

Pengaruh Respons Governor Berbagai Tipe Pembangkit Terhadap Keandalan Sistem Tenaga Listrik Interkoneksi Kalimantan

Oki Andrean¹, Setyo Aji Utomo¹, Armi Y.N. Purwantara¹

¹Institut Teknologi PLN, Jl. Outer Ring Road Lantai 2, RT.1/RW.1, Duri Kosambi, Kecamatan Cengkareng, Kota Jakarta Barat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 11750
e-mail: andrean.anas90@gmail.com

Abstrak— Sistem interkoneksi Kalimantan merupakan salah satu sistem tenaga listrik terbesar di Indonesia. Dalam menjaga keandalannya berbagai jenis pembangkit listrik berkontribusi dengan mengaktifkan mode free governor, diantaranya ada PLTU Teluk Balikpapan, PLTG Sambera, dan PLTA PM Noor. Penelitian ini mengkaji bagaimana respon governor dari PLTU, PLTG, dan PLTA dalam menghadapi fluktuasi frekuensi sistem yang disebabkan oleh perubahan beban atau lepasnya pembangkit sesuai setting speed droop dan deadband pembangkit. Pengambilan data dilakukan dalam 4 sesi pengukuran untuk fluktuasi frekuensi naik dan turun menggunakan rekaman data logger DCS pembangkit yang terpasang. Analisis regresi linear kemudian dilakukan untuk melihat hubungan dan pola dalam data serta menguji hipotesis secara objektif. Berdasarkan hasil pengukuran, PLTA PM Noor memiliki respon governor yang lebih cepat dibandingkan pembangkit lainnya. PLTU Teluk Balikpapan, sebagai pembangkit berkapasitas terbesar, menyuplai perubahan daya terbesar dibandingkan pembangkit lain saat terjadi fluktuasi frekuensi. Untuk memastikan keandalan sistem interkoneksi Kalimantan, hasil analisis regresi linear menunjukkan bahwa respon governor untuk setiap jenis generator umumnya sesuai dengan setelan yang terpasang, kecuali pada PLTU yang menunjukkan penyimpangan sekitar 9,1% dan 10,64%. Deviasi ini mengindikasikan perlunya kalibrasi ulang atau tinjauan setpoint untuk memastikan kontribusi regulasi frekuensi yang optimal bagi keandalan sistem.

Kata kunci: *Generator, governor, frekuensi, sistem tenaga, interkoneksi*

Abstract— The Kalimantan interconnection system is one of the largest power systems in Indonesia. To maintain its reliability, various types of power plants contribute by activating the free governor mode, including PLTU Teluk Balikpapan, PLTG Sambera, and PLTA PM Noor. This study examines how the governors of PLTU, PLTG, and PLTA respond to system frequency fluctuations caused by load changes or generator outages, in accordance with their speed droop and deadband settings. Data collection was carried out in four measurement sessions for both increasing and decreasing frequency fluctuations, using the installed power plant DCS data logger recordings. Linear regression analysis was then conducted to identify relationships and patterns within the data and to objectively test the hypotheses. Based on the measurement results, PLTA PM Noor exhibited a faster governor response compared to the other power plants. PLTU Teluk Balikpapan, as the largest-capacity generating unit, supplied the largest power adjustment during frequency fluctuations. To ensure the reliability of the Kalimantan interconnection system, the linear regression analysis indicates that the governor response for each generator type generally aligns with the installed settings, except for PLTU, which shows deviations of approximately 9.1% and 10.64%. This deviation indicates the necessity for recalibration or a reassessment of the setpoint to ensure optimal contribution to frequency regulation for system reliability.

I. PENDAHULUAN

Sistem Interkoneksi Kalimantan merupakan salah satu sistem tenaga listrik berskala besar di Indonesia dengan wilayah cakupan yang luas dan tingkat kompleksitas operasi yang tinggi. Sistem ini ditopang oleh berbagai jenis pembangkit, antara lain Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sebagai pembangkit beban dasar, Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) yang memiliki fleksibilitas tinggi, serta Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) yang dikenal memiliki respons dinamis cepat. Keberagaman jenis pembangkit tersebut menyebabkan karakteristik respons

sistem terhadap gangguan frekuensi menjadi sangat dipengaruhi oleh interaksi antar pembangkit. Berdasarkan data Kementerian ESDM tahun 2022 PLTU mendominasi lebih dari 70 % total kapasitas pembangkit di sistem Kalimantan, disusul pembangkit tenaga gas dan air dengan persentase 10-16 % serta pembangkit energi terbarukan yang kapasitasnya relatif kecil dibandingkan tiga kategori di atas.

Pada sistem interkoneksi berskala besar, pengendalian frekuensi merupakan aspek fundamental untuk menjaga keandalan dan kestabilan sistem tenaga listrik. Pengendalian frekuensi primer umumnya dilakukan melalui

pengoperasian Free Governor, dimana setiap unit pembangkit secara otomatis merespons deviasi frekuensi dengan menyesuaikan daya keluarannya sesuai karakteristik governor masing-masing. Implementasi Free Governor menjadi sangat penting pada sistem Interkoneksi Kalimantan mengingat besarnya kapasitas sistem dan potensi dampak gangguan yang dapat menyebar secara luas.

Meskipun demikian setiap jenis pembangkit memiliki karakteristik respons governor yang berbeda, baik dari sisi nilai droop, waktu tanggap, maupun kemampuan mengikuti perubahan beban. PLTA umumnya memiliki respons yang cepat terhadap perubahan frekuensi, sementara PLTU memiliki respons yang lebih lambat namun stabil, dan PLTG berada di antara keduanya. Perbedaan karakteristik ini berpotensi menyebabkan kontribusi regulasi frekuensi yang tidak merata serta koordinasi Free Governor yang kurang optimal apabila tidak dianalisis secara menyeluruh. Kondisi tersebut dapat berdampak pada besarnya deviasi frekuensi maksimum serta lamanya waktu pemulihan frekuensi setelah gangguan.

Terkait hal itu diperlukan kajian yang sistematis untuk menganalisis karakteristik respons governor dari berbagai jenis pembangkit yang beroperasi dalam sistem Interkoneksi Kalimantan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik respons governor, khususnya terkait nilai droop dan kecepatan respons pada PLTU, PLTG, dan PLTA, serta mengukur kontribusi masing-masing pembangkit dalam regulasi frekuensi sistem Interkoneksi Kalimantan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar evaluasi dan peningkatan koordinasi Free Governor guna mendukung keandalan dan kestabilan operasi sistem tenaga listrik.

II. STUDI PUSTAKA

Frekuensi menjadi salah satu parameter penting dari jaringan sistem tenaga listrik. Kurva frekuensi sistem dapat mempresentasikan kondisi, stabilitas, dan mengidentifikasi adanya gangguan sistem ketenagalistrikan. Untuk menjamin aspek keselamatan, keandalan, kualitas dan nilai keekonomian frekuensi sistem tenaga listrik harus dijaga dengan nilai rentang frekuensi kerja $50 \pm 0,2$ Hz [1]. Salah satu mekanisme yang digunakan untuk menjaga frekuensi kerja suatu pembangkit ini dengan menggunakan Free Governor, yaitu mode operasi dimana sistem pengatur turbin pada pembangkit listrik, baik tenaga air, uap, maupun gas, diatur untuk merespons perubahan frekuensi secara otomatis tanpa intervensi langsung dari operator [2]. Mode ini berperan penting dalam mempertahankan stabilitas jaringan listrik saat terjadi fluktuasi beban atau gangguan tenaga listrik secara tiba-tiba [3]. Pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA), tenaga uap (PLTU), dan tenaga gas (PLTG), implementasi mode Free Governor memiliki karakteristik yang berbeda karena sifat mekanis dan termodinamis dari masing-masing tipe pembangkit. Namun, tujuan utamanya tetap sama, yaitu memastikan respons cepat terhadap perubahan frekuensi, menjaga sinkronisasi antara pembangkit, dan meningkatkan keandalan sistem tenaga Listrik [4][5].

1. Prinsip Kerja Governor dan Free Governor Mode

Governor merupakan komponen penting sistem pengaturan di pembangkit tenaga listrik karena mengatur kecepatan turbin, daya keluaran, dan pengaturan

frekuensi jaringan tenaga Listrik. Governor pada turbin mendeteksi perubahan frekuensi dan menyesuaikan daya keluaran pembangkit tanpa memerlukan kontrol manual. Prinsip kerja Free Governor didasarkan pada hukum keseimbangan daya, di mana setiap perubahan beban pada jaringan listrik harus diimbangi oleh perubahan daya keluaran pembangkit [6]. Governor dalam sistem pembangkit tenaga listrik memiliki fungsi utama antara lain :

- Mengatur kecepatan turbin untuk memulai operasi dari kondisi idle.
- Mengatur beban pada turbin dan generator saat sinkron dengan jaringan tenaga Listrik
- Melindungi turbin dari kerusakan yang mungkin terjadi dari kondisi operasi yang tidak aman.

Prinsip Kerja

Prinsip kerja Free Governor melibatkan droop control, di mana perubahan frekuensi menghasilkan perubahan daya keluaran berdasarkan karakteristik droop yang telah ditentukan [11]. Secara umum, pengaturan setpoint menggunakan sistem control PID (Proportional Integral Derivative) untuk mengekselerasi pengaturan governor menuju kondisi steady state dengan elemen utama :

a. Speed drop

Droop merupakan parameter penting di sistem pengaturan governor yang memiliki keterikatan antara perubahan frekuensi di jaringan tenaga listrik dengan daya keluaran dari pembangkit listrik, droop direpresentasikan dengan penurunan kecepatan atau frekuensi nominal untuk menghasilkan perubahan daya keluaran. Dalam pembangkit listrik droop berfungsi untuk menjaga stabilitas sistem tenaga listrik, dan memungkinkan pembangkit berbagi beban secara proporsional sesuai dengan load constraint dari beban tersebut.

Droop dapat ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Droop} = \frac{\Delta f}{f_{\text{nominal}}} \times 100 \%$$

Dead band

Dead band adalah rentang perubahan frekuensi atau kecepatan dimana governor tidak merespons perubahan yang terjadi yang lalu melakukan penyesuaian terhadap perubahan parameter parameter yang muncul. Deadband bertujuan untuk mencegah governor bekerja secara berlebihan terhadap fluktuasi yang tidak signifikan terhadap kondisi sistem tenaga listrik (Kundur, 1994). Dead band diukur dari presentase kecepatan atau nominal sistem, contoh : frekuensi nominal 50 Hz, dead band 0,1 % sehingga governor tidak akan bekerja saat terjadi perubahan frekuensi di rentang $50 \pm 0,05$ Hz.

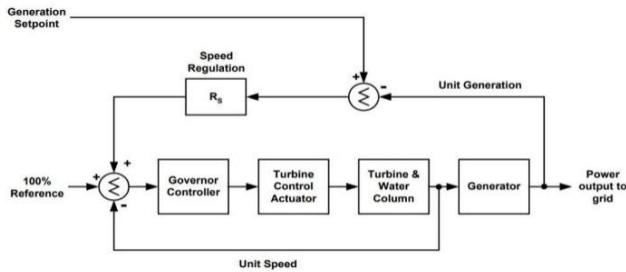
Pentingnya Free Governor

- Stabilitas Frekuensi: Memastikan bahwa jaringan listrik tetap beroperasi pada frekuensi yang stabil meskipun terjadi perubahan beban [9].
- Pembagian Beban (Load Sharing): Memungkinkan pembangkit listrik yang terhubung dalam jaringan interkoneksi untuk membagi beban secara proporsional terhadap kapasitasnya dan load constraint [6].
- Pengendalian Gangguan: Meningkatkan keamanan sistem untuk menahan dampak kondisi abnormal,

seperti kondisi blackout atau lonjakan beban secara tiba tiba [10].

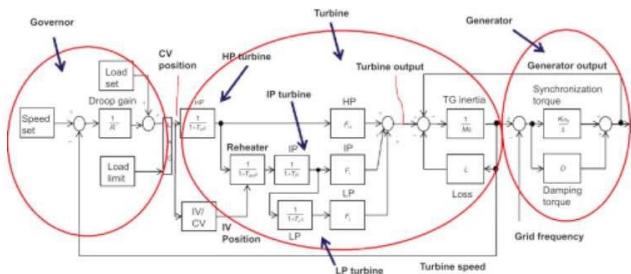
2. Karakteristik Respons Governor Berdasarkan Tipe Pembangkit (PLTA, PLTU, PLTG)

PLTA menggunakan air sebagai fluida kerja untuk memutar turbin. Governor pada PLTA mengatur aliran air melalui katup atau wicket gate untuk menyesuaikan daya keluaran sesuai kebutuhan jaringan. Respons PLTA dalam mode Free Governor sangat cepat karena cara mekanik dari sistem turbin air dalam membangkitkan tenaga Listrik [7]. Studi literatur mengenai pengaturan kecepatan pada PLTA dapat dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama memodelkan bagian penstock, turbin dan speed governor itu sendiri dan bagian. Sesuai dari IEEE Std 1207-2011 serta IEEE Std 125-2007 prinsip kerja dari sistem governor PLTA terdiri dari komponen utama yaitu setpoint controller, aktuator yang berfungsi untuk meneruskan pengaturan mekanik dan proses pengaturan turbin yang ditunjukkan dalam gambar 1.



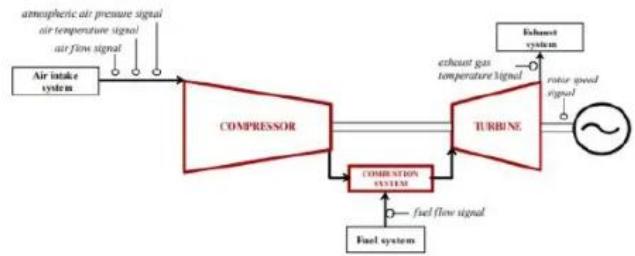
Gambar 1. Skema Pengaturan Governor PLTA

PLTU menggunakan uap superheated untuk menggerakkan turbin. Sesuai IEEE Std 122-1991, governor mengontrol katup uap utama (steam valve) untuk menyesuaikan aliran uap ke turbin pada PLTU. Respons PLTU dalam mode Free Governor cenderung lebih lambat dibandingkan PLTA karena proses termodinamis (pemanasan dan pendinginan) dan membutuhkan waktu lebih lama untuk penyesuaian parameter parameter [8], skema pengaturan governor di PLTU dijelaskan di dalam gambar 2.



Gambar 2. Skema Pengaturan Governor PLTU

PLTG merupakan rakitan komponen kompleks yang berbeda seperti kompresor, turbin, ruang bakar, dll yang dirancang berdasarkan kajian termodinamika. Aliran bahan bakar dan udara menentukan output daya turbin gas. skema pengaturan governor di PLTG dijelaskan di dalam gambar 3.



Gambar 3. Skema Pengaturan Governor PLTG

III. METODE

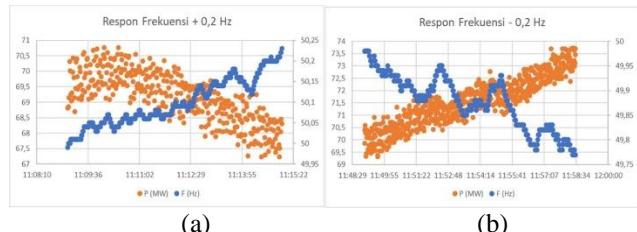
Metode yang digunakan dalam menganalisis data adalah penelitian kuantitatif dengan metode hipotesis hasil pengujian. Penelitian ini memanfaatkan analisis regresi linier pada data yang diperoleh dari pengukuran langsung menggunakan instrumen yang tersedia pada 3 tipe sampel pembangkit (PLTU, PLTG dan PLTA) untuk memvalidasi nilai setting speed droop apakah sudah sesuai unjuk kerja aktual. Pengukuran dilakukan dalam dua tahap, yaitu respons governor saat frekuensi naik (>50 Hz) dan respons governor saat frekuensi turun (<50 Hz). Semua pengaturan frekuensi saat pengujian dilakukan oleh Dispatcher selaku pusat pengelola sistem. Data yang direkam kemudian diolah dengan pendekatan kuantitatif untuk mengukur variabel secara objektif, menguji hipotesis, dan mencari hubungan atau pola dalam data.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

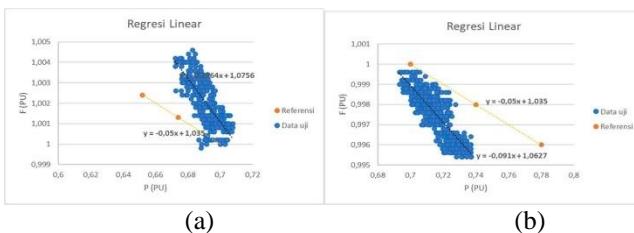
Terdapat 2 parameter utama yang diolah dari data rekaman pengukuran respons free governor pembangkit, yaitu frekuensi (Hz) dan daya (MW). Kemudian data akan dikonversi ke satuan per unit (pu) sebelum dilakukan analisis regresi linier. Output dari analisis regresi linier adalah diperoleh persamaan linier yang medeskripsikan karakteristik dari tipe masing-masing sampel pembangkit yang diuji.

- PLTU Teluk Balikpapan



Gambar. 4. Respons free governor PLTU Teluk Balikpapan (a) frekuensi 0.2 Hz naik; (b) frekuensi 0.2 Hz turun

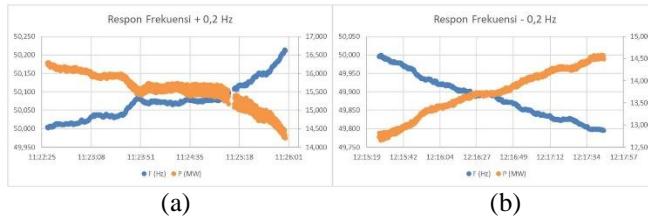
Pengujian dimulai pada frekuensi nominal 50 Hz kemudian frekuensi dinaikkan sebesar 0,2 Hz pembangkit merespons dengan menurunkan daya dengan range 2,46 - 3,53 MW sehingga daya keluaran generator berubah dari 70,76 MW menjadi 68,30 - 67,23 MW. Pada pengujian frekuensi turun pengujian dimulai pada freq 50 Hz kemudian diturunkan sebesar 0,2 Hz pembangkit merespons dengan menaikkan daya dengan range 2,78 - 4,36 MW sehingga daya keluaran generator berubah dari 69,34 MW menjadi 72,12 - 73,70 MW.



Gambar. 5. Plot Regresi Linier PLTU Teluk Balikpapan (a) pengujian frekuensi naik; (b) pengujian frekuensi turun

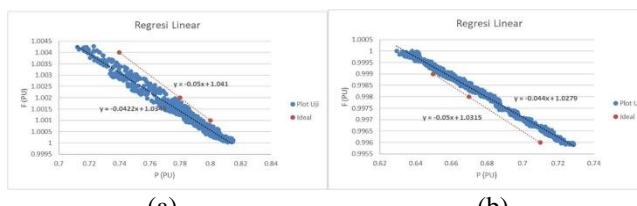
Hasil analisis regresi linear menghasilkan persamaan linier $y = 0,1064x + 1,0756$ untuk pengujian frekuensi naik dan $y = 0,091x + 1,0627$ untuk pengujian frekuensi turun. Dimana pada pengujian frekuensi naik menunjukkan droop governor sebesar 10,64 % untuk kenaikan frekuensi dari 50 Hz sampai 50,2 Hz. Sedangkan untuk pengujian frekuensi turun droop governor sebesar 9,10 % untuk untuk penurunan frekuensi dari 50 Hz sampai 49,8 Hz.

• PLTG Teluk Sambera



Gambar. 6. Respons free governor PLTG Sambera (a) frekuensi 0,2 Hz naik; (b) frekuensi 0,2 Hz turun

Pengujian dimulai pada frekuensi nominal 50 Hz kemudian frekuensi dinaikkan sebesar 0,2 Hz pembangkit merespons dengan menurunkan daya dengan range 1,83 - 2,04 MW sehingga daya keluaran generator berubah dari 16,286 MW menjadi 14.458 - 14.246 MW. Pada pengujian frekuensi turun pengujian dimulai pada freq 50 Hz kemudian diturunkan sebesar 0.2 Hz pembangkit merespons dengan menaikkan daya dengan range 1.748 - 1.918 MW sehingga daya keluaran generator berubah dari 12.66 MW menjadi 14.408 - 14.575 MW.

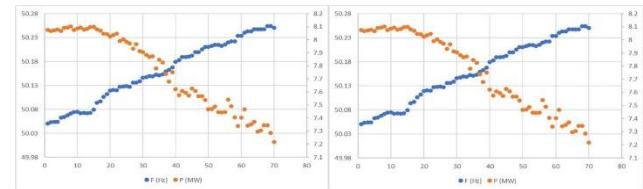


Gambar. 7. Plot Regresi Linier PLTG Sambera (a) pengujian frekuensi naik; (b) pengujian frekuensi turun

Hasil analisis regresi linear menghasilkan persamaan linier $y = 0,0422x + 1,0343$ untuk pengujian frekuensi naik dan $y = 0,044x + 1,0279$ untuk pengujian frekuensi turun. Dimana pada pengujian frekuensi naik menunjukkan droop governor sebesar 4,2 % untuk kenaikan frekuensi dari 50 Hz sampai 50,2 Hz. Sedangkan untuk pengujian frekuensi turun droop governor sebesar 4,4 %

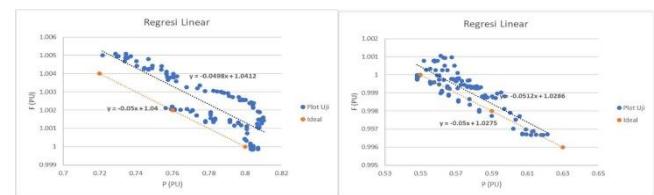
untuk untuk penurunan frekuensi dari 50 Hz sampai 49,8 Hz.

• PLTA PM Noor



Gambar. 8. Respons free governor PLTA PM Noor (a) frekuensi 0,2 Hz naik; (b) frekuensi 0,2 Hz turun

Pengujian dimulai pada frekuensi nominal 50 Hz kemudian frekuensi dinaikkan sebesar 0,2 Hz pembangkit merespons dengan menurunkan daya dengan range 0.77 - 0.85 MW sehingga daya keluaran generator berubah dari 8.07 MW menjadi 7.3 - 7.22 MW. Pada pengujian frekuensi turun pengujian dimulai pada freq 50 Hz kemudian diturunkan sebesar 0.2 Hz pembangkit merespons dengan menaikkan daya dengan range 0.5 - 0.69 MW sehingga daya keluaran generator berubah dari 5.52 MW menjadi 6.02 - 6.21 MW.



Gambar. 7. Plot Regresi Linier PLTA PM Noor (a) pengujian frekuensi naik; (b) pengujian frekuensi turun

Hasil analisis regresi linear menghasilkan persamaan linier $y = 0,0498x + 1,0412$ untuk pengujian frekuensi naik dan $y = 0,0512x + 1,0286$ untuk pengujian frekuensi turun. Dimana pada pengujian frekuensi naik menunjukkan droop governor sebesar 4,98 % untuk kenaikan frekuensi dari 50 Hz sampai 50,2 Hz. Sedangkan untuk pengujian frekuensi turun droop governor sebesar 5,12 % untuk untuk penurunan frekuensi dari 50 Hz sampai 49,8 Hz.

4.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil pengukuran dapat dilihat bahwa respons governor tiap tipe pembangkit berbeda terhadap perubahan daya yang terjadi pada sistem interkoneksi Kalimantan. Respons governor pada PLTU Teluk Balikpapan lebih lambat dibandingkan kedua tipe pembangkit yang lain. Hal ini disebabkan oleh inersia termal yang tinggi dari sistem uap, sehingga membutuhkan waktu lebih lama untuk menyesuaikan kecepatan turbin terhadap perubahan beban. Sehingga respons governor yang lambat membuat PLTU kurang ideal untuk menangani perubahan daya yang cepat, namun sangat stabil untuk operasi jangka panjang dan beban dasar.

Sedangkan untuk respons governor pada PLTG Sambera sangat cepat. Karena turbin gas memiliki massa termal yang lebih rendah dibandingkan turbin uap

sehingga perubahan aliran bahan bakar dapat dengan cepat mempengaruhi kecepatan turbin yang dapat menghasilkan daya atau mengurangi daya dengan waktu yang cepat. Dikarenakan memiliki fleksibilitas yang tinggi dalam respons governor terhadap perubahan daya yang terjadi pada sistem interkoneksi Kalimantan menjadikan PLTG sangat cocok untuk menangani beban puncak dan fluktuasi mendadak dalam sistem tenaga listrik.

Untuk respon governor pada PLTA PM Noor lebih cepat dibandingkan PLTU Teluk Balikpapan dan PLTG Sambera. Dikarenakan PLTA memanfaatkan responsivitas air sebagai penggerak dan sistem pengaturannya yang lebih mekanis dan langsung. Tidak seperti pembangkit termal yang memerlukan pembakaran bahan bakar untuk memanaskan air menjadi uap, turbin air dapat merespons perubahan kebutuhan daya dengan mengubah jumlah aliran air secara langsung. Sehingga PLTA dapat menjadi salah satu pilihan untuk membantu stabilitas frekuensi dalam sistem tenaga listrik.

V. KESIMPULAN

Dari hasil analisis regresi linier didapatkan bahwa respons governor tiap tipe pembangkit yang digunakan untuk keandalan sistem interkoneksi Kalimantan sudah tervalidasi mendekati setting parameter speed droop sebesar 5% yang terpasang di tiap tipe pembangkit tersebut kecuali PLTU sebesar 9,1% dan 10,64%. PLTA PM Noor memiliki respons governor yang lebih cepat dibandingkan tipe pembangkit yang lain. PLTU Teluk Balikpapan merupakan pembangkit yang memiliki kapasitas terbesar sehingga saat terjadi perubahan daya maka PLTU Teluk Balikpapan mensuplai daya lebih besar dibandingkan pembangkit lainnya namun memiliki respon

governor yang cenderung lebih lambat. Dengan demikian masing-masing jenis pembangkit tersebut memiliki peranan tersendiri dalam menjaga kestabilan sistem. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar evaluasi dan peningkatan koordinasi Free Governor guna mendukung keandalan dan kestabilan operasi sistem tenaga Listrik Kalimantan.

REFERENSI

- [1] Permen ESDM, "Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code)," 2020
- [2] Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. McGraw-Hill.
- [3] IEEE Power & Energy Society. (2005). Hydropower Plant Governor Modeling. IEEE.
- [4] Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). Thermodynamics: An Engineering Approach.
- [5] McGraw-Hill. Chandorkar, M. C., Divan, D. M., & Adapa, R. (1999). Control of distributed generation systems with voltage regulation.
- [6] Wood, A. J., Wollenberg, B. F., & Sheble, G. B. (2013). Power Generation, Operation, and Control.
- [7] Divya, K. C., & Rao, P. S. N. (2006). Models for wind turbine generating systems and their application in load flow studies. Electric Power Systems Research, 76(9-10), 844-856.
- [8] Jones, D. A. (2000). Thermal Power Plants: Control and Optimization. Wiley-IEEE Press.
- [9] Tan, X., Li, Q., & Wang, H. (2013). Advances and trends of energy storage technology in renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, 43-48.
- [10] Gonzalez-Longatt, F. M. (2014). PowerFactory Applications for Power System Analysis. Springer.
- [11] IRENA. (2020). Hydropower: Status and Trends. International Renewable Energy Agency.