

対話型多目的計画に基づく電力潮流最適化に関する基礎検討

01109481	北海道大学	*北 裕 幸	KITA Hiroyuki
非 会 員	北海道大学	小田 祐士	ODA Yuji
01503151	北海道大学	長谷川 淳	HASEGAWA Jun

1. まえがき

電力供給の規制緩和、自己責任原則等を内容とする電気事業法の改正に伴い、各種コストの削減や負荷平準化・省エネルギーなどに対する電力会社の自立的な取り組みが強く求められるようになってきている。特に、電力市場の自由化によって、安定供給、環境保全是もとより、これまで以上に経済性を追求した意志決定が要求されてくると考えられる。ところで、系統運用において、経済性、環境及び信頼性は一般にトレードオフの関係にあり、運用者の思考、主観、判断等を考慮した高度な最適化が必要となる。すなわち、各々の達成レベルの上がり下がりを見ながら、制約式の右辺やその他のパラメータを変えてみるなどして、総合的によと思える解を試行錯誤的に見出す（トレードオフ分析）必要がある。本稿では、電力系統の潮流最適化問題に対して、文献[1]の対話形式に基づいた満足化トレードオフ法を適用し、運用者の価値基準を柔軟に反映させながら、高度に意志決定を行う手法について報告する。

2. 電力潮流最適化問題

<2.1> 評価指標の定義 本稿の潮流最適化では、経済性、環境、信頼性に関する3つの指標を定義する。

(1) 経済性指標 経済性指標として火力機の発電燃料費を考える。これは、一般に発電機出力(P_{Gi})の2次関数で表される。

$$f_1 = \sum_{i=1}^n (\alpha_i P_{Gi}^2 + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i) \quad (1)$$

ここに、 n : 発電機総数

(2) 環境指標 環境指標として、単位時間当たりの NO_x 排出総量を考える。一般に、この値は発電機出力の二次関数と指数関数の和となる。

$$f_2 = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + d_i \exp(e_i P_{Gi})) \quad (2)$$

(3) 信頼性指標 各送電線潮流(P_{Li})の制約逸脱量の重み付き2乗和として次式のように表される。

$$f_3 = \sum_{i=1}^m \alpha_i (P_{Li} - P_{Li(\min)})^2 \quad (3)$$

ここに、 m は送電線総数を表し、 α_i は# i の線路潮流が制約を逸脱している時のみ値を持つ係数である。

結局、本稿の電力潮流最適化問題は、以下のような多目的計画問題として定式化される。

$$\min_{P_G} \{ f_1(P_G), f_2(P_G), f_3(P_G) \} \quad (4)$$

subj. to

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_D - L(P_G) = 0 \quad (\text{需給平衡条件}) \quad (5)$$

$$P_{G\min} \leq P_G \leq P_{G\max} \quad (\text{出力上下限制約}) \quad (6)$$

ここに、 P_D : 負荷需要、 L : 送電損失

<2.2> 意志決定における要件 上記の複数の評価指標は、本来同時に最小化したいというものであるが、実運用では従来から、どれか1つを目的関数にとって残りを制約にしたり^[2]、あるいは、線形加重和としてスカラ化し複合的な指標を作る方法などによって解を求めている。しかし、これらの手法では得られた解が運用者の望むものでない場合、どうすればよいかについての情報が与えられないため、最終意志決定のためのトレードオフ分析をする場合、かなりの労力を必要とする。また、人間の意志決定は、その行動原理に基づけば、必ずしも最適化(最小化)ではなく、満足化によるとする方が妥当であろう。すなわち、だいたいこれ以下ならば満足できるという、あいまいな(言い換えれば、柔軟に変更できる)希求水準を目標として意志決定がなされる。但し、その際、単に満足解が得られればよいというのではなく、もしあれば、更にできる限り小さくなるようなぎりぎりの解を選択したいと考えるであろう。つまり得られた解のパレート最適性をも保証することが望ましい(満足パレート解)。

3. 満足化トレードオフ法^[1]に基づく解法

<3.1> 希求水準を用いたスカラ化 前章で述べたように、多目的潮流最適化においては、満足パレート解を運用者の最終意志決定とすることになる。従って、計算のプロセスにおいては、少なくとも、与えられた希求水準に最も近いパレート解を提示できることが必要となる。この目的を達成するためには、いわゆるTchebyshevスカラ化関数を最小化すればよく、通

常、これと全く等価な以下の問題を考える。

$$\min z \quad (7)$$

$$\text{subj. to } \omega_i (f_i(P_c) - f_{i,s}) \leq z \quad i=1, 2, 3 \quad (8)$$

$$P_c \text{は(5)(6)式を満たす値} \quad (9)$$

ここに、 $f_{i,s}$ は希求水準である。また、目的関数の値が非常に大きかったり、正負の入り混じった目的関数があると、特定の目的関数ばかりが利いてくることがあるので、各目的関数を無次元化するスケーリングファクタとして重み係数 ω_i を用いている。この場合、通常、理想点 $f_{i,*}$ と最悪点 $f_{i,*}$ によって、

$$\omega_i = 1 / (f_{i,*} - f_{i,*}) \quad i=1, 2, 3 \quad (10)$$

のように、固定した値に設定する。

〈3.2〉 対話型による意志決定アルゴリズム 文献[1]の満足化トレードオフ法では、「運用者はバランスの取れた解を得るために、その希求水準を変えて試してみることが多い」という認識から、以下のように希求水準を逐次変えつつ、対話型に計算を行う手法である。

ステップ0(希求水準の範囲の設定)：各目的関数を各々単独で最小化して、希求水準の下限とする。上限値としては、各目的関数の最小点において他の目的関数値を計算し、その最大値によって与えることとする。

ステップ1(希求水準の設定)：各目的に対する希求水準を運用者に尋ねる。最初は $k=1$ とする。

ステップ2(パレート解の計算)：(7)～(9)の問題を解き、この解を P_c^k とする。

ステップ3(トレードオフ分析)：各目的関数値($f_i(P_c^k)$)を運用者に見せてこの解で満足できるかどうかを尋ねる。もしこの解における目的関数値に満足できず、この値から動いた状態の方が望ましいのであれば、適当なルールに従い、新たな希求水準を設定する。 $k=k+1$ としてステップ2へいく。

この方式では、運用者の価値基準はその希求水準によって与えられるので、トレードオフ分析は重みの調整ではなく、希求水準によってなされることになる。

〈3.3〉 目的と制約の入れ替え 上記のステップ3において、現在のパレート解のままでもよい、すなわちこれ以上悪くなつては困るという要求が起こる場合が考えられる。この場合には、(8)式の z の係数を0にするだけで制約条件として考慮することができる。このように、ある目的を制約にするということは、その希求水準達成を最優先にしようとするのであり、これにより優先順位の付いた目的をも扱えることになる。

4. 数値計算例

提案手法の有効性を検証するため、IEEE30母線モデル

システムを用いたシミュレーションを行った。このモデルにおいては、発電機総数は7、送電線総数は41である。経済性、環境、信頼性を単独で最小化したときの結果を表1に示す。また、表2は対話型意志決定のプロセスを示したもので、左欄が希求水準を、右欄がその希求水準に対して得られた計算結果を表している。この表から明らかなように、与えた希求水準に応じて適切に解の変更がなされており、更にマンマシン・インターフェースを工夫すれば、より高度な意志決定が可能となろう。

表1 単独最小化による各目的関数の値

	f_1 最小化	f_2 最小化	f_3 最小化
f_1 (\$/h)	2049.2	2553.8	2263.5
f_2 (トン/h)	1.6842	0.3093	0.5071
f_3 (pu)	0.8235	0.0609	0.0041

表2 結果の一例

繰返し回数		希求水準	z の係数	得られた結果	満足/不満足
1	f_1	2150	1	2169.1	×
	f_2	0.4	1	0.4522	×
	f_3	0.2	1	0.0273	○
2	f_1	2150	1	2157.4	×
	f_2	0.46	1	0.4723	×
	f_3	0.03	0	0.0300	○
3	f_1	2155	1	2156.5	×
	f_2	0.48	1	0.4743	○
	f_3	0.03	0	0.0300	○
4	f_1	2155	1	2153.8	○
	f_2	0.49	1	0.4813	○
	f_3	0.03	0	0.0300	○

5. むすび

本稿では、電力システムにおける潮流最適化問題に、満足化トレードオフ法の適用を試みた。その結果、従来の線形加重和による方法と比較して、容易に満足パレート解を得られることが確認された。今後は、トレードオフ分析の際の希求水準変更に関するルールを確立すると共に、ファジィ技術の適用や想定事故を考慮したより複雑な問題への拡張等について検討を行う予定である。

〈参考文献〉

- [1] 中山 弘隆：「対話型多目的計画法とその応用」オペレーションズ・リサーチ, 36, 9, 435-439 (1991)
- [2] 片桐 拓朗・横山 隆一・森田 達男：「信頼性選好指標に基づく電力潮流の多目的最適化」電気学会論文誌B分冊, 106, 3, 233-240 (1986)