

送電網の過負荷解消のための 経済性を考慮した FACTS 機器設置の最適化

正員 松尾 豊 (東京大学)

正員 横山 明彦 (東京大学)

Optimization of Installation of FACTS Device to Avoid Thermal Constraints
Taking into Account Economy in Power System Planning

Matsuo Yutaka, Member, Yokoyama Akihiko, Member (University of Tokyo)

FACTS devices such as high-speed phase shifter and variable series capacitor enable us to control active power flow in order to avoid thermal constraints on transmission lines, resulting in an increase of the network loadability and a reduction of production cost. However where to place these devices is an essential matter because their effects considerably depend on the locations. From an economic point of view, the investment cost must be taken into account as well as the reduction of the production cost. Therefore we propose to maximize return on investment(ROI) by searching not only the best location of FACTS devices but also the rating of each device. This problem is expressed as combinatorial optimization problem nested by nonlinear optimization problem. To solve this problem, tabu search incorporated with nonlinear programming method is used. And we discuss the remedial control of FACTS devices and simultaneous consideration of multiple load conditions. By considering remedial control, we can make better use of FACTS devices. Multiple load conditions bring us more appropriate solutions. Because the consideration makes our problem more difficult to solve, some efforts are necessary to be made. Numerical results are shown for a 3-generator 41-line model system and a 5-generator 42-line model system.

キーワード : FACTS 機器, 設備計画, 最適潮流計算, 高速移相器, 可変直列コンデンサ, タブサーチ, 非線形計画法, 緊急制御

1. はじめに

近年, 立地, 環境問題などのため送電線の新・増設は困難となってきている。そのため, 電力系統のインピーダンスを可変とすることのできるパワーエレクトロニクス技術を応用した FACTS(Flexible AC Transmission System) 機器を用い, 既存の送電線を有効に利用しようという考えが提案されている。

特に, 送電線の熱容量制約が大きな問題となるメッシュ状やループ状の系統では, 送電能力を向上させるためには有効電力潮流の制御が必要とされる。本論文では, このような有効電力潮流の制御機器として高速移相器(以下移相器という)および可変直列コンデンサ(以下直列コンデンサという)の2つの FACTS 機器を取り上げる。移相器を設置することによって, 熱容量制約によりボトルネックとなる送電線の潮流を他のルートに回し, 送電能力を向上させることができる。また, 直列コンデンサを設置することにより, 送電線のリアクタンスを変化させ, 望ましい潮流状態

を実現することができる。それとともに, 与えられた負荷需要に対し, 安価な発電機の出力の割合を増やすことができれば, 総発電コストを小さくすることが可能となる⁽¹⁾⁽²⁾。

本論文では, 送電線の過負荷を解消し送電能力を向上させる FACTS 機器の設置問題を経済的な観点からとらえ, 一般的な投資案件の指標である ROI(Return On Investment)を用いて最適化する。これは, FACTS 機器を設置することによる発電コストの減少分(Return)を FACTS 機器設置コスト(Investment)で割ったものにあたり, これを最大化する FACTS 機器の設置位置および設備容量を求めることが本研究の目的である。また, 設備計画者に意志決定の支援となるような最適解を含むいくつかの準最適解を提示することも考える。以下, 本論文で FACTS 機器という場合は, 移相器および直列コンデンサを指すものとする。

2. FACTS 機器設置問題の定式化

以下では, 発電機母線, 負荷母線, 変電所+開閉所の母線をノードとし, ノード間の変圧器, 送電線の各回線をブ

ランチとする。

本研究では、潮流計算に関して直流モデルを用いる。また、(N-1) ルールを考慮する。ここでは、(N-1) ルールを次のように定義する。

(N-1) ルール : 送電線 1 回線開放の想定事故ケースすべてに対して、定常時のシステムの運用状態から受動的に定まる各ブランチの有効電力潮流が、それぞれのブランチの熱容量から決まる有効電力潮流の上限を越えてはならない。

定常時にこのルールを満たすように運用状態を維持する必要がある。

FACTS 機器設置問題を以下のように定式化する。ここで、送電線 1 回線開放事故ケースを (N-1) ケース 1~N とし、簡便のため定常状態を (N-1) ケース 0 とする。

[目的関数]

$$\text{Max. } ROI = \frac{\text{Return}}{\text{Investment}} = \frac{C_0 - C}{\text{Investment}} \quad \dots (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \text{Inv.} = & \sum_{j \in B_A} u_j (I1 + (I2 + I3\alpha_j^{max}) f_j^{max}) \\ & + \sum_{j \in B_A} v_j (I4 + I5 \Delta x_j^{max} (f_j^{max})^2) \quad \dots (2) \end{aligned}$$

$$C = \sum_{i \in N_G} \text{cost}_i P_i + \sum_{i \in N_L} \text{pcost}_i L_i^{penalty} \quad \dots (3)$$

[制約]

(発電機出力制約)

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad (i \in N_G) \quad \dots (4)$$

(移相角制約)

$$-\alpha_j^{max} \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{max} \quad (j \in B_{PS}) \quad \dots (5)$$

(直列コンデンサ容量制約)

$$-\Delta x_j^{max} \leq \frac{\gamma_j^0}{f_j^0} \leq \Delta x_j^{max} \quad (j \in B_{SC}) \quad \dots (6)$$

(直列コンデンサ容量一定制約)

$$\frac{\gamma_j^0}{f_j^0} = \frac{\gamma_j^1}{f_j^1} = \dots = \frac{\gamma_j^N}{f_j^N} \quad (j \in B_{SC}) \quad \dots (7)$$

(負荷点のペナルティ)

$$\begin{aligned} L_i^{penalty} & \geq L_i^{demand} - L_i, \\ L_i^{penalty} & \geq 0 \quad (i \in N_L) \quad \dots (8) \end{aligned}$$

(需給バランスの制約)

$$\sum_{i \in N_L} L_i - \sum_{i \in N_G} P_i = 0 \quad \dots (9)$$

(移相器、直列コンデンサ設置に関する制約)

$$\sum_{j \in B_A} u_j + \sum_{j \in B_A} v_j \geq 1 \quad \dots (10)$$

$$u_j = 0 \text{ or } 1, \quad v_j = 0 \text{ or } 1, \quad u_j v_j = 0,$$

$$0 \leq \alpha_j^{max} \leq u_j \alpha^{MAX},$$

$$0 \leq \Delta x_j^{max} \leq v_j \Delta x^{MAX} \quad (j \in B_A) \quad \dots (11)$$

((N-1) ルール)(N-1) ケース $k(k = 0, 1, \dots, N)$ において次の制約が課せられる。

(送電線の熱容量制約)

$$-f_j^{max} \leq f_j^k \leq f_j^{max} \quad (j \in B_A) \quad \dots (12)$$

ここで、本定式化中の f_j^k は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} f_j^k = & \sum_{j' \in B_A} a_{(j)(j')}^k (\alpha_{j'} + \gamma_{j'}^k) \\ & + \sum_{i' \in N_A} b_{(j)(i')}^k (P_{i'} - L_{i'}) \quad \dots (13) \end{aligned}$$

C_0, C : FACTS 機器設置前、設置後の発電コスト
 N_A : 全てのノードの集合, B_A : 全てのブランチの集合
 N_G, N_L : 全ての発電機ノード, 負荷ノードの集合
 B_{PS}, B_{SC} : 移相器, 直列コンデンサが設置されたブランチの集合
 cost_i : 発電機 i の単位発電量当たりのコスト
 pcost_i : 負荷点 i の単位不足有効電力あたりのペナルティコスト
 P_i : 発電機 i の有効電力出力 ($i \notin N_G$ のとき $P_i = 0$)
 P_i^{min}, P_i^{max} : 発電機 i の最小出力, 最大出力
 L_i : 負荷点 i の消費有効電力 ($i \notin N_L$ のとき $L_i = 0$)
 $L_i^{demand}, L_i^{penalty}$: 負荷点 i の需要有効電力, 不足有効電力[†]
 α_j : ブランチ j にある移相器の移相角 ($j \notin B_{PS}$ のとき $\alpha_j = 0$)
 α_j^{max} : ブランチ j にある移相器の最大移相角
 γ_j^k : (N-1) ケース k におけるブランチ j にある直列コンデンサの等価電圧 ($j \notin B_{SC}$ のとき $\gamma_j^k = 0$)
 Δx_j^{max} : ブランチ j にある直列コンデンサの最大容量
 f_j^{max} : 熱容量から決まるブランチ j に流すことのできる有効電力潮流の上限
 u_j : ブランチ j の移相器の設置/非設置を表す 0-1 変数
 v_j : ブランチ j の直列コンデンサの設置/非設置を表す 0-1 変数
 α^{MAX} : 移相器の最大移相角の上限
 Δx^{MAX} : 直列コンデンサの最大容量の上限
 $a_{(i)(j)}^k, b_{(i)(j)}^k$: 行列 A^k, B^k の i 行 j 列要素^{††}
 $I1, I2, I3, I4, I5$: 定数
 f_j^k : (N-1) ケース k においてブランチ j を規定方向に流れる有効電力

[†]ここでは、負荷点に送るべき電力を需要有効電力、実際に送ることができ消費される電力を消費有効電力、実際に送ることができなかった(停電が発生した場合)の不足分(すなわち、需要有効電力-消費有効電力)を不足有効電力と呼ぶことにする。ペナルティコストとは、この不足分に対する停電コストに類するものである。

^{††}行列 A^k, B^k は、各ノードに流入(流出)する有効電力と各ブランチの有効電力潮流、およびブランチに挿入された移相角と各ブランチの有効電力潮流の関係を表す感度係数行列であり、各(N-1)ケースに対してあらかじめ計算しておくことにより、従属変数を使わずに各ブランチの有効電力潮流を表すことができる⁽³⁾。

直列コンデンサは直流モデルにおいては、ブランチに挿入される抵抗に置き換えられるが、計算を簡略化するために、移相器と同様、電圧源として表す。そのため、制約式 (7) を課す必要がある。

また、FACTS 機器を同一ブランチに複数台設置することは実際には考えられないので、ここでは同一ブランチに 1 台までとした。移相器のコストは、設置する送電線の熱容量および最大移相角に比例 (係数 I_2, I_3) するとし、また、直列コンデンサのコストは熱容量の 2 乗に比例 (係数 I_5) するとした。いずれも、設置する際には、固定費用 (I_1 および I_4) が必要である。

3. 問題の分析とアルゴリズムの構築

本問題に対する解法を構築する上では、定式化できないさまざまな要素があることや定式化の時点で近似を用いていることを考えると、複数の FACTS 機器設置案を提示できることが望ましい。また、計画業務において、需要予測や送電線拡充計画などの前提のもとで FACTS 機器設置案を策定することを考えると、その計算時間はできるだけ短い方が望ましいと考えられる。

本問題では、最適化すべき変数として以下の 3 種類が混在していることに注意する必要がある。

- 設置位置変数: 移相器、直列コンデンサの設置位置を示す 0-1 変数 (u_j, v_j)
 - 設備容量変数: それぞれの FACTS 機器の設備容量 (最大移相角 α_j^{max} ・最大容量 Δx_j^{max}) を示す連続変数
 - 運用状態変数: 発電機出力、負荷消費電力、移相器の運用移相角、直列コンデンサの運用容量を示す連続変数
- 設備容量変数 $\alpha_j^{max}, \Delta x_j^{max}$ を最適化するためには、運用状態変数が最適化されている、つまり最適経済負荷配分 (ELD) が行われている必要がある。また、設置位置変数 u_j, v_j を最適化するためには、設備容量変数と運用状態変数が最適化されている必要がある。したがって、上記 3 種の変数を最適化するには、単純に考えて 3 つのループがネストしたアルゴリズムを用いればよい。しかし、設備容量変数は連続変数であり、最適化するためには、次のような選択肢が考えられる。

- (1) 設備容量変数と運用状態変数をまとめて最適化する。
 - (2) 設備容量変数を離散化して、その解空間を探索しながら、その都度、運用状態変数を最適化していく。
- 1 の場合には、組合せ最適化問題 (設置位置変数) + 制約つき非線形最適化問題 (設備容量変数、運用状態変数) となり、非線形計画法における高速な解法を利用することができる。ここではその高速性から 1 を選択する。2 は、組合せ最適化問題 (設置位置変数) + 組合せ最適化問題 (設備容量変数) + 制約つき非線形最適化問題 (運用状態変数) となる。これについては 5 節で議論する。

3.1 設備容量・運用状態の最適化: SQP 法 ここでは、一般的な制約つき非線形最適化の解法として効率のよ

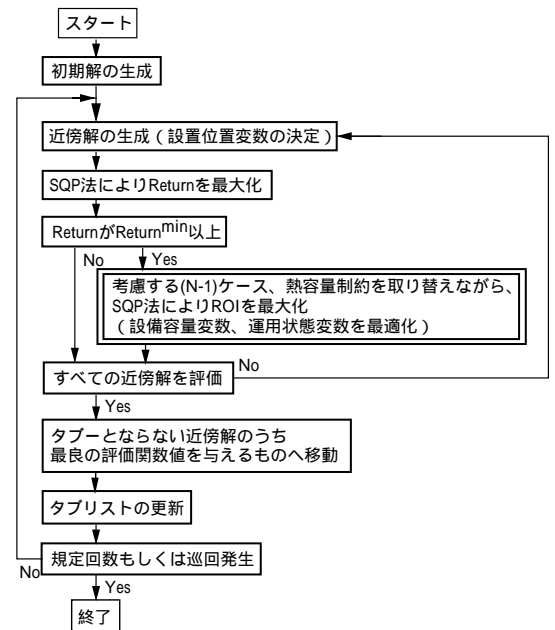


図 1 最適化アルゴリズム
Fig. 1. Optimization algorithm

い手法であるとされている SQP 法 (Successive Quadratic Programming Method)⁽⁴⁾ を用いて、設備容量変数・運用状態変数を最適化することにする。SQP 法は、Karush-Kuhn-Tucker 条件を満たす点を求める非線形方程式を、2 次計画問題に帰着させて解く数学的な手法である⁽⁴⁾。

また、FACTS 機器設置問題は、(N-1) ルールを考慮するため、多くの熱容量制約を持つ。しかし、その中で実際に必要な制約は、苛酷な (N-1) ケースにおける一部のブランチの熱容量制約だけであり、大部分の制約は考慮しなくても解は変わらない。そこで、必要な (N-1) ケースだけ限定して適用し、得られた解が他の制約も満たせば受理、そうでなければ考慮する制約を更新して反復する⁽³⁾。これにより、計算時間の大幅な短縮を図ることができる。

3.2 設置位置の探索: タブサーチ FACTS 機器の設置位置を探索する問題は組合せ最適化問題となり、探索空間は、各ブランチに、移相器もしくは直列コンデンサを設置、または何も設置しないという全ての組み合わせである。その組み合わせの総数はブランチ数を N とすると 3^N 通りとなる。

FACTS 機器の設置位置を決めるにあたって、ボトルネックとなるブランチにいかに対処するかが鍵となる。ここでボトルネックとなるブランチというのは、ある (N-1) ケースに対し、熱容量制約 (12) の等号が成り立つ、つまり熱容量限界に達するブランチのことである。ボトルネックとなるブランチは、もし、そのブランチに流すことのできる有効電力潮流の上限 f_j^{max} を増やせば、総発電コストが下

⁽⁴⁾ ここでの非線形関数が、大域的最適解でない局所解を持つかどうかは議論の余地があるが、文献⁽³⁾に示したように実際上ほとんど問題にならないので、最初に出会った局所最適解を大域的最適解とする。

がる。

どのブランチがボトルネックとなり易いかは、系統ごとにある程度決まっており、また、あるボトルネックに対する効果的な FACTS 機器の設置位置もある程度決まっていることから、良い解の近傍に別の良い解がある場合が多く、近傍探索を基本とする解法が有効であると考えられる。

ここでは、モダンヒューリスティックの1つであり、近傍探索を基本としながら局所解、巡回に対する対策を備えるタブサーチを用いることにした。

タブサーチは、1980 年代に F.Glover によって提案された、組合せ最適化問題に適した解法である。タブリストと呼ばれるリストを用い、効率的に現在の解の近傍を探索することを繰り返す⁽⁵⁾。降下法では局所最適解にトラップされるという欠点があったが、タブサーチでは局所解を逃れるために、現在の解の近傍に現在の解より評価関数値の良いものがなくとも、近傍の中で評価関数値の最も良いものへ移動することを許している。そして、元の解に戻って同じ解空間の探索を繰り返す巡回現象を避けるため、ある解から別の解への遷移に伴う属性をタブリストに一定期間保存しておき、そのリストを元にある属性を伴う解の遷移を禁止する。タブリストの長さはタブレングスと呼ばれる。

本問題では FACTS 機器の設置位置を、各ブランチに対する移相器の設置/非設置を表すビット列と、直列コンデンサ設置/非設置を表すビット列により表現する。そして、1つのビットを0から1にもしくは1から0に変化させる単純ムーブによる解を現在の解の近傍として定義する。タブは、ムーブの逆とする。

各設置位置に対する評価関数値としては、SQP 法により設備容量変数・運用状態変数を最適化した際の ROI を用いる。しかし、一般的に ROI の大きい投資案は投資規模が小さいことが多いため、目的関数として ROI を用いた上で投資規模についての制約を課すには、次のような制約を定式化に加えれば良い[†]。

(Return の下限制約)

$$C_0 - C \geq \text{Return}^{\min} \dots \dots \dots (14)$$

ただし、FACTS 機器の設置位置、設置数により、SQP 法の段階ではどうしてもこの制約を満たせない場合があり、実行可能解がない自体に陥る。そこで、タブサーチの評価関数値を以下のように定義する。 k は十分大きな正数である。

$$f = \begin{cases} ROI & (\text{if } \text{Return} \geq \text{Return}^{\min}) \\ \frac{\text{Return}}{k} & (\text{if } \text{Return} < \text{Return}^{\min}) \end{cases}$$

これにより、制約 (14) を満たせない時には、Return を大きくする方向にタブサーチの探索が進み、制約 (14) を満たした後は ROI を最大化する方向に探索が進むことになる。

[†]Return^{min} はどのくらい発電コストを減らしたいかという基準によって定めることになる。他にも、Investment の上限を決めるなどの方法も考えられる。

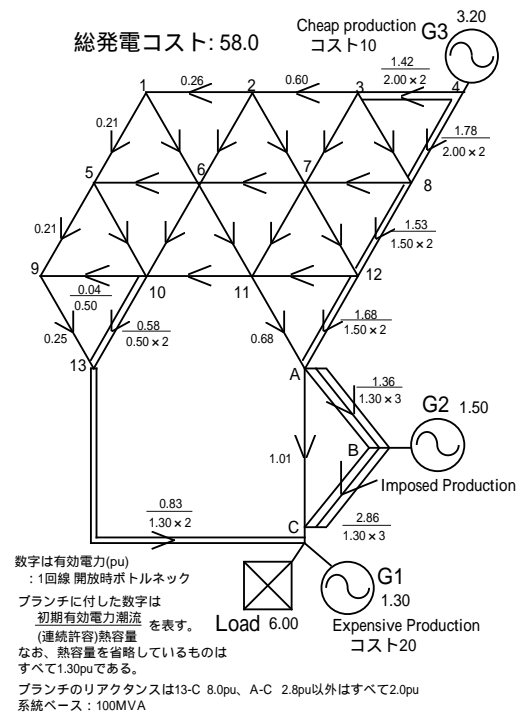


図2 3機系統における初期潮流状態

Fig. 2. Initial power flow of 3-generator model system

アルゴリズムを図1に示す。設置位置の初期解としては、どのブランチにも FACTS 機器を設置しない状態とする。

また、終了条件として、反復を規定回数繰り返せば終了とするのが一般的だが、本研究では問題の性質上、タブレングスを小さくとり、巡回が発生した時点で終了とした。

3.3 3機系統におけるシミュレーションと考察 図2に示す3機41ブランチのモデル系統を用い、シミュレーションを行なった。この系統は、フランス EDF の系統から、ボトルネックとなる主要部分を抜き出し、モデル化したものである⁽²⁾。以下では、例えばノード B とノード C をむすぶブランチを B-C と書くことにする。初期状態におけるボトルネックは、B-C 開放時の残り2回線の B-C である。

表1に得られた上位解を示す。1位から3位の解は、A-B や B-C に FACTS 機器を設置し、初期状態のボトルネック B-C の潮流を A-C 側に迂回させることで、G3 から負荷への送電能力を向上させている(図3(a)(b)参照)。このとき、B-C 開放時の A-C が新たにボトルネックとなるため、さらに送電能力をあげるためには 13-C を積極的に利用する必要がある。そこで、9-13 や 13-C に FACTS 機器を設置するような4位以下の解が有効となる(図3(c)(d)参照)。

また、第8位の案に関しては、13-C に単独で移相器を設置した場合には ROI は 3.81 (最大移相角 6.50°)、また 9-13 に単独で移相器を設置した場合には ROI は 2.97 (最大移相角 9.34°)であるのに対し、これらを組み合わせることにより ROI が向上している。これは、9-13 の移相器により、ボトルネックとなり易い 10-13 の潮流を 9-13 側に

表 1 3 機系統において得られた上位解
($Return^{min} = 0$)Table 1. Solutions in 3-generator model system
($Return^{min} = 0$)

順位	ROI	どこに何を設置	Cost(Return)	Inv.	反復
1	7.05	A-B に -5.27° の PS	56.20(1.79)	25385	1
2	5.66	A-C に $0.236pu$ の SC	56.74(1.25)	22095	1
3	5.38	A-C に 1.76° の PS	56.74(1.25)	23238	1
4	4.80	9-13 に 8.97° の PS A-B に -5.27° の PS	55.44(2.55)	53027	2
5	4.79	9-13 に 8.26° の PS 13-C に 11.88° の PS A-C に $0.236pu$ の SC	54.22(3.77)	78731	15
6	4.74	9-13 に 8.26° の PS 13-C に 8.48° の PS A-B に -5.27° の PS	54.20(3.79)	79941	3
7	4.74	9-13 に 8.26° の PS 13-C に 11.99° の PS A-C に 1.76° の PS	54.20(3.79)	79941	15
8	4.69	9-13 に 8.26° の PS 13-C に 13.00° の PS	55.30(2.69)	57321	14
9	4.65	9-13 に 8.26° の PS 10-11 に -9.24° の PS A-B に -5.27° の PS	54.25(3.74)	80399	3
10	4.62	5-6 に -20.00° の PS A-B に -5.27° の PS	55.23(2.76)	59769	2

反復 19 で巡回により終了。計算時間 4 分。のべ 905 回の探索。

表の見方について

「どこに何を設置」の欄には、FACTS 機器の種類 (PS: 移相器, SC: 直列コンデンサ), 設置位置および運用状態 (設備容量に正負をつけたもの) を示す。PS では、例えばブランチ A-B に設置なら A B の潮流を増大させる方向が正, SC では、コンデンサモードが正,リアクトルモードが負である。見易くするために、 $ROI = Return/Investment \times 10000$ とした。「反復」は各解がタブサーチの何回目の反復で最初に得られたかを示す。終了条件、計算時間およびタブサーチの何通りもの設置位置について探索を行なったかを欄外に付記する。

シミュレーション条件について

タブレングス: 3, α^{MAX} : 20° , Δx^{MAX} : $2.0p.u.$, $I1$: 20500, $I2$: 12.8, $I3$: 4.7, $I4$: 20500, $I5$: 0.4, $pcost_i (i \in N_L)$: 500
計算機は日本電算機(株)Ju1/200(CPU: Ultra SPARC 200MHz)を用いた。以下、同様。

回し, 13-C の移相器をより有効に利用できるようになるためである。

上位の解には移相器を設置する案が多く, 直列コンデンサはあまり見られないが, 潮流の大きな A-C に設置する案は有効である。

タブサーチは, 19 回目の反復で終了し, のべ 905 通りの設置位置に対して探索を行なった。41 本のブランチに 2 台の FACTS 機器を設置するパターンは単純に考えて $41^2 \approx 1700$ 通り, 3 台設置するパターンは $41^3 \approx 69000$ 通りであるから, 少ない探索で解を得ているといえる[†]。

さらに, Return の下限を 2.0, 4.0 として行なった結果を表 2, 3 に示す。表 2 の 6 位と 8 位の解は表 1 には現れていないものであり, Return が 2.0 以上の解を中心に探索を進めている結果であるといえる。逆に言えば, 得られた

表 2 3 機系統において得られた上位解
($Return^{min} = 2.0$)Table 2. Solutions in 3-generator model system
($Return^{min} = 2.0$)

順位	ROI	どこに何を設置	Cost(Return)	Inv.	反復
1	4.80	9-13 に 8.97° の PS A-B に -5.27° の PS	55.44(2.55)	53027	2
2	4.79	9-13 に 8.26° の PS 13-C に 11.88° の PS A-C に $0.236pu$ の SC	54.22(3.77)	78731	19
3	4.74	9-13 に 8.26° の PS 13-C に 11.99° の PS A-C に 1.76° の PS	54.20(3.79)	79941	13
4	4.74	9-13 に 8.26° の PS 13-C に 8.48° の PS A-B に -5.27° の PS	54.20(3.79)	79941	3
5	4.69	9-13 に 8.26° の PS 13-C に 13.00° の PS	55.30(2.69)	57321	32
6	4.68	9-10 に -7.69° の PS 13-C に 13.59° の PS A-C に $0.236pu$ の SC	54.46(3.53)	75508	9
7	4.65	9-13 に 8.25° の PS 10-11 に -9.24° の PS A-B に -5.27° の PS	54.25(3.74)	80399	3
8	4.63	9-10 に -7.69° の PS 13-C に 10.19° の PS A-B に -5.27° の PS	54.44(3.55)	76720	35
9	4.62	5-6 に -20.00° の PS A-B に -5.27° の PS	55.23(2.76)	59769	2
10	4.49	9-10 に -6.21° の PS 10-11 に -14.67° の PS A-C に $0.236pu$ の SC	54.58(3.41)	75822	27

反復 40 で巡回により終了。計算時間 24 分。のべ 2251 回の探索。

表 3 3 機系統において得られた上位解
($Return^{min} = 4.0$)Table 3. Solutions in 3-generator model system
($Return^{min} = 4.0$)

順位	ROI	どこに何を設置	Cost(Return)	Inv.	反復
1	3.88	9-13 に 13.04° の PS 13-C に 8.09° の PS A-B に -5.27° の PS 9-10 に $1.67pu$ の SC	53.93(4.06)	104796	5
2	3.77	5-9 に 8.18° の PS 9-13 に 8.35° の PS 13-C に 6.72° の PS A-B に -5.27° の PS	53.99(4.00)	106082	7
3	3.77	5-9 に 10.85° の PS 13-C に 5.72° の PS A-B に -5.27° の PS 9-13 に $2.00pu$ の SC	53.70(4.29)	113860	11
4	3.76	5-9 に 19.24° の PS 9-10 に -8.38° の PS 13-C に 6.15° の PS A-B に -5.27° の PS	53.92(4.07)	108333	13
5	3.69	13-C に 6.84° の PS A-B に -5.27° の PS 5-9 に $2.00pu$ の SC 9-13 に $2.00pu$ の SC	53.57(4.42)	119769	3

反復 26 で巡回により終了。計算時間は 61 分。のべ 936 回の探索。

[†]なお, タブレングスを変えて比較を行なったが, 得られる解, 計算時間を併せて考えると, 本問題においてはタブレングス 3 が適当であるとした。

解の上位のものは信頼性が高いが, 下位のものになると見つけていない解が存在する可能性があるといえるだろう。

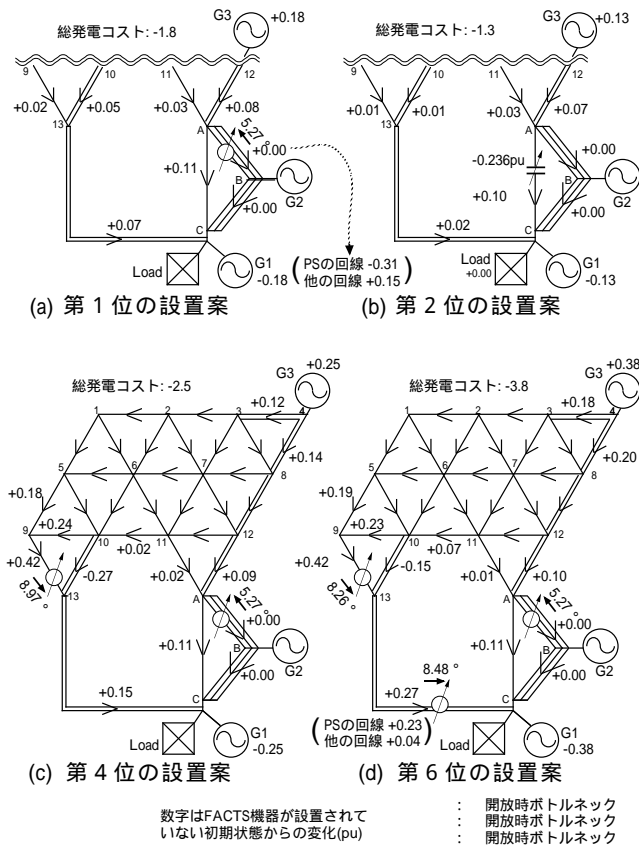


図3 3機系統の上位設置案における潮流状態
Fig. 3. Power flow of solutions in 3-generator model system

4. FACTS 機器の緊急制御の考慮

FACTS 機器の大きな特長として、その高速な制御性が挙げられる。この特長を利用し、事故時に FACTS 機器を緊急制御することにより、さらに系統の送電容量を向上させることができる。

以下では、連続許容熱容量と短時間許容熱容量を区別して考える。送電線 1 回線開放事故時に、各ブランチの潮流が短時間許容熱容量の範囲内に収まり、さらに、発電機出力を変えずに設置された FACTS 機器を緊急制御することによって、各ブランチの潮流を連続許容熱容量の範囲内に収めることができるなら、その運用状態は信頼度の面から許容できることになる。

4.1 定式化 各 (N-1) ケースごとに FACTS 機器は異なる緊急制御を行なうので、それぞれのケースに対し緊急制御後の運用状態を新たに変数として定義する。2 節の定式化における (N-1) ルール以下の制約を次のように変更する。

((N-1) ケース $k(k = 0, 1, \dots, N)$ における事故直後の制約)

(短時間許容熱容量制約)

$$-f_j^{smax} \leq f_j^k \leq f_j^{smax} \quad (j \in B_A) \dots\dots\dots (15)$$

ここで、

$$f_j^k = \sum_{j' \in B_A} a_{(j)(j')}^k (\alpha_{j'} + \gamma_{j'}^k) + \sum_{i' \in N_A} b_{(j)(i')}^k (P_{i'} - L_{i'}) \dots\dots\dots (16)$$

((N-1) ケース $k(k = 1, \dots, N)$ における緊急制御後の制約)

(移相角制約)

$$-\alpha_j^{max} \leq \alpha_j^k \leq \alpha_j^{max} \quad (j \in B_A) \dots\dots\dots (17)$$

(直列コンデンサ容量制約)

$$-\Delta x_j^{max} \leq \frac{\gamma_j^k}{f_j^k} \leq \Delta x_j^{max} \quad (j \in B_{SC}) \dots\dots\dots (18)$$

(連続許容熱容量制約)

$$-f_j^{max} \leq f_j^k \leq f_j^{max} \quad (j \in B_A) \dots\dots\dots (19)$$

ここで、

$$f_j^k = \sum_{j' \in B_A} a_{(j)(j')}^k (\alpha_{j'}^k + \gamma_{j'}^k) + \sum_{i' \in N_A} b_{(j)(i')}^k (P_{i'} - L_{i'}) \dots\dots\dots (20)$$

f_j^{max} : 連続許容熱容量から決まるブランチ j に連続して流すことのできる有効電力潮流の上限

f_j^{smax} : 短時間許容熱容量から決まるブランチ j に短時間流すことのできる有効電力潮流の上限

α_j^k : (N-1) ケース k におけるブランチ j にある移相器の緊急制御後の移相角 ($j \notin B_{PS}$ のとき $\alpha_j^k = 0$)

γ_j^k : (N-1) ケース k におけるブランチ j にある直列コンデンサの緊急制御後の等価電圧 ($j \notin B_{SC}$ のとき $\gamma_j^k = 0$)

f_j^k : (N-1) ケース k の緊急制御後においてブランチ j を規定方向に流れる有効電力

以上の式 (15) ~ (20) までの制約を、式 (4) ~ (11) と併せて同時に扱う。この変更により、運用状態変数として新たに α_j^k, γ_j^k が増えることになる。ブランチ j に設置された移相器は、定常時には移相角 α_j で運用するが、(N-1) ケース k 時には移相角を α_j^k とすることで、短時間の送電線過負荷を解消する。直列コンデンサについても同様である。

このように定式化の変更を行っても、単純に運用状態変数が増えただけなので、前節までと同じアルゴリズムを用いることができる。ただし、(N-1) ルールの限定はより複雑になる⁽³⁾。

4.2 3機系統におけるシミュレーションと考察

図 2 の系統を用い、シミュレーションを行なった。各ブランチの短時間許容熱容量から決まる有効電力潮流の上限は、連続許容熱容量から決まる有効電力潮流の上限の 110% とした。その他の諸条件は 3.3 節と同じとした。

結果を表 4 に示す。緊急制御を考慮した場合には、定常時

表 4 緊急制御を考慮し得られた上位解
($Return^{min} = 0$)

Table 4. Solutions with remedial control ($Return^{min} = 0$)

順位	ROI	どこに何を設置	Cost(Return)	Inv.	反復
1	8.91	13-C に 20.00° の PS	54.93(3.06)	34384	1
2	8.12	13-C に 20.00° の PS A-B に 5.27° の PS	53.14(4.85)	59769	2
3	8.01	11-A に 20.00° の PS	55.23(2.76)	34384	1
4	7.89	10-11 に 20.00° の PS	55.28(2.71)	34384	1
5	7.80	13-C に 16.38° の PS 13-C に 16.38° の PS	52.97(5.02)	64342	2
6	7.64	13-C に 20.00° の PS A-C に 0.236pu の SC	53.68(4.31)	56479	2
7	7.62	11-A に 13.71° の PS 13-C に 20.00° の PS	53.04(4.95)	64924	2
8	7.60	11-A に 20.00° の PS A-B に 5.27° の PS	53.45(4.54)	59769	14
9	7.53	10-11 に 20.00° の PS A-B に 5.27° の PS	53.49(4.50)	59769	14
10	7.49	13-C に 20.00° の PS A-C に 1.76° の PS	53.68(4.31)	57622	2

反復 25 で巡回のため終了。計算時間 29 分。のべ 1052 回の探索。
シミュレーション条件について
短時間許容熱容量は連続許容熱容量の 110%とした。その他は表 1 参照。以下、同様。

表 5 緊急制御を考慮し得られた上位解
($Return^{min} = 5.0$)

Table 5. Solutions with remedial control ($Return^{min} = 5.0$)

順位	ROI	どこに何を設置	Cost(Return)	Inv.	反復
1	7.80	13-C に 16.38° の PS 13-C に 16.38° の PS	52.97(5.02)	64342	2
2	7.41	9-13 に 15.65° の PS 13-C に 20.00° の PS 13-C に 20.00° の PS	50.54(7.45)	100494	3
3	7.20	9-13 に 11.27° の PS 13-C に 20.00° の PS 13-C に 20.00° の PS A-B に 5.27° の PS	49.12(8.87)	123204	4
4	7.13	13-C に 15.90° の PS 13-C に 15.90° の PS A-C に 0.236pu の SC	51.87(6.12)	85852	3
5	7.10	9-13 に 15.64° の PS 13-C に 20.00° の PS 13-C に 20.00° の PS A-C に 0.236pu の SC	49.29(8.70)	122584	4

反復 23 で巡回のため終了。計算時間 53 分。のべ 1038 回の探索。

の FACTS 機器の運用状態と設備容量は無関係であり、表中には設備容量を記している。表中の解すべてが、13-C、11-A、10-11 という系統下部中央のループ沿いの移相器のいずれかを含んでおり、これらの設置位置が緊急制御を考慮する上で効果的であることが分かる。これは、系統下部右側のループの部分で事故が発生した場合には、13-C 側に潮流を迂回させることができるためである。緊急制御を考慮しない場合にこれらの案が良くなかったのは、あらかじめ 13-C 側に潮流を回しておく必要があるため、10-13 や 12-A がボトルネックとなるためである。

13-C に移相器を設置した様子を図 4 に示す。定常状態

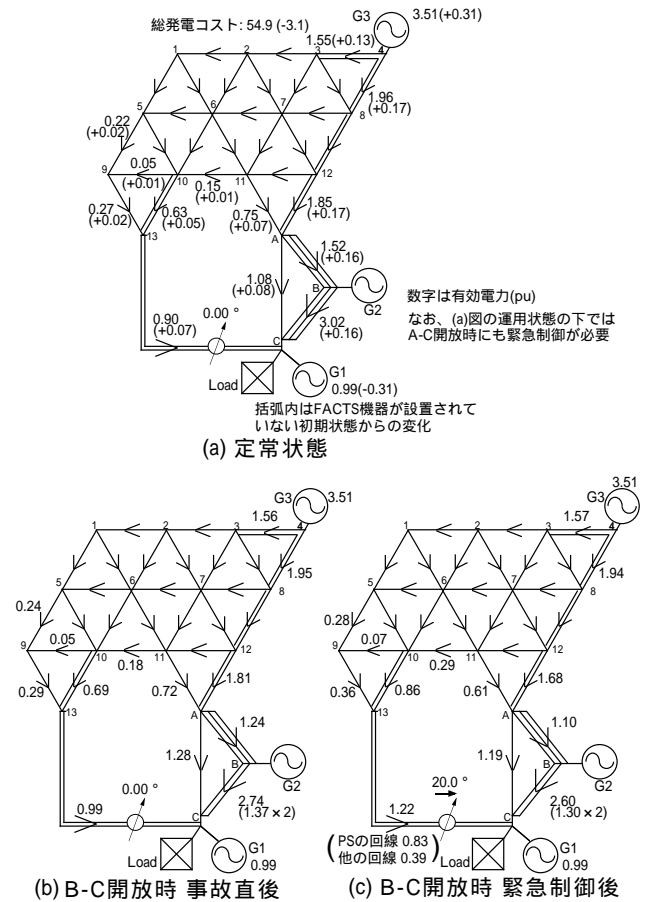


図 4 13-C に移相器を設置した場合の操作
Fig. 4. Operation of phase shifter on 13-C

(図 4(a) 参照) では移相器の移相角は 0° であり、B-C 開放時 (図 4(b) 参照) には、B-C の潮流が連続許容熱容量を越えている。そこで、移相器を緊急制御し、移相角を 20° とする。これによって、各ブランチの潮流が連続許容熱容量の範囲内に収まるようになる (図 4(c) 参照)。

一方、緊急制御を考慮しない場合により設置案であった A-B や A-C に FACTS 機器を設置する案は、緊急制御を考慮しても ROI の変化がなかった。これらの案では、もともとボトルネックが B-C 開放時の B-C と B-C 開放時の A-B の 2 つであり、1 つの (N-1) ケースに関してだけがボトルネックとなっている。つまり、事故状況に応じて柔軟に FACTS 機器の運用状態を変える緊急制御のメリットが生かせない設置案であるため、緊急制御を考慮しても ROI が変化しない。

表 5 に Return の下限を 5.0 とした結果を示す。13-C の各回線に移相器を設置する案が効果的である。

全般に得られた解の ROI は向上しており、FACTS 機器を事故時に緊急制御することによって、系統の送電能力の向上に寄与している。FACTS 機器を有効に利用するには、緊急制御を考慮した上でその設置状態を検討する必要があるといえるだろう。

5. 複数の負荷断面の考慮

負荷は時間帯、季節などによって大きく変動し、負荷断面によって効果的な FACTS 機器の設置状態は異なる。そこで、FACTS 機器の設置問題を複数の負荷断面に対して拡張することを考える。複数の負荷断面を考慮することにより、より適切な FACTS 機器の設置案を得ることが可能となる。

5.1 設備容量の離散化 複数の負荷断面を考慮する際には、FACTS 機器を設置した場合の Return として、各負荷断面ごとの Return を重みをかけて足しあわせた値を用いる。この重みは、各負荷断面ごとの時間比を表すことになる。

複数の負荷断面を考慮した上で最適な設置案を得るには、理論的には、それぞれの負荷断面に対する運用状態変数を別々に用意すればよい。しかし、SQP 法において最適化する変数が増えると、計算時間がより多く必要となるなど、考慮できる負荷断面の数に限界があり、本質的な解決にはならない。また、FACTS 機器の設備容量は、今まで連続変数として扱ってきたが、モデル化の時点でさまざまな近似を行なっていることから、厳密な数字にはあまり意味はない。

そこで、本節では設備容量変数を離散化して、その解空間を探索しながら、その都度、運用状態変数を最適化していくというアプローチをとることにする。つまり、組合せ最適化問題（設置位置変数）+ 組合せ最適化問題（設備容量変数）+ 制約つき非線型最適化問題（運用状態変数）と捉える。

5.2 アルゴリズム 図 5 に設備容量変数離散化による設備容量と運用状態の最適化のアルゴリズムを示す[†]。ここでは、単純な近傍探索の手法である最急勾配法を用いる。現在の解の近傍は、1 つの FACTS 機器の設備容量を単位量増減させたものとする。この処理を、図 1 中の部分に挿入することになる。つまり、タブサーチ（設置位置変数）+ 最急勾配法（設備容量変数）+ SQP 法（運用状態変数）によって解を得る。

5.3 5 機 42 ブランチ系統でのシミュレーション シミュレーションに用いる 5 機 42 ブランチ系統を図 6 に示す。このモデル系統は、文献⁽⁶⁾ に示されている系統に手を加えたものである。負荷断面については、図 7 に示す 3 つ（基本状態：1、重潮流状態：2、負荷の偏った重潮流状態：3）を考えることにする。それぞれ、初期状態におけるボトルネックは異なっている。以下のシミュレーションでは、FACTS 機器の緊急制御を考慮し、Return の下限については考慮しない。

まず、比較のため、負荷断面 1~3 それぞれについて、前節までの方法（図 1）で、最適な設置状態を探索した結果を表 6、7、8 に示す。タブレングスは 3 とした。各負荷断面ごとに潮流状態、ボトルネックが異なるため、得られた

[†]初期解としては、個別の負荷断面ごとに ROI を最大化し、各 FACTS 機器ごとに各負荷断面での設備容量の重み和をとった値を用いる。

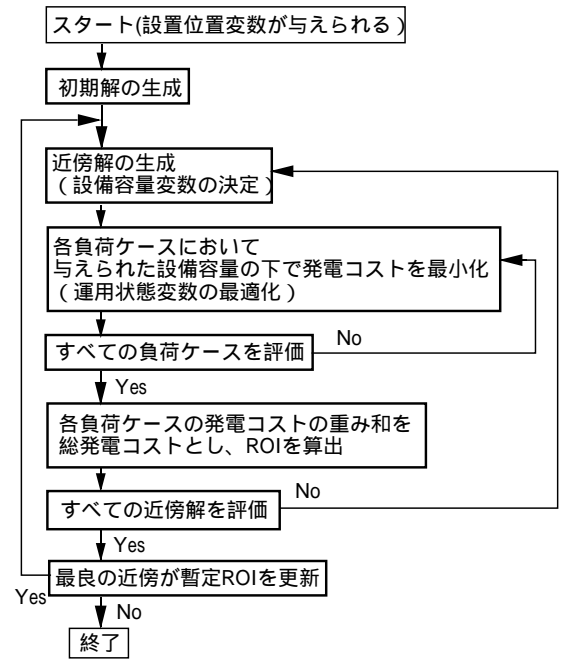


図 5 最急勾配法による設備容量の探索

Fig.5. Search of capacity of FACTS apparatus

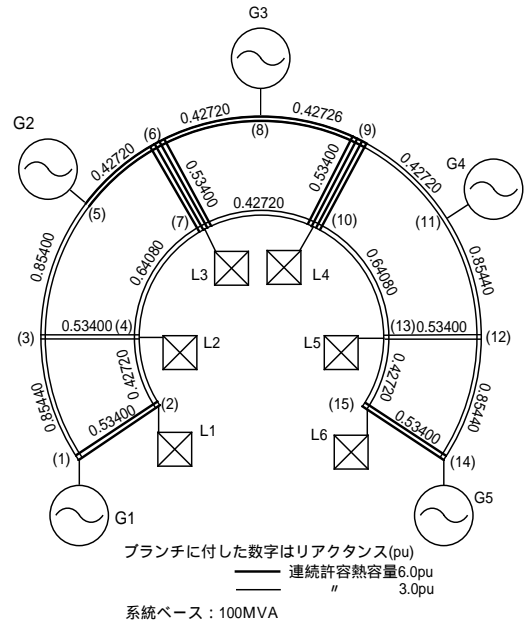


図 6 5 機系統のリアクタンスマップ

Fig.6. Reactance map of 5-generator model system

解も異なっている。

次に、本節で述べた方法により、負荷断面 1~3 を同時に考慮して探索した結果を表 9 に示す。負荷断面 1, 2, 3 の重みは、それぞれ 0.5, 0.2, 0.3 とした。また、タブレングスは計算時間が長くなることから、2 と小さく設定した。

その結果、最も良い設置案は、負荷断面 1, 2 (表 6、表 7) でも 1 位であった 4-7 に移相器を設置する案であった。全般に、負荷断面 2 の Return が大きいためその影響が大

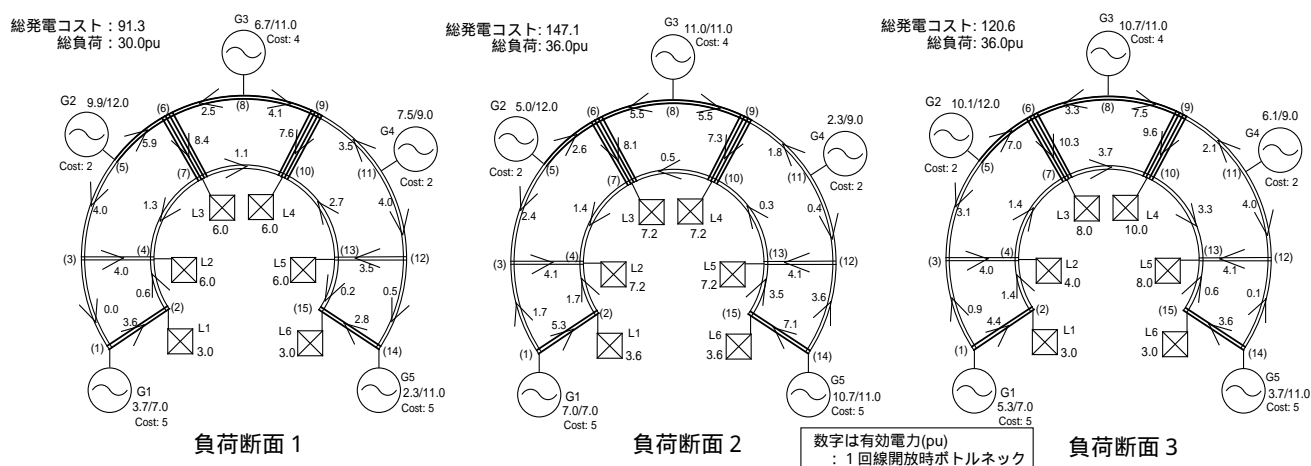


図 7 5 機系統の各負荷断面における初期潮流状態

Fig. 7. Initial power flow under each load condition

きく、負荷断面 2 における上位の解が多く現れている。しかし、第 2 位の解は、負荷断面 2 の Return は他と比較して大きくないが、負荷断面 3 の Return が大きい。また、第 6, 7, 8 位は、効果的な 4-7 に移相器を設置し、さらに系統の右側の 10-13 や 9-11 に FACTS 機器を設置する組み合わせとなっており、負荷断面 1, 3 に対する対策が付加されることが窺える。こういった結果から、例えば、まず、4-7 に移相器を設置し、必要ならば 10-13 や 9-11 に FACTS 機器を設置するという具体的な系統計画案が浮かび上がってくる。

このように、複数の負荷断面を考慮することで、より妥当性の高い解が得られていると言えるだろう。もちろん、取り上げる負荷断面とその重みにより得られる解がある程度変化するが、この変化の少ない解を選ぶことも重要であろう。用いる予測・近似と得られる解を見て良さそうな設置案を選ぶ作業は、設備計画者の判断に委ねられることになるが、ここでは、これ以上立ち入らない。

なお、計算時間は 450 分と長かった。これは、単純に考慮する負荷断面数が増えたことに加え、設備容量の離散化による影響が大きい。

6. おわりに

本論文では、送電線の過負荷を解消し送電能力を向上させる直列コンデンサ、移相器という 2 つの FACTS 機器の設置位置およびその設備容量を経済的な観点から最適化するモデルを示した。解法としては、非線形計画法の手法である SQP 法とタブサーチを併用し、複数の解を効率的に提示することができた。

また、事故時に状況に応じて FACTS 機器を緊急制御することで、FACTS 機器設置の効果が大きくなることを示した。FACTS 機器をより有効に利用するためには、緊急制御を考慮した上で設置状態を検討する必要があるといえるだろう。さらに、複数の負荷断面を考慮することで、よ

表 6 5 機系統の負荷断面 1 において得られた上位解

Table 6. Solutions under load condition 1

順位	ROI	どこに何を設置	Cost(Return)	Inv.	反復
1	1.74	4-7 に 10.67° の PS	86.0(5.2)	29942	1
2	1.41	5-6 に 0.244pu の SC	87.1(4.1)	29286	1
3	1.40	4-7 に 10.77° の PS 12-13 に 15.73° の PS	82.3(8.9)	63521	2
4	1.37	4-7 に 10.43° の PS 10-13 に 15.16° の PS	82.6(8.6)	62876	2
5	1.27	4-7 に 10.71° の PS 10-13 に 0.300pu の SC	84.5(6.8)	53169	2
6	1.25	12-13 に 15.68° の PS 5-6 に 0.243pu の SC	83.4(7.8)	62727	10
7	1.23	10-13 に 15.24° の PS 5-6 に 0.242pu の SC	83.6(7.6)	62389	12
8	1.22	4-7 に 13.78° の PS 4-7 に 13.78° の PS	83.4(7.9)	64269	2
9	1.19	4-7 に 10.79° の PS 10-13 に 8.46° の PS 10-13 に 8.46° の PS	80.9(10.3)	86787	15
10	1.17	4-7 に 13.91° の PS 4-7 に 13.91° の PS 12-13 に 15.20° の PS	79.8(11.5)	97585	3

反復 48 で巡回のため終了。計算時間 85 分。のべ 1238 回の探索。

シミュレーション条件について

タブレングス: 3, α^{MAX} : 20°, Δx^{MAX} : 0.3p.u., I1: 20500, I2: 6.4, I3: 2.35, I4: 20500, I5: 0.1, $pcost_i (i \in N_L)$: 100, $Return^{min}$: 0(考慮しない)

短時間許容熱容量は連続許容熱容量の 120%とした。以下、同様。

り妥当性の高い解を得ることができた。

FACTS 機器の設置問題は、FACTS 機器を 1 台設置する際にはそれほど ROI の良くない設置案であっても、それらを組み合わせることで ROI が改善されることもあり、興味深い問題である。さらに、FACTS 機器の緊急制御、複数の負荷断面などを考慮すると、直観的に良い設置状態を見つけることは難しく、本研究のような効率的な探索手法は有効であろう。今後の課題としては、系統計画のツールとしての使用に耐えるよう、さらにアルゴ

表9 5機系統において負荷断面1~3を考慮して得られた上位解

Table 9. Solutions in 5-generator model system under all load condition 1,2 and 3

順位	ROI	どこに何を設置	Cost(Return)				Inv.	反復
			総合	断面1	断面2	断面3		
1	3.37	4-7に10°のPS	111.2(0.0)	91.3(0.0)	147.1(0.0)	120.6(0.0)	29470	1
2	2.85	10-13に12°のPS	102.4(8.8)	87.9(3.3)	124.9(22.2)	111.6(9.0)	30880	1
3	2.56	1-3に14°のPS	103.0(8.3)	88.2(3.1)	115.8(31.3)	119.0(1.6)	32290	1
4	2.53	3-5に9°のPS	104.0(7.3)	89.0(2.3)	120.8(26.3)	117.8(2.8)	28765	1
5	2.50	2-4に9°のPS	104.1(7.2)	88.6(2.6)	119.3(27.8)	119.6(1.1)	28765	1
6	2.42	4-7に10°のPS 10-13に8°のPS	97.3(13.9)	83.7(7.6)	114.3(32.9)	108.9(11.8)	57530	2
7	2.39	4-7に10°のPS 10-13に0.300puのSC	98.7(12.6)	84.6(6.7)	115.6(31.5)	110.9(9.8)	52670	2
8	2.29	4-7に10°のPS 9-11に0.270puのSC	99.2(12.0)	85.3(5.9)	116.2(30.9)	111.1(9.5)	52400	2
9	2.28	11-12に7°のPS	105.0(6.2)	90.4(0.8)	127.4(19.7)	114.3(6.3)	27355	1
10	2.27	5-6に0.300puのSC	104.1(7.1)	87.1(4.1)	122.6(24.5)	120.2(0.5)	31300	1

反復16で巡回のため終了。計算時間450分。のべ412回の探索。

シミュレーション条件について: タプレングス: 2, 負荷断面1の重み: 0.5, 負荷断面2の重み: 0.2, 負荷断面3の重み: 0.3, PSの最大移相角: 1°きざみ, SCの最大容量: 0.015p.u.きざみ。その他は表6参照。

表7 5機系統の負荷断面2において得られた上位解

Table 7. Solutions under load condition 2

順位	ROI	どこに何を設置	Cost(Return)	Inv.	反復
1	9.96	4-7に9.44°のPS	118.1(29.0)	29075	1
2	9.70	1-3に13.42°のPS	116.2(30.9)	31884	1
3	9.65	2-4に9.11°のPS	119.3(27.8)	28844	1
4	9.18	3-5に8.52°のPS	121.0(26.1)	28424	1
5	7.99	1-2に0.300puのSC	122.1(25.0)	31300	1
6	7.84	5-6に0.300puのSC	122.6(24.5)	31300	1
7	7.76	5-6に9.57°のPS	117.7(29.4)	37832	1
8	7.65	1-2に7.42°のPS	120.5(26.6)	34801	1
9	7.21	10-13に6.31°のPS	127.7(19.4)	26870	1
10	7.21	11-12に6.31°のPS	127.7(19.4)	26870	1

反復28で巡回のため終了。計算時間27分。のべ657回の探索。

表8 5機系統の負荷断面3において得られた上位解

Table 8. Solutions under load condition 3

順位	ROI	どこに何を設置	Cost(Return)	Inv.	反復
1	3.05	10-13に7.38°のPS	112.2(8.4)	27621	1
2	2.84	10-13に0.300puのSC	114.0(6.6)	23200	1
3	2.79	9-11に0.276puのSC	114.2(6.4)	22986	1
4	2.49	9-11に4.75°のPS	114.2(6.4)	25768	1
5	2.40	13-15に5.23°のPS	114.4(6.3)	26105	1
6	2.40	12-14に5.23°のPS	114.4(6.3)	26105	1
7	2.34	11-12に7.40°のPS	114.2(6.5)	27636	1
8	2.06	4-7に13.11°のPS 10-13に8.00°のPS	108.3(12.3)	59719	2
9	2.01	14-15に0.270puのSC	114.6(6.1)	30235	1
10	1.98	14-15に5.23°のPS	114.4(6.3)	31710	1

反復25で巡回のため終了。計算時間55分。のべ623回の探索。

リズムの高速化を図ることや、送電線の拡充を含めた検討などが挙げられる。

(平成年月日受付, 同年月日再受付)

文 献

- (1) P.Paterni, S.Vitet, A.Giard, M.Bena and A.Yokoyama: "Optimal Set of Phase Shifters for Avoiding Thermal Constraints using Genetic Algorithm", ICEE-97, A-03 (1997)
- (2) P.Paterni, S.Vitet, M.Bena and A.Yokoyama: "Optimal Location of Phase Shifters in the French Network by Genetic Algorithm", IEEE PES SM, PE-078-PWRS-0-04-1998 (1998)
- (3) 松尾, 横山: 電力系統設備計画における送電網の過負荷解消のためのFACTS機器設置の最適化手法, 平成11年電気学会B部門大会, 28 (1999)
- (4) 伊理正夫, 今野浩, 刀根薫: 最適化ハンドブック, 朝倉書店 (1995)
- (5) 「新しい電力システム計画手法」, 電気学会技術報告 第647号 (1997)
- (6) 河田, 菅沼, 北内, 森岡: 「電力系統の基幹系標準システムモデル」, 電力系統技術研究会, PSE-98-3 (1999)

松尾 豊 (正員) 昭和50年1月26日生。平成9年3月

東京大学工学部電子情報工学科卒業。11年3月同
大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修
了。現在同大学院博士課程在学中。

横山 明彦 (正員) 昭和31年10月9日生。59年3月東京

大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修
了。工学博士。同年4月同大学工学部電気工
学科助手, 60年同講師, 平成元年同助教授, 現在
に至る。62年2月~平成元年2月テキサス大学
アーリントン校客員研究員, この間63年2月~
63年12月カリフォルニア大学バークレー校客員
研究員。主に電力システム工学の研究に従事。計
測自動制御学会, 日本応用数理学会, IEEE, CIGRE 会員。