

Studi Analisis Kestabilan Transien Akibat Penambahan Kapasitas Pembangkit dengan metode *Time Domain Simulation* pada Masterplan Sistem Kelistrikan Kalimantan 500kV

¹Dewi Anugrah Rizqi, ²Margo Pujiantara, ³Imam Robandi

¹ Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

² Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

³ Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

¹dewiarizqi@gmail.com, ²margo@ee.its.ac.id, ³robandi@ee.its.ac.id

Abstrak-- Peningkatan nilai rasio elektrifikasi merupakan salah satu indikator kemajuan suatu negara. Indonesia merupakan salah satu negara berkembang yang setiap tahun mengalami peningkatan pemanfaatan energi listrik di setiap daerahnya. Untuk dapat memenuhi kebutuhan beban yang semakin meningkat di Indonesia, khususnya pada daerah Kalimantan dibangun suatu sistem penyokong (*backbone*) saluran transmisi 500kV yang terinterkoneksi, agar dapat menyalurkan daya secara optimal akibat penambahan kapasitas pembangkitan. Karena adanya penambahan kapasitas pembangkit, sistem akan ditinjau ulang dengan menggunakan *software* untuk mendapatkan parameter kestabilan dan rancangan sistem kelistrikan yang efisien. Simulasi gangguan transien dilakukan dengan menerapkan kasus generator *outage*, lepasnya satu saluran *double circuit* dan hubung singkat pada busbar sistem kelistrikan Kalimantan tahun 2023-2050. Hasil respon dari sudut rotor, frekuensi, dan tegangan pada titik gangguan menunjukkan sistem masih dalam kondisi stabil dikarenakan daya pembangkitan yang hilang hanya berkisar 1-4% dari daya total pembangkitan, sehingga belum diperlukan skema pelepasan beban (*load shedding*) karena sistem masih mampu memenuhi kebutuhan permintaan beban.

Kata Kunci: Kestabilan transien, *load shedding*.

Abstract--- Increasing the value of electrification ratio is one indicator of the progress of a country. Indonesia is one of the developing countries which has increased the utilization of electric energy in each region annually. To meet the continuous increasing demand in Indonesia, especially in Kalimantan area, a 500kV interconnected transmission line backbone system is built, in order to optimally discharge power due to additional generation capacity. Due to the addition of generating capacity, the system will be reviewed simulation software to obtain stable stability parameters and efficient power system design. The transient disturbance simulation is done by applying the case of outage generator, the loss of a double circuit channel and a short circuit on the Kalimantan electrical busbar system of 2023-2050. Response results from the rotor angle, frequency, and voltage at the point of disturbance indicate the system is still in a stable condition because the lost generation power is only about 1-4% of the

total power generation, so load shedding scheme is not required because the system is still able to meet needs load demand.

Keywords: Transient Stability, Load Shedding.

I. Pendahuluan

Hubungan antara konsumsi energi dengan pertumbuhan ekonomi pada negara-negara telah banyak didiskusikan karena memiliki arah kausalitas yang signifikan dalam perancangan dan implementasi kebijakan ketenagalistrikan [1]. Semakin meningkat kemajuan dari suatu negara maka akan meningkatkan pemanfaatan tenaga listrik, proyeksi kebutuhan tenaga listrik disusun untuk memperkirakan energi listrik yang diperlukan untuk mendukung pertumbuhan ekonomi dan pertumbuhan penduduk [2]. Indonesia merupakan salah satu negara berkembang yang mempunyai peraturan seperti pada PP No 79 tahun 2014 energi sebagai modal pembangunan, sehingga diharapkan dari peraturan tersebut dapat mewujudkan kemandirian energi dan mengoptimalkan pemanfaatan energi. Pemanfaatan energi dilakukan untuk meningkatkan rasio elektrifikasi pada suatu negara. Meningkatkan nilai rasio elektrifikasi dilakukan dengan cara pengembangan kapasitas pembangkitan dan kapasitas transmisi pada sistem kelistrikan. Pengembangan kapasitas pembangkit direncanakan untuk memenuhi kebutuhan listrik dan margin cadangan, sedangkan pengembangan kapasitas transmisi direncanakan untuk memperoleh keseimbangan antara kapasitas pembangkitan dan kebutuhan daya listrik.

Pengembangan kapasitas pembangkitan dan kapasitas transmisi pada sistem kelistrikan membutuhkan rekonfigurasi dan analisis ulang terhadap keseluruhan sistem, seperti analisis aliran daya dan kestabilan sistem [3]. Analisis aliran daya digunakan sebagai konsep dasar analisa pada sistem tenaga listrik untuk menentukan parameter dasar dalam permasalahan sistem [4]. Salah satu permasalahan penting pada pengoperasian dan pengontrolan

sistem tenaga listrik adalah kestabilan [5]. Kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu sistem untuk beroperasi seimbang dalam keadaan normal dan dapat kembali beroperasi seimbang setelah terjadi gangguan [6]. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kestabilan pada sistem tenaga listrik yaitu kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi dan kestabilan tegangan [7]. Permasalahan ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik dapat terjadi karena adanya lepasnya generator dari sistem dan hubung singkat pada saluran ataupun busbar, jika tidak dapat diatasi dalam rentang waktu singkat dapat mengakibatkan kegagalan pada sistem akibat dari gangguan transien [8]. Pelepasan beban atau *load shedding* merupakan salah satu metode untuk mempertahankan kestabilan sistem. Apabila terjadi gangguan seperti lepasnya generator pada sistem yang menyebabkan suplai daya yang dihasilkan pembangkit tidak mencukupi kebutuhan beban, maka untuk menjaga agar sistem tetap stabil dan tidak terjadi *black out* diperlukan adanya pelepasan beban [9].

Pemodelan dan analisis sistem menggunakan *software* yang didesain untuk menganalisis aliran daya dengan menghitung tegangan bus, faktor daya, arus dan aliran daya pada sistem kelistrikan yang digunakan sebagai parameter dalam menganalisa respon dinamik dan batas kestabilan pada sistem sebelum, saat dan sesudah terjadi gangguan [10]. Metode yang digunakan untuk menganalisa pemodelan simulasi adalah simulasi domain waktu (*time domain simulation*, TDS). TDS merupakan metode yang paling akurat dan dapat diandalkan untuk memecahkan masalah kestabilan transien [11]. Analisis domain waktu menggunakan nilai perpindahan sudut dari rotor mesin sinkron yang dipelajari untuk menentukan kondisi stabilitas [12].

Pada tugas akhir ini membahas tentang pemodelan sistem kelistrikan Kalimantan. Sistem kelistrikan Kalimantan terbagi menjadi tiga area besar yaitu: Area 1 (Kalimantan Barat), Area 2 (Kalimantan Selatan dan Tengah) dan Area 3 (Kalimantan Timur dan Utara). Ketiga area pada daerah Kalimantan berdiri sendiri pada level tegangan 150 kV dan belum terinterkoneksi satu sama lain. Untuk itu direncanakan pengembangan sistem *backbone* pada transmisi sistem kelistrikan Kalimantan. Sistem *backbone* merupakan sistem transmisi yang terinterkoneksi dengan sistem pembangkitan utama dan beban utama pada level tegangan tinggi [6]. Sistem ini menghubungkan ketiga area wilayah kerja pada sistem kelistrikan Kalimantan dengan menginterkoneksi menggunakan jalur interkoneksi selatan. *Backbone* jalur selatan, akan menginterkoneksi beberapa kota besar seperti: Seiraya (Kalimantan Barat), Ketapang (Kalimantan Barat), Sampit (Kalimantan Tengah), Palangkaraya (Kalimantan Tengah), Cempaka (Kalimantan Selatan), Balikpapan (Kalimantan Timur), Samarinda (Kalimantan Timur), Bontang (Kalimantan Timur), dan Tanjung Redeb (Kalimantan Utara). *Backbone* ini berfungsi

menyeimbangkan kapasitas pembangkitan dengan kebutuhan daya listrik secara efisien baik dari segi keandalan maupun kualitas yang dihasilkan, serta dapat menyokong kekurangan saluran transmisi 275kV yang terbatas dalam menyalurkan kapasitas daya optimal. Maka dirancang suatu sistem penyokong pada sistem kelistrikan yang berupa saluran transmisi tegangan ekstra tinggi 500kV (*backbone*).

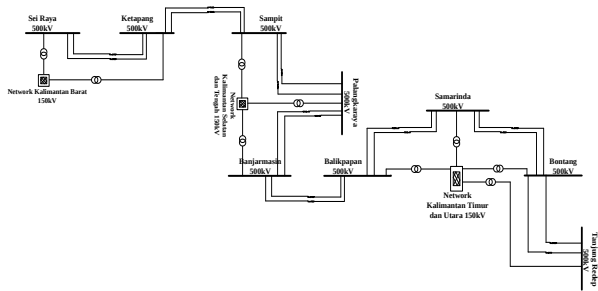
Sistem yang terinterkoneksi dalam satu jaring harus dijaga kestabilan sistemnya seperti: kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan. Namun, semakin kompleks suatu sistem maka akan semakin sulit untuk menjaga stabilitasnya. Permasalahan pada sistem tenaga listrik seperti ketidakstabilan itu yang dihindarkan, karna untuk jangka waktu tertentu kesalahan masih dapat ditolerir tetapi tidak untuk permasalahan jangka panjang karena dapat mengakibatkan kegagalan pada sistem seperti: pemadaman (*black out*) dan hilangnya sinkronisasi pada generator akibat adanya daya balik (*reserve power*) karena sistem tidak mampu menampung aliran daya sehingga keseimbangan pada sistem terganggu. Untuk itu diperlukan suatu sistem yang mampu menjaga stabilitas ketika terjadi gangguan transien seperti hubung singkat, generator lepas, dan pelepasan beban.

Oleh karena itu, dengan adanya pengembangan *backbone* sistem kelistrikan dibutuhkan suatu peninjauan ulang analisis sistem tenaga listrik untuk menentukan kestabilan sistem apabila diberikan penambahan kapasitas dari masing-masing pembangkitan serta penjadwalan pelepasan beban. Untuk itu penulis membuat tugas akhir dengan judul Studi Analisis Kestabilan Transien Akibat Penambahan Kapasitas Pembangkit dengan metode *Time Domain Simulation* pada *Masterplan* Sistem Kelistrikan Kalimantan 500kV Tahun 2023-2050.

II. *Masterplan* Sistem Kelistrikan Kalimantan 2023-2050

Pada bab ini akan dibahas mengenai *masterplan* sistem kelistrikan Kalimantan. Kelistrikan Kalimantan terdiri dari 3 area besar yaitu area Kalimantan Barat, area Kalimantan Tengah dan Selatan, dan area Kalimantan Timur dan utara. Ketiga area ini berdiri masing-masing dengan menggunakan sistem transmisi 150kV. Berikut Gambar 2.1 merupakan *backbone* sistem kelistrikan Kalimantan 500 kV.

Untuk meningkatkan kualitas sistem kelistrikan di daerah Kalimantan dibangun suatu sistem penyokong (*backbone*) saluran transmisi 500kV dengan harapan sistem dapat lebih stabil dan dapat menyalurkan daya maksimum beban. Berikut dipaparkan data pembangkitan pada Tabel 2.1 dan data pembebanan pada Tabel 2.2 sistem kelistrikan Kalimantan tahun 2023-2050.



Gambar 2.1 Backbone Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV

Tabel 2.1 Data Kapasitas Pembangkitan 2023-2050

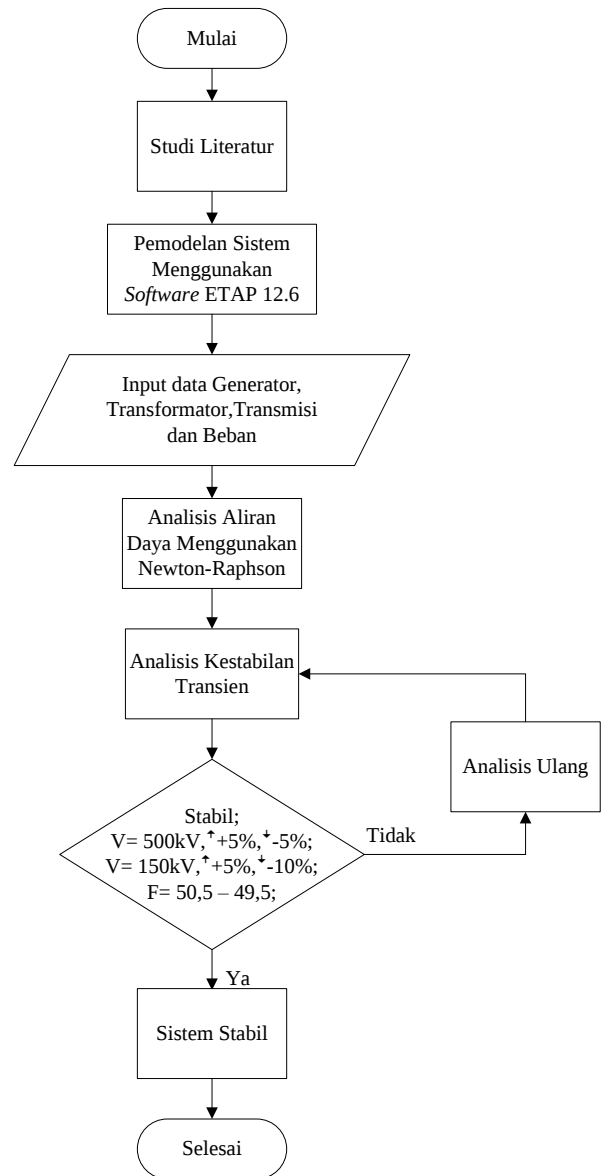
Tahun	Total Kapasitas Pembangkitan(MW)
2023	2778,346
2026	3592,701
2029	4432,688
2032	5495,59
2035	6545,92
2040	8669,415
2045	11286,275
2050	14464,975

Tabel 2.2 Data Kapasitas Pembebanan 2023-2050

Tahun	Total Kapasitas Pembebanan (MW)	Rating Power Factor
2023	2714,423	85
2026	3502,752	85
2029	4315,386	85
2032	5363,594	85
2035	6397,216	85
2040	8492,394	85
2045	11048,722	85
2050	14267,676	85

2.1 Metodologi Simulasi

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2 Metodologi Simulasi

III. Hasil Simulasi Dan Analisa

Analisa kestabilan dapat dilakukan setelah dilakukan pemodelan sistem kelistrikan kedalam bentuk *single line diagram* menggunakan *software* ETAP 12.6. Simulasi kestabilan transien yang dilakukan meliputi gangguan generator lepas, hubung singkat dan lepasnya satu saluran. Pemodelan gangguan ini bertujuan untuk dapat menentukan tindakan ketika terjadi gangguan pada sistem agar kestabilan sistem tetap terjaga. Analisa kestabilan ini dilihat dari respon sudut rotor, respon frekuensi dan respon tegangan pada beberapa titik generator dan bus yang telah ditentukan. Pada simulasi ini studi kasus gangguan terjadi pada detik

ke-2 dengan *Total Simulation Time* menggunakan waktu 20s. Studi kasus kestabilan transien pada kasus ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Studi Kasus Kestabilan Transien

Tahun	Kasus	Keterangan
2023	1 Generator Outage	Generator PLTU Kalbar 11 outage dari sistem
	2 Generator Outage	Generator PLTU Kaltim 4-1-1 dan PLTU Kaltim 4-2-1 outage dari sistem
	Short Circuit 3 fasa	Gangguan Short Circuit 3 fasa pada bus Sei Raya
2026	1 Generator Outage	Generator PLTGU Kalsel 1 outage dari sistem
	Line Trip	Trip satu saluran pada line 17 dari double circuit
2029	2 Generator Outage	Generator PLTU Kalbar 11 dan PLTU Kalbar 12 outage dari sistem
	Line Trip	Trip satu saluran pada line 58 dari double circuit
2032	2 Generator Outage	Generator PLTU TBPP 1 dan PLTU TBPP 2 outage dari sistem
	Short Circuit 3 fasa	Gangguan Short Circuit 3 fasa pada bus Palangkaraya
2035	2 Generator Outage	Generator LNG Kalsel 12 dan MPP Kalsel 1-2 outage dari sistem
	Short Circuit 3 fasa	Gangguan Short Circuit 3 fasa pada bus Banjarmasin
2040	1 Generator Outage	Generator PLTU 400MW-1 outage dari sistem
	2 Generator Outage	Generator LNG Kalsel 3-1 dan LNG Kalsel 5-1 outage dari sistem
	Short Circuit 3 fasa	Gangguan Short Circuit 3 fasa pada bus Balikpapan
2045	2 Generator Outage	Generator LNG Kaltimra 3 dan LNG Kaltimra 16 outage dari sistem
	Short Circuit 3 fasa	Gangguan Short Circuit 3 fasa pada bus Samarinda
2050	2 Generator Outage	Generator PLTU Kaltim 4-1 dan PLTG Kaltimpeaker 2-1-1 outage dari sistem
	1 Generator Outage	Generator LNG Kalteng 3 outage

		dari sistem
	Line Trip	Trip satu saluran pada line 100 dari double circuit

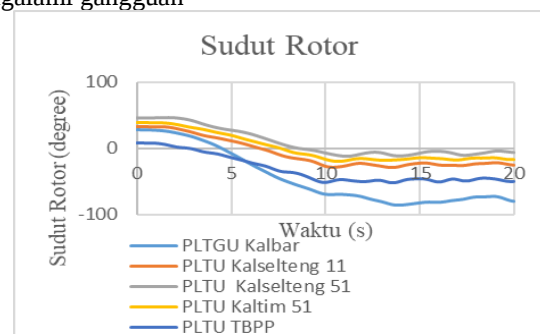
Terdapat beberapa parameter yang diamati dalam analisa kestabilan transien antara lain:

- Sudut rotor generator saat dan setelah terjadi gangguan
- Frekuensi Bus saat dan setelah terjadi gangguan
- Tegangan bus saat dan setelah terjadi gangguan

3.1.1 Studi kasus 1 Generator Outage PLTU Kalbar 11 dan PLTU Kalbar 12

Pada tahun 2029 total daya yang dibangkitkan 4432,688 MW dengan daya pembebanan total 4315,386 MW. Pada kasus ini sistem akan kehilangan daya sebesar 200 MW ketika PLTU Kalbar 11 dan Kalbar 12 off, sehingga sistem akan kehilangan daya 3,6% dari daya yang dibangkitkan. Berikut hasil simulasi respon sudut rotor pada Gambar 3.1, respon frekuensi pada Gambar 3.2 dan respon tegangan pada Gambar 3.3.

Daya pembangkitan pada generator PLTU Kalbar 11 dan Kalbar 12 off akan kehilangan daya sebesar 200MW, sehingga akan mempengaruhi nilai sudut rotor generator lain pada sistem. Dapat dilihat pada Gambar 3.1, nilai sudut rotor pada PLTGU Kalbar, PLTU Kalselteng 11, PLTU Kaltim 51 dan PLTU TBPP 2 berdasarkan hasil simulasi dapat dikatakan bahwa sistem dapat kembali stabil setelah mengalami gangguan



Gambar 3.1 Respon Sudut Rotor Generator

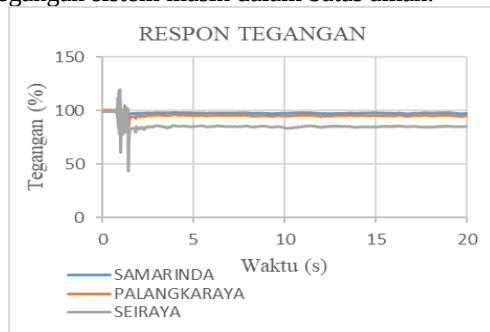
Outage PLTU Kalsel 11 dan PLTU Kaltim 4-2-1-1

Dapat dilihat pada Gambar 3.2 bahwa sistem mengalami penurunan nilai frekuensi. Penurunan nilai disebabkan oleh berkurangnya suplai daya secara mendadak akibat PLTU Kalbar 11 dan Kalbar 12 off, sehingga generator yang lain mengalami perlambatan putaran. Perlambatan putaran ini yang akan mempengaruhi penurunan nilai frekuensi. Pada saat gangguan $t=2s$, frekuensi sistem menurun menjadi 49,97 Hz dan kembali stabil pada 49,85 Hz. Nilai dapat kembali stabil dikarenakan sistem masih memiliki cadangan daya yang besar. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 nilai frekuensi masih dalam batas aman.



Gambar 3.2 Respon Frekuensi Generator Outage PLTU Kalsel 11 dan PLTU Kaltim 4-2-1-1

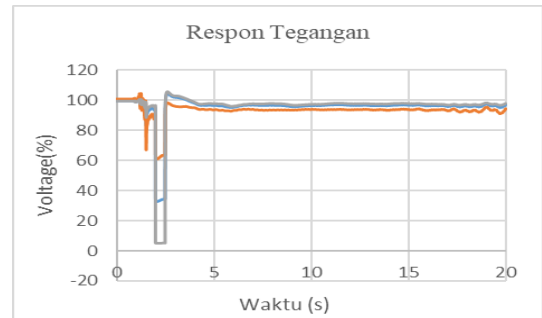
Dapat dilihat pada Gambar 3.3, sistem mengalami fluktuasi tegangan selama beberapa saat serta mengalami *voltage sag* hingga 50% dalam kurun waktu 0,2s sebelum kembali stabil. Penurunan nilai tegangan ini karena berkurangnya suplai daya reaktif dari PLTU Kalbar 11 dan Kalbar 12 *off*. Berdasarkan standar PLN dan IEEE 1195-1995 tegangan sistem masih dalam batas aman.



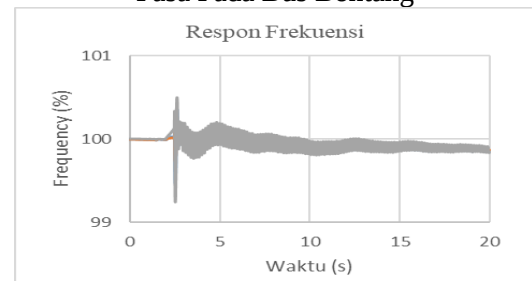
Gambar 3.3 Respon Tegangan Generator Outage PLTU Kalsel 11 dan PLTU Kaltim 4-2-1-1

3.1.2 Studi kasus Hubung Singkat 3 Fasa Pada Bus Bontang

Pada Gambar 3.4 dapat dilihat respon tegangan dan Gambar 3.5 respon frekuensi ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus *backbone* Bontang. Dapat dilihat selama 0,5s sistem mengalami penurunan nilai tegangan yang sangat drastis saat sebelum gangguan dihilangkan. Setelah gangguan dihilangkan pada $t=2,5s$ respon tegangan sistem dapat kembali stabil walaupun mengalami sedikit osilasi. Nilai tegangan setelah gangguan akan lebih rendah daripada tegangan normal. Namun berdasarkan standar PLN, penurunan nilai tegangan masih dalam batas toleransi yang diizinkan. Respon frekuensi pada saat terjadi gangguan, mengalami penurunan sebesar 49,995 Hz dan mengalami sedikit osilasi perubahan nilai hingga $t=20s$ nilai masih beresilasi dengan nilai berkisar 49,9Hz – 50,1 Hz. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 nilai frekuensi masih dalam batas aman dan sistem dapat dikatakan satbil



Gambarr 3.4 Respon Tegangan Hubung Singkat 3 Fasa Pada Bus Bontang



Gambar 3.5 Respon Frekuensi Hubung Singkat 3 Fasa Pada Bus Bontang

iv. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisis yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Diperoleh performa dinamis, optimal dan efisien dari rancangan dan pengoperasian sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2023-2050 dengan menggunakan *backbone* 500 kV berdasar hasil simulasi.
2. Diperoleh pengoperasian sistem tenaga listrik yang stabil pada kelistrikan Kalimantan tahun 2023-2050 berdasarkan studi kasus kestabilan transien generator *outage*, sudut rotor yang mengalami osilasi terbesar pada LNG Kaltimra 3 dan LNG Kaltimra 16 *off* dengan nilai sudut rotor dari 29,06 *degree* menjadi 32,17 *degree* pada saat gangguan dan terus beresilasi tetapi tidak sampai 180°.
2. Studi kasus hubung singkat lepasnya satu saluran pada *line double circuit* pada *Backbone* 500kV, sistem tidak mengalami banyak perubahan pada respon tegangan dan respon frekuensi hanya mengalami osilasi yang relatif kecil, sehingga hasil menunjukkan sistem mempertahankan kestabilannya.
3. Studi kasus gangguan hubung singkat bus *Backbone*, pada busbar yang mengalami gangguan respon tegangan akan *drop* menjadi 0 V dan pada bus yang lain akan mengalami *drop* tegangan 30-60%. Respon frekuensi hanya mengalami sedikit osilasi. Sehingga, dari hasil respon sistem dapat kembali stabil.

4. Belum diperlukan penjadwalan pelepasan beban (*load shedding*) dikarenakan daya pembangkitan yang hilang pada sistem hanya 1-4% dari total pembangkitan, sehingga pada sistem masih mampu memenuhi kebutuhan ketika mengalami gangguan.

- [15] IEEE, “*Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*”, 1995. IEEE Std 1159-1995.

Daftar Pustaka

- [1] Chen. Sheng-Tung, Kuo. Hsiao-I, Chen. Chi-Chung, “The Relationship between GDP and Electricity Consumption in 10 Asian Countries”, *Energy Policy* 35 (2007) 2611-2621.
- [2] Payne. E. J., “A Survey of the Electricity Consumption-Growth Literature”, *Applied Energy* 87 (2010) 723-731.
- [3] D. T. Kumara, P. Ir, O. Penangsang, D. Ph, and N. I. Ketut, “Analysis of Transient Stability in North Sumatra Transmission System 150 kV-275 kV Increment Generation,” vol. 5, no. 2, 2016.
- [4] Tantowi. I, “Transient Stability Constrain of Optimal Power Flow Studies Interconnecting System 150 kV Barito-Pulau Baru South Kalimantan 2021”, vol.5, no. 2, 2017.
- [5] Tamura. Y, Mori. H, Iwamoto. S, “Relationship Between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solutions In Electric Power System”, Vol. PAS-102, No. 5, May.
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Companies Inc, 1994.
- [7] P. Kundur *et al.*, “Definition and classification of power system stability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [8] Gan. Deqiang, Thomas. J. R., Zimmerman. D.R., “Stability Constrained Optimal Power Flow”. IEEE Transaction on Power System, vol.15, no. 2, May 2000.
- [9] Zhang. Z, Yang. H, etc., “A Load Shedding Model Based on Sensitivity Analysis in on-Line Power System Operation Risk Assessment”, MDPI, March 2018.
- [10] Zadkhast. S, Jatskevich. J, Vaahedi. E, “A Multi- Decomposition Approach for Accelerated Time Domain Simulation of Transient Stability Problems”, IEEE Transaction on Power System, vol. 30, no. 5, September 2015.
- [11] IEEE Std 399-1997, “IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis”, 1997.
- [12] W. D. Stevenson and J. and J. J. Grenger, *Elements of Power System Analysis, 4th Edition*. McGraw-Hill Companies Ins, 1994.
- [13] Marsudi, Djiteng, “Operasi Sistem Tenaga Listrik”, Yogyakarta : Graha Ilmu, 2006.
- [14] IEEE, “*Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*”, 1987. IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987).