

Analisis Penerapan Fungsi Dua Tahap Pada Relai Proteksi *Standby Earth Fault* (SBEF) Transformator 30 MVA Gardu Induk Maros 150 kV

Alfin Akram Dwi Amir¹⁾, Ahmad Rizal Sultan²⁾, Muh. Imran Bachtiar³⁾

^{1,2,3}Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ujung Pandang

¹alvinakram2512@gmail.com, ²rizal.sultan@poliupg.ac.id, ³muh.imranb@poliupg.ac.id

Abstrak

Relai SBEF berfungsi untuk melindungi NGR di sisi netral sekunder transformator, SBEF bekerja dengan mentripkan PMT sisi 150 kV yang *interlock* dengan PMT sisi 20 kV apabila muncul arus di sisi netral sekunder trafo, akan tetapi pada tahun 2020 untuk mendukung program *zero trip* PMT 150 kV, PLN menerapkan fungsi dua tahap Relai SBEF guna memberi jeda ketika ada gangguan yang membuat Relai SBEF bekerja dan akan mentripkan sisi 20 kV terlebih dahulu. Tujuan penelitian adalah menganalisis arus hubung singkat dari transformator 30 MVA di Gardu Induk Maros beserta *setting* dari relai SBEF, menganalisis koordinasi relai SBEF dan GFR (*Ground Fault Relay*) berdasarkan simulasi di aplikasi ETAP 16.0.0. Metode dalam penelitian ini berupa studi literatur dan observasi sedangkan teknik analisis data menggunakan metode deskriptif kualitatif. Dari hasil penelitian didapatkan *setting* arus kerja SBEF sebesar 86,6 A untuk tahap satu dan tahap dua. Sedangkan TMS (*Time Multiple Second*) sebesar 0,097 untuk tahap satu dan 0,117 untuk tahap 2, dimana tahap 1 untuk mentripkan PMT sisi 20 kV (*Incoming*) sedangkan tahap 2 untuk mentripkan PMT sisi 150 kV. Untuk simulasinya, GFR bekerja secara bertahap tergantung dari lokasi gangguannya yang dimulai dari GFR Penyulang, GFR *Incoming*, SBEF tahap satu dan SBEF tahap dua.

Keywords: SBEF, *setting* relai, koordinasi relai, ETAP

I. PENDAHULUAN

Sistem proteksi merupakan suatu sistem pengamanan terhadap peralatan listrik dari gangguan seperti gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi, dan penyebab lainnya, yang bekerja dengan cara mendeteksi kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik dan memisahkan peralatan yang terganggu dari sistem yang sehat, sekaligus mengamankan bagian yang masih sehat dari kerusakan atau kerugian yang lebih besar sehingga sistem dapat terus berfungsi. Zona proteksi transformator merupakan salah satu contoh subsistem dari sistem proteksi. Pola proteksi transformator harus dapat mengamankan transformator dari gangguan internal maupun gangguan eksternal. Proteksi transformator tenaga umumnya menggunakan *Differential Relay* dan *Restricted Earth Fault* (REF) sebagai proteksi utama. Sedangkan proteksi cadangan menggunakan *Over Current Relay* (OCR) dan GFR. Relai SBEF umumnya hanya dipergunakan pada transformator dengan belitan Y yang ditanahkan dengan *resistor* dan fungsinya lebih mengamankan *Neutral Grounding Resistor* (NGR). Umumnya, relai proteksi SBEF satu tahap yang berfungsi sebagai pengaman NGR bekerja dengan memisahkan bagian transformator secara keseluruhan (memutus PMT sisi 150 kV pada Transformator 150/20 kV) akan tetapi prinsip tersebut terkadang sangat merugikan karena biasanya penyebab gangguan berada di sisi beban (sisi 20 kV). Sehingga pada tahun 2020 untuk mendukung program *zero trip* PMT 150 kV, PLN menerapkan fungsi SBEF dua tahap guna memberi jeda ketika ada gangguan yang membuat relai SBEF bekerja dan akan mentripkan sisi 20 kV terlebih dahulu [1].

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis arus hubung singkat dari transformator 30 MVA di Gardu Induk Maros beserta *setting* dari Relai SBEF, menganalisis koordinasi Relai SBEF dan GFR menggunakan simulasi di aplikasi ETAP 16.0.0. Metode dalam penelitian ini berupa studi literatur dan observasi. Data dari hasil penelitian kemudian dapat digunakan oleh pihak PLN sebagai bahan referensi dalam melaksanakan penerapan fungsi dua tahap relai SBEF.

II. KAJIAN LITERATUR

A. Transformator Tenaga

Transformator daya dapat memindahkan arus bolak-balik dari suatu rangkaian primer ke rangkaian sekunder dengan tegangan dan arus berubah, namun dengan frekuensi yang tepat [2]. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi faraday dan hukum lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial

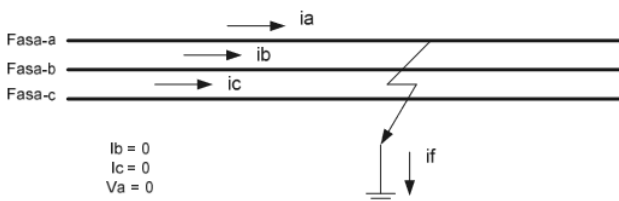
B. Komponen Simetris

Suatu sistem tak seimbang yang terdiri dari 'n' fasa yang berhubungan dapat diuraikan menjadi 'n' buah sistem dengan fasa seimbang dinamakan komponen simetris dari fasa aslinya. Prinsip dasar dari komponen simetris untuk rangkaian sistem tiga fasa adalah setiap bilangan fasa yang tak seimbang dapat diuraikan menjadi fasa seimbang [3]. Pada Gangguan tiga fasa semua fasa mengalami hubung singkat. Ada kemungkinan 2 situasi

yaitu ketiga fasa kemungkinan mengalami hubung singkat ke tanah atau tidak melalui ke tanah. Gangguan tiga fasa dijadikan standar untuk menentukan tingkat gangguan [4]. Gangguan satu fasa ke tanah umumnya bukan merupakan hubung singkat melalui tahanan gangguan, sehingga arus gangguannya menjadi semakin kecil dan tidak bisa terdeteksi oleh rele 1 T 2 T yang ada [5].

C. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Gangguan satu fasa ke tanah dapat dikategorikan sebagai gangguan asimetris sehingga memerlukan metode komponen simetris untuk menganalisa tegangan dan arus pada saat terjadi gangguan. Gangguan satu fasa ke tanah akan menyebabkan kenaikan arus pada fasa terganggu dan tegangan menjadi nol, sedangkan arus pada fasa lain menjadi nol yang diikuti dengan kenaikan tegangan pada fasa yang lain. Untuk gangguan ini dianggap fasa *a* mengalami gangguan. Gambar 1. menunjukkan gangguan satu fasa ke tanah.



Gambar 1. Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Sebelum menghitung nilai gangguan hubung singkat diperlukan nilai impedansi sumber dan impedansi trafo. Impedansi sumber dapat dihitung dengan data hubung singkat dalam bus primer trafo memakai Persamaan (1).

$$Z_{hs} = \frac{V_p \times 1000}{\sqrt{3} \times I_f} \quad (1)$$

Data yang tercantum pada *nameplate* transformator, nilai *base* transformator dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$Z_b \text{ HV} = \frac{V_{hv}^2}{S_b} \quad (2)$$

$$Z_b \text{ LV} = \frac{V_{lv}^2}{S_b} \quad (3)$$

$$I_b \text{ HV} = \frac{S}{V_{hv} \times \sqrt{3}} \quad (4)$$

$$I_b \text{ LV} = \frac{S}{V_{lv} \times \sqrt{3}} \quad (5)$$

$$R_{NGRS} = \frac{3 \times R_{NGR}}{Z_b \text{ LV}} \quad (6)$$

$$X_{t1} = \frac{S_b}{S} \times X_{t\%} \quad (7)$$

Menghitung impedansi transformator urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol dilakukan menggunakan persamaan berikut :

$$X_{tp1}, X_{tp2}, X_{tp0} = 0,5 \times X_{t1} \quad (8)$$

$$X_{ts1}, X_{ts2}, X_{ts0} = 0,5 \times X_{t1} \quad (9)$$

$$X_{tt1}, X_{tt2}, X_{tt0} = 0,5 \times X_{t1} \quad (10)$$

Nilai arus hubung singkat transformator pada gangguan 1 fasa ke tanah dihitung menggunakan persamaan (11 sampai 14) :

$$Z1 = Z_{s1} + j.X_{tp1} + j.X_{ts1} \quad (11)$$

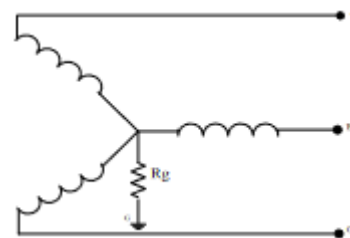
$$Z2 = Z_{s2} + j.X_{tp2} + j.X_{ts2} \quad (12)$$

$$Z0 = \left\{ \frac{(Z_{s0} + j.X_{tp0}) \times j.X_{tt0}}{(Z_{s0} + j.X_{tp0}) + j.X_{tt0}} \right\} + j.X_{ts0} + R_{NGR} \quad (13)$$

$$I_{hs1\phi20} = \frac{3}{Z1 + Z2 + Z0} \times I_b \text{ LV} \quad (14)$$

D. Neutral Grounding Resistor

NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang seri dengan netral sekunder pada generator sebelum terhubung ke tanah [6].



Gambar 2. Neutral Grounding Resistor

Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah [7]. Berikut ini pada persamaan 2.17 rumus untuk menghitung arus nominal NGR.

$$I_n \text{ NGR} = \frac{V_{lv}}{\sqrt{3} \times R_s} \quad (15)$$

E. Rele

Rele proteksi merupakan skema atau rangkaian yang mampu merespon terhadap adanya suatu gangguan atau kesalahan dalam sistem tenaga listrik dan secara otomatis memutuskan hubungan peralatan yang terganggu atau memberikan sinyal (*alarm*) [8].

Rele adalah peralatan yang peka terhadap perubahan arus dan tegangan, pada rangkaian sistem yang dapat mem- pengaruhi bekerjanya alat lain. Syarat karakteristik rele antara lain [9].

F. Rele Standby Earth Fault (SBEF)

Filosofi relai ini adalah untuk mengamankan NGR dari kerusakan akibat panas. Panas bisa dihasilkan karena arus hubung singkat atau arus urutan nol yang mengalir ke titik netral transformator secara terus menerus (*continue*). Prinsip kerja relai ini sama dengan relai gangguan ke tanah dan dipasang hanya untuk pentanahan yang bukan pentanahan langsung.

Untuk pemilihan waktu dan karakteristik SBEF dengan memperhatikan ketahanan termis NGR. Karena arus yang mengalir ke NGR sudah dibatasi oleh resistansi terpasang pada NGR itu sendiri. Karena nilai arus yang

flat, maka pemilihan karakteristik waktu disarankan menggunakan *Definite* atau *Long Time Inverse* [10].

Untuk mengetahui waktu tunda dan tms dari relai SBEF fungsi 2 tahap dapat menggunakan persamaan (16 sampai 19) :

$$ts = 0,5 \times t \text{ max NGR} \quad (16)$$

$$Tms \text{ tahap 1} = \frac{(\frac{\ln NGR}{I_{set}} - 1) \times ts}{120} \quad (17)$$

$$Tms \text{ tahap 2} = \frac{(\frac{\ln NGR}{I_{set}} - 1) \times (ts + 1)}{120} \quad (18)$$

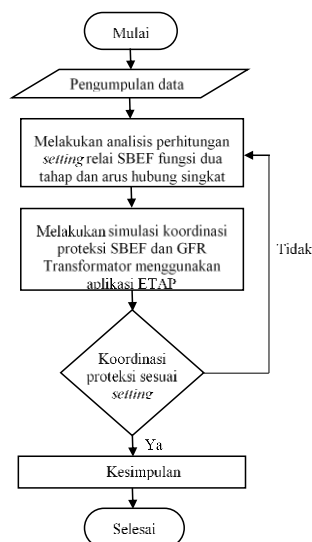
$$LTI = \frac{Tms \times 120}{\frac{I_{hs}}{I_{set}} - 1} \quad (19)$$

III. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini yang menjadi objek penelitian adalah Relai SBEF pada Transformator #1 Gardu Induk Maros, dimana relai ini berfungsi untuk mendeteksi gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah dan diprogram untuk bekerja setelah relai GFR sisi 20 kV penyulang dan *incoming* gagal bekerja.

A. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Diagram Alir (*Flowchart*) Penelitian

B. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Metode Literatur

Pengumpulan data dengan metode literatur dilakukan dengan cara mengumpulkan berbagai referensi-referensi baik berupa buku, internet, jurnal ilmiah, dokumen pemeliharaan tahunan ULTG Maros maupun buku panduan dari PT PLN (Persero), seperti buku Pedoman Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali, buku Perhitungan setting dan Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi, dll.

2. Metode Observasi

Pengumpulan data dengan metode observasi dilakukan dengan cara mencari data-data teknis secara langsung di lapangan. Data tersebut berupa setting dan hasil pengujian setelah pengaktifan fungsi relai yang diambil pada saat terlibat dalam kegiatan pemeliharaan. Pengumpulan data dan pengamatan langsung di lapangan dilakukan tepatnya pada Gardu Induk Maros 150 kV, Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk (ULTG) Maros.

C. Teknik Analisis Data

Data yang didapat kemudian dianalisis serta dilakukan perhitungan terhadap data tersebut dengan tahapan sebagai berikut :

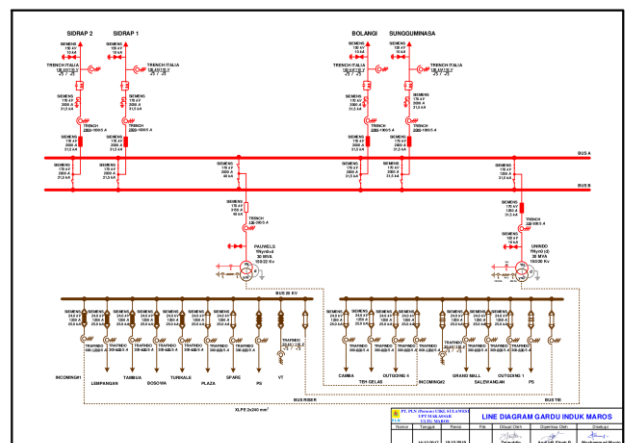
1. Perhitungan *setting* Relai SBEF fungsi dua tahap dan arus hubung singkat transformator.
2. Simulasi koordinasi proteksi SBEF dan GFR Transformator menggunakan aplikasi ETAP.
3. Perbandingan antara hasil teori dan simulasi *setting* relai proteksi SBEF.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini yang menjadi objek penelitian adalah Relai SBEF pada Transformator #1 Gardu Induk Maros, dimana GI Maros merupakan salah satu Gardu Induk yang berada di bawah asuhan ULTG Maros.

A. Gambaran Umum Gardu Induk Maros

Pada gardu induk maros terdiri dari 4 bay line dan 2 bay trafo dengan masing-masing bay trafo dilengkapi transformator berkapasitas 30 MVA. Adapun *single line diagram* dari Gardu Induk Maros, dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. *Single line diagram* GI Maros

B. Data Teknis Gardu Induk Maros

1) Data Spesifikasi Transformator

Data Spesifikasi Transformator #1 Gardu Induk Maros dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Spesifikasi Transformator #1

Spesifikasi	Keterangan
Merek	UNINDO
Frekuensi	50 Hz
Kapasitas	30 MVA
Vektor Grup	YNyn0(d)
Impedansi	12,74 %
Tegangan Primer	150 Kv
Tegangan Sekunder	20 Kv
Tegangan Tersier	10 Kv
E	1 pu

Tabel 1. Spesifikasi Transformator #1

2) Data Spesifikasi NGR

Data spesifikasi NGR transformator #1 Gardu Induk Maros dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. spesifikasi NGR Transformator #1 GI Maros

Besaran	Nilai
R sisi HV	0 Ω
R sisi LV	40 Ω
I max NGR	300 A
I kontinu	30 A
t max NGR	10 s

3) Data Impedansi Sumber di bus 150 kV

Data impedansi sumber di Bus 150 kV GI Maros dapat dilihat pada Tabel 3 berikut :

Tabel 3. Impedansi Sumber di Bus 150 kV

Impedansi Sumber di bus 150 Kv					
Urutan Positif		Urutan Negatif		Urutan Nol	
R1 (p.u)	X1 (p.u)	R2 (p.u)	X2 (p.u)	R0 (p.u)	X0 (p.u)
0,00457	0,03052	0,00176	0,03108	0,01515	0,05681

C. Perhitungan Arus Hubung Singkat Transformator dan Setting Relai SBEF

1. Perhitungan nilai base transformator

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2, nilai base transformator dapat dihitung menggunakan persamaan 2 sampai 10.

- i. Impedansi dasar sisi primer

$$Z_b \text{ HV} = \frac{150^2 \text{ kV}}{100 \text{ MVA}}$$

$$Z_b \text{ HV} = 225 \text{ pu}$$

- ii. Impedansi dasar sisi sekunder

$$Z_b \text{ LV} = \frac{20^2 \text{ kV}}{100 \text{ MVA}}$$

$$Z_b \text{ LV} = 4 \text{ pu}$$

- iii. Arus dasar sisi primer

$$I_b \text{ HV} = \frac{100 \text{ MVA}}{150 \text{ kV} \times \sqrt{3}}$$

$$I_b \text{ HV} = 384,9 \text{ A}$$

- iv. Arus dasar sisi sekunder

$$I_b \text{ LV} = \frac{100 \text{ MVA}}{20 \text{ kV} \times \sqrt{3}}$$

$$I_b \text{ LV} = 2886,751 \text{ A}$$

- v. Tahanan dasar NGR sisi sekunder

$$R_{NGRS} = \frac{3 \times 40 \Omega}{4 \text{ pu}} = 30 \Omega$$

- vi. Impedansi urutan positif trafo

$$X_{t1} = \frac{12,74}{100} \times \frac{100 \text{ MVA}}{30 \text{ MVA}}$$

$$X_{t1} = 0,424 \text{ pu}$$

$$X_{tp1} = 0,5 \times 0,424 \text{ pu} = 0,212 \text{ pu}$$

$$X_{ts1} = 0,5 \times 0,424 \text{ pu} = 0,212 \text{ pu}$$

$$X_{tt1} = 0,5 \times 0,424 \text{ pu} = 0,212 \text{ pu}$$

- vii. Impedansi urutan negatif trafo

$$X_{tp2} = 0,5 \times 0,424 \text{ pu} = 0,212 \text{ pu}$$

$$X_{ts2} = 0,5 \times 0,424 \text{ pu} = 0,212 \text{ pu}$$

$$X_{tt2} = 0,5 \times 0,424 \text{ pu} = 0,212 \text{ pu}$$

- viii. Impedansi urutan nol trafo

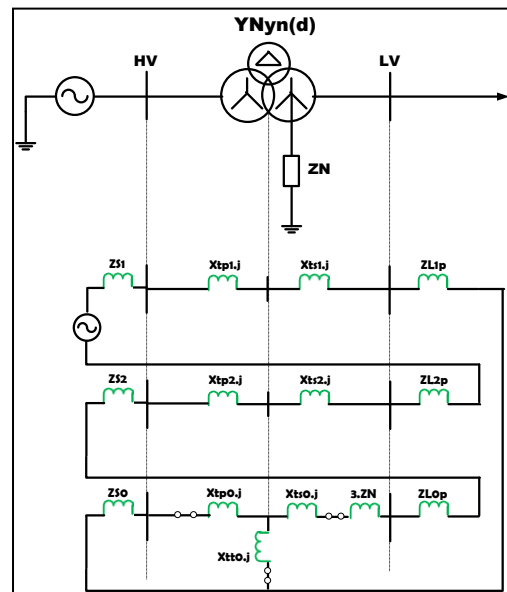
$$X_{tp0} = 0,5 \times 0,424 \text{ pu} = 0,212 \text{ pu}$$

$$X_{ts0} = 0,5 \times 0,424 \text{ pu} = 0,212 \text{ pu}$$

$$X_{tt0} = 0,5 \times 0,424 \text{ pu} = 0,212 \text{ pu}$$

2. Perhitungan arus hubung singkat transformator

Berikut ini Gambar 5 rangkaian ekivalen perhitungan arus hubung singkat 1 fasa di bus 20 kV.



Gambar 5. Rangkaian Ekivalen Perhitungan Arus Hubung Singkat 1 Fasa di Bus 20 kV

Berdasarkan gambar 5, arus hubung singkat 1 fasa ke tanah di bus 20 kV dapat dihitung menggunakan persamaan 11 sampai 14.

$$Z1 = 0,030856 + j.0.212 + j.0,212 = 0,454539 \text{ pu}$$

$$Z2 = 0,03345 + j.0.212 + j.0,212 = 0,456309 \text{ pu}$$

$$Z0 = \left\{ \frac{(0,058797 + 0,212) \times 0,212}{(0,058797 + 0,212) + 0,212} \right\} + 0,212 + 30 = 30,004767 \text{ pu}$$

$$I_{hs1\phi 20} = \frac{3}{0,454539 + 0,456309 + 30,004767} \times 2886,751$$

$$I_{hs1\phi 20} = \frac{3}{30,042} \times 2886,751$$

$$I_{hs1\phi 20} = 288,269 \text{ A}$$

3. Perhitungan setting fungsi dua tahap Relai SBEF

Untuk menghitung setting fungsi dua tahap relai SBEF, terlebih dahulu menghitung arus nominal dari NGR menggunakan persamaan 15 berikut.

$$I_{n \text{ NGR}} = \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 40 \Omega}$$

$$I_{n \text{ NGR}} = 288,68 \text{ Ampere}$$

Selanjutnya untuk menghitung setting dari relai SBEF fungsi 2 tahap menggunakan persamaan (16 sampai 19) berikut.

$$I_{set} = 0,3 \times 288,68 \text{ A} = 86,6 \text{ Ampere}$$

$$t_s = 0,5 \times 10 \text{ s} = 5 \text{ Second}$$

$$T_{ms \text{ tahap 1}} = \frac{\left(\frac{288,68 \text{ A}}{86,6 \text{ A}} - 1 \right) \times 5 \text{ s}}{120}$$

$$T_{ms \text{ tahap 1}} = 0,097$$

$$T_{ms \text{ tahap 2}} = \frac{\left(\frac{288,68 \text{ A}}{86,6 \text{ A}} - 1 \right) \times (5 \text{ s} + 1)}{120}$$

$$T_{ms \text{ tahap 2}} = 0,117$$

$$LTI \text{ tahap 1} = \frac{0,097 \times 120}{\frac{276 \text{ A}}{86,6 \text{ A}} - 1}$$

$$LTI \text{ tahap 1} = 5,322 \text{ detik atau } 5322 \text{ ms}$$

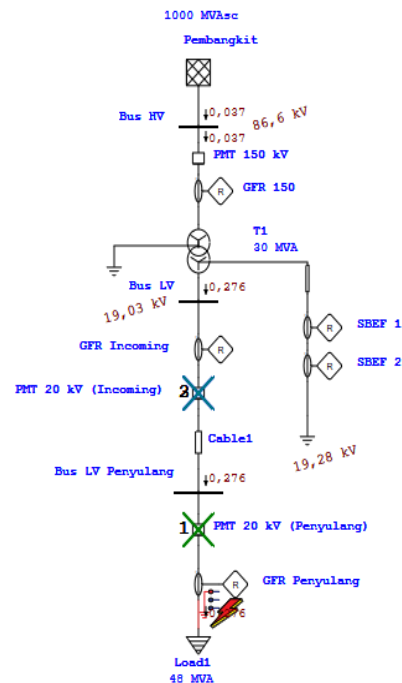
$$LTI \text{ tahap 2} = \frac{0,117 \times 120}{\frac{276 \text{ A}}{86,6 \text{ A}} - 1}$$

$$LTI \text{ tahap 2} = 6,419 \text{ detik atau } 6419 \text{ ms}$$

Berdasarkan hasil perhitungan setting waktu kerja aktual relai didapat hasil sebesar 5,322 detik untuk tahap 1 dan 6,419 detik untuk tahap 2 dari relai SBEF. Waktu kerja aktual ini menunjukkan relai akan bekerja (*trip*) bila arus hubung singkat melewati nilai setting arus CT lebih dari 5,322 detik.

D. Simulasi Koordinasi antara Relai Proteksi SBEF dengan GFR sisi 150 kV dan 20 kV pada Transformator Menggunakan Aplikasi ETAP 16.0.0

Simulasi gangguan dimulai dari sisi penyulang (*Outgoing*) untuk melihat relai apa yang bekerja dan seberapa cepat responnya terhadap gangguan apabila diberi gangguan arus hubung singkat *phase – ground*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Simulasi Gangguan Arus Hubung Singkat *phase – ground* di sisi Penyulang (*Outgoing*)

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
452	GFR Penyul...	0,276	452		Ground - OC1 - 51
452	PMT 20 kV ...		0,0		Tripped by GFR Penyulang Ground - OC1 - 51
722	GFR Incoming	0,276	722		Ground - OC1 - 51
722	PMT 20 kV ...		0,0		Tripped by GFR Incoming Ground - OC1 - 51
5326	SBEF 1	0,276	5326		Ground - OC1 - 51
5326	PMT 20 kV ...		0,0		Tripped by SBEF 1 Ground - OC1 - 51
6424	SBEF 2	0,276	6424		Ground - OC1 - 51
6424	PMT 150 kV		10,0		Tripped by SBEF 2 Ground - OC1 - 51

Gambar 7. Tampilan *Sequence Viewer*

Berdasarkan Gambar 6 dan 7 dapat diketahui bahwa ketika diberi gangguan 1 fasa ke tanah pada sisi penyulang 20 kV, relai GFR akan bekerja terlebih dahulu untuk memisahkan bagian yang terganggu dengan bagian yang tidak terganggu, kemudian disusul relai SBEF ketika relai GFR gagal mentripping PMT. Hal tersebut sesuai dengan peran relai SBEF sebagai *back-up protection* yang menggunakan karakteristik *Long Time Inverse* sehingga relai akan bekerja paling terakhir.

E. Perbandingan Hasil Teori dan Simulasi Setting Relai Proteksi SBEF

Hasil simulasi pada gambar 7 dapat diketahui perbandingan antara hasil simulasi dan teori untuk mengetahui persentase kesalahan dari *setting* yang digunakan.

1. Perbandingan relai SBEF tahap 1

$$\text{Persentase kesalahan} = \frac{\text{Hasil uji - teori}}{\text{teori}} \times 100\%$$

$$\text{Persentase kesalahan} = \frac{5,326 - 5,322}{5,322} \times 100\% = 0,075\%$$

2. Perbandingan relai SBEF tahap 2

$$\text{Persentase kesalahan} = \frac{\text{Hasil uji - teori}}{\text{teori}} \times 100\%$$

$$\text{Persentase kesalahan} = \frac{6,424 - 6,419}{6,419} \times 100\% = 0,077\%$$

Berikut ini Tabel 4. Perbandingan antara hasil simulasi dan teori relai SBEF dua tahap.

Tabel 4. Perbandingan Hasil Simulasi dan Teori Relai

Relai SBEF	Hasil Simulasi	Teori	%Error
1. Tahap satu	5,326 detik	5,322 detik	0,075%
2. Tahap dua	6,424 detik	6,419 detik	0,077%

SBEF

Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat perbandingan hasil simulasi dengan teori pada relai SBEF 2 tahap didapatkan tidak jauh berbeda dengan persen *error* untuk tahap 1 sebesar 0,075% dan untuk tahap 2 sebesar 0,077%.

V. KESIMPULAN

1. Maksimum besarnya arus hubung singkat 1 fasa ke tanah di bus 20 kV sebesar 288,269 Ampere. Sedangkan *setting* dari Relai SBEF dua tahap memiliki arus kerja 86,6 Ampere. Perbedaan antara tahap 1 dan tahap 2 hanya pada tms (*Time Multiple Second*) nya. Untuk tahap 1 memiliki tms 0,097 dan untuk tahap 2 memiliki tms 0,117.
2. Hasil simulasi rangkaian pada aplikasi ETAP 16.0.0 jika terjadi gangguan satu fasa ke tanah sebesar 276 A, maka ada 3 relai proteksi cadangan transformator yang berkoordinasi yaitu SBEF, GFR sisi *incoming* dan GFR sisi *outgoing*. Relai tersebut bekerja secara bertahap tergantung dari lokasi gangguannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik berkat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh staf pengajar Politeknik Negeri Ujung Pandang yang telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Terima kasih kepada teman-teman program studi D4

Teknik Listrik yang telah membantu pada penyelesaian penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Asrida, Andi Yusril. 2020. Penerapan Fungsi Dua Tahap pada Relai SBEF Transformator 60 MVA Gardu Induk Sungguminasa. Makassar : Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- [2] PT. PLN (Persero). Proteksi dan Kontrol Transformator. Kebayoran Baru, Jakarta: 2014.
- [3] Jr. Stevenson, “Analisis Sistem Tenaga Listrik”, Jakarta : Erlangga, 1984.
- [4] Badri Ram. D.N Vishwakarma. 2007. Power System Protection and Switchgear 22nd. New Delhi. Tata McGraw-Hill.
- [5] Anom Astana Ady, I.K. Studi Pengaruh *Setting* Rele Pengaman Untuk Meminimalkan Gangguan *Sympathetic Trip* Pada Penyulang Bunisari-Suwung. Jurnal Teknologi Elektro, Vol.15 No.2, Juli-Desember 2016.
- [6] Ramadhan, Muhammad Zakiy. 2009. *Netral Grounding Resistor*. Laporan Mingguan OJT PT PLN Sektor Asam-Asam Wilayah Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah.
- [7] PT. PLN (Persero). 2014b. Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga. Jakarta : PT. PLN (Persero).
- [8] Pradnya, M.A. Studi Analisis Dampak Pemasangan Over Load Shedding Terhadap Pembebanan Pada Saluran Transmisi 150 kV Di Bali. Jurnal Teknologi Elektro, Vol.16, No.1, Januari-April 2017.
- [9] Sarimun. 2014. Buku Saku Pelayanan Teknik (Yantek). Edisi Ketiga. Kota Depok, Penerbit: Garamod.
- [10] Karyana. 2013. Pedoman Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali. Jakarta : PT. PLN (Persero).