

Analisis Kestabilan Transien Sistem Kelistrikan Kalimantan dengan *Backbone* Sistem Transmisi 500 kV HVDC Menggunakan *Time Domain Simulation*

Angga Prasetya, Ontoseno Penangsang, Imam Robandi

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
aangga.prasetya@gmail.com, ontosenop@ee.its.ac.id, robandi@ee.its.ac.id

Abstrak—Analisis kestabilan transien adalah sebuah studi yang diperlukan saat melakukan perencanaan pembangunan atau pengembangan sistem kelistrikan. Kestabilan transien adalah kemampuan suatu sistem untuk mempertahankan sinkronisasinya saat terkena gangguan transien, yang salah satunya adalah gangguan hubung singkat. Sesuai dengan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL), untuk meningkatkan rasio elektrifikasi di Indonesia, maka dilakukan pengembangan sistem kelistrikan untuk meningkatkan penyediaan tenaga listrik. Pulau Kalimantan memiliki sistem kelistrikan yang belum terinterkoneksi, sehingga dilakukan perencanaan pembangunan sistem transmisi 500 kV HVAC untuk melakukan interkoneksi sistem kelistrikan, serta memanfaatkan teknologi sistem transmisi 500 kV HVDC. Pada penelitian ini dilakukan analisis kestabilan transien pada sistem kelistrikan Kalimantan dengan *backbone* sistem transmisi 500 kV HVAC dan 500 kV HVDC menggunakan *time domain simulation* dengan kasus *3-phase short circuit* pada sistem transmisi HVAC dan *single phase to ground fault* pada sistem transmisi HVDC. Hasil dari simulasi yang dilakukan, frekuensi terbesar yang didapatkan yaitu 102.87% dan frekuensi terendah yaitu 95%, keduanya masih dalam batas toleransi. Hasil menunjukkan bahwa sistem kelistrikan Kalimantan dengan *backbone* 500 kV yang telah dimodelkan mampu mempertahankan kondisi sinkronnya ketika terjadi gangguan pada kasus yang diberikan.

Kata Kunci—HVAC, HVDC, Kestabilan, Short Circuit, Time Domain Simulation, Transien, Transmisi

Abstract—Transient stability analysis is a necessary study when undertaking development planning or development of electrical systems. Transient stability is the ability of a system to maintain its synchronization when exposed to transient disturbances, one of which is short circuit interference. In accordance with the Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL), to increase the electrification ratio in Indonesia, is development of electrical system to increase electricity supply. The island of

Kalimantan has an interconnected electrical system, so it is planned to build a 500 kV HVAC transmission system to interconnect the electrical system, and utilize the 500 kV HVDC transmission system technology. In this research, transient stability analysis in Kalimantan's electrical system with backbone of 500 kV HVAC and 500 kV HVDC transmission system using time domain simulation with 3-phase short circuit case in HVAC transmission system and single phase to ground fault on HVDC transmission system. The results of the simulation performed, the largest frequency obtained is 102.87% and the lowest frequency is 95%, both are still within the limits of tolerance. The results show that Kalimantan's electrical system with a 500 kV backbone that has been modeled is able to maintain its synchronous conditions when an interruption occurs in the given case.

1. Pendahuluan (Font 14)

INDONESIA merupakan negara kepulauan yang memiliki lima pulau besar serta beribu-ribu pulau kecil lainnya yang tersebar di sekitarnya. Indonesia juga merupakan negara paling banyak penduduknya keempat di dunia, dan hal itu berbanding lurus dengan tingginya kebutuhan energi di Indonesia, khususnya kebutuhan energi listrik. Sementara itu, pulau Kalimantan yang merupakan pulau dengan kependudukan terbanyak ketiga di Indonesia, memiliki kebutuhan energi yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan pulau dengan penduduk terbanyak di Indonesia yaitu pulau Jawa.

Dengan adanya sumber energi yang melimpah, pulau Kalimantan mampu memenuhi kebutuhan energi listrik penduduk pulau Kalimantan itu sendiri. Tetapi, sistem kelistrikan di pulau Kalimantan saat ini masih belum terinterkoneksi satu sama lain, dengan adanya Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL)[1], peningkatan rasio elektrifikasi nasional dilakukan salah

satunya yaitu dengan menginterkoneksi sistem kelistrikan Kalimantan.

Saat ini, Indonesia terus berusaha mengembangkan teknologi dalam bidang kelistrikan. Bidang kelistrikan merupakan salah satu bidang yang sangat penting dalam memajukan suatu bangsa, baik dalam segi sistem kelistrikan, pembangkitan tenaga listrik, maupun penyaluran tenaga listrik. Kemajuan teknologi dalam bidang penyaluran tenaga listrik salah satunya yaitu sistem transmisi tegangan tinggi arus searah, atau yang biasa disebut transmisi *HVDC*. Saat ini, sistem transmisi yang sangat umum dan biasa digunakan di berbagai negara yaitu sistem transmisi arus bolak-balik, memiliki beberapa kekurangan seperti terdapatnya *power loss* sedangkan transmisi *HVDC* mampu meminimalkan kekurangan tersebut.

Sebelum melakukan pembangunan sistem transmisi interkoneksi di Kalimantan, perlu dilakukan beberapa studi analisis agar sistem transmisi yang akan dibangun nantinya dapat berjalan secara maksimal. Salah satu studi analisisnya yaitu studi analisis kestabilan transien[2].

Kestabilan transien adalah kemampuan suatu sistem untuk mempertahankan sinkronisasinya saat terkena gangguan transien. Jadi analisis kestabilan transien adalah studi untuk mengetahui kemampuan sistem mempertahankan sinkronisasinya saat terjadi gangguan transien. Kestabilan transien dipengaruhi oleh gangguan besar atau yang biasa disebut gangguan transien, yang termasuk gangguan transien adalah lepasnya sebuah generator, gangguan hubung singkat dan lepasnya beban yang besar secara tiba-tiba[3].

II. Tinjauan Pustaka

A. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kemampuan sistem untuk dapat kembali ke keadaan normal setelah terjadi gangguan merupakan kestabilan sistem tenaga listrik[4].

Kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa macam menurut variabel sistem yang mampu dipengaruhi oleh gangguan. Stabilitas sistem tenaga dikategorikan menjadi tiga, yaitu[5]:

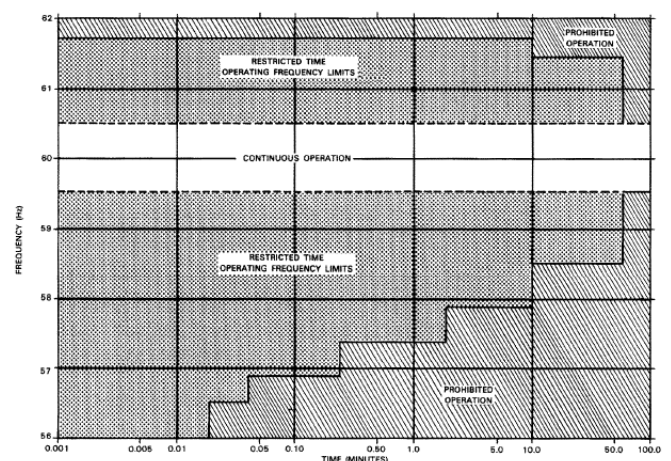
1. Kestabilan Frekuensi
2. Kestabilan Sudut Rotor
3. Kestabilan Tegangan

B. Kestabilan Sudut Rotor

Hal yang dapat mempengaruhi kestabilan sudut rotor adalah gangguan kecil dan gangguan besar atau transien. Kestabilan rotor akibat gangguan besar atau transien merupakan kemampuan sistem untuk mempertahankan sinkronisasi mesin-mesin sinkron pada sistem ketika mendapatkan gangguan besar, seperti hubung singkat atau generator lepas. Stabilitas transien sudut rotor pada sistem kecil memiliki kurun waktu 3 sampai 5 detik setelah terjadi gangguan, jika sistem sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan, kurun waktu dari stabilitas transien sudut rotor sistem tersebut dapat diperpanjang 10 sampai 20 detik. Hal yang menyebabkan sistem kehilangan kestabilannya adalah kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi damping. Kurangnya torsi sinkronisasi menyebabkan sudut rotor mesin sinkron tidak stabil, kurangnya torsi damping menyebabkan osilasi yang tidak stabil[6].

C. Standar Kestabilan Frekuensi

Berdasarkan IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987), operasi frekuensi yang diijinkan untuk naik turunnya frekuensi yaitu 1% untuk continuous operation, 1.5% batas atas untuk operation frequency limit dan 6.66% batas bawah untuk operation frequency limit[7] dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Batasan Operasi Beban Penuh saat Frekuensi Tidak Normal[7]

D. Kestabilan Transien

Kestabilan transien merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan kondisi sinkronnya setelah terjadi gangguan transien secara tiba-tiba pada sistem tersebut[6]. Gangguan transien merupakan gangguan besar yang berupa hubung singkat atau generator lepas. Analisis kestabilan transien sangat

dibutuhkan pada suatu sistem agar dapat mengetahui apakah sistem tersebut dapat kembali ke keadaan steady-state setelah terjadi gangguan transien. Gangguan transien pada suatu sistem akan mengganggu kestabilan sistem ketika gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba pada first swing atau ayunan pertama pada saat AVR dan governor belum bekerja.

E. Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

Persamaan ayunan rotor mesin sinkron merupakan dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar merupakan hasil kali dari momen inersia rotor dengan percepatan sudutnya dinyatakan pada persamaan 2.1 berikut:

$$J \alpha_m(t) = T_m(t) - T_e(t) = T_a(t) \quad (2.1)$$

Dengan Keterangan,

- J Momen inersia total dari massa rotor dalam $kg \cdot m^2$
- α_m Percepatan sudut rotor (rad/s^2)
- T_m Torsi mekanis atau poros penggerak yang diberikan prime mover dikurangi dengan momen putar perlambatan (retarding) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran ($N \cdot m$)
- T_e Torsi elektrik pada total 3-phase output daya elektrik generator dikurangi dengan rugi-rugi elektikal ($N \cdot m$)
- T_a Torsi percepatan bersih (*net*), ($N \cdot m$)

Torsi mekanis T_m dan torsi elektrik T_e bernilai positif pada generator sinkron. Pada kondisi steady state T_m bernilai sama dengan T_e , sehingga torsi percepatan bersih T_a bernilai nol, dan, dari persamaan (2.1), percepatan rotor α_m bernilai nol, kondisi ini menghasilkan kecepatan rotor yang konstan yang bisa juga disebut kecepatan sinkron. Ketika T_m lebih besar nilainya dibanding T_e , T_a bernilai positif dan α_m bernilai positif pula, kondisi ini menghasilkan meningkat kecepatan rotor bekerja. Berlaku pun untuk sebaliknya, ketika T_m bernilai kurang dari T_e maka kecepatan rotor akan menurun[6].

F. Hubung Singkat

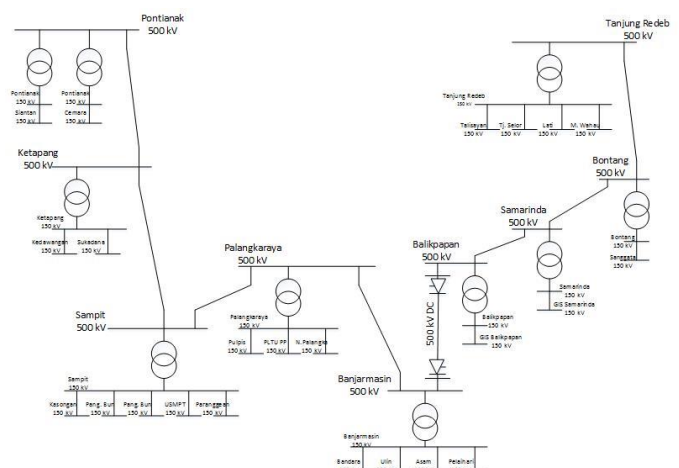
Hubung singkat merupakan suatu gangguan yang paling sering terjadi dalam suatu sistem kelistrikan. Hubung singkat bias terjadi akibat adanya sambaran petir, kegagalan isolasi, ataupun gangguan alam seperti binatang atau ranting pohon, kesalahan teknis pengerjaan

dan kesalahan manusia juga dapat mengakibatkan hubung singkat. Saat hubung singkat terjadi, arus yang sangat besar mengalir menuju titik gangguan, sehingga terdapat disekitar titik gangguan hubung singkat akan turun secara signifikan[8].

III. Perencanaan Sistem Kelistrikan Kalimantan

Sistem kelistrikan kalimantan dibagi menjadi tiga area yaitu area Kalbar (Provinsi Kalimantan Barat), area Kalselteng (Provinsi Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah) dan area Kaltimra (Provinsi Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara). Ketiga area tersebut terpisah dan masing-masing memiliki sistem transmisi 150 kV. Untuk menginterkoneksi ketiga area tersebut, dilakukan perencanaan penghubungan menggunakan sistem transmisi 500 kV sebagai backbone..

Pemilihan backbone untuk sistem transmisi HVDC menggunakan analisis jarak terjauh dan pertimbangan perencanaan pembangkitan dan peramalan beban. *Single line diagram* yang telah dirancang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Perancangan Sistem Kelistrikan Kalimantan dengan Backbone 500 kV

IV. Analisis Kestabilan Transien Sistem Kelistrikan Kalimantan

Permodelan dilakukan dengan membuat single line diagram dari masing-masing area lalu dilakukan interkoneksi menggunakan sistem transmisi 500 kV.

Setelah single line diagram telah dibuat, dilakukan simulasi load flow untuk mengetahui apakah sistem dapat berjalan dengan baik. Setelah simulasi load flow telah dilakukan, kemudian dibuat event gangguan transien berupa short circuit pada line backbone 500 kV.

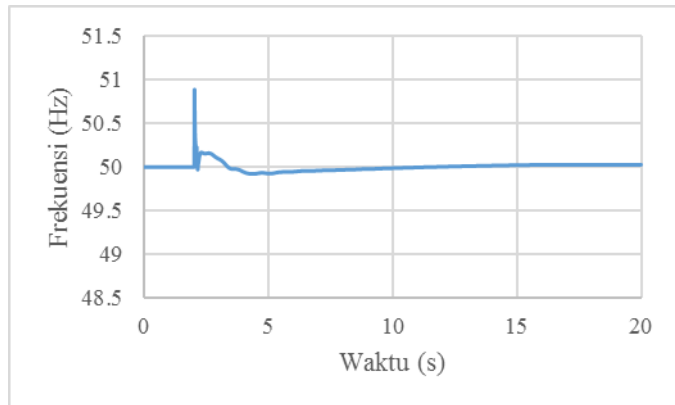
A. Hasil Simulasi pada Sistem Kelistrikan Kalimantan

Seluruh kasus disimulasikan dengan gangguan yang terjadi pada detik ke 2 dan memiliki *fault time* sebesar 0.1 detik.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan dapat mempertahankan sinkronisasinya saat terjadi gangguan tersebut, karena perubahan frekuensi, tegangan dan sudut rotor masih dalam batas toleransi.

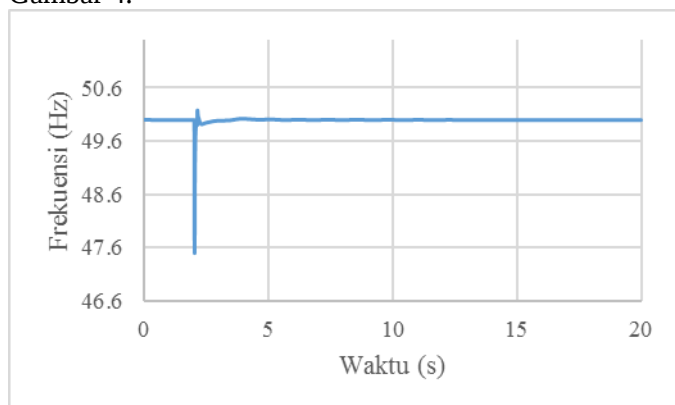
B. Kasus 3-Phase Short Circuit pada Tahun 2032

Frekuensi pada bus *backbone* Bontang 500 kV saat terjadi gangguan sebesar 101.7% dapat dilihat pada Gambar 3.



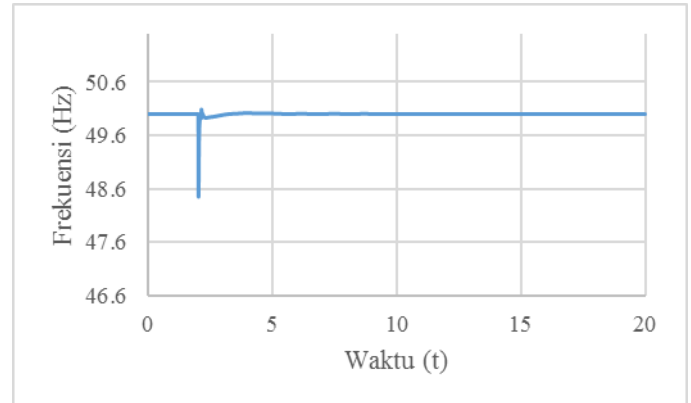
Gambar 3 Respon Frekuensi bus *Backbone* Bontang 500 kV.

Frekuensi pada bus *backbone* Palangkaraya 500 kV saat terjadi gangguan sebesar 95% dapat dilihat pada Gambar 4.



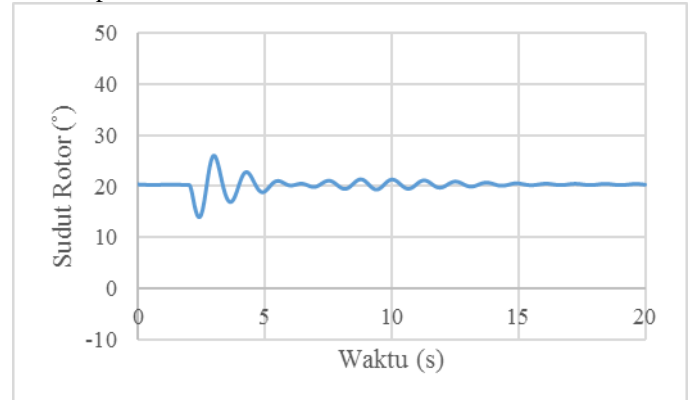
Gambar 4 Respon Frekuensi Bus *Backbone* Palangkaraya 500 kV.

Frekuensi pada bus *backbone* Sei Raya 500 kV saat terjadi gangguan sebesar 96.92% dapat dilihat pada Gambar 5.



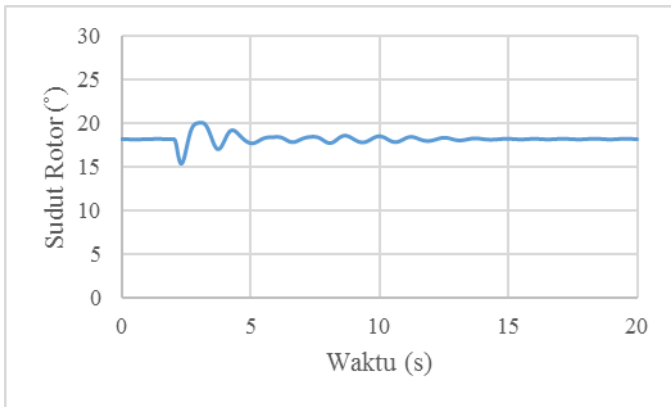
Gambar 5 Respon Frekuensi Bus *Backbone* Palangkaraya 500 kV.

Respon sudut rotor pada PLTU Asam 1 terhadap gangguan memiliki simpangan kurang lebih 6° dapat dilihat pada Gambar 6.



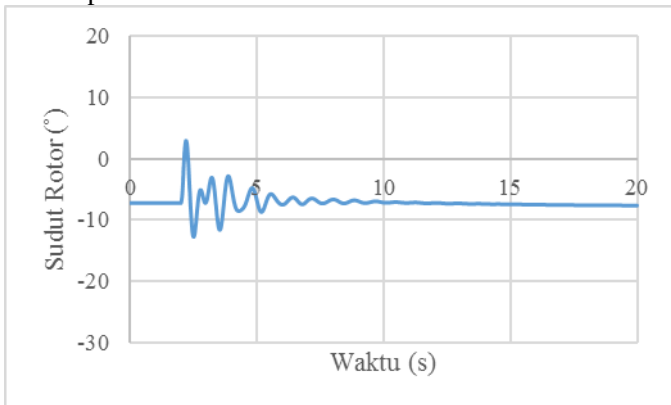
Gambar 6 Respon Sudut Rotor PLTU Asam 1.

Respon sudut rotor pada PLTU Kalbar 2-2 terhadap gangguan memiliki simpangan kurang lebih 4° dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Respon Sudut Rotor PLTU Kalbar 2-2.

Respon sudut rotor pada PLTU Kaltim FTP 1 terhadap gangguan memiliki simpangan kurang lebih 9° dapat dilihat pada Gambar 8.

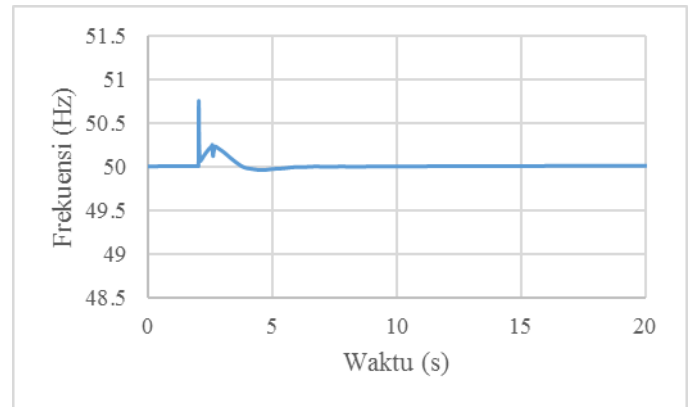


Gambar 8 Respon Sudut Rotor PLTU Kaltim FTP 1.

Pada saat terjadi gangguan, seluruh arus akan menuju ke titik hubung singkat sehingga tidak ada arus yang menuju *rectifier*, membuat sistem area Kaltimra seakan kehilangan beban sehingga frekuensi seketika naik. Sedangkan pada sistem area Kalbar dan Kalselteng seakan kehilangan suplai daya sehingga frekuensi seketika turun, tetapi tidak ikut memberikan arus kontribusi ke titik hubung singkat.

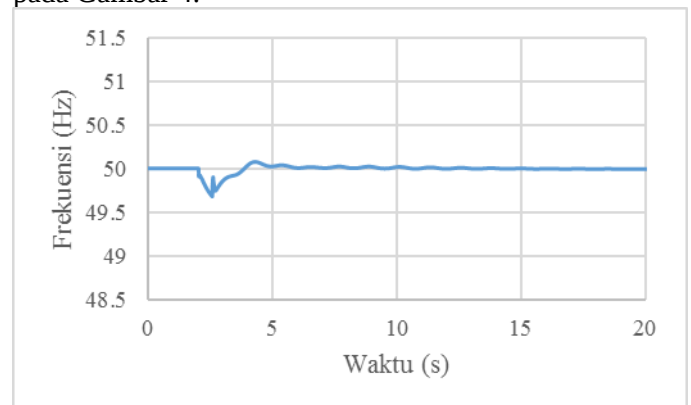
C. Kasus Single Phase to Ground Fault pada Tahun 2032

Frekuensi pada bus *backbone* Bontang 500 kV saat terjadi gangguan sebesar 101.5% dapat dilihat pada Gambar 3.



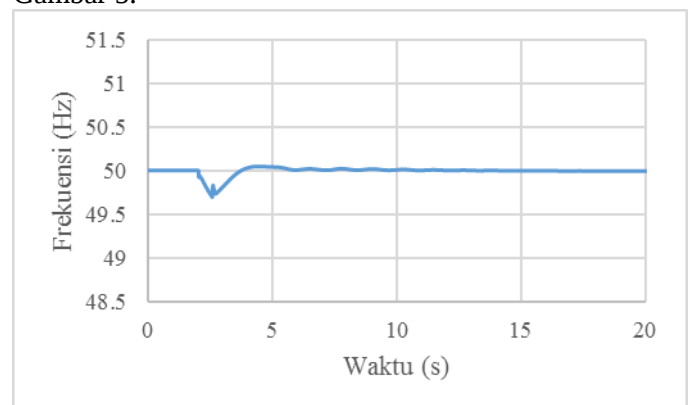
Gambar 3 Respon Frekuensi bus *Backbone* Bontang 500 kV.

Frekuensi pada bus *backbone* Palangkaraya 500 kV saat terjadi gangguan sebesar 99.3% dapat dilihat pada Gambar 4.



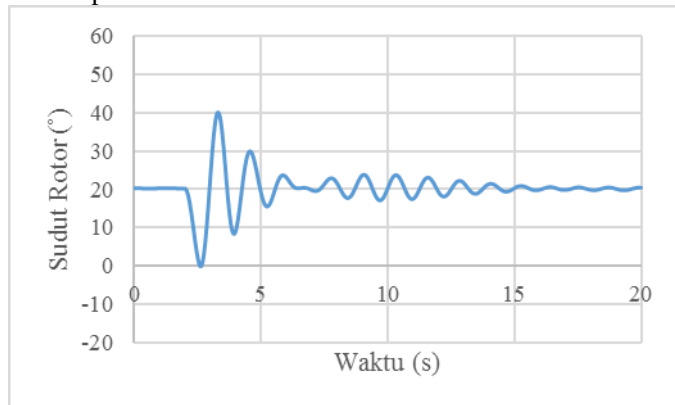
Gambar 4 Respon Frekuensi Bus *Backbone* Palangkaraya 500 kV.

Frekuensi pada bus *backbone* Sei Raya 500 kV saat terjadi gangguan sebesar 99.4% dapat dilihat pada Gambar 5.



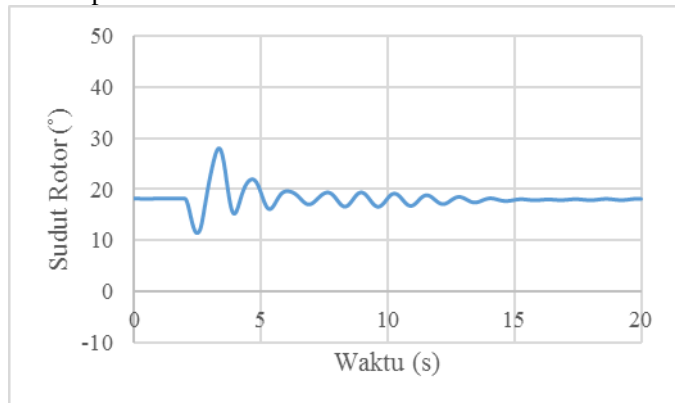
Gambar 5 Respon Frekuensi Bus *Backbone* Palangkaraya 500 kV.

Respon sudut rotor pada PLTU Asam 1 terhadap gangguan memiliki simpangan kurang lebih 20° dapat dilihat pada Gambar 6.



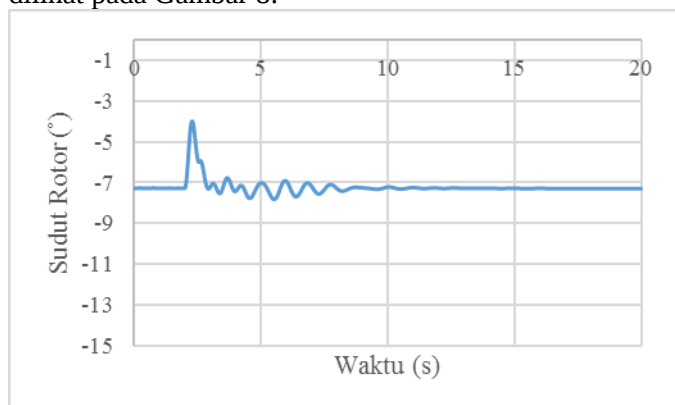
Gambar 6 Respon Sudut Rotor PLTU Asam 1.

Respon sudut rotor pada PLTU Kalbar 2-2 terhadap gangguan memiliki simpangan kurang lebih 9° dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Respon Sudut Rotor PLTU Kalbar 2-2.

Respon sudut rotor pada PLTU Kaltim FTP 1 terhadap gangguan memiliki simpangan kurang lebih 3° dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Respon Sudut Rotor PLTU Kaltim FTP 1.

Pada saat terjadi hubung singkat pada saluran HVDC, sesaat transmisi HVDC akan mati dan berhenti mengirimkan daya, setelah CB trip, arus dialirkan ke saluran HVDC lainnya, sehingga pada area Kaltimra seakan kehilangan beban sesaat dan frekuensi naik seketika, sedangkan pada areak Kalbar dan Kalselteng seakan kehilangan suplai daya dan frekuensi turun seketika. Pada kedua area tidak memberikan arus kontribusi ke titik hubung singkat.

v. Kesimpulan

Analisis kestabilan transien ini dilakukan untuk menentukan apakah sistem kelistrikan Kalimantan yang menggunakan sistem transmisi AC dan DC ini dapat mempertahankan kestabilannya setelah terkena gangguan transien, dan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari 3 kasus yang telah dilakukan pada sistem kelistrikan Kalimantan selama 2029 sampai 2050, tidak ada yang melebihi batas toleransi dan mampu mempertahankan frekuensi dan sudut rotornya.
2. Kenaikan frekuensi tertinggi terjadi pada tahun 2032 di bus *backbone* Bontang 500 kV pada saat terjadi gangguan *3-phase short circuit* pada *line backbone* Tanjung Redeb 500 kV – Bontang 500 kV sebesar 101.7%, tetapi masih dalam batas toleransi.
3. Penurunan frekuensi terendah terjadi pada tahun 2029 di bus *backbone* Palangkaraya 500 kV pada saat terjadi gangguan *3-phase short circuit* pada *line backbone* Tanjung Redeb 500 kV – Bontang 500 kV sebesar 95%, tetapi masih dalam batas toleransi.
4. Ketika gangguan *3-phase short circuit* pada *line backbone* Tanjung Redeb 500 kV – Bontang 500 kV terjadi, seluruh arus menuju ke titik hubung singkat sehingga tidak ada arus yang mengalir menuju *rectifier* dan transmisi HVDC akan mati. Hal ini membuat area sistem Kaltimra seakan kehilangan beban dan frekuensinya akan naik seketika. Sedangkan pada Kalbar dan Kalselteng seakan kehilangan suplai daya dan frekuensinya akan turun seketika.
5. Ketika gangguan *single phase to ground fault* pada *line* HVDC, transmisi HVDC akan mati, setelah CB trip arus akan dialirkan menuju *line* HVDC lainnya. Hal ini membuat area sistem Kaltimra seakan kehilangan beban dan frekuensinya akan naik seketika. Sedangkan pada Kalbar dan Kalselteng seakan kehilangan suplai daya dan frekuensinya akan turun seketika.
6. Pada kasus *short circuit*, area di seberang transmisi HVDC tidak terpengaruh oleh gangguan tersebut sehingga tidak memberikan arus kontribusi pada titik gangguan.

7. Pada kasus *generator outage*, ketika salah satu generator dengan kapasitas yang besar pada pusat beban yaitu Kalimantan Barat, generator lainnya akan bertambah bebannya, sehingga frekuensi akan turun pada Kalimantan Barat dan Kalimantan Selatang Tengah, tetapi pada area Kalimantan Timur Utara tidak terpengaruh. Begitu pula dengan sudut rotor pada pembangkitnya.

Daftar Pustaka

- [1] PT. PLN Persero, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2017-2026," 2017.
- [2] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Power System Analysis: McGraw-Hill Education*. 1994.
- [3] G. Andersson, *Power System Analysis: Power Flow Analysis, Fault Analysis and Power System Dynamics and Stability*. 2012.
- [4] M. Pavella, D. Ernst, and D. Ruiz-Vega, *Transient Stability of Power Systems, A Unified Approach to Assessment and Control*. 1934.
- [5] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, and C. Canizares, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions."
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control: McGraw-Hill Education*. 1994.
- [7] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants."
- [8] J. C. Das, *Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics*. .