

# Studi Kemampuan Transfer Daya Maksimum Dengan Kendala Stabilitas Tegangan Pada Interkoneksi Sumbagsel

Jaka Wibowo, Lukmanul Hakim, Endah Komalasari

Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung  
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung 35145  
[jakawibowoelektro6unila@gmail.com](mailto:jakawibowoelektro6unila@gmail.com)

---

## Abstrak

Suatu sistem interkoneksi memungkinkan suatu wilayah yang kekurangan energi listrik akan dapat terpenuhi kebutuhannya dari pasokan energi listrik yang dikirimkan oleh wilayah dengan daya pembangkitan berlebih. Pengiriman daya pada sistem interkoneksi secara kontinu dengan baik memerlukan suatu sistem yang handal. Proses transfer daya antar wilayah pada sistem interkoneksi agar dapat terpenuhi dengan baik maka memerlukan suatu perencanaan dan studi tentang pengaruh perubahan beban pada sistem dengan tetap menjaga batas toleransi nilai tegangan dalam kondisi yang masih diizinkan dalam pengiriman daya.

Metode yang digunakan untuk menyelesaikan aliran daya pada tugas akhir ini menggunakan solusi *Continuation Power Flow* (CPF) pada *toolbox* PSAT 2.1.6 Matlab dengan langkah prediksi dan koreksi untuk kenaikan  $\lambda$  (faktor pengali kenaikan beban). Untuk skenario simulasi program, dipilih dengan menambahkan beban sebesar 10 MW di setiap beban baik saat luar waktu beban puncak (LWBP) maupun saat waktu beban puncak (WBP) pada sistem Lampung. Transfer daya maksimum saat LWBP dan WBP terjadi pada penambahan beban sebesar 140 MW dengan nilai daya terbesar terdapat pada saluran yang menghubungkan Baturaja-Bukit Kemuning (51-53) sebesar 336,6633 MW (LWBP) dan 324,4741 MW (WBP).

Kata kunci : Interkoneksi, Transfer daya, *Continuation Power Flow* (CPF)

---

## Abstract

An interconnection system allows a region with lack of electricity supplied by the region with excess power. Power distribution on continue interconnection system in good condition requires a reliable system. The process of power transfer between regions in order to interconnect the system met with both the planning and requires a study of the effect of changes in the load on the system while maintaining the tolerance limit voltage value in a condition that is still allowed in the delivery of power.

The method used to solve power flow in this paper using the solution from Continuation Power Flow (CPF) on PSAT 2.1.6 Matlab toolbox with prediction and correction steps to determine the increase in  $\lambda$  (multiplier factor increase in load). For the scenario simulation program, adding a load of 10 MW in each load at beyond the time when the peak load (Luar Waktu Beban Puncak/LWBP) or during peak load time (Waktu Beban Puncak/WBP) in Lampung system. Maximum power transfer occurs when LWBP and WBP on additional load of 140 MW with the largest value of the power contained in the channel that connects Baturaja-Bukit Kemuning (51-53) of 336.6633 MW (LWBP) and 324.4741 MW (WBP).

Key word : interconnection, power transfer, Continuation Power Flow (CPF)

---

## I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik harus selalu dijaga dalam keadaan yang baik, maka dibutuhkan suatu sistem yang handal dalam memberikan pelayanan distribusi listrik. Pertumbuhan beban suatu wilayah akan cenderung lebih pesat dibandingkan penambahan pembangkit pada wilayah tersebut. Hal ini dapat mengakibatkan pemenuhan

kebutuhan energi listrik pada suatu wilayah tidak dapat terpenuhi dengan baik. Sedangkan pemenuhan kebutuhan masyarakat akan listrik dewasa ini terbilang sangat meningkat. Berdasarkan data PLN Lampung tahun 2011, untuk wilayah Lampung pertumbuhan listrik rata-rata mencapai 50 MW – 60 MW atau 12% per tahun [1]. Dengan peningkatan kebutuhan beban tersebut maka sangat penting untuk menjaga

keseimbangan antara penyediaan pasokan listrik dengan pertumbuhan konsumsi listrik masyarakat atau neraca daya dan *economic dispatch* yang juga berpengaruh besar terhadap peningkatan taraf ekonomi suatu bangsa. Suatu sistem interkoneksi merupakan solusi yang pantas untuk menyelesaikan permasalahan kebutuhan energi listrik, karena dengan sistem interkoneksi memungkinkan suatu wilayah yang kekurangan asupan energi listrik akan dapat terpenuhi kebutuhannya dari pasokan energi listrik yang dikirimkan oleh wilayah yang memiliki daya yang berlebih. Pada Sistem Interkoneksi Sumbagsel, wilayah Sumatera Selatan bertindak sebagai wilayah yang kelebihan daya atau area pengirim sedangkan Lampung sebagai area terima.

Hal yang dipertimbangkan dari transfer daya pada sistem interkoneksi adalah kestabilan tegangan pada bus yang terhubung antara dua area dan saluran yang menghubungkan antara bus-bus tersebut. Pada Sistem Interkoneksi Sumbagsel, bus yang menghubungkan antara wilayah Sumatera Selatan dan Lampung antara lain adalah bus GI Bukit Asam, GI Baturaja, GI Blambangan Umpu, GI Bukit Kemuning, dan GI Kotabumi. Saluran yang menghubungkan antara dua wilayah ini adalah saluran Baturaja-Bukit Kemuning dan Baturaja-Blambangan Umpu. Permasalahan transfer daya dapat diselesaikan dengan studi aliran daya pada sistem tenaga listrik, kemudian langkah yang perlu dilakukan adalah memprediksi sejauh mana kenaikan beban pada area Lampung sehingga didapatkan nilai pembebanan maksimum yang juga masih dalam batas kestabilan tegangan dalam proses pengiriman daya. Metode yang digunakan adalah dengan prediksi dan koreksi CPF (*Continuation Power Flow*) untuk penyelesaian aliran daya.

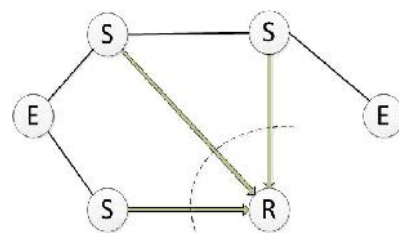
## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Penyelesaian aliran daya dengan metode *Continuation Power Flow* (CPF) merupakan cara yang baik untuk menghasilkan kurva P-V, Q-V atau P-Q-V dalam menentukan perilaku sebuah sistem tenaga listrik dengan mensetting variasi injeksi daya. Kurva P-V dihasilkan dengan menginjeksikan tegangan dan daya aktif yang telah ditentukan, sedangkan daya reaktifnya variable. Pada kurva Q-V daya aktif dan daya reaktif beban telah diketahui.

Secara umum variasi injeksi daya yang terjadi pada sistem tenaga adalah nonlinear. Sebuah penelitian dengan model pendekatan *piecewise-linear* yang dimasukkan kedalam variasi beban nonlinear dan menggabungkannya kedalam *continuation power flow* [2]. Hal ini akan menunjukkan keseragaman variasi pada injeksi daya dan variasi nonlinear yang berbeda dari kurva P-V. Dalam penelitian ini mengilustrasikan tiga kasus dalam memvariasikan perubahan beban. Model sistem yang digunakan adalah tiga bus sistem; bus 1 merupakan slack bus, bus 2 adalah PV bus dan bus 3 adalah PQ bus dengan bus beban PQ2 pada bus 2 dan PQ3 pada bus 3. Kasus pertama menambahkan beban secara linear, kasus yang kedua mengubah beban nonlinear pada PQ2 dan kasus yang ketiga mengubah nonlinear beban pada PQ2 dan PQ3. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa variasi injeksi daya mempengaruhi margin beban tiap kurva P-V, P-Q maupun P-V-Q yang sesuai, dan juga perbedaan antara variasi injeksi linear dan nonlinear sangat signifikan.

Sangatlah penting untuk mempertimbangkan stabilitas transien dengan kontrol korektif pelepasan generator dan pelepasan beban sebagai langkah sistem proteksi sebuah sistem[3]. Metode ini didasarkan pada metode interior point Newton untuk pemrograman nonlinier dan pendekatan kemampuan transfer sebagai maksimalisasi transfer daya antara kendala statis dan dinamis yang digabungkan ke dalam sebuah formulasi *Transient Stability Constrained Optimal Power Flow* (TSCOPF). Pemilihan generator dan beban yang dilepas didasarkan pada nilai masing-masing *Lagrange multipliers* untuk stabilitas sudut rotor generator dan persamaan *active power balance*. Dengan demikian alangkah baiknya untuk melakukan studi transfer daya maksimum dengan kendala stabilitas lainnya (stabilitas dinamik, stabilitas steady state) dan dengan sistem yang lebih luas demi melihat pengaruh transfer daya maksimum pada sistem tenaga.



Gambar 2.1 Sistem interkoneksi sederhana sistem tenaga

Pada gambar 2.1 menunjukkan sebuah sistem sederhana dari interkoneksi yang terdiri dari beberapa area yaitu:

(S) = area pengirim ----- = wilayah transfer daya

(R) = area penerima (E) = area eksternal

## 2.2 Transfer Capability

*Transfer Capability* didefinisikan sebagai ukuran dari kemampuan sistem interkoneksi dalam hal keandalan transfer daya dari satu area ke area yang lain dengan semua jalur transmisi dibawah kondisi tertentu (sebelum dan sesudah kontingensi). Sedangkan *Total Transfer Capability* (TTC) merupakan jumlah energi listrik yang dapat dikirimkan melalui jaringan transmisi secara handal yang memenuhi semua hal yang dipertimbangkan sebelum dan sesudah kontingensi kondisi sistem [4]. Hal-hal yang perlu dipertimbangkan tersebut adalah:

### a. Thermal loading

*Thermal loading* yaitu jumlah maksimum energi listrik yang dapat dikirimkan pada saluran transmisi tanpa menyebabkan panas

### b. Voltage problem

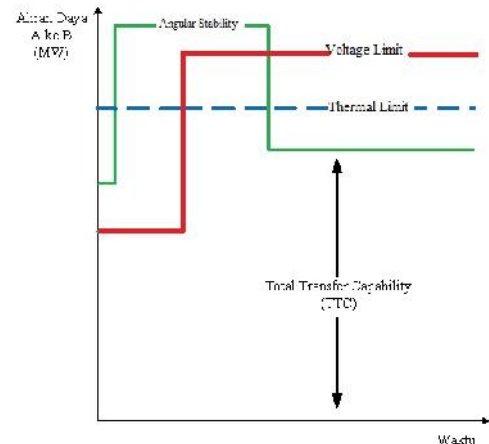
*Voltage problem* yaitu tegangan sistem dan perubahan tegangan yang harus dijaga dengan kisaran tertentu.

### c. Angular Stability (stabilitas sudut)

*Angular Stability* yaitu stabilitas sistem transmisi yang mampu bertahan terhadap gangguan pada periode transien dan dinamis.

Dengan demikian, kondisi sistem yang berubah-ubah akibat adanya *thermal loading*, *voltage problem*, dan *angular stability* dapat diilustrasikan dengan gambar 2.2. Total transfer daya yang dapat dikirimkan dari area kirim ke area terima ditunjukkan dari batas stabilitas sistem yang memperhitungkan batas suhu penghantar (garis putus-putus biru), stabilitas sudut (garis hijau), dan batas tegangan (garis merah). Batas suhu penghantar dari sebuah sistem memiliki titik optimum sehingga pada grafik dibuat stabil dengan garis putus-putus biru. Batas tegangan dan stabilitas sudut suatu sistem pada saat terjadi gangguan terlihat pada garis merah dan hijau yang transien sehingga perlu dikembalikan pada kondisi stabil. Total transfer

daya yang dapat terpenuhi berada dibawah kondisi batas tegangan dan suhu yang stabil.



Gambar 2.2. Limits to Total Transfer Capability

## 2.3 Stabilitas sistem tenaga

Secara umum stabilitas pada suatu sistem tenaga diklasifikasikan menjadi 3 kategori berdasarkan waktu terjadinya[5] yaitu :

### a. Stabilitas steady state

Stabilitas *steady state* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap menjaga sinkronisasi antara mesin-mesin pada sistem setelah mengalami gangguan kecil.

### b. Stabilitas dinamis

Stabilitas dinamis adalah kemampuan sistem untuk tetap mempertahankan kondisi sinkron setelah terjadi ayunan pertama (periode stabilitas transient) sampai sistem mencapai kondisi *steady-state* yang baru (stabilitas transient bila AVR dan governor bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisis).

### c. Stabilitas transien.

Stabilitas transien adalah kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi yang baru yang dapat diterima setelah sistem mengalami gangguan berskala besar dalam kurun waktu selama 1 *swing* (ayunan) pertama dengan asumsi AVR dan generator belum bekerja karena dalam periode transien, seperti gangguan sistem transmisi, perubahan beban yang mendadak dari terputusnya unit pembangkitan atau *switching* pada saluran [6].

## 2.4 Sistem Interkoneksi Sumatera Bagian Selatan (Sumbagsel)

Sistem interkoneksi Sumatera Bagian Selatan dihubungkan oleh Saluran Transmisi Tegangan Tinggi (SUTT) dengan tegangan nominal 150 kV. Pada wilayah Palembang jumlah transmisi sebanyak 39 saluran, untuk Bengkulu sebanyak 13 saluran serta wilayah Lampung sebanyak 42 saluran, namun dari 39 saluran pada UPT Palembang terdapat satu Tragi yaitu Tragi Boom Baru yang menggunakan sirkit 70 kV. Sistem Sumatera Selatan terkoneksi dengan wilayah Bengkulu melalui transmisi 150 kV pada GI Lubuk Linggau-Pekalongan sejauh 69,60 km, sedangkan sistem Lampung terkoneksi dengan sistem Sumatera Selatan melalui 2 penghantar transmisi pada GI Bukit Kemuning-Baturaja sejauh 98,90 km dan GI Blambangan Umpu-Baturaja sejauh 59,834 km.

Sistem interkoneksi sumbagsel ini bertujuan untuk memenuhi kebutuhan listrik pada suatu wilayah. Dalam hal ini sistem Lampung adalah wilayah yang membutuhkan pasokan listrik dari sistem Sumatera Selatan. Pada saat ini Lampung mampu menghasilkan 458 MW dengan defisit daya 104,628 MW saat waktu beban puncak (WBP) dan menghasilkan 355,8 MW saat luar waktu beban puncak (LWBP) dengan defisit daya 25,252 MW. Adapun PLTA Batutege yang hanya dapat beroperasi 1 unit sebesar 12,6 MW saat beban puncak dan pada saat luar waktu beban puncak tidak dioperasikan, sedangkan PLTA Way Besai hanya 1 unit yang beroperasi sebesar 44,8 MW pada saat luar waktu beban puncak, hal ini dikarenakan untuk menghemat keterbatasan debit air. Solusi untuk mengganti rugi-rugi daya yang disalurkan dengan beberapa pembangkit yang merupakan PLTD belum cukup efektif, karena akan memerlukan biaya bahan bakar lebih mahal, sehingga sistem pengoperasiannya pun terbatas. Pada wilayah Bengkulu sebenarnya masih mampu untuk memenuhi kebutuhan beban sebesar 99,148 MW dengan total pembangkitan mencapai 226 MW, namun pembangkit pada wilayah ini merupakan pembangkit listrik dengan sumber daya air (PLTA Musi dan PLTA TESS) yang pada saat musim kemarau akan kekurangan pasokan air dan pada saat melakukan *maintenance* tetap akan membutuhkan pasokan listrik dari wilayah Palembang.

## III. METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan untuk menyelesaikan aliran daya pada tugas akhir ini menggunakan solusi *Continuation Power Flow* (CPF) pada *toolbox* PSAT Matlab [7],[8] dengan langkah prediksi dan koreksi yang merupakan langkah solusi untuk menyelesaikan aliran daya untuk menentukan kenaikan  $\lambda$  (faktor pengali kenaikan beban).

### Persamaan Aliran daya

Persamaan aliran daya untuk fasa  $p$  pada saluran tiga fasa busikoordinat polar dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$P_i^p = \sum_{j \in i, n=a,b,c} V_i^p V_j^m [G_{ij}^{pm} \cos(\theta_i^p - \theta_j^m) + B_{ij}^{pm} \sin(\theta_i^p - \theta_j^m)] \quad (1)$$

$$Q_i^p = \sum_{j \in i, n=a,b,c} V_i^p V_j^m [g_{ij}^{pm} \sin(\theta_i^p - \theta_j^m) + b_{ij}^{pm} \cos(\theta_i^p - \theta_j^m)] \quad (2)$$

Dimana subskrib  $i$  dan  $j$  merepresentasikan nomor bus tiga fasa, sedangkan subskrib  $p$  dan  $m$  menunjukkan fasa bus yang sesuai.

Total daya aktif dan reaktif pada bus generator di koordinat polar yang direpresentasikan sebagai fungsi dari terminal generator dan tegangan ditunjukkan oleh:

$$P_i^\Sigma = -\sum_{p=a,b,c} \sum_{m=a,b,c} V_i^p V_i^m [G_{gen_i}^{pn} \cos(\theta_i^p - \theta_j^m) + B_{gen_i}^{pn} \sin(\theta_i^p - \theta_j^m)] + \sum_{p=a,b,c} \sum_{n=a,b,c} V_i^p E_i^n [G_{gen_i}^{pn} \cos(\theta_i^p - \delta_j^m) + B_{gen_i}^{pn} \sin(\theta_i^p - \delta_j^m)] \quad (3)$$

$$Q_i^\Sigma = -\sum_{p=a,b,c} \sum_{m=a,b,c} V_i^p V_i^m [G_{gen_i}^{pn} \sin(\theta_i^p - \theta_j^m) + B_{gen_i}^{pn} \cos(\theta_i^p - \theta_j^m)] + \sum_{p=a,b,c} \sum_{n=a,b,c} V_i^p E_i^n [G_{gen_i}^{pn} \sin(\theta_i^p - \delta_j^m) + B_{gen_i}^{pn} \cos(\theta_i^p - \delta_j^m)] \quad (4)$$

Dimana  $G_{gen_i}$  dan  $B_{gen_i}$  merupakan matrik 3x3, yang diberikan masing masing oleh bilangan real ( $Y_{gen_i}$ ) dan bilangan imajiner ( $Y_{gen_i}$ ).

Persamaan mismatch aliran daya pada bus ditunjukkan oleh:



$$\Delta P_i^p = -Pd_i^p - P_i^p = 0 \quad (5)$$

$$\Delta Q_i^p = -Qd_i^p - Q_i^p = 0 \quad (6)$$

Dimana  $Pd_i^p$  dan  $Qd_i^p$  merupakan daya aktif dan reaktif beban.

Selain persamaan (5) dan (6) pada beban, persamaan untuk daya aktif dan reaktif juga didapat dari persamaan :

$$\Delta P_{gi} = P_{gi} - P_i^{\Sigma} = 0 \quad (7)$$

$$\Delta Q_{gi} = Q_{gi} - Q_i^{\Sigma} = 0 \quad (8)$$

Dimana  $P_{gi}$  dan  $Q_{gi}$  masing-masing merupakan daya aktif dan daya reaktif generator.

Ini menunjukkan bahwa persamaan (8) hanya berlaku ketika mesin sinkron adalah PQ machine. Untuk PV machine, persamaan (8) perlu diganti dengan persamaan kendala tegangan. Sebagai berikut :

$$\Delta V_{gi} = V_{gi}^{Spec} - V_{gi}^1 = 0 \quad (9)$$

Dimana  $V_{gi}^1$  merupakan tegangan urutan positif bus generator, sementara  $V_{gi}^{Spec}$  adalah tegangan referensi kontrol urutan positif yang ditentukan.

Dalam rangka menyederhanakan presentasi, persamaan (8) dan (9) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Delta R_{gi} = \begin{cases} \Delta Q_{gi}, & PQ \text{ machine} \\ \Delta V_{gi}, & PV \text{ machine} \end{cases} \quad (10)$$

Untuk mensimulasikan perubahan beban,  $Pd_i^p$  dan  $Qd_i^p$  dapat direpresentasikan oleh persamaan:

$$Pd_i^p = Pd_i^p (1 + \lambda^* KPd_i^p) \quad (11)$$

$$Qd_i^p = Qd_i^p (1 + \lambda^* KQd_i^p) \quad (12)$$

Dimana nilai  $\lambda$  adalah parameter beban, dengan karakteristik perubahan beban. Rasio dari  $KPd_i^p / KQd_i^p$  adalah konstan untuk mempertahankan konstannya faktor daya.

Demikian juga untuk mensimulasikan perubahan generator,  $P_{gi}$  dan  $Q_{gi}$  dapat direpresentasikan sebagai fungsi dari  $\lambda$ , ditunjukkan oleh:

$$P_{gi} = P_{gi} (1 + \lambda^* KP_{gi}) \quad (13)$$

$$Q_{gi} = Q_{gi} (1 + \lambda^* KQ_{gi}) \quad (14)$$

Untuk PV machine, persamaan (14) tidak diperlukan.

Persamaan non-linear (5),(6),(7),(10) yang ditambah oleh variable tambahan  $\lambda$  sebagai berikut :

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (15)$$

Dimana  $f(x, \lambda)$  mewakili seluruh rangkaian persamaan mismatch aliran daya.  $x$  adalah variable vektor yang ditunjukkan oleh :

$$x = [\theta^a, V^a, \theta^b, V^b, \theta^c, V^c, \delta^a, E^a]$$

### Langkah Prediksi

Langkah prediksi digunakan untuk memberikan titik perkiraan pada solusi berikutnya. Sebuah prediksi pada solusi berikutnya diambil dari langkah tepat pada arah tangen.

Persamaan (15) dapat diselesaikan oleh *continuation algoritma* dengan langkah prediksi dan koreksi. Ditunjukkan oleh:

$$df(x, \lambda) = f_x dx + f_\lambda d\lambda = 0 \quad (16)$$

Untuk menyelesaikan (16), diperlukan satu persamaan lanjutan. Jika memilih magnitude nilai bukan nol untuk salah satu tangen vektor dan menjaga perubahannya sekitar  $\pm 1$ , satu persamaan tambahan dapat diperoleh, yaitu :

$$t_k = \pm 1 \quad (17)$$

Dimana  $t_k$  adalah elemen bukan nol dari tangen vektor  $dx$ .

Dengan menggabungkan persamaan (16) dan (17), akan didapatkan satu set persamaan yang mana tangen vektor  $dx$  dan  $d\lambda$  adalah variable yang tidak diketahui.

$$\begin{bmatrix} f_x & f_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Dimana  $e_k$  adalah vektor baris dengan semua elemen nol kecuali untuk elemen  $kth$  yang bernilai satu.

Pada persamaan (18) nilai +1 atau -1 digunakan tergantung pada bagaimana

perubahan variable  $kth$  sebagai solusi yang sedang ditelusuri.

Setelah menyelesaikan (18), suatu prediksi solusi berikutnya akan ditunjukkan pada persamaan :

$$\begin{bmatrix} x^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (19)$$

Dimana  $*$  menunjukkan solusi perkiraan untuk langkah selanjutnya pada saat nilai  $\sigma$  adalah skalar, yang merupakan ukuran tahapan.

#### Langkah koreksi

Langkah koreksi bertujuan untuk menyelesaikan penambahan aliran daya Newton dengan solusi prediksi pada (19) sebagai titik awal (*initial point*). Pada algoritma aliran daya Newton persamaan tambahan disertakan dan  $\lambda$  diambil sebagai variabel. Persamaan aliran daya Newton itu ditunjukkan pada:

$$\begin{bmatrix} f(x, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Dimana  $\eta$  merupakan nilai yang sesuai untuk elemen  $kth$  pada  $x$ . Persamaan (20) ini dapat diselesaikan dengan metode Newton.

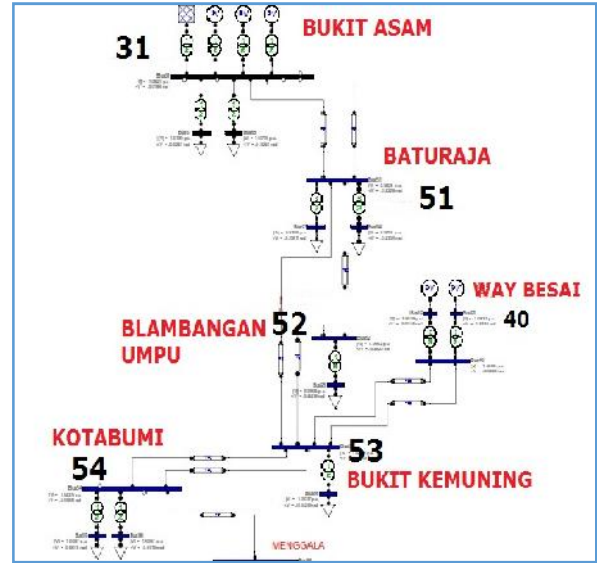
## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Data Pembangkitan dan Pembebanan Interkoneksi Sumbagsel

Sistem interkoneksi Sumatera Bagian Selatan (sumbagsel) yang ditinjau terdiri dari 3 UPT yaitu : wilayah Sumatera Selatan, wilayah Bengkulu serta wilayah Lampung. Sistem Sumbagsel ini terdiri dari 200 bus, 94 saluran, 156 transformator, 66 generator dan 77 beban.

Tabel 4.1. Total Data Pembangkitan dan Beban Sumbagsel

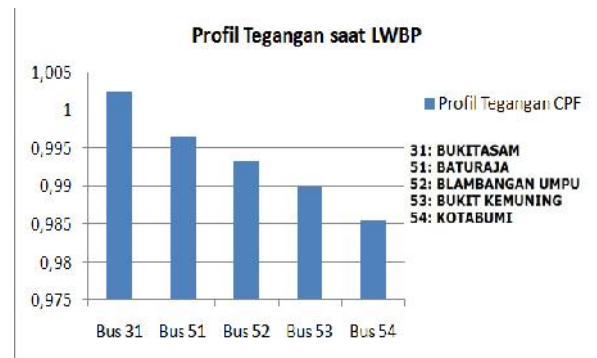
No	Wilayah kerja	Pembangkit (MW)	LWBP (MW)	WBP (MW)
1	Sumatera Selatan	1004	362,925	568,338
2	Bengkulu	226	64,439	99,148
3	Lampung	470,6	381,052	562,628
	Total	1700,6	808,416	1230,114



Gambar 4.1 Bus dan Saluran yang ditinjau

Pada gambar 4.1 menunjukkan bus-bus dan saluran pada sistem Sumbagsel yang ditinjau dari penelitian ini yaitu bus Bukit Asam, Baturaja, Blambangan Umpu, Bukit Kemuning dan Kotabumi. Slack bus ditempatkan di salah satu generator pada bus Bukit Asam dan Saluran yang menghubungkan bus-bus tersebut menggunakan transmisi 150 kV.

Hasil simulasi CPF pada saat luar waktu beban puncak dan waktu beban puncak pada masing masing bus yang menghubungkan Sumatera Selatan dan Lampung didapatkan berupa data, sebagai berikut:

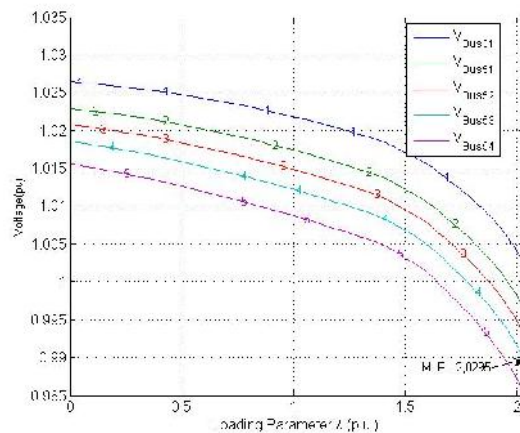


Gambar 4.2. Profil Tegangan CPF saat LWBP

Pada gambar 4.2 dapat terlihat bahwa nilai tegangan pada bus Kotabumi (54) adalah bus dengan nilai tegangan paling kecil sebesar 0,98548 atau 147,8222 kV. Tegangan pada bus Baturaja (51) 149,4787 kV atau 0,99652 pu, pada bus Blambangan Umpu (52) memiliki tegangan sebesar 148,9866 kV atau 0.99324 pu. Tegangan pada bus Bukit Kemuning sebesar 148,4868 kV

atau 0.98991 pu. Sedangkan bus 31 pada bus Bukit Asam memiliki tegangan paling besar yaitu 150,378 kV atau sebesar 1,0025 pu.

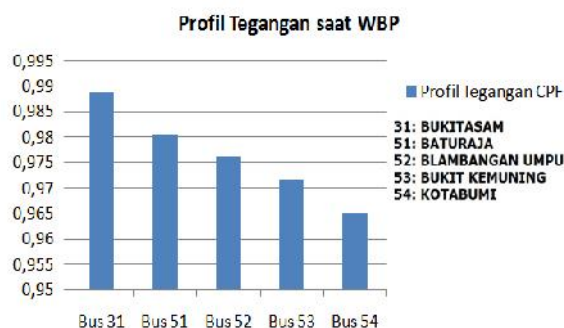
Sedangkan untuk hubungan antara tegangan tiap bus dengan loading parameter pada saat luar waktu beban puncak ditunjukkan dengan *PV Curve* sebagai berikut:



Gambar 4.3. *PV Curves* CPF saat LWBP

Berdasarkan gambar 4.3. kurva nomor 1, 2, 3, 4, 5 berturut-turut merupakan nilai tegangan pada bus 31, 51, 52, 53, dan 54 dengan tegangan pada tiap bus dari hasil simulasi menunjukkan terjadinya penurunan. Dari grafik *PV* ini didapatkan nilai parameter pembebanan maksimum sebesar 2,0295. Nilai ini akan menjadi acuan penambahan beban pada simulasi berikutnya.

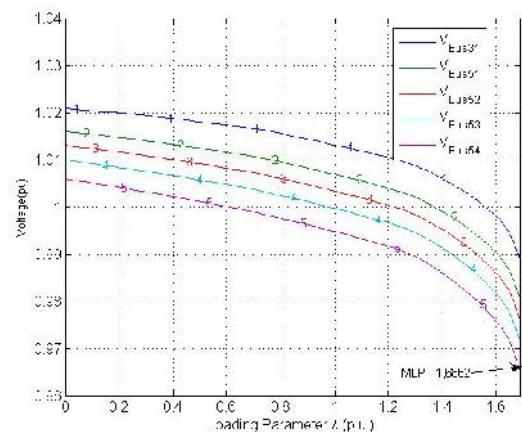
Pada simulasi CPF dengan data saat waktu beban puncak ditunjukkan pada gambar profil tegangan CPF berikut:



Gambar 4.4. Profil Tegangan CPF saat WBP

Berdasarkan gambar 4.7 terlihat bahwa nilai tegangan CPF pada saat waktu beban puncak lebih kecil dibandingkan dengan tegangan pada luar waktu beban puncak. Beban yang harus

ditransfer oleh sistem sangat mempengaruhi nilai tegangan dari tiap bus GI. Saat waktu beban puncak tegangan pada bus Bukit Asam sebesar 0,98878 pu atau 148,3169 kV, pada bus Baturaja sebesar 0,98059 pu atau 147,0888 kV, bus Blambangan Umpu memiliki tegangan sebesar 0,97611 pu atau 146,4162 kV, untuk bus Bukit Kemuning sebesar 0,97157 pu atau 145,736 kV sedangkan pada bus Kotabumi sebesar 0,96525 pu atau 144,7878 kV yang merupakan tegangan CPF paling kecil dibanding bus ditinjau CPF lainnya. Hubungan antara tegangan tiap bus yang ditinjau dengan *loading parameter* pada saat waktu beban puncak ditunjukkan dengan *PV Curve* sebagai berikut:



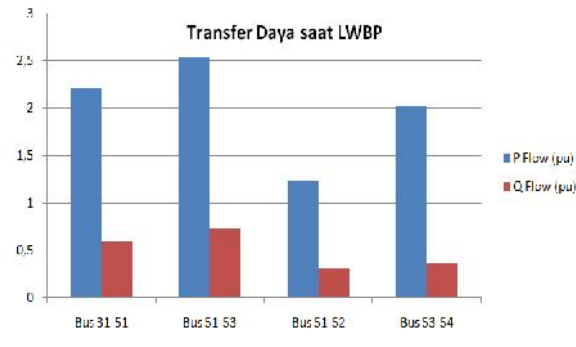
Gambar 4.5. *PV Curves* CPF saat WBP

Gambar 4.5 menunjukkan kurva *PV* pada tegangan bus ditinjau; saat waktu beban puncak dengan nilai lambda maksimum nya sebesar 1,6862. Tegangan paling kecil merupakan bus kotabumi dengan 0,96525 pu. Total beban yang lebih besar pada saat waktu beban puncak menyebabkan nilai parameter pembebanan semakin kecil.

## 4.2 Aliran Daya antar Bus CPF

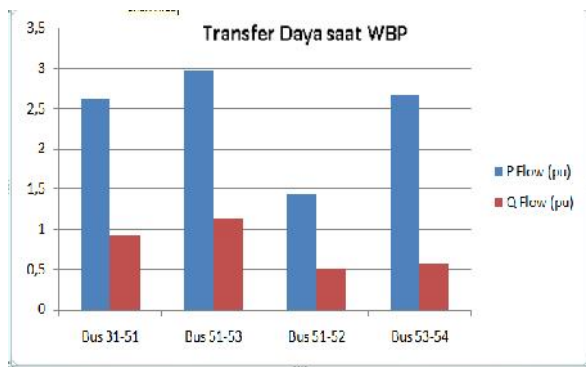
Besarnya daya aktif dan daya reaktif yang dapat disalurkan pada saluran antar bus sistem interkoneksi pada saat luar waktu beban puncak (LWBP) dan waktu beban puncak (WBP) yang ditinjau dapat terlihat dari *Line Flow* hasil simulasi CPF berikut:





Gambar 4.6. Transfer Daya antar bus LWPB

Dari gambar 4.6 menunjukkan besarnya masing-masing daya yang disalurkan tiap bus. Daya aktif terbesar yang disalurkan terdapat pada bus 51-53 yang merupakan bus yang menghubungkan Baturaja – Bukit Kemuning sebesar 254,0898 MW, sedangkan transfer daya paling kecil terdapat pada bus yang menghubungkan Baturaja - Blambangan Umpu atau bus 51-52 sebesar 123,1831 MW. Daya reaktif yang disalurkan terbesar terdapat pada saluran 51-53 yang menghubungkan Baturaja - Bukit kemuning sebesar 72,8803 Mvar. Transfer daya antar bus pada saat waktu beban puncak (WBP) dapat terlihat pada gambar 4.6 berikut:



Gambar 4.7. Transfer Daya antar bus WBP

Pada saat transfer daya waktu beban puncak memiliki daya yang lebih besar dibandingkan dengan transfer daya luar waktu beban puncak. Hal ini disebabkan total beban yang lebih besar, sehingga menyebabkan generator membangkitkan daya yang lebih besar juga agar kontinuitas pelayanan beban tetap terjaga dengan baik. Transfer daya terbesar terdapat pada saluran 51-53 Baturaja – Bukit Kemuning sebesar 296,8438 MW. Daya reaktif yang ditransfer pada saluran Baturaja-Bukit Kemuning sebesar 112,6502 Mvar yang merupakan daya reaktif terbesar dari bus ditinjau lainnya.

### 4.3 Penambahan Beban 10 MW setiap beban Lampung

Untuk mengetahui besar transfer daya maksimum yang masih dapat diterima pada bus yang menghubungkan area Sumatera Selatan dan Lampung dilakukan scenario penambahan beban sebesar 10 MW pada setiap beban wilayah Lampung. Dari hasil scenario tersebut didapatkan data:

Tabel 4.8. Penambahan beban terhadap perubahan tegangan saat LWPB

Beban PQ (MW)	Nomor Bus					MLP
	Bus 31 (kV)	Bus 51 (kV)	Bus 52 (kV)	Bus 53 (kV)	Bus 54 (kV)	
PQNormal	150.378	149.4737	148.9866	148.4863	147.8222	2.0295
PQ + 10 MW	142.3741	140.0057	138.5509	137.1594	135.1289	1.3024
PQ + 20 MW	133.8435	130.8231	128.9348	127.1403	124.4829	0.86787
PQ + 30 MW	133.304	130.1433	128.1647	126.2879	123.499	0.63652
PQ + 40 MW	132.2174	128.9508	126.8902	124.944	122.0489	0.50246
PQ + 50 MW	132.2812	128.9738	126.8826	124.9103	121.9736	0.41442
PQ + 60 MW	126.5668	123.2125	121.0706	119.1013	116.1449	0.39705
PQ + 70 MW	118.3333	114.5857	112.2117	109.97	106.6347	0.29168
PQ + 80 MW	114.6314	110.7533	108.3051	105.9893	102.5435	0.2531
PQ + 90 MW	111.3231	107.3473	104.825	102.4444	98.9027	0.22335
PQ + 100 MW	108.1245	104.0412	101.4536	99.0094	95.3719	0.19735
PQ + 110 MW	105.3234	101.1509	98.5034	96.0015	92.2781	0.17689
PQ + 120 MW	102.7226	98.4552	95.7505	93.1935	89.3878	0.15974
PQ + 130 MW	100.3254	95.973	93.2146	90.6053	86.7217	0.14519
PQ + 140 MW	98.095	93.6616	90.8519	88.1923	84.2344	0.13269
PQ + 150 MW	100.7836	97.1244	94.8807	92.5364	88.9595	0
PQ + 160 MW	0.00015	7.637	0.13643	0.00015	12.3149	0
PQ + 170 MW	108.1003	91.1286	80.7043	69.7195	53.2283	0
PQ + 180 MW	57.6407	0.727	216.0319	3.1238	26.5662	0
PQ + 190 MW	102.3737	60.215	36.8949	16.6861	0.00015	0
PQ + 200 MW	136.4737	121.2251	111.9175	102.2187	91.3204	0

Berdasarkan tabel 4.8 menunjukkan nilai tegangan pada tiap bus yang ditinjau dengan masing-masing penambahan 10 MW sampai 200 MW. Pada tabel ini juga terlihat nilai *Maksimum Loading Parameters* (MLP) yang dihasilkan dari simulasi semakin menurun dengan beban yang terus bertambah. Setiap penambahan 10 MW mengakibatkan nilai tegangan menurun karena besarnya beban yang ditambahkan berbanding terbalik dengan nilai tegangan pada tiap bus. Pada penambahan 150 MW terlihat nilai MLP adalah nol, hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan beban tersebut nilai tegangan sudah tidak stabil dan transfer daya sudah tidak diijinkan.



#### 4.4 Transfer Daya pada Saluran saat LWBP

Tabel 4.9. Daya saluran antar bus yang ditinjau

Beban PQ (MW)	Daya tiap saluran antar Bus			
	31-51 (MW)	51-53 (MW)	51-52 (MW)	53-54 (MW)
PQ Normal	221.2146	254.0898	123.1831	203.2458
PQ + 10 MW	310.2599	382.6249	192.112	287.6628
PQ + 20 MW	322.9119	405.7799	205.6866	298.847
PQ + 30 MW	316.488	401.1635	204.4014	293.56
PQ + 40 MW	314.6045	400.8635	204.7838	291.8749
PQ + 50 MW	313.0505	400.3388	204.8437	290.5927
PQ + 60 MW	251.9216	316.5660	167.4366	224.0095
PQ + 70 MW	298.8841	382.446	196.3314	275.5568
PQ + 80 MW	293.4231	375.5351	197.9839	269.9191
PQ + 90 MW	289.1272	370.045	190.301	265.3951
PQ + 100 MW	282.5245	361.4389	186.0578	258.7063
PQ + 110 MW	277.5731	354.5411	182.845	253.5868
PQ + 120 MW	272.8102	348.6412	179.7196	248.6478
PQ + 130 MW	268.2519	342.5771	176.7041	243.9134
PQ + 140 MW	263.8278	336.6633	173.7175	239.3147
PQ + 150 MW	15.0437	9.6505	11.8095	5.7976
PQ + 160 MW	0.00107	18.7916	18.1621	0.00177
PQ + 170 MW	636.8111	732.0538	371.0271	464.7471
PQ + 180 MW	1014.8355	2.4497	-151.393	-1.9308
PQ + 190 MW	53.4355	1143.9443	-346.615	84.0099
PQ + 200 MW	228.5368	188.3656	125.061	71.0578

Tabel 4.9 menunjukkan bahwa besarnya nilai transfer daya pada tiap-tiap saluran yang ditinjau. Pada keadaan PQ normal atau sebelum penambahan beban, nilai transfer daya pada 4 saluran yang ditinjau paling besar terdapat pada saluran Baturaja – Bukit Kemuning (51-53) yaitu 254.0898 MW. Transfer daya maksimum terjadi pada penambahan beban sebesar 140 MW dengan nilai daya terbesar terdapat pada saluran yang menghubungkan Baturaja-Bukit Kemuning (51-53) sebesar 336,6633 MW. Penambahan beban PQ+150 sudah tidak diizinkan karena nilai transfer daya yang terjadi sudah tidak konvergen lagi.

Tabel 4.10. Penambahan beban terhadap perubahan tegangan saat WBP

Beban PQ (MW)	Nomor Bus				MLP
	Bus 31 (kV)	Bus 51 (kV)	Bus 52 (kV)	Bus 54 (kV)	
PQ Normal	148.3169	147.0898	146.4162	145.736	1.6862
PQ + 10 MW	135.7647	131.3455	131.8386	130.4865	1.1113
PQ + 20 MW	124.2632	121.3361	120.9471	120.2425	0.76591
PQ + 30 MW	133.6124	130.7031	128.585	127.1691	0.58419
PQ + 40 MW	128.9032	125.7911	123.3271	121.9568	0.46433
PQ + 50 MW	125.8524	121.6038	120.5572	118.6319	0.38433
PQ + 60 MW	121.2709	117.3345	115.693	113.6705	0.32521
PQ + 70 MW	118.3043	114.7706	112.5405	110.4408	0.27495
PQ + 80 MW	114.1833	110.3153	108.1987	106.0197	0.24321
PQ + 90 MW	110.8537	107.074	104.5828	102.4353	0.21662
PQ + 100 MW	107.9733	104.0977	101.6732	99.3356	0.19311
PQ + 110 MW	105.8138	101.7449	99.1681	96.7412	0.1768
PQ + 120 MW	103.5624	99.3358	96.984	94.5798	0.15634
PQ + 130 MW	100.7342	96.0035	93.5849	91.1194	0.14573
PQ + 140 MW	99.0621	94.7883	92.6793	89.3233	0.13323
PQ + 150 MW	99.5434	95.5713	93.7232	91.3741	0
PQ + 160 MW	120.0651	10.4493	671.5333	40.9122	90.7693
PQ + 170 MW	87.3383	83.312	81.3687	78.7954	74.749
PQ + 180 MW	112.1979	96.8865	87.4841	77.5624	62.1871
PQ + 190 MW	112.9534	99.3733	91.8839	82.4493	65.0387
PQ + 200 MW	110.8749	96.0023	86.5252	77.4731	64.3417

Pada saat waktu beban puncak nilai tegangan pada tiap bus yang ditinjau lebih kecil dibandingkan dengan nilai tegangan pada saat luar waktu beban puncak. Hal ini dapat diketahui dari MLP atau parameter pembebanan maksimum yang diperoleh dari hasil CPF. Nilai lambda yang diperoleh sistem pada saat waktu beban puncak adalah 1,6862 yang merupakan parameter pembebanan maksimum sejauh mana pembangkitan dapat dilakukan untuk memenuhi

kebutuhan beban. Penambahan PQ+150 dengan tiap beban di Lampung ditambahkan sebesar 150 MW nilai pembebanan nya 0, menandakan batas dari kestabilan tegangan tiap bus sudah tidak dapat dijaga. Nilai tegangan paling besar terdapat pada bus Baturaja (51) sebesar 94,7885 kV yang masih dapat dijaga kestabilan nya pada penambahan PQ+140.

#### 4.5 Transfer Daya pada Saluran saat WBP

Tabel 4.11. Daya saluran antar bus yang ditinjau

Beban PQ (MW)	Daya tiap saluran antar Bus			
	31-51 (MW)	51-53 (MW)	51-52 (MW)	53-54 (MW)
PQ Normal	262.6114	296.8438	144.7098	267.5455
PQ + 10 MW	311.8305	376.1747	188.5662	310.6424
PQ + 20 MW	304.7031	375.9056	190.5498	302.4416
PQ + 30 MW	303.2038	378.7278	192.9998	299.7071
PQ + 40 MW	297.9218	374.6563	191.6083	293.2534
PQ + 50 MW	293.8264	371.1633	190.2856	288.3474
PQ + 60 MW	289.1691	366.2117	188.1097	282.7881
PQ + 70 MW	283.4164	359.566	185.0259	276.4158
PQ + 80 MW	279.0817	354.3983	182.5877	271.4908
PQ + 90 MW	274.0638	348.2418	179.6078	265.8598
PQ + 100 MW	269.2606	342.2502	176.6883	260.5174
PQ + 110 MW	274.5357	349.1532	180.126	263.4293
PQ + 120 MW	258.2738	328.2823	169.8366	248.7264
PQ + 130 MW	256.5989	326.114	168.7232	246.2856
PQ + 140 MW	255.5405	324.4741	168.0617	244.5338
PQ + 150 MW	14.2778	8.6579	11.2614	5.7209
PQ + 160 MW	6624.3272	-357.4919	-3986.7709	4878.834
PQ + 170 MW	16.9823	11.4156	12.2243	6.7423
PQ + 180 MW	518.4158	593.7923	305.0197	406.2638
PQ + 190 MW	180.7349	150.5937	97.3453	67.1783
PQ + 200 MW	210.2802	174.7929	110.1366	72.9872

Transfer daya yang terjadi pada waktu beban puncak bernilai lebih besar dibandingkan dengan pada luar beban puncak. Transfer daya maksimum yang dapat dilakukan sebesar 324,4741 MW pada saluran Baturaja – Bukit Kemuning. Peningkatan transfer daya sebesar 27,6303 MW dari saat beban puncak normal (PQ normal) sampai simulasi penambahan PQ+140 MW pada tiap beban menandakan pembangkitan maksimal mencapai kenaikan 140 MW tiap beban di wilayah Lampung. Pada saat penambahan beban PQ+150 transfer daya sudah tidak konvergen dan tidak dapat diizinkan, hal ini dapat terlihat bahwa kenaikan nilai transfer daya sudah tidak stabil.

## V. SIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

- Dengan kondisi pembangkitan saat ini maka transfer daya maksimum dapat ditingkatkan

dengan menambahkan 10 MW di setiap beban GI wilayah Lampung, dengan tetap menjaga kondisi kestabilan tegangan pada setiap bus maka penambahan beban maksimum mencapai 140 MW.

- b. Transfer daya maksimum pada sistem Interkoneksi Sumbagsel pada saat ini belum optimal sehingga dapat ditingkatkan dengan kenaikan daya sebesar 32,498% pada saat luar waktu beban puncak dan pada saat waktu beban puncak kenaikan daya 9,31%. Tegangan pada bus Baturaja saat luar waktu beban puncak menurun sebesar 37,74% dan saat waktu beban puncak menurun 35,57%.

- [8] Milano, Federico, *Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT Version 2.0.0*, 2007.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisa dan kesimpulan dari penelitian, maka penulis memberikan saran yaitu: Untuk penelitian aliran daya selanjutnya, agar lebih mempertimbangkan limit pembangkit pada sistem agar hasil simulasi lebih optimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] <http://www.pln.co.id/lampung/?p=201>, publikasi tanggal 13 april 2011, akses tanggal 19 Mei 2013
- [2] Shao-Hua Li and Hsiao-Dong Chiang, "Continuation Power Flow With Nonlinier Power Injection Variation: A Piecewise Linier Approximation", *IEEE Transaction On Power Systems*, Vol. 23, No. 4, November 2008. pp. 1637-1643
- [3] L.Hakim, J. Kubokawa, N.Yorino, Y. Zoka, Y. Sasaki, *Total Transfer Capability Assessment Incorporating Corrective Controls for Transient Stability Using TSCOPF*, *IEEE Transaction On Power and Energy*, Vol.130, Issue 4, 2010. pp. 339-406
- [4] North American Electric Reliability Council, *Available Transfer Capability Definition and Determination*, June 1996.
- [5] H. Saadat, *Power System Analysis*, McGraw Hill, 1999.
- [6] J.J Grainger, W.D. Stevenson, *Power System Analysis*, McGraw Hill, 1994
- [7] Milano, Federico, "Continuous Newton's Methode for Power Flow Analysis", *IEEE Transaction On Power Systems*, Vol. 24, No. 1, February 2009. pp. 50-57