanto *et al.*, “Pengaruh frekuensi terhadap efisiensi dan regulasi tegangan transformator,” *J. Ilm. Flash*, vol. 9, no. 1, pp. 60–65, 2023.
 - [4] L. E. Bien and D. Helna, “Studi Penyetelan Relai Diferensial Pada Transformator PT Chevron Pacific Indonesia,” *JETri*, vol. 6, no. 2, pp. 41–68, 2007.
 - [5] E. S. Nasution, F. I. Pasaribu, and M. H. Hidayat, “Studi Proteksi Sistem Tenaga Listrik Pada Trafo 1600 kVA Menggunakan Current Relay IWU 2-3,” *J. MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, vol. 2, no. 2, pp. 28–39, 2021, doi: 10.53695/jm.v2i2.562.
 - [6] E. S. Nasution *et al.*, “Rele diferensial sebagai proteksi pada transformator daya pada gardu induk,” *Reg. Dev. Ind. Heal. Sci. Technol. Art Life*, pp. 179–186, 2015.
 - [7] Ferdiansyah, “Studi Penggunaan Rele Differensial Type P642 Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya 30 Mva Gardu Induk Pantan Labu Pt. Pln (Persero) Aceh Utara,” *J. Tektro*, vol. 7, no. 1, pp. 78–83, 2023.
 - [8] I. Jaya, I. Arjana, and A. A. Pemayun, “STUDI KOORDINASI KERJA RELE DIFERENSIAL DAN RELE RESTRICTED EARTH FAULT SETELAH UPRATING PADA TRANSFORMATOR II DI GI KAPAL,” *J. SPEKTRUM*, vol. 5, p. 49, Jun. 2018, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2018.v05.i01.p07.
 - [9] U. Situmeang, K. Tanjung, and A. Arlenny, “Studi Penggunaan Rele Line Differential Sebagai Proteksi Utama Pada Penghantar 150 KV Tenayan-Riau-Pasir Putih di PT.PLN (Persero) UPT Pekanbaru,” *Sainstek (e-Journal)*, vol. 10, no. 1, pp. 52–59, 2022, doi: 10.35583/js.v10i1.8.
 - [10] P. Utomo, “Studi Analisis Kualitas Transformator Daya Gardu Induk 150 Kv Siantan,” *Tek. Elektro*, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2019.
 - [11] W. D. Agustin and M. A. Hamid, “Analisis Error Meter Dan Ct Pada Automatic Meter Reading (Amr) Di Pt Pln (Persero) Up3 Cikupa,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i1.3776.
 - [12] M. F. Jafar and A. Budiman, “Studi Setting Rele Differensial Pada Trafo Daya Pt. Pln Tarakan,” *Elektr. Borneo*, vol. 9, no. 2, pp. 104–108, 2023, doi: 10.35334/eb.v9i2.3466.
 - [13] A. Yani, “Pemasangan Kapasitor Bank untuk Perbaikan Faktor Daya,” *J. Electr. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 31–35, 2017.
 - [14] D. T. Nugroho, A. W. Wardhana, and A. Wahyumi, “ANALISIS KOORDINASI SISTEM PROTEKSI PENYULANG DIENG-2 (DNG02) TERHADAP GANGGUAN ARUS HUBUNG SINGKAT GARDU INDUK DIENG PT PLN (PERSERO) UP3 PURWOKERTO,” vol. 16, no. 1, pp. 69–82, 2020.
 - [15] H. Yamashika and M. Kamil, “Rancang Bangun Scaled Down Model Sistem Distribusi Tenaga Listrik,” *Rang Tek. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 184–187, 2022, doi: 10.31869/rtj.v5i1.3069.
 - [16] I. D. G. Agung Budhi Udiana, I. G. Dyana Arjana, and T. G. Indra Partha, “Studi Analisis Koordinasi Over Current Relay (Ocr) Dan Ground Fault Relay (Gfr) Pada Recloser Di Saluran Penyulang Penebel,” *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 16, no. 2, p. 37, 2017, doi: 10.24843/mite.2017.v16i02p07.
 - [17] P. A. Wicaksono, “Analisis Tegangan Jatuh Pada Unit Kilang Di Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak Dan Gas Bumi Cepu Berbasis Etap 12.6.0,” *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 473–483, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/view/40855%0Ahttps://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/download/40855/35303>
 - [18] A. D. Mulyadi, A. Mashar, and P. Wijaksono, “Perancangan Sistem Proteksi Arus Pada Trafo Pemakaian Sendiri Kapasitas 54 MVA Untuk Sistem PLTU,” *J. Tek. Energi*, vol. 6, no. 1, pp. 431–438, 2016.
 - [19] B. Rudianta and A. Syakur, “Pengaruh Pengawatan Terbalik Kabel Sekunder Ct (Current Transformer) Meter Energi 3 Fasa,” *J. Tek. Elektro, Univ. Diponegoro*, vol. 19, no. 3, pp. 334–339, 2023.
 - [20] S. Hardi, M. Adam, and I. Arisandy, “Analisis Kerja Rele Overall Differensial 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.
 - [21] G. Risky Iriando and A. Imam Agung, “Studi Koordinasi Sistem Proteksi Pada Transformator 20Kv Di Jaringan Distribusi 20Kv Penyulang Bandilan,” *J. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 3, pp. 611–618, 2019.
 - [22] S. W. Simbolon, M. Aditya, S. M. Siagian, T. Listrik, T. Elektro, and P. N. Medan, “TRANSFORMATOR DAYA DI PT PLN NUSANTARA POWER UPDK,” pp. 453–464, 2023.

- [23] F. Mumtazah and A. Purwanto, "Analisis Pengaruh Kinerja Keuangan Dan Pengungkapan Lingkungan Terhadap Nilai Perusahaan," *Diponegoro J. Account.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–11, 2020.