電圧安定度制約を考慮した最適潮流計算手法

正員 岡 本 浩 (東京電力)

正員 田 辺 隆 也 (東京電力)

正員 多 田 泰 之 (東京電力)

正員 関 根 泰 次 (東京理科大学)

A Method for Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow (VSCOPF)

Hiroshi Okamoto, Member, Ryuya Tanabe, Member, Yasuyuki Tada, Member (Tokyo Electric Power Co.), Yasuji Sekine, Member (Science University of Tokyo)

This paper presents a novel formulation for solving optimal power flow (OPF) problems with voltage stability constraints. The proposed Voltage Stability Constrained OPF (VSCOPF) formulation is based on a voltage sensitivity with respect to total load demand representing a gradient of P-V curve at an operating point. In the formulation, voltage constraints are given by a set of equality constraints which should be satisfied by the voltage sensitivity. Since the voltage stability constraints retain sparse matrix structure, the method based on the proposed OPF formulation may effectively solve large-scale problems. The feasibility and effectiveness of the proposed method are demonstrated on test problems with 2-bus, 49-bus and 2312-bus systems.

キーワード：電力系統，最適潮流計算，電圧安定性，電圧感度

Keywords: power systems, optimal power flow, voltage stability, voltage sensitivity

1. はじめに

電力市場の規制緩和・自由化の進行により，電力事業を取り囲む環境は，IPPや電力託送などの様々な事業形態が混在する競争環境へと移行しつつある。このような環境においては，電力系統の計画・運用を客観的かつ高精度に評価することがとりわけ重要な課題であり，電力系統をより効率的に解析・評価する技術の必要性が高まっている⁽¹⁾。

系統計画・運用に対する解析技術としては，最適潮流計算(OPF; Optimal Power Flow)の応用が期待されており，調相設備計画の検討やIPP・電力託送の解析・評価など広範な問題への適用が検討されている⁽¹⁾。OPFは，系統計画・運用を，経済性などの側面から客観的に評価するための有効な解析技術であり，系統解析・評価の基盤技術として著者らもその整備を進めている^{(2)~(8)}。

OPFについては，適用先に応じた様々な制約や目的関数を考慮した問題設定に対して，逐次線形計画法や内点法などにに基づく有効な手法が開発されている⁽⁹⁾。しかしながら，OPFで計算される潮流解は，場合によっては電圧低め解となって電圧安定度面で許容できないことも起こり得る^{(10)~(11)}。現状では，OPFで低め解が計算された場合には，電圧に関連する制約条件や目的関数をヒューリスティッ

クに調整するなどして，解の修正を行わねばならない。

電圧安定度を考慮したOPFとしては，文献(12)による電圧安定度の予防制御手法が挙げられる。ここでは，総需要を目的関数として，運用制約を満たしながら総需要を最大化するような制御(電力用コンデンサの投入，変圧器タップの調整，発電力の調整など)を求める問題が定式化されている。また，求められた運用解が電圧高め解であることを保証するために，潮流方程式のJacobian行列の行列式の符号が，初期解から変化しないことを制約に追加している。しかしながら，通常のOPFに組み込んで利用する際には，以下のような課題を有している。

- 電圧高め解の初期解が必要である。
- 潮流方程式のJacobian行列の行列式に対するJacobianの計算労力が大きい。
- 電圧安定度から見た余裕度を設定する際に，Jacobian行列式のしきい値をどのように決めればよいかが分からない(電圧安定度から見た余裕度が非常に小さい運用状態が計算されてしまう可能性がある)ため，余裕度を試行錯誤的に設定する必要がある。

また，文献(13)では，電圧安定度を考慮した調相設備計画手法を提案している。ここでは，想定故障に対して予防制御および補正制御が行われた，それぞれの状態における

電圧安定限界までの負荷余裕を制約としており、そこでは負荷余裕の最大化問題の解が満たすべき Kuhn-Tucker 条件を電圧安定限界の条件として用いている。しかしながら、OPF に組み込んで利用するためには、以下のような問題を解決する必要がある。

- 電圧高め解を保証する条件が陽に考慮されていないため、電圧高め解となるように母線電圧の上下限や調相設備の容量等の制約を予め適切に設定する必要がある。
- OPF で扱う決定変数が想定故障の数（健全状態も含む）に比例して増大するため、電圧安定度制約を直接適用することは効率的とはいえない（文献(13)では感度行列を用いて計算の効率化を図っている）。

このような背景を踏まえ著者等は、電圧感度に基づいて OPF に電圧安定度の制約を追加するための定式化を検討している^{(3),(6),(7)}。文献(3)では、電圧感度ベクトル（母線電圧の大きさと位相角の総需要変化に対する感度を要素として持つ）の Jacobian（潮流解の 2 階導関数）から、電圧安定度の評価関数の Jacobian を計算することにより、電圧安定度制約を OPF に組入れることを検討した。しかしながら、電圧安定度制約の Jacobian の計算は密行列での計算となるため、大規模システムへの適用では多くの計算労力が必要となり必ずしも実用的とはいえない。

そこで、本論文では、大規模システムへの適用を可能とするため、スパース性を考慮した新しい定式化に基づいて電圧安定度を考慮した OPF 手法を提案する。提案手法では、電圧感度ベクトルが満たすべき一連の非線形方程式がスパース性を保持するように定式化した上で、等式制約として OPF に直接組み込んでおり、スパース性を用いた効率的な解法の適用が可能である。

以下本論文では、第 2 章において電圧安定度制約を考慮した OPF の定式化を述べるとともに、提案手法の利用法を簡単に整理する。次に、第 3 章において、2 母線モデルシステムにおける送電可能容量 (ATC; Available Transfer Capability) の計算、49 母線モデルシステムにおける燃料費最小化問題、2312 母線の実規模モデルシステムにおける最小電圧感度の最大化問題および総需要の最大化問題を具体的な例題として、提案手法の有効性・妥当性を検証する。

2. 電圧安定度制約付き OPF (VSCOPF) の定式化

〈2・1〉電圧感度に基づく電圧安定度制約 対象システムにおいて、運用点での値 P_0 から $P = (1 + \lambda)P_0$ となるように総需要 P を増加させることを考える。ここで、各負荷母線、各発電機母線における増加分の分担についてはアブリオリに与える。システム内の負荷母線 i において、横軸を総需要の増加率 λ 、縦軸を母線電圧として描いたいわゆる PV 曲線（ただし総需要が正規化されている）の運用点での勾配（電圧感度 $dV_i/d\lambda$ ）は、電圧安定度に対する有力な評価指標として利用できる（図 1 参照）⁽¹⁴⁾。

さて、一般に、潮流方程式は次式で記述することができる。

図 1 総需要増加パラメータ λ に関する電圧感度

Fig. 1. The voltage sensitivity with respect to total load demand parameter λ .

$$F(x, u) = p \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 x は、母線電圧の大きさと位相角からなる電圧ベクトルであり、 u は電力用コンデンサ投入量や変圧器タップ比等の系統のアドミタンス行列に関連する制御量である。また、 p は PV 指定母線においては母線への注入有効電力、それ以外の母線においては母線への注入有効・無効電力からなる指定値ベクトルである。

ここで、総需要をパラメータ λ の関数で表し、指定値ベクトルが総需要の変化に伴い次式で変化するものとする。

$$p = p(\lambda) \dots \dots \dots (2)$$

この時、(1) 式の潮流方程式は次式で書き直すことができる。

$$F(x, u) - p(\lambda) = 0 \dots \dots \dots (3)$$

(3) 式の潮流方程式において、全微分を取ると次式となる。

$$\frac{\partial F(x, u)}{\partial x} dx - \frac{\partial p(\lambda)}{\partial \lambda} d\lambda = 0 \dots \dots \dots (4)$$

したがって、 λ の変化に対する電圧解 x の変化の感度（総需要電圧感度） y は、潮流方程式の x に対する Jacobian 行列を $J(x, u)$ で表わすと次式で計算できる。ただし、 $\partial p(\lambda)/\partial \lambda$ は、総需要増加に対する各負荷の増加シナリオとして予め与える。

$$y = \frac{dx}{d\lambda} = J(x, u)^{-1} \frac{\partial p(\lambda)}{\partial \lambda} \dots \dots \dots (5)$$

(5) 式の計算は、Jacobian 行列の逆行列を求めることなく、次の連立方程式を解くことで行うことができる。

$$J(x, u)y - \frac{\partial p(\lambda)}{\partial \lambda} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

(6) 式の計算は、OPF の定式化において (6) 式を等式制約として直接組み込むことにより実現できる。ここで、潮流方程式の電圧ベクトル x に対する Jacobian 行列は、一般にスパース行列であり、(6) 式の計算に対してはスパース性を考慮した効率的な解法が適用可能である。

〈2・2〉 VSCOPF の定式化 (6) 式を利用してスパー
 クス性を考慮した電圧安定度制約付き OPF(VSCOPF; Volt-
 age Stability Constrained Optimal Power Flow) は、以
 下のように定式化できる。

$$\min_{x,y,u} f(x,y,u) \dots\dots\dots (7)$$

subject to

$$g_1(x,u) = 0 \dots\dots\dots (8)$$

$$g_2(x,y,u) = J(x,u)y - \frac{dp(\lambda)}{d\lambda} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

$$h(x,y,u) \leq 0 \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $f(x,y,u)$ は最適化したい目的関数（総燃料費、送
 電損失など）である。さらに、(8) 式は潮流方程式を表し、
 (9) 式は総需要電圧感度ベクトルが満たすべき等式制約で
 あり、スパークス性を保持している。(10) 式は電圧の大きさ
 やブランチ潮流等の上下限制約であり、 y に含まれる電圧
 感度 $dV_i/d\lambda$ に上下限を与えることで、全ての負荷母線の
 電圧感度を考慮することができる。

〈2・3〉 VSCOPF の利用法 提案手法の適用に際し
 ては、電圧安定度制約をどの母線にどの程度の厳しさで与
 えるかについての予備的な検討が必要である。予備的な検
 討では、PV 曲線や限界需要等の電圧安定性の解析に基づ
 いて対象系統の電圧感度に関する特性を吟味し、（電圧弱点
 母線あるいは電圧安定性に大きく寄与する）適切な母線に
 対して有効な大きさの電圧安定度制約を課すことを解析す
 る必要がある。

さらに、提案手法を適用した結果に対しては、電圧安定
 度を考慮するために必要なコスト（例えば、燃料費の増分）
 と電圧安定度を考慮することによるセキュリティ向上とを、
 問題設定に応じた PV 曲線や限界潮流等の解析と併せて検
 討し、電圧安定度制約の設定にフィードバックすることが
 重要である。このような一連の解析により提案手法の適用
 が可能になるものと考えている。

以下では、VSCOPF がどのような用途に利用可能であ
 るかを整理する。

電圧安定度を考慮した運用計画 ある運用点の計算に
 おいて電圧安定度を加味することにより、電圧安定度上問
 題の無い運用計画を検討することができる。また、需要の
 変化シナリオに従い需要を増大させ、その限界点において
 電圧安定度制約を考慮することにより、電圧安定度上問題
 の無い範囲での運用限界を解析することができる。

電圧安定度を考慮した送電可能容量の計算 例えば 2
 地域間の託送量を目的関数として、これを最大化するよう
 に OPF を構成すれば、送電可能容量を計算できる。OPF
 に電圧安定度制約を追加しておけば、電圧安定度上問題な
 い範囲で、送電可能容量を計算できることになる。

送電ネットワーク制約を考慮した起動停止計画 著者
 らで開発中の系統評価システムでは、送電ネットワーク制
 約を考慮した発電機の起動停止計画を、OPF 結果に基づく

図 2 2 母線系統

Fig. 2. Two-bus model system.

逐次 DP 法によって計算している⁽¹⁵⁾。もし OPF に電圧安
 定度制約を加味できれば、得られた電源運用パターンは電
 圧安定度的にも望ましいものとなり、電圧不安定のケース
 が生じる可能性を抑制し、より高い可能性で実行可能な解
 を得ることができる。

電圧安定度制約を考慮した調相設備計画 調相設備計
 画問題の定式化に電圧安定度制約を加えることで、電圧安
 定度的に望ましい計画案を得ることができる。また電圧安
 定度の評価を制約とするのではなく、目的関数とすることで、
 電圧安定度的に最も望ましい調相設備計画も計算できるこ
 とになる（〈3・3〉節参照）。

3. 数値計算例

本章では、2 母線、49 母線、2312 母線のモデル系統にお
 ける具体的な例題を用いて、提案手法の有効性・妥当性を
 検証する。ここで、数値計算における電圧ベクトルの初期
 値は、全母線の電圧の大きさを 1[pu]、位相角を 0[rad] と
 する。

なお、以下の数値計算では、提案する定式化を汎用最適化
 ソルバー MINOS⁽¹⁶⁾ を用いて解いている。MINOS は基本
 的に、線形計画法の解法であるシンプレックス法を線形制約
 付き非線形計画法へ拡張した一般化縮約勾配法（generalized
 reduced gradient method）に基づいており、問題のスパー
 スクス性を利用した有効な最適化ソルバーとして知られている。

〈3・1〉 2 母線系統を用いた ATC の計算 〈2・2〉節
 で定式化した VSCOPF を利用すれば、電圧安定度を考慮
 した送電可能容量 (ATC) を計算できる。ここでは、図 2 の
 簡単な 2 母線系統を例題として、VSCOPF の定式化の妥
 当性を検証する。なお、この例題は文献 (3) で報告したも
 のと同一の問題である。ここでは、〈2・2〉節の定式化を用い
 ても文献 (3) の定式化と同一の結果が得られることを確認
 する。

この 2 母線系統において、電圧安定度制約、母線電圧の
 上下限制約、調相設備の上下限制約を考慮して、需要を最
 大化する問題を考える。なお発電機有効・無効電力に対す
 る制約は無視する。ここで需要は以下のように定力率で変
 化すると想定する。

$$P + jQ = L(1.0 + j0.2) \dots\dots\dots (11)$$

この問題は、次式を目的関数とする VSCOPF となる。

$$\min_{L, Y, V_1, V_2, \delta_2} -L \dots \dots \dots (12)$$

ただし、決定変数 $\{V_2, \delta_2\}$, $\{L, Y, V_1\}$ は、〈2・2〉節で定式化した VSCOPF のそれぞれ x , u に相当している。また、等式制約、不等式制約については、〈2・2〉節の通りに与えるものとする。

$X = 0.2[\text{pu}]$, $V_1^{\min} = V_2^{\min} = 0.95[\text{pu}]$, $V_1^{\max} = V_2^{\max} = 1.05[\text{pu}]$, $Y_{\min} = 0[\text{pu}]$ という条件で、以下の 6 ケースについて VSCOPF を適用する。なお、 $\min, \max$ は、それぞれ変数の上限・下限を表す記号である。

- Case 1: $Y_{\max} = 1[\text{pu}]$, $-1.0 \leq y \leq 0.0$
- Case 2: $Y_{\max} = 1[\text{pu}]$, $-5.0 \leq y \leq 0.0$
- Case 3: $Y_{\max} = 1[\text{pu}]$, 電圧安定度制約なし
- Case 4: $Y_{\max} = 4[\text{pu}]$, $-1.0 \leq y \leq 0.0$
- Case 5: $Y_{\max} = 4[\text{pu}]$, $-5.0 \leq y \leq 0.0$
- Case 6: $Y_{\max} = 4[\text{pu}]$, 電圧安定度制約なし

各ケースについて VSCOPF を適用した結果を図 3 に示す。図 3 に示す P が、各ケースに対して求められた解の ATC に相当する。得られた計算結果より以下がわかる。

- (1) 調相設備容量が少ない時には、調相設備が上限まで投入される (Case 1, 2, 3)。
- (2) 電圧安定度を緩くした Case 2 と、電圧安定度を無視した Case 3 では、電圧安定度を厳しくした Case 1 よりも ATC が増大している。Case 2, 3 では負荷端電圧が下限値に張り付く箇所に同一の解が得られており、電圧安定度制約ではなく、調相設備量の制約により ATC が決まっている。
- (3) 調相設備容量の上限を大きくした際には、(電圧安定度を無視した Case 6) > (電圧安定度を緩くした Case 5) > (電圧安定度を厳しくした Case 4) の順に計算される ATC の値が大きくなる。
- (4) Case 6 では限界投入量⁽¹¹⁾以上に調相設備が投入されたため低め解が計算されているのに対し、Case 5 ではノーズ付近の高め解、Case 4 ではノーズまで余裕のある高め解が求められている。

これらの結果より、提案する定式化に基づく VSCOPF が妥当な計算結果を与えることが確認できる。なお、この結果はスパース性を考慮していない定式化である文献(3)の数値計算結果と完全に一致している。

〈3・2〉発電機の燃料費最小化問題への適用 図 4 に示すような、IEEE の RTS (Reliability Test System)⁽¹⁷⁾ をベースに修正した 49 母線系統に提案手法を適用する。具体的には、電圧安定度を考慮した発電機の燃料費最小化問題を設定し、提案手法の有効性・実用性を検証する。

この問題では、電圧安定度制約、および母線電圧、調相設備量、発電有効・無効電力の上下限に対する制約を考慮して発電機の総燃料費を最小化する。ただし、発電機の燃料費特性は 2 次関数 ($\alpha P_g^2 + \beta P_g + \gamma$, P_g : 発電有効電力) で模擬し、簡単のため全発電機に同一の特性 (PU 換算値:

図 3 ATC の計算結果
Fig. 3. ATCs computed by VSCOPF.

図 4 IEEE RTS (Reliability Test System) をベースに修正したテスト系統
Fig. 4. The modified IEEE Reliability Test System (RTS).

$\alpha = 0.001$, $\beta = 1.0$, $\gamma = 0.0$) を与える。また、発電有効電力は初期状態の 40~110% の範囲で調整されるものとし、母線電圧の大きさは全て 0.95~1.05[pu] の範囲とする。

以上のような条件で以下の 3 ケースについて VSOPF を適用する。なお、以下のケースは、電圧安定度制約なし計算から徐々に電圧安定度制約を厳しくしていった幾つかの計

表 1 各ケースに対する VSCOPF の総燃料費
Table 1. Total fuel cost for each case of VSCOPF

ケース名	総燃料費	Case A に対する増加分
Case A	76.7489	0.0
Case B	76.8774	0.1285
Case C	76.9684	0.2195

算の中から、その代表として、電圧安定度制約なしのケース、電圧安定度を比較的緩く設定したケース、電圧安定度制約を比較的厳しくしたケースを選択したものである。

Case A: 電圧安定度制約なし

Case B: 電圧安定度制約あり ($-0.0125 \leq y \leq 0.0$)

Case C: 電圧安定度制約あり ($-0.0118 \leq y \leq 0.0$)

各ケースに対して VSCOPF を適用した結果得られた、それぞれの総燃料費を表 1 に示す。表 1 からわかるように、電圧安定度制約を厳しくするに従い、発電機の総燃料費が増大する。この燃料費の増加分は、電圧安定性に対するセキュリティを考慮することによるコストの増分と考えることができ、PV 曲線や限界潮流等の解析を併せて行うことにより、所望の電圧安定度を満足するために必要なコストの検討が可能になると考えられる。

VSCOPF を適用した結果を電圧安定性の面から評価するために、各ケースに対して VSCOPF を適用した結果を初期点として、表 2 に示す条件で PV 曲線を計算する。ここで、PV 曲線の計算条件は、提案する定式化（電圧安定度制約の組み込み）の妥当性を確認することを主眼においたものであり、発電無効電力の制約を考慮した場合としない場合とを比較することより、提案する定式化の適用限界（性能）を見極めることを狙いとしたものである。勿論、実際の問題への適用に際しては、問題設定のバランスを考えた上で、できる限り現実の制約を加味することが必要であり、発電無効電力の制約については、実際の検討において考慮すべき制約の一つであることに注意されたい。

PV 曲線の計算には、PC (Personal Computer) による系統解析研究統合環境 (IMPACT)⁽¹⁸⁾ の一機能である、各種制約を考慮した連続型潮流計算手法⁽¹⁹⁾ を用いている。なお、各負荷の増加シナリオは有効・無効電力ともに一定割合（定力率）で増加するとし、発電機出力は、負荷増加に合わせて、初期値の出力配分比率で一律に増加させる。また、簡単のため、変圧器のタップおよび調相設備の投入容量は初期点で固定とする。

図 5～10 は、各ケースに対して VSCOPF を適用した結果を初期点とした PV 曲線を示したものである。ここで、図中の y_{min} は、総需要電圧感度の最小値を示しており、本論文では最小の総需要電圧感度をもつ母線を電圧最弱点母線と定義する。

初期潮流解および VSCOPF の結果に対する PV 曲線を示す図 5～図 10 より以下がわかる。

- (1) 発電機無効電力の制約を無視した PV 曲線においては、(電圧安定度制約を厳しくした Case C) > (電

図 5 Case A: 電圧安定度制約なしの OPF の PV 曲線 (発電機無効電力制約を無視)

Fig. 5. Case A: PV curve of OPF solution without voltage stability constraints (without generator reactive power constraints).

図 6 Case A: 電圧安定度制約なしの OPF の PV 曲線 (発電機無効電力制約を考慮)

Fig. 6. Case A: PV curve of OPF solution without voltage stability constraints (with generator reactive power constraints).

図 7 Case B: VSCOPF($-0.0125 \leq \frac{dx}{d\lambda} \leq 0.0$) の PV 曲線 (発電機無効電力制約を無視)

Fig. 7. Case B: PV curve of VSCOPF solution (without generator reactive power constraints).

図 9 Case C: VSCOPF($-0.0118 \leq \frac{dx}{d\lambda} \leq 0.0$) の PV 曲線 (発電機無効電力制約を無視)

Fig. 9. Case C: PV curve of VSCOPF solution (without generator reactive power constraints).

図 8 Case B: VSCOPF($-0.0125 \leq \frac{dx}{d\lambda} \leq 0.0$) の PV 曲線 (発電機無効電力制約を考慮)

Fig. 8. Case B: PV curve of VSCOPF solution (with generator reactive power constraints).

図 10 Case C: VSCOPF($-0.0118 \leq \frac{dx}{d\lambda} \leq 0.0$) の PV 曲線 (発電機無効電力制約を考慮)

Fig. 10. Case C: PV curve of VSCOPF solution (with generator reactive power constraints).

表 2 PV 曲線の計算条件
Table 2. Computational condition of P-V curves

図の番号	初期点	発電機無効電力出力の上下限制約
図 5	Case A の結果	考慮
図 6	Case A の結果	無視
図 7	Case B の結果	考慮
図 8	Case B の結果	無視
図 9	Case C の結果	考慮
図 10	Case C の結果	無視

圧安定度制約を緩くした Case B) > (電圧安定度制約を無視した Case A) の順に限界需要 (PV 曲線のノーズ) が大きくなる。発電機無効電力の制限を無視した PV 曲線では、最小の総需要電圧感度 $y_{\min}$ の高い順に限界需要が大きくなることがわかる (図 5, 図 7, 図 9)。

(2) 発電機の無効電力の上下限制約を考慮した PV 曲線においては、(電圧安定度制約を緩くした Case B) > (電圧安定度制約を厳しくした Case C) > (電圧安定度制約を無視した Case A) の順に限界需要が大きくなる。発電機の無効電力出力の制限を考慮した PV 曲線の場合は、必ずしも電圧安定度制約の厳しい順に限界需要が大きくなるとはいえないことがわかる (図 6, 図 8, 図 10)。

(3) 電圧安定度制約により電圧高め解を得ることは保証できるが、発電機無効電力が制限にかかることにより電圧最弱点母線が変化する場合があるため、必ずしも電圧安定度制約の厳しい (総需要電圧感度の高い) 順に限界需要が伸びるとはいえない。Case B では母線 6 が常に電圧最弱点母線であるが、Case C では需要増加の過程で、電圧最弱点母線が母線 6 から母線 3 に変化しているため、Case C が Case B に比べ限界需要が小さい結果になったと考えられる。これらの考察により、提案する定式化に基づく VSCOPF が妥当な計算結果を与えることが確認できる。

〈3・3〉大規模システムモデルへの適用 2312 母線, 2824 ブランチのシステムモデル (発電機数 272, 調相設備数 513, 単巻変圧器 59, 3 巻線変圧器 472) へ提案手法を適用する。

具体的には、最小の (電圧最弱点母線 i の) 総需要電圧感度 $dV_i/d\lambda$ を最大化する max-min 問題, ならびに初期値 P_0 から $P = \Lambda P_0$ となるように総需要 P を増加させる, 総需要パラメータ Λ (制御変数 u に含まれる) の最大化問題を設定し, 提案手法の実規模システムに対する有効性を検証する。これらの問題は, それぞれ (13) 式, (14) 式を目的関数とする VSCOPF となる。

$$\max_{x,y,u} \min_i dV_i/d\lambda \dots\dots\dots (13)$$

$$\max_{x,y,u} \Lambda \dots\dots\dots (14)$$

総需要電圧感度を考慮した提案手法の有効性を検証するため, 電圧安定度制約, 母線電圧, 発電機有効・無効電力

表 3 最小の総需要電圧感度と限界需要
Table 3. minimum $dV_i/d\lambda$ and maximum total load demand.

ケース	minimum $dV_i/d\lambda$	限界需要 [MW]*
VSCOPF-1	-0.02304	75,597.1
VSCOPF-2	-0.02194	75,166.4

*: PV 曲線の計算では, 需要および発電は一律に増加, 発電機の有効・無効電力出力制限を考慮, 調相設備と変圧器タップは初期点の値で固定。

表 4 最小総需要電圧感度と総需要
Table 4. minimum $dV_i/d\lambda$ and total load demand.

ケース	minimum $dV_i/d\lambda$	Λ	総需要 [MW]
VSCOPF-3	-0.0250	1.03266	76,879.9
VSCOPF-4	-0.0275	1.05159	78,288.8

図 11 VSCOPF-3 と VSCOPF-4 の PV 曲線
Fig.11. PV curves of cases VSCOPF-3 and VSCOPF-4.

出力, 調相設備容量, 変圧器タップ比に対する制約を考慮して, 以下のケースについて VSCOPF を適用する。

VSCOPF-1: 無効電力損失の最小化

VSCOPF-2: 最小総需要電圧感度の最大化

VSCOPF-3: 総需要の最大化 ($-0.0250 \leq dV_i/d\lambda \leq 0.0$)

VSCOPF-4: 総需要の最大化 ($-0.0275 \leq dV_i/d\lambda \leq 0.0$)

また, 計算時間や収束性を評価するため, 電圧安定度制約を考慮しない以下の OPF との比較を行う。

OPF-1: 無効電力損失の最小化

VSCOPF-1 と VSCOPF-2 で得られた最小の総需要電圧感度 $dV_i/d\lambda$, 各ケースの解を初期点として PV 曲線を計算して得られた, それぞれの限界需要を表 3 に示す。

表 3 に示すように, VSCOPF-2 では, VSCOPF-1 よりも最小の電圧感度が約 0.0011 改善されており, 提案する定式化により, OPF の制御変数として総需要電圧感度を扱えることが確認できる。しかしながら, 限界需要は VSCOPF-1 が VSCOPF-2 よりも約 430.7MW 伸びており, 無効電力出力制限等の影響により, 電圧感度の改善の通り, 必ずしも限界需要が伸びるとは限らないことがわかる。

VSCOPF-3 および VSCOPF-4 で得られた, 最小の総需要電圧感度 $dV_i/d\lambda$, 総需要パラメータ Λ , 総需要を表 4

表 5 計算時間と繰り返し計算回数の比較

Table 5. Computation time and number of iterations of MINOS.

ケース	変数の数	制約の数	計算時間 [s] ^{*1}	反復回数 ^{*2}
VSCOPF-1	10,577	10,040	2059	26,726
OPF-1	6,211	4,683	701	19,066

^{*1}: PentiumIII 450MHz の CPU を使用^{*2}: MINOS の一般化縮約勾配法および準ニュートン法の全反復数

に示す。また、VSCOPF-3 と VSCOPF-4 で得られたそれぞれの潮流解を初期点として計算した、電圧最弱点母線の PV 曲線を図 11 に示す。

表 4 と図 11 に示すように、両ケースで設定したそれぞれの電圧安定度制約を満足する総需要がそれぞれ得られている。電圧安定度制約をより厳しく設定した VSCOPF-3 では、VSCOPF-4 よりも総需要パラメータ Λ が小さくなっている。また、両ケースとも、最小の総需要電圧感度が電圧安定度制約の下限值となっており、電圧安定度制約により総需要が決まっている。これらの結果により、提案する定式化が妥当な計算結果を与えることが確認できる。

表 5 は、無効電力損失最小化の各ケースにおける、変数および制約の数、計算時間、ソルバーの反復回数をそれぞれ示したものである。VSCOPF-1 の制約の数、計算時間は、OPF-1 のそれぞれ約 2.2 倍、2.9 倍であり、計算時間は制約の数の概ね 1.4 乗に比例している。また、VSCOPF-1 の変数の数は OPF-1 の約 1.7 倍であり、計算時間は変数の数の約 2.0 乗に比例している。提案する定式化により、大規模システムに対しても実用的な計算時間で収束性の問題も無く解が得られることが確認できる。なお、大規模システムに対する著者らのこれまでの数値実験でも、変数の数の概ね 2 乗に比例する計算時間となっている。

4. おわりに

本論文では、大規模システムへの適用を可能とするため、スパース性を考慮した新しい定式化に基づいて電圧安定度を考慮した OPF(VSCOPF) 手法を提案するとともに、2312 母線の大規模システムモデルを含む具体的な例題を用いて、提案手法の妥当性・有効性を確認した。これまでに得られた知見を以下にまとめる。

- 総需要に対する電圧感度を所望の範囲に抑えつつ、ATC の計算、総燃料費最小化、総需要の最大化等の OPF を計算できる。
- 発電機の無効電力の制限等により、電圧安定度制約を厳しくすることによって必ずしも限界需要が大きくなるとはいえないが、電圧安定度制約を考慮することにより電圧高め解を必ず得ることができる。
- 2000 母線程度のシステムに対する著者らのこれまでの数値実験では、変数の数の概ね 2 乗に比例する計算時間となっており、大規模システムに対しても実用的な計算時間で収束性の問題も無く解が得られる。

今後は以下の課題に取り組む予定である。

- VSCOPF 適用に際しての電圧安定度制約の設定方法の検討
- 大規模システムを用いた実用性・妥当性の更なる検証
- $N-1$ 等の信頼度基準の組み込み法の検討
- 過渡安定度制約を考慮した OPF⁽⁸⁾ との組合せ
(平成 13 年 2 月 27 日受付, 同 13 年 6 月 7 日再受付)

文 献

- (1) CIGRE Symposium Tours 1997, "Impact of Open Trading on Power Systems," presented at France, 8-10 June 1997.
- (2) 田辺, 多田, 岡本 他, "大規模電力システムに対する分割最適潮流計算手法," 電学論 B, Vol.119-B, No.12, pp.1402-1411, 1999.
- (3) 岡本, 田辺, 多田, 関根, "電圧安定性を考慮した最適潮流計算手法," 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会 (論文 II), No.195, pp.547-548, 2000.
- (4) 多田, 岡本, 田辺 他, "系統構成と発電機出力を同時に変数とした最適潮流計算の一検討," 電気学会電力エネルギー部門大会, No.196, pp.549-550, 2000.
- (5) 田辺, 多田, 岡本 他, "実行可能性の回復を等価コストとして考慮した OPF 手法による一解析," 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-00-105, PSE-00-110, 2000.
- (6) 岡本, 田辺, 多田, 関根, "電圧安定度制約を考慮した最適潮流計算手法について," 平成 12 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-00-25, PSE-00-30, 2000.
- (7) 岡本, 田辺, 多田, 関根, "電圧安定度制約を考慮した最適潮流計算手法—大規模システムモデルによる検証—," 平成 13 年電気学会全国大会, No.6-116, 2001.
- (8) 陳, 小野, 多田, 岡本, 田辺, "過渡安定度制約を考慮した電力システムの最適運用の決定法," 電学論 B, Vol.120-B, No.12, pp.1582-1594, 2000.
- (9) IEEE, "IEEE Tutorial Course, Optimal Power Flow: Solution Techniques, Requirement, and Challenges," IEEE Power Eng. Soc., 96TP111-0, 1996.
- (10) 方, 斎藤, 豊田, "電圧安定性余裕を考慮した経済的負荷配分," 平成 5 年電気学会電力・エネルギー部門大会 (論文 II), pp.277-278, 1993.
- (11) 田村, 小林, 北 他, "電圧安定性を考慮した電力システムの調相設備限界投入量の決定," 平成 7 年電気学会電力・エネルギー部門大会 (論文 I), pp.1-6, 1995.
- (12) 熊野, 田中, 横山, 関根, "電力システムの最近接臨界点算出と準最適電圧崩壊予防制御," 電学論 B, Vol.110, No.11, pp.911-919, 1990.
- (13) 原田, 餘利野, 佐々木 他, "電圧安定性を考慮した調相設備の最適配置について," 平成 9 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-97-53, PSE-97-53, 1997.
- (14) Y.Tada, H.Okamoto, R.Tanabe, N.Kobayashi, Y.Sekine, "Two Novel Screening Methods to Decide Network Configurations to Maintain Voltage Stability Using Sensitivity Analysis," Proc. of the PICA 1999, pp.79-85, May 1999.
- (15) 田辺, 栗田, 多田, 岡本, 関根, "系統評価のための停止ランキングに基づく電源起動停止計画手法," 電学論 B, Vol.120-B, No.12, pp.1595-1606, 2000.
- (16) B.A. Murtagh and M.A. Saunders, MINOS 5.5 User's Guide, Technical Report SOL 83-20R, System Operation Laboratory, Stanford University, Stanford, CA, Jul. 1998.
- (17) The Reliability Test System Task Force, "IEEE Reliability Test System," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.6, pp.2047-2054, Nov./Dec., 1979.
- (18) 益子, 高原, 穴戸 他, "PC による系統解析研究統合環境 (Impact V2.0) の開発," 平成 12 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-00-17, PSE-00-22, 2000.
- (19) 穴戸, 金子, 小柳 他, "各種制約条件を考慮した連続型潮流計算手法の開発," 平成 12 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-00-18, PSE-00-23, 2000.

岡 本 浩（正員）平成5年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月東京電力（株）入社。平成12年7月まで同社電力技術研究所系統技術グループにて系統解析・制御に関わる研究に従事。現在、同社技術部技術調査グループに勤務。平成8年電気学会論文賞受賞。博士（工学）。計測自動制御学会およびIEEE会員。

田 辺 隆 也（正員）平成6年3月東京都立大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月東京電力（株）入社。平成13年7月まで、同社電力技術研究所系統技術グループにて、電力系統の解析・評価に関する研究に従事。現在、同社技術部系統技術・海外技術グループに勤務。平成3年、11年電気学会優秀論文発表賞受賞，博士（工学）。IEEE 会員。

多 田 泰 之（正員）昭和56年3月埼玉県立川越工業高等学校電気科卒業。同年4月東京電力（株）入社。63年東電学園大学部卒業。平成元年4月より、同社電力技術研究所系統技術グループにて、電力系統の研究，解析業務に従事。この間、平成元年4月より1年間東京大学工学部電気工学科受託研究員。平成8年電気学会論文賞，平成10年同優秀論文発表賞受賞。技術士（電気・電子部門）。博士（工学）。IEEE 会員。

関 根 泰 次（正員）昭和6年12月7日生。34年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月、東京大学工学部電気工学科講師。35年同助教授。47年同教授。現在、東京理科大学工学部電気工学科教授。主に電力系統工学および系統工学の研究に従事。工学博士。34,45,50,62年および平成8年電気学会論文賞，43年，47年同著作賞，49年同電力賞授賞。63年同100周年記念学術振興賞授賞。平成3年同功績賞。平成元年電気学会会長。日本工業標準調査会 IEC 部会長，CIGRE 終身名誉員，PSCC 会長，IEEE 終身 Fellow，日本工学アカデミー会員，日本学術会議会員，スウェーデン王立工学アカデミー会員。

電力・エネルギー部門大会座長のコメントと回答

—A 07 電圧安定・潮流計算—

質 疑

座長 片岡 良彦

1. 同セッションでの対象論文への質疑応答

(1) 高め解を得ることに限れば、そのための制約条件として「電圧に適当な座標変換を施したものが非負」というものは使えないか。

(2) 総需要の最大値の最大化が最終的な目的なのか。

(3) 現実的には電圧安定性よりも経済性を優先できる場合が多いのではないか。

2. 著者に照会したい座長コメント

電圧安定性の指標として、需要に対する電圧の感度を選んだ理由をお示しいただけないでしょうか。その他の指標(代表的には運用点と総需要が最大となる点との離れ具合を表す種々の指標)とは比較されたのでしょうか。

応 答

岡本 浩・田辺 隆也

多田 泰之 (東京電力)

関根 泰次 (東京理科大)

1. 「同セッションでの質疑応答」に対する追加説明

(1) 著者らの知る限りでは、文献(12)の電圧安定度の予防制御手法で用いている、高め解を保証する制約があります。文献(12)では、求められた運用解が電圧高め解であることを保証するために、潮流方程式の Jacobian 行列の行列式の符号が、初期解から変化しないことを制約に追加しています。しかしながら、通常の OPF に組み込んで利用する際には、以下のような課題があり、必ずしも実用的とはいえません。

- ・ 電圧高め解の初期解が必要である。
- ・ 潮流方程式の Jacobian 行列の行列式に対する Jacobian の計算労力が大きい。
- ・ 電圧安定度から見た余裕度を設定する際に、Jacobian 行列式のしきい値をどのように決めればよいかが分からないため、余裕度を試行錯誤的に設定する必要がある。

(2) 需要を最大化するのが最終目的ではなく、所望の電圧安定度レベルを解析するための一つの手段であります。

(3) 電圧安定性の厳しい系統では、電圧安定度と経済性のトレードオフを検討する必要があります。

2. 「著者に照会したい座長コメント」への回答

運用点の最大総需要からの余裕を表す種々の指標は、必ずしも高め解を保証するものではありません。OPF で電圧安定度を検討する際には、高め解を保証し、かつ計算労力の小さい指標が有効と考えます。このような理由から、総需要に対する電圧感度を選択しました。

電力・エネルギー部門大会書面討論

——A 07 電圧安定・潮流計算——

論文題目「電圧安定性を考慮した最適潮流計算手法」

質問事項

質問者 餘利野直人（広島大）

本論文では従来型 OPF に電圧感度制約を加え、電圧安定性を確保する手法を提案しておられます。電圧感度制約の適用は電圧安定性の確保という面で实际的であり、このような有用な手法を提案されたことに對して敬意を表するものであります。論文においては、この考え方が実際上有効であることが示されており、また、これまでの私の経験からもほとんどの場合、提案法は有効であると推察いたします。しかし、系統によっては感度 $dx/d\lambda$ は高め解側では負、低め解側では正といった既成の概念が通用しない場合もあり得ると考えられます。例えば、IEEE の 30、57 母線標準系統などではノーズカーブの形状は通常例示されるものとはかなり異なり、通常の特性を示す母線は数が少なく、ノーズ先端付近以外のほとんどの負荷状態において低め解側と高め解側で同一の感度を示す母線のほうが多いようです。一般に、電圧感度特性は系統ごとに異なりますので、実際の計算では感度制約の設定方法に何らかの予備的検討あるいは工夫が必要になる場合もあるかと考えます。この意味で以下の質問をさせていただきます。

（１）感度 $y = dx/d\lambda$ の上下限値の設定はどのように行っておられるのでしょうか。また、この設定は簡単に行えるのでしょうか。

（２）感度の上下限設定はすべての負荷母線に対して設定されているのでしょうか。あるいは Q 指定の発電機なども含めて選択的に設定されておられるのでしょうか。

回答

岡本 浩・田辺 隆也

多田 泰之 （東京電力）

関根 泰次 （東京理科大）

○ 書面討論全体について

ご指摘のように、提案手法の適用に際しては、電圧安定度制約をどの母線にどの程度の厳しさと与えるかについての予備的な検討が必要です。予備的な検討では、PV 曲線や限界需要等の電圧安定性の解析に基づいて対象系統の電圧感度に関する特性を吟味し（電圧弱点母線あるいは電圧安定性に大きく寄与する）、適切な母線に対して有効な電圧安定度制約を課すことを検討する必要があります。

更に、提案手法を適用した結果に対しては、電圧安定度を考慮するために必要なコスト（燃料費の増分）と電圧安定度を考慮することによるセキュリティ向上とを、問題設定に応じた PV 曲線や限界潮流等の解析と併せて検討し、制約の設定にフィードバックすることが重要です。

このような一連の解析により提案手法の適用が可能になるものと考えており、実用に十分供するものと評価しています。なお、上述の内容につきましては、論文再投稿時に併せて、本文に加筆しています（〈2・3〉節の冒頭）。

○ 個別の質問事項について

（１）上述のような予備的解析に基づいて電圧感度の上下限制約を設定しています。また、この設定は連続型潮流計算に関連する技術を用いることにより容易に行うことができます。

（２）定式化およびプログラム上は、すべての負荷母線に対して電圧感度の上下限を設定することが可能ですが、実際の適用では、電圧安定性に大きく寄与する適切な母線に対して選択的に設定しています。