電源制限を考慮した過渡安定度付き最適潮流計算法による TTC 計算

久保川 淳司（広島工業大学）, *三谷 智久, 餘利野 直人, 佐々木 博司（広島大学）
下村 公彦, 丹羽 祥仁（中部電力）, 袁 越（Houhai University）

1. はじめに

近年、電力自由化にともない非電力事業者などによる電力託送が複雑化している。そのため、電力の送電可能容量を示す TTC (Total Transfer Capability)を常に把握しておくことが重要である。

従来の最適潮流計算法では単に定常状態の最適運用点を求めるために研究されてきたため、系統故障が生じた場合、過渡安定度問題が生じる可能性がある。そこで、過渡安定度付き最適潮流計算法(TSCOPF: Transient Stability Constrained Optimal Power Flow)が注目されつつある。

過渡安定度を向上させる方法の一つとして、故障時に発電機を系統から切り離す電源制限(電制)が用いられている。この電制により電力系統の安定度が増すため TTC は増加する。本論文では、電気学会 WEST30 系統モデルを用いて、電源制限を考慮した TSCOPF により TTC シミュレーションを行う。

2. TSCOPF の定式化

目的関数　TTC

$$P_T = \sum_{i\in S_{SA}, j\in S_{RA}} P_{ij} = \sum_{i\in S_{SA}, j\in S_{RA}} \left\{ G_{ij}V_i^2 - V_iV_j\left(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}\right)\right\} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

不等式制約

$$\left.\begin{array}{l} \underline{\delta} \le \delta_i^t - \delta_{COI}^t \le \overline{\delta} \quad i \in S_G; t \in S_T \\ *\delta_{COI} = \sum_{i=1}^{ng} M_i\delta_i \Big/ \sum_{i=1}^{ng} M_i \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

$$\left.\begin{array}{l} \underline{P_{gi}} \le P_{gi} \le \overline{P_{gi}} \qquad \underline{Q_{gi}} \le Q_{gi} \le \overline{Q_{gi}} \\ \underline{V_i} \le V_i \le \overline{V_i} \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

式(2)は過渡安定度における位相安定度制約であり、慣性中心δCOI を基準として用いている。式(3)は発電機出力、母線電圧の上下限制約である。

等式制約

潮流方程式……………………………………………(4)

$$\left.\begin{array}{l} \delta_i^t - \delta_i^{t-1} - \dfrac{\Delta t}{2}\left[\left(\omega_i^t - \omega_0\right) + \left(\omega_i^{t-1} - \omega_0\right)\right] = 0 \\ \omega_i^t - \omega_i^{t-1} - \dfrac{\Delta t}{2}\dfrac{\omega_0}{M_i}\left[\left(-D_i\omega_i^t + P_{mi} - P_{ei}^t\right)\right. \\ \qquad \left. + \left(-D_i\omega_i^{t-1} + P_{mi} - P_{ei}^{t-1}\right)\right] = 0 \end{array}\right\} \begin{array}{l} j \in S_G \\ t \in S_T \end{array} \quad (5)$$

$$\left.\begin{array}{l} E_i'V_{gi}\sin\left(\delta_i^0 - \theta_{gi}\right) - x_{di}'P_{gi} = 0 \\ V_{gi}^2 - E_i'V_{gi}\cos\left(\delta_i^0 - \theta_{gi}\right) + x_{di}'Q_{gi} = 0 \end{array}\right\} i \in S_G \quad \cdots\cdots(6)$$

$$P_{ei} = P_{eia} + P_{eib} + P_{eic} \qquad (7)$$

ここで、式(5)は動揺方程式であり、式(6)は初期値方程式である。発電機出力 P_{ei} は式(7)のようになり、P_{eia},P_{eib},P_{eic} を計算することで不平衡故障を考慮している。

*P_{ij}:線路(i,j)の有効電力潮流, P_g,Q_g:有効・無効電力発電量, P_l,Q_l:有効・無効電力負荷量, V∠θ:母線電圧と位相, Y∠α=G+jB:系統アドミタンス行列要素, δ,ω:位相角と角速度, M,D:慣性定数と制動定数, x_d',E':直軸過渡リアクタンスと背後電圧, P_m:機械入力, P_e:電気出力, ω_0:同調角速度, Δt:ステップ幅, δ_{COI}:慣性中心, S_{SA}:送電領域集合, S_{RA}:受電領域集合, S_G:発電機集合, S_R:負荷集合, S_N:母線集合, S_{CL}:制約付き線路集合, S_T:ステップ集合

3. 目的関数とラグランジュ乗数

OPF 問題は制約付き最適化問題として以下のようになる。

$$\begin{array}{l} \text{minimize} \quad f(\boldsymbol{x}) \\ \text{subject to} \quad \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{0}, \quad \underline{\boldsymbol{g}} \le \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}) \le \overline{\boldsymbol{g}} \end{array} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

x:変数, $f(x)$:目的関数, $h(x)$:等式制約, $g(x)$:不等式制約

(8)式において等式制約だけの場合、ラグランジュ関数は式(9)のようになる。

$$L(x,\lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^{m}\lambda_i h_i(x) \quad \lambda_i: \text{ラグランジュ乗数} \quad (9)$$

式(9)が x^*,λ^* において局所最小点となる条件は式(10)のようになる。

$$\begin{array}{l} \dfrac{\partial L\left(x^*,\lambda^*\right)}{\partial x_j} = \dfrac{\partial f\left(x^*\right)}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^{m}\lambda_i^*\dfrac{\partial h_i\left(x^*\right)}{\partial x_j} = 0 \quad j = 1,\cdots,n \\ \dfrac{\partial L\left(x^*,\lambda^*\right)}{\partial \lambda_i} = h_i\left(x^*\right) = 0 \quad i = 1,\cdots,m \end{array} \qquad (10)$$

式(10)においてラグランジュ乗数λは、i 番目制約が 1 単位緩和されたとき、どの程度最適値が改善されるかを表している。不等式制約を含む場合も同様であり、本研究では過渡安定度制約のラグランジュ乗数を調べ、電制により安定度が改善された時の目的関数 TTC との関係を確認する。

4. シミュレーション

<u>シミュレーションモデル</u>

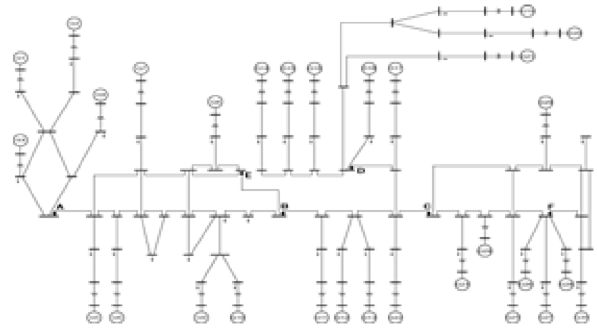

図 1：電気学会 WEST30 機系統モデル

<u>シミュレーション条件</u>

シミュレーションは 0.01 秒間隔で 2 秒間行う。過渡安定度制約は慣性中心から各発電機の内部位相角が±70 度以内、想定故障は A 点～F 点の 3 φ 4 LG 故障を考慮する。

シミュレーション開始 0.10 秒後に想定故障を起こし、0.15 秒後に開放除去を行う。電制は 0.25 秒後に行い、0.50 秒後に回線 2 の再閉路を行う。

電制量は 300MW とし各故障線路における TTC を計算する。

<u>シミュレーション結果</u>

表 1：シミュレーション結果 1

故障点	A	B	C	D	E	F
Iteration (回) TTC(MW)	48 2988	36 3400	51 7203	87 4271	52 2907	63 2177
発電機 1 ラグランジュ	G2 -1.3509	G2 -0.6689	G14 -0.0262	G14 -1.1352	G2 -0.6507	
発電機 2 ラグランジュ		G8 -0.2411			G5 -0.0348	
発電機 3 ラグランジュ		G6 -0.0927			G6 -0.0043	
発電機 4 ラグランジュ		G5 -0.0186				

表 1 は各想定故障での発電機の位相安定度制約のラグランジュ乗数値を示している。A 点故障では発電機 G2 が位相安定度制約に掛かり、ラグランジュ乗数値が大きくなっている。このようなラグランジュ乗数値が大きな発電機を電制することで TTC を効果的に増加することができる。

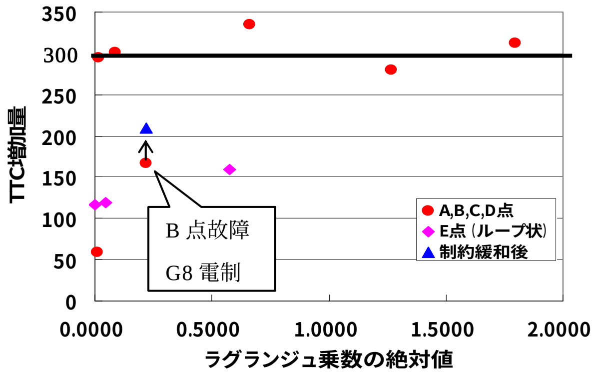

図 2：シミュレーション結果 2

E 点では故障線路がループ状であるため TTC 増加量は 300MW 以下となったが、それ以外の故障点では電制量とほぼ同量の 300MW の TTC が増加した。B 点故障・G8 電制では無効電力が制約に掛かり TTC 増加量は 160MW だったが、無効電力の制約を緩和し、再びシミュレーションを行ったところ、TTC 増加量は 210MW まで増加した。

今回のシミュレーションでは、ラグランジュ乗数値が 0.5 以上では、電制量と同量の TTC が増加した。ラグランジュ乗数値が 0.5 以下では、電圧や無効電力の制約に掛かり TTC 増加量にばらつきがあった。

5. まとめ

本稿では、電源制限を考慮した過渡安定度付き最適潮流計算法により TTC 計算を行い、各発電機のラグランジュ乗数と電制による TTC の関係を調べた。結果、位相安定度制約のラグランジュ乗数が大きい発電機では電制量とほぼ同量の TTC が増加した。ラグランジュ乗数が小さい発電機では、電圧や無効電力の制約に掛かかり十分に TTC が増加しない場合があった。

<u>参考文献</u>

1) Y.Yuan, J.Kubokawa, H.Sasaki: “A Solution of Optimal Power Flows with Transient Stability Constrains”, Proceedings of The Annual Conference of Power Engineering Society, IEEJ, PE-00-29/PSE-00-34, pp.43-48, September 2000

2) Y.Yuan, J.Kubokawa, H.Sasaki: “A Development of Transient Stability Constrained Optimal Power Flow with unbalanced fault condition ~TTC (Total Transfer Capability) comparison under each contingencies ~”, Proceedings of The Annual Conference of Power Engineering Society, IEEJ, PE-04-23/PSE-04-23, September 2004