ニュートン形最適潮流計算法のオンライン適用に関する一考察

正員 佐々木 博 司 (広島大)

正員 久保川 淳 司 (広島大)

正員 餘利野 直 人 (広島大)

A study on Newton Optimal Power Flow for On-Line Application

Hiroshi Sasaki, Member, Junji Kubokawa, Member, Naoto Yorino, Member (Hiroshima University)

In power system operation, it is necessary to consider both security and economy which are contradictory to each other. A very powerful means to satisfy this requirement is Optimal Power Flow (OPF). The Newton OPF with sparsity technique seems suited to on-line use from the viewpoint of computational speed. However, the method has several defects concerning convergence characteristics. This paper studies the following two problems to be overcome to use it in on-line tasks.

First, the P-Q decoupled OPF, which is usually faster than coupled one, does not converge in some systems. For such cases, we propose to introduce a decelerating factor to improve its convergence characteristics. Next, when many constraints are violated and enforced simultaneously, convergence tends to be difficult or the solution sometimes converges at a non-optimal point. Therefore, it is very important to identify binding inequalities effectively. In this paper, we propose an effective method of identifying binding inequalities based on the Kuhn-Tucker condition. The validity of the proposed method is confirmed through numerical simulations on several test systems.

キーワード：最適潮流計算法，オンライン運用，不等式制約，P-Q デカップリング

1. はじめに

現代社会における電力システムの使命は、需要家に安価で良質な電力を安定的に供給することであり、安全性（セキュリティ）と経済性をともに考慮した運用を行う必要がある。しかし、経済性を優先すると、安定度の低下など安全性が損なわれ、また安全性を過度に重視すると、過大な設備投資を必要とし、かつ運転費も常に割高となる。

このような相反する要求を満たす高度な運用を策定するための有力な手法として、最適潮流計算法(OPF)がある。最初の実用的なOPF解法は、Tinneyらによって提案された縮約こう配法に基づく方法であ

る⁽¹⁾。その後も、縮約こう配法によるOPFアルゴリズムが幾つか提案されたが、大規模システムへの適用は困難であった⁽²⁾⁽³⁾。一方、Happらは準ニュートン法に準拠したOPF解法を提案した⁽⁴⁾。この方法は、ヘシアン行列の逆行列を二次元配列中に逐次的に構成していく方法をとっているため、記憶容量・計算速度の両面からみて、大規模システムへの適用は系統計画などのオフライン業務に限られていた。1984年EPRI主導の下に開発されたニュートン形OPFは、最適条件であるKuhn-Tucker条件を満たす解を直接求めるものであり、スパース技法を採用しているため極めて高速である⁽⁵⁾。

著者らはこのニュートン形OPF（以下、OPFと略

記)のカップル版とデカップル版を作成し、幾つかのテストシステムに適用し、その有効性に関する研究を行ってきた^{(6)~(9)}。その結果、低負荷時の運用のように比較的不等式制約の緩い場合、OPFは4~6回の反復で収束し、その実行速度からみて実規模システムのオンライン業務に対しても十分適用できると考えられる。しかし、このOPFアルゴリズムを実運用に適用するためには、克服すべき以下の二つの問題点が存在することがわかった。

まず、デカップル版OPFでは収束解が得られないシステムが存在し、実用的でないと指摘されている⁽¹⁰⁾。しかし、デカップル版はカップル版に比べ数値処理量が約半分になり、最大40%程度の速度向上が見込まれるという利点を生かすため有効な収束改善策が必要とされている。そこで、収束の悪い潮流残差を着実に減少させるため各反復ごとに修正ベクトルを減速する収束改善法を提案する。

次に、運用制約が非常に厳しく多数の不等式制約を強制しなければならない場合、違反した不等式制約をすべて強制すると収束が困難になったり、最適以外の解に収束するといった現象が生じる。そのため、真に必要な有効不等式制約(最小点で仮に不等式制約を取除いたとき、目的関数の値が減少するような実行可能方向が存在する不等式制約)を高速で識別することは極めて重要となる。この問題に対して、Sunらは、補償法を使った内ループによる不等式制約識別法を提案している⁽⁵⁾。しかし、補償法は変数制約に対しては効率的に適用できるものの、関数不等式制約に対しては計算時間がかかるという難点がある。また、Mariaらは不等式制約識別のため線形計画法を用いた手法を提案した⁽¹⁰⁾。この手法は非線形性が弱いときには効果的であるが、内ループの線形計画法でスパース性を考慮していないため、制約の数が多くなるにつれ計算時間が膨大になる。本研究では、Kuhn-Tucker条件を利用した簡略な高速不等式制約識別法を提案する。この手法はラグランジュ関数と制約のこう配の角度を用いたもので、高速に不等式制約の識別を行うことができる。

本論文では、まず最初にニュートンOPFの概略を述べ、作成したプログラムを幾つかのテストシステム(最大344ノードシステム)への適用例を示す。次に、デカップル版の収束改善法を述べ、IEEE 57ノードシステムに適用した結果を示す。最後に、提案する有効不等式制約の識別の手法をIEEE 118ノードシステムに適用し、その結果について考察を加える。

2. 最適潮流計算 (Optimal Power Flow)

〈2・1〉 OPF問題の定義 OPF問題は、制約付き最適化問題として(1)式のように記述される。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{minimize} & F\{u(y), y\} \\ \text{subject to} & G\{u(y), y\} = 0 \\ & H\{u(y), y\} \leq 0 \end{array} \right\} \dots\dots (1)$$

y : 状態変数
 $u(y)$: 制御変数
 $F\{u(y), y\}$: 目的関数
 $G\{u(y), y\}$: 等式制約
 $H\{u(y), y\}$: 不等式制約

一般に、電力システムにおいて目的関数および制約は状態変数と制御変数の非線形関数となるため、本問題は非線形計画問題になる。この問題の最適点はKuhn-Tucker最適条件を満たさなければならない。

〈2・2〉 目的関数 目的関数は火力機の総運転費とした。火力機の発電コストは出力の二次関数として近似することができる。それを(2)式に示す。

$$F(y) = \sum_k \{a_k + b_k * P_{gk}(y) + c_k * P_{gk}^2(y)\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $F(y)$: 総発電コスト、 k : 火力発電機、 $P_{gk}(y)$: 発電機出力、 a_k, b_k, c_k : コスト係数

〈2・3〉 等式制約 OPF解は母線の潮流方程式を満足する必要がある、等式制約として取扱う必要がある。

$$\begin{aligned} P(y) &= \sum_{i \neq j} E_i E_j \{G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}\} \\ &\quad + G_{ii} E_i^2 \\ &= P_i^s \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q(y) &= \sum_{i \neq j} E_i E_j \{G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}\} \\ &\quad + B_{ii} E_i^2 \\ &= Q_i^s \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 P^s, Q^s : 指定値、 G_{ij}, B_{ij} : ノードアドミタンス行列の ij 要素の実部および虚部

〈2・4〉 不等式制約 システムの物理的限界および運用上の限界を守るための不等式制約を課すことが必要である。OPFにおいては、普通以下の不等式制約が取扱われる。

母線電圧に対する制限

$$E_i^{\min} \leq E_i \leq E_i^{\max} \dots\dots\dots (5)$$

変圧器タップ比に対する制限

$$T_{ij}^{\min} \leq T_{ij} \leq T_{ij}^{\max} \dots\dots\dots (6)$$

発電機出力に対する制限

$$P_{gk}^{\min} \leq P_{gk}(\mathbf{y}) \leq P_{gk}^{\max} \dots\dots\dots (7)$$

無効電力発生源に対する制限

$$Q_{gk}^{\min} \leq Q_{gk}(\mathbf{y}) \leq Q_{gk}^{\max} \dots\dots\dots (8)$$

線路潮流に対する制限

$$PL_{ij}^{\min} \leq PL_{ij}(\mathbf{y}) \leq PL_{ij}^{\max} \dots\dots\dots (9)$$

3. ニュートン形 OPF

〈3・1〉 ラグランジュ関数 ラグランジュ未定乗数法を用い、(1)式の制約付き最適化問題を無制約最適化問題に変換する。

$$L(\mathbf{y}, \boldsymbol{\lambda}) = F(\mathbf{y}) + \sum_i \lambda_{pi} \{P_i(\mathbf{y}) - P_i^s\} + \sum_j \lambda_{qj} \{Q_j(\mathbf{y}) - Q_j^s\} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 λ_p, λ_q :それぞれ有効、無効電力の潮流方程式に対するラグランジュ乗数

また、(10)式はラグランジュ関数と言われる。

〈3・2〉 ニュートン OPF の定式化 まず、不等式制約を考慮しないで定式化を行う。状態変数とラグランジュ乗数の合成ベクトルを $\mathbf{z} = (\mathbf{y}, \boldsymbol{\lambda})$ と定義する。Kuhn-Tucker 条件より、(10)式は最適点 $\mathbf{z}^*$ で次式を満足しなければならない。

$$\nabla L(\mathbf{z}^*) = \mathbf{0} \dots\dots\dots (11)$$

上式に対してニュートン法を適用すると、

$$\frac{\partial L(\mathbf{z}^k)}{\partial \mathbf{z}} + \frac{\partial^2 L(\mathbf{z}^k)}{\partial \mathbf{z}^2} \Delta \mathbf{z} = \mathbf{0} \dots\dots\dots (12)$$

すなわち、ニュートン法の更新式は、

$$W \Delta \mathbf{z} = -\mathbf{g} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $W, \mathbf{g}$:それぞれ L の $\mathbf{z}$ に関する 2 階偏導関数 (ヘシアン行列)、および 1 階偏導関数 (こう配ベクトル)、 $\Delta \mathbf{z}$:状態変数 $\mathbf{z}$ の修正量

〈3・3〉 ペナルティー関数法 有効な不等式制約を強制するため、本研究では二次ペナルティー関数法を用いる。有効不等式制約に対するペナルティー関数は、

$$\alpha_i(\mathbf{y}) = \frac{S_i}{2} h_i^2(\mathbf{y}) \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 S_i :重み係数

である。(14)式を(10)式のラグランジュ関数に加えることによって制約強制を行う。また、 S_i を適切に選ぶことは重要であり、 S_i が大きいと hard limit に、 S_i が小さいと soft limit となる。しかし、大きすぎると発散することがあり、逆に小さすぎると収束が遅くなる。そのため、収束状況に応じて制限値に近づくほど S_i を大きくする方策を採用することにした。

〈3・4〉 P-Q デカップリング

(1) P-Q デカップル版の定式化 電力系統の特質に従い、OPF を P- δ 部分と Q-E 部分とに分離し、この二つの部分問題として解くものである。まず、変数ベクトル $\mathbf{z}$ を P- δ 部分と Q-E 部分に分割し、二つの部分問題に分割する。すなわち、

$$\mathbf{z} = (\mathbf{z}^{1T}, \mathbf{z}^{2T})^T; \mathbf{z}^1 = (\boldsymbol{\delta}^T, \boldsymbol{\lambda}_p^T)^T, \\ \mathbf{z}^2 = (\mathbf{T}^T, \mathbf{E}^T, \boldsymbol{\lambda}_q^T)^T$$

このとき、 W 行列 (ヘシアン行列) は四つの部分行列に分解される。

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{g} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}^1 \\ \mathbf{g}^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

比較的結び付きの弱い $\mathbf{z}^1$ と $\mathbf{z}^2$ の結合部分である W_{12} と W_{21} を無視すると、ニュートン法の更新の式は、以下のように二つに分割される。

$$W_{11} \Delta \mathbf{z}^1 = -\mathbf{g}^1 \dots\dots\dots (16)$$

$$W_{22} \Delta \mathbf{z}^2 = -\mathbf{g}^2 \dots\dots\dots (17)$$

(16)式は P- δ 部分、(17)式は Q-E 部分の更新式である。以降、デカップルしない OPF をカップル版 OPF、デカップルを行ったものをデカップル版 OPF と呼ぶ。また、デカップル版 OPF では P- δ 、Q-E 部分それぞれを 1 反復として取扱っている。P-Q デカップリングを行うと、 W 行列の次元が半分になり、解時間の点で有利になるが、難収束となる系統があることがわかった。例えば、高速デカップル潮流計算において収束が遅いとされている IEEE 57 ノード系統に対し、デカップル版 OPF を適用すると収束解が得られなかった。そこで、P-Q デカップリングにより生じる難収束状態を改善する手法を提案する。

(2) 収束改善法 IEEE 57 ノード系統に対するデカップル版 OPF の収束状況を調べると (図 3 参照)、コストはほぼ最終値に収束しているが、潮流残差は減少していない。そこで、各ステップごとに潮流残差が減少するように修正量に減速係数を乗じることによって収束改善を行う手法を提案する。

ニュートン法の更新式に減速乗数 μ を導入すると、

$$\mathbf{z}^k = \mathbf{z}^k + \mu^k \Delta \mathbf{z}^k \quad (0 < \mu^k \leq 1.0) \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 μ^k :第 k 反復の減速乗数

(18)式の μ^k は次の関数を最小化するように決められる。

$$M(\mathbf{y}^k) = \sum_i \{e_i(\mathbf{y}^k)\}^2 + \sum_j \{h_j(\mathbf{y}^k)\}^2 \\ \longrightarrow \min \\ (i \in \text{等式制約集合}, j \in \text{違反不等式制約集合}) \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 $e(\mathbf{y})$:潮流残差、 $h(\mathbf{y})$:不等式制

約の違反量

また、 y は P - δ においては δ に、 Q - E においては E に相当する。

各反復ごとに、 μ^k は (19) 式を最小化するように線形探索により決定しており、収束の悪い潮流残差を着実に減少させることができる。

4. 有効不等式制約の識別

〈4・1〉 有効不等式制約 (binding constraint set)

有効不等式制約とは、最小点で仮に不等式制約を取除いたとき、目的関数の値が減少する実行可能方向が存在する不等式制約を言う。すなわち、最適点において目的関数の値に寄与しているものを有効不等式制約と言う。反復過程で不等式制約を強制する際に、どの不等式制約が最適点で有効であるかを見きわめることは重要である。有効でない不等式制約を強制すると、収束が困難になったり、最適でない点へ収束するという現象を生じる。そのため、高速な有効不等式制約の識別手法が必要となる。本研究では、ラグランジュ関数のこう配と制約のこう配との間の角度、および反復解から不等式制約境界面までの距離の近似値を使って有効不等式を簡略に識別する手法を提案する。

〈4・2〉 ラグランジュ関数と制約のこう配の角度

(1) 式の OPF 問題は、等式制約に対してラグランジュ乗数法を用いることにより、(20) 式のような不等式制約付き最適化問題に書き表すことができる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize } L(z) \\ & \text{subject to } h(z) \leq 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、上記の問題が最適点で満たさなければならない Kuhn-Tucker の一次の最適条件は、

$$\left. \begin{aligned} & \nabla L(z) + \mu \nabla h(z) = 0 \\ & (h(z) \leq 0, \mu_i h_i(z) = 0, \mu_i \geq 0) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

となる。上式より、

$$-\nabla L(z) = \sum_i \mu_i \nabla h_i(z) \quad (\mu_i \geq 0) \quad \dots\dots\dots (22)$$

と書き表すことができる。(22) 式は、最適点において $-\nabla L(z)$ が $\nabla h_i(z)$ (i : 有効不等式制約集合) の形成する凸すい体内になければならないことを表している (図 1)。もし、 $-\nabla L(z)$ がわずかでも $\nabla h_i(z)$ で形成されるすい体の外にあれば $-\nabla L(z)$ と 90° 以内の角度を成すような実行可能方向が存在することを表している。すなわち、 $L(z)$ の値を減少するような実行可能方向が存在することにより、最適条件を満たさないことになる。このように、最適点では $-\nabla L(z)$ と $\nabla h_i(z)$ の成す角はすべて鋭角でなければならない。

そこで、提案する不等式識別手法は、OPF の反復

図 1 ラグランジュ関数と制約のこう配の角度
Fig. 1. Angles between the gradients of Lagrangian and constraints.

過程で違反している不等式制約のうち、この条件を満たす制約を有効不等式とするものである。

$\nabla L(z)$ と $\nabla h_i(z)$ の角度 θ は、内積を使って容易に求めることができる。

$$\theta = \cos^{-1} \frac{-\nabla L(z) \nabla h_i(z)}{|\nabla L(z)| |\nabla h_i(z)|} \quad \dots\dots\dots (23)$$

この角度 θ を使って、 $\theta \leq 90^\circ$ となる不等式制約を有効とする。ここで、 $\nabla L(z)$ と $\nabla h_i(z)$ は W 行列を作成する際に容易に求めることができるため、余分の計算時間をほとんど必要とせず非常に高速で識別を行うことができる。

本手法は、ラグランジュ関数と制約が線形である場合にはすべての点で成り立つが、問題は非線形であるため、解点の近傍でなければ成立しない。そのため、〈4・3〉節で示す制約境界面との距離を用い、あまり大きく制約を違反しているものは、 θ が 90° 以上でも強制を行うものとした。

〈4・3〉 線形化した制約境界面と反復解 z^k との距離 有効不等式制約識別のため反復解と制約境界面との距離を利用する。制約は非線形であるため、実際の距離を求めることは困難である。そのため、制約を一次近似することにより簡略的に距離を求める。

反復解 z^k と不等式制約 $h_i(z)=0$ との距離を求める。

$$h_i(z^k + \Delta z) = 0 \quad \dots\dots\dots (24)$$

上式を一次近似すると、

$$h_i(z^k) + \nabla h_i(z^k) \Delta z = 0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここで、 Δz を制約の法線方向にとると

$$\Delta z = -s \nabla h_i(z^k) \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここで、 s : 定数

となる。(26) 式を (25) 式に代入すると、

$$h_i(z^k) - s |\nabla h_i(z^k)|^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (27)$$

よって、

図 2 反復解 z^k と制約 $h(z)=0$ との距離
Fig. 2. Distance between z^k and $h(z)=0$.

$$s = \frac{h_i(z^k)}{|\nabla h_i(z^k)|^2} \dots\dots\dots (28)$$

よって、距離 d は、

$$d = |s \nabla h_i(z^k)| = \frac{|h_i(z^k)|}{|\nabla h_i(z^k)|} \dots\dots\dots (29)$$

で表すことができる。

不等式制約の識別に際し、この距離を(4・2)節で述べた角度と組合せて用いる。すなわち、反復解の近傍にある不等式制約のみに対して、角度による不等式制約の除去を行った。更に、制約内にあるものに対しても距離を計算し、前回の反復で違反しており、制約境界と反復解が非常に近接し、かつ角度が鋭角であるものは、制約内部にあって強制を行うことにした。なぜなら、このような制約は、次の反復で違反することが多いことが経験上わかっているからである。

以上をまとめると、提案法では以下の条件を満たす不等式制約を有効であるとみなす。

- (i) 不等式制約が違反していて、角度が鋭角の場合
- (ii) 不等式制約が違反していて、制約と反復解の距離が遠い場合
- (iii) 不等式制約を満足しているが、前回の反復では違反しており、制約境界との距離が近く角度が鋭角の場合

5. 数値計算例

〈5・1〉 ニュートン OPF のテスト系統への適用

作成したニュートン OPF の評価を行うため IEEE 30, 57, 118, そして 344 ノード系統に適用した。使用計算機は、広島大学総合情報処理センタの M-680 H である。表 1 にカップル版 OPF とデカップル版 OPF をテスト系統に適用した結果を示す。ここでは通常運転を想定し、あまり不等式制約設定を厳しくしていない。

解法時間について見ると、344 ノード系統で、カップル版 0.219 s、デカップル版 0.209 s とたいへん高速であり、実規模系統に対しても十分適用可能である

表 1 ニュートン OPF のテスト系統への適用結果
Table 1. Numerical result of OPF for the test systems.

	IEEE 30	IEEE 57	IEEE 118	344
ノード数	30	57	118	344
線路数	41	78	178	400
発電機ノード数	6	3	16	13
追加架空線路数*	7	33	282	26
状態変数	48	110	183	636
ラグランジュ乗数	53	106	166	623
コスト	607.32	4,764.35	13,097.54	13,819.0
カップル版	非零要素	1,119	3,026	6,070
	反復回数	4	4	4
	実行時間(s)	0.0254	0.0587	0.1500
デカップル版	非零要素	598	1,530	3,271
	反復回数	19	発散	9
	実行時間(s)	0.0590	—	0.1230

*：追加架空線路数とは、コスト関数に二次関数を、有効・無効出力制約に二次ペナルティ関数法を用いたため生じる非零要素を処理するため必要とされる等価線路の総数。

と思われる。デカップル版とカップル版の計算時間は大きく変わらないが、これは試作プログラムのデカップル版はカップル版のサブルーチンを流用しているためであり、プログラムの最適化により効率化することができる。

反復回数について見ると、カップル版はすべての系統に対して 4~5 回の反復で収束し、反復回数は系統規模にほとんど影響がないことがわかる。しかし、デカップル版においては、IEEE 30 ノード系統では収束が遅く、IEEE 57 ノード系統に対しては収束しなかった。このように、デカップルを行うことにより難収束となる系統があることがわかる。

追加架空線路数⁽⁶⁾について見ると、IEEE 118 ノード系統は、344 ノード系統とほぼ同数の発電機・調相機母線をもつにもかかわらず、282 本あり非常に多い。これは、IEEE 118 ノード系統はループの多い系統で、344 ノード系統は樹枝状系統であるという系統構成の違いにより生じている。しかし、表からもわかるように、系統構成の差は収束性に対して影響を与えないと考えられる。

〈5・2〉 デカップル版の収束改善法の IEEE 57 ノード系統に対する適用 デカップル版の収束改善法の有効性を検討するため、収束しなかった IEEE 57 ノード系統に対して減速乗数を導入したデカップル版 OPF を適用した。収束特性を図 3 に示す。実線は収束改善を行ったものを示し、破線は通常デカップル版を適用した結果を示す。コストに関しては、両者に

(a) 総発電コスト

(b) 最大潮流残差

図 3 IEEE 57 ノード系統に対するデカップル版 OPF の収束特性

Fig. 3. Convergence characteristics of the Decoupled OPF for the IEEE 57 system.

差は生じていないが、潮流残差は、提案法において反復と共に着実に減少し、最終的に 11 反復で収束している。このように、本手法を用いることによってデカップリングに対して生じる難収束状態を改善することができる。また、計算速度はカップル版に比較して約 10 % 向上する。ただし、プログラムの最適化により更に高速可能であるが、この点については省略する。

〈5・3〉 有効不等式制約識別法の適用 本研究で提案した不等式制約識別法の有効性を確認するため IEEE 118 ノード系統に適用した。

本識別法は、解点の近傍で有効であるので、不等式制約を考慮しない OPF を数回反復させた結果を初期値として与えている。なぜならば、この初期値はフラットスタートよりも一般的に解点に近いためである。不等式制約に関する収束状況を表 2 に示す。PG は発電機出力を表し、PL は線路潮流を表す。これら各 PL, PG に対して、各反復過程で違反している制約について、その数値を示してある。この中で、特に*印を付してあるものは、〈4・3〉節の(i)~(iii)に基づいて有効制約から除外されたものである。不等式制約の収束状況を見ると、第 1 回目の反復で多くの不等式制約が違反しているが、提案法を用いることにより、六つの制約が有効制約の集合から除外されてい

表 2 提案法による不等式制約の収束状況
Table 2. Convergence of inequality constraints when the proposed method is used.

不等式制約	制約値	反復回数			
		1	2	3	4
PG 25	2.800(2.800)	2.908*	—	—	—
PG 49	2.000(2.500)	2.483	2.008	2.001	2.000
PG 65	3.000(3.000)	—	—	3.047	3.000
PG 80	3.500(4.000)	—	3.532	3.501	3.500
PG 111	1.500(1.000)	1.494	—	—	—
PL 7	-3.000(-3.500)	-3.247	—	—	—
PL 8	2.500(2.500)	2.585*	—	—	—
PL 9	3.000(3.000)	3.299	3.026	3.000	3.000
PL 28	-0.400(-0.500)	-0.426*	-0.416*	-0.401*	—
PL 29	-0.500(-1.000)	-0.531	-0.515	-0.505	-0.500
PL 38	2.400(3.000)	2.410	—	—	—
PL 48	-0.100(-0.150)	-0.144	—	—	—
PL 59	0.200(0.500)	0.209*	—	—	—
PL 93	1.500(2.000)	1.689	1.508	—	—
PL 112	1.000(1.000)	1.102	1.016	1.005	1.000
PL 141	-0.250(-0.300)	-0.257*	—	—	—
PL 178	-0.450(-0.500)	-0.472*	—	—	—

* : 提案法により除外される不等式制約

— : 不等式制約を満たしている

制約値の括弧内は表 1 のケースにおける制約値を表す。

る。これらの制約を除外せずに、違反したすべての制約を大きなペナルティ係数で強制すると発散し、小さいペナルティ係数のとき 13 回の反復を必要とした。

このように、提案法は各反復において一部の不適当な制約を除外することで収束特性を改善するものである。さて、線路 28 の潮流に関する制約は、すべての反復で除外されているが、これは同制約が更に強い他の制約に実質的に含まれることを意味している。この場合、線路 28 と線路 29 は隣接しており、線路 29 の強制によって線路 28 は自然に満たされると解釈できる。実際、線路 28 に対して制約を課すと線路 29 の制約の収束が著しく遅くなることが確認されている。このように、提案法では不必要かつ収束の妨げとなる制約を効果的に除外している。

ラグランジュ関数と制約のこう配の角度と距離を計算するための計算時間は 0.032 s で、通常の OPF の計算時間の約 15 % である。しかし、今回用いた試作プログラムではこう配を別に求めているが、W 行列を求める際に一緒に計算することができるので、更に高速化することができる。

6. 終りに

本論文では、最初にニュートン形 OPF の定式化とテストシステムへの適用例を示した。OPF は比較的不等式制約の緩い場合、実システムのオンライン業務に対し十分適用可能であることがわかったが、システムによってはより高速化の見込めるデカップル版で収束しないことがわかった。従って、 P - Q デカップルにより生じる難収束を改善する手法を提案し、テストシステムに適用しその有効性を確認した。この手法を用いることにより、デカップル版 OPF に対する収束の信頼性が向上し、実システムへの適用の可能性が一段と高くなった。

また、ラグランジュ関数と制約の角度を利用した高速な有効不等式制約識別法を提案し、IEEE 118 ノードシステムに適用しその有効性を確認した。本手法を使って有効不等式制約を識別することにより、収束を悪化させる有効でない不等式制約の影響を除去することができる。そして、その結果収束特性を相当に改善し、高速かつ安定した求解が可能となった。

本識別法をデカップル版に適用するにあたっては、不等式制約を P - δ に関係の強いものと、 Q - E に関係の強いものに分類して、それぞれに適用する必要がある。

現在、我が国の電力会社では OPF は実運用に供されていない。しかし、今日のように様々な要求や厳しい制約が課せられる状況下で、運用を支援するための手段として OPF は今後必要不可欠と考えられる。その際本論文の結果は、系統計画、オンライン運用など OPF の実用化に貢献することができると期待される。

(平成元年 8 月 2 日受付, 同 2 年 1 月 5 日再受付)

文 献

- (1) H. W. Dommel & W. F. Tinney: "Optimal Power Flow Solutions", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-87, 1866 (1968)
- (2) J. W. Carpentier: "Differential Injection Method, a general method for Secure and Optimal Load Flows", *Proc. PICA* 1973, p. 255
- (3) J. Peschon, D. W. Bree & L. P. Hajdu: "Optimal Solutions Involving System Security", *Proc. PICA* 1971, p. 210
- (4) H. H. Happ, R. C. Burchett & K. A. Wirgau: "Large Scale Optimal Power Flow", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-101, 3722 (1982)
- (5) D. I. Sun, et al.: "Optimal Power Flow by Newton Approach", *ibid.*, PAS-103, 2864 (1984)
- (6) 佐々木・久保川・餘利野: 「ニュートン形 OPF プログラムの作成と AGC への適用」, 電気学会電力技術研資, PE-88-124 (昭 63)
- (7) H. Sasaki, J. Kubokawa & N. Yorino: "Development of Newton Optimal Power Flow", *Proc. 1988 KIEE Annual*

Conference International Sessions, p. 143

- (8) 佐々木・久保川・餘利野: 「最適潮流計算法における不等式制約の取扱いについて」, 電気学会電力技術研資, PE-89-160 (平成元)
- (9) 佐々木・久保川・餘利野: 「デカップル版ニュートン OPF の収束改善法」, 平年度電気学会全大
- (10) G. A. Maria & J. A. Findlay: "A Newton Optimal Power Flow Program for Ontario Hydro EMS", *IEEE Trans. Power Syst.*, PWR-2, 576 (1987)
- (11) 今野・山下: 非線形計画法, (昭 53) 日科技連出版社
- (12) 清水: システム制御と数値計画法 (昭 46) コロナ社
- (13) P. E. Gill, et al.: *Practical Optimization* (1981) Academic Press
- (14) 佐々木: 「シミュレーション技術としての潮流計算法」, シミュレーション, 1, No. 1 (昭 56)

佐々木 博 司 (正員)

昭和 16 年 3 月 10 日生。43 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科博士課程 (電気工学専攻) 修了。同年 4 月広島大学工学部電気工学科講師, 55 年 10 月第二類 (電気系) 助教授, 平成元年 11 月同教授 (電力工学教育科目担当), 現在に至る。主として, 電力システムの過渡安定度, 状態推定, 最適潮流計算法, エキスパートシステムの応用に関する研究に従事。工学博士。IEEE, CIGRE, 日本太陽エネルギー学会, 情報処理学会, エネルギー・資源研究会会員。

久保川 淳 司 (正員)

昭和 62 年 3 月広島工業大学工学部電子工学科卒業, 平成元年 3 月広島大学大学院博士課程前期修了, 同年 4 月同大学院博士課程後期入学, 現在に至る。

餘利野 直 人 (正員)

昭和 33 年 1 月 24 日生。58 年 3 月早稲田大学大学院修士課程修了。同年 4 月富士電機製造 (株) 入社。59 年 4 月早稲田大学大学院理工学研究科博士課程に進学。60 年 4 月早稲田大学理工学部助手, 62 年 4 月広島大学工学部助手。電力系統安定度および電力系統の経済運用に関する研究に従事。1985 年 George Montefiore 受賞。IEEE 会員。