大規模電力系統に対する分割最適潮流計算手法

正員 田 辺 隆 也 (東京電力)

正員 多 田 泰 之 (東京電力)

正員 岡 本 浩 (東京電力)

正員 鈴 木 秀 樹 (開発計算センター)

A Practical Algorithm for Optimal Power Flow Based on Successive Approximation Technique
for Large-Scale Power Systems

Ryuya Tanabe, Member, Yasuyuki Tada, Member, Hiroshi Okamoto, Member (Tokyo Electric Power Co.), Hideki Suzuki, Member (KCC Ltd.)

This paper presents a practical algorithm for solving large-scale optimal power flow problems. The proposed algorithm is based on a successive approximation technique in which an original power system can be divided into a main-system and several sub-systems. In the proposed algorithm, approximate voltage characteristics of sub-systems can be derived from the results of OPF for sub-systems, and the OPF for the main-system in conjunction with the derived approximate voltage characteristics of sub-systems can be solved. Finally, the optimal solution of the original power system can be obtained by successively coordinating the approximate voltage characteristics of sub-systems. Since the dimensions of problems to be treated in OPF are reduced, the proposed algorithm can effectively solve large-scale OPF problems. Moreover, the optimal voltage characteristics of sub-systems can be derived. The feasibility and effectiveness of the proposed algorithm are demonstrated on a typical power system model.

キーワード：大規模電力系統，最適潮流計算，系統分割，逐次近似手法，分散型潮流計算，電圧特性

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。

系統計画・運用の詳細な検討を行う段階においては，実際の系統に極力合致した詳細系統（大規模系統）モデルを用いた検討が重要であり，基幹系統だけでなく電圧階級の低い下位系統も同時に解析する必要性が高まっている。また，各種系統上の問題の所在を切り分け対策を検討する目的で，基幹系統と各下位系統とを個別に解析した上で，最終的に全系で協調を図ることも必要となっている。

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⁾。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，逐次二次計画法，Newton法，PQ分解法，内点法などに基づく有効なOPF手法が開発されている⁽²⁾⁻⁽¹¹⁾。

しかしながら，大規模系統における検討では，扱うべき制約の数が増大することに加えて，線路インピーダンスが二桁以上も異なる下位系統を同時に計算するため，数値計算上の悪条件となり，収束性が大きく悪化してしまう問題が生じている。また，これまでのOPF手法の多くは，基幹系統と下位系統とを個別に解析し，全系で協調を図る枠組みを与えるものではない。

複数のエリアから構成される系統のOPFに対して，各エリア毎のOPFを全系にわたって協調する，分割OPF手法⁽¹²⁾⁽¹³⁾が提案されている。文献(12)は，ラグランジェ双対問題に基づく分解法を適用した手法であり，複数の線路で部分系統が結ばれている場合の解析手法であるが，系統規模およびエリア数の増大に伴う収束性の悪化や計算時間の増大が課題となっていると考えられる。また，文献(13)は，直流法のOPFに対してラグランジェ緩和手法を適用したものであり，有効電力の検討には適しているが，電圧・

無効電力の検討等への適用は困難である。

このような背景を踏まえ本論文では、系統を基幹系統と下位系統に分割し、それぞれの系統のOPFに基づいて全系統のOPFを行なう実用的な分割OPF手法を提案する。著者等は既に、潮流計算の研究において、電力系統の構造的な特徴に着目し、基幹系統と下位系統から構成される大規模系統の潮流状態を精度良く計算する分散型潮流計算手法を開発している⁽¹⁴⁾。提案する分割OPF手法は、この分散型潮流計算手法のアイデアをOPFへ拡張したものであり、基幹系統と下位系統からなる大規模系統に対して適用可能な新しい枠組みを与えるものである。

提案手法は、原問題（大規模系統）に直接OPFを適用せずに、いくつかの部分問題（部分系統）に対してOPFを繰り返し適用しながら、最終的に原問題の解を求める逐次近似アルゴリズムである。分割OPF手法では、OPFを直接適用する系統規模を小さくすることができるので、収束性を改善し信頼性高く解を得ることができる。また、分割された基幹系統あるいは各部分系統毎にOPFを適用することを可能にするので、各系統毎の特質や問題点等の効率的な把握・解析が期待できる。

本論文では、第2章において提案手法の適用条件や特長等の概要について述べる。次に、第3章において逐次近似手法に基づく分割OPF手法の具体的なアルゴリズムを説明する。最後に第4章において提案手法を2312母線の大規模系統へ適用し、有効性・実用性について検証する。

2. 提案手法の概要

〈2・1〉 大規模系統に対するOPF問題 大規模系統が1つの基幹系統とそれに接続される l 個の部分系統とに分割可能であるとすると、OPF問題は、非線形計画問題として以下のように定式化できる。

$$\min_{x_M, x_{S1}, \dots, x_{Sl}} f(x_M, x_{S1}, \dots, x_{Sl}) \dots\dots (1)$$

subject to

$$g_i(x_M, x_{S1}, \dots, x_{Sl}) = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \dots\dots (2)$$

$$h_j(x_M, x_{S1}, \dots, x_{Sl}) \leq 0 \quad (j = 1, \dots, n) \dots\dots (3)$$

ここで、

- x_M : 基幹系統の制御変数
- $x_{S1}, \dots, x_{Sl}$: l 個の部分系統の制御変数
- $f(x_M, x_{S1}, \dots, x_{Sl})$: 目的関数（送電損失等）
- $g_i(x_M, x_{S1}, \dots, x_{Sl})$: 等式制約（潮流方程式）
- $h_j(x_M, x_{S1}, \dots, x_{Sl})$: 不等式制約（変数の上下限）

OPF問題においては、等式制約の数よりも不等式制約の数が多いため特徴である。等式制約は、主に各母線の有効・無効電力の潮流方程式による制約である。一方、不等式制約は、各変数の上下限制約以外にも、発電機の有効・無効電力出力、無効電力補償設備の出力、各送電線の潮流などの上下限制約から構成されており、大規模系統においては数千

にも及ぶ膨大な数になる。この不等式制約の多さが、OPF手法を大規模系統へ適用する際の収束性悪化の一つの要因となっている。

多数の不等式制約を効率的に扱うOPF手法⁽¹¹⁾が提案されているが、最適解において活性化している不等式制約の数が大きな割合を占める場合においては収束性が悪化する問題があることが指摘されている⁽¹¹⁾。わが国のように、発電所と需要地が地理的に偏在している（離れている）など、系統構成の特性のために運用上の制約が厳しく制限されている系統においては、必ずしも有効でない場合が存在する可能性がある。

また、大規模系統では規模の大きさに加えて、線路インピーダンスが2桁以上も異なる下位系統を同時に計算する必要がある。例えば、実規模系統において6万kV以上の系統を詳細に模擬した場合の線路インピーダンス（変圧器を含む、ダミーブランチを除く）の最大値に対する最小値の比率は、およそ0.000001であり、6桁も異なるインピーダンスを同時に計算しなければならない。このため、桁落ち等の数値計算上の悪条件となり、従来のOPF手法では、収束性が大きく悪化してしまう可能性がある。

さらに、各種系統上の問題を効率的に解決するためには、問題の所在を切り分け対策を検討すること、すなわち各下位系統毎に検討した結果を基幹系統の検討へ反映し、最終的に全系統で協調を図ることが有効である。このためには、基幹系統と下位系統とを個別に解析し、全系統で協調を図る枠組みの構築が必要である。

以上、大規模系統に対するOPFの課題としては以下の3点を挙げるができる。

- 数千にも及ぶ膨大な数の不等式制約の効率的な処理
- 基幹系統と下位系統を同時に模擬する際の数値計算上の悪条件の改善
- 基幹系統と下位系統を個別に解析し、全系統で協調をとる枠組みの構築

図1 分割OPF手法における仮定
Fig. 1. Assumptions for proposed method

〈2・2〉 提案手法における仮定 上述のような課題を解決する1つの有効な手段としては、大規模系統を複数のエ

リアに分割し、各エリアのOPFを全系にわたって協調する分割OPFの方法が考えられる。本論文では、以下の仮定のもとで分割OPF手法について検討する(図1参照)。

- 全系を基幹系統と部分系統とに分割する。
- 部分系統は複数あっても構わないが、各部分系統と基幹系統とを接続する母線(分割母線)は1箇所とする。
- 部分系統間の接続は無いものとする。

なお、数値計画法を適用する上では、ダミー母線を追加し仮想的な基幹系統を構成することにより、部分系統間の接続を考慮することも可能である⁽¹⁵⁾が、実際の電力系統においては、電圧階級が比較的低い多くの部分では放射線状に系統が接続されていることやデータの扱い等の実用面の利便性の問題を考え、部分系統間の接続は無いと仮定して議論を進める。

提案手法では、電力系統の構造的な特徴に着目し、大規模系統をいくつかの部分系統と一つの基幹系統とに分割する。分割母線としては、電圧階級が変化する変電所母線が数値計算上望ましいが、上記の条件さえ満足していれば、どの電圧階級で分割しても問題ない。例えば、大規模な系統同士が1点で連系されている場合でも、一方を部分系統とみなして計算することが可能である。また、部分系統内に発電機が複数存在しても何ら問題はない。

上述のような仮定のもとでは、各分割母線における電圧指定値と有効・無効電力の上下制限約さえ決まれば、各部分系統のOPFはそれぞれ一意に計算することができる。また、分割母線から流出する有効・無効電力、および目的関数について、分割母線の電圧に関する特性が決まれば、基幹系統のOPFは一意に求めることができる。本論文では、これらの基幹系統と各部分系統との関係を利用し分割OPF手法のアルゴリズムを構築する。

〈2・3〉 分割OPF手法の概要 提案手法は、原問題(大規模系統)に直接OPFを適用せずに、いくつかの部分問題(部分系統)に対してOPFを繰り返し適用しながら、最終的に原問題の最適解を求める逐次近似アルゴリズムである。

提案手法ではまず、それぞれの部分系統の有効・無効電力および目的関数に関する特性を分割母線の電圧の関数(電圧特性)として代数式で近似する。潮流計算の場合は、有効電力と無効電力に関する電圧特性のみを求めれば十分である⁽¹⁴⁾が、OPFの場合は、全系の最適解を求めるために、目的関数に関する電圧特性も求める必要がある。

次に、近似した各部分系統の電圧特性をもつ負荷を各分割母線に接続し、基幹系統のOPFを計算する。電圧特性の近似の精度が十分であれば、最適解を得ることができる。近似の精度が十分でない場合は、暫定的に求めた解の近傍で部分系統の電圧特性を再度計算し直すことにより、解の範囲を限定していく。このように提案手法では、アルゴリズムの過程において逐次近似された各部分系統の電圧特性(逐次近似電圧特性)を用いて、基幹系統と各部分系統との協調を図るものである。

この種の逐次近似アルゴリズムが最適解に収束するための条件は、目的関数と制約条件の連続性と凸性である。本論文では、調相設備等の変数も含めて変数は全て連続量とする。また、従来のOPFと同様に目的関数および制約条件は、微分可能で凸な関数で構成する。つまり、部分系統の電圧特性を連続で凸な関数で模擬する限りにおいては、提案手法の最適性は保証される。

分割OPF手法の主な特長は以下の通りである。

- 分割された基幹系統あるいは各部分系統毎にOPFを適用することを可能にするので、各系統毎の特質や問題点等の効率的な把握・評価が期待できる。また、基幹系統と各下位系統とを個別に解析した上で、全系で協調を図ることにより、全系を効率的に解析することが期待できる。
- 基幹系統と各部分系統との間の有効・無効電力潮流の変化幅をパラメータとした検討が容易に可能であり、分割母線におけるLagrange乗数等の情報に基づいて、各系統間の潮流変化が運用コスト等の目的関数に与える影響を定量的に評価することが可能である。例えば、電力市場自由化における各エリア間に亘るIPPや電力託送の評価への適用が考えられる。
- OPFを直接適用する系統規模を小さくすることができるので、制約条件の増大を抑え、収束性を改善することができる。また、大規模で制約の厳しい系統に対しては通常、適切な初期値の設定に労力を要するが、解くべきOPFの規模を縮小できるので従来法に比較して初期値の設定が容易であると考えられる。
- 分割母線として、電圧階級が変化する変電所母線を選ぶことにより、基幹系統と下位系統を同時に模擬する際に生じる数値計算上の悪条件を改善することができる。例えば、実規模系統の50万kV変電所母線で系統を分割した場合、線路インピーダンスの隔たり(最小値に対する最大値の比率)は約1/40に縮小することができる。桁落ち等に関連する数値計算上の条件が改善する。
- 通常のOPF手法と比較して、解くべき個々のOPFの計算量は削減できるが、複数のOPFを繰り返し適用する必要があるため、アルゴリズム全体で要する計算量は増大する傾向にある。しかしながら、解くべきOPFの多くは独立な問題として処理でき、アルゴリズムの並列化による高速化が可能である。

3. 逐次近似電圧特性に基づく分割OPF手法

〈3・1〉 アルゴリズムの概要 本節では、逐次近似電圧特性に基づく分割OPF手法の具体的なアルゴリズムについて説明する。アルゴリズムの概要は以下の通りである。なお、アルゴリズムのフローチャートを図2に示す。

Step 1: 各分割母線における電圧範囲と有効・無効電力の上下制限約を任意に設定し、それぞれの部分系統を最適とするような、分割母線の電圧に対する部

図2 分割OPF手法のアルゴリズム

Fig. 2. Flowchart for Algorithm of proposed method

分系統の有効・無効電力および目的関数の電圧特性を求める。

Step 2: Step 1で求めた部分系統の電圧特性を制約および目的関数として考慮した基幹系統に対してOPFを実行する。

Step 3: Step 2で求めた各分割母線の電圧に対して部分系統のOPFを実行し、それぞれの分割母線の有効・無効電力を求める。全ての分割母線に対して、Step 2で求めた有効・無効電力とStep 3で求めた有効・無効電力との差（電力ミスマッチ）が、収束判定値以下であれば計算を終了する。さもなければ、Step 1に戻り、Step 2で求めた分割母線の電圧の近傍で有効・無効電力および目的関数の電圧特性を求め直し、アルゴリズムを継続する。

本アルゴリズムが収束するための条件は、部分系統の電圧特性がある設定された電圧の範囲で十分に正確であることである。アルゴリズムの過程において、電圧特性を求める範囲を順次限定していくことにより、最終的には十分な精度を確保できると考えている。

仮に、十分な精度の電圧特性が得られず、収束判定を満足しない場合にアルゴリズムを中断したとしても、得られた暫定的な解から制約条件を満足する実行可能な解を容易に得ることができるので、基本的な潮流解として十分に活用することが可能である。また、全系のOPFの適切な初期値として利用することも可能である。

提案手法の適用条件として、部分系統間に接続が無いことを仮定しているため、部分系統間での電力のやりとりは全て基幹系統を介して行なわれる。すなわち、部分系統間の電力のやりとりは、各分割母線に流れ込む潮流の大きさにより制約される。つまり、分割母線の有効・無効電力の制約を調整することにより、基幹系統と部分系統間での電力のやりとりに対する運用上の戦略を反映することができる。

勿論、分割母線の有効・無効電力制約の設定によっては、有効電力バランスの問題から実行可能解が存在しない可能性もあるが、有効電力バランスを予め考慮した上で基幹系統と部分系統間の有効電力のやりとりに関する運用上の戦略を設定すれば、部分系統間で大きく電力のやりとりがある問題にも適用することが可能である。

しかしながら、部分系統間で有効電力のやりとりが大きく行われる場合は、有効電力バランスを考慮するために、分割母線の有効・無効電力制約の設定に比較的大きな労力を必要とする。提案手法の利便性を向上させるためには、分割母線の有効・無効電力制約の効率的な設定方法の検討が必要であると考えている。

〈3・2〉 Step 1: 部分系統OPFに基づく電圧特性の算出

分割母線の電圧および有効・無効電力の上下限を指定すると、部分系統 k のOPF問題（部分系統OPF）は以下のように定式化できる。

$$\min_{\mathbf{x}_{Sk}} f_{Sk}(\mathbf{x}_{Sk}) \quad (4)$$

subject to

$$g_{Ski}(\mathbf{x}_{Sk}) = 0 \quad (i = 1, \dots, m_{Sk}) \quad (5)$$

$$h_{S kj}(\mathbf{x}_{Sk}) \leq 0 \quad (j = 1, \dots, n_{Sk}) \quad (6)$$

$$P_{Dk}^{max} \leq P_{Dk}(\mathbf{x}_{Sk}) \leq P_{Dk}^{min} \quad (7)$$

$$Q_{Dk}^{max} \leq Q_{Dk}(\mathbf{x}_{Sk}) \leq Q_{Dk}^{min} \quad (8)$$

$$V_{Dk}(\mathbf{x}_{Sk}) = V_{Dk}^s \quad (9)$$

ここで、

$\mathbf{x}_{Sk}$	: 部分系統 k の制御変数
$f_{Sk}(\mathbf{x}_{Sk})$	: 部分系統 k の目的関数
$g_{Ski}(\mathbf{x}_{Sk})$	: 部分系統 k の i 番目の等式制約
$h_{S kj}(\mathbf{x}_{Sk})$	: 部分系統 k の j 番目の不等式制約
$P_{Dk}(\mathbf{x}_{Sk})$	: 部分系統 k の分割母線の有効電力
$Q_{Dk}(\mathbf{x}_{Sk})$	: 部分系統 k の分割母線の無効電力
$V_{Dk}(\mathbf{x}_{Sk})$	: 部分系統 k の分割母線の電圧
$P_{Dk}^{max}, P_{Dk}^{min}$	: 分割母線の有効電力の上下限値
$Q_{Dk}^{max}, Q_{Dk}^{min}$	: 分割母線の無効電力の上下限値
V_{Dk}^s	: 分割母線の電圧指定値

まず上述の問題において、分割母線の電圧指定値を離散的に変えながら部分系統 OPF を逐次実行し、それぞれの電圧指定値に対する分割母線の最適な有効・無効電力および目的関数値を算出する。次に、得られた一連の有効・無効電力および目的関数値に対して最小二乗法を適用し、分割母線の電圧に対する有効・無効電力および目的関数の電圧特性関数をそれぞれ求める。なお、部分系統 OPF では、分割母線をスラックとした部分系統の潮流計算結果を初期値として利用する。

潮流計算と違って OPF の場合は、制約条件の活性化の影響により、電圧特性が複雑に変化する可能性があるが、アルゴリズムの過程において電圧特性を算出する範囲を限定していくことにより、実用的には十分に精度良く部分系統の特性を 2 次程度の低次の関数で近似可能である。

〈3・3〉 Step 2: 部分系統の電圧特性を考慮した基幹系統 OPF 各部分系統の電圧特性を考慮した基幹系統の OPF を実行する。具体的には、部分系統の有効・無効電力の電圧特性を分割母線の制約条件として考慮するとともに、全ての部分系統の目的関数の電圧特性を基幹系統の目的関数に加えて全系の目的関数を構成する。すなわち、部分系統の電圧特性を考慮した基幹系統の OPF 問題（基幹系統 OPF）は以下のように定式化できる。

$$\min_{\mathbf{x}_M} f_M(\mathbf{x}_M) + \sum_{k=1}^l f_{Sk}(V_{Dk}(\mathbf{x}_M)) \dots\dots\dots (10)$$

subject to

$$g_{Mi}(\mathbf{x}_M) = 0 \quad (i = 1, \dots, m_M) \dots\dots\dots (11)$$

$$h_{Mj}(\mathbf{x}_M) \leq 0 \quad (j = 1, \dots, n_M) \dots\dots\dots (12)$$

$$P_{Dk}(V_{Dk}(\mathbf{x}_M)) - P_{Dk}(\mathbf{x}_M) = 0 \quad (k = 1, \dots, l) \quad (13)$$

$$Q_{Dk}(V_{Dk}(\mathbf{x}_M)) - Q_{Dk}(\mathbf{x}_M) = 0 \quad (k = 1, \dots, l) \quad (14)$$

$$V_{Dk}^{max} \leq V_{Dk}(\mathbf{x}_M) \leq V_{Dk}^{min} \quad (k = 1, \dots, l) \dots\dots (15)$$

ここで、

- $\mathbf{x}_M$: 基幹系統の制御変数
- $f_M(\mathbf{x}_M)$: 基幹系統の目的関数
- $f_{Sk}(V_{Dk}(\mathbf{x}_M))$: 部分系統 k の目的関数の電圧特性
- $g_{Mi}(\mathbf{x}_M)$: 基幹系統の i 番目の等式制約
- $h_{Mj}(\mathbf{x}_M)$: 基幹系統の j 番目の不等式制約
- $P_{Dk}(\mathbf{x}_M)$: 分割母線の有効電力の方程式
- $Q_{Dk}(\mathbf{x}_M)$: 分割母線の無効電力の方程式
- $P_{Dk}(V_{Dk}(\mathbf{x}_M))$: 分割母線の有効電力の電圧特性
- $Q_{Dk}(V_{Dk}(\mathbf{x}_M))$: 分割母線の無効電力の電圧特性
- $V_{Dk}(\mathbf{x}_M)$: 部分系統 k の分割母線の電圧
- $V_{Dk}^{max}, V_{Dk}^{min}$: 分割母線の電圧の上下限值

なお、分割母線の電圧範囲は Step1 の部分系統 OPF において実行可能解のある範囲であるので、基幹系統 OPF の解から得られる分割母線の電圧は、部分系統 OPF においても必ず実行可能なものである。

〈3・4〉 Step 3: 部分系統 OPF による収束判定 Step 2 の基幹系統 OPF で求めた各分割母線の電圧を分割母線の指定値として部分系統 OPF を実行し、各分割母線の有効・無効電力の大きさを求める。ここで得られた各分割母線の有効・無効電力は、各部分系統の電圧特性の精度が十分であれば、Step 2 で得られた基幹系統 OPF の結果と数値計算的に一致するはずである。つまり、分割母線に対して、Step 2 で求めた有効・無効電力と Step 3 で求めた有効・無効電力との差（電力ミスマッチ）が十分に小さければ、Step 1 で求めた電圧特性の近似が十分に正確であると判断できる。すなわち、以下の収束判定式を満足すれば、アルゴリズムを終了する。

$$|\max_k \{P_{Dk}(V_{Dk}(\mathbf{x}_M^*)) - P_{Dk}(\mathbf{x}_{Sk}^*)\}| \leq \varepsilon_p \dots\dots (16)$$

$$|\max_k \{Q_{Dk}(V_{Dk}(\mathbf{x}_M^*)) - Q_{Dk}(\mathbf{x}_{Sk}^*)\}| \leq \varepsilon_q \dots\dots (17)$$

ここで、

- $P_{Dk}(V_{Dk}(\mathbf{x}_M^*))$: Step2 の分割母線の有効電力
- $Q_{Dk}(V_{Dk}(\mathbf{x}_M^*))$: Step2 の分割母線の無効電力
- $P_{Dk}(\mathbf{x}_{Sk}^*)$: Step3 の分割母線の有効電力
- $Q_{Dk}(\mathbf{x}_{Sk}^*)$: Step3 の分割母線の無効電力
- ε_p : 有効電力ミスマッチの収束判定値
- ε_q : 無効電力ミスマッチの収束判定値

収束判定を満たす場合は、Step 2 と Step 3 で求めた OPF 解を併せることにより、全系の OPF 解を得ることができる。また、収束判定を満足しない場合は、Step 1 に戻り、Step 2 で求めた分割母線の電圧の近傍で、有効・無効電力および目的関数の電圧特性を再度求め、アルゴリズムを継続する。アルゴリズムの繰返しにおいて、電圧特性を求める範囲を逐次限定していくことにより、最終的には十分な精度で電圧特性を近似可能である。

ここで特筆すべきことは、アルゴリズムが収束するしなにかかわらず Step3 で得られる解は、各部分系統の制約条件を全て満足する実行可能解であるということである。Step 3 の解で各下位系統の電圧特性を固定し Step 2 の基幹系統 OPF を実行すれば、制約条件を満足する実行可能な解を容易に得ることができる。

4. 数値計算例

〈4・1〉 計算条件 提案手法を 2312 母線の大規模テスト系統（基準容量 1000MVA）へ適用し、その有効性を検証する。ここでは、2312 母線系統を表 1 に示すような 1 つの基幹系統と 12 の部分系統とに分割する。この分割により、線路インピーダンスの最小値に対する最大値の比率は、全系を模擬した場合と比較して約 1/40 に縮小され、桁落ち等に関連する数値計算上の悪条件が改善する。

今回の計算では、目的関数として以下の 2 ケースを設定する。

ケース 1: 無効電力に関する投資を最小化する意味で、各母線の無効電力注入量の 2 乗和の最小化を設定

表1 テストシステムの母線数および需要

Table 1. The number of buses and load demands on test system

系統名	総母線数	負荷需要	
		有効電力 [MW]	無効電力 [MVar]
全系	2312	74448	20099
基幹系統	587	11826	3634
部分系統A	378	12353	1300
部分系統B	286	10407	3070
部分系統C	256	9792	2780
部分系統D	180	6810	2316
部分系統E	158	5408	1791
部分系統F	113	3610	800
部分系統G	85	3490	898
部分系統H	89	2479	769
部分系統I	80	3312	950
部分系統J	52	2777	1041
部分系統K	28	669	262
部分系統L	32	1516	490

表2 分割母線における有効・無効電力の制約

Table 2. Constraints on active and reactive power flow at division buses

	初期潮流計算に対する偏差 [%]	
	有効電力の上下限制約	無効電力の上下限制約
ケース1	± 2%	±10%
ケース2	±10%	±10%

ケース2： 有効電力に関する検討例として、送電有効電力損失の最小化を設定

各分割母線の有効・無効電力の上下限制約は、全系の初期潮流計算から得られる各分割母線の有効・無効電力潮流からの偏差で表2のように設定した。なお、ケース1は無効電力に関する検討であるので、有効電力潮流は極力固定するように設定した。このように基幹系統と各部分系統との間の有効・無効電力潮流のやりとりをパラメータとした検討が容易に可能である。このことは、電力市場自由化における各エリア間にわたるIPPや電力託送の評価への適用を可能にすると考えられる。勿論、OPFから得られるLagrange乗数等の有用な情報が利用可能であるので、各エリア間の潮流変化が運用コスト等の目的関数に与える影響を定量的に評価することが可能である。

部分系統の電圧特性の算出においては、分割母線の電圧範囲を10等分した電圧指定値に対して部分系統OPFを実行し、有効・無効電力および目的関数の電圧特性を2次関数で近似した。なお繰返し2回目以降の分割母線の電圧範囲は、前回の繰返しの範囲の50%となるように設定した。

〈4・2〉 計算結果 図3は、分割母線における基幹系統と部分系統との無効電力ミスマッチ（収束判定値）の推移を示したものである。今回の計算では、ケース1、2ともに繰返し4回目で電力ミスマッチの最大が0.0001pu以下となり、実用的に十分な精度で解を得ることができた。なお、有効電力ミスマッチは両ケースとも繰返し1回目で既に収束判定を満たしており、無効電力の場合と比較して少ない

図3 アルゴリズムの収束状況

Fig. 3. Transition of reactive power mismatch

図4 部分系統Cの無効電力の電圧特性
(ケース1の1回目)

Fig. 4. Voltage characteristics of reactive power on sub-system C in case #1 (1st iteration)

繰返しで精度の高い電圧特性が得られた。

ケース1に対する分割OPFアルゴリズムの1回目の繰返しにおける部分系統Cの無効電力に関する電圧特性を図4に示す。ここでは、部分系統Cにおいて分割母線の電圧を1.02~1.10puの範囲で0.01pu刻みで部分系統OPFを実行し電圧特性を2次関数で近似している。図4に示すように繰返し1回目における電圧特性の近似の精度はあまり高くないため、図3に示すような電力ミスマッチが生じていると考えられる。なおケース2についても同様の結果が得られている。

一方図5は、ケース1に対する分割OPFアルゴリズムの4回目の繰返しにおける部分系統Cの無効電力に関する電圧特性を示したものである。4回目の繰返しでは、部分系統Cの分割母線の電圧を1.062~1.072puの範囲で0.001pu

図5 部分系統Cの無効電力の電圧特性
(ケース1の4回目)

Fig. 5. Voltage characteristics of reactive power on sub-system C in case #1 (4th iteration)

図6 部分系統Cの目的関数の電圧特性
(ケース1)

Fig. 6. Voltage characteristics of objective function on sub-system C (case 1)

刻みで部分系統OPFを実行し電圧特性を2次関数で近似している。図5に示すように繰返し4回目で得られた電圧特性関数は、部分系統Cの電圧特性を1回目に比べて精度良く近似している。すなわち、アルゴリズムの繰返しにおいて、電圧特性を求める範囲を逐次限定していくことにより、十分に精度の高い電圧特性が得られ、結果として、図3に示すようにアルゴリズムが収束していると考えられる。なお、ケース2に対しても同様の結果が得られている。

図6は、各繰返しにおける部分系統Cの目的関数(ケー

表3 全系OPFとの比較(目的関数)

Table 3. Comparison between conventional OPF and proposed OPF on objective functions

	初期状態	全系OPF	分割OPF
ケース1: QG+SC+ShR* [MVar]	48997.7	45887.3	45900.7
ケース2: Ploss** [MW]	1345.7	1277.8	1277.8

* : 発電無効電力, 調相設備の無効電力出力の合計値

** : 有効電力損失

表4 全系OPFとの比較(計算時間, 収束性)

Table 4. Comparison between conventional OPF and proposed OPF on cpu time and convergency

	計算時間* [秒]	最大反復回数** [回]
ケース1: 全系OPF	1425.	132
分割OPF	2331.	17
ケース2: 全系OPF	949.	78
分割OPF	2164.	14

* : Pentium Pro 200MHzのパソコンを使用

** : 各OPFへ適用した準ニュートン法の反復回数の最大値

ス1)の電圧特性を示したものである。図6に示すようにアルゴリズムの繰返しにおいて、基幹系統OPFの結果を反映しながら電圧特性を求める範囲を逐次限定している様子が確認できる。

〈4・3〉 分割OPFと全系OPFの比較 表3は、ケース1および2に対して、それぞれ同一の目的関数を設定し従来のOPF手法を全系に対して適用して得られた結果(全系OPF)と提案手法の結果(分割OPF)とを目的関数について比較したものである。ケース1における全系OPFと分割OPFとの目的関数の差は13.4MVar(全系OPFの目的関数の初期状態からの削減量の0.4%)と僅かであり、概ね同じ結果が得られている。また、ケース2では、全系OPFと分割OPFの目的関数の結果は一致している。なお、発電機出力や線路潮流等の潮流状態については、全系OPFと分割OPFの潮流状態がほぼ一致していることも確認している。

表4は、各OPFに適用した非線形計画手法(準ニュートン法)の最大反復回数と計算に要した時間とを、全系OPFと分割OPFとで比較したものである。ここでは、最大反復回数をもって各OPFの収束性を評価する。分割OPFの最大反復回数は全系OPFと比較して、ケース1で0.13倍、ケース2では0.18倍であった。分割OPFでは、解くべきOPFの規模が高々全系の約1/4であり、収束性が大きく向上している。これらは、解くべきOPFの規模が縮小されているので当然の結果であるが、本アルゴリズムでは、このような収束性の高いOPFの結果を利用して最終的に全系のOPF結果を得ているので、アルゴリズム全体としての信頼性が向上している。

分割OPFの計算時間は、ケース1では全系OPFの1.6倍、ケース2では全系OPFの2.3倍であった。分割OPFでは複数のOPFを繰返し適用する(今回の計算では665の

OPFを実施)ため、アルゴリズム全体に要する計算量は従来のOPF手法よりも増大している。しかし、分割OPFのアルゴリズムのStep 1及び3における部分系統OPFは全て独立に計算することができるので、並列化による高速化が可能である。ここで、全ての部分系統OPFを全て異なるCPUに割り当てて並列計算したと仮定して、分割OPFにおける各OPFの計算時間からアルゴリズム全体の計算時間を推定すると、ケース1の場合約7分、ケース2では約6分となり、全系OPFの約1/3の計算時間での実行が可能であると推定できる。

5. おわりに

本論文では、基幹系統と下位系統からなる大規模系統に対して適用可能な分割OPF手法を提案した。また、提案手法を2312母線の大規模系統へ適用しその有効性を検証した。得られた結果は従来のOPFの結果と実用的に十分に一致しており、提案手法の妥当性が確認できた。提案手法は、基幹系統と下位系統とを個別に解析し、全系で協調を図る実用的な枠組みを与えるものであり、主な特徴は以下の通りである。

- 分割された基幹系統あるいは各部分系統毎にOPFを適用することを可能にするので、各系統毎の特質や問題点等の効率的な把握・評価が期待できる。また、基幹系統と各下位系統とを個別に解析した上で、全系で協調を図ることにより、全系を効率的に解析することが期待できる。
- 基幹系統と各部分系統との間の潮流の変化幅をパラメータとした検討が容易に可能であり、分割母線におけるLagrange乗数等の情報に基づいて各系統間の潮流変化が目的関数に与える影響を定量的に評価することが可能である。例えば、電力市場自由化における各エリア間に亘る電力託送の評価への適用が考えられる。
- 解くべきOPFの問題規模を縮小できるので、制約条件の増大を抑え収束性を改善することができる。さらに、分割母線として、電圧階級が変化する変電所母線を選ぶことにより、基幹系統と下位系統を同時に模擬する際の数値計算上の悪条件の改善が可能である。
- 複数のOPFを繰返し適用する必要があるため、アルゴリズム全体に要する計算量は通常のOPF手法よりも増大する傾向にあるが、解くべきOPFの多くは独立に計算が可能であり、アルゴリズムの並列化による高速化が可能である。
- 部分系統間で有効電力のやりとりが大きく行われる場合は、分割母線の有効・無効電力制約の設定に比較的大きな労力を要する。提案手法の利便性を向上させるためには、分割母線の有効・無効電力制約の効率的な設定方法の検討が必要である。

今後は、大規模系統を用いて、より詳細な検討を重ね、分割母線の有効・無効電力制約の効率的な設定方法、効果的な系統の分割点の探索法、各エリア間にわたるIPPや電

力託送の評価方法等、提案手法の実用性・有効性についての知見を整理していく予定である。

最後に、本研究を遂行するにあたり多くの貴重な御示唆・御意見を賜りました、東京理科大学教授 関根泰次先生、大阪産業大学工学部助教授 陳洛南先生に心より深く感謝申し上げます。

(平成11年6月1日受付、同11年9月17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) E.Hobson, "Network Constrained Reactive Power Control Using Linear Programming," Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.99, 1980.
- (3) O.Alsac, J.Bright, M.Prais, B.Stott, "Further Developments in LP-based Optimal Power Flow," Trans. on Power Systems, vol.5, no.3, pp.691-711, 1990.
- (4) S.N.Takukdar, T.C.Giras, "A Fast and Robust Variable Metric Method for Optimal Power Flows," Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.01, no.2, pp.415-420, Feb. 1982.
- (5) Burchett, H.H.app, D.R.Vierath, "Quadratically Convergent Optimal Power Flow," Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.03, no.11, pp.3267-3276, Nov. 1984.
- (6) D.I.Sun, B.Ashley, B.Brewer, A.Hughes, W.F.Tinney, "Optimal Power Flow by Newton Approach," Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.03, no.10, pp.2864-2880, Oct. 1984.
- (7) R.R.Shoults, D.T.Sun, "Optimal Power Flow Based upon P-Q Decomposition," Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.01, no.2, pp.397-405, Feb. 1982.
- (8) E.Housos, G.Irisarri, "Real and Reactive Power-System Security Dispatch Using a Variable Weights Optimization Method," Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.02, no.5, pp.1260-1268, May. 1987.
- (9) O.Alsac, B.Stott, "Optimal Load Flow with Steady-State Security," Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.93, pp.741-745, 1974.
- (10) Y.C.Wu, A.S.Debs, R.E.Marsten, "A Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows," IEEE Trans. on Power Systems, vol.9, no.2, pp.876-883, May. 1994.
- (11) L.Chen, S.Matoba, H.Inabe, T.Okabe, "Surrogate Constraint Method for Optimal Power Flow," IEEE PICA Proceeding, May 1997.
- (12) B.H.Kim, R.Baldick, "Coarse-Grained Distributed Optimal Power Flow," Trans. on Power Systems, vol.12, no.2, pp.932-939, May 1997.
- (13) A.J.Conejo, J.A.Aguado, "Multi-Area Coordinated Decentralized DC Optimal Power Flow," Trans. on Power Systems, vol.13, no.4, pp.1272-1278, Nov. 1998.
- (14) 多田, 岡本, 栗田, 関根, "大規模電力系統の潮流計算精度向上のための一手法について" 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.306, 1994.
- (15) 関根, "基礎工学4/数値計画法", 岩波書店.

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。現在、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。平成3年電気学会優秀論文発表賞受賞, 博士(工学)。IEEE会員。

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。現在、同社電力技術研究所系統技術グループにて、電力系統の解析および制御に関する研究に従事。平成5年、7年、9年電気学会優秀論文発表賞、平成8年同論文賞受賞。博士(工学)。計測自動制御学会およびIEEE

の会員。

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で、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。

鈴 木 秀 樹 (正員) 昭和62年3月東京理科大学理学部応用物理学科卒業。平成5年8月(株)開発計算センター入社。現在、同社電力システム部にて、電力系統の研究、解析業務に従事。

電力・エネルギー部門大会座長のコメントと回答

——A 09 潮流計算・静的電圧安定性——

質 疑

座長 福山 良和

1. 同セッションでの対象論文への質疑応答

(1)

Q：部分系統の電圧特性は簡単に求められるのか？

A：二次関数で近似しているが、何ら困難はなく、OPFとは独立した計算となっている。

(2)

Q：分割したほうが数値計算上の有利性があるということだが、実際に全系で収束しないケースはあったのか？

A：収束しないケースは経験していない。

2. 著者に照会したい座長コメント

部分 OPF の解法には準ニュートン法を用いられておりますが、最近の OPF の研究によると、内点法を用いることにより、かなり収束特性が改善されることが知られております。今回の場合、部分系統のみを対象とした計算を行うため、系統のインピーダンス差もあまりなく、収束の問題はあまり発生しなかったため、準ニュートン法を利用しているということでしょうか。

また、今後の自由化への対応も考えると、Security-constrained OPF (SC-OPF) の開発も一つのターゲットとなってくると思いますが、SC-OPF のように次元がかなり大きくなってきても準ニュートン法で対応可能とお考えでしょうか。

❖ ❖ ❖

❖ ❖ ❖

応 答

座長 福山 良和

田辺 隆也・多田 泰之

岡本 浩 (東京電力)

鈴木 秀樹 (開発計算センター)

1. 「同セッションでの質疑応答」に対する追加説明

(2)に対する追加説明

系統を分割し個々の系統に対して OPF を適用することができるので、どこの系統のどの部分に対策すればよいかの検討が比較的容易になると考えている。

2. 「著者に照会したい座長コメント」への回答

本論文は、基幹系統と下位系統からなる大規模系統に対して適用可能な OPF 手法を提案したものであり、各系統を個別に解析し全系で協調を図る実用的な枠組みを与えるものです。つまり本論文は、大規模系統の OPF を効率的に解くための新しい切り口の提案であり、そのオリジナリティは個々の OPF の解法に依存しない部分にあります。しかしながら、ご指摘のとおり、解法の選択は今後検討していくべきであり、問題設定（定式化）、問題の規模、非線形制約の扱い等々、対象とする問題に応じて使い分ける必要があります。

分割 OPF で用いた準ニュートン法ベースの手法は、問題のスパース性の考慮や非線形制約の扱い等に対しての最適性や収束性の吟味が十分になされており、信頼性の高い手法であります。内点法も有効な手法の一つであると認識していますが、非線形制約の扱い等、まだ発展途上の技術であり、非線形制約を含む大規模問題への適用に関しては、準ニュートン法ベースの手法が適切であると考えています。

このような理由から、分割 OPF については準ニュートン法ベースの手法を適用しています。また、Security Constrained OPF (SC-OPF) についても、上記の理由から準ニュートン法ベースの手法で十分であると考えています。なお、SC-OPF に対して、問題の次元を拡大して解く方法はあまり実用的ではないと考えており、別のアプローチを検討したいと考えています。