

# Studi Keamanan Pengiriman Daya Pada Sistem Interkoneksi Sumsel – Lampung Dengan Dua Tahap Optimasi

Lukmanul Hakim

*Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung  
Jl. Prof. Dr. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung 35145*

plgsekip@unila.ac.id

**Intisari**---Kebutuhan daya listrik di Propinsi Lampung masih bergantung kepada pengiriman daya dari sistem Interkoneksi Sumbagsel terutama pada waktu beban puncak. Kondisi operasi seperti ini menyebabkan saluran interkoneksi menjadi sangat kritis sehingga gangguan pada saluran interkoneksi dapat mengakibatkan ketidakstabilan operasi mesin-mesin pembangkit yang tersambung ke sistem interkoneksi Sumsel-Lampung. Karenanya sangat penting untuk mengkaji keamanan pengiriman daya melalui sistem interkoneksi ini untuk mencegah kerusakan pada mesin-mesin pembangkit tersebut. Dalam penelitian ini, kami melakukan kajian terhadap keamanan pengiriman daya dengan mempertimbangkan kestabilan transien sudut rotor dari mesin-mesin pembangkit yang tersambung ke sistem interkoneksi Sumsel-Lampung. Permasalahan ini didekati dengan memaksimalkan pengiriman daya dari subsistem Sumsel ke subsistem Lampung. Teknik optimasi yang dipergunakan dalam studi ini adalah metode interior point untuk pemrograman nonlinier dengan iterasi Newton. Simulasi dilakukan untuk dua kondisi yaitu memaksimalkan pengiriman daya tanpa kendala kestabilan transien dan memaksimalkan pengiriman daya dengan mempertimbangkan kendala kestabilan transien. Untuk kondisi pembebanan sistem dalam kajian ini, hasil simulasi menunjukkan, apabila kendala kestabilan transien dipertimbangkan, bahwa maksimal daya yang diizinkan untuk dikirim dari subsistem Sumsel ke subsistem Lampung adalah sekitar 230 MW. Dengan kondisi seperti ini, maka penambahan unit-unit pembangkit di subsistem Lampung menjadi salah satu solusi untuk memperbaiki keamanan operasi sistem interkoneksi Sumsel-Lampung secara keseluruhan.

**Kata Kunci**---keamanan sistem tenaga, pengiriman daya, interkoneksi, kestabilan transien

**Abstract**---During peak load, Lampung subsystem greatly depends on electric power supply from South Sumatra (Sumsel) subsystem through interconnection system at 150 kV. This operating mode causes critical operation of interconnecting line and may lead to unstable operation of generators connected to the system on the occurrence of fault. Hence, it is importance to study power transfer security to prevent further damage to the machines. In this research, we work on power transfer security with respect to rotor angle stability of generators connected to Sumsel-Lampung interconnection system. This problem is formulated by maximizing power transfer from Sumsel to Lampung while meeting rotor angle stability constraints and other operational constraints and solved by applying a Newtonian nonlinear programming primal-dual interior point. Simulation scenarios include power transfer maximization with and without considering rotor angle transient stability. Results on loading condition of this study reveal that maximum allowable transfer is about 230 MW. Therefore, adding new generating units within Lampung area is an alternative solution to improve the overall security operation of the interconnection system.

**Keywords**---power system security, power transfer, interconnection system, transient stability

## I. PENDAHULUAN

Dewasa ini sistem tenaga listrik seringkali beroperasi sangat dekat batas aman operasinya sebagai akibat dari meningkatnya kebutuhan energi listrik dan kerumitan akibat interkoneksi dari beberapa sistem. Untuk menjaga agar sistem tenaga listrik berada dalam kondisi operasi yang aman, maka diadopsilah suatu sistem kendali baik yang bersifat preventif atau pun korektif.

Berdasarkan waktu pelaksanaannya, kendali preventif dilakukan sebelum gangguan benar-benar terjadi dan biasanya dicapai melalui penjadwalan ulang pembangkit, sementara kendali korektif bekerja sesaat setelah gangguan terjadi dengan melepas generator yang kehilangan sinkronisasi dari sistem. Meskipun demikian, semua perhitungan yang diperlukan untuk kedua jenis kendali ini dilakukan sebelum kontingensi.

Beban listrik di Propinsi Lampung hingga saat ini sangat tergantung pada sistem interkoneksi Sumsel – Lampung dimana pada saat waktu beban puncak terdapat transfer daya dari Sumsel ke Lampung hingga kisaran 400 MW. Kondisi ini mengakibatkan pembangkit-pembangkit yang terhubung ke dalam sistem interkoneksi beroperasi pada sekitar batas aman operasinya. Jika sampai terjadi gangguan pada saluran interkoneksi, diperkirakan akan berdampak pada ketidakstabilan transien dan lebih jauh lagi dapat mengakibatkan lepasnya unit pembangkit dari sistem dikarenakan hilangnya sinkronisasi dengan sistem. Lepasnya unit pembangkit dari sistem interkoneksi membuat unit-unit pembangkit yang masih terhubung dengan sistem interkoneksi akan memikul beban yang tadinya dipikul oleh unit pembangkit yang kehilangan sinkronisasi. Pada gilirannya, jika unit-unit pembangkit yang tersisa tidak mampu memikul beban tersebut, maka terjadilah pelepasan beban yang jika tidak diantisipasi dengan tepat bisa berdampak pemadaman total (*total blackout*).

Kendali preventif dengan penjadwalan ulang pembangkitan (*generation rescheduling*) masih merupakan cara yang dipilih untuk memperbaiki keamanan operasi sistem tenaga, baik dalam konteks *steady-state security* atau pun *dynamic security*. Para peneliti sebelumnya telah mencoba mengaplikasikan berbagai metode untuk mencapai keamanan operasi melalui kendali preventif sistem tenaga. Diantaranya adalah penjadwalan pembangkit yang didasarkan atas *Transient Energy Function* (TEF) oleh A. A. Fouad dan T. Jianzhong, 1993 [1] serta A. Bose dan D. H. Kuo, 1995 [2]. M. La Scala et al, 1998 [3] mengembangkan penjadwalan ulang pembangkit dengan aliran daya optimal lalu menguji penjadwalan pembangkitnya dengan kriteria kestabilan transien. M. Pavela et al, 1998 [4] menggunakan metode SIME (*Single Machine Equivalent*) untuk memeriksa kestabilan transien untuk menjadwal ulang pembangkit dengan menurunkan keluaran daya pembangkit yang kritis dan menaikkan keluaran daya pembangkit yang tidak kritis. Kriteria kritisnya diperiksa oleh metode SIME yang sudah mereka kembangkan. Era tahun 2000-

an diawali oleh Gan et al, 2000 [5] yang memasukkan kestabilan transien sebagai kendala di dalam formulasi aliran daya optimal. Di sini, kestabilan transien dilinierisasi sehingga persoalan aliran daya optimalnya dapat diselesaikan dengan pemrograman linier. Iwamoto dan Kato, 2002 [6] mengembangkan metode kendali preventif untuk kestabilan transien untuk nilai waktu pemutusan kritis (*critical clearing time - CCT*) yang diinginkan. Dalam metode ini, mereka menentukan terlebih dahulu hubungan antara CCT dengan sudut rotor generator menggunakan model satu mesin terhubung ke simpul tak hingga (*one machine infinite bus - OMIB*). Nguyen dan Pai, 2003 [7] mengusulkan metode yang didasarkan atas sensitifitas lintasan transien untuk menjadwal ulang keluaran daya unit pembangkit. Fang et al, 2007 mengusulkan penggunaan teknik integrasi mundur untuk mengevaluasi gradien dari indeks performansi kestabilan dan menggunakan indeks ini untuk mengoptimalkan penjadwalan unit pembangkit.

## II. PERUMUSAN MASALAH

Kendali preventif yang dipilih dalam penelitian ini untuk menjaga kondisi operasi yang aman adalah dengan menggunakan pendekatan penjadwalan ulang unit pembangkit (*generation rescheduling*). Dengan pendekatan ini, rumusan permasalahannya menjadi seminimal mungkin penjadwalan ulang keluaran daya dari unit-unit pembangkit yang terhubung dalam sistem interkoneksi Sumsel – Lampung dengan tetap memenuhi batasan-batasan operasional seperti kecukupan daya, kapasitas pembangkit, besaran tegangan pada setiap simpul, dan kestabilan transien.

Dalam penelitian sebelumnya, kami telah mengembangkan metode aliran daya optimal yang mempertimbangkan kestabilan transient. Dalam aliran daya optimal kami, persoalan diselesaikan dengan menggunakan algoritma primal dual interior point untuk pemrograman nonlinier. Namun demikian, dalam penelitian ini, penjadwalan ulang pembangkit didekati dengan model linier yang disesuaikan agar dapat diselesaikan dengan metode aliran daya optimal kami.

Karenanya, kontribusi penelitian ini adalah sebuah model linier penjadwalan pembangkit yang mengakomodasi ketidaklinieran sistem tenaga listrik seperti kendala kestabilan transien dan kendala-kendala nonlinier lainnya dan diselesaikan dengan algoritma interior point. Pendekatan fungsi tujuan dengan model ini memungkinkan metode yang dikembangkan ini dipergunakan dalam kondisi sistem kelistrikan yang telah di-deregulasi dan di-restrukturisasi dimana *model bid-offer* dari para produsen energi listrik dalam hal ini disebut *independent power producer* (IPP) dapat diterapkan.

Dalam penelitian ini persoalan diselesaikan dalam dua tahap optimasi yaitu **Tahap 1** dilakukan maksimalisasi pengiriman daya dari Sumsel ke Lampung tanpa mempertimbangkan batasan dan kendala kestabilan transien serta sudut rotor lalu **Tahap 2** dengan melakukan penjadwalan ulang terhadap keluaran pembangkitan yang diperoleh dari optimasi tahap 1. Penjadwalan ulang pembangkitan pada tahap 2 ini dilakukan dengan mempertimbangkan kendala kestabilan transien dan batasan maksimum sudut rotor.

### III. METODE PENELITIAN

Bentuk umum dari sebuah sistem nonlinier yang diminimalkan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Min: } & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.: } & h(\mathbf{x})=0 \\ & \underline{g} \leq g(\mathbf{x}) \leq \bar{g} \end{aligned} \quad (1)$$

Dimana:

$$\mathbf{x} \equiv \left[ \mathbf{x}^{\text{control}} \mid \mathbf{x}^{\text{state}} \right]^T \in \mathfrak{R}$$

Sistem (1) kemudian dapat ditransformasikan dengan memasukkan vektor slack variable  $(l, u) \in \mathfrak{R}^r$ :

$$\begin{aligned} \text{Min: } & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.: } & h(\mathbf{x})=0 \\ & g(\mathbf{x}) - \underline{g} - l = 0 \\ & \bar{g} - g(\mathbf{x}) + u = 0 \\ & (l, u) \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Untuk sistem (2), fungsi Lagrange-nya adalah:

$$\begin{aligned} F(x, l, u; y, z, w, \tilde{z}, \tilde{w}) \equiv & f(\mathbf{x}) - y^T h(\mathbf{x}) \\ & - z^T [g(\mathbf{x}) - \underline{g} - l] \\ & - w^T [g(\mathbf{x}) - \bar{g} + u] \\ & - \tilde{z}^T l - \tilde{w}^T u \end{aligned} \quad (3)$$

Sistem pada persamaan (3) ini kemudian diselesaikan dengan metode interior point untuk pemrograman nonlinier berdasarkan iterasi Newton.

Sehingga pada penelitian ini, formulasi *generic*-nya adalah sebagai berikut:

#### Tahap I:

Fungsi Tujuan	:	<b>Maksimalkan Pengiriman Daya dari Sumsel ke Lampung</b>
Terkendal a Oleh	:	1. Persamaan Kesetimbangan Daya ( <i>Power Balance Equation</i> )
	.	2. Kapasitas Daya Generator
	.	3. Magnitude Tegangan pada Setiap Bus

#### Tahap II:

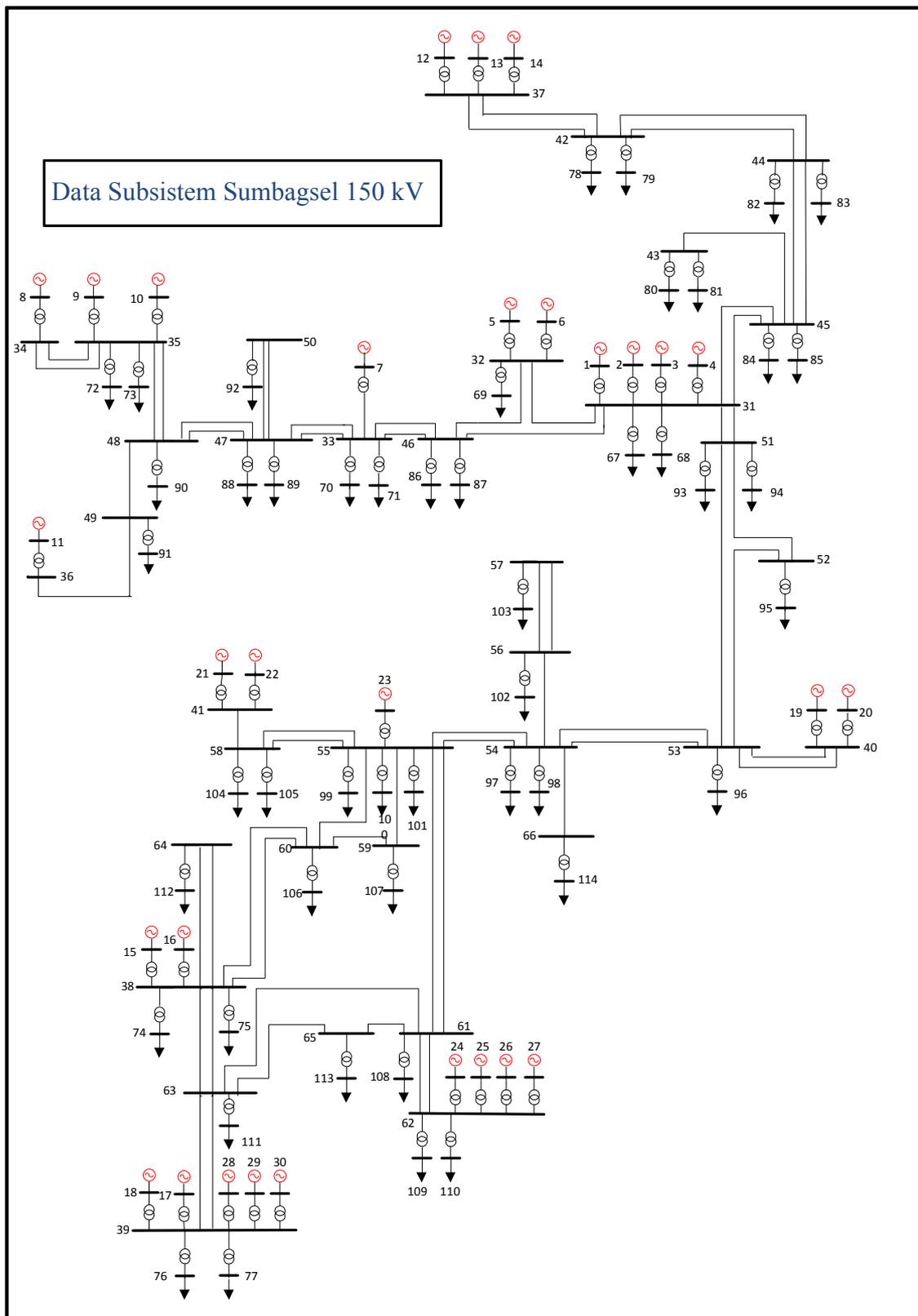
Fungsi Tujuan	:	<b>Minimalkan Perubahan Output Daya Aktif Generator</b>
Terkendal a Oleh	:	1. Persamaan Kesetimbangan Daya ( <i>Power Balance Equation</i> )
	.	2. Persamaan Nilai Awal ( <i>Initial Value Equation</i> )
	.	3. Persamaan Ayunan Sudut Rotor ( <i>Rotor Angle Swing Equation</i> )
	.	4. Kapasitas Daya Generator
	.	5. Magnitude Tegangan pada Setiap Bus
	.	6. Maksimum Sudut Rotor Generator yang Diizinkan

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam studi ini, sistem kelistrikan yang ditinjau adalah sistem interkoneksi Sumsel – Lampung pada tingkat tegangan 150 kV. Kami mengupayakan pemodelan sistem interkoneksi ini serinci mungkin sesuai dengan ketersediaan data dan keterbatasan waktu. Patut dicatat di sini adalah bahwa subsistem Bengkulu dan subsistem Jambi masuk ke dalam subsistem Sumsel. Gambar 1 adalah one line diagram sistem interkoneksi dalam studi ini. Total generator yang tersambung dalam studi ini adalah 30 generator dengan jumlah simpul/node adalah 114 bus.

Unit pembangkit dengan kapasitas terbesar adalah PLTU Bukit Asam dan dalam studi ini, PLTU Bukit Asam dipilih sebagai Slack Bus. Jumlah keseluruhan generator dalam studi ini adalah 30 mesin. Dengan jumlah mesin sebanyak ini, mengakibatkan jumlah kendala

serta jumlah variable yang diselesaikan pada setiap iterasi menjadi sangat besar yaitu 2 x total generator atau 60 variable dan persamaan untuk pembangkitan daya reaktif, ditambah 4 x total simpul atau 456 variable dan kendala persamaan aliran daya, 4 x 4 x total generator x total langkah integrasi (*trapezoidal rule*) atau sekitar 96000 variable dan kendala pada bagian persamaan ayunan untuk penyelesaian sudut rotor selama periode transien, ditambah lagi 3 x total generator atau 90 variable dan persamaan untuk kendali preventif daya aktif generator, ditambah 4 x total generator dan 4 x total generator atau 2 x 4 x total generator atau 240 variable dan persamaan untuk persamaan nilai awal. Dengan demikian, setiap iterasi akan menyelesaikan 96846 variabel x 96846 persamaan.



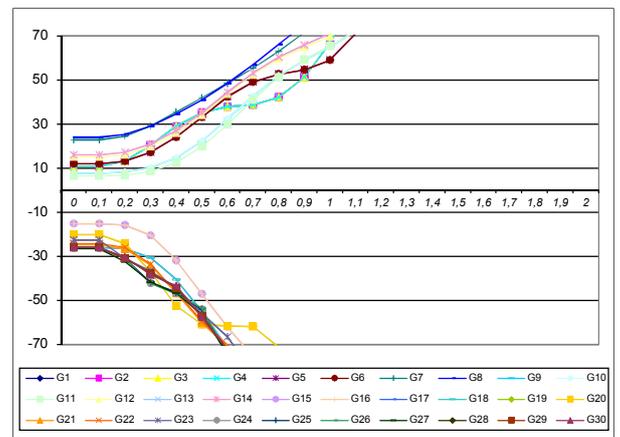
Gbr. 1 *One line diagram* sistem interkoneksi Sumbagsel (Jambi - Sumsel - Bengkulu - Lampung)

Secara keseluruhan, untuk sistem interkoneksi Sumsel – Lampung yang dijadikan obyek penelitian di sini, total beban adalah 1018 MW dan total daya mampu pembangkitan

1360 MW. Dengan kondisi seperti ini, terjadi sebesar 305 MW yang dikirim dari subsistem Sumsel ke subsistem Lampung. Namun jika terjadi gangguan, semua mesin-mesin

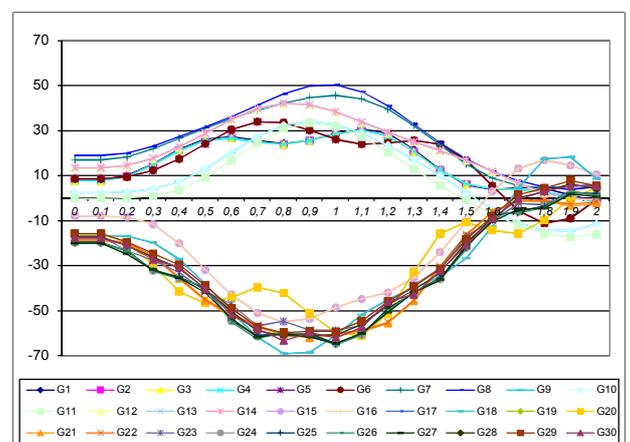
pembangkit akan mengalami kehilangan sinkronisasi yang berarti ketidakstabilan. Salah satu metode dalam meng-assess kestabilan transien adalah melalui *time domain simulation*. Untuk itu, urutan kejadian (*sequence of events*) yang menggambarkan perubahan *network topology* harus dibangun seakurat mungkin. Pada saat  $t = 0$  detik, sistem dalam keadaan operasi normal dan setimbang. Lalu disimulasikan gangguan tidak setimbang terjadi pada  $t = 100$  milidetik. 200 milidetik setelah gangguan, diasumsikan peralatan proteksi bekerja mengisolasi gangguan. 200 milidetik setelah gangguan diisolasi, saluran kembali beroperasi dengan mode sirkit tunggal setimbang dimana satu sirkit dilepas dari sistem.

Dalam studi ini, kriteria kestabilan transien menggunakan batas sudut rotor yang menyimpang dari center of angle sejauh 70 derajat. Penentuan sudut 70 derajat ini lebih ketat dibandingkan kriteria yang umum digunakan oleh operator yaitu 90 derajat. Dalam kajian kestabilan transien menggunakan metode kriteria sama luas (*equal area criterion*) juga menunjukkan bahwa jika sampai sudut rotor generator melampaui batas 90 derajat, maka sudut rotor akan terus menaik dan generator tersebut tidak akan kembali ke titik operasi stabilnya. Hal ini dikonfirmasi pada gambar 2, dimana sebahagian generator mengalami kenaikan sudut rotor generator melampaui batas kestabilan yaitu 70 derajat dan sebahagian lainnya melampaui batas -70 derajat. Ini berarti, ada dua kelompok generator yang selisih sudut rotornya semakin menjauh yang menunjukkan hilangnya sinkronisasi di antara kedua kelompok generator ini.

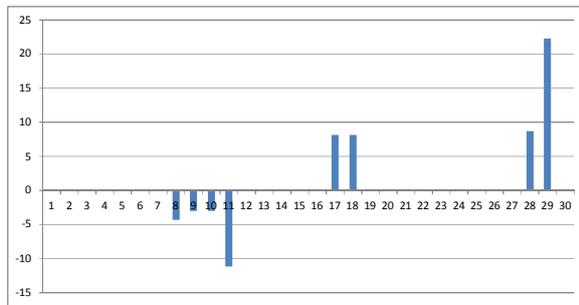


Gbr. 2 Rotor angle plot untuk transfer daya maksimum 305 MW

Apabila dikenakan batas maksimum dan minimum sudut rotor  $\pm 70$  derajat, maka tentunya ada penurunan transfer daya maksimum dari subsistem Sumsel ke subsistem Lampung menjadi sebesar 230 MW saja. Namun demikian, system menjadi beroperasi dalam wilayah aman dimana jika terjadi gangguan pada saluran interkoneksi. Ini ditunjukkan pada gambar 3, bahwa selisih sudut rotor antara kedua kelompok generator ini tidak menjauh. Untuk kriteria kestabilan ayunan pertama (*first swing stable*), time domain simulation hingga 2 detik cukup untuk mewakili kondisi kestabilan transien pada ayunan pertama. Jika *multiple swing stability* yang akan dinilai, maka tentunya memerlukan pemodelan yang lebih rinci atas perilaku dinamis komponen sistem tenaga pada saat dan setelah gangguan terjadi. Untuk itu, maka waktu simulasi mesti diperpanjang hingga 10 detik atau 30 detik.



Gbr. 3 Rotor angle plot untuk transfer daya maksimum 230 MW



Gbr. 4 Perubahan pembangkitan daya aktif (MW) pada generator

Untuk memelihara keamanan operasi jika terjadi gangguan pada saluran interkoneksi, pembangkitan daya aktif di Borang dan Talang Duku (Bus 8, 9, 10, 11) harus diturunkan hingga 10 MW. Untuk mengkompensasi penurunan daya aktif pada pembangkit di wilayah pengirim (Subsistem Sumsel), maka pembangkit di Tarahan (lama) yang terdiri dari 1 PLTG dan 7 PLTD harus dinaikkan. Perubahan jadwal ini juga membawa konsekuensi kenaikan total biaya pembangkitan daya aktif pada sistem interkoneksi Sumsel – Lampung. Perubahan pembangkitan ini terlihat pada gambar 4.

## V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, sistem interkoneksi Sumsel – Lampung memikul beban sebesar 1018 MW dan untuk pembebanan sebesar ini, maka daya sebesar 305 MW harus dikirim dari subsistem Sumsel ke subsistem Lampung. Pengiriman daya sebesar ini membawa akibat ketidakstabilan transien dimana rotor angle separation antara dua kelompok generator semakin membesar jika saluran interkoneksi mengalami gangguan. Agar sistem interkoneksi ini beroperasi dengan aman dimana rotor angle separation antara kedua kelompok generator ini tidak melampaui batas  $\pm 70$  derajat, maka harus dilakukan penjadwalan ulang unit-unit pembangkit yang terhubung ke sistem. Total perubahan active power generation untuk menarik sistem ke wilayah operasi yang aman adalah 69 MW yang terdistribusi antara pembangkit di wilayah pengirim (subsistem Sumsel) dan pembangkit di wilayah penerima (subsistem Lampung).

Untuk jangka panjang, solusi atas persoalan keamanan operasi ini adalah dengan

menambah unit-unit pembangkit baru di wilayah subsistem Lampung. Penambahan unit pembangkit baru ini akan menurunkan ketergantungan subsistem Lampung terhadap saluran interkoneksi. Untuk kondisi pembebanan pada penelitian ini, maka pembangunan unit pembangkit baru dengan kapasitas di atas 200 MW akan menurunkan pengiriman daya melalui saluran interkoneksi dan karenanya sistem akan beroperasi dalam wilayah yang aman.

## REFERENSI

- [1] A. Fouad, T. Jianzhong, "Stability Constrained Optimal Rescheduling of Generation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 8, No. 1, Feb. 1993, pp. 105 – 112.
- [2] H. Kuo, A. Bose, "A Generation Rescheduling Method to Increase the Dynamic Security of Power Systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, Feb. 1995, pp. 68 – 76.
- [3] M. La Scala, M. Trovato, C. Antonelli, "On-line Dynamic Preventive Control: an Algorithm for Transient Security Dispatch," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 13, No. 2, May 1998, pp. 601 – 608.
- [4] D. Ruiz-Vega, A. L. Bettioli, D. Ernst, L. Wehenkel, M. Pavella, "Transient Stability-Constrained Generation Rescheduling," *Proc. of Bulk Power Systems Dynamics and Control IV: Restructuring*, Santorini, Greece, Aug. 23 – 28, 1998, pp. 105 – 115.
- [5] D. Gan, R. J. Thomas, R. D. Zimmerman, "Stability-Constrained Optimal Power Flow," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 15, No. 2, May 2000, pp. 535 – 540.
- [6] Y. Kato, S. Iwamoto, "Transient Stability Preventive Control for Stable Operating Condition with Desired CCT," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 17, No. 4, Nov. 2002, pp. 1154 – 1161.
- [7] T. B. Nguyen, M. A. Pai, "Dynamic Security-Constrained Rescheduling of Power Systems Using Trajectory Sensitivities," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 18, No. 2, May 2003, pp. 848 – 854.
- [8] Z. Fang, Y. Xiaodong, S. Jingqiang, Y. Shiqiang, Z. Yao, "An Optimal Generation Rescheduling Approach for Transient Stability Enhancement," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 22, No. 1, Feb. 2007, pp. 386 – 394.

**Lukmanul Hakim** - Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Elektro Universitas Sriwijaya, 1996, *Master of Science in Electrical Power Engineering* dari University of Manchester Institute of Science and Technology, 1999 dan *Doctor of Engineering in Power Systems Engineering* dari Hiroshima University, 2010. Dr. Hakim adalah anggota IEEE.

