多数のループを含む電力系統における位相調整器による 効率良い潮流制御法に関する検討

正員 佐藤 正弘* 学生員 長谷川 知史*

A New Approach for Computing Phase Shifter Angle for Load Flow Control in the Network with Multi-loops

Masahiro Sato*, Member, Tomofumi Hasegawa*, Student Member

Phase shifter has been used to control line flow. In the network with multiple loops, it is necessary to modify the angle of phase shifter to reduce the flow on a certain line if it exceeds the limit. A new method to compute the value of the angle that is set to the phase shifter is proposed. A coefficient is computed by using two relations. The one is between the change of line flow on a certain line and the modification of power injection at two nodes. The other is between the change of flow on a line and the change of angle of phase shifter. Then the phase angle is computed by multiplying the coefficient and the amount of flow on the line. The coefficients can be used for finding the locations where phase shifters will be placed in order to correct overload that may occur at any line in the loops and can be used for computation of available transmission capacity. The validity of this method was shown by numerical examples using IEEE 30 bus system.

キーワード：電力系統，位相調整器，制御角，過負荷，設置線路，可能送電電力

Keywords: electric power systems, phase shifter, phase angle, overload, placement, available transmission capacity

1. まえがき

自由化の進展に伴い電力会社以外の発電会社と需要家間の取引が増加すると，電力会社が計画した時点では想定していない潮流の分布が現われ，想定外の線路に過負荷の発生することが危惧されている⁽¹⁾。対策のために潮流制御の重要性が認識され位相調整器が広く検討されている^{(2)~(9)}。

図1のIEEE30母線系統⁽¹⁰⁾のように多数のループを含む電力系統において，位相調整器の制御角を変化させれば潮流が各線路に分流する。本論文は，最初に位相調整器を線路 β に設置すると想定した場合，任意の線路 α の潮流を ΔF だけ制御するために必要な制御角 $\Delta\theta$ を直接算出するための係数 K とその計算アルゴリズムを提案する。以下，係数 K を位相角調整係数と呼ぶ。

従来，位相調整器の制御角の変化が，線路潮流の変化に及ぼす影響を扱う感度解析は文献(14)などに述べられている。しかし，多数のループを含む系統における線路潮流を制御するために必要な位相調整器の制御角を直接に計算する方法は提案されていない。

図1 IEEE 30 母線系統

Fig. 1. IEEE 30 bus test system.

本論文で提案する方法は，ノード注入電力とそれが特定のループ内の線路に分流する潮流との関係，そして2つのノード注入電力と線路潮流の関係，さらに位相調整器の制御角とノード注入電力の変化分との関係という3つの関係を組み合わせて位相角調整係数を計算するものである。

次に，位相角調整係数 K を利用することによって得られる長所を2つ示す。1つは，想定外の線路に過負荷が発生

* 日本大学 生産工学部
〒275-8575 習志野市泉町 1-2-1
College of Industrial Technology, Nihon University
1-2-1, Izumi-cho, Narashino 275-8575

することが危惧されているので、全ての線路の過負荷に対処するための方法として、複数の位相調整器を適切な線路に設置する方法が考えられる。そこで、位相角調整係数 K を用いれば、ある線路に設置した位相調整器によって、効果的に潮流を制御できる線路の特定が可能であるという性質を利用し、できるだけ小容量の位相調整器をできるだけ少数台設置するような線路の選定方法を提案する。

2つ目は、係数 K の送電電力を最大化する方法への適用である。送電設備を増強するのは経済的負担が大きいため、現有の設備のままで送電可能な電力を増大しようとする要求⁽²⁾⁽³⁾⁽⁹⁾がある。以下、この電力のことを可能送電電力(ATC)と称する。送電電力を増加するにつれ過負荷が発生するので、過負荷を解消しつつ ATC を最大化する計算にも利用できる事を示す。

第2章では、位相角調整係数 K とその導出方法⁽¹²⁾を示す。

第3章では、複数の位相調整器を設置する線路を選択するための指標と選択の方法を示す。さらに第4章では、過負荷を解消しつつ ATC を増大する方法⁽¹³⁾を示す。

2. 位相角調整係数とその導出法

位相調整器を用いた潮流制御に関しては、交直併用系統において連系潮流を一定に保つための制御方法⁽⁷⁾、位相調整器の配置の仕方と潮流の制御可能領域の差異を比較する方法⁽⁸⁾などが提案されている。また、発電機出力の調整により過負荷を解消する場合、過負荷解消係数⁽¹¹⁾が用いられる。

単一ループの系統であれば、ループ内に発生した過負荷を解消するために必要な位相調整器の制御角は容易に求められる⁽¹⁴⁾。しかし、多数のループが内在する電力系統においては、任意の線路に発生した過負荷を解消するために必要な位相調整器の制御角を決定するのは容易ではない。

そこで、任意のループの線路に生ずる潮流の過負荷分 ΔF を解消するために必要な位相調整器の制御角 $\Delta\theta$ を求めるための位相角調整係数 K を新たに導入する。この係数を用いれば、多数のループを内在する電力系統において、過負荷を解消するための制御角 $\Delta\theta$ を過負荷分 ΔF と係数 K の積として直接計算できる⁽¹²⁾。

〈2・1〉電力分流係数 最初にノード注入電力と線路潮流の間の関係を述べる。図2に示すようにノード N に注入した電力 $\Delta \dot{S}_N$ が、ノード i とノード j の間の線路 α に分流する電力を $\Delta \dot{F}_\alpha$ とした場合、電力分流係数 $\dot{D}_{\alpha N}$ は $\Delta \dot{S}_N$ と $\Delta \dot{F}_\alpha$ との比として(1)式の様に求められる⁽¹¹⁾。ここで、図2において、ノード N の母線電圧を $\dot{V}_N$ 、ノード N に注入する電流を $\dot{C}_N$ とし、線路 α のインピーダンスを $\dot{z}_\alpha$ とする。ここで、 $\Delta \dot{S}_N$ 、 $\Delta \dot{F}_\alpha$ 、 $\dot{V}_N$ 、 $\dot{C}_N$ 、 $\dot{z}_\alpha$ 、 $\dot{D}_{\alpha N}$ は複素数であり、上部の点は複素数、右上の*は共役複素数を示す。

$$\begin{aligned} \dot{D}_{\alpha N} &= \Delta \dot{F}_\alpha / \Delta \dot{S}_N \\ &= \partial [\dot{V}_i (\dot{V}_i - \dot{V}_j) / \dot{z}_\alpha] / \partial (\dot{V}_N \cdot \dot{C}_N^*) \cdots (1) \end{aligned}$$

図2 ノード注入電力と分流する線路潮流

Fig. 2. Node injection and line flow.

図3 ノード注入電力による線路潮流の制御

Fig. 3. Control of line flow due to adjustment of node injection.

ここで、ノード電圧がほぼ1.0である場合、 $\dot{D}_{\alpha N}$ は近似的に次式⁽¹¹⁾となる。

$$\begin{aligned} \dot{D}_{\alpha N} &= (1/\dot{z}_\alpha) * [(\partial \dot{V}_i / \partial \dot{C}_N) - (\partial \dot{V}_j / \partial \dot{C}_N)] * \\ &= [(\dot{Z}_{iN} - \dot{Z}_{jN}) / \dot{z}_\alpha] * \cdots \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

この式で $\partial \dot{V}_i / \partial \dot{C}_N$ はノード i とノード N の間の遷移インピーダンス $\dot{Z}_{iN}$ である。ノード N に注入した電力が、線路 α に分流する潮流は、線路 α のインピーダンス $\dot{z}_\alpha$ と、ノード i とノード N の間の遷移インピーダンス $\dot{Z}_{iN}$ 、およびノード j とノード N 間の遷移インピーダンス $\dot{Z}_{jN}$ から求められることを示している。

ここで、線路の抵抗がリアクタンスに比べて小さいので無視すると(2)式の電力分流係数は次式の実数となる。

$$\dot{D}_{\alpha N} = (X_{iN} - X_{jN}) / b_\alpha \cdots \cdots \cdots (3)$$

ただし、 b_α は線路インピーダンスのリアクタンス分である。以下、抵抗を無視して説明する。

〈2・2〉過負荷解消法 次に電力分流係数を用いて過負荷を解消する計算手順を示す。図3において、線路 α の過負荷量を ΔF_α とする。これを解消するために、ノード N とノード K に電力をそれぞれ ΔP_N 、 ΔP_K だけ注入する。これはノード N とノード K に発電機を接続し、その出力を調整する場合と等価である。

過負荷を解消するにはノード N とノード K の発電機の出力をそれぞれ ΔP_N 、 ΔP_K だけ変化させて線路 α に逆方向の潮流 ($-\Delta F_\alpha$) を分流させればよい。このとき、ノード注入電力と線路潮流の間には(4)、(5)式が成立する。

図4 位相調整器の制御角と線路潮流

Fig. 4. Change of flow due to shifter.

$$(-\Delta F_\alpha) = D_{\alpha N} \cdot \Delta P_N + D_{\alpha K} \cdot \Delta P_K \quad (4)$$

$$\Delta P_N + \Delta P_K = 0 \quad (5)$$

従って、(4)、(5)式から、 ΔP_N と ΔF_α の関係式

$$\begin{aligned} \Delta P_N &= [-1/(D_{\alpha N} - D_{\alpha K})] \cdot \Delta F_\alpha \\ &= C_{NK} \cdot \Delta F_\alpha \quad (6) \end{aligned}$$

が成立する。この関係は、過負荷量 ΔF_α を解消するには、 ΔF_α を C_{NK} 倍した ΔP_N をノードNに注入し、その同量分をノードKから取り出せばよいことを示す。ここで、 C_{NK} は過負荷解消係数である。

〈2・3〉位相調整器によるループ潮流制御 次に、図4に示すように、位相調整器をノードSとノードRの間の線路 β に設置する場合を考える。まず、位相調整器を接続する両端を開放し、その開放端から系統を見たインピーダンスを X_L とする。この時位相調整器の制御角を $\Delta\theta$ 変化させた場合、線路 β に流れる潮流の変化分 ΔP_L は(7)式で求められる⁽¹⁴⁾。

$$\Delta P_L = \Delta\theta_\beta / X_L \quad (7)$$

ここで、 X_L はノードS、Rから系統を見たインピーダンス X_d と線路 β のインピーダンス X_b の和となる。

$$X_L = X_d + X_b \quad (8)$$

ここで X_L 、 X_d 、 X_b はリアクタンスであり実数となる。また、位相調整器は漏れリアクタンスがゼロの理想移相器を想定した。

〈2・4〉位相調整器の制御角の決定 図5(a)に示すように、ある線路 α に発生した過負荷 ΔF_α を、線路 β に設置した位相調整器の制御角を $\Delta\theta_\beta$ 分だけ調整することにより解消する場合、 ΔF_α から $\Delta\theta_\beta$ を計算するための係数を導く。係数は、〈2・1〉節に示した電力分流係数を用い、〈2・2〉節に述べた方法と〈2・3〉節に述べた方法を組み合わせて以下の考え方で導く。

まず、図5(b)に示すように、線路 β を開放して、ノードNに電力 ΔP_N を注入し、もう一方のノードKから同量の電力を取り出すことにより、過負荷分に等しい逆向きの潮流($-\Delta F_\alpha$)を流し、過負荷を解消する。

ここで、一方のノードに電力を注入し、もう一方から取

図5 位相調整器による線路潮流制御

Fig. 5. Flow control by phase shifter.

り出すことは、図5(c)に示すように線路 β に位相調整器を設置して、制御角を調整することによって、注入電力を ΔP_L だけ変化させることと等価である。この関係を利用して関係式を導く。ノードNに注入する電力 ΔP_N と位相調整器が制御する電力 ΔP_L は等しいので、

$$\Delta P_L = \Delta P_N \quad (9)$$

となる。従って(6)、(7)、(9)式から

$$C_{NK} \cdot \Delta F_\alpha = \Delta\theta_\beta / X_L \quad (10)$$

が成立する。これから(11)式が得られる。

$$\Delta\theta_\beta = X_L \cdot C_{NK} \cdot \Delta F_\alpha = K_{\beta\alpha} \cdot \Delta F_\alpha \quad (11)$$

この式は、線路 α の過負荷 ΔF_α を解消するために設定す

べき位相調整器の制御角の値 $\Delta\theta_\beta$ は、 X_L と過負荷解消係数 C_{NK} から計算できることを示す。

係数 $K_{\beta\alpha} = X_L \cdot C_{NK}$ が位相角調整係数である。この位相角調整係数

$$K_{\beta\alpha} = X_L \cdot C_{NK} = -X_L / (D_{\alpha N} - D_{\alpha K}) \cdots (12)$$

はインピーダンスのみから計算できる値であり、系統構成が決まれば一律に求まる。 $K_{\beta\alpha}$ は実数となる。

〈2・5〉 制御角を求める計算手順 位相角調整係数は、線路抵抗を無視して求めたので近似値が得られる。そこで高精度な解を得るため、次の手順に従って計算する。

- ステップ① 交流法潮流計算の実行と過負荷の検出。
- ステップ② 位相調整器を設置する線路を開放した系統構成でインピーダンス X_d の計算と (3), (6) 式による係数 $D_{\alpha N}$, C_{NK} の計算。
- ステップ③ 駆動点インピーダンス X_L の計算と位相角調整係数 $K_{\beta\alpha}$ の計算。
- ステップ④ (11) 式による制御角 $\Delta\theta_\beta$ の計算
- ステップ⑤ 位相調整器の制御角 $\Delta\theta_\beta$ の設定と交流潮流計算の実施。
- ステップ⑥ 過負荷の検出。
- ステップ⑦ 過負荷があればステップ④に戻る。過負荷が解消すれば終了する。

3. 位相調整器の設置線路の選択

前述のように、自由化の進展に伴い電力会社以外の会社間の電力売買が増加すると、電力会社が計画した時点では想定していないような潮流の分布が現われ、想定外の線路に過負荷が発生することが危惧されている⁽¹⁾。位相調整器の設置線路を決定するために、経験に基づく方法や、遺伝アルゴリズムを用いる方法⁽⁹⁾が提案されている。

本論文では、すべての線路に発生する過負荷に対処するための方法として、複数の位相調整器を適切な線路に設置することが一つの方法であると考え、位相角調整係数 K を用いた設置線路の選択法を提案する。

〈3・1〉 潮流制御可能な範囲 線路 α の潮流を、線路 β に設置した位相調整器で制御する場合を想定する。位相角調整係数 $K_{\beta\alpha}$ は (11) 式の定義が示すように、線路 α の潮流を単位量だけ制御するのに必要な位相調整器の制御角である。値 $K_{\beta\alpha}$ が小さいならば、線路 α の潮流は容易に制御できることを示す。したがって、位相調整器を線路 β に設置したと想定し、各線路 i との間の係数 $K_{\beta i}$ を計算し、指定値 θ 以下の線路を選択すれば、系統内の潮流制御が可能な範囲を把握できることになる。ここで、 θ には例えば 20 度を換算した 0.349 [rad] を指定する。

〈3・2〉 設置線路の選択 複数の位相調整器を設置する場合の線路の選択方法を示す。位相調整器を設置する線路の選定に関して 2 つの場合が考えられる。

一つは既に位相調整器が設置されている場合である。残

図 6 位相調整器の設置手順

Fig. 6. Processes of selecting lines for phase shifter.

りの位相調整器を設置する線路選定に本方法が適用できる。

もう一つは位相調整器が 1 台も設置されていない場合である。この場合は、最初の 1 台目は位相角調整係数 K を用い、 K^2 の値が最小になるような線路を選択することが考えられる。ここで、 K は正負の値があるので K^2 を用いた。

位相調整器の容量を小さくする事も重要であり、(13) 式のように制御角と熱的電流容量 I_{max} の積を指標とし用いる⁽⁹⁾ことも考えられる。ただし、以降簡単のために全線路の熱的電流容量は等しいものと仮定し、制御角のみを用いて進める。

$$K^2 * I_{max} \cdots \cdots (13)$$

次に、図 6(a) を用いて、制御可能な線路同士をグループ化する方法を述べる。最初の位相調整器 #1 は線路 A に設置されていると想定する。まず、各線路 i の潮流との間の位相角調整係数 K_{ai} を計算する。次に、 K_{ai} がある値以内となる線路を選択しグループ 1 とする。図 6(a) の実線で囲まれた領域内の線路がグループ 1 に属する。

2 台目の位相調整器 #2 は、位相調整器 #1 による潮流の制御が系統内で最も困難な線路に設置する。そのために、線路 A と各線路 i との間の係数 K_{ai} を用いた K_{ai}^2 を計算し、 K_{ai}^2 の値が最大となる線路、例えば線路 B を選択する。線路 B に位相調整器 #2 を設置したと想定し係数 K_{bi} を計算し、グループ 1 と同様に線路を選択しグループ 2 とする。

さらに、3台目の位相調整器#3は、線路Aと線路Bに設置した位相調整器による潮流の制御効果が最も小さい線路として指標 $K_{ai}^2 + K_{bi}^2$ が最大となる線路iに設置する。

以下同様にして、位相調整器が設置される線路をjとすると、(N+1)個目の位相調整器を設置する線路は次式で計算した指標 L_j が最大になる線路jを選択する。

$$L_j = \sum_i K_{ij}^2 \dots \dots \dots (14)$$

この過程を経て位相調整器の設置線路を選択する。図6(a)の各破線に囲まれた領域内の線路は、各位相調整器によって制御可能な線路のグループを構成する。

〈3・3〉グループの再構成 以上の選択過程では、図6(a)の2つの実線と破線で囲まれた領域内の線路は複数のグループに所属する。この場合、これらの線路は、潮流制御の効果の大きい方、すなわち K_{ij}^2 の小さい方のグループに所属するよう修正する。

〈3・4〉設置線路の再選定 グループ内の線路の中で設置線路を再度選定しなおすことによって位相調整器の容量を小さくすることが可能である。例えば、図6(b)の様に線路1, 2, 3がグループを構成するものと想定する。位相調整器を線路1に設置し、線路1, 2, 3の潮流を単位量制御するための制御角は各々 K_{11} , K_{12} , K_{13} となるので、絶対値が最大の値を選択し指標 $K_{1\max}$ とする。これは位相調整器の制御角の所要位相角を示し、位相調整器の所要設備量に比例する⁽⁹⁾。同様に、線路2に設置する場合も、 K_{21} , K_{22} , K_{23} の絶対値が最大の値を $K_{2\max}$ とする。このように、位相調整器を線路1, 2, 3に設置すると想定して指標 $K_{1\max}$, $K_{2\max}$, $K_{3\max}$ を求め、指標の絶対値が最小となる線路を設置線路とする。この結果、より少ない容量の位相調整器を選択できる。

一般的には、位相調整器をグループ内の各線路iに設置すると想定し、線路jとの間の係数 K_{ij} を計算して、その内の絶対値が最大の値を選択して、指標 $K_{i\max}$ とする。このように、各線路ごとの $K_{i\max}$ の中から最小値を選び、最小値となる線路を位相調整器の設置線路と決定する。

以上のようにグループ内の設置線路の再選択を行うと、〈3・3〉節で述べた両方のグループに所属する線路が新たに生じる可能性があるため、グループの再構成を行う。この設置線路の再選定と、グループの再構成を繰り返す。この結果、図6(c)の黒丸で表した最初に選択された各位相調整器の設置線路は再選択後の白丸の線路に変化する。また、各グループに所属する線路は図6(a)の実線の領域から図6(c)の破線で囲まれる領域に変化する。これを繰り返すことにより、図6(c)の例では、位相調整器#5の領域内の線路は、周辺の位相調整器により制御できるようになるので不要となる場合があり、位相調整器の台数が減少しうる。

〈3・5〉計算手順 計算手順をまとめ、以下に示す。なお、これまでは過負荷が系統内の全ての線路に発生することを想定したが、系統内の一部の線路に発生する場合にも

適用できる。

- Step 1: K_i の計算
- Step 2: K_i^2 が最小となる線路、例えば線路Aを選択。
- Step 3: 線路Aに設置した位相調整器により潮流制御可能な線路をすべて選択しグループ1とする ($|K_{Aj}|$ がある値以下になる線路jを選択する)。
- Step 4: 設置した線路Aから見た係数 K_{Aj}^2 を計算し、最大値となる線路Bを選択する。線路Bに設置した位相調整器により潮流制御可能な線路を選択しグループ2とする。
- Step 5: 同様に、全ての線路がいずれかのグループに所属するまで繰り返す。
- Step 6: 複数のグループに所属する線路を K_{ij}^2 の小さい方に所属させるようにグループを再構成する。
- Step 7: 各線路に位相調整器を設置したと想定し、過負荷解消に必要な最大の制御角を計算する。その中で制御角が最も小さくなる線路を求め位相調整器の設置線路とする。
- Step 8: Step 6に戻りグループの再構成を繰り返す。全ての線路がいずれかのグループに分類され、設置線路の組み合わせに変化が無くなれば終了する。

4. 可能送電電力(ATC)の増大

次に、位相角調整係数Kを利用する例として、複数の位相調整器によるATCを増大する方法を示す。現状の送電設備のままで送電電力を増加した時に一カ所でも過負荷が生ずれば、たとえ他の送電線は熱容量や安定度などの制約面から見て余裕がある場合でも、それ以上の送電は不可能となる。このような場合、位相調整器を設置し過負荷を解消すれば送電電力を増大することが可能である。

まず、過負荷の発生する線路数をm、位相調整器を設置する線路数をnとする。次に、 $\Delta\theta$ は各位相調整器の制御角の変化分を成分とする列ベクトルとし、 ΔF は過負荷分 Δf_i を成分とする列ベクトルであるとする。

$$\Delta F = (\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_m),$$

$$\Delta\theta = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_n)$$

各位相調整器の制御角を $\Delta\theta_j$ 変化させたときの線路潮流の変化分 Δf_i は、係数Kを利用することにより(15)式のように、 $\Delta\theta_j$ の関数として表現できる。位相角調整係数 K_{ij} の逆数を $h_{ij} = 1/K_{ij}$ とおくと、

$$\Delta f_i = h_{i1}\Delta\theta_1 + h_{i2}\Delta\theta_2 + \dots + h_{in}\Delta\theta_n \dots \dots (15)$$

と表すことができ、まとめると(16)式で表せる。

$$\Delta f_i = \sum (1/K_{ij})\Delta\theta_j \dots \dots \dots (16)$$

次に、過負荷を解消するために重畳する潮流分として $\Delta F = (-\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_m)$ とすると、内積 $\Delta F(\Delta F)^T$ をゼロもしくは最小化する定式化を行えば、一般化逆行列⁽¹⁵⁾

により (17) 式を用いて各位相調整器の制御角 $\Delta\theta$ を計算できる。なお、この式は過負荷の線路が位相調整器よりも少ない場合、すなわち m が n より小さい場合を想定している。

$$\Delta\theta = H^T(HH^T)^{-1}\Delta F \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 H は h_{ij} を成分とする行列である。

計算の流れをまとめると次のようになる。

ステップ① 位相角調整係数 K_{ij} の計算。

ステップ② 潮流計算の実施。

ステップ③ 過負荷の検出。

過負荷がなければ終了。

過負荷があればステップ④に進む。

ステップ④ 過負荷を解消する位相調整器の制御角の計算。

制御量が制限幅以上ならば制限値にする。

ステップ⑤ 位相調整器の制御角を設定しステップ②に戻る。

ただし、ステップ③において、制限値以内となる線路の過負荷量はゼロとする。例えば、 $\Delta f_k < 0$ ならば $\Delta f_k = 0$ と設定する。

5. シミュレーションによる有効性の確認

図 1 の IEEE30 母線系統を用いて提案した手法の有効性を確認した。番号は丸の中のノード番号と線路番号である。ノード番号 1 と 30 は、発電機である。

〈5・1〉 制御角計算の精度 位相角調整係数 K による制御角計算の精度と、係数 K を過負荷解消に用いることが有効であることを確認した。ここでは線路 9 に 0.08PU の過負荷が発生する場合を想定した。

表 1 に位相調整器を設置した各線路番号ごとに、(12) 式で計算した位相角調整係数 K 、さらに線路 9 の過負荷 0.08PU を解消するために、(11) 式を用いて計算した位相調整器の制御角 $\Delta\theta$ を初期値の欄に示した。

線路 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 に設置すれば係数 K は小さい値となり、初期値と収束値がほぼ一致した値である。(11) 式により計算した制御角は、直流法の計算としては妥当な精度であることを確認した。一方線路 10, 12 などは過負荷個所に近い線路であるが、係数 K は大きな値となり、制御角も大きな値となることを意味している。潮流計算は収束しない。

〈5・2〉 位相調整器設置線路の選定法の確認 ここでは各線路の熱的電流容量は等しいと仮定した。提案した位相調整器を設置する線路の選択法の有効性を示す。

(1) 本例における位相調整器の設置線路の選択過程を表 2 に示す。選択過程 1 における位相調整器の設置線路は、〈3・5〉節の Step 1 から Step 5 の手順に従い (14) 式の指標を用いて選択した結果であり、5 台の位相調整器が選択されている。全ての線路はいずれかのグループに所属した。

表 1 位相角調整係数と過負荷解消

Table 1. Coefficient K and controllability of flow.

Branch	Coefficient K		Initial val. Converged val.		Itr
	[PU]	[deg.]	[deg.]	[deg.]	
1	2.20	10.29	10.65		2
2	-2.27	-10.36	-10.65		2
3	1.41	6.43	6.67		2
4	2.262	10.34	10.65		2
5	-0.464	-2.12	-2.29		3
6	1.049	4.80	5.03		3
7	0.919	4.21	4.43		3
8	-0.470	-2.16	-2.29		3
10	-137.158	-628.69	No convergence		
11	-25.913	-120.28	No convergence		
12	-47.573	-220.79	No convergence		
14	-26.798	-124.36	No convergence		
15	13.274	61.17	No convergence		
21	30.0	142.59	No convergence		
22	51.243	236.75	No convergence		
30	45.410	208.387	No convergence		

表 2 位相調整器の選択過程

Table 2. Phase shifters selected in each step.

Process	Lines where shifters are set				
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
1	7	10	17	28	33
2	7	10	17	27	-
3	7	10	17	31	-
4	7	10	17	31	-

次に、選択過程 2 以降の各過程の結果は、Step 6 から Step 8 の選択手順で得られた設置線路である。選択過程 2 では、グループ 5 の位相調整器の設置線路 33 が消え、4 グループに減少している。これは、選択過程 2 においてグループ 4 の位相調整器の設置線路が線路 27 に置き換わったために、制御可能な線路が 1 つのグループにまとまった結果である。さらに、選択過程 3 において、グループ 4 の位相調整器の設置線路は線路 27 から線路 31 に置き換わる。これは、グループ 4 の線路の中で、単位量の潮流を制御するのに必要な最大の制御角 (所要位相角) は、線路 31 に設置する場合に最小となるためである。

このことを、表 3 に示したグループ 4 の各線路の潮流制御に必要な制御角を用いて具体的に示す。位相調整器を線路 27 に設置した場合は、線路 33 の潮流を単位量制御するのに制御角 18.1 を必要とする。これが所要位相角である。表 3 の * は潮流制御に必要な制御角の最大値を示す。線路 31 に設置する場合、線路 33 の潮流制御に必要な制御角が最大値 10.4 となる。表 3 から、位相調整器を線路 31 に設置すれば所要位相角は最小になることが分かる。

表3 設置線路と制御角 (単位 [PU])

Table 3. Branch for phase shifter placement and maximum phase angles required.

		Lines included in group 4								
		27	28	29	30	31	32	33	35	36
Lines where shifter is set	27	1.2	1.5	1.2	10.3	6.6	10.3	*18.1	18.0	16.8
	28	1.5	1.3	1.5	15.9	10.1	16.0	*27.9	27.7	26.1
	29	1.2	1.5	1.2	10.4	6.6	10.4	*18.3	18.2	17.0
	30	9.7	14.7	9.7	4.6	5.8	4.6	*21.4	21.2	19.5
	31	6.3	9.5	6.3	6.0	3.8	6.0	*10.4	10.4	9.8
	32	10.3	15.7	10.3	4.9	6.2	4.9	*22.8	22.6	20.8
	33	17.6	*26.7	17.6	22.0	10.6	22.0	7.1	7.1	7.1
	35	16.4	*25.0	16.4	20.6	9.9	20.6	6.7	6.7	6.7
	36	15.4	*23.5	15.4	19.3	9.3	19.3	6.3	6.3	6.3

選択過程4において、全てのグループにおける設置線路に変化がない。最終的な位相調整器の設置線路が求まったことになる。このとき、位相調整器の設置線路7, 10, 17, 31が選択され、合計4台設置することにより系統のどの線路に過負荷が発生しても解消することが可能となる。ただし、線路13, 16, 34は放射状の線路であり、また線路37, 38, 39で構成するループは一点のみで連系しているので除外した。

表4に、選択された4台の位相調整器の各線路に対する位相角調整係数を示す。数値は、単位を(PU)で示してあり、“-”の箇所は、20PU以上の値である。

位相調整器を線路7に設置すれば、*印の付いた線路1~9, 11~15, 18, 19, 21~26, 30, 32がグループを構成し、それらの線路の潮流は、最大でも14.7の制御角で単位量制御できることが分かる。また、線路10に設置された位相調整器では線路10, 40, 41の線路がグループを構成し、最大で1.7の制御角で潮流を制御できる。同様に、線路17, 31の位相調整器では、それぞれ最大で3.8, 14.4の制御角である。

また、線路32の潮流は設置線路7の位相調整器により制御角15.6、設置線路31の位相調整器からは制御角6.0で制御できる。したがって、線路32は制御角の小さい方、線路31のグループの所属と分類する。

(2) 提案した手順に従い選択した4本の線路に位相調整器を設置すれば、位相調整器の容量の合計を減少できることを、シミュレーションで確認した。

まず、(13)式の指標が示すように位相調整器の容量は位相角調整係数に比例する。そこで複数の位相調整器について係数の和を求め、それが最小になる組み合わせを選択すれば位相調整器の容量の合計は最小となる。

本例では、全ての送電線の潮流をいずれかの位相調整器を用いて単位量制御するためには4台以上の位相調整器が必要であり、組み合わせは全部で36組あることを確認した。

表5には、組み合わせごとに位相角調整係数の和を求め、値の小さい順番に選んだ最初の5組と10, 20, 30, 36組目の値を示す。この表から、最小の値となるのは線路(7, 10, 17, 31)の組み合わせである。これは、提案する選定手

表4 位相調整器の設置線路の選定 (単位 [PU])

Table 4. Selection of lines for phase shifter.

Line	Lines where shifter is set			
	Line7	Line10	Line17	line31
1	* 4.2	-	-	-
2	* 4.2	-	-	-
3	* 2.6	-	-	-
4	* 4.2	-	-	-
5	* 5.2	-	-	-
6	* 2.3	-	-	-
7	* 1.2	-	-	-
8	* 5.2	-	-	-
9	* 5.2	-	-	-
10	-	* 1.6	-	-
11	* 8.4	-	-	12.1
12	* 14.7	-	-	-
14	* 8.4	-	-	12.1
15	* 4.4	-	-	-
17	-	-	* 3.1	-
18	10.8	-	* 3.8	13.3
19	* 10.2	-	-	13.8
20	-	-	* 3.1	-
21	* 10.1	-	-	13.9
22	18.2	-	-	* 14.0
23	18.2	-	-	* 14.0
24	18.2	-	-	* 14.0
25	17.3	-	-	* 14.4
26	* 10.0	-	-	14.0
27	-	-	-	* 6.3
28	-	-	-	* 9.5
29	-	-	-	* 6.3
30	15.6	-	-	* 6.0
31	-	-	-	* 3.8
32	15.6	-	-	* 6.0
33	-	-	-	* 10.4
35	-	-	-	* 10.4
36	-	-	-	* 9.8
40	-	* 1.6	-	-
41	-	* 1.7	-	2.6

表5 設置線路の組み合わせ

Table 5. Combination of phase shifters placed.

Lines where shifter is set	Maximum phase angle required (pu)				Total (pu)
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	
(7, 10, 17, 31)	14.7	1.7	3.8	14.4	34.6
(7, 17, 31, 40)	14.7	3.8	14.4	1.8	34.8
(7, 10, 20, 31)	14.7	1.7	3.9	14.4	34.8
(7, 20, 31, 40)	14.7	3.9	14.4	1.8	34.9
(7, 10, 18, 31)	14.7	1.7	9.3	10.4	36.1
(7, 20, 28, 41)	18.2	3.9	10.1	8.7	41.0
(7, 10, 17, 29)	18.2	1.7	3.8	18.3	42.0
(7, 20, 32, 41)	14.7	3.9	15.7	8.7	43.1
(7, 18, 32, 41)	14.7	9.3	15.7	8.7	48.4

順で選択したものと同一である。このことは選択方法の妥当性を示している。

〈5・3〉 過負荷解消 線路7, 10, 17と31に位相調整器を設定し、過負荷の発生を次のように想定し、その解消について検討した。

(1) 過負荷線路が1ヵ所の場合 過負荷が0.1PUを想定したところ、すべてのケースで過負荷を解消できた。

表 6 過負荷解消計算結果

Table 6. Computation to remove overload.

	No of cases OL is removed	Rate (%)
Proposed method	546	91.8
Modified method	569	95.6

図 7 過負荷解消できないケース

Fig. 7. Case when overload can not be corrected.

(2) 過負荷線路が 2 カ所の場合 過負荷が同時に 2 個所に発生すると想定した場合、ループを構成する線路は 35 本であるから過負荷の発生する線路の組み合わせ数は 595 ケースである。

(i) 表 6 に示すように 91.8% にあたる 546 ケースの過負荷を解消できた。

(ii) 過負荷線路が同一ループで直列に存在する場合、解が得られない。しかし、潮流が循環する方向に流れて過負荷になる場合は、大きい過負荷のみを解消の対象にする事によって両者の過負荷を解消できた。23 ケースが解消され表 6 の改良法に示すように正解率は 95.6%に向上した。

(iii) 過負荷解消できないケースは、図 7 に示すように一方の線路の過負荷を解消する様に潮流を変化させるともう一方の線路の過負荷が大きくなるように潮流が分布している場合である。位相調整器はループ線路に潮流を循環させるものであるから、図 7 のケースは位相調整器を用いるだけでは原理的に過負荷を解消できないケースであり、検討の対象外とすべきケースである。

(5・4) ATC 最大化への適用 位相角調整係数を用いた (15) 式の関係を利用すれば、過負荷を防止しつつ送電可能な限界を求める計算が可能な事を確認した。

ノード 23, 24, 26, 27 の負荷が増加し、その分をノード 1 の発電機の出力増加で対処する場合、系統の左上部分から右下部分への送電電力が増加する。この結果、線路 14 に過負荷が生ずる場合を想定した。表 7 に、位相調整器を設置した線路の組み合わせと最大総需要を示す。ケース 1 は、位相調整器を設置しない場合であり、最大の総需要は 3.341PU である。3 章で提案した手法で選択した線路 7, 10, 17, 31 に位相調整器を設置すれば、表 7 のケース 10 に示すように、総需要を 25.6%増加の 4.195PU まで増加できた。

また、表 4 に示す係数から、線路 14 の過負荷を解消でき

表 7 ATC の計算結果

Table 7. Results of ATC computed.

case	Lines where shifters are set.	Total load (PU)	Rate of load increment (%)
1	なし	3.341	0.0
2	(7)	4.195	25.6
3	(31)	3.869	15.8
4	(7, 10)	4.195	25.6
5	(7, 17)	4.195	25.6
6	(7, 31)	4.195	25.6
7	(10, 17)	3.398	1.7
8	(10, 31)	3.869	15.8
9	(17, 31)	3.869	15.8
10	(7, 10, 17, 31)	4.195	25.6

る位相調整器は、線路 7 と 31 に設置する 2 台である。この 2 ケ所のいずれか、またはこの 2 ケ所を設置線路とした場合、過負荷解消に有効である。そこで有効性を確認するため、まず位相調整器を線路 7 に設置した場合の最大の総需要を求めると 4.195PU まで 25.6%増加できることが確かめられた。次に位相調整器を線路 31 に設置すれば 3.869PU まで 15.8%増加できた。さらに位相調整器を線路 7 と線路 31 の両方に設置したケースでは最大の総需要は 4.195PU まで増加できた。

比較のため、4 台中の 2 台を組み合わせた全てのケースについて計算した結果も表 7 のケース 4 からケース 9 に示した。設置線路が (7, 10) それに (7, 17) の場合にも 25.6%増加できた。しかし、(10, 17) の組み合わせの場合、増加率は 1.7%と小さい。この理由は、線路 10, 17 に位相調整器を設置しても線路 14 の潮流はほとんど制御できないためである。

以上の数値例で、位相角調整係数 K を用いた (15) 式の関係を利用する事によって過負荷を防止しつつ送電可能な最大電力を計算できることを示した。また、3 章に述べた方法で選択した線路に位相調整器を設置すれば、それらの組み合わせについてのみ送電可能な最大電力を計算すれば良いので、全ての組み合わせについて計算する方法と比較すれば計算量が大幅に減少できる。検討すべきケースを大幅に絞り込むことが出来る方法である。

本モデル系統では、位相調整器を設置することが可能な線路が 35 本あり、この中で任意の 2 ケ所を設置線路として選択する場合には、組み合わせ数が全部で 595 通りになる。一方、提案手法で設置線路を選択すれば 4 箇所の設置場所となるので位相調整器を 2 台選択する場合ならば、6 通りの組み合わせを検討することになる。

6. まとめ

本論文では、多数のループを有する電力系統において、

任意の線路の潮流を制御するために必要な位相調整器の制御角を直接計算するための位相角調整係数とその導入の方法, 計算アルゴリズムを提案した。

位相角調整係数を用いることの利点を示す。

一つは, 任意の線路に発生する過負荷を, 複数の位相調整器を設置し解消する場合を想定し, 位相角調整係数を利用し, 適切な設置線路を選択する方法を提案した。全ての組み合わせを検討する場合に比べ, 提案した方法で設置線路を選択すれば検討するケース数を大幅に減少できる。

二つ目は, 位相角調整係数を用いた過負荷量と制御角の関係式を用いて, 複数の線路に過負荷が発生する場合の解消法を示した。過負荷を防止しつつ可能送電電力 (ATC) を増大できることを示した。

提案した方式の有効性を IEEE30 母線系統で確認した。
(平成 13 年 6 月 26 日受付, 平成 14 年 9 月 18 日再受付)

文 献

- (1) P. Johnson: "A discussion Paper on Aligning Transmission Reservations and Energy Schedules to Actual Flow," Attachment of NERC TRSSDWT Meeting Notes, DRAFT 3-5-98 (1998-3) (<http://www.nerc.com/filz/~trssdwt.html>)
- (2) A. Edris: "FACTS Technology Development An Update," *IEEE Power Engineering Rev.*, **20**, No.3, pp.4-9 (2000-3)
- (3) E. Stahlkopf, W.J. Budney, B. Rentz, J. Cerdan, and Humphries: "Stretching Transmission capacity by Technology Deployment," *IEEE Power Engineering Rev.*, pp.4-12 (1996-11)
- (4) M.R. Iravani and D. Maratukulam: "Review of Semiconductor Controlled (Static) Phase Shifters for Power System Applications," *IEEE Trans. Power Syst.*, **9**, No.4, pp.1833-1838 (1994-11)
- (5) P. Paterni, S. Vitet, M. Bena, and A. Yokoyama: "Optimal Location of Phase Shifters in the French Network by Genetic Algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, **14**, No.1, pp.37-42 (1999-2)
- (6) Y. Uriu: "Study of The Totalized Control for effective Usage of The Multiple FACTS Apparatuses," 1992 Proc. of the third Annual Conference of Power & Energy Society, IEE of Japan, pp.152-153 (1992) (in Japanese)
瓜生: 「複数の FACTS 機器の有効利用を考慮した制御方策の検討」, 平成 4 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.152-153 (1992)
- (7) H. Fujita, T. Kobayashi, and Y. Noro: "A Power Flow Controller Design for Phase Shifter Used in Parallel AC/DC Links," *T.IEE Japan*, Vol.119-B, No.12, pp.1427-1436 (1999-12) (in Japanese)
藤田・小林・野呂: 「交直併用連系系統における移相器潮流制御系の設計法」, 電学論 B, **119**, 12, pp.1427-1435 (1999-12)
- (8) C. Huang, H. Saito, and J. Toyoda: "Feature Extraction for

Controllable Area of Power Flows Depending on Phase Shifter Allocations," *T. IEE Japan*, Vol.118-B, No.12, pp.1347-1456 (1998-12) (in Japanese)

黄・斎藤・豊田, 「位相調整器群の配置に依存した潮流制御可能領域の特徴抽出に関する基礎検討」, 電学論 B, **118**, 12, pp.1347-1356, (1998-12)

- (9) N. Kobayashi, T. Yamada, H. Okamoto, A. Kurita, Y. Tada, and Y. Sekine: "Some Fundamental Observations on the Optimality of Load Flow Control," *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.12, pp.1091-1100 (1997-8) (in Japanese)
小林・栗田・山田・多田・岡本・関根: 「潮流制御の最適化に関する基礎的検討」, 電学論 B, **117**, 8, pp.1091-1100 (1997-8)
- (10) G.W. Stagg, et al.: "Techniques for the Real-Time Monitoring of Power System Operations," *IEEE Trans. PAS*, **69**, No.4, pp.545-554 (1970-4)
- (11) G.T. Heydt: *Computer Analysis Methods for Power Systems*, Macmillan Publishing Company, New York (1986)
- (12) M. Sato and T. Hasegawa: "A New Approach for Computing Phase Shifter Angle for Load Flow Control," 2000 Proc. of the Eleventh Annual Conference of Power & Energy Society, IEE of Japan, pp.57-62 (2000-8) (in Japanese)
佐藤・長谷川: 「潮流制御のための位相調整器の制御角設定法」, 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.57-62 (2000-8)
- (13) T. Hasegawa and M. Sato: "A Method of Controlling Phase Shifter to Increase ATC," 2001 National Convention Record, IEE Japan, No.6 pp.2431-2432 (2001-3) (in Japanese)
長谷川・佐藤: 「ATC 増大のための位相調整器の制御方法」, 平成 13 年電気学会全国大会, No.6, pp.2431-2432 (2001-3)
- (14) 新田日: 電力系統技術計算の応用, 電気書院 ()
- (15) W.L. Brogan, "Modern Control Theory," Quantum Publishers, INC.

佐藤 正 弘 (正員) 1946 年 1 月 16 日生。1968 年 3 月東北大学電気工学科卒業。同年 4 月, (株) 東芝に入社。電力系統の安定度, 事故波及防止システム, 電圧安定度などの研究に従事。1978 年, Purdue 大学院より MSEE。1999 年 4 月より日本大学生産工学部。教授。工学博士。1975 年電気学会進歩賞 1994 年同論文賞を受賞。

長谷川 知 史 (学生員) 1977 年 5 月 6 日生。2000 年 3 月, 日本大学生産工学部電気工学科卒業。同年 4 月, 同大学院修士課程に進学。電力系統の解析, 運用に関する研究に従事。2002 年 3 月, 同大学院修士課程を修了。同年 4 月, (株) 東芝に入社。