

ANALISA PELEPASAN BEBAN OLEH UNDER FREQUENCY RELAY BERBASIS SIMULASI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK JAWA BALI

Agus Sofwan¹ dan Indra Aditya²

¹)Program Teknik Elektro ISTN, asofwan@istn.ac.id

²)PLN Gandul, Depok, indraaditya25@yahoo.com

ABSTRAK

Guna menjaga stabilitas system penyaluran daya diperlukan adanya analisa Pelepasan Beban yang akan digunakan pada saat berkurangnya jumlah pembangkitan. Strategi pelepasan beban di sistem tenaga listrik Jawa Bali yang andal merupakan hal penting dan perlu selalu diperbaharui setiap tahun sesuai dengan kondisi sistem. Kondisi sistem Jawa Bali yang berkembang baik beban maupun pembangkitan, mengindikasikan bahwa perlunya Analisa pengkajian terhadap program pelepasan beban (Load Shedding) yang dibuat tahun 2014 dan masih digunakan sampai saat ini yang sebaiknya diperbaharui secara periodik minimal satu tahun sekali agar kesesuaian skema pelepasan beban dengan target beban yang dilepas selalu terjaga. Program pelepasan beban SJB tahun 2014 dihitung dengan data beban puncak SJB tahun 2013 sebesar 22.567 MW dengan Indeks Kekuatan Sistem sebesar 718,49 MW/Hz, sedangkan realisasi BP SJB tahun 2015 adalah sebesar 24.258 MW. Berdasarkan kondisi tersebut maka dilakukan studi simulasi mengenai pelepasan beban oleh rele under frekuensi menggunakan software Digsilent 14.1.3 dengan hasil bahwa skema pelepasan beban 2015 total sebanyak 7 tahapan adalah sebesar 6.179 MW yang didasari atas prioritas area. Dengan demikian, akan terjaga kestabilan antara pembangkitan dengan jumlah beban yang harus dilayani. Untuk itu, akan dianalisa dalam penulisan ini tentang pelepasan beban oleh under frequency berbasis simulasi pada system Tenaga Listrik Jawa Bali.

Kata Kunci : Pelepasan beban, frekuensi, pembangkit listrik, kestabilan sistem, UFR

ABSTRACT

In order to maintain the stability of the power distribution sistem, it is necessary to have a load shedding analysis which will be used when the number of generators decreases. A reliable load shedding strategy in the Java-Bali power system is urgent issue and needs to be updated annually in accordance with the conditions of the system. The development of Java-Bali power system condition, either load and generating system, indicates the need of re-assessment for load shedding program which created in 2014 and still used today. It was calculated by the 2013's data with 22.567 MW as peak load and system stiffness by 718,49 MW / Hz, while the realization of peak load in 2015 was 24.258 MW. Based on these conditions, the study of load shedding by under frequency Rele has been conducted by using Digsilent 14.1.3 and resulting seven stages of load shedding scheme in 2015 by 6.179 MW based on Priority area. Thus, stability will be maintained between generation and the amount of load that must be served. For this reason, this paper will analyze under-frequency load shedding based on simulation on the Java-Bali Electric Power System.

Keywords: Load Shedding, frequency, power plant, system stability, UFR

I. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pada sistem tenaga listrik, frekuensi merupakan indikator dari keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan total beban sistem. Frekuensi sistem akan turun dari nominal 50 Hz apabila kekurangan daya pembangkitan atau kelebihan beban. Penurunan frekuensi yang besar

dapat mengakibatkan kegagalan unit pembangkit secara beruntun yang menyebabkan kegagalan sistem total. Pelepasan sebagian beban secara otomatis dengan menggunakan rele under frekuensi, dapat mencegah penurunan frekuensi dan mengembalikannya ke kondisi normal. Untuk menghindari hal tersebut perlu dilakukan suatu mitigasi. Beberapa strategi operasi yang diterapkan dalam sistem kelistrikan Jawa Bali pada kondisi

kekurangan pasokan daya yang dikenal sebagai skema pengamanan sistem, salah satunya dengan menggunakan UFLS (Under Frequency Load Shedding) atau pelepasan beban otomatis oleh rele frekuensi. Strategi pelepasan beban di Sistem Jawa Bali (SJB) yang andal merupakan hal penting dan selalu diperbaharui sesuai dengan kondisi sistem. Kondisi SJB yang berkembang baik beban maupun pembangkitan, mengindikasikan bahwa perlunya Analisa terhadap program pelepasan beban TH 2014 dan masih digunakan sampai saat ini. Program pelepasan beban SJB TH 2014 dihitung dengan data beban puncak SJB tahun 2013 sebesar 22.567 MW dengan Indeks Kekuatan Sistem sebesar 718,49 MW/Hz, sedangkan realisasi BP SJB tahun 2015 adalah sebesar 24.258 MW yang terjadi pada 5 November 2015 pukul 18.00 WIB. Untuk itu, dalam tulisan ini dilakukan analisa strategi pelepasan beban yang dihitung berdasarkan kondisi terakhir STL Jawa Bali.

II. OPERASI SISTEM TENAGA

2.1. Elemen Sistem Tenaga Listrik

Sistem JawaBali berarti sistem tenaga listrik yang mencakup Pulau Jawa, Madura dan Bali. Secara umum sistem tenaga listrik dapat dikatakan terdiri dari tiga bagian utama, yaitu Pembangkitan tenaga listrik, Penyaluran tenaga listrik dan Distribusi tenaga listrik. [5]

Pengaturan operasi sistem dalam cakupan interkoneksi di sisi pembangkitan dan penyaluran dalam ruang lingkup se Jawa Bali secara rasional dan ekonomis dengan memperhatikan mutu dan keandalan, sehingga penggunaan tenaga listrik se Jawa Bali dapat mencapai daya guna dan hasil guna yang semaksimal mungkin.[9].

2.2. Pembangkit Tenaga Listrik [6]

Sebagai memasok tenaga listrik ke system, Pembangkit terdiri dari generator dan penggerak mula. Penggerak mula berupa mesin yang memutar poros generator. Tenaga listrik diperoleh dari generator arus bolak-balik. Generator listrik menghasilkan tenaga listrik dengan frekuensi tertentu. Generator-generator di sistem tenaga listrik di Indonesia menggunakan frekuensi 50 hertz. Kapasitas generator beragam, dari 100-1000 kW bahkan hingga MW. Unit Pembangkit sering dikelompokkan berdasarkan jenis tenaga yang dirubah menjadi tenaga listrik, yaitu Tenaga panas, Tenaga air dan Tenaga nuklir. Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar sampai ke konsumen.

2.3. Beban Sistem Tenaga Listrik

Beban sistem di suatu daerah tergantung pada kegiatan komersial, industri dan pemukiman yang juga dipengaruhi oleh keadaan cuaca. Sifat beban dari kelompok pelanggan yang beragam akan sangat membantu dalam proses prakiraan beban sistem tenaga. Beban sistem tenaga terdiri dari beberapa kelompok pelanggan. Tiap pelanggan memiliki sifat-sifat yang khas. Pembagi pelanggan-pelanggan tersebut secara umum kedalam 5 kelompok, yaitu pemukiman, komersial, industri, pertanian, traksi listrik. Stabilitas sistem merupakan kemampuan yang memungkinkan sistem tersebut untuk tetap berada pada kondisi batas operasi normal atau abnormal Oleh karena itu, perlu adanya pengklasifikasian kestabilan sistem berdasarkan faktor kontribusi yang menyebabkan ketidakstabilan.

2.3.1. Stabilitas dan Dinamika Rotor

Berdasarkan sifat gangguan masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas: [3] [4] Stabilitas steady state, Stabilitas transient dan Stabilitas dinamis. Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan adalah hasil kali dari momen-momen kelembaman rotor dan percepatan sudutnya. Dalam sistem unit-unit MKS dan untuk generator serempak, persamaan ini ditulis dalam bentuk [3]:

$$J = d^2 \theta m = T_a = T_m - T_e \quad \text{N-m} \dots (2.1)$$

Simbol-simbol mempunyai arti berikut:

J= Momen kelembaman total (kg-m²), θ m adalah Pergeseran sudut rotor, t=Waktu (detik), T_a = Momen putar percepatan (Nm), m Momen putar mekanis (Nm), T_e adalah Momen putar elektrik (Nm).

2.3.2. Stabilitas dan Pengaturan Frekuensi

Frekuensi merupakan gelombang sinusoidal dari tegangan atau arus listrik dalam satu detik dengan besaran Hertz. Frekuensi merupakan salah satu tolok ukur kualitas tenaga listrik. Dalam kondisi normal, frekuensi menunjukkan keseimbangan sesaat antara pembangkitan dan beban. Frekuensi nominal 50 Hz, diusahakan untuk tidak lebih rendah dari 49,5 Hz. atau lebih tinggi dari 50,5 Hz. Dalam waktu keadaan darurat frekuensi yang diizinkan turun hingga 47,5 Hz atau naik hingga 52,0Hz sebelum unit pembangkit diizinkan keluar dari operasi (Aturan SJB [2]. Hubungan antara kopel mekanis penggerak generator dengan perputaran generator mengikuti hukum Newton, yaitu [3]:

$$(T_g - T_b) = H \times (d\omega / dt). \quad (2.2)$$

Tg=Kopel penggerak generator, Tb= Kopel beban, H=Momen Inersia, $d\omega =$ Kecepatan sudut generator dengan $f = (\omega/2\pi)$.

Dari persamaan di atas menunjukkan bahwa pengaturan frekuensi dalam suatu sistem sama dengan pengaturan kopel penggerak generator atau pengaturan daya aktif dari generator. Nilai konstanta inersia dari suatu unit pembangkit telah ditentukan oleh pabrikan atau juga dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$H = \frac{\text{Energi Kinetik mesin (MWs)}}{\text{Rating mesin (MVA)}} \quad (2.3)$$

2.3.3. Respon Frekuensi Terhadap Waktu

Respon penurunan frekuensi rata-rata yang diakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dengan beban konsumen karena gangguan dinyatakan dalam persamaan [9]:

$$df_{ave}(t)/dt = (\Delta PG) / \{2\pi \cdot (H_1 + H_2)\} \quad (2.4)$$

Dari persamaan diatas, semakin besar konstanta inersia sistem, laju penurunan frekuensi semakin lambat. Besaran inersia sistem (H) merupakan ukuran kekakuan sistem (Stiffness).

2.3.4. Perhitungan Target Load Shedding

Besarnya beban yang dilepas oleh rele frekuensi rendah dalam rangka pemulihan kondisi kestabilan frekuensi akibat gangguan dapat dihitung dengan persamaan [9]:

a. Cadangan sistem memadai :

$$\sum PLS = \Delta PG - K \cdot \Delta f_{ss} \quad (2.5)$$

b. Cadangan sistem kurang memadai : $< DPG$

$$\sum PLS_2 > (\Delta PG - SR) + (\Delta PG - K \cdot \Delta f_{SS}) \dots \quad (2.6)$$

$\sum PLS =$ Beban dipadamkan (MW), $\Delta PG =$ Unit Pembangkit trip (MW), $K =$ Indeks Kekuatan Sistem (MW/Hz), $\Delta f_{ss} =$ Selisih frekuensi akhir setelah shedding terhadap frekuensi normal dan $SR =$ Spinning Reserve (MW)

2.4. Prinsip Kerja Rele Frekwensi

UFR merupakan suatu rele yang bekerja apabila terdapat inputan berupa frekuensi yang disetting dibawah frekuensi normalnya. Rele ini bekerja sesuai dengan setting yang ditentukan oleh pengguna. Setiap tipe dari UFR memiliki cara setting yang berbeda. Settingan dari UFR ada yang berupa switch dan berupa digital. Terdapat suatu gambaran umum dari prinsip kerja dari rele frekuensi.

2.5. Prinsip Kerja Generator Sinkron

Kumparan medan pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi sehingga menimbulkan

fluks yang besarnya tetap terhadap waktu. Kemudian penggerak mula yang terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya sesuai dengan persamaan:

$$n = (120f/p) \quad (2.7)$$

Perputaran rotor sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor akan menginduksikan tegangan 3 fasa pada kumparan jangkar sehingga akan menimbulkan medan putar pada stator. Perputaran ini menghasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Perubahan fluks magnetik melingkupi kumparan akan menimbulkan induksi pada ujung kumparan. GGL pada alternator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator bila rotor diputar di sekitar stator. Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan (I_f) yang diberikan pada rotor. Besarnya GGL induksi rata-rata yang dihasilkan kumparan jangkar alternator dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$E = 4,44 \times f \cdot \Phi \cdot T \dots \dots \dots (2.8)$$

Jika $f = (nP/120)$, maka: $E = 4,44 \times (nP/120) \Phi \cdot T$

$E = (4,44nP\Phi T)/120$, Bila $C = (4,44P T/120)$, maka

$$E = C \cdot n \cdot P \quad (2.9)$$

E adalah ggl induksi dalam Volt, sedangkan P= Jumlah kutub dengan Putaran n (rpm), $\Phi =$ Fluks magnetik (weber) T=banyaknya lilitan /fase =1/2 dan Z = banyak sisi kumparan.

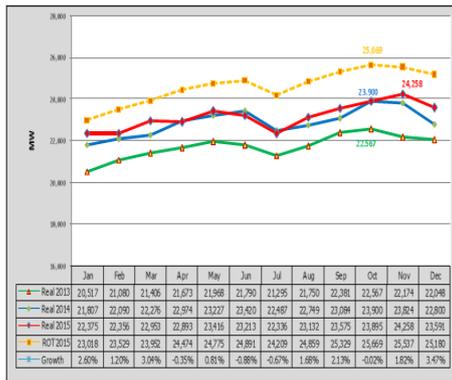
III. PELEPASAN BEBAN

3.1. Kondisi Sistem Jawa Bali

Sistem Kelistrikan SJB merupakan sistem interkoneksi yang terhubung satu sama lain melalui transmisi. Sistem ini juga membuat setiap kejadian di sistem tenaga listrik akan mempengaruhi seluruh sistem yang terhubung.

3.1.1. Beban Puncak Sistem

Beban Puncak (BP) tertinggi Sistem Jawa Bali 2015 mencapai 24.258 MW dengan pertumbuhan 1,50% (atas beban puncak 2015) dan faktor beban 79,28%, terjadi pada Kamis, 05 November 2015. Realisasi BP mencapai 94,5% dari rencana operasi 2015, (Gbr 3.1). Untuk BP siang terjadi pada Rabu, tanggal 18 Nov 2015 pukul 13:30 capai 23.449 MW dengan pertumbuhan 2,33%.



Gambar 3.1 Beban Puncak SJB

3.1.2. Beban Puncak Area Pengatur Beban

Pada beban puncak sistem 24.258 MW, tampak urutan kontribusi APB Jakarta & Banten mencapai 39,5% atau 9.594 MW. Urutan kedua beban Jabar 20,7% dan Jatim 20,8% diikuti oleh APB Jateng dan DIY sebesar 15,8% dan Bali 3,2%. Untuk pertumbuhan beban puncak dari masing-masing APB (beban puncak Diversity) pada Tabel 3.1. Pertumbuhan ke-1 APB Jatim yaitu 5,31%, Jakarta & Banten 3,87%, Jateng & DIY 3,19%, Jabar 0,73%.

Tabel 3.1. Beban Puncak Diversity

Area	Beban Diversity				Beban Coincident	
	2014		2015		2015	
	MW	Tumbuh	MW	Tumbuh	MW	Kontribusi (%)
APB Jakban	9,615	3.19%	9,987	3.87%	9,594	39.55%
APB Jabar	5,037	7.55%	5,074	0.73%	5,029	20.73%
APB Jateng	3,764	7.45%	3,884	3.19%	3,822	15.76%
APB Jatim	4,995	6.04%	5,260	5.31%	5,045	20.80%
APB Bali	781	8.20%	808	3.46%	767	3.16%
Sistem	23,900	5.91%	24,258	1.50%	24,258	100%

3.1.3. Komposisi Pembangkitan

Daya Mampu Netto (DMN) pembangkit berdasarkan energi primer untuk setiap jenis pembangkit di SJB dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2. DMN berdasarkan energi primer

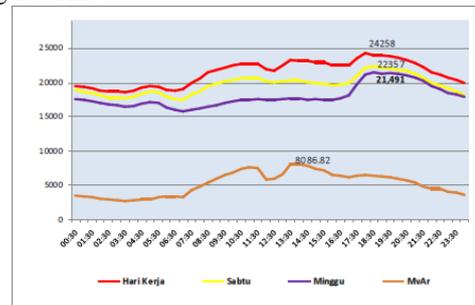
Jenis Pembangkit	DMN (MW)	%
Hidro	2,477.49	8%
Gas	8,471.03	27%
Batubara	17,339.40	55%
HSD	1,585.04	5%
MFO	696.00	2%
Panas Bumi	1,124.65	4%
Total	31,693.61	100%

Dari tabel 3.2, Daya Mampu Netto (DMN) pembangkit ditampilkan, yang merupakan daya mampu maksimum netto pembangkit sebagai pemasok sistem (setelah dikurangi pemakaian sendiri), sesuai dengan kontrak jual beli.

DMN SJB yang beroperasi hingga akhir 2015 adalah 31.694 MW. Dari tabel 3.2 terlihat bahwa SJB masih didominasi oleh pembangkit PLTU.

3.1.4. Karakteristik Beban

Karakteristik beban harian sistem Jawa Bali 2015 baik karakteristik beban hari kerja maupun hari libur/Minggu, lihat Gambar 3.2 di bawah ini. Beban harian dapat dikelompokkan sebagai berikut:



Gambar 3.2 Karakteristik Beban SJB [10]

3.1.5. Gangguan Sistem

Adanya gangguan operasi sistem dari berbagai jenis dapat memicu ketidakstabilan frekuensi, tegangan dan perbedaan sudut rotor. Jika gangguannya relatif kecil dan waktunya singkat, umumnya operasi sistem masih aman dan stabil, tetapi ketika gangguannya cukup besar dengan atau tanpa durasi yang panjang maka akan berpotensi mengancam keruntuhan sistem secara parsial maupun menyeluruh.

Tabel 3.3 Gangguan Pembangkit dengan Penurunan Frekuensi tahun 2015

No	Tanggal	Penyebab Gangguan
1	13-Jan-15	SUTET UNGAR-MDRCN 1,2
2	5-Mar-15	PLTU JP #7 Trip
3	6-Mar-15	PLTU JP #9 Trip
4	19-Mar-15	PLTA Saguling #4 Trip
5	1-Apr-15	PLTGU MTWAR Blok #1 Trip
6	16-Apr-15	PLTU Paiton #9 Trip
7	24-Apr-15	PLTU PEC #8 Trip
8	24-May-15	PLTU PEC #7 Trip
9	14-Jun-15	PLTGU Priok GT #3.2 & HRSG Trip
10	22-Jun-15	PLTU JP #7 Trip
11	6-Jul-15	PLTU JP #7 Trip
12	3-Aug-15	PLTU JP #7 Trip
13	13-Aug-15	PLTU JP #7 Trip
14	28-Aug-15	PLTU TJATI #2 Trip
15	5-Oct-15	PLTUPaiton #9 Trip
16	8-Oct-15	PLTU Pratu #3 Trip
17	28-Oct-15	PLTU PEC #7 & #8 Trip
18	4-Nov-15	PLTU JP #5 Trip

Untuk menghindari kondisi yang tidak diharapkan maka perlu adanya penerapan strategi pertahanan pada sistem tenaga secara tepat. Selama

periode 2015, SJB telah mengalami beberapa gangguan yang menyebabkan penurunan frekuensi (tabel 3.3.)

Berdasarkan tabel 3.3, Salah satu gangguan yang paling besar terjadi tanggal 13 Januari 2015 gangguan SUTET 500kV Ungaran - Mandirancan sirkit-1 reclose lockout dan SUTET Ungaran-Mandirancan sirkit-2 trip di GITET Mandirancan bersamaan dengan tripnya IBT-3 GITET Ungaran. Akibat trip penghantar 500 kV Ungaran-Mandirancan 1 & 2, terjadi fenomena unstable power swing (out of step) yang menyebabkan penghantar 500 kV Pedan-Tasikmalaya 1 & 2 trip, sehingga Sistem Jawa Bali terpisah menjadi Sistem Barat dan Sistem Timur. Akibatnya frekuensi wilayah Barat turun hingga mencapai 48,66 Hz sedangkan wilayah Timur naik hingga 51,6 Hz seperti terlihat pada gambar 3.3 berikut ini



Gambar 3.3. Frekuensi Wilayah Barat Saat

Gangguan 13 Januari 2015 Selama periode 2014 hingga 2015, unjuk kerja keberhasilan penyulang dan keberhasilan beban UFR terlihat pada tabel 3.4 dan tabel 3.5 berikut,

Tabel 3.4 Unjuk Kerja UFR tahun 2014

No.	Tanggal	Frek. [Hz]	APB DKI JAB		APB JABAR		APB JTD		APB JATM		APB BALI		TOTAL		
			Distribusi Jakarta & Tangerang		Distribusi Jawa Barat & Banten		Distribusi Jawa Tengah		Distribusi Jawa Timur		Distribusi Bali		%	%	
			Penyulang	Penyulang	Penyulang	Penyulang	Penyulang	Penyulang	Penyulang	Penyulang					
1	15-10-14	48,66	39,5	75,5	75,5	85,2	112,4	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	80,6	85,7	
2	20-04-15	49,03	0,0	0,0	0,0	0,0	47,5	42,9	0,0	0,0	0,0	0,0	47,5	42,9	
3	28-04-15	49,38	50,9	68,8	70,9	75,8	111,2	93,0	75,5	81,0	-	95,5	0,0	77,1	82,8
4	14-NOV-15	49,51	0,0	0,0	0,0	0,0	94,1	76,7	62,1	42,9	0,0	0,0	0,0	76,1	59,8
5	26-NOV-15	49,02	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	54,5	38,1	0,0	0,0	0,0	54,5	38,1
6	6-Dec-15	-	12,5	6,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,5	6,9

Dari tabel 3.4, untuk tahun 2014 unjuk kerja keberhasilan penyulang sebesar 54,88% dengan keberhasilan beban sebesar 51,69%.

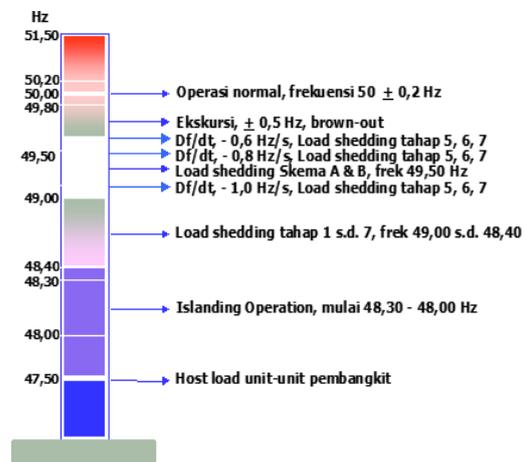
Tabel 3.5 Unjuk Kerja UFR tahun 2015

No.	Tanggal	Frek. [Hz]	APB DKI JAB		APB JABAR		APB JTD		APB JATM		APB BALI		TOTAL					
			Distribusi Jakarta & Tangerang		Distribusi Jawa Barat & Banten		Distribusi Jawa Tengah		Distribusi Jawa Timur		Distribusi Bali		%	%				
			Penyulang	Penyulang	Penyulang	Penyulang	Penyulang	Penyulang	Penyulang	Penyulang								
1	12-May-14	49,04	68,0	78,3	65,7	74,3	66,9	75,0	95,3	79,7	61,6	63,6	74,7	97,4	74,7			
2	16-04-14	49,08	20,2	18,3	39,6	42,8	29,5	35,6	62,2	74,7	0,0	0,0	23,5	41,1	0	31,3	37,0	
3	14-05-14	49,08	12,1	18,2	12,1	11,4	12,7	15,3	94,6	76,7	33,9	36,4	47,3	66,7	0	0	46,9	48,0
Rata-rata			33,4	38,7	39,0	41,9	34,4	42,3	92,1	77,5	31,6	33,3	44,5	61	0,0	0,0	31,8	34,3

Dari data tabel 3.5, pada tahun 2015 unjuk kerja keberhasilan penyulang sebesar 52,3% dengan keberhasilan beban sebesar 58,4%. Sehingga rata-rata unjuk kerja keberhasilan penyulang UFR sebesar 53,59 %, dengan keberhasilan beban UFR sebesar 55,045%.

3.2. Skema Pelepasan Beban Frekuensi Rendah

Dalam pengusahaan operasi sistem tenaga listrik, frekuensi merupakan parameter yang sangat penting untuk dipertahankan dan diusahakan agar selalu dalam rentang normal (50 + 5%). Ketika kondisi sistem kekurangan pasokan daya (defisit) atau terjadi gangguan yang menyebabkan penurunan frekuensi yang membahayakan sistem, PLN P2B sebagaimana tercantum dalam Aturan Jaringan Sistem Jawa Bali tahun 2007 mempunyai wewenang untuk melakukan pelepasan beban baik secara manual (sub bab OC 3.6) maupun secara otomatis oleh Rele Frekuensi Rendah (sub bab OC 3.7). Berdasarkan pertimbangan dan alasan-alasan tersebut, Sistem Jawa Bali telah menyiapkan strategi pengamanan frekuensi rendah dengan pelepasan beban (Load Shedding) yaitu Skema A & B, Under Frequency Load Shedding (UFLS), dan Islanding Operation. Gambaran mengenai strategi pelepasan beban oleh UFR terdapat pada gambar 3.4 berikut :



Gambar 3.4. Strategi Pelepasan Beban UFR Sistem Jawa Bali [9]

Pada gambar 3.4, Skema A & B merupakan skenario pelepasan beban secara manual dalam rangka mengatasi kondisi sistem defisit pembangkitan. Pelepasan beban Skema A & B akan dilaksanakan ketika frekuensi sistem turun dalam 49,8 - 49,5 Hz selama + 6 menit dan diperkirakan tidak ada sumber pasokan yang bisa diharapkan untuk mengembalikan frekuensi menjadi normal kembali. Besar dan lokasi beban yang dilepas merupakan hasil perhitungan dan studi/simulasi yang telah disepakati bersama antara

pusat pengatur beban dengan distribusi, Dalam kondisi gangguan sistem, misalnya karena terjadi kehilangan/trip unit pembangkit besar atau terputusnya saluran penghubung entitas pembangkit, akan menyebabkan penurunan frekuensi yang cepat dan cukup signifikan. Penurunan frekuensi ini bisa dipulihkan dengan skema pelepasan beban secara otomatis menggunakan rele frekuensi. Pelepasan beban dilakukan secara bertahap atau langsung, tergantung pada kemampuan sistem mempertahankan kestabilannya. Besar dan jumlah tahap pelepasan beban dapat ditentukan melalui analisis prioritas secara komprehensif dan diverifikasi dengan simulasi model statis maupun dinamis untuk mendapatkan besaran yang dibutuhkan. Data tabel 3.6 dijadikan pertimbangan penyusunan skema pelepasan beban Jawa Bali.

Tabel 3.6 Parameter Penyusunan Alokasi Pelepasan Beban 2015

No	Parameter	Satuan	JKB	JBR	JTD	JTM	BLI	SJB	Keterangan
1	DMN	MW	9,282	7,673	5,216	8,561	962	31,694	
2	Entitas Pembangkit Terbesar	MW	3,802	1,959	2,644	4,610	380	4,610	Opsi LS maksimum
3	Unit Pembangkit Terbesar	MW	590	660	661	815	130	815	Opsi tahapan LS
4	Beban Puncak	MW	9,987	5,074	3,884	5,260	808	24,258	Referensi LS
		%	41	21	16	22	3	100	
5	Energi Distribusi	GWh	65,278	35,791	24,354	32,823	4,840	163,086	proporsi LS
		%	40	22	15	20	3	100	
6	Kekuatan Sistem (Statistik)	MW/Hz						917	Opsi penentuan LS
7	Kekuatan Sistem (Simulasi)	MW/Hz						899	Opsi penentuan LS
8	Keberhasilan UFR	%	63	84	61	95	-	52	koefisien LS

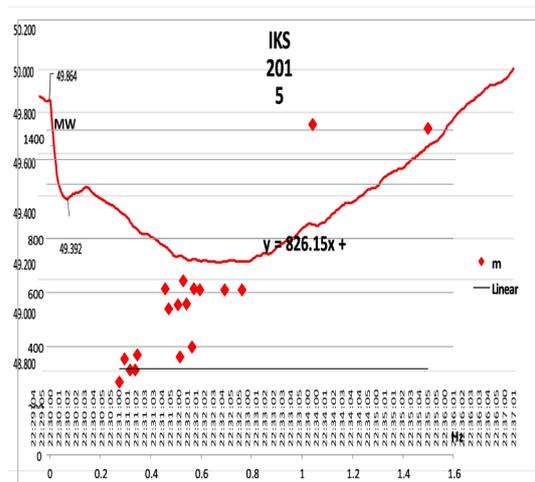
Tabel 3.6, berisi informasi mengenai referensi penyusunan skema pelepasan beban: entitas pembangkit Paiton sebesar 4.610 MW, Indeks Kekuatan Sistem secara statistik dan simulasi dan prosentase keberhasilan UFR 2015.

IV. PERHITUNGAN DAN ANALISIS

4.1. Indeks Kekuatan Sistem Jawa Bali

Untuk menentukan nilai indeks kekuatan SJB, digunakan data rekapitulasi gangguan pembangkit yang terjadi pada 2015 dan menyebabkan frekuensi sistem turun. Salah satu gangguan tersebut adalah PLTU Tanjung Jati #2 7 trip 28 Agustus 2015, 22:29 WIB. Kondisi frekuensi sistem saat gangguan dilihat pada gbr 4.1 Gangguan PLTU Tanjung Jati #2.

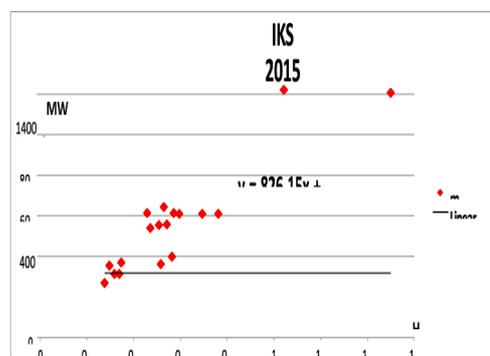
Dari gambar 4. 1 terlihat bahwa frekuensi sistem pada pukul 22:29 WIB terjadi penurunan yang cukup curam yang semula frekuensi berada pada nilai 49,864 Hz hanya dalam durasi 56 detik, frekuensi turun hingga mencapai 49,392 Hz.



Gambar 4.1. Profil Frekuensi Sistem Saat

Bersamaan dengan PLTU Tanjung Jati #2 trip pada beban 539 MW. Dengan menggunakan pers 2.6, maka diperoleh nilai nilai laju penurunan frekuensi tercantum dalam tabel 4.1

Dari tabel 4.1, diperoleh nilai df/dt untuk tiap gangguan yang terjadi Setelah diperoleh data laju penurunan frekuensi akibat hilangnya pasokan daya dari unit pembangkit yang trip, dengan gunakan regresi Linier seperti gambar 4.2.



Gambar 4.2. Indeks Kekuatan SJB

Dari gambar 4.1 di atas, diperoleh persamaan untuk indeks kekuatan SJB untuk 2015 adalah

$$y = 826,15x + 90,811$$

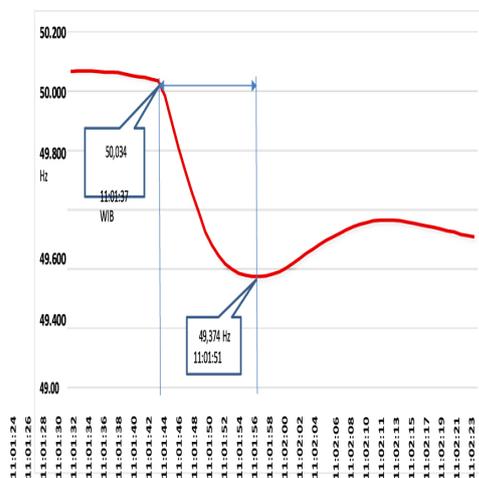
Sehingga untuk penurunan frekuensi sebesar 1 Hz (x = 1) nilai indeks kekuatan sistem Jawa Bali adalah sebesar 916,961 MW/ Hz.

Tabel 4.1. Rekapitulasi Penurunan Frekuensi

No	Tanggal	Penyebab Gangguan	dP (MW)	Frek. Awal (Hz)	Frek. Akhir (Hz)	dt (s)	df (Hz)	IKS(MW/Hz)	df/dt
1	5-Mar-15	PLTU PEC #7 Trip	610	50.034	49.374	14	0.660	924	0.047
2	6-Mar-15	PLTU Paiton #9 Trip	615	50.008	49.436	14	0.572	1075	0.041
3	19-Mar-15	PLTA Saguling #4 Trip	361	49.988	49.472	214	0.516	700	0.002
4	1-Apr-15	PLTGU MTWAR Blok #1 Trip	355	49.826	49.530	17	0.296	1201	0.017
5	16-Apr-15	PLTU Paiton #9 Trip	315	49.852	49.514	216	0.338	932	0.002
6	24-Apr-15	PLTU PEC #6 Trip	645	49.980	49.450	9	0.530	1217	0.059
7	24-May-15	PLTU PEC #7 Trip	400	49.986	49.422	226	0.564	709	0.002
8	14-Jun-15	PLTGU Prink GT #3,2 & HRSG Trip	270	49.952	49.676	22	0.276	978	0.013
9	22-Jun-15	PLTU PEC #7 Trip	610	50.032	49.436	14	0.596	1023	0.043
10	6-Jul-15	PLTU PEC #7 Trip	554	50.082	49.574	14	0.508	1090	0.036
11	3-Aug-15	PLTU IP #5 Trip	557	50.034	49.492	17	0.542	1028	0.032
12	13-Aug-15	PLTU Surabaya #1 Trip	370	49.900	49.554	15	0.346	1069	0.023
13	28-Aug-15	PLTU TJATI #2 Trip	539	49.864	49.392	56	0.472	1142	0.008
14	5-Oct-15	PLTU Paiton #9 Trip	613	49.918	49.460	21	0.458	1338	0.022
15	8-Oct-15	PLTU Pretu #3 Trip	314	49.732	49.414	120	0.318	987	0.003
16	28-Oct-15	PLTU PEC #7 & #8 Trip	1220	50.044	48.978	9	1.066	1144	0.118
17	4-Nov-15	PLTU IP #5 Trip	610	49.782	49.020	65	0.762	801	0.012

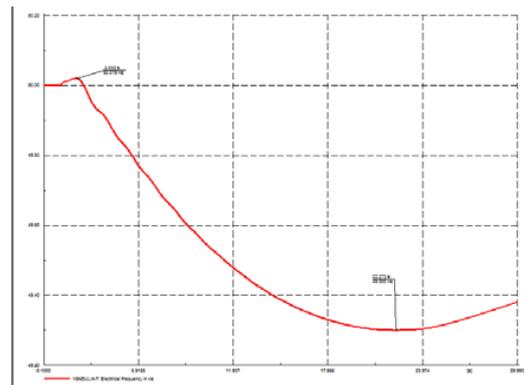
4.2. Rekonstruksi Gangguan PLTU Paiton Unit 7 Trip

Dari realisasi gangguan yang terjadi, kejadian gangguan akibat PLTU Paiton unit 7 trip pada 5 Maret 2015 memiliki data yang cukup jelas dan lengkap untuk dijadikan sebagai base case. Gangguan tersebut menyebabkan daya aktif 610 MW keluar (trip) dari sistem dan frekuensi menurun dari 50,034Hz menjadi 49,374 Hz dalam waktu 14 detik (gambar 4.3) .



Gambar 4.3. Realisasi Gangguan PLTU P 7.

Loadflow mendekati kondisi sebelum gangguan. Kemudian rekonstruksi gangguan mendekati hasil rekaman dengan pemodelan dinamik pembangkit sehingga dihasilkan yang serupa. Data pemodelan dinamik dipakai dalam simulasi penurunan f pada berbagai kondisi beban . (Gbr 4.4). Hasil simulasi gangguan PLTU Paiton 7 diperoleh lenting kurva yg identik dengan kurva realisasi dengan penurunan f dari 50,019 Hz menjadi 49,30 Hz saat unit 610 MW di tripkan.



Gambar 4.4. Rekonstruksi Gangguan PLTU P7

4.3. Simulasi Penurunan Frekuensi

Simulasi penurunan frekuensi dilakukan pada kondisi beban malam dan siang pada beban puncak 2015 Simulasi penurunan frekuensi dilakukan pada kondisi satu pembangkit trip. Pada setiap kondisi beban dilakukan 8 (delapan) simulasi trip pembangkit yang berbeda. Dari dua kondisi beban sistem yang berbeda di tahun 2015 diperoleh 16 kali simulasi penurunan frekuensi. Salah satu simulasi penurunan frekuensi bebanp puncak malam dilihat pada gbr 4.4.

Pada simulasi unit terbesar yaitu Paiton 3 trip (beban 810 MW) penurunan f capai 49,084 Hz. Pada kondisi ini, untuk UFR tahap 1 belum bekerja dikarenakan diseting pada 49,00 Hz. Untuk hasil simulasi penurunan f akibat gangguan Unit trip lebih detail lihat tabel 4.2. Dari tabel 4.2 tersebut diperoleh nilai indeks kekuatan sistem ketika melakukan simulasi adalah 899,21 MW/ Hz. Jika dibandingkan dengan kondisi realisasinya yang bernilai 917 MW/ HZ, maka diperoleh margin error sebesar 1,9%.

4.4. Penentuan Alokasi Pelepasan Beban

Setelah IKS diperoleh, dibuatlah skema dan tahapan pelepasan load untuk mengamankan Sistem bila terjadi trip unit pembangkit/ transmisi.

Tabel 4.2. Simulasi Perubahan Frekuensi Terhadap Pembangkit Trip.

N o	Waktu Beban Puncak	Unit	ΔP	F0	Ft	ΔF
1	Malam	Paiton 7	610	50.00	49.300	0.700
2	Malam	Tanjung Jati 3	630	50.00	49.190	0.804
3	Malam	Suralaya 7	560	50.00	49.628	0.372
4	Malam	Cilacap 1	260	50.00	49.861	0.138
5	Malam	CEP	660	50.00	49.581	0.419
6	Malam	Rembang 2	280	50.00	49.791	0.208
7	Malam	Suralaya 3	372	50.00	49.679	0.321
8	Malam	Paiton 3	810	50.00	49.084	0.916
9	Siang	Paiton 7	610	50.00	49.021	0.979
10	Siang	Tanjung Jati 3	630	50.00	49.209	0.791
11	Siang	Suralaya 7	560	50.00	49.488	0.512
12	Siang	Cilacap 1	260	50.00	49.835	0.161
13	Siang	CEP	660	50.00	49.440	0.560
14	Siang	Rembang 2	280	50.00	49.780	0.214
15	Siang	Suralaya 3	372	50.00	49.741	0.255
16	Siang	Paiton 3	810	50.00	49.021	0.977

Tabel 4.3. Alokasi tahapan load shedding

Tahap	Setting (Hz)	Shedding (MW)	Shedding (MW)	Kumulatif Shedding (MW)
		2014	2015	
Skema A	49,5	625	459	459
Skema B	49,5	625	459	459
1	49,0	625	459	459
2	48,8	625	459	918
3	48,7	1000	459	1377
4	48,6	1100	459	1836
5	48,5	1160	459	2295
6	48,4	625	459	2754
7	48,3	625	459	3213
Total		5760		3213

Skema A dan B akan bekerja dengan tunda waktu 5 dan 10 menit, sesuai waktu untuk memobilisasi cadangan putar unit PLTA start beroperasi. Bila batas waktu terlampaui dan f masih menurun, maka dilakukan pelepasan beban 459 MW diharapkan f kembali naik 0,5 Hz ke 50Hz. Perbandingan skema UFLS 2014 dengan hasil perhitungan dengan data BP Jawa Bali 2015 dapat dilihat pada tabel 4.4 dan tabel 4.5 .

Tabel 4.4. Skema tahapan load shedding 2014

Tahap/ Skema	Setting UFR (Hz)	APB JAKBAN (MW)	APB JABAR (MW)	APB JATENG & DIY (MW)	APB JATIM (MW)	APB BALI (MW)	Jumlah (MW)	Keterangan
Skema A	49,5	270	130	90	135	0	625	Tunda waktu 5-10 menit
Skema B	49,5	270	130	90	135	0	625	Tunda waktu 5-10 menit
UFR Niaga								
Tahap 1	49,45	85	41	28	41	5	200	Instantaneous
Tahap 2	49,40	85	41	28	41	5	200	Instantaneous
Tahap 3	49,30	85	41	28	41	5	200	Instantaneous
UFR Sistem								
Tahap 1	49,0	273	131	90	130	0	625	Instantaneous
Tahap 2	48,9	273	131	90	130	0	625	Instantaneous
Tahap 3	48,8	437	210	144	209	0	1000	Instantaneous
Tahap 4	48,7	480	231	159	229	0	1100	Instantaneous
Tahap 5	48,6	493	237	163	235	32	1160	Instantaneous
Tahap 6	48,5	261	125	86	125	28	625	Instantaneous
Tahap 7	48,4	252	121	83	120	48	625	Instantaneous
Jumlah Tahap 1 s.d 7		2469	1188	817	1179	108	5760	
df/dt : -0,3	49,2	480	231	159	229	0	1100	Tahap 4 yg dibatasi
df/dt : -0,4	49,2	493	237	163	235	32	1160	Tahap 5 yg dibatasi
df/dt : -0,5	49,2	513	247	170	245	76	1250	Tahap 6&7 yg dibatasi

Tabel 4.5. Skema tahapan load shedding 2016

Tahap/ Skema	Frek (Hz)	JKB (MW)	JBR (MW)	JTD (MW)	JTM (MW)	BLI (MW)	SJB (MW)	Keterangan
Skema A	49,50	360	201	139	183	0	883	Tunda waktu 5 - 10 menit
Skema B	49,50	360	201	139	183	0	883	Tunda waktu 5 - 10 menit
UFR Sistem								
1	49,00	360	201	139	183	0	883	instant
2	48,90	360	201	139	183	0	883	instant
3	48,80	360	201	139	183	0	883	instant
4	48,70	360	201	139	183	0	883	instant
5	48,60	353	194	132	177	26	883	instant
6	48,50	353	194	132	177	26	883	instant
7	48,40	353	194	132	177	26	883	instant
Jumlah		2498	1386	953	1262	79	6179	

Dari tabel 4.5, untuk proporsi jumlah beban yang harus dilepas tiap Area Pengatur Beban (APB) dihitung berdasarkan proporsi energi distribusi masing-masing APB tersebut pada 2015.

V. SIMPULAN

1. Nilai Indeks Kekuatan SJB 2015 sebesar 917 MW/Hz berarti jika f turun mencapai 49,0 Hz dan UFR bekerja mengembalikan f 49,5 Hz (batas bawah normal) diperlukan load shedding sebesar 459 MW (50% IKS)
2. Untuk margin keamanan terhadap kinerja UFR, maka alokasi load shedding diperhitungkan di tingkat keberhasilan program UFR 2015 52% sehingga untuk mengembalikan dari f 49,0 Hz ke 49,5 Hz harus melepas beban 883 MW per tahap, sehingga total beban yang perlu dilepas pada tahap 1 s.d 7 adalah 6.179 MW.
3. Hasil simulasi gangguan pembangkit dengan mentriplan unit terbesar yaitu PLTU Paiton unit 3 (810 MW), frekuensi turun mencapai 49,084Hz, tidak mengakibatkan UFR tahap 1 bekerja dan sistem masih dalam kondisi stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Chapman, Stephen J, "Electric Machinery Fundamentals 5th ed", McGraw Hill, New York : 2012.
- [2]. Dep. Energi Dan Sumber Daya Mineral , "Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali", Jakarta, 2007.
- [3]. Saadat, Hadi, "Power System Analysis", McGraw Hill, Singapore, 1999.
- [4]. Kundur, Prabha, "Power System Stability and Control", McGraw Hill, 1994
- [5]. Marsudi, Djiteng, "Operasi Sistem Tenaga Listrik", Jkt : Balai Penerbit & Humas ISTN.
- [6]. Marsudi, Djiteng, "Pembangkitan Energi Listrik", Jakarta : Erlangga.