

Studi *Setting* Relai Arus Lebih Sistem Proteksi Generator dan Transformator PLTA Bakaru Sebelum dan Setelah Masuknya PLTA Malea

Zaenab Muslimin
Departemen Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
zaenabandy@gmail.com

Aisya Nurjihan
Departemen Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
aisyanurjihan27@gmail.com

Abstract— Adanya penambahan pembangkit baru menyebabkan perubahan arus hubung singkat saat terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik yang membutuhkan peningkatan kinerja dari sistem proteksi, khususnya pada relai arus lebih (overcurrent relay). Penelitian ini membahas dampak penambahan pembangkit listrik pada sistem tenaga listrik dan perlunya penyesuaian setting relai arus lebih (overcurrent relay) pada sistem proteksi generator PLTA Bakaru sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea, dengan daya 2×45 MW, ke dalam sistem SULBAGSEL. Data yang digunakan berupa data sistem kelistrikan PT. PLN (Persero) UP2B Makassar, PT. PLN (Persero) UIKL Sulawesi, dan ULPLTA Bakaru. Studi ini melibatkan analisis simulasi aliran daya dan gangguan hubung singkat pada busbar Bakaru 150 kV dengan dua skenario kasus menggunakan program DigSilent. Kasus pertama membandingkan arus nominal dan setting relai arus lebih pada generator, sementara kasus kedua membandingkan arus hubung singkat pada busbar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa arus hubung singkat pada busbar Bakaru 150 kV sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea adalah 4,395 kA dan 4,421 kA, menunjukkan peningkatan yang signifikan. Selanjutnya, setting relai arus lebih pada generator PLTA Bakaru unit 1 dan unit 2 sebelum masuknya PLTA Malea adalah 3,34 kA dan 3,14 A, yang kemudian berkurang menjadi 3,15 A dan 2,97 A setelah masuknya PLTA Malea.

Kata-kata kunci:—PLTA Bakaru, PLTA Malea, Relai arus lebih, Sistem Proteksi.

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik merupakan salah satu bentuk energi yang paling populer dan paling penting dalam kehidupan manusia, karena dapat dengan mudah ditransformasikan menjadi bentuk energi yang lain dengan efisiensi tinggi, tetapi masih dalam batas biaya yang wajar [1]. Suatu sistem tenaga listrik tidak terlepas dari potensi gangguan yang dapat terjadi di berbagai tahapan, mulai dari pembangkitan, transmisi, hingga distribusi. Gangguan ini dapat menghentikan aliran daya dari pembangkit ke beban, menyebabkan kerugian finansial yang besar, dan bahkan merusak peralatan produksi. Oleh karena itu, sistem proteksi yang efektif menjadi kunci untuk melindungi peralatan dan menjaga kelancaran operasi sistem tenaga listrik [2].

Salah satu sistem proteksi yang umum digunakan pada sistem tenaga listrik adalah relai arus lebih. Relai arus lebih berguna untuk mengidentifikasi adanya kondisi abnormal saat terjadi gangguan hubung singkat dan menyampaikan perintah

peralatan pemutus agar memisahkan saluran yang terganggu dari sistem guna mencegah atau membatasi kerusakan jaringan beserta peralatannya yang dekat dengan gangguan dan menghindari terputusnya suplai daya listrik untuk daerah yang tidak terjadi gangguan. Relai arus lebih bekerja jika arus yang mengalir melewati nilai settingnya dari ambang batas [3].

Dalam gangguan hubung singkat, salah satu sumber terjadinya arus hubung singkat adalah generator dimana saat terjadi hubung singkat prime mover terus beroperasi dan eksitasi juga beroperasi untuk mempertahankan kecepatan putar dari prime mover tersebut [4]. Oleh karena itu, adanya penambahan pembangkit baru (generator) akan menyebabkan perubahan arus hubung singkat saat terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik. Untuk meningkatkan kinerja dari sistem proteksi, perlu dilakukan perhitungan pengaturan kembali terhadap setting relai pengaman khususnya pada relai arus lebih (overcurrent relay).

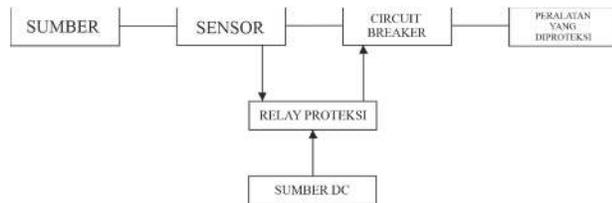
Penelitian ini mengeksplorasi potensi dampak yang timbul akibat penambahan pembangkit listrik baru terhadap suatu sistem tenaga listrik. Sistem yang dianalisis adalah generator Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA) Bakaru dengan kapasitas 2×63 MW. PLTA Bakaru menjadi pembangkit yang sangat diharapkan keandalannya untuk menyuplai listrik ke sistem interkoneksi 150 kV Sulawesi Selatan dan Sulawesi Barat. Analisis dilakukan dengan meninjau penambahan PLTA Malea berkapasitas 2×45 MW yang terinterkoneksi ke sistem SULBAGSEL sesuai dengan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN 2021-2030 [5]. Data sistem ketenagalistrikan yang relevan akan dianalisis diantaranya data sistem ketenagalistrikan PT. PLN (Persero) UP2B Makassar, PT. PLN (Persero) UIKL Sulawesi, dan ULPLTA Bakaru. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan penting tentang perubahan arus hubung singkat dan penyesuaian setting relai sebagai tanggapan terhadap penambahan pembangkit baru dalam sistem tenaga listrik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Proteksi mempunyai fungsi untuk mengamankan alat atau mesin yang digunakan pada suatu sistem tenaga listrik khususnya mengamankan dari arus gangguan yang dapat menyebabkan alat menjadi rusak. Sistem proteksi juga harus dapat menjaga keandalan sistem maupun kualitas penyaluran

daya yang terdapat di bagian yang tidak terganggu [2]. Filosofi dasar dari sistem proteksi adalah bagaimana melindungi sistem tenaga listrik dari akses gangguan yang terjadi pada sistem, dengan cara memisahkan gangguan tersebut dari sistem lainnya dengan cepat dan tepat. Kualitas dari sistem proteksi yang diinginkan adalah cepat, sensitif, selektif, dan andal. Selain itu juga dibutuhkan kualitas kesederhanaan dan ekonomis. Sistem proteksi bekerja dengan komponen-komponen yang saling terhubung membentuk suatu sistem proteksi. Adapun komponen-komponen dalam sistem proteksi dapat dilihat pada Gambar 1 [6].



Gambar 1. Komponen-komponen sistem proteksi

B. Gangguan Hubung Singkat

Terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh arus yang mengalir mempunyai nilai yang lebih besar melebihi kapasitas nilai arus maksimum yang diizinkan menuju ke titik gangguan yang kemudian akan menyebabkan kerusakan peralatan karena panas berlebih. Ketika arus hubung singkat terjadi akan mengalir arus yang sangat besar secara tiba-tiba dan cepat menuju ke titik gangguan. Besarnya nilai reaktansi rangkaian dan reaktansi sumber di titik gangguan akan mempengaruhi besarnya nilai arus yang mengalir. Terjadinya gangguan hubung singkat dapat mengakibatkan peralatan listrik akan menjadi rusak, stabilitas daya akan berkurang dan terganggunya penyaluran daya yang diakibatkan karena PMT atau CB (circuit breaker) terbuka [4]. Gangguan arus hubung singkat yang dapat terjadi pada generator adalah sebagai berikut [7]:

1) Hubung Singkat 3 Fasa

Terjadinya gangguan hubung singkat 3 fasa simetris akan menyebabkan kenaikan arus pada generator. Arus gangguan mengakibatkan terbakarnya isolasi yang pada akhirnya menimbulkan kerusakan yang fatal pada mesin. Besarnya arus gangguan ini tidak saja dipengaruhi oleh besarnya reaktansi-reaktansi generator tetapi juga oleh impedansi dari sistem tenaga, dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (1) berikut:

$$I_{hs} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_f} \quad (1)$$

2) Hubung Singkat 2 Fasa

Arus hubung singkat antar fasa tanpa dihubungkan ke tanah dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2) berikut:

$$I_{hs} = \frac{\sqrt{3} E_a}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

3) Hubung Singkat Satu Fasa Dengan Tanah

Gangguan ini karena satu buah fasa pada sistem tenaga listrik hubung singkat dengan tanah. Dapat dihitung dengan Persamaan (3) berikut:

$$I_{hs} = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (3)$$

Keterangan:

- I_{hs} = Arus hubung singkat
- E_a = Tegangan fasa netral
- Z_0 = Impedansi urutan nol
- Z_1 = Impedansi urutan positif
- Z_2 = Impedansi urutan negatif
- Z_f = Impedansi gangguan hubung singkat

C. Relai Arus Lebih

Relai arus lebih merupakan rangkaian peralatan relai pengamanan yang dapat memberikan respon terhadap kenaikan arus yang melewati nilai arus yang telah ditentukan rangkaian yang diamankan. Relai arus lebih merupakan relai pekerja yang tertuju pada arus lebih dan relai ini bekerja jika arus yang mengalir melewati nilai settingnya dari ambang batas. Ambang batas adalah arus yang ditetapkan dimana relai tidak boleh beroperasi di bawah settingannya dan di atasnya harus beroperasi [3].

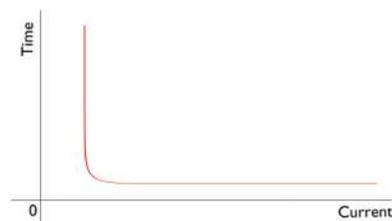
Prinsip kerja relai arus lebih ini bekerja pada arus lebih, relai akan bekerja apabila arus yang mengalir melewati nilai settingannya (I_s). Relai akan bekerja apabila memenuhi kondisi sebagai berikut:

- $I_f > I_p$ relai bekerja (trip)
- $I_f < I_p$ tidak bekerja (block)

I_p adalah arus kerja yang didapatkan dengan berdasarkan kumparan sekunder dari transformator arus (CT). Sedangkan I_f adalah arus gangguan yang juga didapatkan dengan berdasarkan kumparan sekunder CT. Relai arus lebih ini akan melindungi seluruh bagian pada sistem tenaga listrik misalnya jaringan transmisi, motor, generator, dan transformator. Jenis karakteristik relai arus lebih antara lain sebagai berikut [4]:

1) Relai waktu seketika (Instantaneous relay)

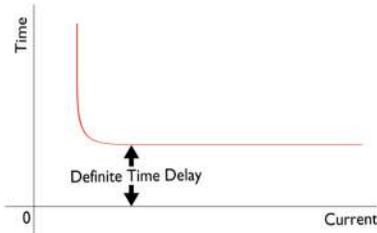
Relai akan beroperasi seketika (tanpa waktu tunda) ketika arus yang mengalir melebihi nilai settingnya maka relai akan bekerja dalam waktu beberapa mili detik (10 – 20 ms). Kurva karakteristik relai instantaneous dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Karakteristik Relai Waktu Seketika (Instantaneous Relay).

2) Relai arus lebih waktu tertentu (Definite time relay)

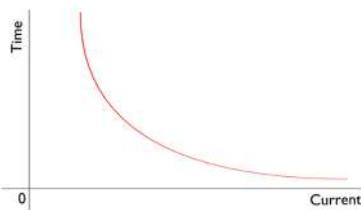
Relai akan memberikan perintah pada PMT ketika saat terjadinya gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melebihi nilai settingnya (I_s), dan jangka waktu kerja relai mulai pick up sampai kerja relai diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengerjakan rel. Kurva karakteristik relai definite dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Karakteristik Relai Waktu Tertentu (Definite time relay)

3) Relai arus lebih waktu terbalik (Inverse relay)

Relai akan beroperasi dengan waktu tunda yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (inverse time), semakin besar arus maka semakin kecil waktu tundanya. Karakteristik waktunya dibedakan dalam tiga kelompok yaitu standar invers, very inverse, dan extremely inverse. Kurva karakteristik relai invers dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Karakteristik Relai Waktu Terbalik (Inverse relay)

D. Setting Relai Arus Lebih

Setting arus input yaitu untuk menentukan seberapa besarnya arus (I). arus input berasal dari trafo arus (CT) yang bersangkutan dan nilainya tergantung terhadap keadaan sistem apakah keadaan normal atau ada gangguan. Pada saat ada gangguan besarnya arus bervariasi antara arus hubung singkat minimum atau arus hubung singkat maksimum. Setting arus input dipilih pada nilai arus (I_s). Jika besar arus melebihi I_s maka relai akan trip – Arus setting bisa diperoleh dengan memilih salah satu posisi sadapan arus (current tap) yang tersedia di relai.

Batas penyetelan relai arus lebih adalah relai tidak bekerja pada saat beban maksimum. Oleh karena itu, setting arusnya harus lebih besar dari arus beban maksimum. Bila dilihat dari kurva yaitu relai sebaiknya relai berada disebelah kanan kurva beban maksimum. Relai arus lebih memiliki setelan pickup dan setelan time dial. Pada relai arus lebih, besarnya arus pickup ini ditentukan dengan pemilihan tap. Adapun untuk menentukan besarnya tap yang digunakan dapat menggunakan rumus pada Persamaan (4) berikut:

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT\ primer} \quad (4)$$

Arus pick up atau arus kerja adalah nilai arus dimana relai harus bekerja dan menutup kontakannya sehingga waktu relai trip (bekerja) Menurut standar British BS 142 batas penyetelannya adalah 1.05-1.3 Iset. Koordinasi antara relai pengaman utama dan relai pengaman cadangan (backup) tidak boleh bekerja secara bersamaan. Untuk itu, diperlukan adanya time delay antara relai utama dan relai cadangan (backup). Time delay ini sering dikenal sebagai setelan setting kelambatan waktu (Δt) atau grading time. Perbedaan waktu kerja minimal antara relai utama dan relai backup

Berdasarkan standar IEEE Std 242-1986 (batas waktu kerja antara dua buah relai: 0,2 s – 0,4 s). Perhitungan setting relai arus lebih dapat dilihat pada Persamaan (5), (6), dan (7) di bawah ini [8]:

$$I_n = \frac{S}{V\sqrt{3}} \quad (5)$$

$$I_s\ Primer = 1,1 \times I_n \quad (6)$$

$$I_s\ Sekunder = I_s\ primer \times \frac{CT\ Sekunder}{CT\ Primer} \quad (7)$$

Keterangan:

- I_n = Aliran daya (A)
- S = Daya (KVA)
- V = Tegangan (KV)
- I_s = Arus setting relai(A)

E. Proteksi Generator

Untuk menjelaskan bentuk dan keadaan gangguan yang ada pada generator, maka perlu diketahui bahwa generator pada pembangkit mempunyai fungsi menghasilkan energi listrik. Untuk melakukan fungsinya akan sangat mungkin terjadi gangguan dari luar ataupun dari bagian dalam generator. Gangguan yang mungkin terjadi pada generator bisa disebabkan oleh hal-hal seperti hubung singkat antar fasa, hubung singkat fasa ke tanah, hubung singkat berbalikan dalam satu fasa, hubung singkat kumparan rotor ke tanah, beban lebih, panas berlebih pada kumparan, hilangnya medan penguat, atau bisa terjadi karena yang bekerja pada generator tersebut hanya satu fasa saja [9]. Ada beberapa jenis proteksi yang digunakan untuk mengamankan generator, antara lain:

- Proteksi Diferensial
- Proteksi Arus Lebih
- Proteksi Beban Lebih
- Proteksi Tegangan Lebih
- Proteksi Loss of Field
- Proteksi Frekuensi Lebih
- Proteksi Negative Phase Sequence

F. Software DigSilent

Program perhitungan DigSilent adalah program yang digunakan untuk analisis transmisi, distribusi, dan sistem tenaga listrik industri. DigSilent dirancang untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol agar mencapai tujuan utama dari perencanaan dan optimasi operasi. Digsilent merupakan kependekan dari “Digital Simulation of Electrical NeTworks”. DigSilent versi 7 adalah software analisis sistem tenaga pertama dengan Gambar single line yang terintegrasi.

DigSilent dirancang dan dikembangkan oleh engineer dan programmer yang berpengalaman di bidang elektrikal analisis sistem tenaga dan pemrograman. Keakuratan dan keabsahan hasil yang diperoleh dengan DigSilent telah digunakan dalam jumlah besar oleh organisasi meliputi perencanaan dan operasi sistem tenaga di seluruh dunia. Untuk mengatasi persyaratan analisis sistem tenaga, DigSilent dirancang sebagai peralatan engineering untuk

menyediakan analisis fungsi sistem tenaga dengan program single executable. Fitur-fitur meliputi [10]:

- Fungsi inti merupakan definisi, modifikasi, dan kasus-kasus; numerical routine inti dan fungsi dokumentasi.
- Single line graphic interaktif yang terintegrasi.
- Elemen sistem tenaga dan database kasus.
- Fungsi kalkulasi yang terintegrasi.
- Konfigurasi jaring sistem tenaga interaktif dan akses dengan Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA).
- Interface umum untuk komputer berbasis sistem mapping.

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan September 2022-Juni 2023. Data penelitian diperoleh dari:

- PT. PLN (Persero) Unit Pelayanan dan Pengatur Beban Makassar (UP2B Makassar) yang berlokasi di Jalan Letjen Hertasning Blok B, Pandang, Kec. Panakkukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan.
- PT. PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Sulawesi (UIKL Sulawesi) yang berlokasi di Jalan Urip Sumoharjo Km. 7 Makassar, Sulawesi Selatan.
- PT. PLN (PERSERO) Sektor Baru Unit Layanan PLTA Baru.

Sedangkan penelitian dilakukan di Laboratorium Relay Proteksi dan Pengukuran Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang berlokasi di Jl. Poros Malino Km.6, Bontomarannu, Gowa.

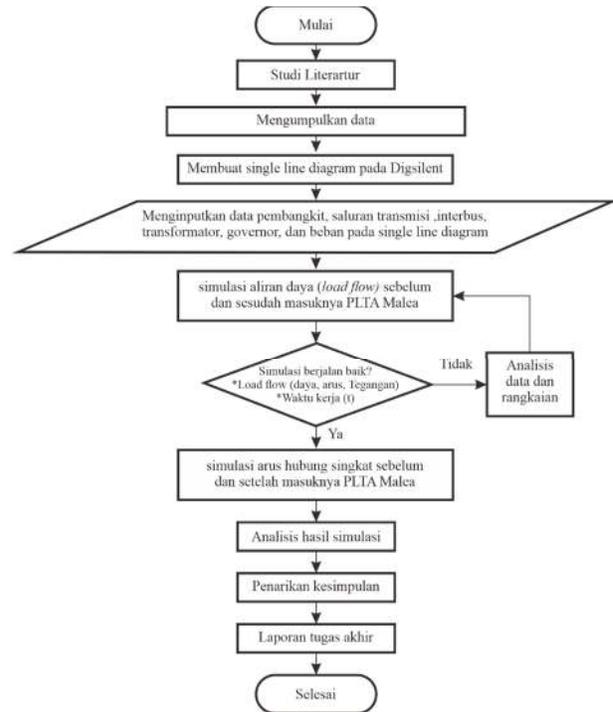
B. Alat dan Bahan

Bahan dan peralatan penelitian yang digunakan dalam penelitian adalah berupa data sekunder yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) UP2B Makassar, PT. PLN (Persero) UIKL Sulawesi dan ULPLTA Baru, satu unit laptop, dan software DigSilent untuk mengolah data.

C. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dimulai dari identifikasi masalah, pengumpulan data hingga kesimpulan penelitian. Adapun tahapan penelitian dapat dilihat pada

Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Alur Penelitian

D. Metode Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) UP2B Makassar, PT. PLN (Persero) UIKL Sulawesi dan ULPLTA Baru. Data tersebut antara lain:

- Single line diagram sistem Sulbagsel
- Data saluran transmisi sistem Sulbagsel
- Data pembangkit pada sistem Sulbagsel
- Data transformator distribusi dan IBT pada sistem Sulbagsel
- Data beban yang disuplai pada sistem Sulbagsel
- Data generator dan transformator PLTA Baru
- Data relai arus lebih pada generator dan transformator PLTA Baru

E. Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan setelah simulasi aliran daya dan hubung singkat dengan beberapa skenario kasus sesuai rumusan masalah yang telah dilakukan. Kasus pertama yaitu simulasi aliran daya sistem sulbagsel sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea, pada kasus ini akan membandingkan hasil nilai arus nominal dan arus setting relai arus lebih pada generator sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea. Kasus kedua yaitu simulasi arus hubung singkat sistem sulbagsel pada busbar Baru 150 kV sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea, pada kasus ini akan membandingkan hasil nilai arus hubung singkat pada busbar 150 kV dan waktu operasi relai sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tinjauan Sistem Proteksi Generator dan Transformator pada PLTA Bakaru

PLTA Bakaru mempunyai dua unit generator sinkron 3 fasa dengan kapasitas daya masing-masing unitnya 63 MW dengan total daya yang dibangkitkan oleh PLTA Bakaru sebesar 126 MW. Data generator unit 1 dan 2 yang ada di PLTA Bakaru dapat dilihat pada Tabel I.

TABEL I. DATA GENERATOR UNIT 1 DAN 2 YANG ADA DI PLTA BAKARU

Spesifikasi	Nilai/Keterangan
Merek	MEIDENSHA, 1989
Tipe	Poros Tegak, Generator Sinkron
Kecepatan	500 rpm
Daya	70.000 Kva
Arus	3.674 A
Tegangan	11.000 V
Frekuensi	50 Hz
Kelas isolasi	B
Faktor daya	0,9 Lagging
Fasa	3
Tegangan eksitasi	245 Volt
Arus eksitasi	712 A

PLTA Bakaru mempunyai dua unit transformator utama sinkron 3 fasa dengan kapasitas masing-masing unitnya 70 MVA. Data transformator unit 1 dan 2 yang ada di PLTA Bakaru dapat dilihat pada Tabel II.

TABEL II. DATA TRANSFORMATOR UNIT 1 DAN 2 YANG ADA DI PLTA BAKARU

Spesifikasi	Nilai/Keterangan
Merk	Pauwels Trafo
Nomor Seri	301130126
Kapasitas	70 MVA
Tegangan Operasi	11/150 kV
Pendingin	ONAN/ONAF
Frekuensi	50 Hz
Phase	3
Insulation Level	LI 650 AC 275-LI 95 AC 38/LI75 AC 28
Type Minyak	NYNAS NYTRO LIBRA
Vektor Grup	YND5

Adapun data relai arus lebih yang digunakan pada generator dan transformator di PLTA Bakaru dapat dilihat pada Tabel III.

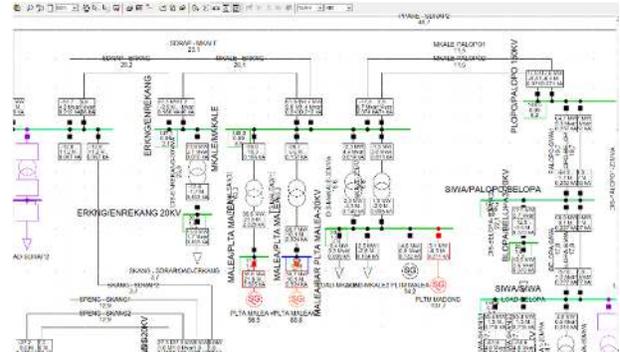
TABEL III. DATA RELAI ARUS LEBIH PADA GENERATOR DAN TRANSFORMATOR DI PLTA BAKARU

Spesifikasi	Nilai/Keterangan	
	Generator	Transformator
Relay	Overcurrent Relay	Overcurrent Relay
Jenis	Invers Time	Invers Time
Karakteristik	IEC Curve A / Standar Invers	IEC Curve A / Standar Invers
Pabrik	GE Multilin	GE Multilin
Tipe	G60	T60
Arus Setting	4,5 A	5 A
TMS	0,25 ms	0,18 ms
Rasio CT	5000/5 A	5000/5 A

B. Tinjauan PLTA Malea

PLTA Malea merupakan pembangkit baru yang beroperasi secara komersial pada sistem Sulbagesel sejak tahun 2021. PLTA Malea mempunyai dua unit generator sinkron 3 fasa dengan kapasitas daya masing-masing unitnya

45 MW dengan total daya yang dibangkitkan oleh PLTA Malea sebesar 90 MW. Berdasarkan hasil simulasi output daya aktif PLTA Malea saat diintegrasikan pada sistem Sulbagesel pada Gambar 12 diperoleh output daya aktif pada unit 1 sebesar 38,6 MW dan unit 2 sebesar 38,7 MW yang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Tampilan simulasi output daya aktif PLTA Malea

C. Hasil Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan pada keseluruhan sistem Sulbagesel dengan dua kondisi yaitu sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea pada sistem Sulbagesel. Simulasi aliran daya dilakukan menggunakan perangkat lunak DigSilent berdasarkan single line diagram sistem Sulbagesel pada kondisi beban normal dengan semua pembangkit beroperasi.

1) Sebelum masuknya PLTA Malea

Berdasarkan hasil simulasi aliran daya yang diperlihatkan pada Gambar 7 sebelum masuknya PLTA Malea diperoleh arus nominal pada unit 1 sebesar 3,04 kA dan unit 2 sebesar 2,86 kA.

Unit	Bus Voltage [kV]	Power [MW]	Reactive Power [MVar]	Power Factor	Current [kA]	Loadings [kA]	Additional Data
ANDILO 20KV	0,55	13,13	13,04				
Sub_1 / Bus	LOAD-ANDILO	9,97	5,00	0,89	0,33	0,33	9,97 MW Q10: 5,00 Mvar
Sub_1 / T22	DIS-ANDILO-0807A	-9,97	-5,00	-0,89	0,33	0,33	9,97 MW Q10: 5,00 Mvar
BAGARU 1	1,00	11,00	11,00				
Sub_1 / Bus	PLTA BAGARU#1(1)	36,73	12,74	0,98	3,04	31,98	36,73 MW Q10: 12,74 Mvar
Sub_1 / Comp	CB						
Sub_1 / T22	TO BAGARU1	36,73	12,74	0,98	3,04	32,41	36,73 MW Q10: 12,74 Mvar
Sub_1 / Bus	PLTA BAGARU#2(1)	35,13	12,14	0,97	2,86	26,50	35,13 MW Q10: 12,14 Mvar
Sub_1 / Comp	CB						
Sub_1 / T22	TO BAGARU2	35,13	12,14	0,97	2,86	26,12	35,13 MW Q10: 12,14 Mvar
BAGARU 20KV	1,00	20,02	6,71				
Sub_1 / Bus	LOAD-BAGARU	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,30 MW Q10: 0,00 Mvar
Sub_1 / T22	DIS-BAGARU-1007A(1)	-0,30	-0,00	-1,00	0,00	0,00	0,30 MW Q10: 0,00 Mvar
BAGARU 150KV	1,00	130,17	6,74				
Sub_1 / Bus	TRAND - PLTA#3	37,43	13,30	0,99	0,30	47,46	133,00 MW Q10: -1,00 Mvar Lr: 99,02 km
Sub_1 / Comp	TRAND - BAGARU	22,12	1,73	1,00	0,12	29,29	139,53 MW Q10: -1,00 Mvar Lr: 242,00 km
Sub_1 / T22	2-Winding Transformer	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00 Mvar
Sub_1 / T22	2-Winding Transformer	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00 Mvar
Sub_1 / T22	DIS-BAGARU-1007A(2)	0,12	0,00	1,00	0,00	0,00	0,12 MW Q10: 0,00 Mvar
Sub_1 / T22	TO BAGARU1	-36,73	-12,74	-0,98	0,33	32,41	36,73 MW Q10: 12,74 Mvar
Sub_1 / T22	TO BAGARU2	-35,13	-12,14	-0,99	0,21	26,12	35,13 MW Q10: 12,14 Mvar
BAGARU 211KV	0,99	10,01	6,74				
Sub_1 / Bus	PLTA BAGARU#1	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00 Mvar
Sub_1 / Comp	CB						
Sub_1 / T22	2-Winding Transformer	-0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00 Mvar
Sub_1 / Bus	PLTA BAGARU#2	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00 Mvar
Sub_1 / Comp	CB						
Sub_1 / T22	2-Winding Transformer	-0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00 Mvar

Gambar 7. Simulasi aliran daya sebelum masuknya PLTA Malea

2) Setelah masuknya PLTA Malea

Berdasarkan hasil simulasi aliran daya yang diperlihatkan pada Gambar 8 setelah masuknya PLTA Malea diperoleh arus nominal pada unit 1 sebesar 2,87 kA dan unit 2 sebesar 27,0 kA. 2,86 kA.

Gambar 8. Simulasi aliran daya setelah masuknya PLTA Malea

D. Perhitungan Arus Setting

Berdasarkan arus nominal pada pembangkit PLTA Bakaru unit 1 dan 2 yang diperoleh setelah dilakukan simulasi aliran daya, selanjutnya dilakukan perhitungan arus setting untuk overcurrent relay pada generator dan sisi primer transformator. Arus setting terdapat dua perhitungan yaitu untuk sisi primer ($I_{sprimer}$) dan untuk sisi sekunder ($I_{ssekunder}$) pada CT. Perhitungan dimulai dengan nilai arus setting sisi primer yang selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai arus setting sisi sekunder yang juga menggunakan rasio CT arus yang terpasang. Berikut perhitungan untuk arus setting sebelum dan masuknya PLTA Malea untuk sisi primer maupun sisi sekunder:

1) Sebelum masuknya PLTA Malea (sisi primer)

- Unit 1 Bakaru

$$I_s \text{ primer} = 1,1 \times I_n$$

$$I_s \text{ primer} = 1,1 \times 3.041 \text{ A}$$

$$I_s \text{ primer} = 3345,1 \text{ A}$$

Jadi untuk nilai arus setting sebelum masuknya PLTA Malea unit 1 pada sisi primer adalah 3345,1 A.

- Unit 2 Bakaru

$$I_s \text{ primer} = 1,1 \times I_n$$

$$I_s \text{ primer} = 1,1 \times 2.860 \text{ A}$$

$$I_s \text{ primer} = 3.146 \text{ A}$$

Jadi untuk nilai arus setting sebelum masuknya PLTA Malea unit 2 pada sisi primer adalah 3.146 A

2) Setelah masuknya PLTA Malea (sisi primer)

- Unit 1 Bakaru

$$I_s \text{ primer} = 1,1 \times I_n$$

$$I_s \text{ primer} = 1,1 \times 2.781 \text{ A}$$

$$I_s \text{ primer} = 3158,1 \text{ A}$$

Jadi untuk nilai arus setting sesudah masuknya PLTA Malea unit 1 pada sisi primer adalah 3158,1 A

- Unit 2 Bakaru

$$I_s \text{ primer} = 1,1 \times I_n$$

$$I_s \text{ primer} = 1,1 \times 2.702 \text{ A}$$

$$I_s \text{ primer} = 2972,2 \text{ A}$$

Jadi untuk nilai arus setting sesudah masuknya PLTA Malea unit 2 pada sisi primer adalah 2972,2 A

3) Sebelum masuknya PLTA Malea (sisi sekunder)

- Unit 1 Bakaru

$$I_s \text{ sekunder} = I_s \text{ primer} \times \frac{CT \text{ sekunder}}{CT \text{ primer}}$$

$$I_s \text{ sekunder} = 3345,1 \text{ A} \times \frac{5}{5000}$$

$$I_s \text{ sekunder} = 3,34 \text{ A}$$

Jadi untuk nilai arus setting sebelum masuknya PLTA Malea unit 1 pada sisi sekunder adalah 3,34 A

- Unit 2 Bakaru

$$I_s \text{ sekunder} = I_s \text{ primer} \times \frac{CT \text{ sekunder}}{CT \text{ primer}}$$

$$I_s \text{ sekunder} = 3.146 \text{ A} \times \frac{5}{5000}$$

$$I_s \text{ sekunder} = 3,14 \text{ A}$$

Jadi untuk nilai arus setting sebelum masuknya PLTA Malea unit 2 pada sisi sekunder adalah 3,14 A

4) Setelah masuknya PLTA Malea (sisi sekunder)

- Unit 1 Bakaru

$$I_s \text{ sekunder} = I_s \text{ primer} \times \frac{CT \text{ sekunder}}{CT \text{ primer}}$$

$$I_s \text{ sekunder} = 3158,1 \text{ A} \times \frac{5}{5000}$$

$$I_s \text{ sekunder} = 3,15 \text{ A}$$

Jadi untuk nilai arus setting setelah masuknya PLTA Malea unit 1 pada sisi sekunder adalah 3,15 A

- Unit 2 Bakaru

$$I_s \text{ sekunder} = I_s \text{ primer} \times \frac{CT \text{ sekunder}}{CT \text{ primer}}$$

$$I_s \text{ sekunder} = 2972,2 \text{ A} \times \frac{5}{5000}$$

$$I_s \text{ sekunder} = 2,97 \text{ A}$$

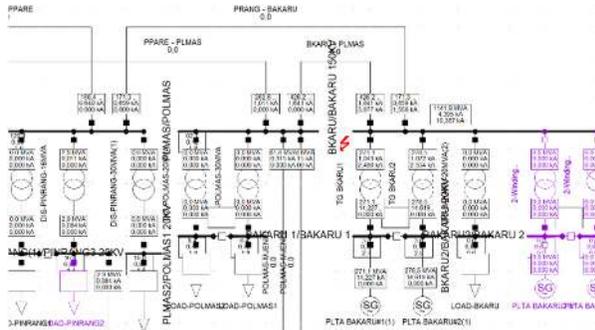
Jadi untuk nilai arus setting sesudah masuknya PLTA Malea unit 2 pada sisi sekunder adalah 2,97 A.

E. Simulasi Gangguan Hubung Singkat

Simulasi Gangguan hubung singkat dilakukan menggunakan perangkat lunak DigSilent. Titik gangguan di dibuat terjadi pada busbar Bakaru sisi 150 kV yang menghubungkan PLTA Bakaru unit 1 dan unit 2. Gangguan yang terjadi merupakan hubung singkat simetris tiga fasa dengan titik gangguan terjadi pada titik terdekat dengan PLTA Bakaru unit 1 dan 2. Simulasi hubung singkat dibagi menjadi dua kondisi yaitu sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea pada sistem Sulbagsel.

1) Simulasi Gangguan Hubung Singkat Bakaru Sebelum Masuknya PLTA Malea

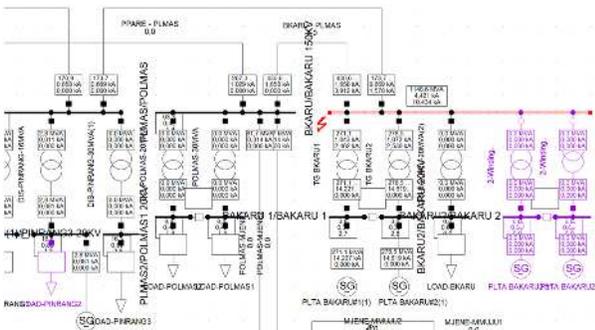
Berdasarkan hasil simulasi Gangguan hubung singkat pada Gambar 9 sebelum masuknya PLTA Malea jika terjadi gangguan pada busbar Bakaru sisi 150 kV maka diperoleh arus hubung singkat sebesar 4,395 kA.



Gambar 9. Simulasi gangguan hubung singkat pada busbar Bakaru 150 kV sebelum masuknya PLTA Malea

2) *Simulasi Gangguan Hubung Singkat Bakaru Setelah Masuknya PLTA Malea*

Berdasarkan hasil simulasi gangguan hubung singkat Bakaru pada Gambar 10 setelah masuknya PLTA Malea jika terjadi gangguan pada busbar Bakaru sisi 150 kV maka diperoleh arus hubung singkat sebesar 4,421 kA



Gambar 10. Simulasi gangguan hubung singkat pada busbar Bakaru 150 kV setelah masuknya PLTA Malea

F. *Perhitungan Waktu Operasi Relai*

Berdasarkan simulasi hubung singkat, diketahui bahwa arus hubung singkat yang terjadi pada PLTA Bakaru unit 1 sebesar 14,227 kA dan unit 2 sebesar 14,619 kA. Nilai arus hubung singkat ini kemudian digunakan untuk menghitung waktu operasi overcurrent relay pada generator dan sisi primer transformator untuk PLTA Bakaru unit 1 dan 2 pada kondisi sebelum dan setelah masuknya PLTA Malea. Adapun hasil perhitungan waktu operasinya adalah sebagai berikut:

1) *Waktu Operasi Relai Sebelum Masuknya PLTA Malea pada Transformator*

- Unit 1 Bakaru

$$t = TMS \times \frac{K}{\left[\frac{I}{I_S}\right] i^E - 1}$$

$$= 0,18 \times \frac{0,14}{\left[\frac{14,227}{3,34}\right] i^{0,02} - 1}$$

$$= 0,138 \text{ s}$$

Jadi untuk nilai waktu operasi relai arus lebih pada trafo sebelum masuknya PLTA Malea pada PLTA Bakaru unit 1 sebesar 0,138 s.

- Unit 2 Bakaru

$$t = TMS \times \frac{K}{\left[\frac{I}{I_S}\right] i^E - 1}$$

$$= 0,18 \times \frac{0,14}{\left[\frac{14,619}{3,14}\right] i^{0,02} - 1}$$

$$= 0,136 \text{ s}$$

Jadi untuk nilai waktu operasi relai arus lebih pada trafo sebelum masuknya PLTA Malea pada PLTA Bakaru unit 2 sebesar 0,136 s.

2) *Waktu Operasi Relai Sebelum Masuknya PLTA Malea pada Generator*

- Unit 1 Bakaru

$$t = TMS \times \frac{K}{\left[\frac{I}{I_S}\right] i^E - 1}$$

$$= 0,25 \times \frac{0,14}{\left[\frac{14,227}{3,34}\right] i^{0,02} - 1}$$

$$= 0,192 \text{ s}$$

Jadi untuk nilai waktu operasi relai arus lebih pada generator sebelum masuknya PLTA Malea pada PLTA Bakaru unit 1 sebesar 0,192 s.

- Unit 2 Bakaru

$$t = TMS \times \frac{K}{\left[\frac{I}{I_S}\right] i^E - 1}$$

$$= 0,25 \times \frac{0,14}{\left[\frac{14,619}{3,14}\right] i^{0,02} - 1}$$

$$= 0,190 \text{ s}$$

Jadi untuk nilai waktu operasi relai arus lebih pada generator sebelum masuknya PLTA Malea pada PLTA Bakaru unit 2 sebesar 0,190 s.

3) *Waktu Operasi Relai Setelah Masuknya PLTA Malea pada Transformator*

- Unit 1 Bakaru

$$t = TMS \times \frac{K}{\left[\frac{I}{I_S}\right] i^E - 1}$$

$$= 0,18 \times \frac{0,14}{\left[\frac{14,227}{3,15}\right] i^{0,02} - 1}$$

$$= 0,137s$$

Jadi untuk nilai waktu operasi relai arus lebih pada trafo setelah masuknya PLTA Malea pada PLTA Bakaru unit 1 sebesar 0,137 s.

- Unit 2 Bakaru

$$t = TMS \times \frac{K}{\left[\frac{I}{I_s}\right] i^E - 1}$$

$$= 0,18 \times \frac{0,14}{\left[\frac{14.619}{2,97}\right] i^{0,02} - 1}$$

$$= 0,135 s$$

Jadi untuk nilai waktu operasi relai arus lebih pada trafo setelah masuknya PLTA Malea pada PLTA Bakaru unit 2 sebesar 0,135 s.

4) Waktu Operasi Relai Setelah Masuknya PLTA Malea pada Generator

- Unit 1 Bakaru

$$t = TMS \times \frac{K}{\left[\frac{I}{I_s}\right] i^E - 1}$$

$$= 0,25 \times \frac{0,14}{\left[\frac{14.227}{3,15}\right] i^{0,02} - 1}$$

$$= 0,190s$$

Jadi untuk nilai waktu operasi ke relai arus lebih pada generator setelah masuknya PLTA Malea pada PLTA Bakaru unit 1 sebesar 0,190 s.

- Unit 2 Bakaru

$$t = TMS \times \frac{K}{\left[\frac{I}{I_s}\right] i^E - 1}$$

$$= 0,25 \times \frac{0,14}{\left[\frac{14.619}{2,97}\right] i^{0,02} - 1}$$

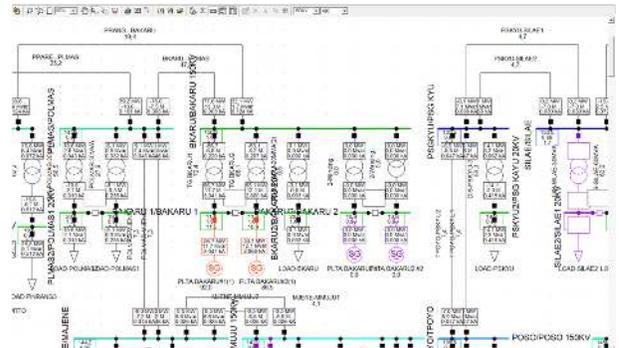
$$= 0,188 s$$

Jadi untuk nilai waktu operasi relai arus lebih pada generator setelah masuknya PLTA Malea pada PLTA Bakaru unit 2 sebesar 0,188 s.

G. Perubahan Daya Aktif PLTA Bakaru

1) Perubahan Daya Aktif PLTA Bakaru Sebelum Masuknya PLTA Malea

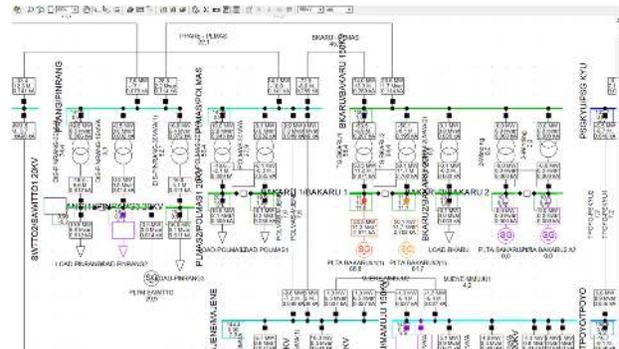
Berdasarkan hasil simulasi perubahan daya aktif PLTA bakaru pada Gambar 11 sebelum masuknya PLTA Malea diperoleh daya aktif pada unit 1 sebesar 56,7 MW dan unit 2 sebesar 53,1 MW.



Gambar 11. Simulasi perubahan daya aktif PLTA Bakaru sebelum masuknya PLTA Malea

2) Perubahan Daya Aktif PLTA Bakaru Setelah Masuknya PLTA Malea

Berdasarkan hasil simulasi perubahan daya aktif PLTA bakaru pada Gambar 12 setelah masuknya PLTA Malea diperoleh daya aktif pada unit 1 sebesar 53,5 MW dan unit 2 sebesar 50,1 MW.



Gambar 12. Simulasi perubahan daya aktif PLTA Bakaru setelah masuknya PLTA Malea

H. Perbandingan Nilai Arus Setting Relai Arus Lebih pada Generator dan Transformator PLTA Bakaru Sebelum dan Setelah Masuknya PLTA Malea

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan maka dapat dibandingkan dengan data simulasi yang disajikan dalam Tabel IV berikut.

TABEL IV. PERBANDINGAN NILAI ARUS SETTING RELAI ARUS LEBIH PADA GENERATOR PLTA BAKARU SEBELUM DAN SETELAH MASUKNYA PLTA MALEA

Spesifikasi	Nilai/Keterangan	
	Sebelum Masuknya PLTA Malea	Setelah Masuknya PLTA Malea
Arus Setting Relai Sisi Primer (Normal)	<ul style="list-style-type: none"> • Unit 1 = 3041 A • Unit 2 = 2860 A 	<ul style="list-style-type: none"> • Unit 1 = 2871 A • Unit 2 = 2702 A
Arus Setting Relai Sisi Sekunder (Normal)	<ul style="list-style-type: none"> • Unit 1 = 3,34 A • Unit 2 = 3,14 A 	<ul style="list-style-type: none"> • Unit 1 = 3,15 A • Unit 2 = 2,97 A
Arus Hubung Singkat (lhs) busbar Bakaru 150 kV	4.395 A	4.421 A

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan yang telah dilakukan dalam penelitian ini terkait gangguan hubung singkat pada sistem proteksi generator PLTA Bakaru diperoleh hasil bahwa, untuk nilai arus hubung singkat pada

busbar Bakaru 150 kV, hasil simulasi menunjukkan bahwa sebelum masuknya PLTA Malea, nilai arus hubung singkat mencapai 4,395 kA, sedangkan setelah masuknya PLTA Malea, nilai ini meningkat menjadi 4,421 kA. Selanjutnya, untuk pengaturan relai arus lebih, hasil simulasi aliran daya dan perhitungan menunjukkan bahwa sebelum masuknya PLTA Malea, arus setting relai arus lebih pada sisi primer PLTA Bakaru unit 1 adalah sebesar 3345,1 A dan unit 2 sebesar 3.146 A. Sedangkan pada sisi sekunder, arus setting relai arus lebih pada unit 1 adalah sebesar 3,34 A dan unit 2 sebesar 3,14 A. Namun, setelah masuknya PLTA Malea, terjadi penyesuaian arus setting relai arus lebih, di mana nilai pada sisi primer menjadi 3158,1 A untuk unit 1 dan 2972,2 A untuk unit 2, sementara nilai pada sisi sekunder adalah 3,15 A untuk unit 1 dan 2,97 A untuk unit 2. Hasil penelitian ini menunjukkan adanya perubahan arus hubung singkat dan perlunya penyesuaian setting relai arus lebih dalam penambahan pembangkit listrik baru dalam sistem tenaga listrik.

REFERENSI

- [1] Saadat, H. *Power system analysis*. New York: McGraw-Hill Inc., 1999.
- [2] Fitriawati, Nurhadyono, S., & Efendi, N. 2018. Analisis Setting Relai Proteksi Pengaman Arus Lebih Pada Generator (Studi Kasus di PLTU 2x300 MW Cilacap). *Intuisi Teknologi Dan Seni*, 10(1), 49-57.
- [3] Uma, U. dan I.K. Onwuka. 2014. Overcurrent Relay Setting Model for Effective Substation Relay Coordination. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. Vol 04. Hal 26-31.
- [4] Rahmani, Itsna Nurul. *Analisa Sistem Proteksi Rele Arus Lebih Pada Generator Unit 1 di PT. Indonesia Power Up mrica PLTA Wonogiri*. Jakarta: Institut Teknologi PLN, 2020.
- [5] PT. PLN (Persero), *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN (Persero) 2021-2030*. Jakarta: PT PLN (Persero), 2021.
- [6] Tanyadji, Sonny dan Sarma Thaha. *Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Makassar: Innawa, 2015.
- [7] Rachmawan, Alvin Nur Fajar. *Studi Evaluasi Sistem Proteksi Relai Arus Lebih Pada Generator di Pusat PLTA Gajah Mungkur*. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2020.
- [8] Rahardani, S. S. *Studi Koordinasi Sistem Proteksi Pada PLTA PT PJB Unit Pembangkitan Cirata*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [9] Bachtiar, H. *Sistem Proteksi Pembangkitan Energi Listrik*. Bandung, 2006.
- [10] Samodra, Gladi. *Analisis Stabilitas Sistem Kelistrikan Kalimantan dan Jawa 500 kV DC Menggunakan Time Domain Simulation. Tugas Akhir*. Surabaya: Program Studi S1 Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.