動態安定度に基づいた電力取引経路の優先順位付け手法 に関する基礎検討

正 員 斎藤 浩海 (東北大)

正 員 皆藤 佳孝 (東京電力)

正 員 豊田 淳一 (八戸工大)

A Study on Screening of Electricity Transaction Path Based on Dynamic Stability

Hiroumi Saitoh, Member (Tohoku University), Yoshitaka Kaito, Member (Tokyo Electric Power Company), Junich Toyoda, Member (Hachinohe Institute of Technology)

In a network open access environment, various electricity transactions with different contract paths will occur, and which tend to result in parallel flows. In order to reduce such kinds of power flows, series types of FACTS devices such as TCSC can be used. On the other hand, since the FACTS devices are effective means for stability enhancement, those devices will be utilized for the both purposes of power flow control and stabilizing control in the network open access environment.

This paper proposes a new concept of Transaction Path Filter (TPF) which can screen and order the electricity transactions from the viewpoint of parallel flow reduction and stabilizing ability of TCSC. In the TPF, first, the amount of compensation of TCSC is computed which is necessary for completely reducing the parallel flow of each transaction. Next, by using sensitivity analysis of eigenvalue, the effect of the compensation on stabilizing ability of TCSC is evaluated as the change in the real parts of eigenvalues corresponding to the focused oscillatory modes. Each transaction is classified into four ranks based on the necessary amount of compensation and the stabilizing ability, and then it is determined whether the transaction is accepted or not by system operators.

キーワード：電力取引、パラレルフロー、動態安定度、順位付け、TCSC、FACTS

1. まえがき

近年の欧米で進められている送電ネットワーク利用の開放化は、潮流制御を複雑化し、ネットワークセキュリティの維持を困難にする傾向にある。たとえば、アメリカの卸電力託送で採用されている契約バスベースの送電サービス予約では、契約バス以外の系統へ流れ込む電力（パラレルフローと呼ばれている）による線路過負荷などが問題となっており、実潮流ベースの送電サービス予約および電力取引削減ルールなどのソフトウェア的な解決策が検討されている^(1,2)。

一方、TCSC や UPFC などの直列型 FACTS 機器は高速な潮流制御を可能にし⁽⁵⁾、また電力動揺抑制などの安定化制御にも有効である^(3,4)。したがって、これらの FACTS 機器が導入された電力ネットワークでは、パラレルフローなどの潮流問題の解決と、系統安定度の維持とを、ハードウェア的な方策により、同時に実現できる可能性がある。ただし、直列型 FACTS 機器の動揺安定化能力は、その機器が設置されている線路の潮流方向に依存するので、パラレルフロー解消のための潮流制御動作が、その機器の動揺

抑制能力を劣化させる危険性がある。

そこで本論文では、TCSC が設置された電力ネットワークにおいて、契約バスを伴った種々の電力取引を、TCSC の潮流制御と動揺安定化の観点からランク付けする手法を提案する。提案手法では、各取引電力が契約バスの通りに流れるように TCSC が潮流制御を行った場合、その潮流制御の結果、TCSC の動揺安定化能力が向上するのか、あるいは劣化するのかを、固有値感度などを利用して簡略な評価を行う。そして、TCSC の安定化能力を向上させるまたは悪化させない電力取引に高いランクを付け、安定化能力の劣化を招く取引に低いランクを与えて、そのランクをベースに各電力取引の採択を決定する。本論文では、このランク付け手法を電力取引経路フィルタ TPF(Transaction Path Filter)と呼んでいる⁽⁶⁾。

送電ネットワーク利用が開放された環境では、系統運用組織にとって、種々の電力取引の物理的実現性と系統安定度に及ぼす影響を容易に評価でき、その採否を決定する方法が望まれると考えられる。本論文で提案する TPF は、TCSC の設置されたネットワークを前提とし、また TCSC のパラレルフロー解消制御能力と動揺安定化能力に基づい

で電力取引のランク付けを行なうという限定された状況での電力取引の採択決定手法であるが、その考え方は、ネットワーク利用の開放環境下における系統運用支援ツールの基礎を与えるものと考えている。なお、本論文では、TPFの具体的手順を小規模なモデル系統を用いて説明している。

2. 電力取引経路フィルタ TPF の考え方

提案する TPF の基本的な考え方を図 1 と図 2 を用いて説明する。まず、契約パスを伴った複数の電力取引が（図 1 には発電元 G と需要元 L の間の取引のみを示している）、系統運用組織に申し込まれたとしよう。このとき TPF は、各取引電力の全量がそれぞれの契約パス上に物理的に流れるようにするのに必要な TCSC の線路リアクタンス補償量 x_c を、各取引毎に算出する（図 2 の処理①）。次に、この TCSC の潮流制御が TCSC の動揺安定化能力にどのような影響を及ぼすのかを、固有動揺モードの減衰特性から各取引毎に別々に評価する（処理②）。本論文では、この評価を固有値実部の変化量 $\Delta\sigma$ を用いて行っている。

申し込まれたすべての取引に関して x_c と $\Delta\sigma$ が得られたならば、それらの値を用いて、各取引を以下の 4 つのランクに分類する（処理③）。まず、TCSC の制御限界範囲内で取引電力の全量を契約パス上に流すことができ、すなわちパレルフローを発生させず、かつその潮流制御の結果が固有動揺モードの減衰特性を劣化させない取引を、採択可能な取引として最も高いランク（図 2 中のランク A）に分類する。次に、TCSC の制御範囲内で取引電力の全量を契約パス上に流すことができず、パレルフローが発生してしまうが、モードの減衰特性の劣化を招かない取引を次のランク（ランク B）に分類する。同様に、パレルフローを発生させないが、減衰特性を劣化させる取引をランク C、パレルフローを発生させ、かつ減衰特性も劣化させる取引を最も低いランク D に分類する。

取引の採択は、ランク A、B、C に分類された取引に対して行う（処理④）。採択の決定手順の詳細は、<3.2>節で説明するが、その基本的な考え方は、固有モードの減衰特性を劣化させないランク A、B に分類された取引を優先的に採択するようにする。ただし、複数の取引が同時に成立するように TCSC を制御したときにその線路リアクタンス補償量が限界を超える場合には、減衰特性の劣化を

図 1 契約パスとパレルフロー
Fig.1 contract path and parallel flow

招くランク C の取引も含めて、TCSC の補償量が補償限界内に入るように採択する最終的な取引を決定する。なお、この段階で採択されなかった取引は、ランク D に分類された取引と同様に扱われる。

ランク D に分類された取引は、TCSC が潮流制御を行ってもパレルフローを発生させてしまい、かつ固有動揺モードの減衰特性を劣化させてしまうので、その取引経路のままでは採択されない。そこで TPF では、減衰特性を劣化させない新しい契約パスを各取引毎に算出し、その修正した契約パスを取引の申し込み者に提示することになる（処理⑤）。この契約パスの修正法については<3.3>節で詳述する。

3. TPF の構成

ここでは TPF で行われる処理の詳細を説明する。

<3.1>パレルフロー解消制御量と減衰特性変化量の評価

この節の内容は図 2 の処理①、②、③に対応している。まず、図 1 に示したように発電元 G と需要元 L の間で、図中の太線の契約パスを伴った電力取引が行われると仮定しよう。このとき、TCSC の潮流制御により取引電力の全量が契約パスにながれたとしたときのネットワークの潮流分布を f_r とし、TCSC による潮流制御を行わずに

図 2 電力流通経路フィルタ
Fig.2 Concept of Transaction Path Filter

G-L間の取引が行われたときの潮流分布を f_{NC} とすれば、発生するパラレルフロー f_P は、次式から求められる。

$$f_P = f_T - f_{NC} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f_T 、 f_{NC} 、 f_P はそれぞれ線路の総数 m の次元を持つベクトルである。

TCSCの潮流制御の目的は、このパラレルフローを0にすることであるので、それを達成するのに必要なTCSCの補償量 x_c は次式の最小化問題の解として得られる。

$$\min_{x_c} [f_P - Hx_c]^T [f_P - Hx_c] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで x_c はTCSCの設置台数 ℓ に対応した次元を持つベクトルであり、その各要素はTCSCの線路リアクタンス補償量である。なお、本論文では、TCSCを付録1に示す簡単なモデルで表現している。行列 H は、G-L間の取引電力がネットワークに注入された状態で得られるTCSCのリアクタンス x_c に対する潮流分布の感度を表し、 $m \times \ell$ の行列である。なお、行列 H の算出方法を付録2に示している。

一般にTCSCの設置台数 ℓ は線路の総数 m より少ないと考えられるので、(2)式の解は行列 H の左擬似逆行列を用いて次のように求められる。

$$x_c^* = (H^T H)^{-1} H^T f_P \quad \dots\dots\dots (3)$$

TPFの処理①では(3)式を用いている。

上記のパラレルフロー解消制御がTCSCの動揺抑制能力に与える影響は、次式を用いて評価することができる。

$$\Delta \sigma = S x_c^* \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\Delta \sigma$ は着目している固有動揺モードに対応する固有値の実部の変化分を表すベクトルで、その次元は着目モードの個数に対応している。また、 S は、TCSC設置線路のリアクタンス変化に対する着目モードの固有値実部の感度を表す行列である。固有値の実部が負であれば、対応する動揺モードは時間と共に減衰するので、 $\Delta \sigma \leq 0$ とする取引経路は固有動揺モードの減衰特性を劣化させないことになる。逆に $\Delta \sigma > 0$ とする取引経路はTCSCの動揺抑制能力を低下させることになる。なお、本論文では、TCSCによる動揺安定化制御を付録3に示すブロック図でモデル化している。また、固有値感度行列 S を付録4のシステム行列に関して求めている。

TPFの処理③では、 x_c^* と $\Delta \sigma$ を用いて各取引を以下の4つのランクに分類する。

ランクA： $\Delta \sigma \leq 0$ かつすべてのTCSCの補償量に関して $|x_{ci}^*| \leq x_{c \max i}$ ($i=1,2,\dots,\ell$)が成立する。

ランクB： $\Delta \sigma \leq 0$ かつ少なくとも1台のTCSCの補償量に関して $|x_{ci}^*| > x_{c \max i}$ が成立する。

ランクC： $\Delta \sigma > 0$ かつすべてのTCSCの補償量に関して $|x_{ci}^*| \leq x_{c \max i}$ ($i=1,2,\dots,\ell$)が成立する。

ランクD： $\Delta \sigma > 0$ かつ少なくとも1台のTCSCの補償量に関して $|x_{ci}^*| > x_{c \max i}$ が成立する。

なお、TCSCの補償量 x_c がその限界 $x_{c \max}$ の範囲内でパラレ

ルフローを解消できれば、(3)式から得られる x_c^* のすべての要素の絶対値は $x_{c \max}$ 以下であるので、ここでの分類では、 x_c^* の各要素が $x_{c \max}$ を超えているか否かでパラレルフローの有無を判断している。

<3.2> 取引経路の採択手順 この節では、TPFの処理④におけるランクA、B、Cに分類された取引の採択手順について図3を用いて説明する。説明では、9種類の取引 $t_1, t_2, \dots, t_9$ が図のように4つのランクに分類されているものとする。また、一つの固有動揺モードの減衰特性に着目しているとする。

はじめにランクAに分類された取引の採択を決定する。ランクAでは t_1 が着目モードの減衰特性を最も劣化させない($\Delta \sigma$ が負の方向で最大)取引なので、最初に t_1 について、パラレルフローの解消に必要なTCSCの線路リアクタンス補償量 x_{c1}^* が限界 $x_{c \max}$ の範囲内にあるのかをチェックする。 t_1 はランクAに分類されているので、 x_{c1}^* のすべての要素の絶対値が $x_{c \max}$ より小さいことは明らかである。したがって、 t_1 は採択されることになる。次に、減衰特性の劣化度が次に小さい取引 t_2 について、 t_1 と同様のチェックを行うが、今度は t_1 と t_2 のそれぞれの潮流制御に必要なTCSC補償量 x_{c1}^* と x_{c2}^* の和に関して、補償限界内にあるのかを調べる。なぜなら、 t_1 と t_2 に関するパラレルフローを同時に解消するためには、TCSCの補償量を $x_{c1}^* + x_{c2}^*$ とすればよいからである。したがって、それらの和が限界内であれば、パラレルフローを発生させることなく、両方の取引を同時に成立させることができる。しかし、それらの和が補償量の限界 $x_{c \max}$ を超えるとパラレルフローを発生させずに両方の取引電力をネットワーク上に流すことができないことになるので、その場合は t_2 の採択の決定を一時保留し、次の取引 t_3 について同様のチェックを行う。ここで取引 t_2 の採択決定を一時保留する理由は、他の取引、たとえば t_3 の採択が決定された後に、あらためて t_2 のチェックを行えば、 t_2 も採択される可能性があるからである。もし、 t_1 に関するTCSCの制御動作が容量性補償であり、 t_3 に関する動作が誘導性補償であったとすれば、 x_{c1}^* と x_{c3}^* の符号は逆になっている。すなわち、パラレルフローが発生しないように t_1 と t_3 のそれぞれの取引電力を同時に流すのに必要なTCSCの補償量 $x_{c1}^* + x_{c3}^*$ は、 t_1 のときだけに必要な補償量 x_{c1}^* よりも少なくなる可能性がある。したがって、 t_3 の採択が決定された後に t_2 について再度チェックをすれば、3つの取引 t_1, t_3, t_2 に同時に必要となる補償量 $x_{c1}^* + x_{c3}^* + x_{c2}^*$ は、限界 $x_{c \max}$ の範囲に入る可能性がある。なお、この例で、 t_1 と t_3 が採択され、 t_2 が採択されなかったと仮定すれば、 t_2 の採択はランクBでの評価で再度検討されることになる。

ランクBに分類された取引の採択決定手順は、ランクAの取引に対する手順と同一である。なおこの段階で新たに取引 t_4 が採択され、取引 t_2, t_5 の決定が一時保留され

図 3 取引経路の採択アルゴリズム

Fig.3 discrimination algorithm for transaction paths

たとすれば、保留された取引の採択決定はランク C の決定において再度検討される。

ランク C の取引に関する手順も、ランク A, B の手順とほぼ同じであるが、異なる点は減衰特性の劣化度合いに関するチェックを TCSC の補償量のチェックと合わせて行う点である。ランク C に分類された取引は着目モードの減衰特性を劣化させる取引であるので、図示したように、劣化度合いの和 $\Delta\sigma_{sum}$ が正にならないようにする必要がある。

以上の手順の結果、取引 t_1, t_3, t_4, t_6, t_7 が採択され、取引 t_2, t_5 が採択されなかったとすれば、 t_2 と t_5 はランク D に分類された取引 t_8, t_9 と同様に TPF の処理⑤において、取引経路の修正計算がなされる。結局、採択された取引の各電力の全量をそれぞれの契約パス上に同時に流すのに必要な TCSC の補償量は、採択された各取引の x_c の総和となる。また、その時の着目モードの減衰特性は、採択された取引の $\Delta\sigma$ の総和の分だけ向上する（総和が 0 ならば取引発生前の減衰特性と同じ）ことになる。

<3.3> 修正取引経路の決定の仕方 TPF の処理⑤では、ランク D に分類された取引と、ランク A, B, C で採択されなかった取引について、申し込まれてきた契約パスを修正した採択可能な取引経路を算出する。修正された取引経路は、各取引毎に以下の最小化問題を解くことにより求める。なお、ランク A, B, C, D の順に、同一ランク内では着目モードの減衰特性劣化度合いの小さい取引から最小化問題を解く。たとえば図 3 に示した取引の場合、採択されなかったランク A の取引 t_2 に関して最初に修正経路を求め、次にランク B の採択されなかった取引 t_5 、つづいてランク D の t_8, t_9 の順に修正経路を算出する。

$$\text{目的関数: } \min_{x_{cr}} [f_{Pr} - Hx_{cr}]^T [f_{Pr} - Hx_{cr}] \quad \dots\dots\dots (5)$$

制 約:

$$(a) \text{需給平衡条件: } 0 = AHx_{cr} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$(b) \text{TCSC の補償量限界: } |x_{sum} + x_{cr}| \leq x_{c \max} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$(c) \text{送電容量の限界: } |f_{ij}| \leq f_{\max ij} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$(d) \text{着目モードの減衰特性劣化の回避: } \Delta\sigma_r = Sx_{cr} \leq 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

上記の各変数に付した添字 r は経路の修正を必要とする取引の番号である。また、需給平衡条件を表す式は、TCSC が線路リアクタンス補償の動作をしても各母線への注入電力は一定で、変化しないという仮定から導かれる。なお、行列 A は接続行列である。TCSC の補償量限界を表す式における x_{sum} は、TPF の処理④において採択されたランク A, B, C の取引に必要な TCSC の補償量と、取引 t_r の修正経路を求める前までに修正経路が決定された取引に必要な補償量の総和である。したがって、上述した順番で修正経路が決定される毎に、 x_{sum} 、すなわち、この制約の範囲は変更されることになる。

取引 t_r の修正経路は、その取引電力をネットワークに

注入した状態で、上記の最小化問題の解 x_{cr}^* の分だけ TCSC が線路補償を行なったときの潮流分布と、その取引を行なう前の潮流分布との差として求められる。

4. 小規模モデルによる検討例

提案する TPF の妥当性を図 4 の線路抵抗を無視した小規模モデル系統を用いて検討した。図中には取引発生前の発電機出力、負荷、有効電力潮流を示している。この系統には、0.71 Hz と 1.20 Hz の固有動揺モードが存在するが、ここでの検討では 0.71 Hz のスローなモードに関する減衰特性の劣化度合 $\Delta\sigma$ を TPF の評価に用いている。また、TCSC の動揺安定化制御には発電機 #1 の回転速度変化を入力信号として用い、0.71 Hz モードの動揺安定化に最も効果のある線路に TCSC を設置した。取引発生前の 0.71 Hz モードに対応する固有値の実部は、-0.40 (減衰時定数 2.5 秒) であり、安定である。なお、最大補償時の TCSC のリアクタンス x_c を 25.6 Ω としている。

表 1 は 3 種類の取引 t_1 、 t_2 、 t_3 が申し込まれてきたときの、各取引に対するランク付けと採択結果を示している。なお、各取引電力は 10 MW である。採択の過程は次の通りである。まずランク A の取引のうち減衰特性劣化度合の最も小さい取引 t_1 が採択される。次にランク A の取引 t_2 について TCSC の補償量 x_c の制限をチェックすると、25.6 Ω を越えてしまうので、 t_2 の採択決定は一時保留され、次のランク C の取引 t_3 について減衰特性の劣化度合と TCSC 補償量の制限を調べる。その結果、どちらも制限内に入るので t_3 は採択されることになる。ここで保留されていた t_2 について改めて補償量のチェックをすると、 t_3 が採択された結果、TCSC 補償量に余裕が出たため、 t_2 も採択されることになる。結局、パラレルフローを発生させず、かつ 0.71 Hz モードの減衰特性を劣化させないで (-0.088 だけ固有値実部を負の方向へ増加させている)、これら 3 つの取引電力を同時に各契約パス上に流せること

図 4. 小規模モデルと取引前の潮流分布
Fig.4 studied power system and power flows before occurring transactions

になる。

表 2 は、取引 t_4 、 t_5 、 t_6 が申し込まれてきたときのランク付けと採択結果である。この場合も、ランク A の取引 t_4 は採択される。しかし、ランク C の取引 t_5 または t_6 のいずれを t_4 と組み合わせても、0.71 Hz モードの固有値の実部が取引発生前の -0.40 よりも悪化してしまうので、 t_5 、 t_6 は採択されないことになる。

図 5 は、 t_5 、 t_6 に関して TPF の処理⑤で求めた修正取引経路である。これらの 2 つの取引が、修正経路のような契約パスで申し込みをすれば、TCSC の補償量の限界内でパラレルフローは発生せず、かつ 0.71 Hz モードの減衰特性を劣化させることはない。なお、図 5 に示した修正経路は $\Delta\sigma=0$ とする結果になっている。

表 3 はランク A、B、C の取引がそれぞれ一つずつある場合の結果である。この場合、ランク B の取引 t_8 の採択決定が一時保留された後、ランク C の取引 t_9 が採択される。しかし、 t_8 について再度、採択決定の評価を行なってみると TCSC の補償量が制限を越えてしまい、 t_8 は採択されないことになる。したがって、 t_8 については TPF の処理⑤において修正取引経路の算出が行われることになる。

表 1 2つのランク A 取引と1つのランク C 取引の採択結果
Table 1 a discrimination result for two Rank A-transactions and single Rank C-transaction

取引経路 (ランク順)	$\Delta\sigma$ [1/sec]	X_c [Ω]
t 1 (ランク A)	-0.083	-19.6
t 2 (ランク A)	-0.025	-6.4
t 3 (ランク C)	0.020	4.8

採択過程 ↓

取引経路 (採択順)	$\Delta\sigma$ の積算値 $\Sigma\Delta\sigma \leq 0$	X_c の積算値 $ \Sigma X_c \leq 25.6$
t 1	-0.083	-19.6
t 3	-0.063	-14.8
t 2	-0.088	-21.2

取引経路 t 1 : #2→#7→#5→#4→#6

取引経路 t 2 : #3→#9→#8

取引経路 t 3 : #1→#4→#5

表 2 1つのランク A 取引と2つのランク C 取引の採択結果
Table 2 a discrimination result for single Rank A-transaction and two Rank C-transactions

取引経路 (ランク順)	$\Delta\sigma$ [1/sec]	X_c [Ω]
t 4 (ランク A)	-0.040	-9.0
t 5 (ランク C)	0.041	10.1
t 6 (ランク C)	0.078	20.7

採択過程 ↓

取引経路 (採択順)	$\Delta\sigma$ の積算値 $\Sigma\Delta\sigma \leq 0$	X_c の積算値 $ \Sigma X_c \leq 25.6$
t 4	-0.040	-9.0
t 5 (不採択)	0.001	1.1
t 6 (不採択)	0.038	11.7

取引経路 t 4 : #2→#7→#5

取引経路 t 5 : #3→#9→#6

取引経路 t 6 : #1→#4→#5→#7→#8

(a)取引 t5 の修正案 (b)取引 t6 の修正案

図5 修正された取引経路
Fig.5 modified transaction paths

表3 ランク A、B、C の取引が一つの場合の採択結果
Table 3 a discrimination result for a Rank A-transaction, a Rank B-transaction and a Rank C-transaction

取引経路 (ランク順)	$\Delta \sigma$ [1/sec]	X_c [Ω]
t 7 (ランクA)	-0.083	-19.6
t 8 (ランクB)	-0.124	-30.2
t 9 (ランクC)	0.078	20.7

採択過程 ↓

取引経路 (採択順)	$\Delta \sigma$ の積算値 $\Sigma \Delta \sigma \leq 0$	X_c の積算値 $ \Sigma X_c \leq 25.6$
t 7	-0.083	-19.6
t 9	-0.005	1.1
t 8 (不採択)	-0.129	-29.1

取引経路 t 7 : #2→#7→#5→#4→#6

取引経路 t 8 : #3→#9→#8→#7→#5→#4→#6

取引経路 t 9 : #1→#4→#5→#7→#8

以上の小規模モデルの検討結果から、電力取引経路の採択決定に関して次のような知見が得られた。

(1) 電力取引経路のランク付けは系統構成に依存する。例えば図4のモデル系統の場合、TCSCに容量性の補償動作をさせる反時計回りの取引経路が、固有モードの減衰特性を向上させる傾向にある。したがって、そのような取引は高いランクに分類されることになる。

(2) ある取引経路の採否が、同時に発生した他の取引経路に左右される可能性がある。例えば、表2のランクCの取引 t_6 と表3のランクCの取引 t_9 は同一の取引経路であるが、表2の場合は採択されず、表3の場合は採択されている。これは同時に発生したランクAの取引(表2の場合、 t_4 、表3の場合、 t_7)がどの程度減衰特性を向上させるのかに依存している。

上記の2点は、送電ネットワーク利用の開放環境下における系統動特性情報の公開の重要性和難しさを示唆するものと考えられる。すなわち、どのような流通経路が系統の安定運用に好ましいのかという情報や、同時期の他の取引経路に関する情報などが提示されないと、ネットワークの利用者は申し込んだ取引経路がどのランクに分類されるのかを事前に予測できないことになる。その結果、経済的で、かつ経路の修正要求を受けないで済むような取引経路を、ネットワーク利用者側で事前に決定できない可能性が

ある。しかし、そのような情報が公開されることになれば、一部の線路に取引経路の申請が集中するなどの系統運用を困難にする危険性も出てくる。したがって、系統動特性情報の公開の仕方は取引経路の申請手順と関連付けて十分に吟味する必要があると言える。

5. むすび

本論文では、アメリカなどで問題になっている卸電力託送取引に伴うパラレルフローと、その解消制御によって劣化しうる FACTS 機器の動揺安定化能力に焦点を当て、系統信頼度の維持の観点から各取引をランク付けし、その採択を決定する新しい手法の電力取引経路フィルタ TPF を提案した。なお、提案手法を実用的な手法に近づけるためには、以下の項目についてさらに検討する必要がある。

(1) 複数の TCSC が設置されている系統と着目する動揺モードが複数の場合の TPF。

(2) 申請されてきた各電力取引経路に関するパラレルフロー解消制御量と減衰特性変化量をどの時点の系統状況・負荷状況において評価すべきか。また、その評価において電力システムの非線形性をどのように考慮すべきか。

(3) TCSC の補償動作が短絡電流や電圧安定度に及ぼす影響をどのように TPF に組み込むか。

(4) 想定事故、過渡安定度を考慮した TPF。

(5) TCSC 以外の FACTS 機器が設置されている場合や FACTS 機器の無い系統での TPF。

(6) 米国で検討されている取引電力量の削減方策と TPF の関連付け。

これらの課題が解決されれば、提案する TPF は、送電ネットワーク利用が開放された環境において、有用な信頼度評価ツールになり得ると考えられる。

なお、本研究の一部は共著者の皆藤が東北大学大学院に在学中に行なったものである。

(平成11年6月10日受付、同11年9月17日再受付)

文 献

- (1) Current Operational Problems Working Group, "Operating Problems with Parallel Flow", paper of IEEE/PES 1991 Winter Meeting, 91WM226-1PWR, 1~11, Feb. 1991.
- (2) 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, March, 1998 (<http://www.nerc.com/~filez/trssdwt.html>)
- (3) 岡本、横山、関根：「可変インピーダンス型電力系統の安定化制御手法とその可変直列コンデンサ補償系統への応用」電学論B、113巻3号、203~208
- (4) J. J. Pasrba, N. W. Miller, E. V. Larsen & R. J. Piwko, "A Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.10, No.3, July 1995
- (5) 皆藤、斎藤、豊田：「セキュリティ維持のための予防的潮流制御に関する基礎検討」、平10年度電気関係学会東北支部連合大会、2A22
- (6) Y. Kaito, H. Saitoh & J. Toyoda：「Stability Based Screening of Electricity Transaction Path」、平11電気学会全大、No.1384

1. TCSC の簡略モデル

TCSC を付図 1 のような可変リアクタンス x_c として扱い、 $|x_c| \leq x_{cmax}$ の範囲で連続的に変更できるものとした。また、計測時間やサイリスタスイッチの動作時間の遅れなどを無視している。

付図 1. TCSC のモデル

app. Fig. 1 a simplified model of TCSC

2. TCSC の制御に対する潮流の感度

n 母線 m 線路系統において、線路の抵抗を無視し、各母線間の相角が小さいと仮定すると、注入有効電力 P ($n-1$ 次元) と潮流分布 f (m 次元) は、接続行列 A ($n-1 \times m$ 次元) と母線位相角 δ ($n-1$ 次元)、TCSC を含めた線路リアクタンスからなる行列 X ($m \times m$ 次元) を用いて次のように表される。

$$f = X^{-1} A^T \delta \quad (\text{付 1})$$

$$P = A X^{-1} A^T \delta \quad (\text{付 2})$$

母線 i — j 間の線路に TCSC が設置されている場合、注入電力一定の条件下で、TCSC のリアクタンス x_c に対する潮流分布の変化分 Δf は、次式で与えられる。

$$\Delta f = \left[\frac{\partial f}{\partial x_c} \right] x_c = H x_c \quad (\text{付 3})$$

ここで、行列 H は、次式により与えられる。

$$H = \{X^{-1} A^T (A X^{-1} A^T)^{-1} A - I\} X^{-1} \frac{\partial X}{\partial x_c} X^{-1} A^T (A X^{-1} A^T)^{-1} P \quad (\text{付 4})$$

3. TCSC による動揺安定化制御

付図 2 に示すように TCSC のリアクタンス x_c を発電機の回転速度変化に比例させて決定している。なお、入力信号として利用する回転速度変化は、動揺抑制の対象となる固有動揺モードを多く含んだ発電機から計測するものとしている。また付図 3 のように、慣性中心からの周波数偏差の差が 0.1 [Hz] のとき、線路リアクタンスの $\pm 30\%$ の補償が行われるように制御ゲインを設定している。ここで、 $+30\%$ 補償は C 性補償であり、 -30% 補償は L 性補償である。なお、対象モードに正の制動をかけるようにするため、

TCSC 設置線路の潮流方向に合わせて制御ゲインの符号を決定している。

付図 2. TCSC の制御ブロック図

app. Fig. 2 block diagram of control system for TCSC

付図 3. 制御ゲインの特性

app. Fig. 3 characteristics of control gain

4. 固有値感度行列 S の算出

発電機を過渡リアクタンス背後電圧一定モデルで表現し、負荷を等価アドミタンスとして表して負荷ノードを縮約したノードアドミタンス行列を用いたとき、TCSC の制御効果を考慮した動揺方程式は次式のように表わされる。

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_{e0} - \left. \frac{\partial P_e(x_c)}{\partial x_c} \right|_{v=v_0, \delta=\delta_0} x_c \quad (\text{付 5})$$

ここで、 $\left. \frac{\partial P_e}{\partial x_c} \right|_{v=v_0, \delta=\delta_0}$ は TCSC のリアクタンス x_c に対する発電機出力の感度である。

(付 5) 式を、運転点周りで線形近似をし、一階の微分項で整理すると次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1} K(x_c) & -M^{-1} \left(\frac{\partial P_e(x_c)}{\partial x_c} \right)_{v=v_0, \delta=\delta_0} G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (\text{付 6})$$

ここで、 K は同期化力係数行列、 G は付図 2 のブロック図から定まる行列である。

固有値感度行列 S は(付 6)式のシステム行列から求めている。

斎藤 浩海

(正員) 1960年7月19日生。1989年3月
東北大学大学院工学研究科博士課程修了。
同年4月同大学工学部助手、1992年4月
同助教授、現在に至る。工学博士。IEEE
会員。

皆藤 佳孝

(正員) 1972年7月6日生。1997年3月
東北大学工学部電気工学科卒業。1999年
3月同大学大学院工学研究科博士前期2年
の課程修了。同年4月東京電力(株)入社、
現在に至る。

豊田 淳一

(正員) 1934年7月9日生。1963年3月
東京大学大学院博士課程修了。同年4月
成蹊大学工学部電気工学科助教授、1972
年4月同教授。1983年4月東北大学工学
部電気工学科教授、1998年3月同停年退
官。同年4月八戸工業大学工学部電気工学
科教授、現在に至る。工学博士。東北大学
名誉教授。IEEE, CIGRE 会員。

電力・エネルギー部門大会座長のコメントと回答

—A 03 規制緩和(1)—

質 疑

座長 田辺 隆也

1. 同セッションでの対象論文への質疑応答

(1)

Q：潮流状態により大きく取引経路の優先順位が変動する
と考えられるが、多断面の評価をこの手法を用いてど
のように行うのか？

A：どの時点の潮流状態を用いて評価すべきか。また、そ
の評価においてシステムの非線形性をどう扱うかは重
要な課題であり、今後検討を進めたいと考えている。

(2)

Q：TCSCを論文のように導入していくと、安定度が悪
化してしまうのではないかと？

A：提案手法は系統信頼度維持の観点からのランク付けで
あり、パラレルフロー問題の解決と系統安定度の維持
とを両立できる可能性があると考えている。

(3)

Q：現実問題として TCSC が導入されていくのか？

A：TCSC 等の FACTS 機器は高速な潮流制御、電力動
揺抑制などに有効であるので、今後導入が検討されて
いくと考えている。

2. 著者に照会したい座長コメント

論文の中で「系統動特性情報の公開の仕方は取引経路の
申請手順と関連づけて十分に吟味する必要があると言え
る」と述べている。つまり、系統動特性情報の公開に対す
る何らかの具体的方策・考え方が示されてこそ、この論文
の有用性が発揮されるのではないかと考えます。そこで、
系統動特性情報の公開方法についての具体的なお考えがあ
りましたら教えて下さい。

❖ ❖ ❖

❖ ❖ ❖

応 答

斎藤 浩海 (東 北 大)

皆藤 佳孝 (東京電力)

豊田 淳一 (八戸工大)

「著者に照会したい座長コメント」への回答

系統動特性情報の公開方法については具体的な検討をし
ておりませんが、系統運用組織が送電ネットワーク利用者
に提示する必要のある情報には、次の2点が含まれるので
はないかと考えております。

(1) ネットワーク利用者が電力システムの安定度を考
慮して電力取引経路を選定するための情報

(2) 系統運用組織がネットワーク利用者取引経路の
修正を要請する場合の情報

(1)に関する情報として、電力取引に使用可能な各線路
の送電容量が必要になると考えられます。なお、この送電
容量は取引電力の注入点と引出点の組み合わせごとに算定
され、その算定において系統の安定度や各種電力設備・制
御機器の限界などが考慮されることになると思います。ま
た、この送電容量は系統状況に依存しますので、発電機出
力分布、負荷分布、系統構成などの変化に合わせて随時更
新するか、あるいは、ある将来時点までの一定期間にわた
って予測した送電容量を提示する必要があると考えられま
す。

このような送電容量に関する情報が提示されれば、ネッ
トワーク利用者は、系統の安定運用に好ましい取引経路、
すなわち本論文で言うランク A に相当する経路を申請し
てくるものと予想されます。ただし、本論文で述べました
ように、単独では採択され得る取引経路でも、同時に複数
の取引が生じると TCSC の制御限界の制約などから、必
ずしもすべての取引が採択されるとは限らない状況が発生
します。したがって、提案する電力取引経路フィルタ
TPF のようなある明確な規準に基づいて各取引に採択順
位をつける手法が、ネットワーク利用の開放環境下にお
いて重要になると考えております。

(2)に関する情報は、取引経路の修正が必要になる理由
をネットワーク利用者に明示するために必要であり、その
内容としては、申請した取引経路が系統の安定度劣化やパ
ラレルフローの発生にどのような影響を与えるのかを明確
にできるものでなければならぬと考えられます。

なお、ネットワーク利用者に提示すべき具体的情報とそ
の提示の仕方を考えるうえで、アメリカの NERC で検討
されている ATC (Available Transmission Capability)
の定義・算定方法などが参考になるものと考えています。