

PENINGKATAN KESTABILAN SISTEM ENERGI BEBAS PLTB MELALUI *CRITICAL CLEARING TIME* YANG TERHUBUNG *SMART GRID*

Fitriani^{1*}, Risal Mantofani², Muhdalifah Muhtar³

^{1,2)} Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Dewantara, Kota Palopo, Sulawesi Selatan, Indonesia

³⁾ Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan, Indonesia

Email: fitrianielektro3@gmail.com*, risalmantofani@atidewantara.ac.id, muhdalifahmuhtar@poliupg.ac.id

Info Artikel

Histori Artikel:

Diterima Sep 12, 2024

Direvisi Okt 09, 2024

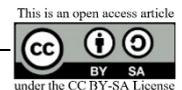
Disetujui Okt 13, 2024



ABSTRACT

Wind Power Plants (PLTB) are a vital renewable energy source in the global transition towards clean energy. PLTB holds great potential for reducing reliance on fossil fuels and enhancing the stability of power systems. However, unpredictable wind power fluctuations can challenge system stability. To address this, smart systems like the Smart grid are needed. The Smart grid is an evolution of traditional power systems equipped with dynamic optimization techniques to improve real-time efficiency, reliability, and sustainability. Additionally, transient stability analysis is crucial for maintaining system stability during disturbances. One method used is the Critical Clearing Time (CCT) calculation, which determines the critical disconnection time from the onset of the disturbance until synchronization is lost. This study uses transient analysis simulations on the Sungguminasa – Maros power system, utilizing the Power System Analysis Toolbox (PSAT) under MATLAB. By integrating PLTB with the Smart grid, it is expected that better coordination between power system components can be achieved, enhancing not only the system's reliability and stability but also optimizing overall energy efficiency.

Keywords: Stability; Renewable Energy; Wind Power; Smart grid; CCT



ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan sumber energi terbarukan yang penting dalam transisi global menuju energi bersih. PLTB memiliki potensi besar untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan kestabilan sistem tenaga listrik. Namun, fluktuasi daya angin yang tidak terduga dapat mengganggu stabilitas sistem. Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan sistem cerdas seperti Smart grid, yaitu evolusi sistem tenaga listrik tradisional yang dilengkapi dengan teknik optimasi dinamis guna meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan secara real-time. Selain itu, analisis kestabilan transien juga penting untuk menjaga kestabilan sistem saat terjadi gangguan. Salah satu metode yang digunakan adalah perhitungan Critical Clearing Time (CCT), yang menghitung waktu pemutusan kritis dari awal gangguan hingga hilangnya sinkronisasi. Penelitian ini menggunakan simulasi analisis transien pada sistem tenaga listrik wilayah Sungguminasa – Maros dengan Software Power System Analysis Toolbox (PSAT) di bawah MATLAB. Dengan mengintegrasikan PLTB ke dalam Smart grid, diharapkan tercipta koordinasi yang lebih baik antara komponen sistem tenaga listrik, yang tidak hanya meningkatkan keandalan dan kestabilan sistem, tetapi juga mengoptimalkan efisiensi penggunaan energi secara keseluruhan.

Kata Kunci: Stabilitas; Energi Terbarukan; PLTB; Smart grid; CCT

Penulis Korespondensi:

Fitriani,

Program Studi Teknik Elektronika,

Politeknik Dewantara, Kota Palopo, Sulawesi Selatan,

JL. KH. Ahmad Razak 2, No.7 Kelurahan Binturu.

fitrianielektro3@gmail.com



1. PENDAHULUAN

Seiring perkembangan kemajuan teknologi dan pembangunan, kebutuhan energi listrik akan terus meningkat. Maka pembangkit harus selalu memenuhi daya yang dibutuhkan oleh konsumen. Namun, saat ini dunia lagi mengalami masalah krisis energi. Itu disebabkan karena energi yang berasal dari energi fosil jumlahnya semakin terbatas. Sedangkan kebutuhan akan energi terus meningkat dan cadangan terus menurun. Untuk mengatasi masalah ini, pengembangan energi terbarukan merupakan pilihan yang tepat [1][2].

Salah satu energi terbarukan yang saat ini digunakan yakni Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) [3][4]. Namun, pengintegrasian PLTB membawa tantangan tersendiri terutama terkait dengan kestabilan sistem energi. Salah satu tantangan utama yang dihadapi adalah kestabilan sistem energi yang terkait dengan PLTB yakni variabilitas dan fluktuasi daya yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan, seperti angin yang tidak selalu stabil dan dapat mempengaruhi kestabilan sistem secara keseluruhan [5][6].

Suatu sistem tenaga listrik terinterkoneksi melalui jaringan transmisi yang tidak dapat menghindari gangguan yang menyebabkan ketidakstabilan sistem. Gangguan besar yang sering ditemukan pada sistem tenaga listrik yakni seperti putus saluran transmisi maupun lepasnya pembangkit dan beban yang besar sehingga menimbulkan gangguan kestabilan khususnya gangguan kestabilan transien. Untuk menjaga sistem daya agar tetap beroperasi terus menerus dan stabil, diperlukan pengaturan kestabilan yang baik dengan mempertimbangkan beberapa parameter kestabilan sistem tenaga, diantaranya kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi, dan kestabilan sudut rotor [7][8][9].

Kestabilan transien disebabkan oleh gangguan besar misalnya hubung singkat yang harus diperhatikan dalam suatu sistem tenaga. *Critical Clearing Time* (CCT) digunakan untuk memberikan batas kestabilan transien ketika terjadi gangguan. Saat terjadi gangguan, maka CCT akan membedakan kondisi sistem stabil dan tidak stabil. CCT sangat penting diperhatikan untuk menghindari pemadaman sistem karena gangguan dapat mengakibatkan berubahnya sudut rotor pada generator hingga hilangnya sinkronisme pada mesin. Dalam konteks PLTB, optimalisasi CCT dapat menjadi strategi yang efektif untuk mengatasi fluktuasi daya angin dan menjaga kelancaran operasional sistem [10][11][12].

Smart grid adalah sistem jaringan tenaga listrik yang mengintegrasikan teknologi informasi dan komunikasi (ICT) untuk memonitor dan kendali

sistem tenaga listrik secara otomatis dan komprehensif. Teknologi *Smart grid* dapat didesain mampu mendeteksi dan mengisolasi gangguan, mengantisipasi sebelum terjadi gangguan skala besar sehingga akan meminimalkan dampak yang terjadi [13][14].

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini akan membahas tentang peningkatan kestabilan sistem tenaga listrik PLTB wilayah Sungguminasa–Maros dengan mengoptimalkan CCT yang terhubung dengan *smart grid*. Dengan tujuan mengoptimalkan manfaat energi terbarukan PLTB dan memastikan bahwa adanya integrasi PLTB dengan *Smart grid* ini tidak hanya memenuhi kebutuhan energi, meningkatkan kontrol dan manajemen energi secara *real-time*, tetapi juga memperkuat kestabilan sistem tenaga listrik secara keseluruhan dan dapat mengembangkan sistem energi yang efisien, andal, dan berkelanjutan di masa depan.

2. METODE PENELITIAN

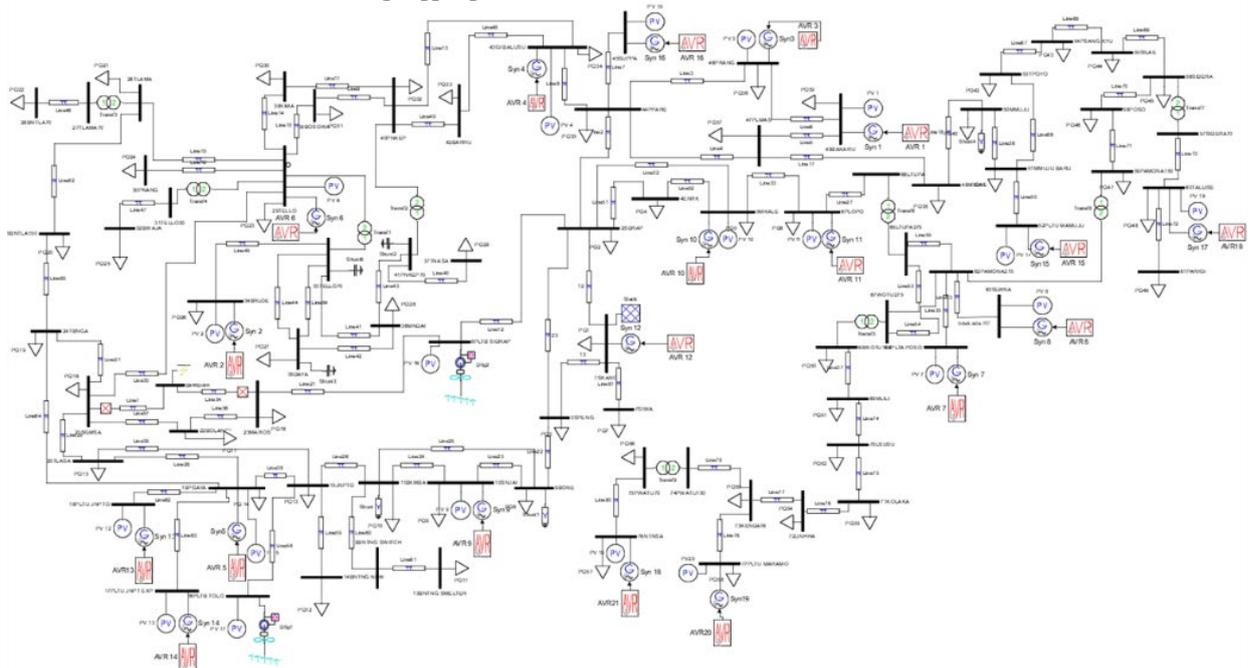
2.1 Sistem Transmisi Sulselrabar

Sistem kelistrikan yang digunakan sebagai kasus yang diuji dalam penelitian ini adalah sistem transmisi Sulselrabar yang terdiri dari pembangkit, gardu induk, dan saluran-saluran transmisi. Namun, pada penelitian kali ini akan memfokuskan pada saluran transmisi yang ada pada wilayah Sungguminasa-Maros. Dalam penelitian ini, pemodelan single line diagram akan disimulasikan menggunakan software PSAT MATLAB. Pada Gambar 1 merupakan *single line* diagram sistem kelistrikan Sulselrabar.

Pengumpulan data dilakukan dengan studi literatur yang mana dilakukan pendalaman pemahaman mengenai segala informasi yang berhubungan dengan permasalahan yang berkaitan pada penelitian ini. Pada tahap ini juga dilakukan pengambilan data sistem tenaga listrik wilayah Sungguminasa–Maros pada kantor PT. PLN UP2B Sistem Makassar. Adapun data yang diambil merupakan data yang berkaitan dengan penelitian ini adalah *single line* diagram, data impedans saluran transmisi, data pembangkit dan pembebanan sistem Sulselrabar. Diagram alur penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada penelitian ini, tahapan yang dilakukan adalah mengintegrasikan *toolbox* PSAT pada *software* MATLAB, memodelkan sistem interkoneksi Sulselrabar saat terintegrasi PLTB dan saat terjadi gangguan, penginputan data (transmisi, beban, data generator pada sistem yang telah dimodelkan), memilih lokasi dan menentukan *setting* gangguan, analisis *power flow*, analisis time domain untuk melihat respons kecepatan sudut rotor, analisis

grafik untuk melihat respons sudut rotor saat terjadi osilasi, dan mencatat nilai CCT [15][16].



Gambar 1 Single Line Diagram Sulselrabar

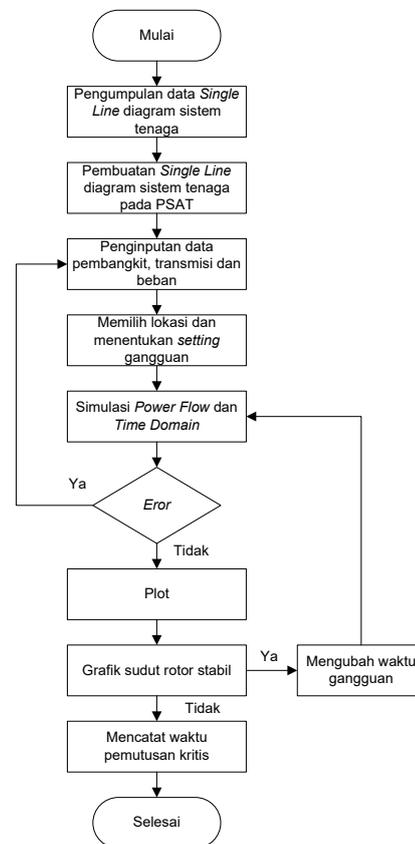
Dalam kasus penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan besaran momen inersia dari setiap pembangkit terdapat beberapa skenario yang dilakukan untuk mengetahui stabilitas sistem Sulselrabar terkait dengan penetrasi PLTB yaitu mengetahui nilai rata-rata momen inertiya pada pembangkit, sebelum melakukan penjadwalan ulang. Dengan mengubah penjadwalan dari pembangkit yang memiliki momen inertiya besar maka, suplai daya reaktif terpengaruh, hal ini berakibat pada stabilitas sistem bila mengalami gangguan sehingga mengalami osilasi. Setiap pembangkit listrik akan menghasilkan tenaga sesuai dengan nilai momen inersia-nya. Untuk menjelaskan nilai daya masing-masing generator dapat dilihat pada persamaan berikut [17]:

$$P_{Generator} = \frac{H_{Generator}}{Total H_{Generator}} \times P_{Total} \quad (1)$$

2.2 Kestabilan Transient

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan keadaan stabil pada sistem jika terjadi gangguan. Gangguan transien adalah gangguan besar yang sering terjadi secara tiba-tiba. Stabilitas Transien terjadi apabila Pengatur Tegangan Otomatis (AVR) dan Pengatur Frekuensi (Regulator) tidak beroperasi. Sistem dianggap stabil jika terdapat keseimbangan antara keluaran mekanis penggerak mula dan keluaran listrik yang didistribusikan ke beban. Jika kondisi sistem yang tidak stabil tidak segera dipulihkan,

maka percepatan dan perlambatan putaran motor akan menyebabkan sistem kehilangan sinkronisasi. Kelebihan daya pada sistem menambah beban pada generator sehingga menyebabkan rotor generator melambat [18][19].



Gambar 2 Diagram Alur Simulasi Penelitian

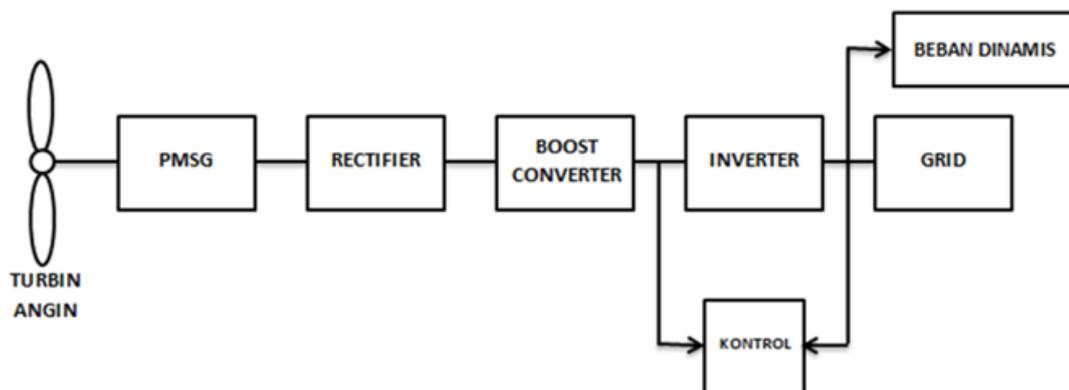
2.3 Critical Clearing Time

Critical Clearing Time (CCT) adalah parameter penting dalam sistem tenaga listrik yang mengacu pada durasi maksimum yang diperbolehkan selama gangguan terjadi sebelum sistem mengalami ketidakstabilan. CCT mendefinisikan waktu kritis dimana sebuah gangguan harus diatasi agar sistem dapat kembali ke keadaan stabil. Waktu ini sangat penting karena jika pemutusan gangguan berlangsung lebih lama dari CCT, maka sistem dapat kehilangan sinkronisme, yang dapat menyebabkan pemadaman yang lebih luas atau kerusakan pada komponen sistem tenaga listrik. Ketika gangguan terjadi, baik itu gangguan besar seperti hubung singkat pada saluran transmisi atau gangguan kecil seperti fluktuasi tegangan, area yang mengalami gangguan harus segera diisolasi dari sistem utama. Proses isolasi ini dilakukan melalui pemutusan saluran oleh *Circuit Breaker (CB)*. CB berfungsi untuk memutuskan hubungan antara komponen yang terganggu dengan jaringan yang masih sehat, baik itu melalui pemutusan saluran transmisi yang terganggu atau pelepasan generator dari sistem.

Pemutusan oleh CB harus dilakukan dalam waktu yang lebih cepat dari CCT. Ini memastikan bahwa sistem dapat kembali ke kondisi stabil tanpa mengalami osilasi sudut rotor yang dapat memperburuk keadaan. Jika waktu pemutusan lebih lama dari CCT, sistem berisiko memasuki kondisi tidak stabil, di mana sudut rotor pada generator dapat beresilasi dengan amplitudo yang semakin besar hingga akhirnya terjadi kehilangan sinkronisme [20][21].

2.4 Smart grid

Smart grid adalah konsep modernisasi jaringan listrik. Melalui penambahan teknologi *smart grid* pada jaringan menjadi lebih fleksibel, interaktif dan mampu memberikan umpan balik secara *real time*. Ini adalah jaringan listrik cerdas yang dapat mengintegrasikan tindakan dari semua pengguna yang terhubung pada pembangkit, konsumen dan para pelaku baik dalam rangka penyediaan yang berkelanjutan secara efisien, ekonomis dan pasokan listrik yang aman. Berikut pemodelan sistem tenaga listrik PLTB yang terhubung dengan *smart grid*.



Gambar 3 Pemodelan *Smart grid*

Pengaplikasian *smart grid* memiliki komponen utama yakni smart meter yang memungkinkan komunikasi dua arah antara utilitas dan pelanggan atau *Distributed Generation (DG)*, teknologi informasi yang memungkinkan pengendalian optimal seluruh jaringan bahkan ketika sejumlah besar DG terintegrasi sebagai sistem manajemen energi untuk membantu pelanggan memanfaatkan energi listrik mereka seefisien mungkin, sistem kontrol dan perlindungan canggih meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem tenaga kecil dan besar [22][23][24].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

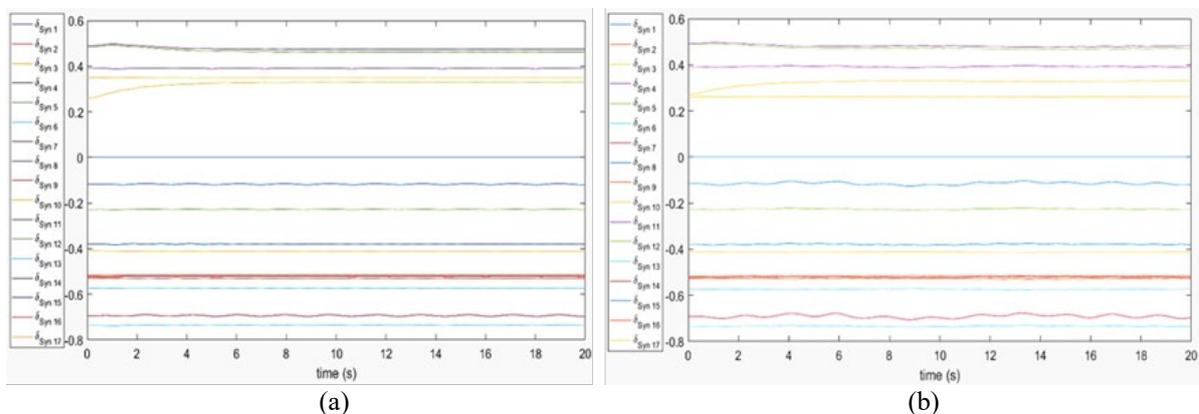
Pada simulasi ini dilakukan analisis kestabilan pada sistem uji Sulselrabar. Setelah menggambarkan pemodelan sistem sulselrabar dalam bentuk single

line diagram pada PSAT 2.1.10 maka selanjutnya akan dilakukan simulasi stabilitas meliputi beberapa kasus seperti simulasi kestabilan sudut rotor saat kondisi normal, saat kondisi PLTB terintegrasi, dan saat terjadi gangguan pembangkit berdasarkan momen inersia. Untuk melihat nilai sudut rotor sistem sulselrabar sebelum dan setelah integrasi PLTB ditunjukkan pada [Gambar 4\(a\)](#).

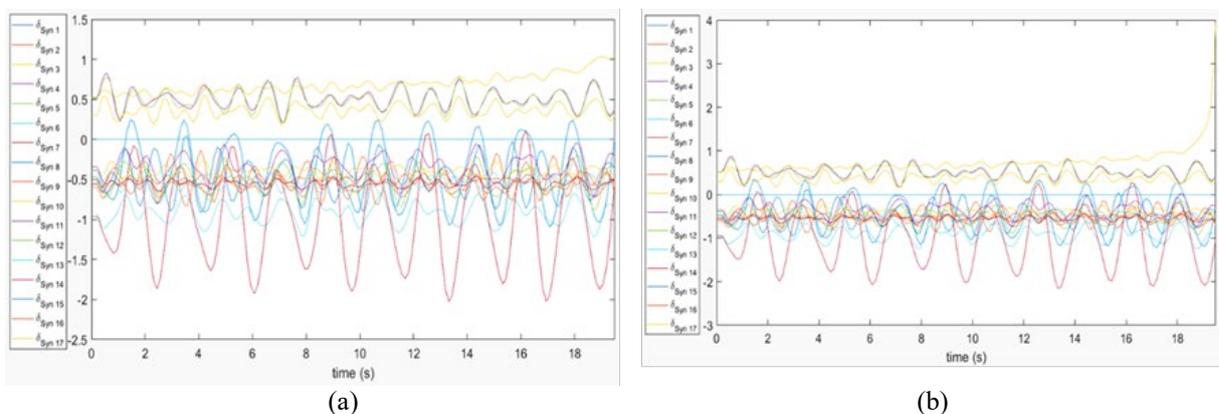
Kestabilan sudut rotor saat kondisi normal belum didapatkan nilai *Critical Clearing Time (CCT)*, ini dikarenakan pada saat ini belum terdapat gangguan hubung singkat tiga fasa. Nilai CCT ini merupakan nilai titik kritis dalam satuan second yang menjadi penentu suatu sistem tenaga listrik masih dalam keadaan stabil atau tidak. Sehingga pada kondisi normal, grafik sudut rotor masih stabil (belum ada

pembangkit yang lepas sinkron). Nilai sudut rotor ketika salah satu PLTB belum terintegrasi pada system masih berada pada range $-0,339$ radian atau $-19,423$ degree, hingga $0,159$ radian atau $9,110$ degree, dimana range ini masih berada pada kondisi stabil. Sedangkan pada Gambar 4(b) pada saat PLTB terintegrasi, nilai sudut rotor berbeda dengan kondisi normal, tetapi nilai sudut rotor masih dalam keadaan sinkron atau stabil. Nilai sudut rotor ketika PLTB terintegrasi pada sistem masih berada pada range $-0,331$ radian atau $-18,964$ degree, hingga $0,167$ radian atau $9,568$ degree. Jika nilai momen inersia-nya kecil, maka nilai sudut rotor-nya akan semakin besar akan membuat pembangkit ini tahan

terhadap gangguan karena osilasi sudut rotor-nya tidak akan menyimpang terlalu jauh, sehingga ketika terjadi gangguan pembangkit ini dapat bertahan. Semakin besar nilai momen inersia, maka nilai sudut rotor-nya pun juga akan semakin kecil. Sedangkan untuk pembangkit yang tidak memiliki daya aktif, maka nilai sudut rotor-nya bisa di katakan lebih besar jika dibandingkan dengan pembangkit yang memiliki daya aktif. Sehingga meskipun pembangkit ini memiliki momen inersia yang besar, tetapi sudah tidak menyuplai daya aktif ke sistem, maka pembangkit ini memiliki sudut rotor yang besar dan rentan akan mengalami lepas sinkron.



Gambar 4 Grafik Sudut Rotor (a) Kondisi Normal (b) Kondisi terintegrasi PLTB



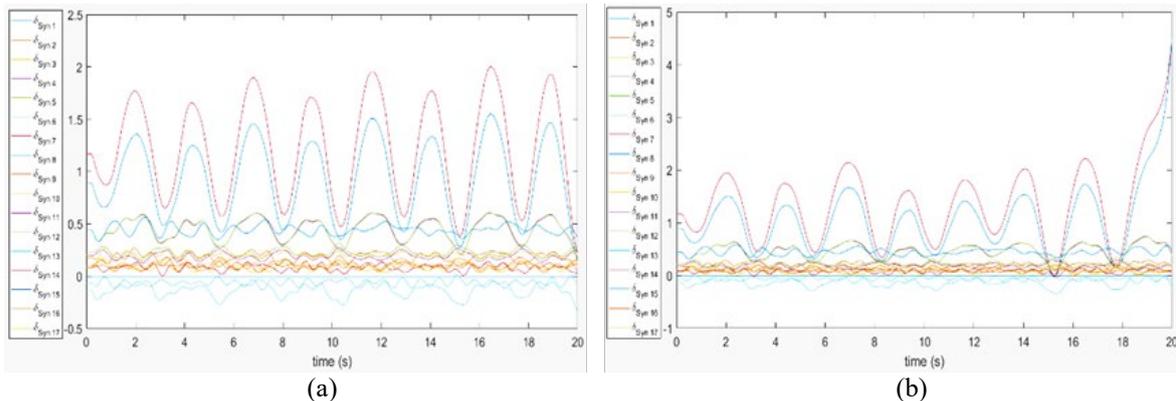
Gambar 5 Grafik sudut rotor ketika ada gangguan (a) Kondisi sinkron (b) Kondisi lepas sinkron

Gambar 5(a) merupakan grafik sudut rotor saluran transmisi Sungguminasa-Maros pada saat PLTB terintegrasi dengan lama gangguan 0.08 detik maka sistem pun kembali stabil. Sistem dikatakan masih stabil karena tidak ada pembangkit yang kehilangan sinkronisasi selama gangguan hingga mencapai waktu kritis pemutusan. Terlihat bahwa pembangkit pada syn 3 hampir menuju ke kondisi tidak stabil. Kemudian pada Gambar 5(b) waktu gangguan ditambahkan lagi sampai 0.081 detik, terlihat pada pembangkit syn 3, sudut rotor menjadi tidak stabil

(generator tidak sinkron lagi) dan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) selama 0.28 detik. Untuk mendapatkan nilai CCT, penulis mengubah-ubah waktu lama gangguan dengan memperhatikan grafik sudut rotor pada aplikasi PSAT 2.1.10. Pada gangguan ini (Gambar 5(b)), terlihat bahwa semakin lama waktu gangguan terjadi, maka grafik akan memperlihatkan respons sudut rotor yang akan semakin menuju ke kondisi tidak stabil. Rotor dari generator akan mengalami osilasi yang kemudian dapat dilihat apakah rotor tersebut mengalami

percepatan (jika nilai sudut rotor-nya positif) dan mengalami perlambatan (jika nilai sudut rotor-nya negatif) setelah ada gangguan. Jika tidak terjadi gangguan rotor generator tidak akan beresilasi, maka kecepatan dari putaran rotor generator tidak akan mengalami perlambatan atau percepatan (stabil). Hal ini ditunjukkan dengan hasil simulasi yang menunjukkan respons sudut rotor dalam batasan toleransi yaitu tidak melampaui 90° ataupun -90° . Untuk meningkatkan kestabilan sistem dalam penelitian ini, maka dilakukan penjadwalan ulang

pembangkit berdasarkan nilai momen inersia generator. Dengan penjadwalan ulang ini, kita dapat membandingkan nilai Critical Clearing Time (CCT) sebelum dan setelah penjadwalan. Cara ini bertujuan untuk menentukan apakah terjadi peningkatan CCT. Jika nilai CCT meningkat setelah penjadwalan ulang, berarti sistem menjadi lebih tahan terhadap gangguan dibandingkan sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa metode penjadwalan berdasarkan nilai indeks H berhasil menjadikan nilai CCT lebih stabil.



Gambar 6 Grafik sudut rotor ketika ada gangguan setelah penjadwalan ulang

Pada Gambar 6(a) terlihat bahwa sudut rotor kembali ke keadaan stabil setelah melakukan penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan momen inersia dengan lama gangguan yang sama seperti kondisi sebelumnya pada Gambar 5, yaitu 0.08 detik. Selain melihat perbandingan grafik sudut rotor antara Gambar 5 dan Gambar 6 dengan waktu gangguan yang sama, pada kondisi ini juga akan dicari nilai CCT. Waktu nilai CCT yang dipilih adalah waktu saat gangguan diputuskan tidak mempengaruhi kestabilan sistem atau tidak ada salah satu generator yang hilang kesinkronan nya. Pada Gambar 6(b) terlihat bahwa pada saat terjadi gangguan pada Sungguminasa-Maros sudut rotor menjadi tidak stabil dengan lama gangguan sebesar 0.096 detik dan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) selama 0.295 detik. Artinya setelah melakukan penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan momen inersia, pada saat terjadi gangguan dari sistem mempunyai waktu yang lebih lama sebelum memutuskan untuk melepas gangguan dibandingkan sebelum melakukan penjadwalan ulang pembangkit. Ini menunjukkan bahwa kestabilan sistem kelistrikan Sulselrabar setelah melakukan penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan momen inersia menjadi semakin kuat.

3.2 Pembahasan Hasil Penelitian

Smart grid memberikan solusi terhadap tantangan utama yaitu variabilitas dan fluktuasi daya yang dihasilkan oleh angin. Fluktuasi daya ini dapat

mempengaruhi kestabilan sistem secara keseluruhan, terutama dalam kondisi gangguan seperti hubung singkat atau pemutusan saluran transmisi. Dengan memanfaatkan *smart grid*, sistem tenaga listrik dapat mendeteksi dan mengisolasi gangguan sebelum berkembang menjadi masalah yang lebih besar, sehingga meminimalkan dampak terhadap kestabilan sistem.

Selain itu, *smart grid* memungkinkan integrasi yang lebih baik antara PLTB dan sistem tenaga listrik utama, dengan cara mengoptimalkan distribusi beban dan penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan kondisi aktual jaringan. Teknologi ini juga memungkinkan pemanfaatan energi terbarukan yang lebih efisien dan aman, dengan cara mengatur suplai dan permintaan daya secara dinamis.

Dalam penelitian yang dilakukan, penggunaan *smart grid* dalam pengelolaan *Critical Clearing Time* (CCT) terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas transien sistem tenaga listrik, khususnya pada wilayah Sungguminasa-Maros. *Smart grid* memungkinkan penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan momen inersia yang berujung pada peningkatan nilai CCT, sehingga sistem lebih tahan terhadap gangguan dan osilasi sudut rotor generator dapat dikendalikan dengan lebih baik.

Melalui teknologi *smart grid*, kestabilan sistem energi dapat lebih diandalkan, terutama dalam menghadapi tantangan integrasi energi terbarukan seperti PLTB. Ini juga membuka jalan menuju

pengembangan sistem energi yang lebih efisien, handal, dan berkelanjutan di masa depan.

4. KESIMPULAN

Nilai CCT pada saluran transmisi Sungguminasa-Maros sebelum penjadwalan ulang 0.28 dan setelah penjadwalan ulang nilai CCT mengalami peningkatan menjadi 0.295, ini menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode penjadwalan berdasarkan nilai indeks H didapatkan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) menjadi lebih stabil, sehingga sistem lebih tahan terhadap gangguan. Ini berarti bahwa metode yang diusulkan dapat meningkatkan stabilitas transien sistem. Nilai indeks H dapat menjadi solusi untuk meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Sakurai, H. Funato, and S. Ogasawara, "Fundamental Characteristics of Test Facility for Micro Hydroelectric Power Generation System.," doi: [10.1109/ICEMS.2009.5382836](https://doi.org/10.1109/ICEMS.2009.5382836)
- [2] M. Reza, "A Survey on the Transient Stability of Power Systems with Converter Connected Distributed Generation," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 8–12, 2007, doi: [10.9744/jte.7.1.8-12](https://doi.org/10.9744/jte.7.1.8-12).
- [3] F. Safari and I. Dincer, "Assessment and optimization of an integrated wind power system for hydrogen and methane production," *Energy Convers Manag*, vol. 177, no. September, pp. 693–703, 2018, doi: [10.1016/j.enconman.2018.09.071](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.071).
- [4] R. K. Tagayi, S. Han, H. Lee, and J. Kim, "Reliable Frequency Control Support Scheme Based on Wind Power Generator Combined with Rechargeable Energy Storage System Applying Adaptive Power Reference," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 9, 2023, doi: [10.3390/app13095302](https://doi.org/10.3390/app13095302).
- [5] M. Tuegeh, A. Soeprijanto, and M. P. Hery, "Optimal Generator Scheduling Based On Particle Swarm optimization," *SemnasIF 2009*, vol. 2009, no. semnasIF, pp. A25–A32, 2009, Available: <http://jurnal.upnyk.ac.id>
- [6] Z. Wu, X. Zhao, and D. Fan, "Research on the Influence of Traction Load on Transient Stability of Power Grid Based on Parameter Identification," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 22, 2023, doi: [10.3390/en16227553](https://doi.org/10.3390/en16227553).
- [7] Z. Huang, L. Bao, and W. Xu, "A method to measure QV curves and its applications in power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 147–154, 2007, doi: [10.1016/j.ijepes.2006.06.003](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.06.003).
- [8] I. C. Gunadin, Z. Muslimin, and A. Siswanto, "Transient stability improvement using allocation power generation methods based on moment inertia," *Proceedings - 2017 International Conference on Electrical Engineering and Informatics: Advancing Knowledge, Research, and Technology for Humanity, ICELTICS 2017*, vol. 2018-Janua, no. ICELTICS, pp. 147–152, 2017, doi: [10.1109/ICELTICS.2017.8253281](https://doi.org/10.1109/ICELTICS.2017.8253281).
- [9] D. Sreenivasulu Reddy and C. H. Siva Kumari, "Transient stability analysis of a combined cycle power plant using etap software," *Proceedings - 7th IEEE International Advanced Computing Conference, IACC 2017*, pp. 510–515, 2017, doi: [10.1109/IACC.2017.0111](https://doi.org/10.1109/IACC.2017.0111).
- [10] I. B. Sulistiawati, M. Abdillah, and A. Soeprijanto, "Neural network based transient stability model to analyze the security of Java-Bali 500 kV power system," *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, ICEEI 2011*, no. April 2014, 2011, doi: [10.1109/ICEEI.2011.6021694](https://doi.org/10.1109/ICEEI.2011.6021694)
- [11] Y. Al Mashhadany, A. K. Abbas, and S. Algburi, "Study and Analysis of Power System Stability Based on FACT Controller System," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 317–332, 2022, doi: [10.52549/ijeei.v10i2.3630](https://doi.org/10.52549/ijeei.v10i2.3630).
- [12] I. C. Gunadin, A. Soeprijanto, and O. Penangsang, "Steady state stability assessment using extreme learning machine based on modal analysis," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 4532–4537, 2012, Available: <https://www.academia.edu>
- [13] A. H. Raditya, M. Pujiantara, and I. Robandi, "Penentuan *Critical Clearing Time* Untuk Analisis Kestabilan Transien Sistem Kelistrikan Kalimantan 275kV," *SinarFe7*, pp. 256–261, 2018, [Online]. Available: <https://journal.fortei7.org>
- [14] S. B. A. Kashem, M. E. H. Chowdhury, A. Khandakar, J. Ahmed, A. Ashraf, and N. Shabrin, "Wind power integration with smart grid and storage system: Prospects and limitations," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 5, pp. 552–569, 2020, doi: [10.14569/IJACSA.2020.0110570](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110570).
- [15] E. Syahputra, Z. Pelawi, and A. Hasibuan, "Analisis Stabilitas Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Berbasis Matlab," *Sisfo: Jurnal*

- Ilmiah Sistem Informasi*, vol. 2, no. 2, pp. 29–48, 2018, doi: [10.29103/sisfo.v2i2.1010](https://doi.org/10.29103/sisfo.v2i2.1010).
- [16] A. Nuncio *et al.*, “Analisis Kestabilan Tegangan Akibat Integrasi Pembangkit PLTB 1 MW Pada Sistem Kelistrikan Jaringan Distribusi 20 Kv,” vol. 8, pp. 425–432, 2024, Available: <https://www.ejournal.itn.ac.id>
- [17] Fitriani, I. C. Gunadin, A. Suyuti, and A. Siswanto, “Dynamic stability improvement with integrated power plant scheduling method based on moment of inertia,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 926, no. 1, 2021, doi: [10.1088/1755-1315/926/1/012030](https://doi.org/10.1088/1755-1315/926/1/012030).
- [18] J. A. Pongtiku, M. Tuegeh, and Ir. H. Tumaliang, “Analisa Stabilitas Transien Untuk Menentukan Waktu Pemutusan Kritis (*Critical Clearing Time*) Pada Jaringan Transmisi 70 Kv Plta Tanggari Ii-Gi Sawangan Dengan Menggunakan Program Matlab,” *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 3, no. 2, pp. 53–58, 2014, Available: <https://ejournal.unsrat.ac.id>
- [19] S. I. Cahya, D. W. I., & Haryudo, “Analisis Kestabilan Transient Dan Pelepasan Beban Saat Terjadi Gangguan Pada Pembangkit Di Ptpn X (Persero) Pg. Ngadiredjo Kediri,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 113–120, 2018, Available: <https://core.ac.uk>
- [20] R. P. Eviningsih, A. Priyadi, and Soedibjo, “Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) Berbasis Trajectory Kritis Menggunakan Persamaan Simultan pada Sistem yang Terhubung dengan *Smart grid*,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 4, no. 2, 2015, [Online]. Available: <http://www.ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/9506>
- [21] N. L. Bijang, “Analisa Waktu Pemutusan Kritis Suatu Sistem Kelistrikan,” *Jurnal Ilmiah Sains*, vol. 12, no. 2, p. 153, 2013, doi:[10.35799/jis.12.2.2012.741](https://doi.org/10.35799/jis.12.2.2012.741).
- [22] L. F. Viera Valencia and D. Garcia Giraldo, *Smart grid. Fundamental Of Design And Analysis*, vol. 2. 2019
- [23] Thomas and Mcdonald (2015), *Power_system_SCADA*, Available: <https://books.google.com>
- [24] M. J. B. Kabeyi and O. A. Olanrewaju, “*Smart grid* technologies and application in the sustainable energy transition: a review,” *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 685–758, 2023, doi: [10.1080/14786451.2023.2222298](https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298).