



## SKEMA PELEPASAN BEBAN UNTUK PENINGKATAN KEMAMPUAN PENGIRIMAN DAYA PADA SISTEM INTERKONEKSI TENAGA LISTRIK SUMBAGSEL

Lukmanul Hakim<sup>1</sup>, Bagus Sulisty<sup>2</sup>, Joni Efwan<sup>1</sup>,  
Herri Gusmedi<sup>1</sup>, Nining Purwasih<sup>1</sup>, Khairudin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Jurusan Teknik Elektro, FT Universitas Lampung,  
Bandar Lampung, 35145*

<sup>2</sup> *UPT Pusat Komputer, Universitas Lampung,  
Bandar Lampung, 35145  
Email: plgsekip@unila.ac.id*

### ABSTRAK

Dalam suatu system tenaga listrik yang terinterkoneksi, kemampuan pengiriman daya sangat ditentukan oleh batasan keamanan operasi sistem. Batasan keamanan operasi sistem tersebut meliputi besaran tegangan pada setiap simpul harus dijaga supaya berada dalam batas tertentu, kapasitas mampu pembangkit, kapasitas thermal saluran transmisi serta kestabilan transien. Dari kajian terdahulu terungkap bahwa kendala kestabilan transien dalam hal ini kestabilan sudut rotor sangat menentukan kemampuan pengiriman daya. Untuk memperbaiki kemampuan pengiriman daya ini, maka kendala kestabilan transien mesti diamankan salah satunya adalah melalui kendali korektif. Dalam penelitian ini, kendali korektif yang dikaji adalah skema pelepasan beban yang bekerja sesaat setelah terjadi gangguan. Dengan bekerjanya kendali korektif ini, maka kendala kestabilan transien yang diindikasikan oleh kestabilan sudut rotor generator dapat diamankan sehingga meningkatkan kemampuan pengiriman daya. Penelitian ini menunjukkan potensi penerapan skema pelepasan beban tersebut untuk peningkatan kemampuan pengiriman daya. Simulasi dilakukan pada system interkoneksi Sumbagsel yang meliputi wilayah Sumsel, Bengkulu dan Lampung.

**Kata Kunci:** *Pengiriman daya, Sistem interkoneksi tenaga listrik, Kestabilan transien, Pelepasan beban*

### PENDAHULUAN

Kemampuan pengiriman daya dalam suatu sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi ada ukuran yang menunjukkan kemampuan sistem tersebut dalam mengirimkan daya dari satu wilayah atau subsistem interkoneksi ke wilayah atau subsistem interkoneksi lainnya secara handal dan aman melalui saluran interkoneksi yang telah ditentukan untuk kondisi sistem tertentu. Kemampuan pengiriman daya atau *powertransfer capability* ini sangat penting dalam

menjamin keamanan operasi sistem interkoneksi. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik, maka operasi sistem tenaga listrik dan kemampuan sistem interkoneksi dalam mengirimkan daya semakin mendekati batas amannya.

Di antara batas-batas keamanan operasi yang membatasi pengiriman daya adalah kestabilan transien sudut rotor generator. Hingga saat ini, para peneliti bidang ketenagalistrikan telah mampu mengintegrasikan kestabilan transien sudut rotor ke dalam formulasi optimasi operasi sebagaimana yang dilakukan oleh Bettiol *et al* (1999) dan De Tuglie *et al* (2000). Dalam upaya menjaga kestabilan transien, beberapa penelitian terdahulu mengungkapkan kelayakan skema pelepasan beban sebagai kendali korektif. Untuk penerapan praktisnya, operator sistem tenaga perlu membuat kontrak khusus dengan konsumen (beban) yang akan diputus suplainya dari sistem sebagai kendali korektif ini. Mekanisme ini dikenal sebagai *system protection scheme*. Giannuzzi *et al* (2005) mengungkapkan aplikasi pelepasan beban ini sebagai teknik kendali korektif pada sistem tenaga listrik di Italia.

Mengingat pentingnya perhitungan kemampuan pengiriman daya yang mengakomodasi kestabilan transien sebagai salah satu kendala yang membatasi serta penggunaan mekanisme pelepasan beban sebagai sarana kendali korektif, maka dalam makalah ini kami mengusulkan suatu skema pelepasan beban yang memungkinkan pengiriman daya yang aman. Metode yang dikembangkan di sini adalah berdasarkan aliran daya optimal yang terkendala oleh kestabilan transien. Teknik optimisasi yang diadopsi adalah metode interior point yang dikembangkan oleh Wei *et al* (1999) untuk pemrograman nonlinier. Sebagai sistem uji digunakan sistem interkoneksi Sumatera Bagian Selatan yang meliputi wilayah Bengkulu, Sumatera Selatan dan Lampung dimana koridor pengiriman daya yang dikaji adalah dari arah Sumatera Selatan ke Lampung.

## **Kestabilan Transien**

### **Model Kestabilan Transien**

Dalam penelitian ini, model klasik generator sebagaimana yang diungkapkan oleh Pai (1981) diadopsi sebagai kendala dalam model optimisasi nonlinier. Model ini

memungkinkan perilaku generator selama periode transien diwakilkan dengan sumber tegangan dengan magnitudo tetap di belakang reaktansi efektif  $x_d'$ . Persamaan (1) adalah model dinamis persamaan ayunan untuk generator dalam periode transien.

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_i &= \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i &= \frac{\omega_0}{2H_i}(P_{mi} - P_{ei}) \\ i &\in S_G\end{aligned}\quad (1)$$

Keterangan :  $\delta_i$  : rotor generator  $i$

$\omega_i$  : kecepatan rotor generator  $i$

$\omega_0$  : kecepatansinkron generator

$H_i$  : konstantainersia generator  $i$  dalam detik

$P_{mi}$  : masukandayamekanis generator  $i$

$P_{ei}$  : keluarandayaelektris generator  $i$

Keluaran daya elektrik generator  $i$  dapat dihitung dengan persamaan (2) berikut:

$$P_{ei} = E_i'^2 G_{ii}' + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{ng} E_i' E_j' [G_{ij}' \cos \delta_{ij} + B_{ij}' \sin \delta_{ij}] \quad (2)$$

Pada persamaan (2),  $Y_{ij}' = G_{ij}' + jB_{ij}'$  adalah driving point admittance ( $i=j$ ) dan transfer admittance ( $i \neq j$ ).  $Y_{ij}'$  akan berubah nilainya jika terjadi perubahan pada jaringan akibat gangguan atau operasi pensaklaran. Perubahan sudut rotor generator selama periode transien dihitung dengan metode *center of inertia* (COI). Sudut rotor generator relatif terhadap COI digunakan sebagai indikasi apakah sistem stabil atau tidak.  $M$  adalah inersia mesin.

$$\delta_{COI} = \left( \sum_{i=1}^{ng} M_i \delta_i \right) / \left( \sum_{i=1}^{ng} M_i \right) \quad (3)$$

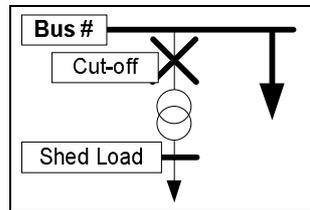
Dimana,  $\delta_{COI}$  adalah posisi COI

$$M_i = \frac{2H_i}{\omega_0}$$

### Model Pelepasan Beban

Beban dimodelkan sebagai impedansi tetap pada periode transien dan daya tetap pada kondisi tunak. Pelepasan beban dicapai dengan memotong saluran yang menghubungkan beban yang akan dilepas. Hal ini membawa perubahan pada

jaringan dan karenanya  $Y'_{ij}$  harus dihitung ulang untuk mengakomodasi perubahan ini. Model pelepasan beban disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Model PelepasanBeban

## METODE PENYELESAIAN

### Maksimalisasi Pengiriman Daya

Kemampuan pengiriman daya dimodelkan sebagai maksimalisasi aliran daya dari sumber ke beban:

$$\text{Maksimumkan : } \sum_{i \in S_{SA}, j \in S_{RA}} P_{ij} \quad (4)$$

Terkendala dengan

(a) Persamaan aliran daya:

$$\begin{aligned} V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + P_{Li} - P_{Gi} &= 0 \\ V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + Q_{Li} - Q_{Ri} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

(b) Persamaan ayunan:

Dengan mengadopsi aturan integral implisit, Persamaan (1) dapat didiskritisasikan pada setiap interval waktu. Karenanya, persamaan ayunan dapat diubah ke bentuk persamaan aljabar yang secara numeris adalah ekuivalen sebagaimana yang dipaparkan oleh Dommel dan Sato (1972).

$$\begin{aligned} \delta_i^t - \delta_i^{t-1} - \frac{\Delta t}{2} [(\omega_i^t - \omega_0) + (\omega_i^{t-1} - \omega_0)] &= 0 \\ \omega_i^t - \omega_i^{t-1} - \frac{\Delta t}{2} \frac{\omega_0}{2H_i} [(P_{mi} - P_{ei}^t) + (P_{mi} - P_{ei}^{t-1})] &= 0 \quad (6) \\ i \in S_G, t \in S_T \end{aligned}$$

Dimana:

$$P_{ei}^t = E_i'^2 G_{ii}' + E_i' \sum_{j \neq i}^{ng} E_j' (G_{ij}' \cos \delta_{ij}^t + B_{ij}' \sin \delta_{ij}^t)$$

$$P_{ei}^{t-1} = E_i'^2 G_{ii}' + E_i' \sum_{j \neq i}^{ng} E_j' (G_{ij}' \cos \delta_{ij}^{t-1} + B_{ij}' \sin \delta_{ij}^{t-1})$$

Dalam penelitian ini, kami menggunakan interval waktu 0.01 detik.

(c) Persamaan Nilai Awal

$$\begin{aligned} E'V_g \cos(\delta^0 - \theta_g) - x_d' Q_g - V_g^2 &= 0 \\ E'V_g \sin(\delta^0 - \theta_g) - x_d' P_g &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

(d) Batas Operasi Sistem Tenaga Listrik

$$\begin{aligned} P_{Gi} &\leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} & i \in S_G \\ Q_{Ri} &\leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri} & i \in S_R \\ V_i &\leq V_i \leq \bar{V}_i & i \in S_N \end{aligned} \quad (8)$$

$P_{Gi}$  dan  $Q_{Ri}$  adalah *control variables*.

(e) Batas Sudut Rotor Generator

$$\begin{aligned} \underline{\delta} \leq \delta_i^0 - \delta_{COI}^0 \leq \bar{\delta}, \quad \underline{\delta} \leq \delta_i^t - \delta_{COI}^t \leq \bar{\delta} \\ i \in S_G, \quad t \in S_T \end{aligned} \quad (9)$$

### Metode Interior Point

$$\begin{aligned} \text{Minimalkan} \quad & f(x) \\ \text{Terkendala} \quad & h(x) = 0 \\ & \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \end{aligned} \quad (10)$$

Dengan memasukkan vektor *slack variable*  $l, u \in \mathbb{R}^m$ , maka sistem (10) menjadi

$$\begin{aligned} \text{Minimalkan} \quad & f(x) \\ \text{Terkendala} \quad & h(x) = 0 \\ & g(x) - \underline{g} - l = 0 \\ & g(x) - \bar{g} + u = 0 \\ & (l, u) \geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Fungsi Lagrange untuk sistem (11) adalah

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(x, l, u, y, z, w, \tilde{z}, \tilde{w}) \\ \equiv f(x) - y^T h(x) - z^T [g(x) - \underline{g} - l] - w^T [g(x) - \bar{g} + u] - \tilde{z}^T l - \tilde{w}^T u \end{aligned} \quad (12)$$

$y, z, w, \tilde{z}, \tilde{w}$  adalah pengali Lagrange dan  $\tilde{z} = -, \tilde{w} = -$ .

Fungsi Lagrange di atas lalu diturunkan Optimal Karush-Kuhn-Tucker dengan perturbasi. Dengan menerapkan Metode Newton padaturunan tersebut, diperoleh persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} H(\bullet) & J(x)^T \\ J(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \psi(\bullet, \mu) \\ \phi \end{bmatrix} \quad (13)$$

dimana,

$$\begin{aligned} H(\bullet) &\equiv \left[ \sum_{i=1}^m y_i \nabla^2 h_i(x) + \sum_{j=1}^r (z_j + w_j) \nabla^2 g_j(x) \right. \\ &\quad \left. - \nabla^2 f(x) \right] \\ &\quad + \sum_{j=1}^r \left( \frac{w_j}{u_j} - \frac{z_j}{l_j} \right) \nabla g_j(x) \nabla g_j(x)^T \\ J(x) &\equiv \nabla h(x)^T \\ \psi(\bullet, \mu) &\equiv \nabla h(x)y - \nabla f(x) \\ &\quad + \nabla g(x) [U^{-1}WL_{w_0} - L^{-1}ZL_{z_0} \\ &\quad - \mu(U^{-1} - L^{-1})e] \\ \phi &\equiv h(x) \end{aligned}$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengiriman daya dalam suatu sistem interkoneksi dibatasi oleh kendala-kendala di antaranya adalah kendala kestabilan transien. Untuk mengeliminir kendala kestabilan transien, maka diperkenalkan suatu kendali korektif dalam hal ini adalah pelepasan beban. Dengan demikian, diharapkan kendala kestabilan transien tidak lagi secara ketat membatasi pengiriman daya dan karenanya operator sistem tenaga dapat menjadwalkan pengiriman daya yang lebih besar.

Mekanisme pelepasan beban untuk kendali korektif kestabilan transien ini kemudian disimulasikan pada sistem interkoneksi Sumatera Bagian Selatan (Sumbagsel). Total pembangkitan daya aktif (daya mampu) yang dipertimbangkan dalam studi ini adalah 1360,46 MW dan total beban adalah 1017,96 MW. Dengan kondisi seperti, lebih dari 200 MW daya listrik harus dikirim oleh wilayah Sumatera Selatan ke wilayah Lampung untuk memenuhi kebutuhan beban. Tabel 1 memberikan gambaran umum kondisi daya mampu pembangkitan Sumbagsel.

Sedangkan Tabel 2 memberikan gambaran pembebanan pada sistem Sumbagsel yang dikaji dalam penelitian ini. Gambar 2 adalah sistem interkoneksi Sumbagsel yang dikaji dalam penelitian ini.

Tabel 1. Data Pembangkitan Sumatera Bagian Selatan(Sumbagsel) dalam penelitian ini

No	Provinsi	Daya Mampu	
		Aktif (MW)	Reaktif (Mvar)
1	Sumatera selatan	678	84,81
2	Bengkulu	210	55,33
3	Lampung	472,76	74,65
Jumlah		1360,46	214,79

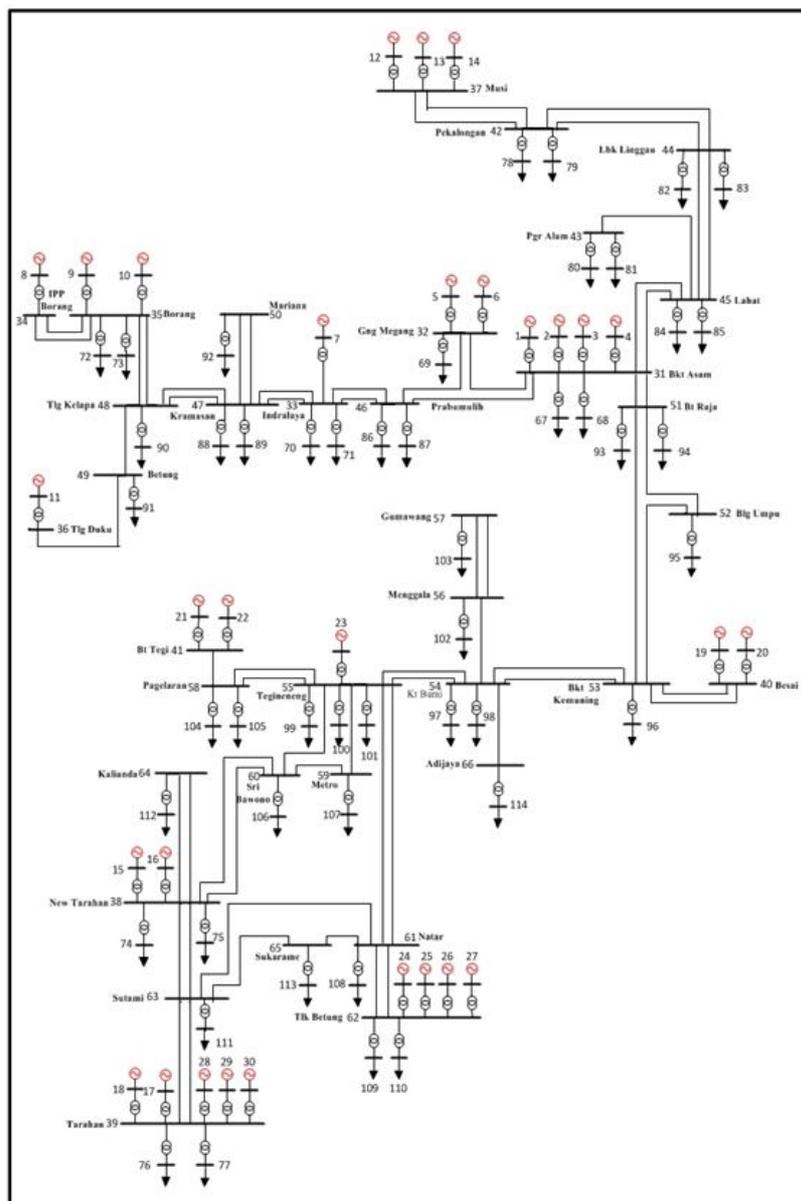
Tabel 2. Data Pembebanan Sumatera Bagian Selatan(Sumbagsel) dalam penelitian ini

No	Provinsi	Daya	
		Aktif (MW)	Reaktif (Mvar)
1	Sumatera selatan	481,69	213,3
2	Bengkulu	73,06	35,39
3	Lampung	463,21	274,35
Jumlah		1017,96	523,04

Asumsi yang digunakan dalam studi ini adalah bahwa Sistem Interkoneksi Sumbagsel sedang beroperasi dalam mode islanding yaitu terpisah dari Sistem Interkoneksi Sumatera. Koridor interkoneksi yang dimaksimalkan aliran dayanya adalah link sirkuit ganda dari Bukit Kemuning ke Kotabumi. Gangguan tiga fasa simetris pada salah satu sirkuit disimulasikan terjadi pada koridor interkoneksi ini. 200 ms setelah gangguan, diasumsikan peralatan proteksi bekerja dengan melepas sirkuit yang mengalami gangguan. 300 ms setelah gangguan, kendali korektif berupa pelepasan beban bekerja membawa sistem ke kondisi stabil. Semua asumsi ini kemudian diakomodir dalam simulasi.

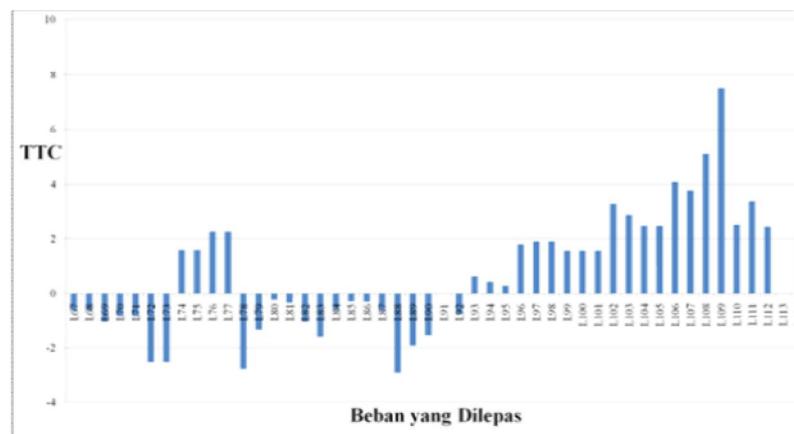
Hasil simulasi menunjukkan bahwa jika kestabilan transien tidak diperhitungkan (*base case*) dalam maksimalisasi aliran daya dari Sumsel ke Lampung, maka sistem interkoneksi memiliki kemampuan untuk mengirimkan daya sebesar 278,68 MW untuk kondisi pembebanan seperti pada tabel 2. Jika kemudian, koridor interkoneksi mengalami gangguan (dalam hal ini gangguan hubung

singkat tiga fasa simetris), maka generator-generator pada sistem interkoneksi ini, terutama pada wilayah Sumsel akan mengalami ketidakstabilan. Agar sistem tetap berada dalam kondisi stabil jika terjadi gangguan yang diasumsikan terjadi ini, maka unit-unit pembangkit harus dijadwal ulang. Besarnya penjadwalan ulang ini diperoleh dengan memasukkan kestabilan transien sebagai kendala. Hal ini mengakibatkan terjadi penurunan kemampuan pengiriman daya menjadi 236,96 MW jika terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa simetris pada satu sirkuit koridor interkoneksi Bukit Kemuning ke Kotabumi. Gambar 1 merupakan diagram satu garis sistem interkoneksi Sumbagsel.



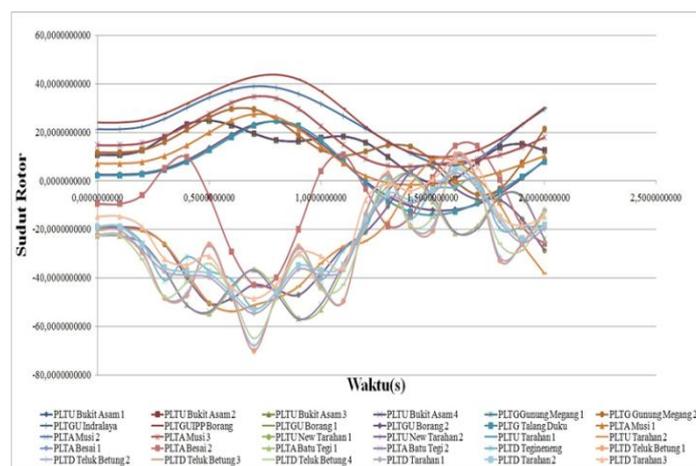
Gambar2. Diagram Satu Garis Sistem Interkoneksi Sumbagsel

Peningkatan kemampuan pengiriman daya, dapat dicapai dengan mengaplikasikan pelepasan beban untuk asumsi kontingensi di atas. Gambar 3 menunjukkan pengaruh pelepasan beban terhadap perbaikan kemampuan pengiriman daya dari Sumsel ke Lampung. Dari gambar ini juga terlihat bahwa skema pelepasan beban pada wilayah Lampung jika terjadi gangguan yang diasumsikan di atas, memberikan kontribusi positif bagi kemampuan pengiriman daya. Hal sebaliknya terjadi jika yang dilepas adalah beban pada wilayah Sumsel. Skema pelepasan beban pada wilayah Sumsel memberikan kontribusi negatif terhadap kemampuan pengiriman daya dari Sumsel ke Lampung.



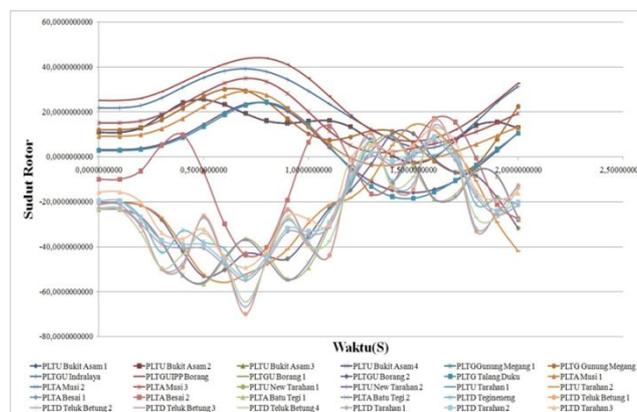
**Gambar 3.** Efek Pelepasan Beban Terhadap Perbaikan Kemampuan Pengiriman Daya

Gambar 4 menunjukkan perubahan sudut rotor untuk kondisi dimana kemampuan pengiriman daya dari Sumsel ke Lampung dibatasi oleh kestabilan transien.



**Gambar 4.** Perubahan sudut rotor tanpa mempertimbangkan pelepasan beban

Pada kondisi ini, tidak ada kendali korektif yang diadopsi, namun demikian kestabilan transien tetap dapat dijaga dengan kompensasi rendahnya kemampuan pengiriman daya menjadi hanya sebesar 236,96 MW atau lebih rendah sekitar 42 MW dari kondisi *base case*. Dengan menerapkan pelepasan beban pada wilayah Lampung jika terjadi kontingensi, maka kemampuan pengiriman daya menjadi lebih baik yaitu sekitar 244 MW atau lebih rendah sekitar 34 MW saja. Ini menunjukkan perbaikan dibandingkan dengan kasus dimana kendali korektif tidak dipertimbangkan. Sudut rotor generator pun masih tetap berada dalam batasan kestabilannya sebagaimana terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perubahan sudut rotor dengan mempertimbangkan pelepasan sebahagian beban Teluk Betung

## KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa kendali korektif seperti pelepasan beban pada wilayah penerima dalam suatu sistem interkoneksi dapat memperbaiki kemampuan pengiriman daya yang terkendala oleh kestabilan transien. Sebaliknya, pelepasan beban pada wilayah pengirim akan memberikan kontribusi negative terhadap kemampuan pengiriman daya. Hal ini ditunjukkan pada kemampuan pengiriman daya dari Sumsel ke Lampung yang terkendala oleh kestabilan transien akibat gangguan hubung singkat tiga fasa simetris pada salah satu sirkuit dari koridor interkoneksi Bukit Kemuning – Kotabumi. Untuk kelayakan secara ekonomis, mengingat pelepasan beban ini berakibat pemadaman pada sebahagian beban listrik, perlu dikaji lebih lanjut mekanisme kompensasi

terhadap pelanggan. Aspek stokastik perlu juga dipertimbangkan dalam analisis ekonomis tersebut dengan mempertimbangkan jenis dan frekwensi gangguan yang sering terjadi serta pengaruhnya terhadap kemampuan pengiriman daya dari Sumsel ke Lampung.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bettiol, A.L., Wehenkel, L., Pavella, M. 1999. *Transient Stability-Constrained Maximum Allowable Transfer*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, 2, pp 654-659.
- De Tuglie, E., Dicorato, M., La Scala, M., Scarpellini, P. 2000. *A Corrective Control for Angle and Voltage Stability Enhancement on the Transient Time-Scale*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, 4, pp 1345-1353.
- Dommel, H.W., Sato, N. 1972. *Fast Transient Stability Solutions*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, 4, pp 1643-1650.
- Giannuzzi, G., Lucarella, D., Massucco, S., Pozzi, M., Sforza, M., Silvestro, F., 2005. *Advanced Load-Shedding Methodology and Architecture for Normal and Emergency Operation of the Italian Power System*, Proc. of IEEE PES General Meeting, Vol. 2, pp 1563-1569.
- Pai, M.A. 1981. *Power System Stability*, North-Holland Publishing Co.
- Wei, H., Sasaki, H., Kubokawa, J., Yokoyama, R. 1998. *An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow with a Novel Data Structure*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, 3, pp 870-877.