

## ANALISIS SISTEM PENGAMAN UTAMA UNTUK MENGAMANKAN BUSBAR 150 kV TERHADAP GANGGUAN DI GIS PECATU

Made Niken Ayu Larasati Danianto<sup>1</sup>, I Gede Dyana Arjana<sup>2</sup>, Cok. Gede Indra Partha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro Falkutas Teknik, Universitas Udayana

Email : [larasatiniken46@gmail.com](mailto:larasatiniken46@gmail.com)<sup>1</sup>, [dyanaarjana@unud.ac.id](mailto:dyanaarjana@unud.ac.id)<sup>2</sup>, [cokindra@unud.ac.id](mailto:cokindra@unud.ac.id)<sup>3</sup>

### ABSTRAK

GIS (*Gas Insulated Switchgear*) merupakan sistem penghubung dan pemutus jaringan listrik yang dikemas dalam sebuah tabung nonferro, menggunakan bahan gas sulphurhexafluoride (SF6) sebagai media isolasinya. GIS Pecatu bertegangan 150 kV terletak di Desa Pecatu, Kuta Selatan, Kabupaten Badung, Provinsi Bali ini dibangun untuk membantu mensuplai energi sebesar 120 MW karena beban di daerah Badung khususnya Pecatu dan Nusa Dua meningkat. Sehingga diperlukan untuk mengetahui *setting* arus rele diferensial saat terjadi gangguan hubung singkat di GIS Pecatu agar menghasilkan sistem pengaman yang efektif, selektif dan handal.

Sistem pengaman utama busbar menggunakan rele diferensial sudah sesuai dengan karakteristik *Instantaneous*. Saat terjadi gangguan arus hubung singkat sebesar 11,58 kA rele akan langsung bekerja dalam 0 SI, ini membuktikan bahwa rele diferensial akan langsung memerintahkan trip saat nilai arus gangguan hubung singkat sudah memasuki nilai yang *disetting*. Sehingga, dari hasil perhitungan *setting* koordinasi rele pengaman utama telah bekerja sesuai dengan standar SPLN No 52-1 1984 untuk sistem 150 kV.

**Kata Kunci** : Busbar, Arus Hubung Singkat, Rele Diferensial

### ABSTRACT

GIS (*Gas Insulated Switchgear*) is a system of connecting and disconnecting the power grid which is packaged in a non-ferrous tube, using gaseous sulfur hexafluoride (SF6) as the insulation medium. The 150 kV of GIS Pecatu is located in Pecatu Village, South Kuta, Badung Regency, Bali Province. This GIS was built to help supply 120 MW of energy because of the load in Badung area, especially Pecatu and Nusa Dua, is increasing. So, it is necessary to know the differential relay current settings when there is a fault of short circuit in GIS Pecatu to produce an effective, selective and reliable safety system.

When there is a fault of 11.58 kA the relay will work immediately within 0 SI, this proves that the differential relay with *Instantaneous* characteristics will immediately command a trip when the fault current has surpass the set value. From the calculation results, the setting of the main safety relay has worked in appropriate with the SPLN standard No. 52-1 1984 for the 150 kV system.

**Key Words** : Busbar, Short Circuit, Differential Relay

### 1. PENDAHULUAN

GIS (*Gas Insulated Switchgear*) merupakan sistem penghubung dan pemutus jaringan listrik yang menggunakan media isolasi gas sulphurhexafluoride (SF6). GIS Pecatu bertegangan 150 kV terletak di Pecatu, Provinsi Bali dibangun untuk membantu mensuplai energi sebesar 120 MW karena beban di daerah Badung khususnya Pecatu dan Nusa Dua meningkat. Busbar adalah bagian utama yang berpengaruh pada kinerja GIS karena sebagai tempat terhubungnya semua bay

pada GIS tersebut. Busbar tidak terlepas dari gangguan terputusnya saluran daya yang dapat mengakibatkan kontinuitas aliran daya di GIS terganggu. Sehingga busbar diberi sistem pengaman yang disebut pengaman busbar.

Pengaman busbar adalah pengaman penting dalam mengamankan gangguan, dalam pengoperasiannya pengaman busbar harus bersifat sensitif, selektif, dan dapat bekerja dengan cepat (Purnawan, 2015).

GIS Pecatu menggunakan konfigurasi *double busbar*, menyalurkan energi listrik

dari GIS Bandara Ngurah Rai menuju GIS Pecatu, dan dari GI Nusa Dua menuju GIS Pecatu, mempunyai 2 unit transformator tenaga dengan masing - masing kapasitas 60 MVA, digunakan untuk mensuplai beban di daerah Pecatu dan Nusa Dua. Dengan pengamanan utama karena Relay Diferensial karena dinilai sangat selektif, lebih sensitif dan sistem kerjanya sangat cepat. Sehingga Relay Differensial digunakan sebagai pengamanan utama yang berfungsi untuk mengamankan busbar dari gangguan arus lebih atau hubung singkat yang terjadi saat penyaluran tenaga listrik menuju GIS.

**2. TINJAUAN PUSTAKA**

**2.1 Gas insulated substation (GIS)**

GIS adalah sistem penghubung dan pemutus jaringan listrik sebagai peralatan yang terpasang dari beberapa rangkaian dalam sebuah metal enclosure yang menggunakan media isolasi gas sulphurhexaflouride (SF6).

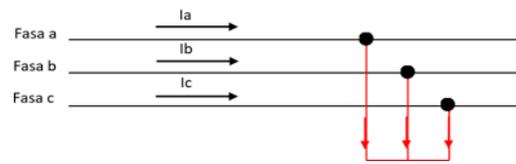
**2.2 Busbar**

Konduktor logam tembaga atau aluminium berbentuk persegi panjang. Busbar merupakan salah satu bagian utama gardu induk berfungsi sebagai tempat terhubungnya semua bay.

**2.3 Gangguan Hubung Singkat**

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi akibat adanya sentuhan antara fasa dengan fasa atau fasa dengan tanah tanpa melalui resistor/beban, sehingga terjadi aliran arus yang tidak normal. Gangguan hubung singkat diklasifikasikan menjadi dua macam, yaitu gangguan hubung singkat simetri dan asimetri.

Gangguan hubung singkat yang terjadi pada semua fasa sehingga arus maupun tegangan pada tiap fasa tetap seimbang setelah terjadi gangguan disebut gangguan simetri, terdiri dari gangguan hubung singkat tiga fasa, gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.



Gambar 1. Pemodelan Hubung Singkat Tiga Fasa (Sumber:Fauzi, Arjana dan Partha, 2020)

**2.3.1 Perhitungan Arus Hubung Singkat 150 kV**

Dalam mencari arus hubung singkat perlu mengetahui impedansi sumber dan arus pembangkit, dapat dicari dengan menggunakan persamaan dibawah.

Menghitung impedansi sumber data yang diperlukan adalah data level tegangan 150 kV dan arus sumber dengan persamaan: (Julian, 2012)

$$Z_{base} 150 kV \frac{(V_{base})^2}{S_{base}} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

Z<sub>base</sub> = Impedansi sumber (Ω)

V<sub>base</sub> = Tegangan sumber (kV)

S<sub>base</sub> = Arus (MVA)

Arus pembangkit atau sumber dapat dihitung dengan menggunakan persamaan: (Julian, 2012)

$$I_{base} 150 kV \frac{S_{base}}{V_{base} \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

I<sub>base</sub> 150 kV = Arus pembangkit atau sumber (A)

Arus hubung singkat di sistem rele pengamanan pada gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa ke tanah dapat dihitung dengan persamaan: (Manurung, 2012)

- Gangguan hubung singkat 3 fasa pada sisi 150 kV

$$I_{fault 3 fasa} = \frac{S}{Z_1} \times I_{base} 150 kV \dots\dots(3)$$

- Gangguan hubung singkat 2 fasa pada sisi 150 kV

$$I_{fault 2 fasa} = \frac{S}{2 \times Z_1} \times I_{base} 150 kV \dots\dots(4)$$

- Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada sisi 150 kV

$$I_{fault 1 \phi-tanah} = \frac{S}{2 \times Z_1 + Z_0} \times I_{base} 150 kV \dots\dots(5)$$

Keterangan:

$I_{\text{fault } 3\text{fasa}}$  = Arus hubung singkat tiga fasa di sisi 150 kV

$I_{\text{fault } 2\text{fasa}}$  = Arus hubung singkat dua fasa di sisi 150 kV

$I_{\text{fault } 1\text{fasa-tanah}}$  = Arus hubung singkat satu fasa ke tanah di sisi 150 kV

$Z_1$  = Impedansi tiga fasa

$Z_2$  = Impedansi dua fasa

$Z_0$  = Impedansi total satu fasa ke tanah

## 2.4 Sistem Pengaman Tenaga Listrik

Sistem pengaman tenaga listrik berfungsi untuk mengidentifikasi gangguan dan memisahkan dan mengamankan bagian sistem yang tidak terganggu. Sistem pengaman dibagi dua bagian yaitu pengaman utama, merupakan pengaman paling penting di daerah yang dilindungi.

Pengaman utama harus lebih selektif dan cepat mengisolasi sistem dari gangguan. Sedangkan pengaman cadangan bekerjanya lebih lambat dari pengaman utama. Pengaman cadangan bekerja jika pengaman utama gagal beroperasi.

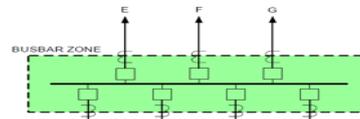
### 2.4.1 Syarat Pengaman

Untuk menjamin kestabilan kerja dalam operasional, sistem pengaman harus memenuhi persyaratan cepat yaitu kecepatan bereaksi *relay* dalam merasakan gangguan, selektif untuk menentukan pengaman secara keseluruhan, sensitif bekerja dengan kepekaan tinggi dengan sistem yang sederhana dengan biaya ekonomis tanpa mengabaikan persyaratan.

### 2.4.2 Sistem Pengaman Busbar

Sistem pengaman busbar meliputi transformator arus (CT), *relay* pengaman, pemutus tenaga (PMT), catu daya, rangkaian pengawatannya dan harus memenuhi syarat kecepatan, keandalan, dan keamanan. Menurut (PT.PLN (Persero), 2014) daerah kerja pengaman busbar di antara semua trafo arus (CT) bay

yang tersambung di busbar. Sistem pengaman busbar harus bekerja *instantaneous* jika terjadi gangguan di dalam zona pengamanannya (area warna hijau). Gangguan yang terjadi di luar zona pengamanannya (di luar area warna hijau), pengaman busbar tidak boleh bekerja (*relay* harus stabil).



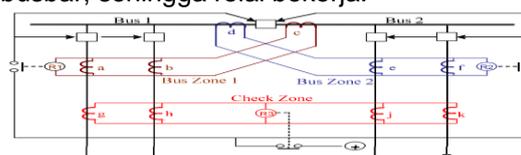
Gambar 2. Daerah Pengaman Busbar (Sumber: PT. PLN (persero), 2014)

## 2.5 Rele Diferensial

Rele diferensial digunakan sebagai pengaman utama busbar. Karena dapat memproteksi gangguan dalam busbar yang diproteksi internal. Agar terhindar dari gangguan, rele *disetting* sesuai ketentuan yang sudah ditetapkan. Dua jenis rele diferensial yang biasa digunakan busbar yaitu rele diferensial impedansi tinggi dan rele diferensial dengan bias.

### 2.5.1 Prinsip kerja *relay* diferensial pada busbar

Menggunakan metode Merz-Price *Circulating Current* sebagai prinsip kerja rele diferensial busbar. Arus masuk dan arus keluar dari busbar dibandingkan satu sama lain. Tidak ada resultan arus yang mengalir jika terjadi gangguan diluar zona proteksi busbar sehingga relai tidak bekerja. Sebaliknya timbul resultan arus yang besar dan mengalir ke relai diferensial busbar apabila terjadi gangguan di dalam zona busbar, sehingga relai bekerja.



Gambar 3. Prinsip Kerja Diferensial Busbar (Sumber: PT. PLN (persero), 2013)

*Bus zone* adalah komponen penyusun sistem proteksi diferensial busbar

berfungsi menentukan busbar yang terganggu. Satu zona mengamankan satu busbar, bus zone 1 meliputi CT a, CT b, dan CT c, Bus zone 2 meliputi CT d, CT e dan CT f. *Check Zone* berfungsi memastikan rele proteksi busbar bekerja dengan benar saat terjadi gangguan internal. *Check zone* membandingkan semua arus pada *bay* yang tersambung dalam GI tanpa membandingkan arus pada *bus coupler*. *Check Zone* meliputi CT g, CT h, CT j, dan CT k.

**2.5.2 Prinsip dasar perhitungan setting arus rele pengaman**

Dengan memperhatikan arus *pick up* dan arus kembali untuk menghitung *setting* arus rele. Arus *pick up* adalah nilai arus mengalir saat rele bekerja dan menutup kontak. Arus *drop off* adalah nilai arus mengalir pada rele, sehingga rele berhenti bekerja. Biasanya perbandingan antara besarnya arus *drop off* dan arus *pick up* dinyatakan dengan  $K_d$ , sehingga:

$$K_d = \frac{I_d}{I_p} \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan :

- $K_d$  = Faktor arus kembali
- $I_d$  = Arus kembali (arus *drop off*).
- $I_p$  = Arus kerja (arus *pick up*)

Rele dengan karakteristik waktu arus tertentu mempunyai nilai  $K_d$  0,7 – 0,9 sedangkan karakteristik waktu terbalik mempunyai nilai 1,0. Kaidah penyetelan rele sebagai berikut:

Pada keadaan beban maksimum rele tidak boleh bekerja. Dalam beberapa hal, arus nominal trafo arus (CT) adalah arus maksimumnya, sehingga penyetelan arusnya:

$$I_{set} = \frac{K_{fk}}{K_d} \times I_{nom} \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan :

- $I_{set}$  = Setelan arus
- $K_{fk}$  = Faktor keamanan, dengan nilai 1,1 - 1,25
- $K_d$  = Faktor arus kembali

$I_{nom}$  = Arus maksimum yang diijinkan untuk peralatan yang diamankan

**2.5.3 Prinsip dasar perhitungan setting rele pengaman**

Penyetelan arus rele umumnya didasarkan pada penyetelan batas minimumnya. Untuk mensetting waktu tunda ( $t_d$ ) rele, harus diketahui data berikut: (PT.PLN (Persero), 2013)

1. Besaran arus hubung singkat ( $I_f$ ).
2. Penyetelan / *setting* arusnya ( $I_s$ ).
3. Kurva karakteristik rele yang dipakai.

Sehingga waktu waktu tunda ( $t_d$ ) dicari dengan persamaan :

$$t_d = \frac{(I_f/I_{set})^{0,02} - 1}{0,14} \times T \dots\dots\dots(8)$$

Keterangan :

- $I_f$  = Arah arus gangguan hubung singkat dua *phase*.
- $t$  = Waktu kerja rele yang dikehendaki

**3. METODOLOGI PENELITIAN**

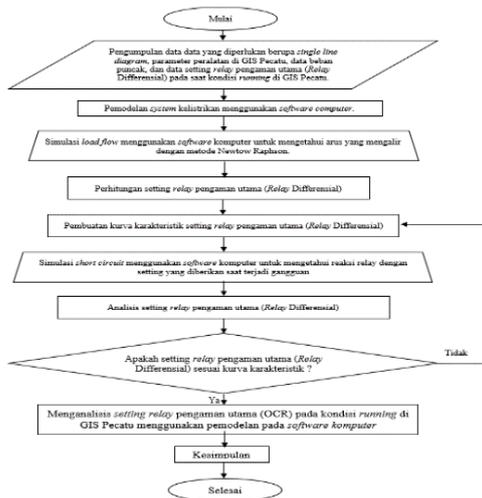
**3.1 Tahapan Penelitian**

Tahapan penelitian yang ditempuh meliputi :

1. Melakukan observasi pada lokasi peneltian mengenai pengaman utama busbar 150 kV di GIS Pecatu.
2. Mencari data spesifikasi, karakteristik rele, jenis penghantar yang digunakan, panjang saluran, dan *single line diagram* GIS Pecatu.
3. Melakukan simulasi *load flow* menggunakan *software* komputer agar mengetahui arus yang mengalir dengan menggunakan metode Newton Raphson.
4. Menghitung *setting* arus rele pengaman utama (rele diferensial) di GIS Pecatu.
5. Melakukan simulasi *short circuit* menggunakan *software* komputer untuk mengetahui reaksi rele pengaman utama (rele diferensial) terhadap *setting* yang diberikan saat terjadi gangguan.
6. Melakukan analisis rele pengaman utama (rele diferensial).

7. Memastikan setting rele pengaman utama (rele diferensial) sudah sesuai dengan karakteristik *setting* rele pengaman utama (rele diferensial)
8. Melakukan analisis *setting* rele pengaman utama (rele diferensial) saat kondisi *running* di GIS Pecatu menggunakan pemodelan pada *software* komputer.

### 3.1 Alur Penelitian

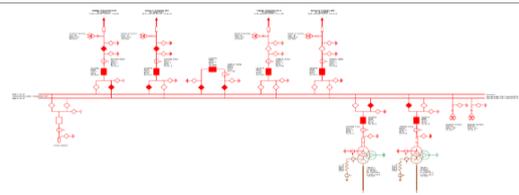


Gambar 4. Flowchart Analisa Data

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Gambaran Umum GIS Pecatu

GIS Pecatu menggunakan konfigurasi *double* busbar. Menyalurkan energi listrik dari bandara Ngurah Rai ke GIS Pecatu dan dari GI Nusa Dua ke GIS Pecatu. Pengaman utama busbar adalah rele diferensial berfungsi untuk mengamankan busbar dari gangguan kelebihan arus atau hubung singkat. GIS Pecatu mempunyai 2 unit transformator tenaga dengan kapasitas masing masing 60 MVA. GIS Pecatu terdiri dari 10 bay dengan 2 bay transformator, 1 bay *future* transformator, 4 bay line, dan 1 bay kopel. Bay Bandara 2 dan Bay Nusa Dua 2 hanya open CB dan dipersiapkan apabila Bay Bandara 1 dan Bay Nusa Dua 1 sudah maksimal dalam mengamankan beban. *Single line* diagram GIS Pecatu dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Single Line Diagram GIS Pecatu

### 4.2 Data – data Teknis yang Diperlukan dalam Penelitian

#### 4.2.1 Data spesifikasi teknis busbar, trafo, dan impedansi sistem kelistrikan di GIS Pecatu

Tabel 1. Spesifikasi Busbar di GIS Pecatu

Busbar	Merk Busbar	No. Serie
Busbar A	Siemens	8DN9
Busbar B	Siemens	8DN9

Sumber : PT. PLN (Persero)

Tabel 2. Spesifikasi Transformator di GIS Pecatu

Transformator Tenaga	Merk Transformator	Daya (MVA)	CT
Transformator 1	XD	60	4000/1
Transformator 2	XD	60	4000/1

Sumber : PT. PLN (Persero)

Tabel 3. Spesifikasi Impedansi Sistem Kelistrikan di GIS Pecatu

GI	Impedansi Urutan Positif		Impedansi Urutan Negatif		Impedansi Urutan Nol	
	R1(pu)	X1(pu)	R2(pu)	X2(pu)	R0(pu)	X0(pu)
Pecatu A	0,005304	0,036099	0,005304	0,036099	0,007254	0,030055
Pecatu B	0,005304	0,036099	0,005304	0,036099	0,007254	0,030055

Sumber : PT. PLN (Persero)

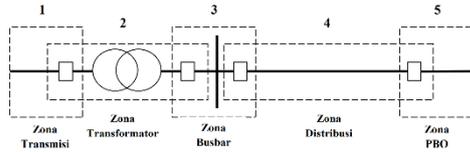
### 4.3 Arus Gangguan dan Koordinasi Rele Pengaman

Pengaman utama busbar GIS Pecatu adalah rele diferensial, perlu dihitung koordinasi peralatan supaya rele pengaman dapat memberikan perintah *trip* pada *tripping coil*. Data kapasistas arus hubung singkat pada pengantar 150 kV GIS Pecatu dan diagram komponen arus gangguan dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Data nilai arus hubung singkat pada busbar 150 kV GIS Pecatu

Busbar	If3ph Bus (kA)
Busbar 1	11.58
Busbar 2	11.58

Sumber : PT. PLN (Persero)



**Gambar 6.** Diagram Komponen Arus Gangguan  
Keterangan :

- Pemutus tenaga (PMT)
- 1. Zona pengaman transmisi
- 2. Zona pengaman transformator unit
- 3. Zona pengaman busbar
- 4. Zoba pengaman jaringan distribusi
- 5. Zona pengaman PBO

Dilakukan dengan menggunakan software ETAP PowerStation 7.5 untuk menjalankan simulasi *single line* diagram serta mengetahui aliran daya yang dihasilkannya.

**4.4 Hasil Simulasi Aliran Daya pada GIS Pecatu**

Berdasarkan hasil simulasi *single line diagram* dengan menggunakan software ETAP PowerStation diperoleh *loaf flow* pada GIS Pecatu dapat dilihat pada tabel 5.

**Tabel 5.** Data nilai aliran daya 150 kV GIS Pecatu

Lokasi	Busbar A (KVA)	Busbar B (KVA)
GIS Pecatu	32079	32079
GI Bandara – GIS Pecatu	16039	16039
GI Nusa Dua – GIS Pecatu	16040	16040

**4.5 Perhitungan Arus Gangguan Rele Diferensial Busbar**

Saat terjadi gangguan di busbar 150 kV GIS Pecatu, sangat diperlukan untuk mengetahui daerah kerja rele pengaman berdasarkan data arus hubung singkat maksimum busbar.

Untuk mempermudah perhitungan, nilai reaktansi yang per-unit (pu) diubah ke satuan ohm. Komponen yang dihitung dalam mencari arus gangguan pada rele pengaman adalah sebagai berikut:

1. Impedansi pembangkit atau sumber ( $Z_{base}$ )
2. Arus pembangkit atau sumber ( $I_{base}$ )

Berdasarkan komponen tersebut maka dasar perhitungan dapat dicari dengan persamaan:

$$Z_{base} 150 kV = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}} \dots\dots\dots(9)$$

$$Z_{base} 150 kV = \frac{(150 kV)^2}{150 MVA} = 150 ohm \dots\dots(10)$$

$$I_{base} 150 kV = \frac{S_{base}}{V_{base} \times \sqrt{3}} \dots\dots\dots(11)$$

$$I_{base} 150 kV = \frac{150 MVA}{150 kV \times \sqrt{3}} = 0,5773672 kA = 577.3672 A$$

Ketentuan perhitungan arus hubung singkat busbar 150 kV, data yang diperoleh adalah kondisi hubung singkat 3 fasa hanya mengalir arus urutan positif saja, dimana  $I_1=I$  fault 3 fasa, sedangkan  $I_2$  dan  $I_0=0$

Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya untuk menghitung arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat menggunakan persamaan :

$$I_{fault 3 fasa} = \frac{S}{Z_1} \times I_{base} 150 kV \dots\dots\dots(11)$$

Langkah 1. Menghitung impedansi total dengan reaktansi yang masih dalam satuan per-unit (pu) menjadi satuan ohm sebagai berikut :

**Tabel 6.** Nilai reaktansi dalam satuan per-unit GIS Pecatu

GIS	Impedansi Positif		Impedansi Negatif		Impedansi Nol	
	R <sub>1</sub> (pu)	X <sub>1</sub> (pu)	R <sub>2</sub> (pu)	X <sub>2</sub> (pu)	R <sub>0</sub> (pu)	X <sub>0</sub> (pu)
Pecatu	0,005304	0,036099	0,005304	0,036099	0,007254	0,030055

Sumber : PT. PLN (Persero)

Dengan persamaan  $z = \sqrt{R^2 + X^2}$  sehingga nilai reaktansi menjadi sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Impedansi Positif } (Z_1) &= \sqrt{R^2 + X^2} \\ &= \sqrt{0,005304^2 + 0,036099^2} \\ &= 0,03648 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Impedansi Negatif } (Z_2) &= \sqrt{R^2 + X^2} \\ &= \sqrt{0,005304^2 + 0,036099^2} \\ &= 0,03648 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Impedansi Nol } (Z_0) &= \sqrt{R^2 + X^2} \\ &= \sqrt{0,007254^2 + 0,030055^2} \\ &= 0,03139 \Omega \end{aligned}$$

**Tabel 7.** Nilai Reaktansi Dalam Satuan Ohm Pada GIS Pecatu

GIS	Impedansi Positif (Ohm)	Impedansi Negatif (Ohm)	Impedansi Nol (Ohm)
Pecatu	0,03648	0,03648	0,03091

Sehingga untuk mencari impedansi total pada masing-masing fasa dapat menggunakan persamaan " $Z_{total} = Z_{base} 150 \text{ kV} \times (\sqrt{R^2 + X^2})$ " sebagai berikut :

Pada impedansi urutan positif

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{base} 150 \text{ kV} \times (\sqrt{R^2 + X^2}) \\ &= 150 \Omega \times 0,03648 \Omega \\ &= 5,472 \Omega \end{aligned}$$

Pada impedansi urutan negatif

$$\begin{aligned} Z_2 &= Z_{base} 150 \text{ kV} \times (\sqrt{R^2 + X^2}) \\ &= 150 \Omega \times 0,03648 \Omega \\ &= 5,472 \Omega \end{aligned}$$

Pada impedansi urutan nol

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z_{base} 150 \text{ kV} \times (\sqrt{R^2 + X^2}) \\ &= 150 \Omega \times 0,03091 \Omega \\ &= 4,6365 \Omega \end{aligned}$$

Langkah 2. Berdasarkan hasil simulasi *single line* diagram GIS Pecatu (tabel 5), hasil aliran daya tersebut masih dalam satuan KVA, perlu diubah dalam satuan kilowatt dengan mengalikan *power factor* (PF) sebesar 85%. Sehingga diperoleh aliran daya dalam satuan watt pada tabel 8.

**Tabel 8.** Hasil aliran daya dalam satuan kilowatt

Lokasi	Busbar A (KW)	Busbar B (KW)
GIS Pecatu	27267,15	27267,15
GI Bandara – GIS Pecatu	13633,15	13633,15
GI Nusa Dua – GIS Pecatu	13634	13634

Langkah 3. Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya maka dapat dicari arus gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa ke tanah dengan persamaan :

$$\begin{aligned} I_{fault\ 3\ fasa} &= \frac{S}{Z_{1\ Total}} \times I_{base} 150 \text{ KV} \\ I_{fault\ 3\ fasa} &= \frac{27267,15}{5,472} \times 0,5773672 \\ I_{fault\ 3\ fasa} &= 2,878 \text{ kA.} \end{aligned}$$

Menggunakan persamaan yang sama untuk mencari arus gangguan hubung singkat 3 fasa pada Busbar A dan Busbar B.

**Tabel 9.** Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa

Lokasi	Busbar A (KW)	Busbar B (KW)
GIS Pecatu	2877,038	2877,038
GI Bandara – GIS Pecatu	1438,474	1438,474
GI Nusa Dua – GIS Pecatu	1438,568	1438,568

Sehingga dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa pada tabel 9 di atas dapat dijumlah dengan persamaan " $I_{fault\ Total} = I_{fault_1} + I_{fault_2} + I_{fault_3} + \dots$ " adalah 11508 A = 11.50 kA.

$$\begin{aligned} \% \text{ kesalahan} &= \frac{Y_{data} - Y_{perhitungan}}{Y_{data}} \times 100\% \\ &= \frac{11580 - 11508}{11580} \times 100\% \\ &= 0,006\% \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas didapat nilai persentase kesalahan senilai 0,006%.

Untuk arus gangguan hubung singkat 2 fasa pada GIS Pecatu:

$$\begin{aligned} I_{fault\ 2\ fasa} &= \frac{S}{2 \times Z_{1\ Total}} \times I_{base} 150 \text{ KV} \\ I_{fault\ 2\ fasa} &= \frac{27267,15}{2 \times 5,472} \times 0,5773672 \\ I_{fault\ 2\ fasa} &= \frac{27267,15}{10,944} \times 0,5773672 \\ &= 1438,519 \text{ A} \end{aligned}$$

**Tabel 10.** Hasil perhitungan gangguan arus hubung singkat 2 fasa

Lokasi	Busbar A (KW)	Busbar B (KW)
GIS Pecatu	1438,519	1438,519
GI Bandara – GIS Pecatu	719,237	719,237
GI Nusa Dua – GIS Pecatu	719,282	719,282

Sehingga dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 2 fasa pada tabel 10 di atas dapat dijumlah dengan persamaan " $I_{fault\ Total} = I_{fault_1} + I_{fault_2} + I_{fault_3} + \dots$ " adalah 5754,08A = 5.754 kA. Besar gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} I_{fault\ 1\ \emptyset\ ke\ tanah} &= \frac{S}{2 \times Z_{1\ Total} + Z_{0\ Total}} \times I_{base} 150 \text{ KV} \\ &= \frac{27267,15}{2 \times 5,472 + 4,6365} \times 0,5773672 \\ &= \frac{27267,15}{15,5805} \times 0,5773672 \\ &= 1010,439 \text{ A.} \end{aligned}$$

**Tabel 11.** Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Lokasi	Busbar A (KW)	Busbar B (KW)
GIS Pecatu	1010, 439	1010, 439
GI Bandara – GIS Pecatu	505,204	505,204
GI Nusa Dua – GIS Pecatu	505,235	505,235

Sehingga dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah pada tabel 11 di atas dapat dijumlah dengan persamaan “ $I_{\text{fault Total}} = I_{\text{fault}_1} + I_{\text{fault}_2} + I_{\text{fault}_3} + \dots$ ” adalah 4041.756 A = 4.041 kA.

#### 4.6 Perhitungan Setting pada Rele Differensial

##### 4.6.1 Analisis setting arus rele differensial

Berdasarkan data arus pada saat kondisi normal rele differensial pada busbar di GIS Pecatu dapat dilihat arus masuk dan keluar pada tabel 12 dibawah ini

**Tabel 12.** Data CT pada bay Busbar GIS Pecatu

No.	Komponen Busbar	CT	Jenis
1.	Busbar A	4000/1	Siemens
2.	Busbar B	4000/1	Siemens

**Tabel 13** Data setting arus pada bay Busbar saat kondisi normal

No.	Komponen Busbar	Busbar A		Busbar B	
		$I_{in}$ (ampere)	$I_{out}$ (ampere)	$I_{in}$ (ampere)	$I_{out}$ (ampere)
1.	GIS Pecatu	3209	3209	3209	3209

Berdasarkan tabel 13 maka untuk mencari arus keluar saat terjadi gangguan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{out} = \left( \frac{1,25 \times I_{in}}{CT} \right) \times CT$$

$$= \left( \frac{1,25 \times 3209}{\frac{4000}{1}} \right) \times \frac{4000}{1}$$

$$I_{out} = 4011,25 A$$

Dari hasil perhitungan di atas diperoleh setting arus keluar rele differensial sebesar 4011,25 A, dengan cara yang sama untuk mencari setting arus keluar saat terjadi gangguan yang terhubung pada GIS Pecatu dapat dilihat dalam tabel 14 berikut:

**Tabel 14.** Hasil perhitungan setting arus keluar saat terjadi gangguan

No.	Lokasi GI	Busbar A		Busbar B	
		$I_{in}$ (ampere)	$I_{out}$ (ampere)	$I_{in}$ (ampere)	$I_{out}$ (ampere)
1.	GIS Pecatu	3209	4011,25	3209	4011,25

##### 4.6.2 Analisis perhitungan waktu tunda rele differensial

Untuk menentukan hasil waktu tunda yang dibutuhkan dalam penyetelan rele differensial, terlebih dahulu harus mengetahui besarnya arus gangguan 3 fasa. Sehingga untuk mencari setting waktu tunda rele differensial, dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$T_{tunda} = \frac{\left( \frac{I_{\text{fault } 3 \text{ fasa}} \times 0,866}{I_{out}} \right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t$$

$$= \frac{\left( \frac{11508 \times 0,866}{4011,25} \right)^{0,02} - 1}{0,14} \times 0$$

$$T_{tunda} = 0 SI$$

Dari hasil perhitungan di atas diperoleh setting waktu tunda rele differensial sebesar 0 SI, dapat dilihat pada tabel 15 sebagai berikut:

**Tabel 15.** Hasil perhitungan waktu tunda rele differensial

No.	Lokasi GIS	$T_{tunda}(SI)$	
		Busbar A	Busbar B
1	Pecatu	0	0

##### 4.6.3 Analisis perhitungan setting rele differensial

Untuk menentukan hasil penyetelan rele differensial busbar, terlebih dahulu harus mengetahui besarnya arus gangguan 3 fasa dan hasil perhitungan waktu tunda. Sehingga untuk mencari setting rele differensial dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$T = \frac{0,14}{\left( \frac{I_{\text{fault } 3 \text{ fasa}} \times 0,866}{I_{out}} \right)^{0,02} - 1} \times T_{tunda}$$

$$T = \frac{0,14}{\left( \frac{11508 \times 0,866}{4011,25} \right)^{0,02} - 1} \times 0$$

$$T = 0 \text{ detik}$$

Dari hasil perhitungan di atas diperoleh setting rele differensial sebesar 0 detik, dengan cara yang sama untuk setting

saluran transmisi yang terhubung GIS Pecatu dapat dilihat pada tabel 16.

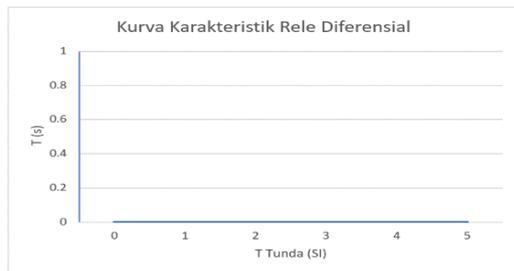
Tabel 16. Hasil perhitungan setting rele diferensial

No.	Lokasi GIS	$I_{out}$ (Ampere)		T (detik)	
		Busbar A	Busbar B	Busbar A	Busbar B
1.	GIS Pecatu	3209	4011,25	0	0

Sehingga, analisis dari hasil perhitungan setting rele diferensial yang sudah dilakukan sebelumnya bahwa untuk nilai setting koordinasi rele pengaman pada busbar sudah memenuhi standar dari ketentuan SPLN No52-1 1984 untuk sistem 150 kV.

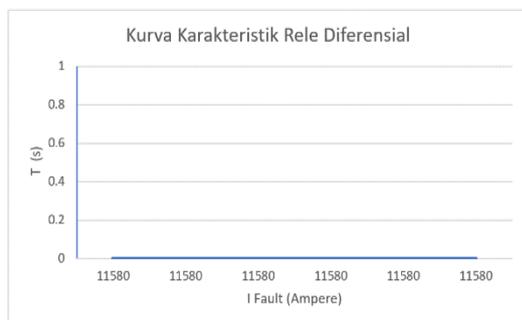
#### 4.6.4 Kurva Karakteristik Rele Diferensial

Berdasarkan nilai T dan T Tunda, maka didapatkan kurva sebagai berikut.



Gambar 7. Perbandingan T dengan T Tunda

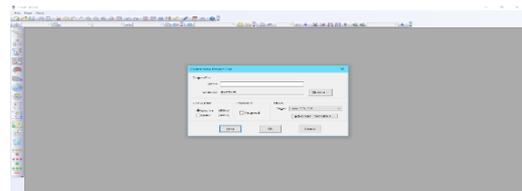
Berdasarkan gambar 7 dapat dilihat bahwa nilai T adalah 0 detik dan T tunda adalah 0 SI, hal ini sesuai dengan karakteristik diferensial rele, *instantaneous*.



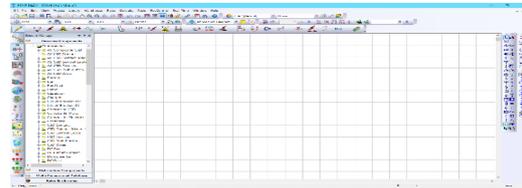
Gambar 8. Perbandingan T dengan I Fault

#### 4.7 Simulasi Short Circuit 3 Phasa

Langkah pertama untuk menganalisis aliran daya adalah dengan membuat file yang baru

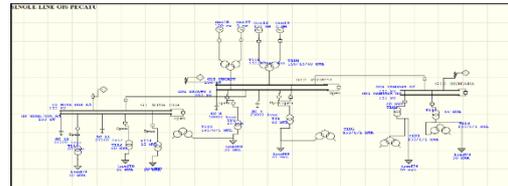


Gambar 9. Menu utama ETAP PowerStation



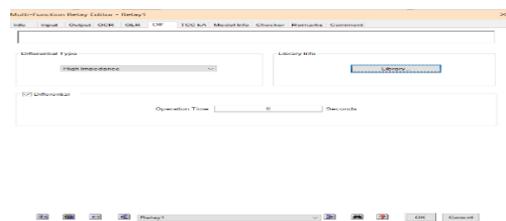
Gambar 10. Menu drawing ETAP PowerStation

Dilanjutkan dengan mensimulasikan *single line* diagram dengan menggunakan fasilitas katalog yang berada pada posisi kanan.

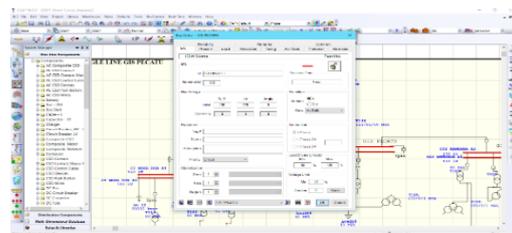


Gambar 11. Single Line simulasi pada ETAP

Setelah selesai menggambar *single line diagram*, maka dilanjutkan dengan memasukkan data-data pada setiap komponen yang disesuaikan dengan data yang diperoleh di PT PLN (Persero).



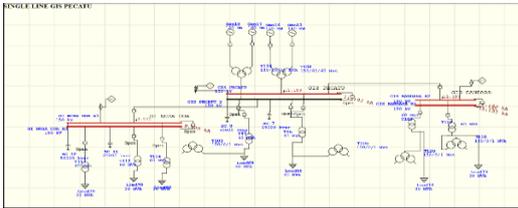
Gambar 12. File data pada ETAP PowerStation



Gambar 13. File setting waktu ETAP PowerStation

Pada Gambar 13 setting dimasukan pada tab DIF dengan nilai *operation time* 0

detik. *Setting* input memakai standar yang biasanya mengacu standar IEC dan ANSI, frekuensi sistem dan menggunakan metode Newton Raphson, sehingga didapatkan nilai gangguan 3 Phasa yang dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. simulasi pada ETAP

Pada Gambar 14 menunjukkan hasil simulasi didapatkan nilai arus gangguan 3 phasa pada busbar bernilai 11,193. Persentase kesalahan dari hasil simulasi dengan hasil perhitungan dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \% \text{ kesalahan} &= \frac{Y \text{ data} - Y \text{ perhitungan}}{Y \text{ data}} \times 100\% \\ &= \frac{11580 - 11193}{11580} \times 100\% \\ &= 0,03\% \end{aligned}$$

Analisis dari hasil perhitungan *setting* rele diferensial bahwa untuk nilai setting koordinasi rele pengaman pada busbar dan persentase kesalahan <1% sudah memenuhi standar dari ketentuan SPLN No52-1 1984 untuk sistem 150 kV.

## 5. SIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan yang telah dilakukan sebelumnya dapat diambil simpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan perhitungan *setting* rele diferensial pada sisi 150 kV waktu tunda rele bernilai 0 detik dan nilai waktu kerja aktual rele sebesar 0 detik. Karakteristik rele diferensial adalah *Instantaneous*.
2. Sistem pengaman utama busbar menggunakan rele diferensial sudah sesuai dengan karakteristik *Instantaneous*. Saat terjadi gangguan arus hubung singkat sebesar 11,58 kA rele akan langsung bekerja dalam 0 SI, ini membuktikan bahwa rele

diferensial akan langsung memerintahkan trip saat nilai arus gangguan hubung singkat sudah memasuki nilai yang disetting. Sehingga, dari hasil perhitungan *setting* koordinasi rele pengaman utama telah bekerja sesuai dengan standar SPLN No 52-1 1984 untuk sistem 150 kV.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fauzi, A., Arjana, I. G. D., Partha, C. G. I 2020, 'Perancangan sistem pengaman busbar 150 KV menggunakan rele *diferensial* di gardu induk Sanur', *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 7, no.2, pp. 101-108.
- [2] Laksana, I. P. D., Arjana, I. G. D., & Partha, C. G. I 2015, 'Studi analisis *setting backup* proteksi pada SUTT 150 KV GI Kapal – GI Pemecutan Kelod akibat *uprating* dan penambahan saluran', *E-Jurnal SPEKTRUM*, vol. 2, no.4, pp. 1-6.
- [3] PT.PLN(Persero) 2013, *Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali Edisi Pertama*.
- [4] PT.PLN(Persero) 2014, *Buku Pedoman Proteksi dan Kontrol Busbar, Proteksi dan Kontrol Busbar*. Jakarta.
- [5] Purnawan, I. M. D., Arjana, I. D., & Rinas, I. W. (2016). „Studi pengaman busbar pada gardu induk amlapura“. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol.15, no.1, pp. 38-41.
- [6] Titarenko-M and Inoskov, *Protection in Electric Power Sistem, Second Printing, Pease publisher, Moscow*.
- [7] Yoga, B. I. G. A., Hartati, R. S., Arjana, I. G. D 2015, *Studi Koordinasi Rele Pengaman Pada Sistem Busbar di Gardu Induk Kapal*. Skripsi Teknik Elektro.