Unified Power Flow Controller (UPFC) による電力系統ダンピング向上制御

正員 河野 啓利 (東京大学)

正員 中島 達人 (東京電力)

正員 横山 明彦 (東京大学)

Power System Damping Enhancement using Unified Power Flow Controller (UPFC)

Hirotohi Kohno, Member (University of Tokyo),

Tatsuhito Nakajima, Member (Tokyo Electric Power Co.),

Akihiko Yokoyama, Member (University of Tokyo)

Unified Power Flow Controller (UPFC) can inject voltage with the controllable magnitude and phase angle in series with a transmission line. And it can also generate or absorb controllable reactive power. UPFC is expected to be able to damp power system oscillation more effectively than power electronics applied devices such as SVG and TCSC.

In this paper, a control system design of UPFC for power system damping enhancement based on eigenvalue control method was proposed. As a result, it was made clear that the best design method for the power system damping enhancement is to determine steady-state values of UPFC control variables and control parameters of UPFC such as gains and time constants simultaneously because controllability of UPFC depends on the steady-state values of UPFC and the power flow condition. And the effectiveness of the proposed control system taking into account UPFC inverter ratings is verified by digital time simulation. Furthermore the effects of input signals to UPFC controller on small-signal stability and transient stability enhancement were studied. And it was made clear that the controller of UPFC using global information are more effective on the power system damping enhancement than that using local information because the global information has stronger observability for power system oscillation than the local information.

キーワード: 電力系統, パワーエレクトロニクス, FACTS, UPFC, 固有値, 安定化制御

1. はじめに

電力システムは、増大する電力需要、電力の安定供給への強い要請に対応するため、電源、電力輸送設備の整備、有効利用が必要である。そこで、近年発達が著しいパワーエレクトロニクス技術を利用した、電力用パワーエレクトロニクス機器を系統に設置することで、系統安定度向上させ、既存の電力設備の送電能力を増大させる可変インピーダンス型電力システム (Variable Impedance Power System, VIPS) が提案されている⁽¹⁾。このようなパワエレ機器では、GTO (Gate Turn Off Thyristor) に代表される自己消弧機能を有するデバイスによって構成される自励式変換器を適用することが検討されている。そのなかの一つが Unified Power Flow Controller (UPFC) である^(2,3,4,5)。

従来の VIPS 機器の制御操作変数が 1 つであるのに対して UPFC は複数の制御操作変数を持つので、よりいっそうの制御効果が期待できる。そこで、本論文では、はじめに、固有値法による定態安定度解析、デジタルシミュレーションによる過渡安定度解析の際に必要な UPFC

の等価モデルを作成する。つぎに、系統ダンピング向上のための UPFC の制御系設計方法について検討する。最後に、UPFC の制御系への制御入力などが系統ダンピング向上効果にどのような影響を与えるかについて検討する。

2. UPFC の構成とその等価モデル

(2-1) UPFC の構成と特徴 UPFC (Unified Power Flow Controller) は、図 1 のように、分路変圧器を介して系統に並列に接続されている自励式変換器 (以下、Inv. 1 と呼ぶ)、直列変圧器を介して系統に直列に接続されている自励式変換器 (以下、Inv. 2 と呼ぶ) と、これらの 2 つの自励式変換器をつなぐ直流回路 (直流コンデンサ) からなる。

自励式変換器は、変換器を通過する有効電力と無効電力を独立に制御可能である。そこで、Inv. 1、Inv. 2 は、それぞれ、変換器の定格範囲内で任意の有効電力、無効電力を系統に供給または系統から吸収することができる。しかし、Inv. 1 と Inv. 2 が系統に供給する有効電力の和が 0 でなければ、直流コンデンサの電圧が変動してしまうので、

図1 UPFCの構造

Fig.1. UPFC

Inv. 1 は、任意の有効電力を系統に供給するのではなく、Inv. 2 が系統に供給する同量の有効電力を系統から吸収することで直流コンデンサの電圧を一定にするものとする。

(2.2) UPFC の等価モデル⁽⁵⁾ 実効値解析を行うために、UPFC を図2のような等価モデルで表現する。これは、Inv. 2 を直列変圧器によって系統に印加する電圧を1つの電圧源で、Inv. 1 が系統に供給する無効電力・系統から吸収する有効電力を2つの等価電流源モデルで表現している。このモデルにおいて、UPFC の動作状態を決定する操作変数は、直列側の系統に印加する電圧の大きさ V_U 、その電圧の分路側端子電圧との位相差 ϕ 、分路側の系統に供給する無効電力 Q_{inj} の3つである。また、分路側の設置ノードを node i 、直列側の設置ノードを node j 、直列変圧器漏れリアクタンスを x とする。なお、直列側と分路側の有効電力の授受、変換器損失等起因して直流電圧変動が発生するが、分路側変換器の制御による直流電圧調整が十分に速いとして無視している。

図2 UPFC の等価モデル

Fig.2. Equivalent model of UPFC

また、設置送電線両端の端子電圧および UPFC の印加電圧の関係は図3に示すようになる。ここで、 θ_{ij} は、分路側端子電圧から見た直列側端子電圧の位相である。 V_{SVC}

図3 電圧ベクトルの関係

Fig.3. Relation between voltage phasors

は、Inv. 1 が供給した無効電力 Q_{inj} による分路側端子電圧 V_i の変化であり、これは、 V_i と同位相である。

(2.3) UPFC の等価電流源モデルの導出 UPFC などのように、その動作によって系統のアドミタンス行列が連続的に変化するパワエレ機器が設置された系統のデジタル過渡シミュレーションを行う際には、パワエレ機器を設置したブランチの両端のノードに、系統内の電圧/電流分布が保存されるような等価電流を注入することで、パワエレ機器の動作を模擬することが一般に行われている。そこで、本節では、図2の等価モデルをもとに、node i 、node j に接続される電流源で模擬する図4のような等価電流源モデルを導出する。

図4 UPFC の等価電流源モデル

Fig.4. Equivalent current source model of UPFC

Inv. 2 を模擬した電圧源 $V_U e^{j(\phi + \theta_i)}$ は、ノートンの定理により、並列に設置された電流源 I_2 に書き換えることができる。

$$I_2 = \frac{V_U e^{j(\phi + \theta_i)}}{jx} \quad (1)$$

また、Inv. 2 が直列変圧器を介して系統に供給する有効電力を P_{IN2} とすると、

$$P_{IN2} = \text{Re} [V_U e^{j(\phi + \theta_i)} \cdot \bar{I}_{Sr}] \quad (2)$$

となる。

Inv. 1 の無効電力制御を表す無効電力供給電流源 I_{1Q} は、

$$I_{1Q} = -j \frac{Q_{inj}}{V_i} e^{j\theta_i} \quad (3)$$

表 1 潮流状態

Table 1. Power flow condition

ノード 1	発電機	—
ノード 2	発電機	1.90 p.u.
ノード 3	発電機	1.20 p.u.
ノード 5	負荷	2.50 + j0.80 p.u.
ノード 6	負荷	1.70 + j0.50 p.u.
ノード 8	負荷	1.00 + j0.20 p.u.

となる。Inv. 1 の直流電圧一定制御を表す有効電力吸収電流 $\dot{I}_{1P}$ は、

$$\dot{I}_{1P} = \frac{P_{IN2}}{V_i} e^{j\theta_i} \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、図 2 より、 $\dot{I}_{1Q}$ 、 $\dot{I}_{1P}$ の向きが逆であることに注意が必要である。

以上より、node i 、node j それぞれに注入される電流 $\dot{I}_i$ 、 $\dot{I}_j$ は、(5) 式、(6) 式で表される。

$$\dot{I}_i = \dot{I}_{1Q} - \dot{I}_{1P} - \dot{I}_2 \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{I}_j = \dot{I}_2 \dots\dots\dots (6)$$

なお、詳細は文献⁽²⁾を参照されたい。

(2.4) UPFC の電力源モデルの導出 UPFC が設置されることにより、系統内の潮流分布は変化する。そこで、node i 、node j 間に設置された UPFC を、その操作変数に依存する電力源として表現することで、UPFC が系統の潮流状態に与える影響を模擬することができる。

UPFC によって node i に供給される複素電力 $P_i + jQ_i$ は (7) 式となる。

$$P_i + jQ_i = -V_i e^{j\theta_i} \left(\frac{V_U e^{j(\phi + \theta_i)}}{jx} \right) - P_{IN2} + jQ_{inj} \quad (7)$$

一方、node j に供給される複素電力を $P_j + jQ_j$ とすると、(8) 式となる。

$$P_j + jQ_j = V_j e^{j\theta_j} \left(\frac{V_U e^{j(\phi + \theta_i)}}{jx} \right) \dots\dots\dots (8)$$

この UPFC の等価電力源モデルは、潮流計算・線形化状態方程式の導出の際に使用する。ここで、線形化状態方程式の導出の際注意すべきことは、発電機端子電流と端子電圧の間の関係を表すアドミタンス行列は、UPFC の操作変数 V_U 、 ϕ 、 Q_{inj} 、端子電圧の関数となることである。

3. 解析に用いた系統と UPFC の制御系

(3.1) モデル系統 図 5 に示すような 3 機 9 母線系統を検討に使用した。この系統は、100 MVA ベース、送電線定格電圧は 275 kV、系統周波数は 50 Hz である。発電機定数、送電線定数は文献⁽⁶⁾に示された値を用いた。

系統の潮流状態は表 1 のような比較的重潮流な状態とした。

この時の電力動揺モードを表 2 に示す。ここで、電力動揺モード 1 は G1 と G2、G3 の間の動揺、モード 2 は G2 と G3 の間の動揺である。想定した事故は、Line 5-7 の

図 5 3 機 9 母線系統

Fig.5. 3-machine 9-bus system

表 2 電力動揺モード

Table 2. Power swing modes

モード	固有値 (σ [1/p.u.] $\pm j\omega$ [p.u.])
1	$-1.10 \times 10^{-3} \pm j1.45 \times 10^{-2}$
2	$-1.95 \times 10^{-3} \pm j2.72 \times 10^{-2}$

ノード 5 至近端における 3 相地絡事故 (70 ms 後事故除去) である。なお、UPFC は事故中および事故除去後 20 ms は出力しないものとする⁽⁴⁾。

UPFC は、図 5 のように、Line 5-7 間の中間地点に分路側を node 5 側として設置した。UPFC の機器の諸量は、直列側印加電圧定格 55 kV (0.2 p.u.)、変換器通過皮相電力定格 20 MVA (0.2 p.u.)、直列変圧器漏れリアクタンス 5 % (自己容量ベース) とした。なお、UPFC の定常値は、系統動揺時の制御余裕を考慮して、印加電圧最大値を 0.1 p.u.、分路側供給無効電力最大値を 0.1 p.u. とした。

(3.2) 変換器の定格を考慮した場合の UPFC の制御系 UPFC の操作変数 V_U 、 ϕ 、 Q_{inj} は、印加電圧の定格 V_{Umax} 、Inv. 2 を流れる皮相電力の定格 PQ_{IN2max} 、Inv. 1 を流れる皮相電力の定格 PQ_{IN1max} を超えないように制御する必要がある。

Inv. 2 を通過して系統へ流れる皮相電力 PQ_{IN2} を (9) 式に、直流回路を Inv. 1 から Inv. 2 へ流れる電力 P_{DC} を (10) 式、Inv. 1 を通過して系統へ流れる皮相電力 PQ_{IN1} を (11) 式にそれぞれ示す。

$$PQ_{IN2} = |V_U e^{j(\theta_i + \phi)} \cdot \bar{I}_{Sr}| \dots\dots\dots (9)$$

$$P_{DC} = \text{Re} [V_U e^{j(\theta_i + \phi)} \cdot \bar{I}_{Sr}] \dots\dots\dots (10)$$

$$PQ_{IN1} = \sqrt{P_{DC}^2 + Q_{inj}^2} \dots\dots\dots (11)$$

(9) 式、(11) 式より、 PQ_{IN1} 、 PQ_{IN2} は、設置端子電圧の大きさ V_i 、 V_j 、位相差 θ_{ij} の関数となる。そのため、設置端子電圧が大きく変化する系統事故時には、変換器の定格範囲内となるような UPFC の操作変数の動作可能範囲

を固定することは困難である。そこで、UPFCの制御系として、図6のような構成を提案する。一般に、ある操作変数については、その変数の値を変動可能範囲に制限する。しかし、その変数の非線形な関数である変換器の定格容量が変動可能範囲を超えないようにその変数の値を変更することは、瞬時にはできない。そのため、変換器通過皮相電力を操作変数の指定値をもとに推定し、その推定値が定格範囲内になるように繰り返し操作変数の指定値の変更を行う。

図6 UPFCの定格を考慮に入れた場合の制御系の構成
Fig.6. Control system configuration of UPFC taking into account ratings of UPFC

図6において、外部制御系 $K(s)$ は、系統内の情報を制御入力 u として、UPFCの操作変数の指令値 η_k^s を出力する制御系である。変換器内部制御系は、操作変数の指令値 η_k^s が出力されるように半導体スイッチのオンオフを制御するものであるが、簡単のために、この動特性は1次遅れ ($T_k = 0.05$ s) で模擬している。

図6の指令値の決定は、図7に示すようなアルゴリズムで、定格を考慮したUPFCの操作変数の指令値の変更を20 msごとに行い、20 msの間は一定の指令値を出力する。外部制御系 $K(s)$ から出力されたUPFCの操作変数 η_k の指令値 η_k^s と系統から検出した (検出遅れ $T_M = 0.01$ s) 設置端子電圧の大きさと位相差 V_i, V_j, θ_{ij} より、変換器通過皮相電力 PQ_{IN1} , PQ_{IN2} および直流回路通過有効電力 P_{DC} をオンラインで推定する。もし、Inv. 2 通過皮相電力の推定値 $\hat{P}Q_{IN2}$ が機器の定格 PQ_{IN2max} を超えた場合には、印加電圧の大きさの指令値 V_{Uk}^s の値を0.995倍ずつ減少させていき、定格以下になった時の指令値を V_U^s とする。ここで、印加電圧の位相角の指令値 ϕ_K^s の変更は行わない。次に、Inv. 1 通過皮相電力の推定値 $\hat{P}Q_{IN1}$ が、機器の定格 PQ_{IN1max} を超えた場合には、(11) 式をもとに、定格を超えない最大量を分路側供給無効電力の指令値 Q_{inj}^s とする。

なお、系統が動揺している状態では、UPFCに動作遅れがあり、UPFCの操作変数が変化することによって端子電圧が変化するために、正確な推定を行うことはできないことに注意を要する。

(3.3) 制御入力の違いと外部制御系の構成 本論文では、制御入力 u として

- 系統内のすべての発電機の角速度偏差 $\Delta\omega_i$

図7 変換器の定格を考慮した場合のUPFCの操作変数の指令値の指定アルゴリズム

Fig.7. Algorithm for change of UPFC control output signals considering UPFC ratings

- UPFC 設置送電線通過有効電力 P_{Sr}
- UPFC 設置端子電圧偏差 ΔV_i

を用いる。発電機の角速度偏差 $\Delta\omega_i$ はグローバルな遠隔情報であり、端子電圧偏差 ΔV_i 、設置送電線通過有効電力 P_{Sr} はローカルな情報である。各制御入力に対する制御系の構成を図8 (a) ~ (c) に示す。図中には、制御系設計で設計しなければならない定数も合わせて示した。

4. UPFCの制御系設計方法

(4.1) UPFCの制御系設計時の問題点 UPFCの定常値や $K(s)$ の制御系パラメータの決定の際には、以下のような問題が生じる。

- UPFCの操作変数は V_U, ϕ, Q_{inj} の3つあるため、その決定には工夫を要する。
- UPFCの制御系設計の際、直列側印加電圧制御と分路側供給無効電力制御による相互干渉を防ぐ必要がある。
- UPFCの定常値と制御効果の間に関係がある場合には、UPFCの定常値と制御系パラメータを同時に決定する必要がある。

本論文では、上記の問題を解決するため、UPFCの定常値決定・制御系パラメータ設計には固有値制御手法を用いることとした。

(4.2) 固有値制御手法と固有値感度 固有値制御とは、系統内の各種パラメータ (発電機、系統内に設置され

制御系設計の際には、 $K_{\omega ik} (i = 1 \cdots n)$ を決定

(a) 発電機の角速度偏差を制御入力とした場合

制御系設計の際には、 K_P, T_{P1}, T_{P2} を決定

(b) 線路有効電力を制御入力とした場合

制御系設計の際には、 K_{V1}, K_{V2} を決定

(c) 端子電圧偏差を制御入力とした場合

図8 UPFCの制御系

Fig.8. Control system of UPFC

たパワエレ機器の制御系のゲインや時定数などのパラメータ・発電機端子電圧、発電機出力設定値、パワエレ機器の定常値などシステムの動作点に関する定数)を変更することにより、図9のようにシステムの固有値を複素平面のあらかじめ定められた領域(指定安定領域)まで移動させ、システムの動揺がある一定以上のダンピングを持つことを保証するものである⁽⁷⁾。固有値制御において、固有値安定化のために変更するシステム内の各種パラメータを固有値制御における“制御パラメータ”と呼ぶが、本論文では、UPFCの定常値を決定する操作変数とUPFC制御系パラメータとした。なお、システムの固有値のうち、固有値制御で安定化の対象とする固有値を“制御対象固有値”，制御対象固有値に選択されないが比較的ダンピングの小さい固有値を“監視対象固有値”と呼ぶ。

固有値制御を行う際には、制御パラメータを変更した時に、各固有値がどのように変化するか情報が必要となる。この情報は、固有値感度と呼ばれるもので以下のように定義することができる。システム行列 $\hat{A} = A_{\hat{x}}$ の固有値 $\lambda_j (j = 1 \cdots N_A)$ とすると操作パラメータ a_i の λ_j に対す

図9 固有値制御

Fig.9. Eigenvalue control

る固有値感度は、

$$\frac{d\lambda_j}{da_i} \triangleq S_{ij} = \underline{v}_j \frac{dA}{da_i} \underline{u}_j \cdots \cdots \cdots (12)$$

となる。 $\underline{v}_j, \underline{u}_j$ は、それぞれ、固有値 λ_j の左固有ベクトル、右固有ベクトルである。UPFCの操作変数とUPFC制御系定数と固有値感度の関係を図10に示す。ここで、図中の $\hat{A}\hat{x} + \hat{B}\Delta V = \hat{C}\hat{x}$ は状態方程式、 $\hat{Y}\Delta V = \hat{D}\hat{x}$ はシステム方程式である。UPFCの定常値に関する固有値感度を求める際には、文献⁽⁸⁾に示されるように、動作点の変更をともなうために、UPFCの定常値がシステムの端子電圧や発電機の内部位相角に及ぼす影響も考慮する必要がある。

図10 UPFCの操作変数・制御系定数の変化による固有値への影響

Fig.10. Influence of steady-state values and control parameters of UPFC on eigenvalues

固有値制御は、問題の定式化により、2通りのアルゴリズムが提案されているが、本研究では、制御対象固有値をできるだけ安定方向へシフトすることを目的とする支配固有値優先安定化アルゴリズムを用いた。詳細は文献⁽⁷⁾を参照されたい。

(4.3) 系統ダンピング向上のためのUPFCの制御系設計方法 UPFCの定常値およびその時の潮流状態は、UPFCの固有値に対する制御性の大きさ(固有値に対しての感度)に影響を与えると考えられる。そこで、系統安定化効果を大きくするためには、電力動揺モードに対する制御性が大きくなるようなUPFCの3つの操作変数の定常値も決定する必要がある。

表 3 UPFC の定常値およびグローバル制御系パラメータ (1)

Table 3. Steady-state values and control parameters of UPFC (1)

	定常値			V_U の制御系			ϕ の制御系			Q_{inj} の制御系		
	V_U	ϕ	Q_{inj}	$K_{\omega 1}$	$K_{\omega 2}$	$K_{\omega 3}$	$K_{\omega 1}$	$K_{\omega 2}$	$K_{\omega 3}$	$K_{\omega 1}$	$K_{\omega 2}$	$K_{\omega 3}$
方法 1	0.1	0.0	0.1	-60.0	16.0	46.4	0.0	60.0	60.0	-6.4	60.0	-60.0
方法 2	0.1	48.3	-0.1	-3.0	-45.0	-45.0	0.74	14.0	15.0	32.7	-60.0	-54.4

(注意 1) V_U , Q_{inj} の定常値の単位は [p.u.] , ϕ の単位は [deg] である。

(注意 2) ここで, 方法 2 の定常値が $V_U = 0.1$ [p.u.] , $\phi = 48.3$ [deg] となっているが, 制御系の初期値としては, $V_U = -0.1$ [p.u.] , $\phi = -131.7$ [deg] を用いる。

以下では, UPFC の定常値の決定およびその定常値における制御系パラメータの設計を 2 とおりの方法で行い, その制御効果の比較することで, 最適な UPFC の制御系設計方法を検討する。

方法 1 まず, UPFC の制御系を動作させない場合で, 最も電力動揺モードが安定となる UPFC の操作変数の定常値を求め, その後に制御系パラメータの設計を行う。

方法 2 UPFC の操作変数の定常値の決定と制御系パラメータの設計を同時に行う。

検討は, 図 5 に示した 3 機 9 母線系統で行った。また, UPFC の制御系は, 3 つの操作変数とも, 系統内すべての発電機の角速度偏差を制御入力とする図 8 (a) とした。固有値制御手法における制御対象固有値として電力動揺モード 1 を選択し, 監視対象固有値としてモード 2 を選択した。

方法 1 および方法 2 で決定された UPFC の定常値・制御系パラメータを表 3 に示す。方法 1, 方法 2 で決定された UPFC の定常値で制御系は動作しない場合 (制御なし) の電力動揺モード 1 と, 制御系が動作させた場合 (制御あり) の電力動揺モード 1 の実部を表 4 に示す。

表 4 電力動揺モード 1 の改善効果の比較

Table 4. Comparison of real parts of power swing mode 1

	制御なし	制御あり
方法 1	-1.20×10^{-3}	-8.08×10^{-3}
方法 2	-1.12×10^{-3}	-2.11×10^{-2}

この結果, 制御を考慮しない場合に電力動揺モードが最も安定になるように定常値を決定し, その後に, 制御系パラメータの設計を行う方法 1 よりも, UPFC の定常値の決定と制御系パラメータの設計を同時に行う方法 2 の方が, 定態安定度向上効果が大きいことがわかった。そこで, 以後の検討では, UPFC の制御系設計は UPFC の定常値および UPFC の制御系パラメータの決定を同時に行うこととする。ただし, 系統状態が変更することによってシステムの特性も変化するために, さまざまな潮流状態で最適な制御系を設計するためには, 複数の潮流断面を考慮した固有値制御手法による設計を行う必要がある。

5. UPFC による電力系統安定化制御

(5.1) 変換器定格を考慮した場合の UPFC の制御系の有効性 UPFC の変換器定格を考慮に入れた制御系の効果を検証するために, 事故後の系統動揺時の UPFC の操作変数の限界値の決定を以下の 2 とおりで行った。

Case A 操作変数の限界値をオンラインで変更するのではなく, $|V_U| \leq 0.2$ p.u., $|Q_{inj}| \leq 0.2$ p.u. で固定とし, 事故後の系統動揺時も変更しない場合

Case B 図 6 の制御系および図 7 の指令値決定アルゴリズムにより, 操作変数の限界値をオンラインで変更する場合

なお, Case A は, 定常状態において操作変数の限界値を決定している。そのため, 系統動揺時において, 変換器通過皮相電力に制限を与えていないこととなる。検討は図 5 の 3 機 9 母線系統で行い, UPFC の制御系は表 3 の方法 2 の制御系とした。機器の定格は, 直列側印加電圧定格 0.2 p.u., 変換器通過皮相電力定格 0.2 p.u. である。図 11 に, 想定した事故時に対するシミュレーション結果を示す。また, 図 12 に, 提案したアルゴリズムによる操作変数の指令値の変更の様子を示す。

この結果, UPFC の変換器通過皮相電力をオンラインで推定し, UPFC の操作変数の内部制御系への指令値を変更することによって, 系統動揺抑制効果は若干悪化するが, 図 11(c)・(d) の Case A のように, UPFC の変換器通過皮相電力の定格を著しく超えることはなかった。

なお, 図 12(a) において, 変更された印加電圧 V_U^s の指定値が, パルス状に変化しているのは, 図 11, 図 12 をみてわかるように, 系統動揺中に変換器通過皮相電力が限界に近づき, かつ, node i と node j の間に大きな電流が流れている場合には, UPFC の印加電圧の大きさを非常に小さくしなければ, 変換器通過皮相電力を定格範囲内にすることができないためである。

(5.2) 選択する制御対象固有値と系統動揺抑制効果の関係 本節では, 固有値制御手法で選択する制御対象固有値と系統動揺抑制効果の関係を解析するために, 電力動揺モード 1 のみを制御対象固有値として制御系設計を行った場合 (Case 1) と, 電力動揺モード 1 とモード 2 の両方を制御対象固有値として設計を行った場合 (Case 2) の制

表 5 UPFC の定常値およびグローバル制御系パラメータ (2)
Table 5. Steady-state values and control parameters of UPFC (2)

定常値			V_U の制御系			ϕ の制御系			Q_{inj} の制御系		
V_U	ϕ	Q_{inj}	$K_{\omega 1}$	$K_{\omega 2}$	$K_{\omega 3}$	$K_{\omega 1}$	$K_{\omega 2}$	$K_{\omega 3}$	$K_{\omega 1}$	$K_{\omega 2}$	$K_{\omega 3}$
0.1	182.1	0.1	-0.22	-24.53	45.0	40.0	-40.0	-40.0	-55.0	55.0	-55.0

(注意) V_U , Q_{inj} の定常値の単位は [p.u.] , ϕ の単位は [deg] である。

御効果の比較を行う。UPFC の制御系は、グローバル情報を制御入力とする図 8(a) の構成とした。Case 1 で設計された制御系は、表 3 の方法 2 の制御系と同じである。Case 2 で設計された制御系を表 5 に示す。電力動揺モードの改善効果の比較を表 6 に示す。また、想定した事故に対する動揺抑制効果の違いを図 13 に示す。

(a) 発電機 2 内部位相角偏差 (G1 基準)

(b) 発電機 3 内部位相角偏差 (G1 基準)

(c) Inv. 1 通過皮相電力 P_{QIN1}

(d) Inv. 2 通過皮相電力 P_{QIN2}

図 11 制御効果および変換器通過電力の比較
Fig.11. Comparison of dynamic behavior

(a) UPFC 印加電圧の大きさ V_U

(b) UPFC 供給無効電力 Q_{inj}

図 12 操作変数の指令値の変更の様子 (Case B)

Fig.12. Behavior of control output variables of UPFC

表 6 電力動揺モードの改善効果の比較 (制御対象固有値の違い)

Table 6. Comparison of real parts of power swing modes (for different controlled eigenvalue)

	モード 1	モード 2
UPFC なし	-1.10×10^{-3}	-1.96×10^{-3}
Case 1	-2.11×10^{-2}	-2.68×10^{-3}
Case 2	-5.24×10^{-3}	-4.30×10^{-3}

表 6 より, Case 2 では, モード 1, モード 2 ともに安定にすることはできているが, いずれのモードもその制御効果は大きくない。一方, Case 1 では, モード 2 はあまり安定化されていないが, モード 1 に対する制御効果が非常に大きい。図 13 より, Case 2 は, Case 1 に比べ過渡安定度向上効果は小さいことがわかる。これは, 検討に用いた潮流状態における事故後の系統動揺では, G1 と G2, G3 の動揺であるモード 1 が支配的であり, G2 と G3 の動揺であるモード 2 は, 系統動揺にほとんど現れないため, Case 1 に比べ Case 2 の過渡安定度向上効果が小さくなってしまったと考えられる。

(5.3) 制御入力の違いと電力動揺抑制効果の関係
本節では, グローバルな遠隔情報を用いて UPFC の制御

表 7 UPFC の定常値およびローカル制御系パラメータ (3)

Table 7. Steady-state values and control parameters of UPFC (3)

UPFC の定常値			V_U の制御系			ϕ の制御系			Q_{inj} の制御系	
V_U	ϕ	Q_{inj}	K_P	T_{P1}	T_{P2}	K_P	T_{P1}	T_{P2}	K_{V1}	K_{V2}
0.1	200.48	-0.1	0.45	0.3 s	0.319 s	-0.638	0.3 s	0.143 s	2.5	-0.55

(注意 1) V_U , Q_{inj} の定常値の単位は [p.u.] , ϕ の単位は [deg] である。

(注意 2) ここで, 定常値が $V_U = 0.1$ [p.u.] , $\phi = 200.48$ [deg] となっているが, 制御系の初期値としては, $V_U = -0.1$ [p.u.] , $\phi = 20.48$ [deg] を用いる。

を行う場合 (グローバル制御) とローカルな情報を用いて UPFC の制御を行う場合 (ローカル制御) の系統動揺抑制効果の比較を行う。

グローバル制御では, UPFC の 3 つの操作変数をすべて, すべての発電機の角速度偏差を制御入力とする図 8(a) の制御系で制御する。ローカル制御では, V_U , ϕ を操作変数とする直列側印加電圧制御は, 設置送電線通過有効電力を制御入力とする図 8(b) の制御系で, Q_{inj} を制御変数とする分路側供給無効電力制御は, 設置端端子電圧を制御入力とする図 8(c) の制御系でそれぞれ制御する。

制御対象固有値は, 電力動揺モード 1 だけとした。設計されたローカル制御系を表 7 に示す。なお, UPFC 設置送電線通過有効電力 P_{Sr} を制御入力とする制御系設計を行う際に, 設計が容易なように, $T_{P1} = 0.3$ s として, T_{P2} だけを固有値制御手法により設計した。

設計された制御系による電力動揺モードの改善効果の比較を表 8 に示す。また, 想定した事故に対する動揺抑制効果の比較を図 14 に示す。

表 8 電力動揺モードの改善効果の比較 (制御入力の違い)

Table 8. Comparison of real parts of power swing modes (for different control input)

	モード 1	モード 2
UPFC なし	-1.10×10^{-3}	-1.96×10^{-3}
グローバル制御	-2.11×10^{-2}	-2.68×10^{-3}
ローカル制御	-8.84×10^{-3}	-2.26×10^{-3}

この結果, グローバルな情報を用いて制御する方が, ローカルな情報を用いて制御するよりも, 定常安定度, 過渡安定度ともに安定化効果が大きいことがわかった。

さらに, ローカルな情報を用いた場合で, モード 1 とモード 2 を制御対象固有値として制御系を設計したが, 2 つのモードとも安定化するような制御系を設計することはできなかった。

以上より, グローバルな情報を用いた場合, 電力動揺モード 1・モード 2 に対して観測性があり, その大きさも大きいのにに対して, ローカルな情報を用いた場合, 電力動揺モード 1 に対する観測性はグローバル情報を用いた場合に比べて小さく, モード 2 に対しての観測性は, この系

統状態, 解析条件においてはなないと考えられる。

6. おわりに

本稿では, Unified Power Flow Controller (UPFC) による電力系統ダンピング向上制御について検討した。その結果, 以下のようなことが明らかとなった。

系統動揺抑制のための UPFC の制御系設計方法について検討した。その結果, UPFC の操作変数の定常値や系統状態が UPFC の制御効果に大きな影響を与えるために, UPFC の操作変数の定常値の決定と UPFC の制御系パラメータは同時に行わなければならないことがわかった。さらに, 設計の際に安定化の対象とするモードは, その系統において支配的なモードを選択して制御系を設計しなければならない。

また, UPFC の定格は構成する自動式変換器の変換器通過皮相電力定格で決定されるが, 変換器通過皮相電力は, UPFC の操作変数だけでなく, 設置端端子電圧の影響も受けるため, 系統事故時のように端子電圧が大きく変化する場合, 変換器定格以上の電力が流れるおそれがある。そこで, 本論文では, UPFC の操作変数の設定値をオンラインで決定することにより, 事故後の系統動揺時にも UPFC の定格範囲内で運転可能な制御アルゴリズムを示し, その有効性を確認した。

最後に, 小規模系統において, UPFC への制御入力の違いによる系統安定化効果の比較を行った。その結果, 発電機の角速度偏差のようなグローバルな情報を用いた制御の方が, 設置送電線通過有効電力や設置端端子電圧偏差のようなローカルな情報を用いた制御よりも系統安定化効果が大きいことが明らかとなった。

今後の課題として, 以下のようなことが挙げられる。まず, 定格を考慮した場合の制御系において, 変換器通過皮相電力の推定が十分でないため, UPFC の動作遅れや UPFC の操作変数の変更による系統状態の変化を考慮することによって, より一層精度の良い推定を行う必要がある。さらに, 推定により変換器通過皮相電力が定格を越えると判断された場合, 直列側印加電圧の大きさの指令値の変更を行ったが, 第 1 波, 第 2 波の過渡動揺抑制効果も考慮した指令値の変更方法の検討が必要である。次に, 大規模系統を用いて, 設置位置, 容量と系統安定化効果の関係について検討する必要がある。また, 自動式 SVC や可変

(a) 発電機 2 内部位相角偏差 (G1 基準)

(b) 発電機 3 内部位相角偏差 (G1 基準)

(c) UPFC 印加電圧の軌跡 (モード 1 のみ)

(d) UPFC 印加電圧の軌跡 (モード 1 と モード 2)

(e) UPFC 供給無効電力 Q_{inj}

図 13 制御対象固有値の違いによる過渡動揺抑制効果の比較

Fig.13. Dynamic behavior for different controlled eigenvalue

(a) 発電機 2 内部位相角偏差 (G1 基準)

(b) 発電機 3 内部位相角偏差 (G1 基準)

(c) UPFC 印加電圧の軌跡 (グローバル制御)

(d) UPFC 印加電圧の軌跡 (ローカル制御)

(e) UPFC 供給無効電力 Q_{inj}

図 14 制御入力の違いによる過渡動揺抑制効果の比較

Fig.14. Dynamic behavior for different control input

直列コンデンサなどの従来から提案されているパワエレ機器との系統安定化効果の比較を行う必要がある。一方、UPFCの直列側印加電圧に対する操作変数として電圧の大きさ V_U と位相角 ϕ を用いるかわりに、分路側端子電圧を基準とした $d, q2$ 軸に分解した場合の妥当性も検討する必要がある。(平成10年4月23日受付、同10年10月12日再受付)

文 献

- (1) 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」, 電気学会論文誌B, 113巻3号, pp.203-212, 平成5年3月
- (2) 河野, 中島, 横山:「変換器の定格を考慮したUPFCによる過渡安定度向上制御」, 電気学会電力技術研究会資料, PE-98-11, 平成10年5月
- (3) C. Schauder, E. Stacey, M. Lund, L. Gyugyi, L. Kovalsky, A. Keri, A. Mehraban, A. Edris: "AEP UPFC Project: Installation, Commissioning and Operation of the ± 160 MVA STATCOM (Phase I)" IEEE Power Engineering Society (PES) Winter Meeting, PE-515-PWRD-0-12-1997, Feb. 1998
- (4) 加藤, 森岡 他:「UPFCの試作と送電機能向上効果の検証」電気学会電力・エネルギー部門大会, 論文I, 27, 平成9年7月
- (5) M.Noroozian, L.Aangqusit, M. Ghandhari, G. Andersson "Series-connected FACTS Devices Control Strategy for Damping of Electro-mechanical Oscillations" 12th-PSCC, Proc., August, 1996, pp.1090-1096
- (6) 関根:「電力系統過渡解析論」, オーム社 (1984)
- (7) 前田, 横山, 関根:「電力系統安定化のための最適動作点設定による固有値制御とそのアルゴリズム」電気学会論文誌B, 107巻5号, pp.221-228, 昭和62年5月
- (8) 横山, 前田, 関根:「固有値制御のための系統動作点に対する固有値感度解析」, 電気学会論文誌B, 107巻4号, pp.181-188, 昭和62年4月

河野 啓利 (正員)

昭和48年12月12日生。平成8年3月東京大学工学部電気工学科卒業。10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。同年4月より東京電力(株)勤務。

中島 達人 (正員)

昭和37年11月13日生。平成2年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月東京電力(株)入社。電力技術研究所パワーエレクトロニクスグループにてパワーエレクトロニクス利用技術の研究に従事し、現在に至る。工学博士。IEEE会員。

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門課程博士課程修了。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。