

Studi Kestabilan Sistem Kelistrikan Kalimantan-Jawa 500 kV AC/DC Menggunakan Analisis Modal

¹Heryanto Hartra M M, ²Ardyono Priyadi, ³Imam Robandi

¹Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

¹heryhartra@gmail.com, ²priyadi@ee.its.ac.id, ³robandi@ee.its.ac.id

Abstrak— Indonesia merupakan negara kepulauan dengan kebutuhan energi yang terus meningkat tiap tahunnya. Kalimantan merupakan salah satu pulau yang berada di Indonsesia yang memiliki peranan penting dalam pertumbuhan ekonomi dan industri. Pada Perencanaan pengembangan sistem kelistrikan dibutuhkan analisis untuk menentukan kelayakan performa sistem. Pada penelitian ini dibahas *small signal stability* untuk sistem kelistrikan Kalimantan dengan backbone 500 kV AC yang menghubungkan Kalimantan Barat (Sei Raya, Ketapang), Kalimantan Timur (Bontang, Samarinda, Balikpapan), Kalimantan Utara (Tanjung Redeb), Kalimantan Selatan (Banjarmasin) dan Kalimantan Tengah (Sampit, Palangkaraya) dengan menggunakan Analisis Modal dari skenario sistem kelistrikan Kalimantan yang mengirimkan daya sebesar 1 GW menuju Jawa dengan jarak 500 km menggunakan sistem transmisi HVDC Monopolar 500 kV. Analisis Modal memberikan informasi tentang *eigenvalue*, *mode shape*, dan *participation factor*. Sistem dikatakan stabil jika seluruh nilai *eigenvalue* bernilai negatif, jika terdapat satu saja nilai *eigenvalue* positif sistem dikatakan tidak stabil. Pada penelitian ini didapatkan seluruh nilai *eigenvalue* bernilai negatif. Pada tahun 2029 didapatkan nilai *eigenvalue* yang kritis dengan nilai $-0,08468 \pm j3,97306$ dan *damping ratio* sebesar 2,131% dengan mode osilasi *inter-area* yang meliputi ketiga area yang ada di Kalimantan. Dengan nilai *eigenvalue* yang diperoleh tiap tahunnya dari tahun 2023 sampai tahun 2050 menunjukkan nilai *eigenvalue* stabil dan menyatakan sistem kelistrikan Kalimantan layak dari sisi *small-signal stability*.

Kata Kunci— *eigenvalue*, *modal analysis*, *small-signal stability*

Indonesia is an archipelago country with an ever increasing energy demand every year. Kalimantan is one of the islands located in Indonsesia that has an important role in economic and industrial growth. In Planning the development of electrical systems required analysis to determine the feasibility of system performance. In this study we discussed the small signal stability for the Kalimantan electricity system with the 500 kV AC backbone connecting West Kalimantan (Sei Raya, Ketapang), East Kalimantan (Bontang, Samarinda, Balikpapan), North Borneo (Tanjung

Redeb), South Kalimantan (Banjarmasin) and Central Kalimantan (Sampit, Palangkaraya) using modal analysis from a scenario of Kalimantan's electricity system that sends a power of 1 GW to Java with a distance of 500 km using a 500 kV monopolar HVDC transmission system. Modal Analysis provides information on eigenvalue, shape mode, and participation factor. The system is said to be stable if all eigenvalue values are negative, if there is only one positive eigenvalue value of the system is said to be unstable. In this study obtained all eigenvalue value is negative. In the year 2029 obtained a critical eigenvalue value with the value of $-0.08468 \pm j3,97306$ and damping ratio of 2.131% with the mode of inter-area oscillation covering the three areas in Kalimantan. The eigenvalue value obtained annually from 2023 to 2050 shows a stable eigenvalue value and states that Kalimantan's electricity system is feasible from the small-signal stability side.

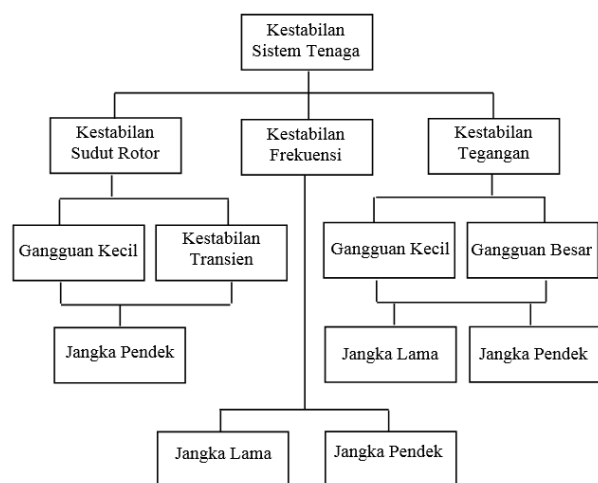
Key Word— *eigenvalue*, *modal analysis*, *small-signal stability*

I. Pendahuluan

Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) diharapkan dapat meningkatkan rasio elektrifikasi nasional salah satu caranya adalah dengan mengembangkan sistem kelistrikan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik, pada sistem kelistrikan kalimantan direncanakan pengembangan melakukan interkoneksi untuk sistem kelistrikan Kalimantan kedepannya. Melimpahnya sumber energi di pulau Kalimantan, menjadikan pembangunan pembangkit sangat memungkinkan dibangun di Kalimantan namun pertumbuhan beban yang lambat dapat mengakibatkan daya yang dibangkitkan akan lama terserap oleh beban sehingga dapat menimbulkan kerugian, adanya skenario pemanfaatan energi air di Kalimantan Utara karena pertumbuhan beban yang lambat oleh karena itu memungkinkan daya yang dibangkitkan di salurkan ke luar Kalimantan dalam hal ini dengan sistem kelistrikan Jawa menggunakan saluran 500 kV high voltage direct current (HVDC).

Seiring dengan bertambahnya beban dan terjadinya fluktuasi beban pada sistem kelistrikan Kalimantan oleh karena itu diperlukan studi *kestabilan small signal stability* dimana dapat melihat kestabilan sistem saat terjadi gangguan-gangguan kecil dengan menggunakan Analisis Modal kita bisa mendapatkan nilai-nilai *eigenvalue* sistem dimana berdasarkan nilai-nilai *eigenvalue* ini dapat dilihat karakteristik sistem dan kestabilan sistem tersebut. Gangguan kecil pada saat kondisi beban puncak, karena fenomena tidak dapat di amati di *transient stability*, Karena AVR dan Governor sudah bekerja, dan dengan *modal analysis* kita mendapatkan informasi tentang *eigenvalue*, *mode shape*, dan *participation factor*. Dengan memperhatikan *mode shape* yang dapat mengklasifikasikan *eigenvalue* sebagai mode osilasi *local area* atau *inter-area* [1] sedangkan *participation factor* dapat menentukan generator mana yang paling tepat untuk diberikan kontrol tambahan. Dengan menganalisis *mode shape* dan *participation factor* kita dapat mengidentifikasi generator mana yang dapat menyebabkan ketidakstabilan dan dapat melakukan pencegahannya [1][2].

Pada penelitian ini dilakukan *small signal stability analysis* untuk sistem kelistrikan Kalimantan dengan memperhatikan *mode shape*, *participation factor*, dan *damping ratio* dari *eigenvalue*. *Eigenvalue* yang diperhatikan adalah *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% karena dengan *damping ratio* dibawah 5% menunjukkan kelemahan sistem karena memperpanjang



waktu yang dibutuhkan untuk sistem kembali *steady state*
Gambar 1. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga setelah terjadi gangguan dan jika gangguan lain terjadi

selama waktu ini ada risiko yang lebih tinggi yang dapat menyebabkan ketidakstabilan [3][4] untuk memperoleh informasi generator mana saja yang dapat menyebabkan sistem menjadi tidak stabil.

II. Teori Penunjang

A. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai bagian dari sistem tenaga listrik yang merupakan kemampuan sistem tenaga untuk tetap berada dalam kondisi operasi yang seimbang atau dalam kondisi operasi normal, dan kemampuan sistem untuk mendapatkan kondisi yang seimbang ataupun kondisi yang dapat diterima setelah mengalami gangguan [5]. Ketidakstabilan dalam sistem tenaga adalah kondisi dimana sistem tenaga tidak mampu menjaga kondisi sinkronnya atau tidak dapat kembali menuju operasi normal setelah mengalami gangguan besar maupun gangguan kecil.

Berdasarkan referensi [6] dari paper IEEE Transactions On Power Systems dengan judul *Definition and Classification of Power System Stability*, kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi tiga yaitu :

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

Gambar 1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga

B. Modal Analysis

Model non-linier dari sistem tenaga dinamis dapat dimodelkan dalam bentuk persamaan diferensial dan persamaan aljabar sebagai berikut :

$$\dot{x} = f(x, u) \tag{1}$$

Sedangkan untuk keluaran dari sistem dimana kita dapat melihatnya dari sistem dapat pula dinotasikan dalam bentuk *state variable* dan *input variable*:

$$y = g(x, u) \tag{2}$$

Modal analysis digunakan untuk mendapatkan performansi *small signal* dengan linierisasi persamaan sistem (1) pada titik ekuilibriumnya (x_0)

$$x_0 = f(x_0) = 0 \tag{3}$$

Dan didapatkan persamaan setelah sistem di linierisasi sebagai berikut:

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (4)$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u \quad (5)$$

Berdasarkan persamaan (4) dengan masukan sama dengan nol sehingga didapatkan persamaan :

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x \quad (6)$$

Sehingga kestabilan sistem dapat dilihat dari matriks A dimana matriks A adalah matrik yang sudah dilinierisasi sehingga *eigenvalue* didapatkan dari :

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (7)$$

Eigenvalue dari sistem dapat sangat penting untuk menganalisis kestabilan sistem. Sistem dikatakan stabil jika seluruh nilai *eigenvalue* memiliki bagian *real* negatif jika terdapat satu saja nilai *eigenvalue* positif sistem dikatakan tidak stabil.

C. Mode Osilasi Local Area dan Inter-area

Perubahan pada sistem tenaga seperti perubahan tegangan, arus, dan aliran daya antara area yang berbeda. Sistem tenaga yang besar akan memiliki mode osilasi elektromekanikal yang dominan pada saat terjadi gangguan. Mode osilasi elektromekanikal di klasifikasikan berdasarkan [5] sebagai berikut :

1) Mode Inter-area pada frekuensi 0.1-0.8 Hz

Pada mode inter-area dimana generator dari dua area yang berbeda saling ber-osilasi satu sama dengan yang lain. Mode ini dapat muncul saat terjadi gangguan pada saluran yang menghubungkan kedua area pembangkitan ini atau pada saluran transmisi yang di matikan untuk keperluan pemeliharaan.

2) Mode Local area pada frekuensi 0.7-2 Hz

Pada mode lokal area ini dimana generator pada satu area yang sama saling berosilasi satu dengan yang lain. Mode ini dapat muncul saat terjadi gangguan yang letaknya dekat dengan area generator tersebut.

D. Participation Factor

Dalam penggunaan eigenvector kiri dan kanan secara terpisah untuk mengidentifikasi hubungan antara state dan mode terdapat permasalahan yaitu elemen eigenvector bergantung pada satuan dan penskalaan yang berhubungan dengan variable state. Sebagai solusi atas masalah ini, digunakan matriks yang disebut matriks

participation factor (P), yang menggabungkan eigenvector kiri dan kanan sebagai pengukuran dari hubungan antara variable state dan mode.

$$P = [P_1 P_2 \dots P_n] \quad (8)$$

Dengan

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ \vdots \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \psi_{i1} \\ \phi_{2i} \psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \psi_{in} \end{bmatrix}$$

Participation factor digunakan untuk menentukan *state variable* atau generator mana yang sangat berpengaruh terhadap suatu mode atau terhadap suatu nilai *eigenvalue*.

III. Perencanaan Sistem Kelistrikan Kalimantan

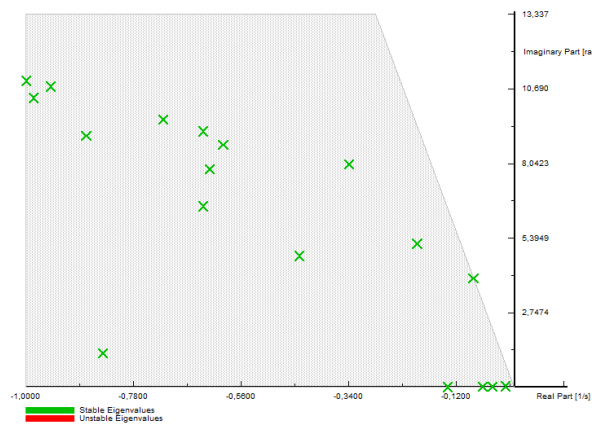
Perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan yang saling terinterkoneksi dengan backbone 500 kV AC dan mengirimkan daya ke Jawa menggunakan sistem transmisi *high voltage direct current* dimana pada sistem kelistrikan Kalimantan di asumsikan dibagi menjadi tiga area yaitu area Provinsi Kalimantan Barat (Kalbar), Provinsi Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah (Kalselteng), dan Provinsi Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara (Kaltimra). Pada ketiga area yang terpisah ini masih menggunakan tegangan 150 kV untuk transmisinya. Sehingga dilakukan perencanaan untuk menghubungkan ketiga area ini dengan menggunakan tegangan 500 kV sebagai backbone, sehingga ketiga area saling terhubung satu sama lain. Pada skenario ini di asumsikan potensi tenaga air pada aliran sungai Kayan dimana sebesar 6000 MW berdasarkan RUPTL [7] dimanfaatkan secara besar dengan adanya penambahan pembangkit Kayan Hydro sebesar 5 x 400 MW yang terhubung dengan bus Tanjung Redeb 500 kV sehingga dengan adanya skenario pemanfaatan potensi energi air ini diperlukan beban yang perlu di suplai sehingga direncanakan transfer daya listrik menuju Jawa menggunakan transmisi HVDC. Pada skenario ini letak HVDC adalah pada bus Banjarmasin 500 kV yang menuju Jawa yang diasumsikan berupa beban dengan jarak 500 km

2045	558	-0,1857	5,1763	0,8238	3,587%
	479	-0,3783	8,2852	1,3186	4,562%
	564	-0,2218	4,4760	0,7123	4,949%
2050	537	-0,2010	5,1198	0,8148	3,924%
	596	-0,1782	4,2163	0,6710	4,223%
	492	-0,3719	8,4273	1,3412	4,409%
	541	-0,2399	5,1713	0,8230	4,634%
	446	-0,4546	9,4440	1,5030	4,808%

Dari rekapitulasi nilai *eigenvalue* pada Tabel 1 dapat dilihat pada tahun 2029 memiliki *eigenvalue* dengan damping ratio terendah dengan damping ratio sebesar 2,131% dengan mode *inter-area* dan pada tahun 2035 menjadi mode *local area* dengan damping ratio terendah yaitu sebesar 3,880%.

G. Modal Analysis Mode 378 Tahun 2029

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2029 menghasilkan 861 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif.



Gambar 4. Eigenvalue plot dengan damping dibawah 10%

Tabel 2. Eigenvalue dengan Damping Dibawah 5% Tahun 2029

Mode	Real	Imaginer	Frequency	Damping Ratio
378	-0,08468	3,97306	0,63233	2,131%
350	-0,19961	5,19564	0,82691	3,839%
312	-0,33907	8,01774	1,27606	4,225%

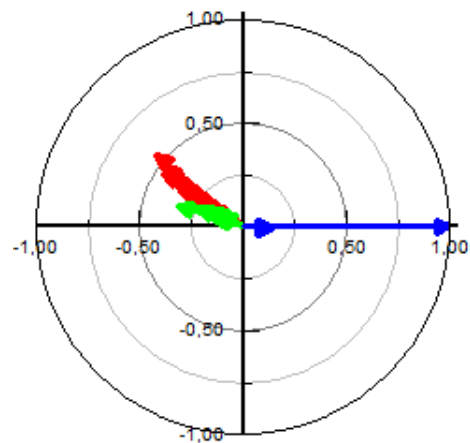
Pada tahun 2029 dapat dilihat terdapat tiga nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini. Pada mode 378 memiliki damping ratio sebesar 2,131 % dimana merupakan damping ratio terendah dan dapat dilihat nilai bagian real dari mode 378 sudah mendekati nol atau sumbu positif dengan

frekuensi 0,63233 . Mode 378 memiliki mode shape atau observeability dimana dapat dilihat berdasarkan observeability sudut rotor (δ)

Observeability δ			
Nama Pembangkit	Area	Magnitude	Angle
Kaltim MT	Kaltimra	0,148	-2,536
PLTA Kaltara	Kaltimra	1,000	0,000
PLTU Kalbar 1	Kalbar	0,483	142,820
PLTU Kura-kura 1	Kalbar	0,471	143,522
PLTU Parit Baru 2	Kalbar	0,463	146,007
PLTU Kalbar 3	Kalbar	0,402	146,547
MPP Kalbar	Kalbar	0,369	146,957
Kalbar Peaker 1	Kalbar	0,369	146,957
PLTU Parit Baru 1	Kalbar	0,369	146,957
Bangkanai	Kalselteng	0,356	147,786
Kalselteng 1	Kalselteng	0,298	148,642
Pulpis	Kalselteng	0,197	149,112
Asam-Asam	Kalselteng	0,171	152,191
Sampit	Kalselteng	0,197	155,372
Kalselteng 2	Kalselteng	0,151	156,270
PLTG Kalteng	Kalselteng	0,239	156,934

Tabel 3. Observeability δ Mode 378

Dari data observeability δ dapat dilihat bahwa mode 378 merupakan mode *inter-area* karena meliputi



pembangkit dari ketiga area yaitu Kaltimra, Kalselteng, dan Kalbar.

Gambar 5. Phasor Plot observeability δ Mode 378

Jika dikelompokkan berdasarkan sudut magnitudenya dapat dilihat bahwa pembangkit pada area Kaltimra dalam hal ini PLTA Kaltara dan Kaltim MT saling berosilasi terhadap pembangkit lain dari kedua area lainnya, dan berdasarkan magnitudenya PLTA Kaltara menjadi pembangkit yang paling *observeable* dengan magnitudo paling besar

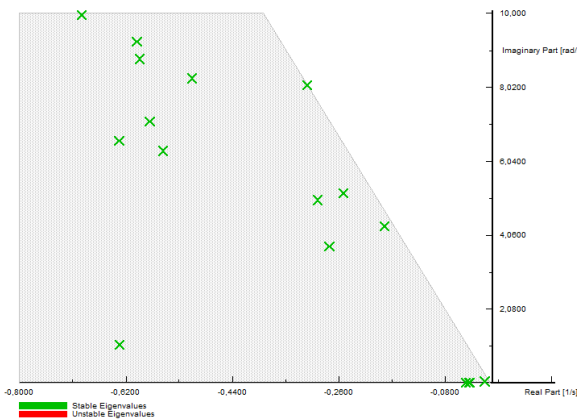
Tabel 4. Participation Factor δ Mode 378

Participation Factor δ		
Nama Pembangkit	Area	Magnitude
PLTA Kaltara	Kaltimra	1

Tabel 5. Participation Factor ω Mode 378

Participation Factor ω		
Nama Pembangkit	Area	Magnitude
PLTA Kaltara	Kaltimra	0,880
PLTU Kalbar 1	Kalbar	0,101

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 378 lebih sensitif terhadap generator pada area Kaltimra dan Kalbar lebih tepatnya pada PLTA Kaltara.



Berdasarkan informasi dari *observability* dan

participation factor dimana PLTA Kaltara merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka *eigenvalue mode 378* akan lebih sensitif terhadap pembangkit PLTA Kaltara dan PLTA Kaltara akan lebih rentan terhadap gangguan dan dapat menyebabkan ketidakstabilan jika dibandingkan dengan pembangkit pada area

Kaltimra, Kalselteng dan Kalbar lain.

H. Modal Analysis Mode 370 Tahun 2032

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2032 menghasilkan 954 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negative

Gambar 6. Eigenvalue plot dengan damping dibawah 10%

Tabel 6. Eigenvalue dengan Damping Dibawah 5% Tahun 2035

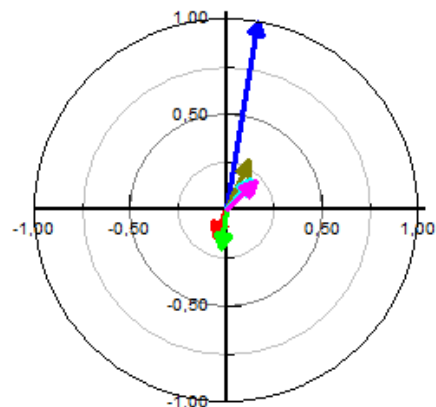
Mode	Real	Imaginer	Frequency	Damping Ratio
370	-0,31362	8,07615	1,28536	3,880%
434	-0,18265	4,31082	0,68609	4,233%
426	-0,25215	5,18824	0,82573	4,854%

Pada mode 370 memiliki *damping ratio* sebesar 3,880% dengan frekuensi 1,28536. Mode 370 memiliki *mode shape* atau *observability* dimana dapat dilihat berdasarkan *observability* sudut rotor (δ)

Tabel 7. Observability δ Mode 370

Observability δ			
Nama Pembangkit	Area	Magnitude	Angle
Pulpis	Kalselteng	0,216	42,884
Sampit	Kalselteng	0,199	50,039
Kalselteng 1	Kalselteng	0,282	66,151
PLTG Kalteng	Kalselteng	1,000	80,384
Kalsel FTP 1	Kalselteng	0,203	-96,565
Bangkanai	Kalselteng	0,150	-114,340

Dari data *observability* δ dilihat bahwa dengan frekuensi 1,28536 dimana merupakan mode *local area*, hal ini dapat dilihat bahwa hanya meliputi pembangkit dari area Kalselteng saja yang *observeable* dan selain itu berdasarkan sudut dari magnitudo dimana sudut antar pembangkit saling berlawanan atau *counter phase* sehingga dapat dikatakan merupakan mode osilasi lokal pada area Kalselteng.



Gambar 7. Phasor Plot observeability δ Mode 370

Jika dikelompokkan berdasarkan sudutnya seperti pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa pembangkit Bangkanai dan Kalselteng beresilasi terhadap PLTG Kalteng. Kalselteng 1, Sampit, Pulpis.

Tabel 8. Observeability δ Mode 370

Participation factor δ		
Nama Pembangkit	Area	Magnitude
PLTG Kalteng	Kalselteng	0,952

Tabel 9. Observeability δ Mode 370

Participation factor δ		
Nama Pembangkit	Area	Magnitude
PLTG Kalteng	Kalselteng	1

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 370 lebih sensitif terhadap generator pada area Kalselteng lebih tepatnya pada PLTG Kalteng. Berdasarkan informasi dari *observeability* dan *participation factor* dimana PLTG Kalteng merupakan pembangkit yang paling *observeable* dan dengan *participation factor* terbesar maka pembangkit PLTG Kalteng akan lebih rentan terhadap gangguan jika dibandingkan dengan pembangkit lain pada area Kalselteng lain untuk mode 370 dikarenakan merupakan mode *local-area*.

v. Kesimpulan

Berdasarkan studi kestabilan sistem kelistrikan Kalimantan yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Sistem kelistrikan Kalimantan yang terinterkoneksi dan mengirimkan daya sebesar 1000 MW menuju Jawa stabil dari sisi *small-small signal stability* hingga tahun 2050.
2. Daya yang dapat dikirim menuju Jawa dengan skenario HVDC pada bus Banjarmasin hanya mampu mengirim daya 1000 MW karena kapasistas saluran AC dengan tegangan 500 kV.
3. Skenario interkoneksi pada kelistrikan Kalimantan menimbulkan mode osilasi *inter-area* atau mode osilasi antar pembangkit pada area yang berbeda hal ini dapat dilihat berdasarkan *modeshape* yang diberikan dari *eigenvalue*
4. *Eigenvalue*, *damping ratio*, dan frekuensi osilasi dari suatu mode dipengaruhi oleh topologi

dari sistem, kondisi operasi pembangkit, dan kondisi pembebanan.

5. Frekuensi osilasi untuk *mode local area* selalu lebih besar jika dibandingkan dengan frekuensi osilasi *mode inter-area*

Daftar Pustaka

- [1] D. V. Nair and M. S. R. Murty, "Modal analysis of Power System and study of oscillatory instability," in *2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*, 2016, pp. 667-672.
- [2] G. Á and P. Monzón, "Modal analysis of the Uruguayan electrical power system," in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1-6.
- [3] A. Prakasha, "Fundamental Study of Small-Signal Stability of Hybrid Power Systems," Master, Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Delft University of Technology, Netherlands, 2017.
- [4] F. Dussaud, "An Application of Modal Analysis in Electric Power Systems to Study Inter-area Oscillations," Electrical Engineering, KTH Royal Institute Of Technology, Stockholm, Sweden, 2015.
- [5] P. Kundur, *Power System Stability and Control*: McGraw-Hill Education, 1994.
- [6] P. Kundur and e. al, "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 19, May 2004.
- [7] PT. PLN. (Persero). *Rancangan Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2017-2026*.
- [8] M. O. Faruque, Z. Yuyan, and V. Dinavahi, "Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 378-387, 2006.
- [9] DigSILENT. Power Factory. GmbH. *DigSILENT PowerFactory 15.1.2 User's Manual*.
- [10] A. V. Ubisse, "Comparison of DigSILENT, Matlab PST and PSAT for Steady State and Stability Studies on HVAC-HVDC Systems " Master, Electrical Engineering University of Cape Town Cape Town, 2012.