

## 無効電力機器の ATC に対する設置効果に関する研究

餘利野直人, 造賀芳文, 山口友也\*, Mehdi Eghbal,  
(広島大学)

## 1. 初めに

電力システムの信頼度維持で問題となる電圧崩壊は、重負荷状態における無効電力の欠如から発生しやすく、通常、系統故障により引き起こされる。よって、電圧崩壊問題は故障解析を考慮した無効電力計画問題に密接に関係している。

規制緩和前には各電力会社の長期需要予測に基づいて無効電力計画、設備投資が行われていたが、規制緩和さらには自由化によって不確実性が増大し、最適な設備投資が行えない可能性がある。著者らはこれまでに、電圧安定性を考慮した無効電力計画問題の定式化と解法を提案し、機器設置に対する効果を検討してきた。無効電力機器の設置コストと系統の運用コストの合計を最小化することを目的とし、解法として、Particle Swarm Optimization (PSO)によって得られた配置に対して逐次線形化に基づくプログラミング(SLP)を用いて運用問題を解き、総コストを最小化する PSO/SLP 法によって無効電力機器の準最適配置を求めてきた。<sup>(1)</sup>

本稿では、さらに無効電力機器の設置効果として、電力取引の際に問題となる ATC(送電可能容量)を考慮に入れる。これまでの研究で求めた準最適配置時をベースケースとし、追加の無効電力機器の設置による ATC 増加の効果を求め、ある一定の託送要求を確保するのに必要なコスト、また無効電力保障のみで確保できる送電可能容量を求める。無効電力機器としては、静止型無効電力補償装置(SVC)を取り扱う。

## 2. 電圧・熱容量 ATC の定式化

電圧・熱容量 ATC は潮流方程式において、電圧、有効電力、無効電力、線路潮流の上下制限約を満たしながら、負荷への託送を最大にした時の基準負荷点からの送電分である。電圧・熱容量 ATC の定義より、下の式(1)のように定式化すると最適化問題が得られ、求められた最大の値  $\lambda$  が熱容量 ATC となる。

$$\begin{aligned} \text{minimize: } & -\lambda \\ \text{subject to } & f(x, \lambda) = y_0(x) + \lambda y_d - g(x) = 0 \quad (1) \\ & \underline{G} \leq G(x) \leq \overline{G} \\ & x = (v, P_e, Q_e, P_f) \end{aligned}$$

ここで、 $\lambda$  : 需要の増加を表すスカラーベクトル;  $x \in \mathbb{R}^{2n}$  : 状態変数;  $f(x, \lambda_f)$  : 拡張潮流方程式;  $y_d$  :  $\lambda$  が変化する際の各母線の電力注入変化を指定する定ベクトル。  $G$  : 電圧、無効電力、有効電力、線路潮流の制約条件である。

## 3. 設置コスト

図1は SVC と SC の設置コストを示しており、下限は機器単体のコストを、上限は他の要因を含む総合的な設置コストを表している。本稿では後者の値を適用し、式(2), (3)が得られる。

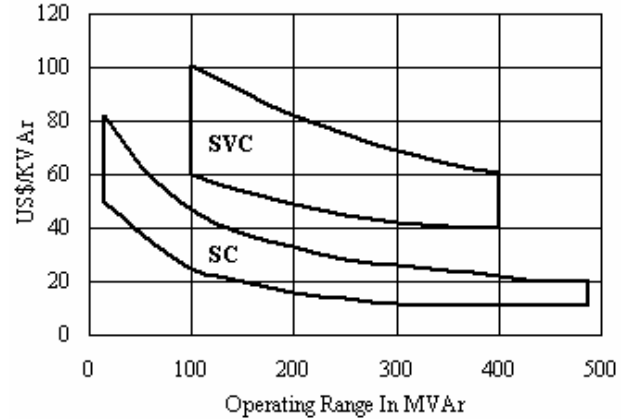


図1. SVC,SC の単価[US\$/KVar] [2]

これらを式(4)に用いることで設置コストが得られる。式(5)は減価償却の考えに基づいた年間の設置コストである。

$$\mu_{isvc} = 0.0003c_{isvc}^2 - 0.3051c_{isvc} + 127.38 \quad (2)$$

$$\mu_{isc} = -0.0000014c_{isc}^3 + 0.0014c_{isc}^2 - 0.52c_{isc} + 91 \quad (3)$$

$$F_{t0} = \sum_{i \in \Omega} (\mu_{isvc} c_{isvc} d_{isvc} + \mu_{isc} c_{isc} d_{isc}) \quad (4)$$

$$F_t = \frac{ir(1+ir)^{Dy}}{(1+ir)^{Dy} - 1} F_{t0} \quad (5)$$

ここで、 $\mu_i$ は設置量に関するコスト係数、 $c_i$ は機器の設置量、機器が設置される場合は  $d_i=1$ 、設置しなければ  $d_i=0$ 、 $ir$  は金利、 $Dy$ は機器の耐用年数である。

## 4. PSO のアルゴリズム

設置量上限内で ATC を最大化する無効電力機器の準最適配置を求めるため、メタヒューリスティック手法を用いる。本稿では GA に代わって、計算時間の短縮が期待される PSO を適用する。

・ PSO の更新式<sup>(4),(5)</sup>

探索  $k$  回目のエージェントの位置を  $s^k$ 、その速度を  $v^k$  とする。エージェントは各々の探索におけるそれまでの目的関数の最良値を得る位置  $pbest$  を覚えており、また、集団の中での目的関数の最良値を得る位置  $gbest$  を共有している。(6)式により、エージェントは  $pbest, gbest$  に確率的に近づくように速度を更新し、(7)式により次の探索点を得られる。

$$v^{k+1} = w \times v^k + c_1 \times r_1 \times (pbest - s^k) + c_2 \times r_2 \times (gbest - s^k) \quad (6)$$

$$s^{k+1} = s^k + v^{k+1} \quad (7)$$

ここで、 $w, c_1, c_2$  はそれぞれ現在の速度、 $pbest, gbest$  に対する重み係数、 $r_1, r_2$  は 0~1 の一様乱数である。

表1. 各負荷レベルにおける設置コストと送電可能容量の関係

負荷レベル[%]	設置コスト上限 [ $\times 10^6$ \$]												
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
70	0.4607	0.6504	0.8468	1.0775	1.2197	1.261	1.3663	1.3826	1.3003	1.3517	1.3923	1.3685	1.3569
80	0.188	0.5095	0.7639	0.9319	1.0984	1.2043	1.2775	1.3018	1.2735	1.3085	1.2742	1.3113	1.316
90		0.3109	0.6474	0.8426	1.0975	1.1871	1.2518	1.2766	1.3084	1.2792	1.2145	1.2741	1.3084
100			0.097	0.3655	0.6249	0.8719	0.9502	1.065	1.0879	1.1248	1.1248	1.1248	1.1545
110					0.111	0.4236	0.6642	0.8447	0.9518	0.9602	1.0055	1.0311	1.0323

## 5. 解法手順

本設置計画問題の解法は次のように要約される。

本設置計画法は設置コスト上限以下で ATC を最大化する最適配置を算出するものである。

Step1. 初期設定。機器の配置を PSO におけるエージェント数だけランダムに決定する。

Step2. 各想定故障において内点法により送電可能容量を求め、最過酷故障時の送電容量つまり最小の送電可能容量  $p$  を求める。これを各エージェントにおいて行う。

Step3. 送電可能容量  $p$  を最大化するように配置を更新する(PSO)。

以上を最大反復回数繰り返し、最大の送電容量とその時の最適配置を求める。

## 6. シミュレーション

IEEE-14 母線システムを用いてシミュレーションを行った。用いたパラメータは次のように設定した。

$$V_{\min} = 0.9pu, V_{\max} = 1.1pu, \alpha = 1, C_{h\max} = 0.60,$$

SVC の設置候補母線はスラック母線であるノード1を除く全母線とし、故障線路は全線路とした。

### 6. 1. 無効電力機器の ATC における設置効果

これまでの研究で求めた準最適配置時をベースケースとし、追加の無効電力機器の設置による ATC を求めた。追加の無効電力機器の設置コストに上限を設け、その範囲内で ATC を最大化する準最適配置を求め、準最適配置時の ATC (ノード2→ノード12の託送)と設置コストを表1に示す。但し、ここではこれまでの研究で用いた重負荷状態を100%負荷レベルとしている。これより各負荷レベルにおいて ATC を確保するのに必要となるコストを求めることができる。また、無効電力機器は ATC の増加に有効だが無効電力補償のみで確保できる ATC には限界があることを示した。

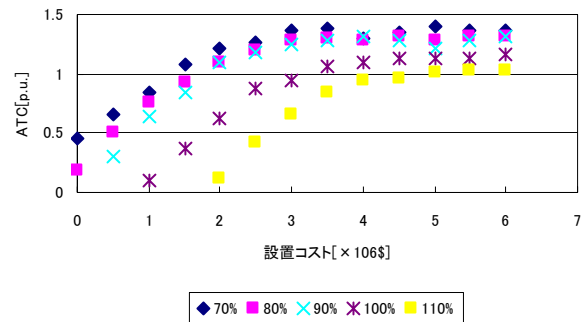


図2. ATC—設置コスト

## 7. まとめ

本稿では、無効電力機器の設置効果として ATC を取り上げ検討した。機器設置により ATC が増加することを確認した。また、準最適配置設置時をベース潮流とし追加の無効電力機器の最適配置を求め、そのときの ATC と設置コストを求めることで、ATC を確保するのに必要な設置コストを示した。また図2より、無効電力補償のみで ATC を増加させることには限界があることを示した。

今後の課題として、以上に述べた指標を用いて本研究の本来の目的である無効電力プライシングに活用できないか検討していこうと考えている。

## 参考文献

- (1) 餘利野直人, 伊藤陽一\*, E. E. Elaraby, 造賀芳文 “電力システムにおける無効電力機器の設置と効果” 電気学会研究会資料 PE-05-155, PSE05-162
- (2) Klaus Habur, Donal O’Leary, “FACTS For cost effective and reliable transmission of electrical energy”, Available: [www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/facts\\_siemens.pdf](http://www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/facts_siemens.pdf).
- (3) 餘利野直人, 川野晃紀, 末成展康, 造賀芳文 “電圧・熱容量 ATC の高速計算法の提案” 電気学会論文誌 C 123 巻1号, 2003
- (4) J.Kennedy and R.Eberhart, “Particle Swarm Optimization”, Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks, VoIV, pp.1942-1948, Perth, Australia, 1995