

Analisis Kestabilan Peralihan Akibat Pelepasan Beban pada Sistem Tenaga Listrik PT. KPC Sangatta Menggunakan Metode *Static Under Frequency Load Shedding*

Iyang Mukti Ali¹, Ipniansyah², Khairuddin Karim³
^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Samarinda
 ipnian@yahoo.co.id

Abstrak- Dalam sistem tenaga listrik, pemadaman listrik terjadi ketika frekuensi menurun dan tegangan berfluktuasi sebagai efek dari sisi pembangkitan dan sisi beban yang tidak seimbang. Untuk menstabilkan permintaan daya dan suplai, metodologi yang cukup baik dalam keadaan darurat adalah dengan *static under frequency load shedding*. Analisa ini dilakukan pada sistem tenaga listrik PT. KPC Sangatta, di mana gangguan lepasnya generator terjadi akibat *short circuit line to ground* pada node generator. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 Pada skenario 1 setelah dilakukan pelepasan generator steam no. 3 frekuensi turun menjadi 27,8 Hz, sedangkan pada skenario 2 dimana unit generator steam no. 4 lepas frekuensi turun menjadi 17,45 Hz. Akibat lepasnya generator yang mengakibatkan penurunan frekuensi dilakukanlah *load shedding*, di mana berdasarkan perhitungan metode *static UFLS* didapat mekanisme pelepasan beban yang handal di mana frekuensi sempat turun pada nilai 48,1 Hz dengan jumlah beban yang dilepas sebesar 9,334 MW, sebaliknya untuk mekanisme pelepasan beban dengan data *setting stage 1* tidak dapat melakukan pemulihan frekuensi dengan handal dimana frekuensi turun dinilai 46,3 Hz dan jumlah beban yang dilepas sebesar 17,2 MW, sedangkan dengan mekanisme pelepasan beban menggunakan data *setting stage 2* mampu mengembalikan frekuensi ke nilai yang diizinkan dimana jumlah beban yang dilepaskan sebesar 9,334 MW dan nilai terendah frekuensi mencapai 47,5 Hz.

Kata kunci: *Load shedding*, Frekuensi, *Static Under Frequency Load Shedding*.

atau mesin jatuh dari sinkronisasi dan tidak lagi bekerja pada kecepatan sinkron, menyebabkan berkurangnya masa pakai komponen sistem, dan dalam kasus terburuk dapat menyebabkan sistem padam total. Kondisi tersebut tidak hanya mempengaruhi frekuensi tetapi juga tegangan.

Berdasarkan paper IEEE *Transactions on Power Systems* berjudul *Definition and Classification of Power System Stability*, kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi tiga, yaitu kestabilan frekuensi, sudut rotor, dan tegangan. Definisi ini berlaku juga untuk sistem yang beroperasi dengan menginterkoneksi beberapa generator (*multimachine*)[1].

Gangguan *transient* sangat mempengaruhi stabilitas dari suatu sistem tenaga listrik pada industri-industri besar sehingga perlu dianalisis lebih lanjut. Setelah dilakukan perubahan pada sistem tenaga listrik, PT. KPC Sangatta belum melakukan studi *transient* yang lebih mendalam. Sehingga dibutuhkan studi stabilitas *transient* untuk mengetahui kestabilan sistem saat terjadi gangguan *transient*. Berdasarkan paper referensi *Definition and Classification of Power System Stability*, maka pada penelitian ini dilakukan analisis yang meliputi kestabilan frekuensi, sudut rotor, dan tegangan. Sedangkan perubahan yang akan terjadi pada sistem meliputi generator lepas, motor starting, dan hubung singkat. Pada penelitian ini juga akan dianalisis mekanisme pelepasan beban untuk mengatasi gangguan *transient* yang terjadi.

I. PENDAHULUAN

Kestabilan suatu sistem didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem untuk kembali ke keadaan tunaknya ketika sistem terjadi gangguan. Secara umum, kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan ke dalam kestabilan *steady state*, peralihan dan dinamis. Dibandingkan dengan *steady state*, kestabilan peralihan harus lebih diperhatikan karena pengaruhnya yang sangat besar pada sistem tenaga.

Studi kestabilan peralihan diperlukan untuk memastikan bahwa sistem dapat bertahan dalam kondisi peralihan setelah terjadinya gangguan besar seperti aplikasi beban secara tiba-tiba atau perubahan beban secara tiba-tiba, kehilangan pembangkitan, dan gangguan pada sistem. Terjadinya gangguan dapat menyebabkan ketidakstabilan dalam sistem

II. LANDASAN TEORI

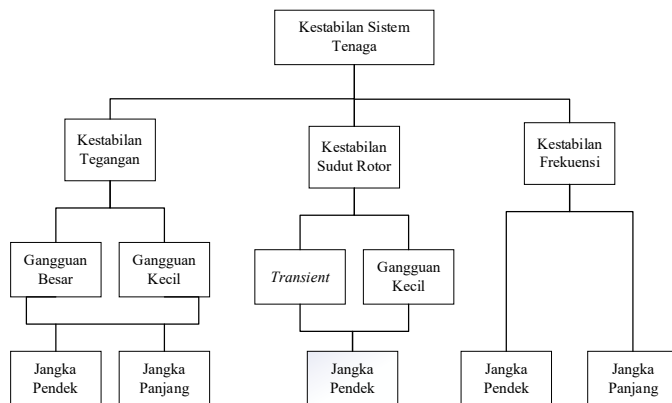
A. Kestabilan Sistem Tenaga

Kestabilan sistem tenaga listrik secara umum dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan keadaan sinkronnya pada saat dan sesudah terjadi gangguan. Definisi ini berlaku juga untuk sistem yang beroperasi dengan menginterkoneksi beberapa generator (*multimachine*). Karakteristik utama dalam stabilitas ini adalah bagaimana mesin-mesin mempertahankan sinkronisasi pada saat akhir periode peralihan. Jika respon sistem mengalami osilasi saat terjadi gangguan dan kemudian dapat teredam dengan sendirinya, maka sistem dapat dikatakan

stabil. Jika osilasi terjadi secara terus menerus hingga periode yang lama maka sistem dikatakan tidak stabil

B. Klasifikasi Kestabilan

Terdapat banyak faktor yang dapat mempengaruhi kestabilan suatu sistem tenaga listrik, maka dibutuhkan suatu pengelompokan sistem tenaga listrik guna mempermudah analisis kestabilan. Berdasarkan *Paper IEEE definition and classification of power system stability*, kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori, yaitu[1]:



Gambar 1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga

1) Kestabilan sudut rotor

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari mesin sinkron yang terhubung dengan sistem untuk tetap sinkron setelah terjadi gangguan. Ketidakstabilan akan mengakibatkan naiknya sudut rotor yang berbeda-beda dari generator sehingga dapat mengakibatkan generator hilang sinkronisasi antar generator.

2) Kestabilan frekuensi

Kestabilan frekuensi yaitu kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi yang stabil pada saat operasi normal maupun ketika sistem terjadi ketidakseimbangan antara daya aktif di sisi pembangkit dan beban. Pada umumnya masalah kestabilan frekuensi dikaitkan dengan ketidakmampuan dari respons peralatan, koordinasi yang buruk pada peralatan kontrol dan peralatan proteksi, atau kurangnya daya cadangan pembangkitan

3) Kestabilan tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan yang dapat diterima secara stabil di semua bus dengan besaran operasi sesuai standar dalam kondisi operasi normal dan setelah mengalami gangguan. Tegangan dapat menjadi tidak stabil ketika ada ketidakseimbangan antara permintaan beban dan suplai beban, terutama ketidakseimbangan daya reaktif. Hal ini dapat terjadi karena dua alasan baik karena perubahan permintaan beban yang tiba-tiba, seperti hilangnya beban di suatu daerah, atau karena keterbatasan kapasitas pasokan beban akibat terputusnya saluran transmisi.

C. Static Under Frequency Load Shedding

Implementasi dari pelepasan beban statis membutuhkan beberapa langkah yang ditentukan. Langkah pertama adalah menentukan kondisi sistem terburuk saat beban berlebih, kemudian menentukan penurunan frekuensi akibat kondisi beban berlebih. Peluruhan frekuensi dapat membantu kita untuk menentukan waktu pelepasan beban dan pendekatan untuk menentukan jumlah beban yang akan dilepaskan.

1) Menentukan overload

Kemungkinan terburuk dapat ditentukan dengan mengetahui *overload* maksimum yang akan terjadi pada sistem. *Overload* biasanya terjadi karena hilangnya generator, kehilangan beban sesaat, perubahan variasi pada beban dan *output* generator. Rumus beban lebih dapat dituliskan sebagai berikut[2]:

$$OL = \frac{-P_{SO}}{P_{GOT} - P_{SOT}} \quad (1)$$

Keterangan: P_{SO} = Daya yang dibangkitkan oleh unit yang terganggu (MW)

P_{GOT} = Daya terpasang dari unit-unit pembangkit yang beroperasi sebelum gangguan (MW)

P_{SOT} = Daya terpasang dari unit yang mengalami gangguan (MW)

2) Peluruhan frekuensi dan inersia sistem

Inersia sistem (H) adalah energi kinetik dalam sistem yang dibagi dengan energi yang terpasang dalam sistem dan dinyatakan dalam MW-s/MVA atau MJ/MVA. Inersia sistem diperlukan untuk menghitung peluruhan frekuensi yang dijelaskan dengan persamaan berikut[2]:

$$H_{system} = \frac{\sum_{k=1}^N H_k \times MVA_k}{\sum_{k=1}^N MVA_k} \quad (2)$$

Keterangan: H_k = Inersia dari generator k_{th}

MVA_k = Rata-rata daya semu dari generator k_{th}

N = Jumlah generator yang ada

Inersia generator sangat mempengaruhi penurunan nilai frekuensi, karena semakin besar nilai inersia generator, maka sistem semakin kuat sehingga penurunan frekuensi lebih lambat dan lebih kecil. Berdasarkan perhitungan inersia total di atas kita dapat menentukan peluruhan frekuensi dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{df}{dt} = \frac{OL \times f}{2 \times H_{system}} \quad (3)$$

Keterangan: f = Frekuensi nominal (Hz)
 OL = Overload

H_{system} = Nilai dari sistem inersia

3) Waktu awal dan waktu pelepasan beban

Waktu awal adalah waktu di mana frekuensi mencapai batas *underfrequency*, sedangkan waktu pelepasan beban adalah waktu untuk melepaskan beban ketika frekuensi mencapai di bawah batas frekuensi. Berikut ini adalah persamaan untuk mendapatkan nilai waktu awal[2]:

$$T_i = \frac{f_i - f}{\frac{df}{dt}} \quad (4)$$

Keterangan: f_i = Batas bawah frekuensi yang diperbolehkan (Hz)

F = Frekuensi nominal (Hz)

$\frac{df}{dt}$ = Penurunan frekuensi (Hz/s)

Di mana nilai beban lebih dan peluruhan frekuensi setelah pelepasan beban dapat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$OL_{new} = \frac{-P_{SO} + P_{LS}}{P_{GOT} - P_{SOT}} \quad (5)$$

$$\frac{df}{dt_{new}} = \frac{OL_{new} \times f}{2 \times H_{system}} \quad (6)$$

Keterangan: P_{LS} = Jumlah beban yang akan dilepaskan berdasarkan pada peluruhan frekuensi yang diharapkan (MW)

$\frac{df}{dt_{new}}$ = Jumlah peluruhan frekuensi yang diharapkan (Hz/s)

D. Standar Frekuensi

Frekuensi nominal di jaringan yaitu 50,00 Hz. Frekuensi sistem dapat naik sampai dengan 52,00 Hz dan turun sampai dengan 47,00 Hz pada keadaan luar biasa. Nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut[3].

TABEL 1
BATAS RENTANG FREKUENSI OPERASI

Rentang Frekuensi	Rentang Waktu Operasi
51,50 Hz < f ≤ 52,00 Hz	Beroperasi selama paling singkat 15 menit
51,00 Hz < f ≤ 51,50 Hz	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
49,00 Hz ≤ f ≤ 51,00 Hz	Beroperasi secara terus-menerus
47,50 Hz < f < 49,00 Hz	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
47,00 Hz < f ≤ 47,50 Hz	Beroperasi selama paling singkat 6 detik

E. Standar Tegangan

Standar yang digunakan PT. KPC Sangatta untuk menentukan tegangan nominal dalam kondisi normal adalah sebesar 0,95-1,05 p.u.

Sedangkan standar yang digunakan untuk kedip tegangan adalah IEEE *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*[4]. Tabel 2 menunjukkan bahwa untuk kedip tegangan (*voltage sag*) terbagi menjadi 3 berdasarkan lamanya gangguan dengan batas nilai sebesar 0.1-0.9 p.u untuk *instantaneous* selama 0,01-0,6 detik, untuk *momentary* selama 3 detik dan untuk *temporary* selama 1 menit.

TABEL 2
KATEGORI DAN KARAKTERISTIK TIPIKAL SISTEM TENAGA LISTRIK GEJALA ELEKTROMAGNETIK

Kategori	Durasi	Magnitude tegangan
2.0 Short duration variations		
2.1 Instantaneous		
2.1.1 Sag	0.5 - 30 cycles	0.1 - 0.9 p.u
2.1.2 Swell	0.5 - 30 cycles	1.1 - 1.8 p.u
2.2 Momentary		
2.2.1 Interruption	0.5 cycles - 3 s	< 0.1 p.u
2.2.2 Sag	30 cycles - 3 s	0.1 - 0.9 p.u
2.2.3 Swell	30 cycles - 3 s	1.1 - 1.4 p.u
2.3 Temporary		
2.3.1 Interruption	3 s - 1 min	< 0.1 p.u
2.3.2 Sag	3 s - 1 min	0.1 - 0.9 p.u
2.3.3 Swell	3 s - 1 min	1.1 - 1.2 p.u
3.0 Long duration variations		
3.1 Interruption, sustained	> 1 min	0.0 p.u
3.2 Undervoltages	> 1 min	0.8 - 0.9 p.u
3.3 Overvoltages	> 1 min	1.1 - 1.2 p.u

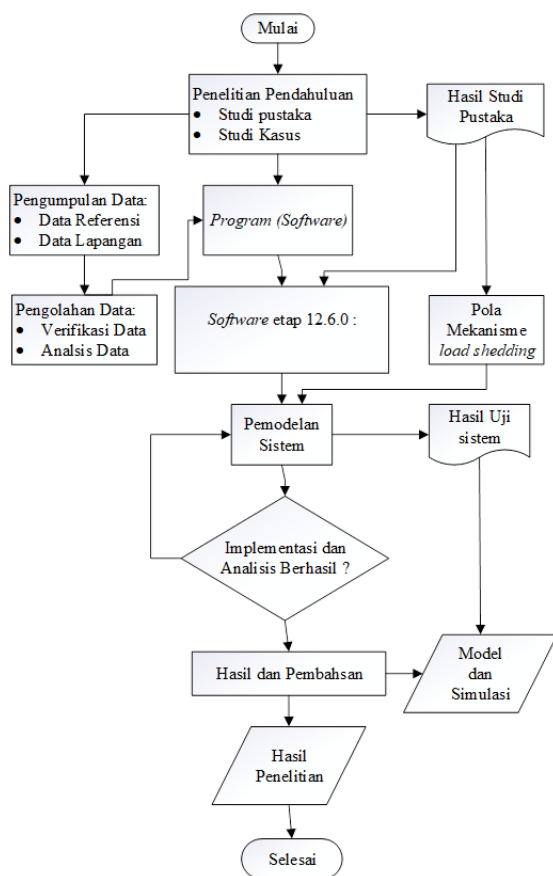
III. METODE PENELITIAN

A. Kerangka Operasional Penelitian

Dalam Gambar 2 menunjukan diaram alir kerangka opeasional penelitian, ditunjukan bahwa proses penelitian diawali dengan penelitian pendahuluan berupa studi pustaka dan studi kasus, kemudian dilanjutkan dengan pengumpulan data referensi dan data lapangan berupa data teknis sistem tenaga listrik PT.KPC Sangatta. Program (*software*) untuk mengerjakan analisis berupa etap 12.6.0 dan hasil studi pustaka berupa pola mekansime *load shedding*.

Penelitian dilanjutkan dengan peroses data, di mana data refrensi dan data lapangan diverifikasi dan dianalisis menggunakan *tools load flow analysis*, sehingga menghasilkan data olahan berupa data aliran daya. Kemudian hasil data olahan tersebut diolah kembali menggunakan *tools transient stability analysis* untuk mengetahui respon sudut rotor, frekuensi, dan tegangan yang dibandingkan terhadap besaran parameter operasi dan kinerja sesuai batas standar yang digunakan untuk kemudian dilakukan *under frequency load shedding*.

Selanjutnya pada tahap akhir merupakan hasil dan pembahasan yang akan memperlihatkan hasil penelitian berupa model dan simulasi terhadap analisis kestabilan peralihan dan kinerja sistem saat tidak menggunakan serta saat menggunakan mekanisme pelepasan beban metode *static under frequency load shedding* sesuai dengan batasan besaran yang digunakan pada sistem tenaga listrik PT.KPC Sangatta.

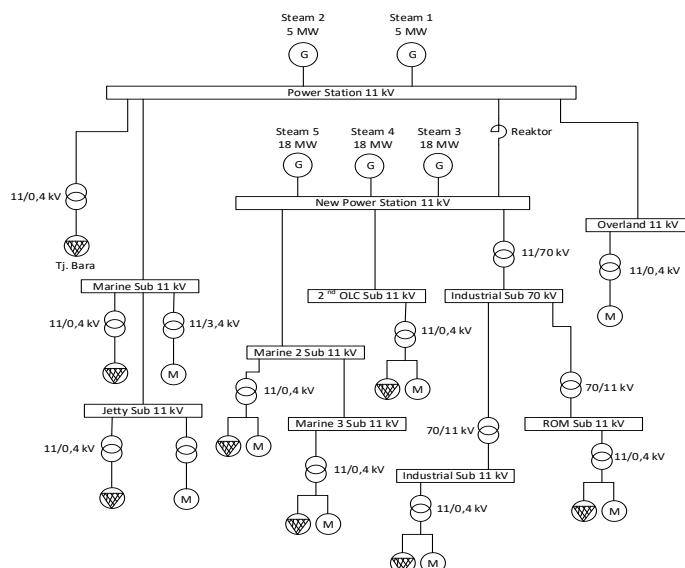


Gambar 2. Kerangka operasional penelitian

B. Sistem Tenaga Listrik PT. KPC Sangatta

Analisis dan simulasi dilakukan pada sistem tenaga listrik PT. KPC Sangatta, di mana nantinya akan dilakukan simulasi gangguan generator *trip* yang disebabkan oleh adanya *short circuit line to ground* yang terjadi pada node steam pada masing-masing generator. Sehingga apabila terjadi perubahan pada frekuensi dan tegangan yang melebihi batas normal, untuk menjaga sistem tetap aman terutama generator dari adanya *short circuit* diatas maka akan dilakukan pelepasan generator. Setelah dilakukan pelepasan generator maka frekuensi dan tegangan akan turun di mana akibat lepasnya generator maka akan mengakibatkan sistem mengalami *overload*.

Sesuai pada Gambar 3, terdapat 11 bus utama yang digunakan sebagai indikator dalam analisis.



Gambar 3. Single line diagram sederhana PT. KPC Sangatta

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Simulasi Sistem Keadaan Normal

Pada simulasi ini akan dilakukan dua *study case* yang berbeda yaitu *load flow analysis* dan *transient stability analysis* dengan *initial load flow* newton raphson untuk mengetahui parameter sistem pada saat kondisi normal sebelum terjadi gangguan.

Berikut adalah data generator dan beban yang akan digunakan untuk mendapatkan pola mekanisme pelepasan beban metode *static* UFLS yang tertera pada Tabel 3.

TABEL 3
DATA TOTAL PEMBANGKITAN DAN BEBAN SETELAH RUNNING
LOAD FLOW DAN TRANSIENT STABILITY

Generator	S (MVA)	P gen (MW)	P operation (MW)	H (MW-s/MVA)	Tahap P _{LS} (MW)				
					1	2	3	4	5
Steam no. 3	22,5	18	11,625	3,489					
Steam no. 4	22,5	18	11,630	3,489					
Jumlah		36			0	1	5,5	9,3	12,8

B. Simulasi Sistem Keadaan Gangguan

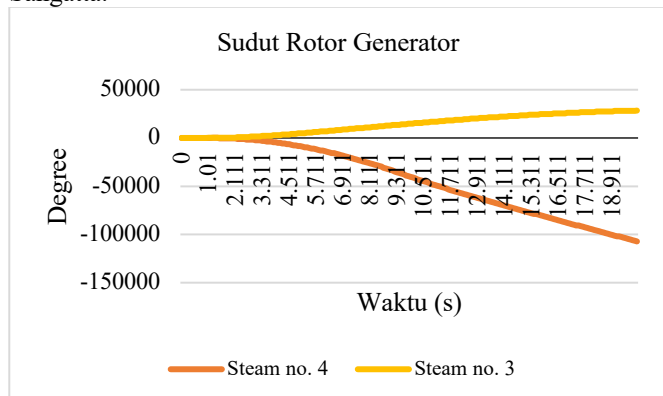
Berdasarkan Tabel 4 simulasi sistem saat gangguan dilakukan dengan memberi gangguan hubung singkat *line to ground* pada node generator steam no.3 dan node steam no.4, langkah selanjutnya adalah melepas generator untuk mengamankan sistem dan mengetahui apakah sistem dapat bertahan dalam kondisi transien atau tidak.

TABEL 4
SKENARIO PELEPASAN BREAKER PENGAMAN AKIBAT *SHORT CIRCUIT LINE TO GROUND*

Skenario	Generator lepas	CB open
1	Steam no.3	CB steam no. 3
2	Steam no.4	CB steam no. 4

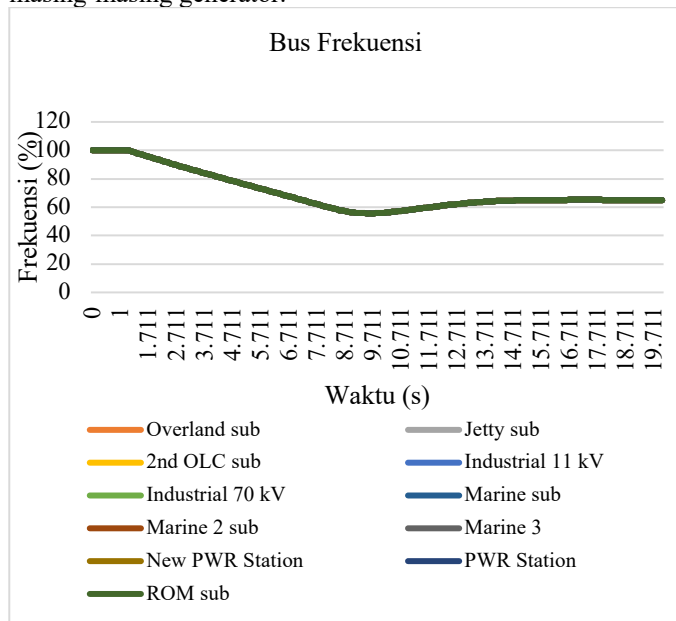
1) Skenario 1

Pada skenario 1 ini akan disimulasikan gangguan *short circuit line to ground* yang terjadi pada node steam no. 3 pada detik ke-1 kemudian *circuit breaker* terbuka untuk memproteksi generator dari arus hubung singkat pada detik ke-1,01, dan dilanjutkan dengan melihat respon sudut rotor pada masing-masing generator yang sinkron, respon tegangan, dan frekuensi pada main bus sistem tenaga listrik PT. KPC Sangatta.



Gambar 4. Respon sudut rotor saat generator steam no. 3 trip

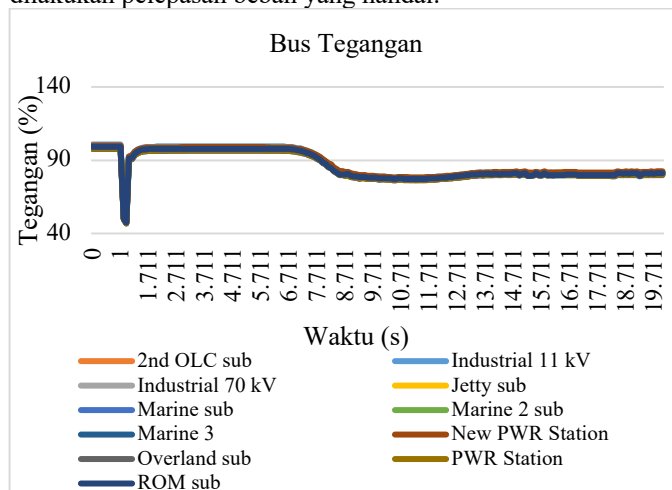
Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat sudut rotor pada masing-masing generator cenderung akan mengalami kenaikan seiring bertambahnya waktu hal ini terjadi akibat *short circuit line to ground* pada node steam no. 3 yang kemudian generator steam no. 3 harus dilepas. Oleh sebab itu pada sudut rotor steam no. 4 terjadi kenaikan derajat yang sangat besar dari pada sudut rotor steam no. 3 sebagai akibat dari memikul beban-beban yang ada pada sistem yang sebelumnya dibagi seimbang dengan masing-masing generator.



Gambar 5. Respon frekuensi saat generator steam no. 3 trip

Berdasarkan Gambar 5 diatas terlihat bahwa penurunan frekuensi akibat lepasnya generator steam no.3 pada detik ke 1,01 namun frekuensi dapat bertahan dalam batas yang

diperkenankan sampai pada detik ke- 1,91 dengan frekuensi sebesar 47,1 Hz, kemudian semakin bertambahnya waktu frekuensi terus mengalami penurunan hingga mencapai titik terendah pada detik ke- 9,71 dengan frekuensi sebesar 27,8 Hz memasuki detik ke-10,11 hingga detik ke-20 frekuensi mulai mencapai steady state pada nilai 32,5 Hz. Dengan demikian dapat dikatakan sistem akan terjadi *blackout* apabila tidak dilakukan pelepasan beban yang handal.

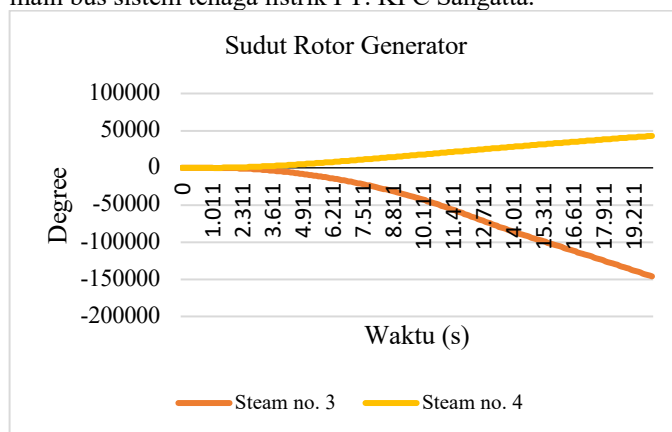


Gambar 6. Respon tegangan saat generator steam no. 3 trip

Berdasarkan Gambar 6 respon tegangan saat generator steam no. 3 trip, di mana pada gambar diatas semua bus utama memiliki kondisi tegangan dibawah nilai yang diizinkan yaitu sebesar 0,95 p.u.

2) Skenario 2

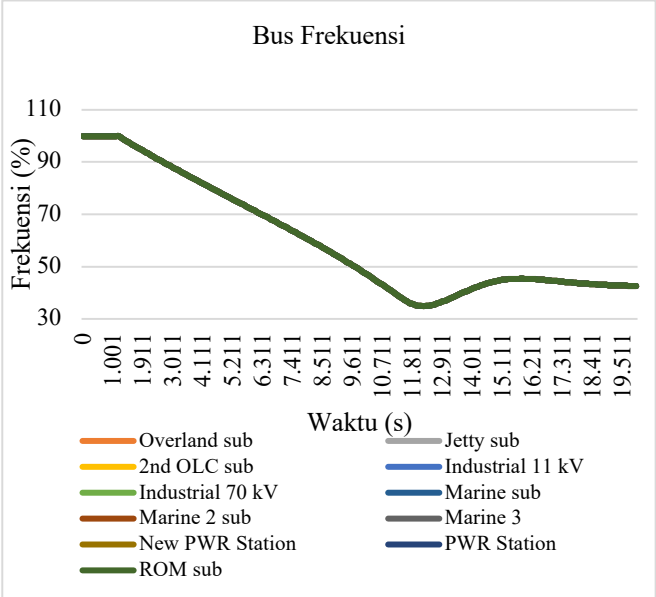
Pada skenario 2 ini akan disimulasikan gangguan *short circuit line to ground* yang terjadi pada node steam no. 4 pada detik ke-1 kemudian *circuit breaker* terbuka untuk memproteksi generator dari arus hubung singkat pada detik ke-1,01, serta akan dilihat respon sudut rotor pada masing-masing generator yang sinkron, respon tegangan, dan frekuensi pada main bus sistem tenaga listrik PT. KPC Sangatta.



Gambar 7. Respon sudut rotor saat generator steam no. 4 trip

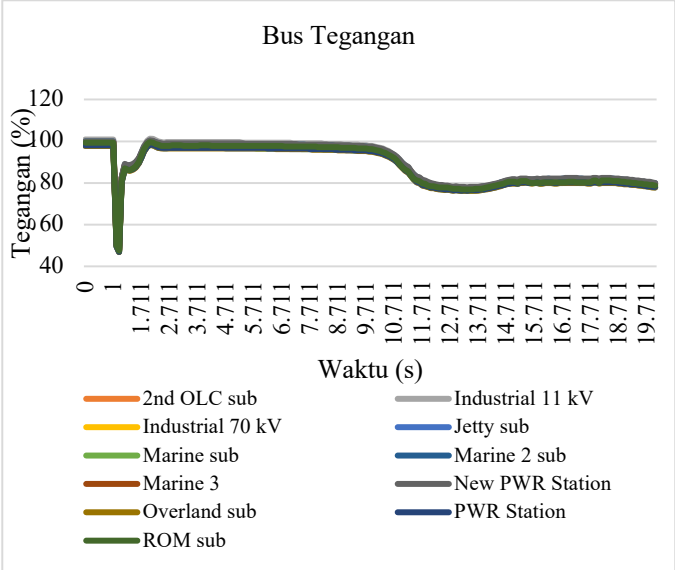
Dari Gambar 7 dapat dilihat sudut rotor pada masing-masing generator cenderung akan mengalami kenaikan seiring bertambahnya waktu hal ini terjadi akibat *short circuit line to ground* pada node steam no. 4 yang kemudian generator steam

no. 4 harus dilepas. Oleh sebab itu pada sudut rotor steam no. 3 terjadi kenaikan derajat yang sangat besar dari pada sudut rotor steam no. 4 sebagai akibat dari memikul beban-beban yang ada pada sistem yang sebelumnya dibagi seimbang dengan masing-masing generator.



Gambar 8. Respon frekuensi saat generator steam no. 4 trip

Berdasarkan Gambar 8 diatas terlihat bahwa penurunan frekuensi akibat lepasnya generator steam no.4 pada detik ke 1,01 namun frekuensi dapat bertahan dalam batas yang diperkenankan sampai pada detik ke- 1,91 dengan frekuensi sebesar 47,2 Hz, kemudian semakin bertambahnya waktu frekuensi terus mengalami penurunan hingga mencapai titik terendah pada detik ke- 12,2 dengan frekuensi sebesar 17,45 Hz, memasuki detik ke-12,3 hingga detik ke-20 frekuensi mulai meningkat dan mencapai *steady state* pada nilai 21,3 Hz. Dengan demikian dapat dikatakan sistem akan terjadi *blackout* apabila tidak dilakukan pelepasan beban yang handal.



Gambar 9. Respon tegangan saat generator steam no. 4 trip

Berdasarkan Gambar 9 respon tegangan saat generator steam no. 4 trip, di mana pada gambar diatas semua bus utama memiliki kondisi tegangan dibawah nilai yang diizinkan yaitu sebesar 0,95 p.u.

C. Static Under Frequency Load Shedding

Berdasarkan data generator dan beban pada Tabel 3, kita dapat menghitung nilai inersia total, laju penurunan frekuensi, waktu penurunan frekuensi dibawah batas yang diijinkan, waktu pelepasan beban dan jumlah beban yang harus dilepaskan sehingga frekuensi dapat kembali ke nilai yang diperbolehkan.

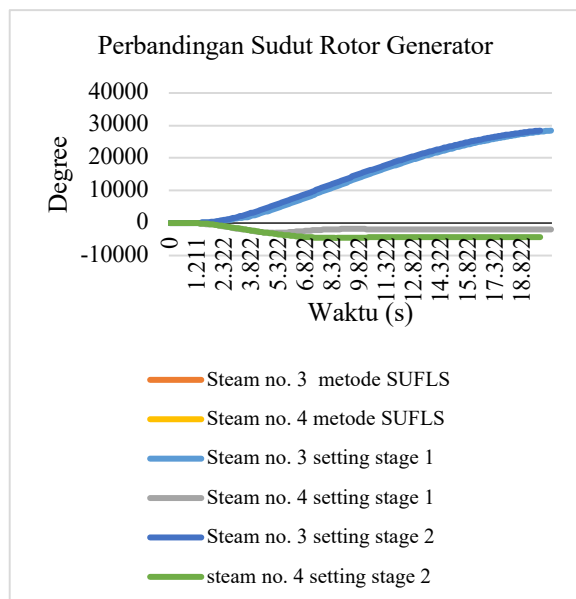
Adapun perhitungan static UFLS dengan skenario generator steam no.3 lepas seperti yang tertera pada Tabel 5.

TABEL 5 PERHITUNGAN STATIC UFLS				
Tahap Pelepasan beban	H sistem (MW-s/MVA)	OL (steam no.3 lepas)	df/dt (Hz/s)	Ti (s)
1	3,489	-0,645	-4,627	0,2
2		-0,59	-4,229	0,3
3		-0,336	-2,409	0,5
4		-0,127	-0,911	1,4
5		0,066	0,476	2,7

D. Hasil Perbandingan Metode Static Under Frequency Load Shedding Dengan Data Load Shedding Setting

Setelah menyelesaikan perhitungan metode static UFLS dan mendapatkan mekanisme pelepasan beban yang handal, maka langkah selanjutnya adalah melakukan pelepasan beban pada masing-masing skenario yang telah ditentukan dan membandingkan dengan skema yang sudah ada di lapangan sesuai rancangan perusahaan.

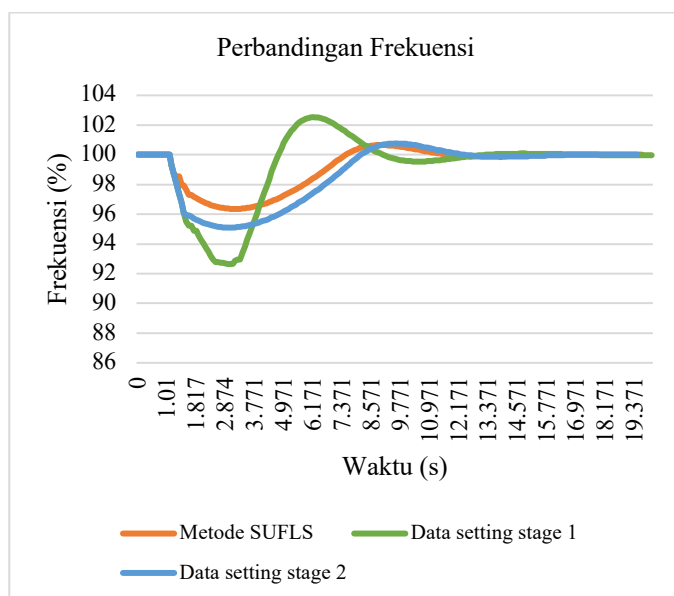
1) Skenario 1



Gambar 10. Perbandingan sudut rotor generator skenario 1 setelah pelepasan beban

Berdasarkan Gambar 10 untuk sudut rotor generator steam no. 3 pada ketiga jenis mekanisme pelepasan beban memiliki nilai derajat yang cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu hal ini terjadi akibat gangguan hubung singkat *line to ground* pada node steam no. 3 yang memaksa generator harus lepas dari sistem untuk mengamankan generator dari arus hubung singkat *line to ground*.

Untuk sudut rotor steam no. 4 pada data *setting stage 1* memiliki derajat yang lebih kecil saat kondisi *steady state* dibanding dengan metode *static UFLS*, dan data *setting stage 2* hal ini terjadi karena pada pelepasan beban data *setting stage 1* jumlah beban yang dilepaskan lebih besar dibanding dengan pelepasan beban metode *static UFLS*.



Gambar 11. Perbandingan frekuensi skenario 1 setelah pelepasan beban

Dari Gambar 11 diketahui bahwa dari detik ke- 0 hingga detik ke- 1 frekuensi pada nilai 50 Hz, kemudian pada detik ke- 1,001 dilakukan gangguan hubung singkat *line to ground* pada node steam no.3 yang berdampak pada CB steam no.3 harus *open* untuk mengamankan generator dari arus hubung singkat sehingga terjadi penurunan frekuensi dan dilakukanlah mekanisme pelepasan beban yang berbeda berdasarkan metode *static UFLS* dan skema pelepasan beban yang ada di lapangan.

Untuk mekanisme pelepasan beban data *setting stage 1* nilai paling rendah penurunan frekuensi berada pada detik ke- 3 dengan nilai 46,3 Hz kemudian mulai mengalami kenaikan pada detik ke- 3,1 dan sempat mencapai nilai tertingginya di frekuensi 50,5 Hz sampai 51 Hz selama 2,9 detik. Frekuensi dapat mencapai keadaan *steady-state* dengan nilai nominalnya pada saat detik ke- 8.

Berbeda dengan mekanisme pelepasan beban data *setting stage 1* pada mekanisme pelepasan beban data *setting stage 2* nilai terendah frekuensi mencapai 47,5 Hz pada detik ke- 3,2 kemudian mulai memasuki rentang nilai operasi frekuensi pada detik ke- 7,2 dan mencapai kondisi *steady-state* dengan frekuensi 50 Hz pada detik ke- 8,64.

Sedangkan untuk mekanisme pelepasan beban metode *static UFLS* dapat diketahui bahwa frekuensi mencapai nilai paling rendah pada detik ke- 3,2 sebesar 48,1 Hz kemudian frekuensi mulai meningkat pada detik ke- 3,7 hingga mencapai keadaan *steady-state* dengan nilai standar yang diizinkan pada detik ke- 7.

Dari ketiga mekanisme pelepasan beban tersebut yang telah melewati batas aman rentang frekuensi sesuai standar yang ditentukan adalah pelepasan beban dengan data *setting stage 1* dengan frekuensi terendahnya 46,3 Hz. Hal ini terjadi akibat *time delay* yang terlalu lama untuk memutuskan beban. sedangkan mekanisme pelepasan beban data *setting stage 2* dan metode *static UFLS* memiliki batas bawah frekuensi yang masih sesuai standar di mana untuk data *setting stage 2* memiliki nilai 47,5 Hz, sedangkan untuk metode *static UFLS* dinilai frekuensi 48,1 Hz.

TABEL 6
HASIL TEGANGAN SKENARIO 1 SETELAH MELAKUKAN
PELEPASAN BEBAN

Bus	Tegangan (p.u)		
	Static UFLS	Data setting stage 1	Data setting stage 2
Power station 11 kV	0,98	0,99	0,98
New power station 11 kV	0,99	1	0,99
Overland Sub 11 kV	0,97	0	0,97
Industrial sub 70 kV	1	1	1
Industrial sub 11 kV	0	0	0
ROM sub 11 kV	1	1	1
2 nd OLC sub 11 kV	0,99	0	0,99
Marine sub 11 kV	0,98	0,99	0,98
Marine 2 sub 11 kV	0,99	0,99	0,99
Marine 3 sub 11 kV	0,99	0,99	0,99
Jetty sub 11 kV	0,98	0,99	0,98

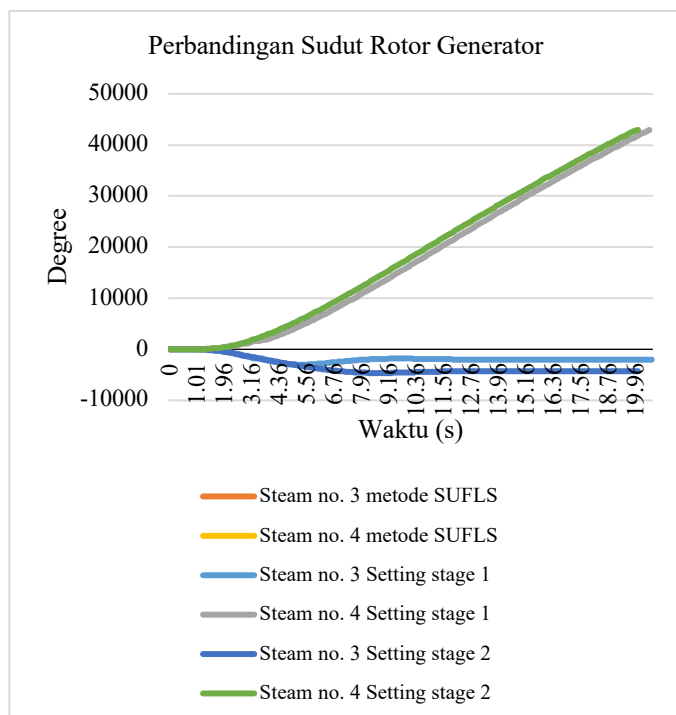
Mengacu dengan standar tegangan operasi yang diizinkan oleh PT. KPC Sangatta yaitu antara 0,95-1,05 p.u, maka dapat dikatakan bahwa pada Tabel 6 tegangan pada masing-masing

bus dengan jenis mekanisme pelepasan beban yang berbeda telah sesuai dengan batas aman yang ditentukan. Untuk mekanisme pelepasan beban *static* UFLS dan data *setting stage* 2 terdapat satu *main* bus yang dimatikan akibat tahapan pelepasan beban yaitu Industrial sub 11 kV. Sedangkan mekanisme pelepasan beban data *setting stage* 1 terdapat tiga *main* bus yang harus padam akibat dari tahapan pelepasan beban yaitu Overland sub 11 kV, Industrial sub 11 kV, dan 2nd OLC sub 11 kV.

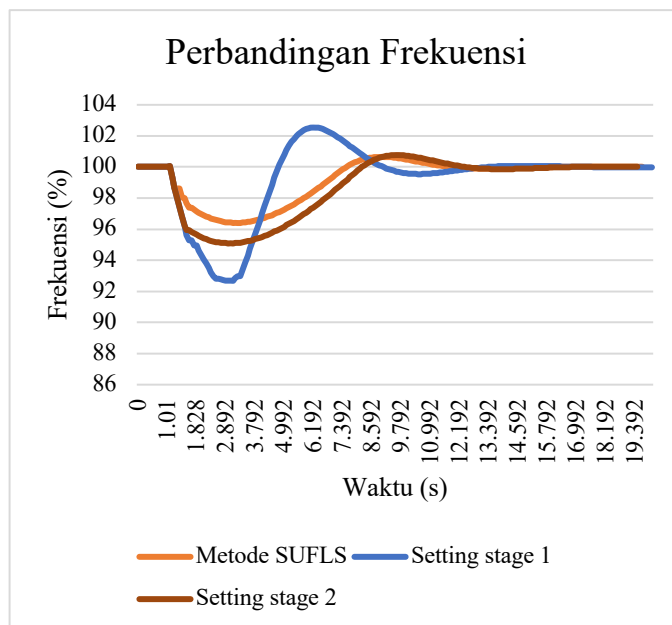
2) Skenario 2

Berdasarkan Gambar 12 untuk sudut rotor generator steam no. 4 pada ketiga jenis mekanisme pelepasan beban memiliki nilai derajat yang cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu hal ini terjadi akibat gangguan hubung singkat line to ground pada node steam no. 4 yang memaksa generator harus lepas dari sistem untuk mengamankan generator dari arus hubung singkat line to ground.

Untuk sudut rotor steam no. 3 pada data setting stage 1 memiliki derajat yang lebih kecil saat kondisi steady state dibanding dengan metode static UFLS, dan data setting stage 2 hal ini terjadi karena pada pelepasan beban data setting stage 1 jumlah beban yang dilepaskan lebih besar dibanding dengan pelepasan beban metode static UFLS.



Gambar 12. Perbandingan sudut rotor generator skenario 2 setelah pelepasan beban



Gambar 13. Perbandingan frekuensi skenario 2 setelah pelepasan beban

Dari Gambar 13 diketahui bahwa dari detik ke- 0 hingga detik ke- 1 frekuensi pada nilai 50 Hz, kemudian pada detik ke- 1,001 dilakukan gangguan hubung singkat *line to ground* pada node steam no.4 yang berdampak pada CB steam no.4 harus *open* untuk mengamankan generator dari arus hubung singkat sehingga terjadi penurunan frekuensi dan dilakukanlah mekanisme pelepasan beban yang berbeda berdasarkan metode *static* UFLS dan skema pelepasan beban yang ada di lapangan.

Untuk mekanisme pelepasan beban data *setting stage* 1 nilai paling rendah penurunan frekuensi berada pada detik ke- 3,02 dengan nilai 46,3 Hz kemudian mulai mengalami kenaikan pada detik ke- 3,29 dan sempat mencapai nilai tertingginya difrekuensi 50,5 Hz sampai 51,25 Hz selama 2,9 detik. Frekuensi dapat mencapai keadaan *steady-state* dengan nilai nominalnya pada saat detik ke- 8.

Berbeda dengan mekanisme pelepasan beban data *setting stage* 1 pada mekanisme pelepasan beban data *setting stage* 2 nilai terendah frekuensi mencapai 47,5 Hz pada detik ke- 3,26 kemudian mulai memasuki rentang nilai operasi frekuensi yang diizinkan 49,5 Hz pada detik ke- 8,06 dan mencapai kondisi *steady-state* pada frekuensi 50 Hz pada detik ke- 8,76.

Sedangkan untuk mekanisme pelepasan beban metode *static* UFLS dapat diketahui bahwa frekuensi mencapai nilai paling rendah pada detik ke- 2,82 sebesar 48,2 Hz kemudian frekuensi mulai meningkat pada detik ke- 4 hingga mencapai keadaan *steady-state* dengan nilai standar yang diizinkan pada detik ke- 7,12.

Dari ketiga mekanisme pelepasan beban tersebut yang telah melewati batas aman rentang frekuensi sesuai standar yang ditentukan adalah pelepasan beban dengan data *setting stage* 1 dengan frekuensi terendahnya 46,3 Hz. Hal ini terjadi akibat *time delay* yang terlalu lama untuk memutuskan beban dibanding dengan laju penurunan frekuensi. sedangkan mekanisme pelepasan beban data *setting stage* 2 dan metode *static* UFLS memiliki batas bawah frekuensi yang masih sesuai standar di mana untuk data *setting stage* 2 memiliki nilai 47,5

Hz, sedangkan untuk metode *static* UFLS dinilai frekuensi 48,2 Hz.

TABEL 7
HASIL TEGANGAN SKENARIO 2 SETELAH MELAKUKAN
PELEPASAN BEBAN

Bus	Tegangan (p.u)		
	<i>Static</i> UFLS	<i>Data setting</i> <i>stage 1</i>	<i>Data setting</i> <i>stage 2</i>
Power station 11 kV	0,98	0,99	0,98
New power station 11 kV	0,99	1	0,99
Overland Sub 11 kV	0,97	0	0,97
Industrial sub 70 kV	1	1	1
Industrial sub 11 kV	0	0	0
ROM sub 11 kV	1	1	1
2 nd OLC sub 11 kV	0,99	0	0,99
Marine sub 11 kV	0,98	0,99	0,98
Marine 2 sub 11 kV	0,99	0,99	0,99
Marine 3 sub 11 kV	0,99	0,99	0,99
Jetty sub 11 kV	0,98	0,99	0,98

Mengacu dengan standar tegangan operasi yang diizinkan oleh PT. KPC Sangatta yaitu antara 0,95-1,05 p.u, maka dapat dikatakan bahwa pada tabel 7 tegangan pada masing-masing bus dengan jenis mekanisme pelepasan beban yang berbeda telah sesuai dengan batas aman yang ditentukan. Untuk mekanisme pelepasan beban *static* UFLS dan data *setting stage 2* terdapat satu *main* bus yang dimatikan akibat tahapan pelepasan beban yaitu Industrial sub 11 kV. Sedangkan mekanisme pelepasan beban data *setting stage 1* terdapat tiga *main* bus yang harus padam akibat dari tahapan pelepasan beban yaitu Overland sub 11 kV, Industrial sub 11 kV, dan 2nd OLC sub 11 kV.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian kestabilan sistem dan *load shedding* dengan melakukan simulasi beberapa kondisi gangguan terhadap sistem, maka dapat diambil kesimpulan bahwa penggunaan mekanisme pelepasan beban metode *static* UFLS untuk mengatasi masalah kestabilan sistem di PT. KPC Sangatta terbukti lebih efektif, hal ini dapat dilihat dari pengujian kestabilan sistem dengan hasil sebagai berikut:

- 1) Berdasarkan perhitungan metode *static* UFLS diperoleh mekanisme pelepasan beban yang handal untuk keseluruhan skenario, di mana frekuensi terendah pada nilai 48,1 Hz dengan jumlah beban yang dilepas sebesar 9,334 MW. Untuk kestabilan tegangan dan sudut rotor memiliki hasil yang sama yaitu untuk tegangan dapat mencapai kondisi kestabilan *steady state* sesuai standar yang diizinkan oleh PT. KPC Sangatta yaitu antara 0,95-1,05 p.u. Begitu pula

untuk kestabilan sudut rotor mampu mencapai kondisi kestabilan *steady state* tergantung dari skenario yang telah ditentukan.

- 2) Berdasarkan mekanisme pelepasan beban dengan data *setting stage 1* tidak dapat melakukan pemulihan frekuensi dengan handal untuk keseluruhan skenario di mana frekuensi turun dinilai 46,3 Hz dan jumlah beban yang dilepas sebesar 17,2 MW yang mengakibatkan over frequency sebagai akibat over load shedding, sedangkan dengan mekanisme pelepasan beban menggunakan data *setting stage 2* mampu mengembalikan frekuensi ke nilai yang diizinkan dengan jumlah beban yang dilepaskan sebesar 9,334 MW dan nilai terendah frekuensi mencapai 47,5 Hz. Untuk kestabilan tegangan dan sudut rotor pada keseluruhan skenario memiliki hasil yang sama yaitu untuk tegangan dapat mencapai kondisi kestabilan *steady state* sesuai standar yang diizinkan oleh PT. KPC Sangatta yaitu antara 0,95-1,05 p.u. Begitu pula untuk kestabilan sudut rotor mampu mencapai kondisi kestabilan *steady state* tergantung dari skenario yang telah ditentukan.

B. Saran

Berdasarkan simpulan yang diuraikan melalui analisis dan pembahasan sebelumnya, maka dapat diberikan saran sebagai berikut:

- 1) Dari sisi keandalan dan selektifitas, PT KPC Sangatta mungkin perlu mempertimbangkan *setting under frequency relay* menggunakan metode *static* UFLS sebagai pilihan dengan melihat perbandingan hasil analisis yang telah dilakukan.
- 2) Sebaiknya dalam perancangan mekanisme pelepasan beban harus lebih diperhatikan seiring perubahan pada sistem tenaga listrik PT. KPC Sangatta dengan mengikuti data lapangan yang terkini.

REFERENSI

- [1] C. Andersson, J. E. Solem, dan B. Eliasson, "Classification of power system stability using support vector machines," *2005 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol. 1, no. 2, pp. 650–655, 2005, doi: 10.1109/pes.2005.1489266.
- [2] I. B. Sulistiawati, A. D. Priasmoro, A. Lomi, dan A. Priyadi, "Study of static under frequency load shedding on IEEE 3 generators 9 bus system caused of transient condition," *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.*, vol. 10, no. 2–3, pp. 37–42, 2018.
- [3] Kementerian 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/PM ESDM No 20 Tahun 2020.pdf](https://jdih.esdm.go.id/storage/document/PM%20ESDM%20No%2020%20Tahun%202020.pdf)
- [4] I. S. Association, *IEEE Standard 1159 - 1995*. 1995. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5154067