

蓄電池の最適 PQ 出力による 電圧安定度の改善

相良 光軌 * 千住 智信 *
(*琉球大学)

1 はじめに

電力自由化や、再生可能エネルギーの系統への導入量増加、経済的利益の追求による送電電力増加に伴い電力系統はこれまでより厳しい状況下におかれる [1]。送電線のより効率的な利用により、多くの電力系統が頻繁に電圧安定限界近傍での運転となり、電圧不安定や電圧崩壊の可能性が高まる。そのため、電圧安定性解析は電力系統の安定運用において主要な検討項目となる。そこで、有効電力と無効電力の両方を同時に考慮すると正確に電圧安定度解析が出来ることが期待される。

本論文では、蓄電池を用いて電圧安定度指標に基づいて有効・無効電力を最適制御することで、電力系統の電圧安定度を改善する手法を提案する。負荷変電所に設置した蓄電池の最適有効・無効電力制御を行い、電力系統のさらなる電圧安定度の向上をシミュレーションにより示す。

2 電力系統モデルと電圧安定度解析

本論文で用いる電力系統モデルを図 1 に示す [2]。本論文では IEEE 5 Bus System を用いて、100MW を基準容量として設定した。図 2 より、送電端電圧を V_l 、受電端電圧を V_k 、受電側に送電される有効電力を P_k 、無効電力を Q_k とすると、2 母線の電力系統における電力潮流は次式で表わされる。

$$P_k - jQ_k = (V_k \angle \delta_k)^* \frac{V_l \angle \delta_l - V_k \angle \delta_k}{r_{lk} + jx_{lk}} \quad (1)$$

受電端電圧 V_k は、 $V_k > 0$ であることを考慮すると次式となる。

$$V_k = \sqrt{-(r_{lk}P_k + x_{lk}Q_k - \frac{V_l^2}{2}) \pm A_{lk}} \quad (2)$$

$$A_{lk} = \sqrt{\left(r_{lk}P_k + x_{lk}Q_k - \frac{V_l^2}{2}\right)^2 - (r_{lk}^2 + x_{lk}^2)(P_k^2 + Q_k^2)}$$

送電可能電力には限界があり、その時の電力を安定限界電力、電圧を安定限界電圧と呼ぶことにする。電圧の安定限界条件は (2) 式の A_{lk} 項が零となった下式から求められる。

$$\sqrt{\left(r_{lk}P_k + x_{lk}Q_k - \frac{V_l^2}{2}\right)^2 - (r_{lk}^2 + x_{lk}^2)(P_k^2 + Q_k^2)} = 0 \quad (3)$$

図 3 に (3) 式により得られた電圧安定度限界時の $P-Q$ 特性を示す。

3 電圧安定度評価指標

電圧安定度評価指標として、送電線 $l-k$ 間の動作点から安定限界曲面までの最短点距離を ΔP_{lk} 、 ΔQ_{lk} とすると下式で評価できる。

$$CBI_{lk} = \sqrt{\Delta P_{lk}^2 + \Delta Q_{lk}^2} \quad (4)$$

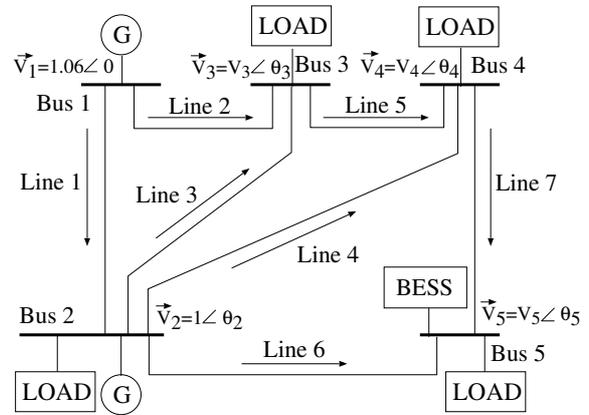


図 1: 電力系統モデル

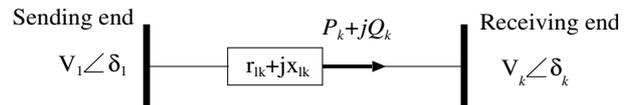


図 2: 送電線モデル

ただし、 l は送電端母線番号、 k は受電端母線番号である。従って、送電線の電圧安定度は、電圧安定度評価指標 (CBI: Critical Boundary Index) で表わされる。また、本指標が零に近づくほど電圧安定度が悪化することになる [3]。

3.1 目的関数

本論文では電圧安定度指標の最大化を達成するために粒子群最適化 (PSO) を用いる。下式に目的関数を示す。

$$\max : CBI_{lkmax} = \sqrt{\Delta P_{lk}^2 + \Delta Q_{lk}^2} \quad (5)$$

3.2 制約条件

有効・無効電力を蓄電池で補償するため、蓄電池のインバータ容量制約 S_{Bk} を考慮しなければならない。

$$S_{Bk} = \sqrt{P_{Bk}^2 + Q_{Bk}^2} \quad (6)$$

$$S_{Bk} = S_{Bkmax} \exp\left(\frac{\alpha_k - CBI_{lk}}{\xi_k}\right) \quad (7)$$

ここで、本論文では $\alpha_k = 0.1$ 、 $\xi_k = 0.5$ としている。

4 シミュレーション結果

図 1 の電力系統を用いてシミュレーションを行った。各ケースのシミュレーション条件は、母線 5 に接続した負荷の有効電力を初期条件から電圧崩壊まで増加した場合 (ケース 1)、ケース 1 に加えて母線 5 に最適無効電力のみ補償した場合 (ケース 2)、ケース 1 に加えて母線 5 に最適有効・無効電力補償した場合 (ケース 3) とした。図 4 にシミュレーション結果を示す。ケース 1 について、図 4(a) より負荷の

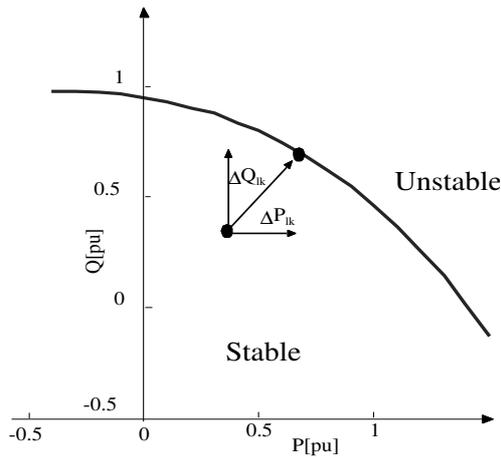


図 3: $P - Q$ Characteristics.

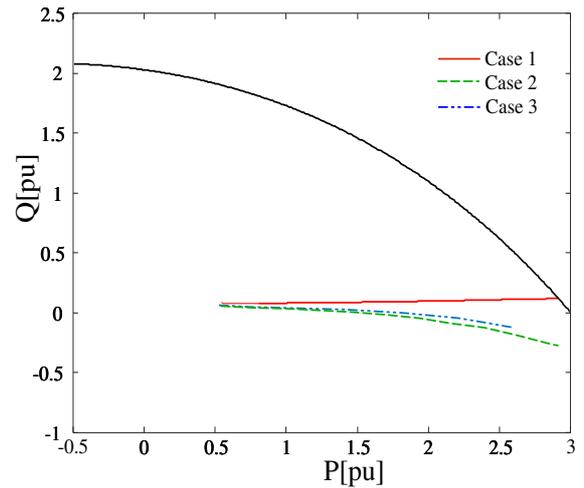
増加に伴い送電線に流れる有効・無効電力が増加し、安定限界曲面に至ると電圧崩壊が生じている。図 4(b)より、ケース 1 の CBI は安定限界曲面上にあるとき零である。図 4(a)よりケース 2, 3 では、電力補償を行うことで送電線 6 における動作点と安定限界曲面との距離が Case 1 の場合より大きくなっている。図 4(b) のケース 2, 3 では、ケース 1 より CBI が大きくなっている。また、図 4(c) からわかるように提案手法を用いると母線電圧の低下も抑制されている。図 4(d) に蓄電池の最適有効・無効電力出力を示す。シミュレーション結果より、同じインバータ容量であっても有効・無効電力補償を適切に行うことで、無効電力のみの補償と比較して電圧安定度が高いことがわかる。以上のことから、最適化手法を用いて最適有効・無効電力出力制御により電圧安定度を向上することは重要である。

5 むすび

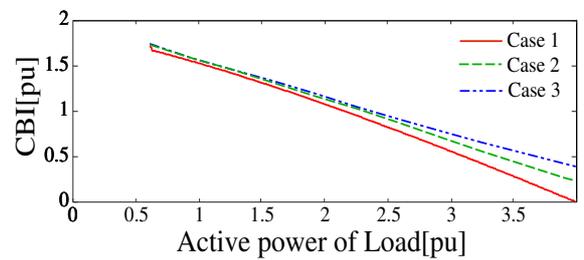
本論文では、PSO を用いて電圧安定度指標 (CBI) が最大となるよう蓄電池の有効・無効電力出力制御を行った。これにより、電力系統の電圧安定度の改善をシミュレーションにより確認できた。今後の課題として、蓄電池容量の最適化、蓄電池の複数設置場所の最適化、複数の母線負荷増加に対する電力補償を行う必要があると考えられる。

参考文献

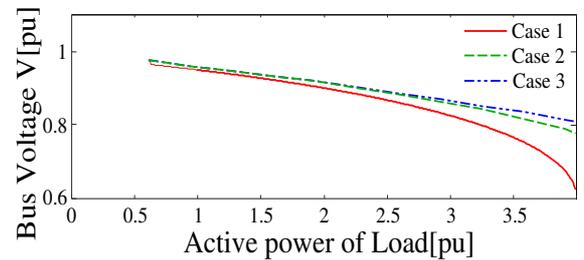
- [1] Yuan-Kang Wu, "A novel algorithm for ATC calculations and applications in deregulated electricity markets," *International Journal of Electr Power and Energy Systems*, vol. 29, Issue 10, pp. 810-821, 2007.
- [2] P. Srikanth, O. Rajendra, A. Yesuraj, M. Tilak, "Load Flow Analysis of IEEE 14 Bus System Using MATLAB", *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 2, Issue 5, pp. 149-155, 2013.
- [3] 橋 正人, 重信 颯人, 千住 智信, "新しい電圧安定度評価指標 (CBI) と従来評価指標の比較", H27 年電気学会 電力・エネルギー部門大会, No. 178, 2015.



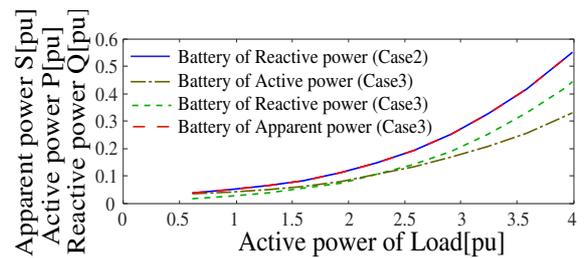
(a) 各ケースにおける $P-Q$ 特性 (送電線 6)



(b) 各ケースにおける電圧安定度指標 CBI (送電線 6)



(c) 各ケースにおける母線電圧 (母線 5)



(d) 各ケースにおける蓄電池補償

図 4: シミュレーション結果