BLACKOUT MESIN MAN DAN KOMATSU AKIBAT KETIDAKSTABILAN FREKUENSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK KABUPATEN FAKFAK PT. PLN (Persero) ULP FAKFAK

Naomi Lembang[1]
[1]Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Negeri Fakfak
naomi_lembang@ymail.com

ABSTRAK

Pemadaman listrik secara total kamis 02 Januari 2022 pada sistem tenaga listrik Kabupaten Fakfak akibat *trip*-nya mesin MAN-04 dan mesin MAN-07 (PLN) dengan daya terpasang 528 kW, daya operasi 350 kW, dan akibat *trip*-nya mesin KOMATSU-09 dan mesin KOMATSU-12 (P3) mesin mempunyai daya terpasang 800 kW, daya operasi 450 kW pada PLTD Kebun Kapas, terjadi kelebihan beban (*overload*) pada mesin-mesin pembangkit yang masih beroperasi. Hal ini tidak efektif dan efisien daya yang dibangkitkan lebih kecil dari beban pada sistem mengakibatkan ketidakstabilan frekuensi mengalami penurunan frekuensi sehingga terjadilah *blackout*. Untuk meminimalisir *blackout*, perlu dilakukan pelepasan beban agar mesin pembangkit yang masih beroperasi tidak kelebihan beban *(overload*) dan frekuensi sistem tetap normal, untuk itu perlu dilakukan analisis pengolahan data skema pertahanan frekuensi pada PLTD Kebun Kapas serta pengukuran beban dan frekuensi pada salah satu mesin di PLTD Kebun Kapas. Penormalan Frekuensi dilakukan merujuk pada hasil simulasi pelepasan beban dilakukan untuk menjaga keseimbangan daya yang dibangkitkan dengan beban pada sistem. Berdasarkan hasil penelitian untuk mesin MAN mengembalikan frekuensi dari awal pelepasan beban 49,44 Hz ke frekuensi normal 50 Hz membutuhkan waktu 3,6 detik pada mesin MAN pada mesin KOMATSU untuk mengembalikan frekuensi dari 49,28 Hz ke frekuensi normal 50 Hz membutuhkan waktu 5,2 detik pada masing-masing mesin KOMATSU.

Kata Kunci: *Black out*, Ketidakstabilan, Penurunan frekuensi, Pelepasan Beban.

BLACK OUT OF MAN AND KOMATSU MACHINERY DUE TO FREQUENCY INSTABILITY IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM IN FAKFAK DISTRICT PT. PLN (Persero) ULP FAKFAK

ABSTRACT

Total power outage Thursday 02 January 2022 in the Fakfak Regency electric power system due to tripping of the MAN-04 engine and the MAN-07 engine (PLN) with installed power of 528 kW, operating power of 350 kW, and due to tripping of the KOMATSU-09 engine and the KOMATSU-12 (P3) engine has an installed power of 800 kW, an operating power of 450 kW at the Cotton Garden PLTD, there is an overload on the generator engines that are still operating. This is not effective and efficient, the power generated is less than the load on the system, resulting in frequency instability, which decreases the frequency so that a black out occurs. To minimize blackout, load shedding is necessary so that the generating machines that are still operating are not overloaded and the system frequency remains normal. For this reason, it is necessary to analyze the data processing of the frequency defense scheme at PLTD Kebun Kapas and measure the load and frequency on one of the machines. at the Cotton Plantation PLTD. Frequency Normalization is carried out referring to the load shedding simulation results carried out to maintain the balance of the power generated with the load on the system. Based on the results of the study for the MAN machine, returning the frequency from the initial load shedding of 49.44 Hz to a normal frequency of 50 Hz takes 3.6 seconds, on a MAN machine on a KOMATSU machine, to return the frequency from 49.28 Hz to a normal frequency of 50 Hz, it takes 5.2 seconds on each KOMATSU machine.

Keyword: *Blackout, Instability, Decreasing frequency, Load shedding.*

PENDAHULUAN

Listrik telah menjadi salah satu kebutuhan dasar yang sangat vital bagi kehidupan masyarakat di dunia, termasuk Indonesia. Energi listrik disediakan oleh PT. Perusahaan Listrik Negara, dalam melaksanakan fungsinya sebagai penyedia listrik bagi masayarakat indonesia. PT. PLN (Persero) tidak luput dari kendala dan masalah, masalah yang sering menjadi momok bagi PT. PLN (Persero) ialah masalah terjadinya pemadaman listrik masal atau *blackout*. Telah terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik kabupaten Fakfak yang mengakibatkan terjadinya *blackout* (pemadam total). Gangguan tersebut terjadi pada kamis 02-01-2022 akibat *trip*-nya empat mesin pembangkit sehingga terjadi kelebihan beban (*overload*). Yang mengakibatkan ketidak seimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan beban pada sistem, maka frekuensi pada sistem mengalami penurunan sehingga terjadi *blackout*.

Stabilitas frekuensi merupakan suatu kemampuan sistem daya untuk menjaga frekuensi tetap stabil dalam kirasan normal pada keadaan gangguan yang dapat mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban [1]. Ketika generator sinkron diberi beban yang berubah-ubah, maka besarnya tegangan akan berubah. Hal ini mengakibatkan ketidakstabilan tegangan dan frekuensi [2].

Pada sistem tenaga listrik, frekuensi merupakan indikator dari keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan total beban sistem. Pelepasan beban dilakukan sebagai usaha memperbaiki kestabilan sistem yang terganggu akibat beban lebih. Pelepasan beban diharapkan dapat memulihkan frekuensi dengan cepat. Terdapat tahapan-tahapan yang dapat ditentukan dalam pelepasan beban [3].

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan kapasitas pembangkitan generator merupakan salah satu parameter dari kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Namun dalam pengoperasian sistem tenaga listrik akan selalu terjadi perubahan beban [4].

Kestabilan sistem dalam menyuplai beban secara terus menerus sangat penting. Salah satu faktor yang mempengaruhi hal tersebut adalah kestabilan frekuensi dan tegangan. Stabilitas frekuensi dan tegangan perlu diperhatikan selama perencanaan dan pengoperasian tenaga listrik untuk menghindari ketidakstabilan sistem yang dapat menyebabkan (*blackout*) pemadaman sistem [5].

Penting untuk mempertahankan frekuensi sistem di sekitar nilai nominalnya untuk mencegah hal ini terjadi. Seperti semua sistem daya, mikrogrid kepulauan harus mematuhi kode keandalan dan kecukupan, dan dengan demikian tegangan dan frekuensi sistem harus berada dalam kisaran tertentu [6]. Pasokan energi yang berkualitas dapat menghindari terjadinya kerusakan pada peralatan listrik. Umumnya peralatan hanya dapat bekerja pada frekuensi 50 Hz – 60 Hz. Pengaturan sistem frekuensi dilakukan berdasarkan Standar Operational Prosedur (SOP) untuk penanganan *emergency system* sebagai berikut [7]:

- Frekuensi normal sistem pada 50.10 HZ (normal)
- Frekuensi terendah sistem pada 49.30 HZ (*warning*)
- Frekuensi tertinggi sistem pada 52.00 HZ (*warning*)
- UFR penyulang bekerja pada frekuensi 49.00 HZ (*trip*)
- Jika trip dari sisi pembangkitan akan terjadi *Under Frequency*
- Jika trip dari sisi penyulang akan terjadi Over *Frequency*.

Pada operasi sistem tenaga listrik, pensuplaian tenaga listrik ke konsumen dikatakan baik apabila besarnya tegangan dan frekuensi yang diterima sesuai dengan yang ditentukan dan masih dalam batas toleransinya. *Load shedding* atau pelepasan beban pada penyulang dilakukan secara otomatis dengan menggunakan *under frequency relay* (UFR) [8].

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis penyebab terjadinya *blackout* pada sistem tenaga listrik karena ketidakstabilan frekuensi. Parameter-parameter yang dibutuhkan sesuai dengan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam perhitungan, faktor kelebihan beban (*overload*), besarnya penurunan frekuensi akibat kelebihan beban pada sistem tenaga listrik dan pelepasan beban pada sistem tenaga listrik. Parameter-parameter yang dibutuhkan sesuai dengan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam perhitungan Daya output pembangkit, Daya yang dibangkitkan unit yang mengalami gangguan (MW), Awal penurunan frekuensi, frekuensi normal, *Load Shedding*. Dengan persamaan-persamaan yang dibutuhkan yaitu :

1. Untuk dapat membandingkan tingkat ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan daya beban pada suatu sistem, telah didefinisikan suatu faktor kelebihan beban (*overload*) [9]:

$$OL = \frac{p_{G0}-(p_{G0}-\Delta p_G)}{(p_{G0}-\Delta p_G)} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana

p_{G0} : Daya output pembangkit (MW)
Δp_G : Daya yang dibangkitkan unit yang mengalami gangguan (MW)

2. Salah satu penyebab terjadinya penurunan frekuensi pada sistem tenaga listrik adalah terjadinya gangguan (*trip*) satu unit pembangkit dari beberapa pembangkit yang dioperasikan secara parallel. Hal ini mengakibatkan perbandingan daya terpasang dengan beban yangditanggung tidak seimbang, sehingga bila tidak diantisipasi, sistem pengaman akan bekerja dan terjadi *blackout*. Salah satu strategi untuk mengantisipasi terhadap kemungkinan turunnya frekuensi adalah dengan sistem *load shedding*. Sistem *load shedding* dapat dilakukan oleh *Programmable Logic Controller*. Dengan melepas sebagian beban yang tidak vital, pembangkit yang masih bekerja dapat terhindar dari kerusakan dan juga pelayanan terhadap beban yang tinggal masih dapat dilayani [10]. Untuk lebih memudahkan dalam menghitung penurunan frekuensi, maka perlu dilakukan langkah-langkah sebagai berikut : Diambil selang-selang waktu yang cukup kecil misalnya 0,1 detik. Dalam selang waktu ini nilai $\frac{df}{dt}$ dianggap konstan.

Pada akhir selang waktu yang pertama yang merupakan permulaan selang waktu yang kedua yaitu pada saat t_1, nilai frekuensi adalah [11]:

$$f_1 = f_0 + (\frac{df}{dt})_{0\text{-}1}.\,(t_0 - t_1) \quad (2)$$

Dimana :
f_1 = Awal penurunan frekuensi (Hz)
f_0 = Frekuensi normal (Hz)
$\frac{df}{dt}$ = Selang waktu (Hz/dt)
t_0 = waktu frekuensi normal (detik)
t_1 = Waktu awal penurunan frekuensi (detik)
Dengan $(\frac{df}{dt})_{0\text{-}1}$ adalah $\frac{df}{dt}$ nilai dalam selang waktu t_0 dan t_1.

Untuk selang waktu berikutnya yaitu antara t_1 dan t_2. Harus dilakukan perhitungan mencari nilai permulaan dari frekuensi dan selisih daya yang dibangkitkan dengan beban.

$$p_{s1} = p_1 - p_{B1} \quad (3)$$
$$= (p_{GO} - p_{SO}) - p_{B1}$$

Dimana:
p_1 = daya yang dibangkitkan saat t_1
p_{B1} = beban sistem setelah ada gangguan
p_{G0} = daya yang dibangkitkan sistem sebelum ada gangguan dari unit pembangkit.

Dengan cara yang sama seperti ketika menghitung nilai $(\frac{df}{dt})_{0\text{-}1}$ maka : $\frac{df}{dt} = -\frac{f_0}{2H} x \frac{p_{so}}{p_{got} - p_{sot}}$ (4)

Dimana :
f_0 : Frekuensi normal.
p_{S0} : Daya yang dibangkitkan unit terganggu.
p_{G0t} : Daya terpasang dari unit-unit yang beroperasi.
p_{S0t} : Daya terpasang dari unit yang terganggu.

3. Meminimalisir *Blackout*
Apabila penurunan frekuensi tidak segera ditanggulangi makan akan menyebabkan sistem tersebut mengalami pemadaman total (*blackout*). Salah satu tindakan yang harus dilakukan untuk menanggulangi turunnya frekuensi adalah dengan melakukan pelepasan beban (*load shedding*) yang diharapkan dapat memulihkan frekuensi dengan cepat dan jumlah beban yang dilepaskan seminimal mungkin [12], rancangan *load shedding* standar IEEE akan diberlakukan. Jumlah beban yang dilepas serta lama waktu yang dibutuhkan untuk menstabilkan kembali sistem menggunakan prosedur *load shedding* IEEE kemudian dibandingkan dengan kondisi eksisting yang diberlakukan saat ini, sehingga menghasilkan rekomendasi *load shedding* yang lebih efektif [13]. Simulator penggunaan energi listrik sangat membantu dalam perencanaan pasokan listrik secara terus menerus atau perlu pemadaman bila terjadi gangguan. Agar kinerja pembangkit dapat kembali normal, bertahap, dan terencana akibat mengalami gangguan, maka digunakan metoda *Load Shedding* [14], Pelepasan beban merupakan solusi terakhir yang terpaksa diambil ketika terjadi penurunan frekuensi akibat kehilangan pembangkitan, yang jika tidak dilakukan akan dapat mengakibatkan *collapse*-nya sistem tenaga [15].
Untuk menghitung perubahan frekuensi setelah dilakukan pelepasan beban menggunakan rumus [11]:

$$(\frac{df}{dt})_{1\text{-}2} = \frac{f_1}{2H}\left\{\frac{p_{S0} - (p_{S0} - p_{BR}) - p_{B1}}{p_{G0t} - p_{Dot}}\right\} \quad \text{.....(5)}$$

Dimana :
p_{BR} : Besar beban yang dilepaskan oleh relay
f_1 : Frekuensi Awal Lepas Beban
p_{S0} : Daya yang dibangkitkan unit terganggu.
p_{G0} : Daya yang dibangkit unit-unit sebelum ada gangguan.

p_{G0t} : Daya terpasang dari unit-unit yang beroperasi

p_{D0t} : Penambahan kemampuan pembangkit karena adanya pelepasan beban

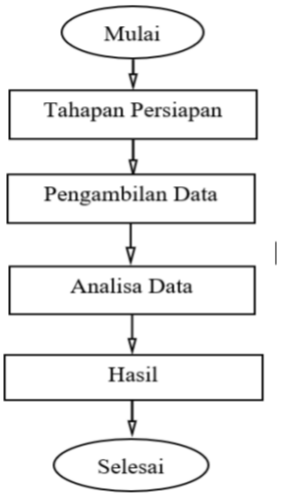
p_{B1} : Beban sistem sebelum gangguan

METODE PENELITIAN

Metode penelitian menggunakan metode penelitian kuantitatif dan wanwancara/diskusi dimana pada penelitian ini lebih menitik beratkan pada pengumpulan data-data secara langsung dan melakukan wanwancara / diskusi dengan pihak yang terkait pada PLTD Kebun Kapas, PT. PLN (Persero) ULP Fakfak, penelitian yang dilakukan yaitu memahami penyebab terjadinya *blackout* pada sistem tenaga listrik Kabupaten Fakfak PT. PLN (Pesero) ULP Fakfak. Menganalisis penyebab terjadinya *blackout* pada sistem tenaga listrik Kabupaten Fakfak PT. PLN (Persero) ULP Fakfak. Teknik pengambilan data yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut :

1. Observasi (pengamatan), dilakukan dengan mencari data teknis secara langsung ke lapangan. Data yang diambil dengan observasi meliputi
   - Data mesin-mesin pada PLTD Kebun Kapas, PT. PLN (Persero) ULP FAKFAK
   - Skema pertahanan sistem tenaga listrik kabupaten Fakfak
2. Wawancara / diskusi pengambilan data dengan metode wawancara / diskusi, dilakukan dengan mencari data teknis dengan melakukan wawancara / diskusi dengan pihak yang terkait pada PLTD Kebun Kapas PT. PLN (Persero) ULP Fakfak. Data tersebut berupa data wawancara pada waktu terjadinya *blackout* pada sistem tenaga listrik kabupaten Fakfak.

Pengambilan data terkait analisis frekuensi *blackout* mesin MAN-04,07, KOMATSU-09, KOMATSU-12 (P3) pada sistem tenaga listrik kabupaten Fakfak PT. PLN (Persero) ULP Fakfak dari data yang telah terkumpul, maka dilakukan pengelompokan data melalui perhitungan dan *microsoft excel* sesuai identifikasi permasalahannya sehingga diperoleh analisa. Kemudian data ini dikelompokkan dalam bentuk tabel hasil perhitungan penurunan frekuensi dan hasil perhitungan perubahan frekuensi setelah pelepasan beban akibat *trip*-nya mesin. grafik hasil perhitungan penurunan frekuensi akibat *trip*-nya mesin ditampilkan dalam bentuk diagram batang guna melihat penurunan frekuensi dalam keadaan keadaan tidak normal dan grafik hasil perhitungan perubahan frekuensi setelah pelepasan beban akibat *trip*-nya ditampilkan diagram batang tiap-tiap mesin dalam keadaan normal. Tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini diperlihatkan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai pengerak mula (*prime mover*). Adapun mesin-mesin pembangkit yang digunakan di PLTD Kebun Kapas, PT. PLN (Persero) ULP Fakfak yaitu mesin KOMATSU, mesin MAN, mesin KORMAN, mesin DOSSAN, dan mesin CUMMINS. Namun pada penelitian ini hanya meneliti beberapa mesin yang *trip* sehingga menyebabkan terjadinya *blackout*, yaitu mesin MAN-04, mesin MAN-07, mesin KOMATSU-09, dan mesin KOMATSU-12 dapat dilihat pada gambar dibawah ini :

(a) (b)

Gambar 2 (a) mesin MAN dan (b) mesin KOMATSU PLTD Kebun Kapas, PT. PLN (Persero) ULP FAKFAK.

Adapun data mesin-mesin pembangkit yang digunakan pada PLTD Kebun Kapas, PT. PLN (Persero) ULP FAKFAK yaitu dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL 1. DATA MESIN-MESIN PADA PLTD KEBUN KAPAS, PT. PLN (PERSERO) ULP FAKFAK

ULP FAKFAK	LOKASI	UNIT	MEREK	TYPE	DT (kW)	OPERASI (kW)	STATUS
PLN	PLTD KEBUN KAPAS	1	KOMATSU	SAA 12V 140-P1150	720	550	OPERASI
		2	KOMATSU	SAA 12V 140-P1150	720	400	OPERASI
		3	MAN-04	D 2842LE201	528	350	OPERASI
		4	MAN-05	D 2842LE202	528	300	OPERASI
		5	MAN-06	D 2842LE203	528	250	OPERASI
		6	MAN-07	D 2842LE204	528	350	OPERASI
		7	MAN-08	D 2842LE205	528	350	OPERASI
	PLTMH WERBA	8	FRANCIS	COMPACFRANCE	1000	800	OPERASI
		9	FRANCIS	COMPACFRANCE	1000	800	OPERASI
TOTAL PLN					6080	4150	
MESIN SEWA (P3)	PLTD KEBUN KAPAS	1	KORMAN-01		400	200	OPERASI
		2	DOSSAN-02		400	200	OPERASI
		3	KOMATSU-03	SAA 12V 140-P1150	800	450	OPERASI
		4	KOMATSU-04	SAA 12V 140-P1150	800	450	OPERASI
		5	KOMATSU-05	SAA 12V 140-P1150	800	450	OPERASI
		6	KOMATSU-06	SAA 12V 140-P1150	800	450	OPERASI
		7	DOSSAN-07		0	0	GANGGUAN
		8	KOMATSU-09	SAA 12V 140-P1150	800	450	OPERASI
		9	KOMATSU-10	SAA 12V 140-P1150	800	450	OPERASI
		10	CUMMINS-11		0	0	GANGGUAN
		11	KOMATSU-12	SAA 12V 140-P1150	800	450	OPERASI
TOTAL SEWA					7800	3550	
TOTAL PLN+SEWA					13880	7700	
BEBAN PUNCAK						6000	
CAD						1700	

Pada Tabel 1 dapat diketahui bahwa data mesin-mesin pembangkit yang beralamat pada PLTD Kebun Kapas Fakfak Papua Barat, Merek KOMATSU tipe SAA 12V 140-P1150, dengan daya terpasang 800 kW, daya operasi 450 kW. Merek MAN tipe D 2842LE201, dengan daya terpasang 528 kW, daya operasi 350 kW. Merek FRANCIS tipe COMPACFRANCE, dengan daya terpasang 1000 kW, daya operasi 800 kW. Merek KORMAN, daya terpasang 400 kW, daya operasi 200 kW. Merek DOSSAN, daya terpasang 400 kW, daya operasi 200 kW.

TABEL 2. SKEMA PERTEHANAN SISTEM TENAGA LISTRIK KABUPATEN FAKFAK.

Over frekuensi	52,0 Hz	
batas atas frekuensi	50,5 Hz	
Frekuensi normal	50,0 Hz	
batas bawah frekuensi	49,8 Hz	
UFR Tahap 1	49,2 Hz	Melepas Beban 588 kW
UFR Tahap 2	49,0 Hz	Melepas Beban 667 kW

Berdasarkan Tabel 2 telihat skema pertahanan sistem tenaga listrik Kabupaten Fakfak. Menurut standart PLN, nilai frekuensi sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, berlaku untuk seluruh Indonesia. Sistem tenaga listrik Kabupaten Fakfak memiliki daya terpasang 13880 kW dengan daya operasi 7700 kW. Strategi yang diterapkan untuk menjaga frekuensi pada batas normal sistem tenaga listrik Kabupaten Fakfak.

A. Penyebab Terjadinya *BlackOut* Pada Sistem Tenaga Listrik Kabupaten Fakfak.

Penyebab terjadinya *blackout* pada sistem tenaga listrik kabupaten Fakfak pada kamis 02-01-2022 diakibatkan oleh *trip*-nya dua mesin MAN (PLN) dan dua mesin KOMATSU (P3) sehingga terjadi kelebihan beban (*overload)* pada mesin pembangkit yang masih beroperasi. Dikarenakan beban pada sistem lebih besar dari daya yang dihasilkan pembangkit, akibat dari ketidakseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan beban yang ada pada sistem, maka frekuensi pada sistem pun mengalami penurunan. Ketika frekuensi pada sistem turun mecapai batas paling bawah. Maka semua mesin pada pembangkit akan *trip*, sehingga terjadilah pemadaman total (*blackout*).

B. Perhitungan kelebihan beban pada sistem akibat *trip*-nya mesin pada PLTD Kebun Kapas.

Perhitungan Kelebihan Beban Akibat *trip*-nya mesin MAN-04 menggunakan persamaan (1).

Diketahui :

p_{GO} : 7700 kW

Δp_G : 350 kW

Penyelesaian:

$$OL = \frac{p_{GO}-(p_{GO}-\Delta p_G)}{(p_{GO}-\Delta p_G)} \times 100\%$$

$$= \frac{7700-(7700-350)}{(7700-350)} x\ 100\%$$

$$= \frac{350}{7350} x100\% = 4{,}76\%$$

TABEL 3. HASIL PERHITUNGAN KELEBIHAN BEBAN AKIBAT *TRIP*-NYA MESIN

Merek Mesin	Hasil Perhitungan (%)
MAN-04, MAN-07	4,76 %.
KOMATSU-09, KOMATSU-12	6,20%

Berdasarkan perhitungan di atas dapat dilihat Tabel 3 kelebihan beban akibat *trip*-nya mesin MAN-04 dengan daya operasi 350 kW dan factor kelebihan beban sebesar 4,76 %, mesin MAN-07 dengan daya operasi 350 kW dan factor kelebihan beban sebesar 4,76 %, mesin KOMATSU-09 dengan daya operasi 450 kW dan factor kelebihan beban sebesar 6,20 % dan KOMATSU-12 dengan daya operasi 450 kW dan factor kelebihan beban sebesar 6,20 %.

B. Perhitungan penurunan frekuensi akibat *trip*-nya empat mesin pada PLTD Kebun Kapas.

Dengan menggunakan data mesin pembangkit pada Tabel 1. Maka perhitungan penurunan frekuensi akibat *trip*-nya mesin MAN-04 pada PLTD Kebun Kapas menggunakan persamaan (2)(4) sebagai berikut:

Diketahui :

$f_o = 50\ Hz$ $\quad p_{got} = 13880\ kW$
$p_{so} = 350\ kW$ $\quad p_{sot} = 528\ kW$
$h = 2\ detik$ $\quad t_0 = 0\ detik$
$t_1 = 0{,}2\ detik$

Penyelesaian :

$$\frac{df}{dt} = -\frac{f_0}{2H} x \frac{p_{so}}{p_{got} - p_{sot}}$$

$$\frac{df}{dt} = -\frac{50}{2.2} x \frac{350}{13880 - 528} = -12{,}5\ x\ 0{,}02621330138$$

$$(\frac{df}{dt})_{0-1} = -0{,}32766\ \frac{Hz}{dt}$$

$$f_1 = f_0 + (\frac{df}{dt})_{0\text{-}1}.(t_1 - t_0)$$

$$f_1 = 50 + (-0{,}32766\ x\ 0{,}2)$$

$$f_1 = 49{,}93446\ Hz$$

TABEL 4. PERHITUNGAN PENURUNAN FREKUENSI AKIBAT *TRIP*-NYA MESIN.

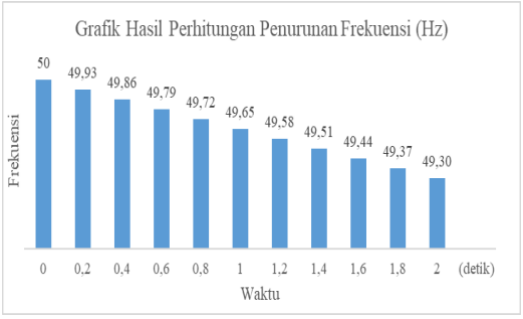
Merek Mesin	Laju Penurunan Frekuensi	Frekuensi
MAN-04, MAN-07	0,32766 Hz/detik	49,93446 Hz
KOMATSU-09 KOMATSU-12	0,43004 Hz/detik	49,91399 Hz

Berdasarkan hasil perhitungan mesin MAN-04, MAN-07 diketahui laju penurunan frekuensi sebesar $\frac{df}{dt} = -0{,}32766$ Hz/detik, sehingga frekuensi turun mencapai 49,93446 Hz, pada mesin KOMATSU-09 KOMATSU-12 diketahui laju penurunan frekuensi sebesar $\frac{df}{dt} = -0{,}43004$ Hz/detik, sehingga frekuensi turun mencapai 49,91399 Hz. Berdasarkan hasil perhitungan yang diperoleh disajikan dalam bentuk Tabel 5.

TABEL 5. HASIL PERHITUNGAN PENURUNAN FREKUENSI AKIBAT *TRIP*-NYA MESIN MAN-04 DAN MAN-07 (PLN).

Tahap	Delay (detik)	$\frac{df}{dt}$	Frekuensi (Hz)
1	0	0	50
2	0,2	-0,3276	49,9344
3	0,4	-0,3271	49,8645
4	0,6	-0,3266	49,7946
5	0,8	-0,3260	49,7247
6	1	-0,3258	49,6548
7	1,2	-0,3253	49,5849
8	1,4	-0,3247	49,5150
9	1,6	-0,3242	49,4451
10	1,8	-0,3239	49,3752
11	2	-0,3234	49,3053

Berdasarkan Tabel 5, dilihat hasil perhitungan penurunan frekuensi akibat *trip*-nya mesin MAN-04 dan MAN-07 sehingga frekuensi pada sistem mengalami penurunan dari frekuensi normal 50 Hz hingga mencapai frekuensi 49,30 Hz dalam kurun waktu 2 detik. Maka peneliti membuat grafik atau diagram batang dari hasil perhitungan penurunan frekuensi agar dapat dilihat dengan jelas penurunan frekuensi dari frekuensi normal mencapai frekuensi awal pelepasan beban.



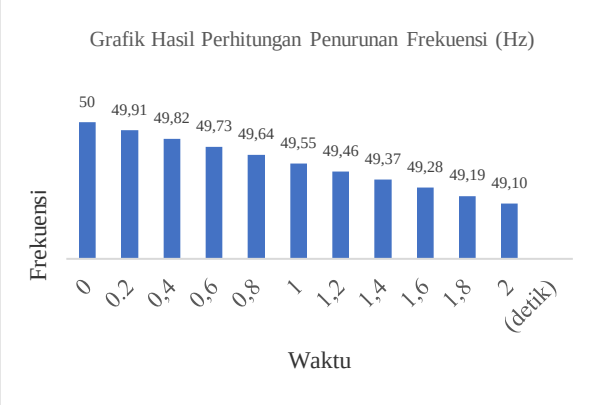
Gambar 3. Grafik Hasil Perhitungan Penurunan Frekuensi Akibat *Trip*-nya Mesin MAN-04 dan MAN-07 (PLN).

Pada gambar 3 pada grafik dapat dilihat hasil perhitungan penurunan frekuensi akibat *trip*-nya mesin MAN-04 dan MAN-07 sehingga frekuensi pada sistem mengalami penurunan dari frekuensi normal 50 Hz hingga mencapai frekuensi tidak normal 49,30 Hz dalam kurun waktu 2 detik. Ketika frekuensi turun melebihi batas bawah yaitu 49,8 Hz dapat mengakibatkan terjadinya *blackout* jika dibiarkan dan tidak dilakukan penanganan. Maka hal yang harus dilakukan untuk mengembalikan frekuensi ke posisi normal yaitu dengan dilakukan pelepasan beban. Pelepasan beban dilakukan agar daya yang dibangkitkan dengan beban pada sistem seimbang sehingga frekuensi pada sistem kembali normal.

TABEL 6. HASIL PERHITUNGAN PENURUNAN FREKUENSI AKIBAT *TRIP*-NYA MESIN KOMATSU-09 (P3) DAN KOMATSU-12 (P3).

Tahap	Delay (detik)	$\frac{df}{dt}$	Frekuensi (Hz)
1	0	0	50
2	0,2	-0,4300	49,9139
3	0,4	-0,4290	49,8242
4	0,6	-0,4283	49,7343
5	0,8	-0,4276	49,6444
6	1	-0,4269	49,5546
7	1,2	-0,4259	49,4648
8	1,4	-0,4252	49,3749
9	1,6	-0,4245	49,2851
10	1,8	-0,4238	49,1952

Berdasarkan Tabel 6, dilihat hasil perhitungan penurunan frekuensi akibat *trip*-nya mesin KOMATSU-9 dan KOMATSU-12 sehingga frekuensi pada sistem mengalami penurunan dari frekuensi normal 50 Hz hingga mencapai frekuensi 49,10 Hz dalam kurun waktu 2 detik. Maka peneliti membuat grafik atau diagram batang dari hasil perhitungan penurunan frekuensi agar dapat dilihat dengan jelas penurunan frekuensi dari frekuensi normal mencapai frekuensi awal pelepasan beban.



Gambar 4. Grafik Hasil Perhitungan Penurunan Frekuensi Akibat *Trip*-nya Mesin KOMATSU-09 dan KOMATSU 12.

Pada Gambar 4 dapat dilihat hasil perhitungan penurunan frekuensi akibat *trip*-nya mesin KOMATSU-9 dan KOMATSU-12 sehingga frekuensi mengalami penurunan dari frekuensi normal 50 Hz hingga mencapai frekuensi 49,10 Hz dalam kurun waktu 2 detik. Ketika frekuensi turun melebihi batas bawah yaitu 49,8 Hz dapat mengakibatkan terjadinya *blackout* jika dibiarkan dan tidak dilakukan penanganan. Maka hal yang harus dilakukan untuk mengembalikan frekuensi ke posisi normal yaitu dengan dilakukan pelepasan beban. Pelepasan beban dilakukan agar daya yang dibangkitkan dengan beban pada sistem seimbang sehingga frekuensi pada sistem kembali normal.

C. Meminimalisir *Blackout* Pada Sistem Tenaga Listrik Kabupaten Fakfak.

1. Pelepasan Beban

Pelepasan beban merupakan salah satu fenomena yang terjadi disuatu sistem tenaga listrik yang menginjinkan beberapa beban keluar dari sistem sehingga menghasilkan kestabilan sistem tenaga listrik. Hal ini biasa disebabkan oleh kelebihan beban atau (*overload*) dan turunnya frekuensi pada sistem, agar sistem kembali normal seperti sediakala diperlukan pelepasan beban tertentu. Alat yang digunakan untuk melakukan pelepasan beban yaitu : *Under Frekuensi Relay* (UFR) *Under frekuensi relay* atau rele frekuensi rendah bekerja dengan cara membandingkan frekuensi sistem dengan frekuensi *setting*-nya, ketika frekuensi sistem lebih kecil atau sama dengan frekuensi *setting*-nya maka rele akan bekerja : *Under frekuensi relay* dipasang pada penyulang TM, untuk pelepasan beban secara otomatis setelah terjadi penurunan frekuensi sistem, akibat kehilangan daya pembangkit. Tahap penyetelan rele di penyulang 20 kV, yaitu: UFR bekerja pada frekuensi 49,2 Hz dimana sistem akan melepas beban sebesar 588 kW dengan men-*trip*-kan penyulang kota.

2. Perubahan frekuensi setelah pelepasan beban.

Akibat dari *trip*-nya empat mesin pada PLTD Kebun Kapas. PT.PLN (Persero) ULP FAKFAK. Maka akan terjadi penurunan frekuensi. Penurunan frekuensi yang disebabkan oleh *trip*-nya mesin pada PLTD Kebun Kapas dapat membahayakan sistem. Untuk menghindari gangguan yang lebih besar perlu dilakukan palepasan baban. Berdasarkan tabel perhitungan penurunan frekuensi sebelumnya, kita bisa mengetahui nilai frekuensi dari masing-masing mesin pada PLTD Kebun Kapas saat mulai melakukan pelepasan beban seperti Tabel 7:

TABEL 7. FREKUENSI AWAL DILAKUKAN PELEPASAN BEBAN

No	Pembangkit	Merek	Delay	Frekuensi
1	Generator	MAN-04 MAN-07	1,6	49,44
2	Generator	KOMATSU-09 KOMATSU-12	1,6	49,28

Berdasarkan Tabel 7 bisa dilihat frekuensi awal dilakukan pelepasan beban. Dari data diatas kita bisa menghitung lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mencapai frekuensi normal setelah dilakukan pelepasan beban. Berikut data perhitungan untuk masing-masing mesin pembangkit setelah dilakukan pelepasan beban. Perhitungan perubahan frekuensi setelah dilakukan pelepasan beban akibat *trip*-nya mesin MAN-04 (PLN) menggunakan persamaan (5) dan (2) sebagai berikut:

Diketahui:

f_1 : 49,44 Hz $\quad p_{BR}$: 588 kW
p_{So} : 350 kW $\quad p_{Go}$: 7700 kW
p_{Got} : 13880 kW $\quad p_{Dot}$: 588 k

$$p_{B1} = \frac{49,44}{50} \text{ x } 7700 = 7613,76 \text{ kW}$$

Penyelesaian:

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{1-2} = \frac{f_1}{2H}\left\{\frac{p_{go} - (p_{so} - p_{BR}) - p_{B1}}{p_{Got} - p_{Dot}}\right\}$$

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{1-2} = \frac{49,44}{2.2}\left\{\frac{7700 - (350 - 588) - 7613,76}{13880 - 588}\right\}$$

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{1-2} = 0,30150\ \frac{Hz}{dt}$$

$$f_2 = f_1 + \left(\frac{df}{dt}\right)_{1-2} x\,(t_2 - t_1)$$
$$f_2 = 49{,}44 + 0{,}30150\ x\ (1{,}8 - 1{,}6)$$
$$f_2 = 49{,}50\ Hz$$

TABEL 8. PERHITUNGAN PERUBAHAN FREKUENSI STELAH DILAKUKAN PELEPASAN BEBANA AKIBAT *TRIP*-NYA MESIN MAN-04 (PLN).

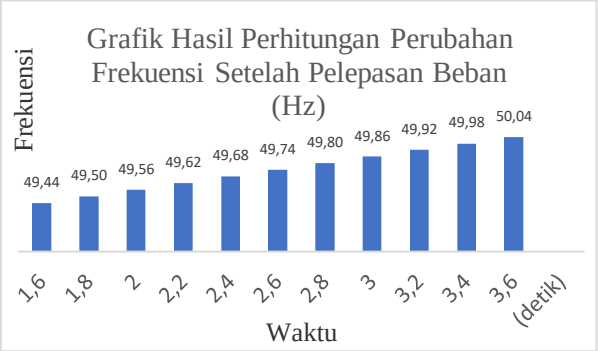
Merek Mesin	Laju Penurunan Frekuensi	Frekuensi
MAN-04, MAN-07	0,30150 Hz/detik	49,50 Hz
KOMATSU-09 KOMATSU-12	0,2306 Hz/detik	49,32 Hz

Berdasarkan hasil perhitungan mesin MAN-04, MAN-07 diketahui diatas diketahui laju perubahan frekuensi setelah pelepasan beban sebesar $\frac{df}{dt}$ =0,30150 Hz/detik, sehingga frekuensi naik mencapai 49,50 Hz. Dari hasil perhitungan yang diperoleh disajikan dalam bentuk Tabel 9.

TABEL 9. HASIL PERHITUNGAN PERUBAHAN FREKUENSI SETELAH PELEPASAN BEBAN AKIBAT *TRIP*-NYA MESIN MAN-04 DAN MAN-07 (PLN).

Beban Yang Dilepas	Frekuensi Lepas Beban	Selang Waktu	df/dt	Frekuensi (Hz)
		1,6	0,3244	49,44
		1,8	0,3246	49,50
		2	0,3252	49.56
		2,2	0,3255	49,62
		2,4	0,3259	49,68
558 kW	49,44 Hz	2,6	0,3262	49,74
		2,8	0,3267	49,80
		3	0,3270	49,86
		3,2	0,3275	49,92
		3,4	0,3279	49,98
		3,6	0,3283	50,04

Berdasarkan Tabel 9 dapat dilihat Mesin MAN-04 dan MAN-07 hasil perhitungan perubahan frekuensi setelah dilakukan pelepasan beban sebesar 588 kW sehingga frekuensi pada sistem mengalami kenaikan dari frekuensi awal dilakukan pelepasan beban 49,44 Hz hingga mencapai frekuensi normal 50,04 Hz dalam kurun waktu 3,6 detik. Maka peneliti menentukan frekuensi awal pelepasan beban hingga mencapai frekuensi normal dengan membuat grafik atau diagram batang dari hasil perhitungan perubahan frekuensi setelah dilakukan pelepasan beban agar dapat dilihat dengan jelas kenaikan frekuensi dari frekuensi awal dilakukan pelepasan beban hingga mencapai frekuensi normal.



Gambar 4. Grafik Hasil Perhitungan Perubahan Frekuensi Setelah Pelepasan Beban Akibat *Trip*-nya Mesin MAN-04 Dam MAN-07 (PLN).

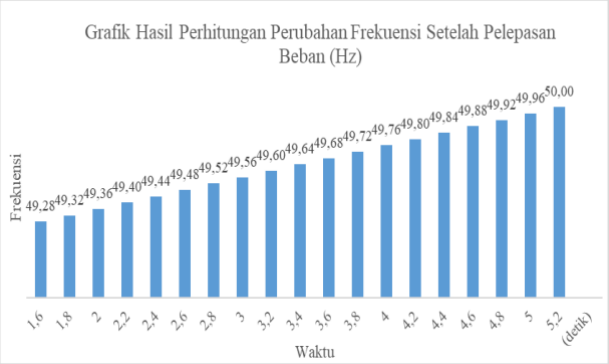
Pada Gambar 4, dapat dilihat hasil perhitungan perubahan frekuensi setelah dilakukan pelepasan beban sebesar 588 kW sehingga frekuensi mengalami kenaikan dari frekuensi 49,44 Hz mencapai frekuensi normal 50,04 Hz dalam kurun waktu 3,6 detik.

TABEL 10. HASIL PERHITUNGAN PERUBAHAN FREKUENSI SETELAH PELEPASAN BWBAN AKIBAT *TRIP*-NYA MESIN KOMATSU-09 (P3) DAN KOMATSU-12 (P3)

Beban Yang Dilepas	Frekuensi Lepas Beban	Selang Waktu	df/dt	Frekuensi (Hz)
		1,6	0,2306	49,28
		1,8	0,2308	49,32
		2	0,2310	49,36
		2,2	0,2312	49,40
		2,4	0,2314	49,44
		2,6	0,2316	49,48
		2,8	0,2318	49,52
		3	0,2319	49,56
558kW	49,28 Hz	3,2	0,2321	49,60
		3,4	0,2323	49,64
		3,6	0,2325	49,68
		3,8	0,2327	49,72
		4	0,2329	49,76
		4,2	0,2331	49,80
		4,4	0,2333	49,84
		4,6	0,2334	49,88
		4,8	0,2336	49,92
		5	0,2338	49,96
		5,2	0,2340	50,00

Berdasarkan Tabel 10 mesin KOMATSU-09 (P3) dan KOMATSU-12 (P3). bisa dilihat hasil perhitungan perubahan frekuensi setelah dilakukan pelepasan beban sebesar 588 kW sehingga frekuensi pada sistem mengalami kenaikan dari frekuensi awal dilakukan pelepasan beban 49,28 Hz hingga mencapai frekuensi normal 50,00 Hz dalam kurun waktu 5,2 detik. Maka peneliti menentukan frekuensi awal pelepasan beban hingga mencapai frekuensi normal dengan membuat grafik atau diagram batang dari hasil perhitungan perubahan frekuensi setelah dilakukan pelepasan beban agar dapat dilihat dengan jelas kenaikan frekuensi dari

frekuensi awal dilakukan pelepasan beban hingga mencapai frekuensi normal.



Gambar 5. Grafik Hasil Perhitungan Perubahan Frekuensi Setelah Pelepasan Beban Akibat *Trip*-nya Mesin KOMATSU-09 (P3) dan) dan KOMATSU-12 (P3).

Pada gambar 5, mesin KOMATSU-09 (P3) dan KOMATSU-12 (P3) di atas dapat dilihat hasil perhitungan perubahan frekuensi setelah dilakukan pelepasan beban sebesar 588 kW sehingga frekuensi mengalami kenaikan dari frekuensi 49,28 Hz mencapai frekuensi normal 50,00 Hz dalam kurun waktu 5,2 detik.

SIMPULAN

Berdasarkan data dan hasil analisa perhitungan, dapat disimpulkan :

1. *Blackout* pada sistem tenaga listrik Kabupaten Fakfak diakibatkan karena *trip*-nya dua mesin MAN (PLN) dan dua mesin KOMATSU (P3) pada PLTD Kebun Kapas, sehingga terjadi kelebihan beban (*overload)* yang membuat frekuensi pada sistem mengalami penurunan karena daya yang dihasilkan pambangkit lebih kecil dari beban pada sistem, sehingga terjadi *blackout* pada sistem tenaga listrik kabupaten Fakfak.
2. Kelebihan beban pada sistem akibat *trip*-nya mesin pada PLTD Kebun Kapas mesin MAN-04 dan MAN-07 beban sebesar 4,76 %, mesin KOMATSU-09 dan KOMATSU-12 faktor kelebihan beban sebesar 6,20 %.
3. Penurunan frekuensi akibat *trip*-nya empat mesin pada PLTD Kebun Kapas pada mesin MAN-04 dan MAN-07 dari frekuensi normal 50 Hz hingga mencapai frekuensi tidak normal 49,30 Hz dalam kurun waktu 2 detik. Ketika frekuensi turun melebihi batas bawah yaitu 49,8 Hz, Pada mesin KOMATSU-9 dan KOMATSU-12 sehingga frekuensi mengalami penurunan dari frekuensi normal 50 Hz hingga mencapai frekuensi 49,10 Hz dalam kurun waktu 2 detik. Ketika frekuensi turun melebihi batas bawah yaitu 49,8 Hz dapat mengakibatkan terjadinya *blackout*.
4. Perubahan frekuensi setelah pelepasan beban pada mesin MAN-04 dan MAN-07 frekuensi mengalami kenaikan dari frekuensi 49,44 Hz mencapai frekuensi normal 50,04 Hz dalam kurun waktu 3,6 detik. Pada KOMATSU-09 (P3) dan KOMATSU-12 (P3). frekuensi mengalami kenaikan dari frekuensi 49,28 Hz mencapai frekuensi normal 50,00 Hz dalam kurun waktu 5,2 detik.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. D. Nofvowan, M. Mieftah, And W. Kusuma, “Analisis Stabilitas Transien Tegangan dan Frekuensi Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap,” Elposys J. Sist. Kelistrikan, Vol. 8, No. 1, Pp. 28–33, 2021, Doi: 10.33795/Elposys.V8i1.31.

[2] N. D. Pratiwi And I. Isdiyato, “Analisis Ketidakstabilan Tegangan Dan Frekuensi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Soko Kembang,” Energi & Kelistrikan, Vol. 11, No. 2, Pp. 129–137, 2019, Doi: 10.33322/Energi.V11i2.864.

[3] W. Winarso and Y. Yunarto, “Analisa Dan Simulasi Stabilitas Transien Dengan Pelepasan Beban Pada Sistem Pembangkit Tenaga Listrik Pt. Indo Bharat Rayon,” Din. Rekayasa, Vol. 13, No. 2, P. 61, 2017, Doi: 10.20884/1.Dr.2017.13.2.170.

[4] F. Ariansyah, “Analisis Kestabilan Transien dan Pelepasan Beban Pada Sistem Integrasi 33 Kv PT. Pertamina Ru Iv Cilacap Akibat Penambahan Beban RFCC dan PLBC,” J. Tek. Its, Vol. 5, No. 1, Pp. 19–23, 2016, Doi: 10.12962/J23373539.V5i1.15169.

[5] A. Stabilitas, D. A. N. Penentuan, P. Tegangan, M. I. Azmi, And M. Facta, “Frekuensi Di Generator Transformator PLTP Darajat,” Vol. 10, No. 3, Pp. 460–467, 2021.

[6] J. Khodabakhsh, E. Mohammadi, and G. Moschopoulos, “Primary Frequency Control In Islanded Microgrids Using A Novel Smart Load,” Can. Conf. Electr. Comput. Eng., Vol. 2020-Augus, Pp. 18–21, 2020, Doi: 10.1109/Ccece47787.2020.9255760.

[7] Y. Nantan Et Al., “Analisa Teknis Kondisi Blackout Pada PLTD Kebun Kapas PT . PLN (Persero) ULP Fakfak Technical Analysis Of Blackout Conditions At PLTD Kebun Kapas , PT . PLN (Persero) ULP Fakfak,” Vol. 20, No. 2, 2023.

[8] S. Sofyar, “Studi Skenario Load Shedding Pada Penyulang Dalam Operasi Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Under Frequency

Relay," J. Eltikom, Vol. 4, No. 1, Pp. 65–75, 2020, Doi: 10.31961/Eltikom.V4i1.162.

[9] R. A. Diantari And M. Rafsanjani, "Studi Laju Penurunan Frekuensi Pada Sistem Kelistrikan Sumatera Bagian Utara Dengan Skema Pelepasan Beban," Sutet, Vol. 9, No. 2, Pp. 72–80, 2019, Doi: 10.33322/Sutet.V9i2.548.

[10] A. Nawawi, "Sistem Load Shedding Pada Generator," Pusdiklatmigas.Com, Vol. 05, No. 2, 2014, [Online]. Available: Http://Www.Pusdiklatmigas.Com/File/T3-Load_Shedding.Pdf

[11] T. Baruna, H. Ahmad, N. Alamsyah, Y. Hakimah, And S. Prabumulih, "Listrik Pertamina Talisman Dengan Menggunakan Relay Pendahuluan Latar Belakang Job Pertamina Talisman Merupakan Sebuah Perusahaan Yang Bergerak Dibidang Pengeboranminyak Dan Berlokasi Di Daerah Air Salah Satu Penyebab Gangguan Pengiriman Daya Listrik Adal," Vol. 3, No. 1, 2015.

[12] T. V. B. Karo, J. Windarta, And M. Facta, "Analisis Pelepasan Beban (Load Shedding) Menggunakan Under Frequency Relay Pada Pembangkitan Tanjung Jati B Jepara," Transient, Vol. 7, No. 1, P. 138, 2018, Doi: 10.14710/Transient.7.1.138-144.

[13] N. Nuswantara, W. G. Ariastina, And A. A. N. Amrita, "Studi Kestabilan Sistem Dan Pelepasan Beban (Load Shedding) Berdasarkan Standar Ieee di PT. Pertamina (Persero) Refinery Unit IV," J. Spektrum, Vol. 4, No. 1, P. 66, 2017, Doi: 10.24843/Spektrum.2017.V04.I01.P11.

[14] E. M. Sartika, R. Sarjono, And R. S. Restianto, "Simulasi Sistem Otomasi Load Shedding Menggunakan Prediksi Beban," Elkomika J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron., Vol. 7, No. 1, P. 180, 2019, Doi: 10.26760/Elkomika.V7i1.180.

[15] A. Adrianti, M. Nasir, And A. R. Salvayer, "Skema Pelepasan Beban Menggunakan Relai Rate Of Change Of Frequency Dengan Supervisi Under Frequency Relay," Maj. Ilm. Teknol. Elektro, Vol. 19, No. 2, P. 249, 2020, Doi: 10.24843/Mite.2020.V19i02.P18.