

Analisis Pelepasan Beban Sistem Jaringan Bengkulu dengan Penambahan PLTU Teluk Sepang 2×100 MW

Afriyastuti Herawati^{1,2}, Rinda Apriliani¹, Irnanda Priyadi¹, Ika Novia Anggraini^{1,2}, Yuli Rodiah¹, Nilda Tri Putri^{2,3}

¹ Program Studi Teknik Elektro Universitas Bengkulu, ²Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur Universitas Andalas,

³Jurusan Teknik Industri Universitas Andalas

E-mail: afriyastuti_herawati@unib.ac.id

ABSTRACT

Load shedding is one way to overcome the rapid decrease in frequency due to transient disturbances. With load shedding the rate of decrease in system frequency can be slowed down so as to avoid total blackouts in the power system. Currently, the Bengkulu network system has added a new power plant, namely PLTU 2×100 MW in Teluk Sepang. This paper analyzes load shedding on the Bengkulu network system after the inclusion of PLTU Teluk Sepang. The proposed method is load shedding taking into account the Rate Of Change Of Frequency (ROCOF) and critical fault clearing time (CCT) after a transient fault occurs and then analyzing the stability of the system transient before and after the load shedding occurs with three phase short circuit disturbance. The analysis found that the proposed method succeeded in returning the dropped frequency to the permitted frequency value and the system showed a stable response after a transient disturbance occurred.

Keywords: CCT, Load Shedding, ROCOF, transient stability

ABSTRAK

Pelepasan beban merupakan salah satu cara untuk mengatasi terjadinya penurunan frekuensi yang cepat akibat terjadinya gangguan transien. Dengan pelepasan beban laju penurunan frekuensi system dapat diperlambat sehingga dapat menghindari terjadinya pemadaman total pada system tenaga. Saat ini system jaringan Bengkulu sudah ada penambahan pembangkit baru yaitu PLTU 2×100 MW di Teluk Sepang. Pada makalah ini, dianalisis pelepasan beban pada system jaringan Bengkulu setelah masuknya PLTU Teluk Sepang. Metode yang diajukan yaitu pelepasan jumlah beban dengan memperhitungkan laju penurunan frekuensi (rate of change of frequency/ROCOF) dan waktu pemutusan gangguan kritis setelah terjadinya gangguan transien kemudian dianalisis kestabilan transien system sebelum dan setelah pelepasan beban terjadi dengan beberapa variasi gangguan. Dari analisis didapatkan bahwa dengan metode yang diajukan berhasil mengembalikan frekuensi yang turun ke nilai

frekuensi yang diizinkan dan system menunjukkan respon yang stabil setelah terjadi gangguan transien.

Kata kunci : kestabilan transien, pelepasan beban, waktu pemutusan gangguan kritis

1. PENDAHULUAN

Dalam suatu system tenaga gangguan bisa terjadi kapan saja baik gangguan besar maupun kecil. Gangguan yang terjadi dalam system dapat menyebabkan terjadinya ketidakstabilan. Kestabilan merupakan kemampuan system tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi kesetimbangan ketika system terjadi gangguan[1]. Jika gangguan lambat diselesaikan maka akan mengakibatkan terjadinya pemadaman total pada system akibat frekuensi turun di bawah nilai yang diizinkan [2]. Untuk Indonesia frekuensi yang digunakan adalah 50 Hz[3]. Pemadaman total atau blackout pernah terjadi di Indonesia pada 4 Agustus 2019 sebagian Jawa-Bali mengalami pemadaman listrik serentak yang mengakibatkan 21 juta konsumen listrik mengalami pemadaman. Peristiwa ini disebabkan terjadinya gangguan pada saluran transmisi 500kV Jawa-Bali[4][5][6]. Ketika terjadi gangguan transien maka frekuensi akan turun. Laju penurunan frekuensi (ROCOF) ini dihitung dan dianalisis sebagai dasar penentuan jumlah beban yang akan dilepas dalam setiap tahapannya[7][8].

Dalam pelepasan beban terdapat beberapa metode yang dapat digunakan salah satunya adalah dengan metode adaptif[9]. Dalam metode adaptif ini diperhitungkan laju penurunan frekuensi dalam menentukan skema pembagian beban.

Saat ini system jaringan listrik provinsi Bengkulu terdapat penambahan pembangkit baru yaitu PLTU Teluk Sepang 2×100 MW. Sebelum penambahan ini sudah pernah dianalisis kestabilan transien system Bengkulu dan skema pelepasan beban saat frekuensi mengalami penurunan akibat gangguan transien[10]. Namun untuk penambahan PLTU Teluk Sepang 2×100 MW belum

dilakukan analisis kestabilan transien dan skema pelepasan bebannya.

Penelitian yang terkait dengan pelepasan beban ini diantaranya menggunakan metode konvensional yaitu dengan menggunakan under frequency relay dan under voltage relay[11][12][13] dengan nilai setting relay yang tetap. Selain itu juga ada yang menggunakan metode adaptif yaitu dengan memperhitungkan *rate of change of frequency* (ROCOF) atau laju penurunan frekuensi[14][15][16]. Namun tidak memperhitungkan waktu pemutusan gangguan kritis atau critical fault clearing time (CCT). Sedangkan CCT ini menentukan ketika terjadi gangguan akan terjadi pemutusan beban atau tidak.

Pada makalah ini akan diajukan skema pelepasan beban system jaringan kelistrikan Bengkulu setelah penambahan PLTU Teluk Sepang 2 x 100 MW akibat gangguan transien dengan memperhitungkan laju penurunan frekuensi (ROCOF) dan waktu pemutusan kritis (CCT). Dalam metode ini pertama akan dilakukan pengamatan pada kestabilan transien atau sudut rotor tanpa gangguan. Setelah itu system diberi gangguan transien, kemudian dihitung besar sudut kritis, waktu pemutusan kritis dan laju penurunan frekuensi. Nilai-nilai ini kemudian dijadikan dasar sebagai penentuan besar daya yang akan dilepas.

Dengan metode ini diharapkan akan didapatkan perkiraan awal nilai CCT dan skema besar beban yang di lepas saat terjadi gangguan pada system Bengkulu dengan lebih akurat sesuai dengan nilai ROCOF nya.

2. KERANGKA TEORITIS

A. Kriteria Sama Luas Pada Kestabilan

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk memprediksi stabilitas adalah metode kriteria sama luas. Metode ini hanya bisa digunakan untuk sistem satu mesin yang terhubung ke bus tak terbatas atau sistem dua mesin. Persamaan (1) dapat digunakan untuk menurunkan metode kriteria sama luas sebagai berikut [1]:

$$E = V_{\infty} + I_g(R_e + j(X_e + X'_d)) \quad (1)$$

Nilai R_e dan X_e ditentukan dari kondisi sebelum gangguan dengan persamaan:

$$R_e = \frac{P_e}{I_g^2} \quad (2)$$

$$X_e = \frac{Q_e}{I_g^2} \quad (3)$$

$$I_g = \frac{\frac{P_g}{MVA_{base}} + j \frac{Q_g}{MVA_{base}}}{V_g} \quad (4)$$

$$P_e = P_{max} \sin \delta \quad (5)$$

$$P_{max} = \frac{|E| |V_{\infty}|}{X} \quad (6)$$

Dimana:

V_{∞} = Tegangan *infinite bus* (Pu).

I_g = Arus generator (Pu).

R_e = Resistansi elektrik (Pu).

X_e = Reaktansi elektrik (Pu).

P_e = Daya elektrik (Pu).

P_g = Daya aktif generator (Pu).

Q_g = Daya reaktif generator (Pu).

P_{max} = Daya maksimal (Pu).

δ = Sudut daya (θ).

E = Tegangan terminal mesin (Pu).

X'_d = Reaktansi transien generator (Pu).

X = Reaktansi pengganti (Pu).

Untuk menganalisa kestabilan transien ada tiga kurva yang harus diselesaikan dengan menggunakan metode kriteria sama luas, yaitu [1]:

1. Kondisi sebelum gangguan.

Pada kondisi ini, nilai reaktansi ditulis pada persamaan berikut.

$$X = X'_d + X_{T1} + \frac{(X_{ST})(X_{ST1} + X_{ST2})}{X_{ST} + X_{ST1} + X_{ST2}} + X_{T2} \quad (7)$$

Dimana:

X = Reaktansi sebelum gangguan (Pu).

X'_d = Reaktansi transien (Pu).

X_T = Reaktansi trafo (Pu).

X_{ST} = Reaktansi saluran transmisi (Pu).

$X_{ST1} = X_{ST2} = X_{ST}$ dibagi 2 (Pu).

2. Kondisi saat gangguan.

Pada kondisi ini, nilai reaktansi ditulis pada persamaan berikut.[1]

$$x'_{d1} = \frac{(X_{ST})(X_{ST1})}{X_{ST} + X_{ST1} + X_{ST2}} \quad (8)$$

$$x'_{d2} = \frac{(X_{ST})(X_{ST2})}{X_{ST} + X_{ST1} + X_{ST2}} \quad (9)$$

$$x'_{d3} = \frac{(X_{ST1})(X_{ST2})}{X_{ST} + X_{ST1} + X_{ST2}} \quad (10)$$

$$X' = \frac{(x'_{d2} + X_{T2}) + (x'_{d3} + X_{T1})(x'_{d1} + X_{T1})}{x'_{d3}} \quad (11)$$

3. Kondisi saat gangguan hilang.

Pada kondisi ini, gangguan diatasi dengan membuka *Circuit Breaker* dekat bus yang terjadi gangguan dan *infinite bus*. Reaktansi untuk kondisi setelah gangguan hilang sebagai berikut.

$$X'' = X'_d + X_{T1} + X_{ST} + X_{T2} \quad (12)$$

4. Menghitung CCT dan sudut kritis

Untuk perhitungan waktu pemutusan kritis (CCT) dan sudut kritis digunakan persamaan (13) s.d (17).

$$\frac{d^2 \delta_k}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f}{H} P_m \int_0^{t_k} dt = \frac{\pi \cdot f}{H} P_m t \quad (13)$$

$$t_k = \sqrt{\frac{4H(\delta_k - \delta_0)}{\pi \cdot f P_m}} \quad (14)$$

$$\delta_0 = \sin^{-1} \left[\frac{P_m}{P_{mak1}} \right] \quad (15)$$

$$\delta_{mak} = \pi - \sin^{-1} \left[\frac{P_m}{P_{mak3}} \right] \quad (16)$$

$$\delta_k = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{\pi}{180} P_m (\delta_{mak} - \delta_0) - P_{mak} \cos \delta_0 + \cos \delta_{mak}}{P_{mak} \cos \delta_0 - P_{mak} \cos \delta_{mak}} \right] \quad (17)$$

Dimana :

f = Frekuensi (Hz).

P_m = Daya mekanis (W).

δ_k = Sudut kritis (θ).

δ_0 = Sudut daya awal (θ).

t_k = waktu pemutusan kritis (s).

H = Konstanta yang berhubungan dengan kelembaman (MW-s/MVA).

B. Pelepasan Beban

Pelepasan beban merupakan salah satu fenomena yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik yang memungkinkan pelepasan beberapa beban dari sistem tersebut guna menghasilkan kestabilan sistem tenaga listrik tersebut. Ini biasanya disebabkan oleh kelebihan sistem. Oleh karena itu, untuk mengembalikan sistem ke keadaan normalnya, beban tertentu harus dilepaskan. Gangguan yang disebabkan oleh beban lebih biasanya dipicu oleh beberapa hal antara lain [10]:

- Adanya generator yang lepas dari pembangkit berarti beban yang seharusnya disuplai oleh generator tersebut dipikul oleh generator lain
- Terjadi gangguan pada saluran transmisi, sehingga beberapa beban tidak dapat dialiri oleh salah satu generator dalam sistem yang saling berhubungan.

C. Laju/Kecepatan Penurunan Frekuensi (Rocof)

Untuk mendapatkan nilai kecepatan turunnya frekuensi maka dipakai persamaan ayunan/swing generator [1]:

$$\frac{df}{dt} = - \left(\frac{P_s}{2GH} \right) \times f_0 \quad (\text{Hz.s}^{-1}) \quad (18)$$

Dimana:

$\frac{df}{dt}$ = kecepatan turunnya frekuensi
 P_s = Daya beban lebih (W)
 G = Daya Semu Generator (MVA)
 H = Ketetapan inersia untuk generator
 f_0 = Frekuensi keadaan normal

Konstanta/ketetapan inersia diperoleh dengan persamaan (19).

$$H = \frac{\text{energi kinetik mesin (MW)}}{\text{rating mesin (MVA)}} \quad (19)$$

Untuk memperoleh besar frekuensi saat *circuit breaker* (CB) bekerja dipakai persamaan (20),(21) dan (22).

$$f_{load shedding} = \left[f_0 - \frac{df}{dt} (t_{trip}) \right] \quad (\text{Hz}) \quad (20)$$

$$t_{trip} = t_{pick-up} + t_{CB} + t_{relay} \quad (21)$$

$$t_{pick-up} = \frac{f_0 - f_1}{\frac{df}{dt}} \quad (22)$$

Laju/kecepatan pemulihan frekuensi selama 5 detik setelah beban dilepas dan frekuensi pemulihan sama dengan frekuensi nominal (50 Hz) dihitung dengan persamaan (23) (perhitungan diterapkan pada setiap tahap pelepasan beban:

$$f_0 = f + \frac{df}{dt} t \quad (\text{Hz}) \quad (23)$$

Dimana:

$\frac{df}{dt}$ = Laju/kecepatan Pemulihan Frekuensi

f = Frekuensi kerja CB/PMT

t = Waktu pemulihan yang diinginkan (5 s)

Dari kalkulasi laju/kecepatan pemulihan frekuensi diatas dapat diperkirakan nilai beban yang dapat diputus/lepas dari system dalam tiap tahapan digunakan persamaan ayunan pada persamaa (24).

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_{gen} - (P_{load} - P_{load shedding})}{2GH} \times f_0 \quad (24)$$

Dimana:

P_{gen} = daya generator (MW)

P_{load} = daya beban (MW)

$P_{load shedding}$ = daya pelepasan beban (MW)

D. Pengaturan Frekuensi

Daya aktif (MW) berkaitan erat dengan frekuensi (Hz). Jika daya aktif yang dihasilkan sesuai dengan permintaan pengguna, maka frekuensinya adalah 50Hz. Walaupun beban pengguna terus berubah, frekuensi grid harus dipertahankan pada nominal 50Hz dengan toleransi $\pm 0,2\text{Hz}$ [8].

E. Keseimbangan Pembangkit Dan Beban

- Frekuensi sama dengan 50 Hz
Menunjukkan keseimbangan sesaat antara daya aktif pembangkitan (MW) dan daya aktif beban (MW), nilai nominal (= 50 Hz), ketika daya aktif pembangkitan sama dengan daya aktif beban.
- Frekuensi lebih besar dari 50 Hz
Frekuensi jaringan lebih besar dari nilai pengenalan (> 50Hz), ketika pembangkitan daya aktif lebih besar dari konsumsi daya aktif beban, untuk kembali ke 50Hz, pembangkitan daya aktif akan berkurang
- Frekuensi lebih kecil dari 50 Hz
Frekuensi jaringan lebih rendah dari nilai nominal 50Hz, ketika daya pembangkitan efektif lebih rendah dari daya efektif yang diserap oleh beban, untuk kembali ke 50Hz, daya pembangkitan efektif ditambahkan.

F. Perhitungan Besar Kehilangan Daya

Kehilangan daya yang disebabkan terjadinya gangguan dalam sistem dapat di hitung dengan mengetahui nilai arus gangguan yang terjadi dan nilai impedansi transformator. Untuk menghitung nilai impedansi yang sesungguhnya dengan menggunakan Persamaan 2.33 [10]:

$$Z_t = \frac{V^2}{S} \quad (25)$$

Dimana:

Z_t = impedansi trafo tenaga (Ω)

V = tegangan sekunder trafo (kV)

S = daya semu trafo (MVA)

Nilai impedansi transformator tenaga urutan positif dan urutan negatif ($Z_{t1} = Z_{t2}$), impedansi urutan nol (X_{t0}).

$$Z_{t1} = Z_{t2} = Z\% \times Z_t \quad (26)$$

Setelah didapat besarnya nilai impedansi transformator tenaga, maka besarnya daya yang hilang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.35

$$P_{loss} = I_{sc}^2 \times Z \quad (27)$$

Dimana:

P_{loss} = daya yang hilang (MW)

I_{sc} = arus gangguan (A)

Z = impedansi transformator (Ω)

3. METODE RISET

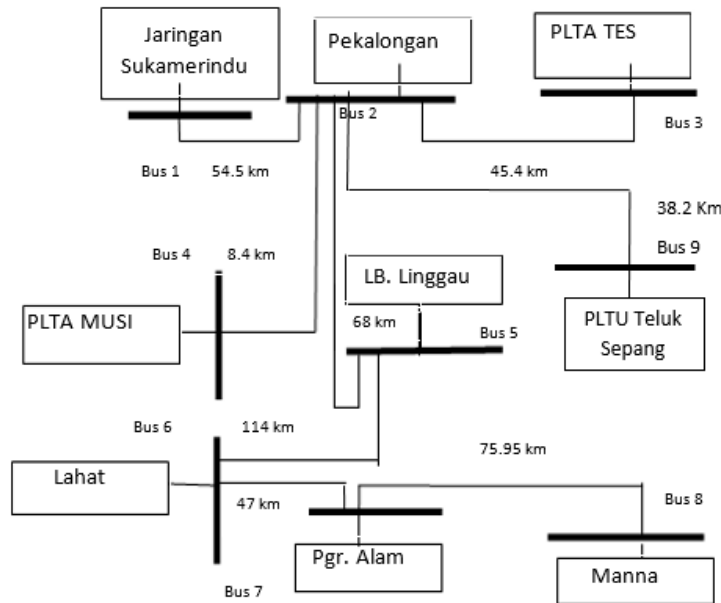
A. Diagram Sistem Kelistrikan Bengkulu

Diagram system kelistrikan Bengkulu merupakan salah satu data yang dibutuhkan dalam penelitian ini. Data ini menjadi acuan untuk analisis kesatabilan yang akan disimulasikan. Gambar 1 merupakan jaringan sistem tenaga listrik yang akan disimulasikan, terdiri atas sembilan bus dengan dua pembangkit utama yaitu PLTA Musi dan PLTA Tes. Bus 9 pada Gambar 1 adalah gardu induk Pulau Baai, dimana pada gardu induk ini akan ditambah PLTU 2 x 100 MW. Setelah penambahan PLTU 2 x 100 MW akan dilakukan simulasi untuk dapat

menganalisa bagaimana pengaruh penambahan PLTU 2 x 100 MW terhadap kestabilan transien sistem kelistrikan Bengkulu. Selanjutnya, dilakukan simulasi dengan memberi gangguan berupa salah satu pembangkit lepas/trip dari sistem atau gangguan tiga fasa ke tanah. Kemudian baru dianalisa apakah penambahan PLTU 2 x 100 MW dapat mempertahankan kestabilan transien sistem kelistrikan Bengkulu ketika terjadi gangguan. Setelah itu dilakukan pelepasan beban untuk mendapatkan kinerja sistem tenaga listrik yang lebih baik pada sistem kelistrikan Bengkulu. Data generator dan saluran disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

B. Simulasi Kestabilan Transien dan Perhitungan CCT

Pada penelitian ini disimulasikan kestabilan transien dengan metode kriteria sama luas. Metode ini digunakan untuk menentukan keadaan stabil atau tidak dengan cara menentukan waktu pemutusan kritis dan melihat perbandingan besar sudut daya sebelum terjadi gangguan δ_0 dan sudut daya sesudah terjadi gangguan δ_{mak} yang diberikan PLTA Tes dan PLTA Musi dalam sebuah kurva ayunan.



Gambar 1. Diagram Sistem Kelistrikan Bengkulu

Tabel 1. Data Generator

Generator	Rating Kapasitas (MVA)	Daya Operasi (MW)	Tegangan (KV)	Faktor Daya (pf)
Musi 1	84.5	70	11	0.85
Musi 2	84.5	70	11	0.85
Musi 3	84.5	70	11	0.85
Tess 1	4.9	4.41	6.6	0.9
Tess 2	4.9	4.41	6.6	0.9

Tess 3	4.9	4.41	6.6	0.9
Tess 4	4.9	4.41	6.6	0.9
Tess Lama 1	1.5	0.66	6.3	0.9
Tess Lama 2	1.5	0.66	6.3	0.9
TI Sepang 1	60	115	10.5	0.85
TI Sepang 2	60	115	10.5	0.85

Tabel 2. Data Saluran

No	Route	Tegangan (kV)	Jarak (km)	Z1 (ohm/km)		Z0 (ohm/km)	
				R	X	R	X
1	Pagar Alam – Lahat	150	47,3	0.120	0.408	0.372	1.145
2	Lbk Linggau – Lahat	150	117,2	0.039	0.298	0.483	1.611
3	Tess- Pekalongan	70	40,0	0.157	0.379	0.630	2.098
4	Pekalongan - Sukamerindu	70	61,0	0.157	0.379	0.630	2.098
5	Pekalongan – Sukamerindu (Uprate)	70	61,0	0.079	0.278	0.308	1.202
6	Pekalongan – Lbk Linggau	150	69,6	0.043	0.275	0.530	1.674
7	Musi – Pekalongan	150	16,6	0.060	0.290	0.305	1.029
8	Pagar Alam - Manna	150	48,0	0.120	0.408	0.372	1.145
9	Pekalongan – Pulau Baai (Gardu PLTU Teluk Sepang)	150	45,0	0.120	0.408	0.372	1.145

Berdasarkan metode kriteria sama luas maka dihitung terlebih dahulu nilai daya mekanis P_m dan daya listrik P_e . Dimana nilai daya listrik P_e dapat dihitung menggunakan persamaan (5). Selanjutnya, menentukan waktu pemutusan kritis t_k menggunakan persamaan (14). Dalam hal ini membutuhkan parameter hitung seperti nilai sudut kritis δ_k , sudut daya awal δ_0 , nilai frekuensi, nilai konstanta inersia dan daya mekanis. Nilai frekuensi dan daya mekanis menggunakan nilai yang ada pada data *sheet* atau *name plate* generator. Sedangkan nilai sudut daya awal δ_0 dari penyelesaian aliran daya dan nilai sudut kritis δ_k didapatkan dari penyelesaian persamaan (17).

Berdasarkan perbandingan waktu lama gangguan selesai dengan nilai waktu pemutusan kritis, sistem dikatakan stabil jika nilai waktu lama gangguan selesai lebih kecil dari nilai waktu pemutusan kritis ($t_i < t_c$). Sebaliknya, sistem dikatakan tidak stabil jika nilai waktu lama gangguan selesai lebih besar dari nilai waktu pemutusan kritis ($t_i > t_c$).

C. Perencanaan Pelepasan Beban

Pelepasan beban dapat dilakukan jika beberapa kondisi terpenuhi, kondisi tersebut harus dipenuhi agar tidak menimbulkan masalah sistem tenaga listrik setelah pelepasan beban. Kondisi tersebut meliputi:

- Pelepasan beban berlangsung dalam beberapa tahap.
- Beban yang dilepas sekecil mungkin.
- Beban yang dilepas harus memenuhi kriteria tertentu yang tidak akan merugikan perusahaan jika dilepaskan.
- Pelepasan beban terjadi dengan semestinya, yaitu ketika sebenarnya terjadi penurunan frekuensi karena kelebihan beban.

Mengacu pada kebutuhan pelepasan beban, dapat dirancang skema pelepasan beban untuk sistem tenaga listrik kota Bengkulu. Untuk mendapatkan skema pelepasan beban frekuensi rendah yang sesuai untuk sistem tenaga listrik kota Bengkulu, perlu dilakukan pemilihan frekuensi operasi relai frekuensi rendah dan beban yang tepat untuk dilepaskan pada setiap tahap pelepasan beban. Untuk mendapatkan nilai-nilai ini Anda perlu melakukan beberapa hal:

- Merencanakan kombinasi lepasnya generator untuk memperkirakan nilai beban lebih yang terjadi pada sistem.
- Mengkalkulasikan turunnya frekuensi yang bias saja terjadi dari semua kombinasi lepasnya generator lepas dengan persamaan ayunan pembangkit sesuai dengan persamaan (18).
- Perkirakan nilai frekuensi saat CB beroperasi, UFR diaktifkan terlebih dahulu saat frekuensi jaringan 49,5Hz dan waktu pengoperasian relai 50 ms dan waktu pengoperasian sakelar 100 ms.
- Hitung tingkat pemulihan frekuensi yang diharapkan setelah pelepasan beban dan beban yang harus dilepaskan untuk mencapai tingkat pemulihan.

Pemilihan muatan yang akan dilepas menurut kriteria tertentu.

D. Laju Perubahan Frekuensi (ROCOF)

Penentuan frekuensi referensi tahap ini dan tahap berikutnya tergantung pada besarnya estimasi laju penurunan frekuensi yang terjadi dan waktu pengoperasian rele. Langkah-langkah yang harus dilakukan untuk mendapatkan nilai frekuensi operasi relai dan jumlah beban aktual yang harus dilepaskan pada setiap

tahap pelepasan beban setelah pembuatan kombinasi lepasnya pembangkit adalah dengan mengkalkulasi laju/kecepatan penurunan frekuensi dari setiap kombinasi generator yang dapat dilepas. Laju/kecepatan turunnya frekuensi tergantung pada jumlah kelebihan permintaan daya yang dihadapi, frekuensi nominal sistem, nilai daya semu pembangkit pada kondisi ideal, dan besarnya ketetapan inersia generator. Dalam perhitungan laju/kecepatan penurunan frekuensi digunakan persamaan ayunan generator sesuai dengan persamaan (18). Pengaturan waktu ini digunakan untuk menentukan perkiraan frekuensi akhir saat pelepasan beban akan terjadi setelah frekuensi trip terbesar terdeteksi.

E. Frekuensi Circuit Breaker (CB) Bekerja

Untuk mendapatkan nilai pelepasan beban yang sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga, maka frekuensi yang dijadikan acuan untuk menghitung kebutuhan pelepasan beban bukanlah frekuensi pada saat relai frekuensi beroperasi, melainkan frekuensi pada saat CB bekerja. Pada titik ini diambil asumsi bahwa relai frekuensi beroperasi tanpa penundaan hanya ketika frekuensi turun sebesar 49,5 Hz. Ini sesuai dengan standar frekuensi yang biasa disetujui untuk pembangkit listrik, yaitu IEEE C37-106 2003. Menurut standar tersebut, generator dapat beroperasi terus menerus jika frekuensi kerja memiliki nilai 49,5 – 50,5 Hz pada frekuensi nominal 50 Hz. Disebabkan umur generator yang relatif tua, frekuensi 49,5Hz dipilih sebagai frekuensi operasi relai tahap pertama dalam skema pelepasan beban ini. Untuk memperoleh nilai frekuensi pada saat CB beroperasi digunakan persamaan (20).

F. Laju/Kecepatan Pemulihan Frekuensi dan Kalkulasi Besar Daya pada Pelepasan Beban

Laju/kecepatan pemulihan frekuensi dihitung dengan Persamaan (24). Dalam skema pelepasan beban diinginkan frekuensi dapat kembali ke kondisi normal dalam waktu 5 detik setelah beban dilepas dan frekuensi system kembali ke 50 Hz.

Setelah menghitung laju pemulihan frekuensi nilai beban yang dilepaskan pada setiap fasa dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan ayunan pembangkit menurut persamaan (26).

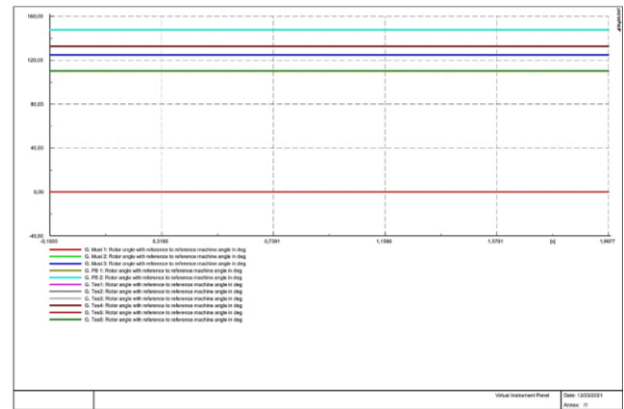
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Simulasi Sebelum Gangguan

Pada Simulasi berikut ini sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu dengan menambahkan unit PLTU 2x100 MW ke Bus 9 gardu induk Pulau Baai 150 kV sebelum diberi gangguan hubung singkat tiga fasa. PLTU terkoneksi ke dalam sistem tenaga kelistrikan Bengkulu dengan tegangan keluaran yang dihasilkan masing-masing generator yaitu 10.5 kV kemudian dinaikan tegangannya masing-masing menggunakan transformator daya 60 MVA, tegangan naik menjadi 150 kV. Dari hasil simulasi diperoleh grafik hasil simulasi respon dari kestabilan sudut

rotor sistem pada kondisi normal sesudah penambahan PLTU pada semua pembangkit yaitu generator unit PLTA Musi, generator unit PLTA Tess dan generator unit Pulau Baai yang dapat dilihat seperti pada Gambar 2.

Gambar 2 merupakan respon kestabilan sudut rotor sistem sesudah penambahan PLTU pada kondisi normal. Dapat dilihat bahwa seluruh generator pada PLTA Musi, PLTA Tes dan PLTU Teluk Sepang beroperasi dalam keadaan yang stabil karena pada sistem belum diberikan gangguan. Hasil Simulasi juga dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 2. Respon kestabilan sudut rotor sistem sesudah penambahan PLTU pada kondisi normal

Tabel 3. Sudut rotor generator dalam kondisi normal

Generator	Sudut Rotor (°)
PLTA Musi	119,994
PLTA Tes	124,486
PLTA Tes Lama	102,730
PLTU Teluk Sepang	144,326

B. Simulasi Gangguan

Kestabilan sudut rotor generator unit pembangkit Musi dan Tes pada sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu berdasarkan Gambar 2 hasil simulasi menunjukkan respon sudut rotor dalam kondisi stabil. Kemudian dilakukan simulasi dengan diberi gangguan transien berupa gangguan hubung singkat tiga fasa pada saluran transmisi Musi-Pekalongan karena gangguan jenis ini sering terjadi pada saluran transmisi.

1. Perhitungan reaktansi dan daya

Untuk menganalisa waktu pemutusan gangguan kritis dapat dilakukan terlebih dahulu perhitungan nilai reaktansi dan daya pada kondisi sebelum gangguan, selama gangguan dan setelah gangguan dengan nilai reaktansi saluran transmisi (X_{ST}) = 0,25 pu, X_{ST1} = 0,125 pu, dan X_{ST2} = 0,125 pu.

Nilai reaktansi saluran pada kondisi sebelum terjadi gangguan

$$X = 0,24 + 0,26 + \frac{(0,25)(0,125 + 0,125)}{(0,25 + 0,125 + 0,125)} + 0,26$$

$$X = 0,885 \text{ pu.}$$

Nilai reaktansi saluran pada kondisi saat terjadi gangguan

$$X'_{d1} = \frac{(0,25)(0,125)}{(0,25 + 0,125 + 0,125)} = 0,0625 \text{ pu.}$$

$$X'_{d2} = \frac{(0,25)(0,125)}{(0,25 + 0,125 + 0,125)} = 0,0625 \text{ pu.}$$

$$X'_{d3} = \frac{(0,125)(0,125)}{(0,25 + 0,125 + 0,125)} = 0,03125 \text{ pu.}$$

$$X' = \frac{(0,24 + 0,26)(0,03125) + (0,24 + 0,26)(0,0625 + 0,26) + (0,0625 + 0,26)(0,03125)}{(0,03125)} = 5,98 \text{ pu.}$$

Nilai reaktansi saluran pada kondisi setelah terjadi gangguan

$$X'' = 0,24 + 0,26 + 0,25 + 0,26 = 1,01 \text{ pu.}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai $P_{\max}$ dan P_e di ketiga kondisi tersebut dengan melakukan perhitungan nilai arus keluaran generator dan tegangan dalam generator terlebih dahulu

$$I_g = \frac{\left(\frac{194,2}{84,5}\right) + j\left(\frac{29,9}{84,5}\right)}{1,0} = \frac{(2,298 + j0,354)}{1,0} = 2,33 \angle 8,76^\circ \text{ pu.}$$

$$R_e = \frac{(2,298)}{2,35^2} = 0,423 \text{ pu.}$$

$$X_e = \frac{(0,354)}{2,35^2} = 0,065 \text{ pu.}$$

$$E = 1 + 2,33(0,423 + j(0,065 + 0,24)) = 1,74 \angle 35,79^\circ \text{ pu.}$$

Perhitungan nilai $P_{\max}$ dan P_e

Kondisi sebelum terjadi gangguan sebagai berikut.

$$P_{\max 1} = \frac{(1,74)(1,0)}{0,885} = 1,97 \text{ pu.}$$

$$P_{e1} = 1,97 \sin \delta$$

Kondisi saat terjadi gangguan sebagai berikut.

$$P_{\max 2} = \frac{(1,74)(1,0)}{0,125} = 13,92 \text{ pu.}$$

$$P_{e2} = 13,92 \sin \delta$$

Kondisi setelah terjadi gangguan sebagai berikut.

$$P_{\max 3} = \frac{(1,74)(1,0)}{1,01} = 1,72 \text{ pu.}$$

$$P_{e3} = 1,72 \sin \delta$$

2. Perhitungan sudut kritis dan CCT

Analisa perhitungan dapat dilihat sebagai berikut.

$$\delta_0 = \sin^{-1} \left[\frac{1,0}{1,97} \right] = 30,50^\circ = 0,53 \text{ rad.}$$

$$\delta_{\max} = \pi - \sin^{-1} \left[\frac{1,0}{1,72} \right] = -32,41^\circ = 2,52 \text{ rad.}$$

$$\delta_k = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{\pi}{180} 1,0(2,52 - 0,53) - 13,92 \cos(30,50^\circ) + \cos(-32,41^\circ)}{1,72 - 13,92} \right]$$

$$\delta_k = \cos^{-1} \left[\frac{-8,995}{-12,2} \right] = 42,498^\circ = 0,74 \text{ rad.}$$

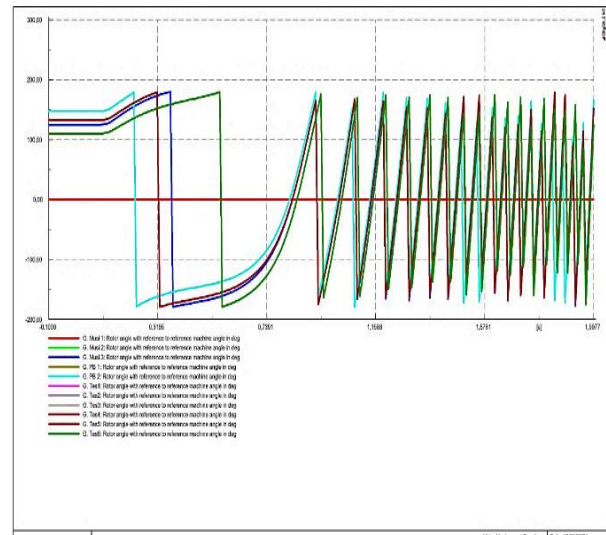
Untuk mendapatkan nilai waktu pemutusan kritis (CCT) dapat dihitung sebagai berikut.

$$t_k = \sqrt{\frac{4 \times 4(0,74 - 0,53)}{3,14 \times 50 \times 1,0}} = \sqrt{\frac{3,36}{157}} = 0,146 \text{ detik}$$

Setelah dilakukan analisa perhitungan waktu pemutusan kritis, maka sistem dapat diuji dengan menggunakan CCT yang telah dihitung.

3. Simulasi kestabilan

Setelah dilakukan simulasi dapat dilakukan analisa untuk mengetahui pengaruh waktu pemutusan gangguan yang diberikan terhadap respon sudut rotor, daya aktif, arus dan frekuensi pada semua generator yang terhubung ke sistem. Untuk hasil simulasi respon kestabilan sudut rotor pada semua generator dapat dilihat pada Gambar 3.



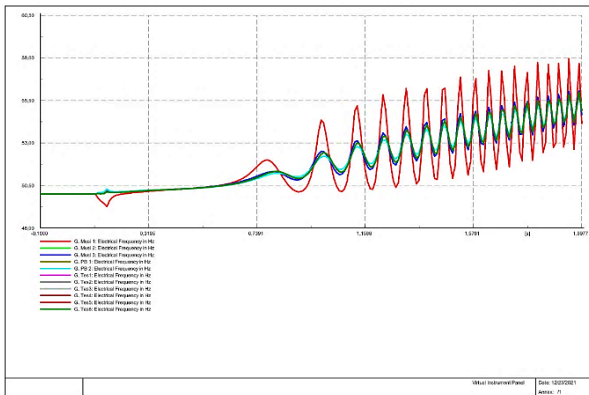
Gambar 3. Grafik hasil simulasi respon kestabilan sudut rotor dengan waktu pemutusan gangguan 146 milidetik.

Gambar 3 merupakan respon kestabilan sudut rotor terhadap waktu pemutusan gangguan yang diberikan yaitu 146 milidetik dan setelah diamati selama 2 detik. Dapat dilihat bahwa terjadi perubahan sudut rotor pada generator yang menyebabkan ketidakstabilan pada sistem, hal tersebut dikarenakan generator pada sistem mengalami perubahan sudut rotor serta mengalami gangguan pada detik ke 0,112. Perubahan sudut rotor yang dihasilkan terjadi karena sistem mengalami kelebihan daya serta lamanya waktu pemutusan gangguan yang memengaruhi sudut rotor di pembangkit.

Tabel 4. Hasil Simulasi Respon Arus Setelah Diberi Gangguan

Generator		Arus (kA)	
		Kondisi Normal	Setelah Diberi Gangguan
PLTA Musi	1	10,314	16,538
	2	3,844	4,871
	3	3,844	4,871
PLTA Tes	1	0,387	0,418
	2	0,387	0,418
	3	0,387	0,418
	4	0,387	0,418
	5	0,062	0,082
	6	0,062	0,082
PLTU Teluk	1	6,328	5,886
Sepang	2	6,328	5,886

Pemberian gangguan pada sistem berdampak pada hasil respon arus yang dihasilkan oleh masing-masing pembangkit seperti terlihat pada Tabel 4. Pada generator Musi 1 terjadi kenaikan nilai arus sebesar 6,224 kA serta generator Musi 2 dan Musi 3 mengalami kenaikan nilai arus sebesar 1,027 kA. Untuk generator PLTA Tes 1, Tes 2, Tes 3, dan Tes 4 mengalami kenaikan nilai arus sebesar 0,031 kA serta Generator PLTA Tes 5 dan Tes 6 mengalami kenaikan nilai arus sebesar 0,02 kA. Pada Generator Teluk Sepang 1 dan Teluk Sepang 2 terjadi penurunan nilai arus sebesar 0,442 kA. Selanjutnya grafik perubahan frekuensi terhadap terjadinya gangguan selama waktu 2 detik dengan waktu pemutusan 146 milidetik dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Grafik hasil simulasi respon frekuensi sesudah penambahan PLTU dengan waktu pemutusan gangguan 146 milidetik.

Pada Gambar 4 menunjukkan adanya perubahan frekuensi pada sistem sebelum penambahan PLTU dan setelah diberi gangguan. Ketika dilakukan penambahan PLTU dan diberi gangguan tiga fasa pada sistem, nilai frekuensi mengalami kenaikan terus menerus dari nilai frekuensi awal. Pada kondisi ini sistem dikatakan tidak

stabil, karena frekuensi belum kembali normal atau mendekati normal seperti frekuensi awal sebelum terjadi gangguan. Untuk mengembalikan frekuensi pada kondisi normal atau mendekati normal, maka perlu dilakukan pelepasan beban agar sistem mengalami kestabilan.

C. Simulasi Pelepasan Beban

1. Perhitungan laju penurunan frekuensi (ROCOF)

Besarnya nilai laju penurunan frekuensi (ROCOF) ini dipengaruhi oleh besarnya beban lebih, frekuensi nominal sistem, daya semu generator yang digunakan dalam sistem dan nilai konstanta/ketetapan inersia pada generator. Nilai laju penurunan frekuensi dihitung dengan persamaan (18). Penghitungan laju penurunan frekuensi ini dipakai dalam menentukan estimasi frekuensi system setelah pelepasan. Besar beban saat terjadi gangguan adalah 186,12 MW, sedangkan suplai beban sebesar 183,09 MW sehingga kelebihan beban sebesar 3,03 MW. Pada generator unit pembangkit PLTA Musi memiliki konstanta kelembaman yaitu $H = 4 \text{ MW.detik/MVA}$ dan frekuensi nominal sebesar 50 Hz. Untuk nilai daya semu generator pada sistem adalah 36,01 MVA.

$$\frac{d_f}{d_t} = -\frac{3,03 \text{ MW}}{(2 \times 36,01 \text{ MVA} \times 4 \text{ MW.s/MVA})} \times 50 \text{ Hz}$$

$$\frac{d_f}{d_t} = -0,526 \text{ Hz/s}$$

Dari perhitungan diatas maka didapatkan nilai laju penurunan frekuensi sebesar -0,526 Hz/s. Nilai yang diperoleh bernilai negatif menunjukan bahwa terjadinya perubahan frekuensi pada terjadi saat gangguan.

2. Perhitungan frekuensi pelepasan beban

Agar didapatkan jumlah beban yang dilepaskan sesuai akan kebutuhan dalam sistem, maka frekuensi yang dipakai sebagai referensi dalam perhitungan adalah frekuensi ketika *Circuit Breaker* (CB) bekerja. Setelah mendapatkan nilai perubahan frekuensi atau nilai laju penurunan frekuensi, maka selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan besar frekuensi CB bekerja dengan menggunakan Persamaan (20), Persamaan (21) dan Persamaan (22).

$$t_{pick\ up} = \frac{50 \text{ Hz} - 49,5 \text{ Hz}}{-0,526 \text{ Hz/s}}$$

$$t_{pick\ up} = -0,95 \text{ s}$$

$$t_{CB} = 0,1 \text{ s}$$

$$t_{rele} = 0,05 \text{ s}$$

$$t_{trip} = -0,95 \text{ s} + 0,1 \text{ s} + 0,05 \text{ s}$$

$$t_{trip} = -0,801 \text{ s}$$

$$f_{load\ shedding} = |50 \text{ Hz} - (-0,526 \text{ Hz/s})(-0,801 \text{ s})|$$

$$f_{load\ shedding} = 49,58 \text{ Hz}$$

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan maka didapatkan nilai frekuensi yang digunakan untuk melakukan pelepasan beban adalah 49,58 Hz. Pelepasan beban dilakukan dengan mempertimbangan kemampuan

sistem untuk mengembalikan frekuensi system ke nilai standar IEEE C37-106 2003 yaitu 10 detik.

3. Perhitungan jumlah beban yang dilepas

Penentuan beban yang harus dilepas harus mempertimbangkan beberapa parameter, yaitu frekuensi yang diharapkan setelah pelepasan beban dan waktu pemulihan. Untuk mendapatkan nilai pelepasan beban yang tepat, laju/kecepatan pemulihan frekuensi yang diharapkan pada saat terjadi pelepasan beban harus dihitung terlebih dahulu. Dengan skema pelepasan beban ini, kecepatan harus pulih dalam 5 detik setelah beban dilepas dan kecepatan akhir setelah pemulihan adalah frekuensi nominal (50Hz). Laju/kecepatan pemulihan frekuensi bisa dihitung dengan persamaan (23)..

$$f_0 = f + \frac{d_f}{d_t} t$$

$$50 \text{ Hz} = 49,58 \text{ Hz} + \frac{d_f}{d_t} (5 \text{ s})$$

$$-\frac{d_f}{d_t} (5 \text{ s}) = 49,58 \text{ Hz} - 50 \text{ Hz}$$

$$-\frac{d_f}{d_t} = \frac{-0,421 \text{ Hz}}{5 \text{ s}}$$

$$\frac{d_f}{d_t} = 0,0842 \text{ Hz/s}$$

Nilai laju pemulihan frekuensi yang didapat setelah melakukan perhitungan diatas adalah sebesar 0,0842 Hz/s. Nilai tersebut adalah nilai yang diharapkan untuk kecepatan pemulihan frekuensi ketika dilakukan pelepasan beban. Dengan hasil ini maka dapat diestimasikan besar beban yang di lepas melalui Persamaan (24).

$$\frac{d_f}{d_t} = \frac{P_{gen} - (P_{load} - P_{load \text{ shedding}})}{2 \times G \times H} \times f_0$$

$$0,0842 \text{ Hz/s} = \frac{183,09 \text{ MW} - (186,12 \text{ MW} - P_{load \text{ shedding}})}{2 \times 36,01 \text{ MVA} \times 4 \text{ MW.s/MVA}} \times 50 \text{ Hz}$$

$$0,0842 \text{ Hz/s} = \frac{183,09 \text{ MW} - (186,12 \text{ MW} - P_{load \text{ shedding}})}{288,08 \text{ MW.s}} \times 50 \text{ Hz}$$

$$0,0842 \text{ Hz/s} \times 288,08 \text{ MW.s} = \frac{183,09 \text{ MW} - (186,12 \text{ MW} - P_{load \text{ shedding}})}{50 \text{ Hz}}$$

$$24,08 \text{ MW} = 183,09 \text{ MW} - (186,12 \text{ MW} - P_{load \text{ shedding}})$$

$$24,08 \text{ MW} = 183,09 \text{ MW} - 186,12 \text{ MW} + P_{load \text{ shedding}}$$

$$24,08 \text{ MW} = -3,03 \text{ MW} + P_{load \text{ shedding}}$$

$$P_{load \text{ shedding}} = 27,11 \text{ MW}$$

Setelah dilakukan perhitungan diatas maka didapatkan nilai beban minimal yang harus dilepas untuk memulihkan frekuensi adalah sebesar 2,54 MW. Pelepasan beban dalam sistem tenaga listrik adalah hal yang sangat dihindari. Maka dari itu, besarnya beban yang akan dilepaskan dirancang seminimal mungkin sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik dalam memperbaiki frekuensi agar pada saat pelepasan beban tidak terjadi pemadaman total. Beban yang dilepas harus memiliki prioritas paling rendah dibandingkan beban lain dalam sistem tenaga listrik. Pemilihan beban yang dilepas pada sistem saat terjadi gangguan tiga fasa pada saluran transmisi Musi-Pekalongan adalah beban pada GI Pekalongan 70/20 kV sebesar 3,2 MW, hal ini dikarenakan beban tersebut adalah beban mendekati dan telah memenuhi nilai hasil perhitungan untuk beban yang dilepas.

4. Perhitungan penurunan daya

Untuk mengetahui berapa besar kehilangan daya aktif pada saat terjadi gangguan pada saluran transmisi Musi-Pekalongan, maka dilakukan perhitungan penurunan daya aktif pada unit pembangkit. Pada perhitungan penurunan daya aktif diperlukan nilai arus gangguan yang terjadi pada saluran transmisi Musi-Pekalongan dan nilai impedansi trafo unit pembangkit [17]. Nilai arus gangguan dari hasil perhitungan sebelumnya adalah sebesar 115470,07 A. Untuk nilai impedansi trafo dapat dihitung menggunakan Persamaan (25).

$$Z_t = \frac{(11 \text{ kV})^2}{84,5 \text{ MVA}}$$

$$Z_t = 1,43 \Omega$$

Nilai impedansi trafo yang didapat sebesar 1,43 Ω digunakan untuk mencari impedansi trafo urutan positif dan urutan negatif yang dikalikan dengan persen impedansi yang tertera pada nameplate trafo dengan Persamaan (26).

$$Z_{t1} = Z_{t2} = 10,9 \% \times 1,43 \Omega$$

$$Z_{t1} = Z_{t2} = 0,1558 \Omega$$

Sedangkan untuk menghitung nilai impedansi trafo urutan nol, dimana trafo tenaga pada unit pembangkit Musi menggunakan belitan Y/ Δ , maka

$$Z_{t0} = 3 \times 0,1588 \Omega$$

$$Z_{t0} = 0,4674 \Omega$$

Untuk menghitung nilai besarnya kehilangan daya pada pembangkit akibat terjadinya gangguan pada saluran transmisi Musi-Pekalongan dapat menggunakan Persamaan (27)

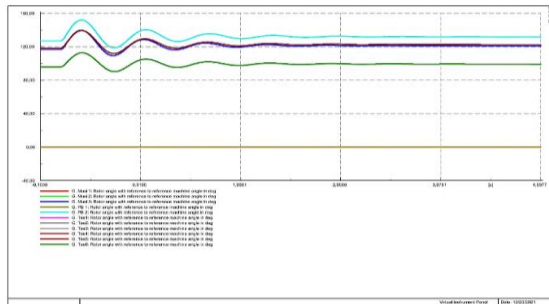
$$P_{loss} = (115470,07 \text{ A})^2 \times 0,4674 \Omega$$

$$P_{loss} = 6,232 \text{ MW}$$

Setelah dilakukan perhitungan besarnya kehilangan daya aktif pada unit pembangkit akibat gangguan tiga fasa pada saluran transmisi Musi-Pekalongan adalah sebesar 6,232 MW.

5. Simulasi kestabilan setelah pelepasan beban

Simulasi kestabilan system setelah diberi gangguan hubung singkat tiga fasa pada saluran transmisi Musi-Pekalongan dan dilakukan pelepasan beban pada trafo GI Pekalongan 70/20 kV dapat dilihat pada Gambar 5.

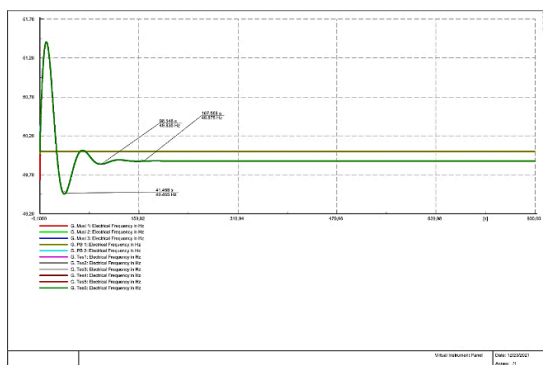


Gambar 5. Grafik hasil simulasi respon kestabilan sudut rotor saat pelepasan beban

Gambar 5 merupakan respon kestabilan sudut rotor saat dilakukan pelepasan beban. Dapat dilihat bahwa terjadi perubahan sudut rotor pada generator yang menyebabkan ketidakstabilan pada sistem. Perubahan sudut rotor pada sistem saat kondisi sebelum dan setelah dilakukan pelepasan beban sangat berbeda. Respon sudut rotor pada generator sebelum dilakukan pelepasan beban mengalami gangguan sedangkan setelah dilakukan pelepasan beban, respon sudut rotor pada generator menunjukkan kondisi yang lebih stabil pada detik ke 2,818 dan mendekati nilai sudut rotor pada kondisi normal. Hasil respon sudut rotor juga dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Simulasi Respon Sudut Rotor Saat Pelepasan Beban

Generator	Sudut Rotor (°)	
	Sebelum Pelepasan Beban	Setelah Pelepasan Beban
PLTA Musi	125,524	121,214
PLTA Tes	133,250	122,672
PLTA Tes Lama	110,773	99,358
PLTU Tel. Sepang	148,215	131,752



Gambar 6. Grafik hasil simulasi respon frekuensi saat pelepasan beban

Pada Gambar 6 menunjukkan adanya perubahan frekuensi pada sistem saat terjadi gangguan pada saluran transmisi Musi-Pekalongan. Frekuensi sistem pada saat terjadi gangguan untuk ayunan pertama mencapai nilai puncak sebesar 51,40 Hz. Pelepasan beban terjadi ketika nilai frekuensi sebesar 49,58 Hz. Setelah dilakukan pelepasan beban, frekuensi pada sistem kembali berangsur stabil pada frekuensi 49,87 Hz. Hal ini dapat dikatakan stabil karena masih dalam batas toleransi yaitu $50 \pm 0,2$ Hz.

5. PENUTUP

Dari hasil penelitian didapatkan hasil bahwa dengan waktu pemutusan gangguan (CCT) sebesar 146 ms dan sudut kritis sebesar 42,498° setelah terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa maka untuk mengembalikan kestabilan system harus dilepas beban sebesar 2,54 MW. Pada system ini maka nilai beban yang mendekati adalah pada GI Musi-Pekalongan yaitu sebesar 3,2 MW dan system kembali ke kondisi stabil

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] X. Zhang, Z. Zhu, Y. Fu, and L. Li, "Optimized virtual inertia of wind turbine for rotor angle stability in interconnected power systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 180, no. May 2019, p. 106157, 2020, doi: 10.1016/j.epr.2019.106157.
- [3] Kementrian ESDM, "Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code)," *Menteri Energi dan Sumber Daya Miner. Republik Indones.*, no. 3, pp. 417–607, 2020, [Online]. Available: [https://jdih.esdm.go.id/storage/document/PMESDM No 20 Tahun 2020.pdf](https://jdih.esdm.go.id/storage/document/PMESDM%20No%20Tahun%2020.pdf)
- [4] Wikipedia, "Mati Listrik Jawa 2019," *Wikipedia*, 2019. https://id.wikipedia.org/wiki/Mati_listrik_Jawa_2019
- [5] G. Hartomo, "pln: 21,3 juta pelanggan terdampak pemadaman listrik serentak," *okezone.com*, 2019. <https://economy.okezone.com/read/2019/08/05/320/2087791/pln-21-3-juta-pelanggan-terdampak-pemadaman-listrik-serentak>
- [6] H. Friana, "Listrik Mati di Jakarta-Banten-Jabar, PLN Rugi Sekitar Rp90 Miliar," *tirto.id*, 2019. <https://tirto.id/listrik-mati-di-jakarta-banten-jabar-pln-rugi-sekitar-rp90-miliar-efB8>
- [7] T. Shekari, A. Gholami, F. Aminifar, and M. Sanaye-Pasand, "An Adaptive Wide-Area Load Shedding Scheme Incorporating Power System Real-Time Limitations," *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 759–767, 2018, doi: 10.1109/JSYST.2016.2535170.
- [8] M. El-Shimy, "Stability-based minimization of load shedding in weakly interconnected systems

- for real-time applications,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 70, pp. 99–107, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.01.034.
- [9] E. Engineering, “Pradeepti Lakra and Mukesh Kirar,” vol. 4, no. 3, 2015.
- [10] M. Nofrilia, “Analisis Simulasi Pelepasan Beban (Load Shedding) Saat Terjadi Gangguan Transien Pada Sistem Jaringan Distribusi Bengkulu 70/20 kV,” Bengkulu, 2017.
- [11] L. Ismael and A. I. Ismael, “Prediction the data consumption for power demands by Elman neural network,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 9, no. 5, pp. 4003–4009, 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i5.pp4003-4009.
- [12] T. Sucita, Y. Mulyadi, and W. S. Saputra, “Load Shedding Analysis because of Contingency Damage (N-2) at Transmission Lines 150 kV Subsystem Cirata,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 384, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/384/1/012076.
- [13] Yudiastira, “Analisa Kestabilan Transient dan Mekanisme Pelepasan Beban Di PT. Pertamina RU V Balikpapan Akibat Penambahan Generator 2x15 MW dan Penambahan Beban 25 MW,” Surabaya, 2016.
- [14] M. A. Kabir, M. M. H. Sajeeb, M. N. Islam, and A. H. Chowdhury, “Frequency transient analysis of countrywide blackout of Bangladesh Power System on 1st November, 2014,” *Proc. 2015 3rd Int. Conf. Adv. Electr. Eng. ICAEE 2015*, pp. 267–270, 2016, doi: 10.1109/ICAEE.2015.7506847.
- [15] Z. Jianjun, Z. Dong, G. Yang, and Y. Zhihong, “Load shedding control strategy for power system based on the system frequency and voltage stability(Apr 2018),” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, no. 201804230000057, pp. 1352–1356, 2018, doi: 10.1109/CICED.2018.8592262.
- [16] I. V. Raphoolo and J. A. De Kock, “Dynamic load-shedding for enhancement of power system stability for the Lesotho 132 kV transmission network,” *Proc. - 2019 South. African Univ. Power Eng. Conf. Mechatronics/Pattern Recognit. Assoc. South Africa, SAUPEC/RobMech/PRASA 2019*, no. July 2013, pp. 376–382, 2019, doi: 10.1109/RoboMech.2019.8704813.
- [17] A. Nugraha *et al.*, “Studi Perhitungan Suhu Hot Spot Pada Bushing Transformator Unit II GI Pekalongan dengan Metode Elemen Hingga,” vol. 12, no. 1, pp. 6–11, 2022.