UPFC を用いた電力動揺線形化に基づく 系統安定化制御の実験による検討

正員 北 條 昌 秀 (徳島大学)
 学生員 Duangkamol Kamolyabutra (大阪大学)
 正員 三 谷 康 範 (大阪大学)
 正員 伊 瀬 敏 史 (大阪大学)
 正員 辻 毅一郎 (大阪大学)

Experimental Study on Power System Stabilization by UPFC with Linearizing Control of Power Swing

Masahide Hojo, Member (The University of Tokushima), Duangkamol Kamolyabutra, Student Member, Yasunori Mitani, Member, Toshifumi Ise, Member, Kiichiro Tsuji, Member (Osaka University)

With the advancement of power electronics technologies, it has become feasible to control the line power flow directly and quickly. In the circumstances, the direct power control of generator in order to linearize the power swing property has been developed. The controller is robust in the sense that the control parameters do not have to be adjusted even if the operating point of the power system is changed. The effectiveness has been confirmed by a series of simulation studies. In this paper, the feasibility of control strategy is confirmed by several experimental results using a 10kVA model power transmission system. First, the control scheme to adjust the generator power to the specified signal is implemented in the experimental system, which is extended to the control strategy for the power swing linearization. The capability of generator power direct control by Unified Power Flow Controller (UPFC) is confirmed by the experiments in which the generator power is controlled to follow the specified sinusoidal waveform. Some experimental results demonstrate the significant effect on the power system stabilization and the robustness of the proposed controller of power swing.

キーワード：UPFC，線形化，系統安定化，発電機出力制御

1. ま え が き

近年，電力需要の拡大に対して，電源立地の困難さから大容量長距離送電が余儀なくされ，それに伴い送電容量ならびに系統の過渡安定度がしばしば問題となっている。これに対して，パワーエレクトロニクス技術の進歩を背景に，米国においては FACTS (Flexible AC Transmission System) 構想が提唱され，電力系統における諸問題解決の新たな糸口として様々な制御機器が提案・検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。FACTS 機器と呼ばれるこれらの新しい制御機器は系統の諸量を柔軟に制御できることが特徴であり，例えば送電線の電力を直接かつ高速に操作することも容易に実現できるようになってきている。

これまでに筆者らは FACTS 機器の系統安定化制御への応用として，動揺方程式を線形化する安定化制御の方式

を提案し⁽³⁾，その検討を進めてきた。発電機動揺の安定性を考えるとき，発電機の電氣的出力が位相角に関する三角関数で表されることに起因する非線形性が要因となって，大擾乱発生後に同期はずれを引き起すことがよく知られている。これに対し上述の制御方式は，送電線潮流の制御が可能な可変リアクタンス機器などの FACTS 機器によって発電機の電氣的出力を直接制御し，動揺方程式を安定でかつ線形な 2 次系とするものである。この手法を適用した結果，制御系の設計手順や系統の過渡特性が系統のパラメータ変動等によって影響されないといった制御系のロバスト性の向上が期待できる。これまでに，その制御効果について計算機シミュレーションによる様々な角度からの検証を行ってきた^{(3)~(6)}。

本論文は，Unified Power Flow Controller (UPFC)⁽⁷⁾

が設置された長距離大容量送電システムを模擬した実験装置⁽⁸⁾を用いて、上述の電力動揺線形化制御の実験的な検証を行った結果について述べたものである。以下では、まず電力動揺線形化制御を模擬実験装置の UPFC へ実装するための制御系の構成法について説明する。次に、電力動揺線形化制御に必要な、指令信号に対する加速電力の追従制御の試験を行った結果について述べる。そのうえで UPFC を用いた電力動揺線形化制御による系統安定化実験の結果に基づいて制御特性ならびにロバスト性を検証し、電力動揺線形化制御の有効性を確認する。

2. 実験システムの構成

図 1 に実験システムの構成を示す。本実験システムは模擬電力系統と送電線に設置された UPFC により構成される。

模擬電力系統は長距離大容量送電システムを想定した一機無限大母線系統となっており、百万 kW 級の原子力発電機 2 台を有する発電所から、500kV で約 200km の送電線を介して大容量の系統に送電している場合を模擬した構成となっている⁽⁸⁾。模擬発電機は定格が 10kVA/230V/1800rpm の同期発電機で、直流電動機により駆動されており、発電機の励磁系及び直流電動機の制御によりそれぞれ AVR、調速機が模擬されている。送電線は 1 ユニットの 500kV、二回線 40km に相当する RLC の π 形構成(線間電圧 460V)である。本実験システムの定数は表 1 に示す通りである。

図 1 実験システムの構成

Fig. 1. Configuration of the experimental system.

表 1 系統の定数

Table 1. System Constants.

発電機 (10kVA, 230V ベース値)	
慣性定数	$M = 8.0 \text{ s}$
直軸同期リアクタンス	$x_d = 1.35$
直軸過渡リアクタンス	$x'_d = 0.48$
横軸同期リアクタンス	$x_q = 1.31$
直軸開路時定数	$T'_{do} = 0.21 \text{ s}$
定格角速度	$\omega_r = 120\pi \text{ rad/s}$
送電系統 (10kVA, 460V ベース値)	
変圧器のリアクタンス	$X_T = 0.15$
送電線のリアクタンス	$X_L = 0.046$
送電線の抵抗	$R_L = 0.005$
送電線の静電容量	$B_L = 0.027 \times 2$
里側の短絡リアクタンス	$X_S = 0.14$

ただし、模擬発電機では界磁回路の抵抗分が大きいために電流の減衰が速いことから、開路時定数 T'_{do} の値が実系統での値(通常 4~9 秒とされている)に比べて極めて小さくなっている。

図 2 は本実験装置に設置されている UPFC の構成を示している。UPFC は、系統に直列に接続された 3 台の単相インバータと並列に接続された三相インバータを直流側で接続した構成となっており、その仕様は表 2 に示す通りである。それぞれのインバータの制御については様々な方式が提案されており⁽⁹⁾、送電線潮流を制御可能な機器として注目を浴びている。

3. 実験システムへの電力動揺線形化制御の実装

〈3・1〉 電力動揺線形化制御 電力動揺線形化制御に関しては、文献⁽³⁾⁽⁵⁾で詳しく述べられているので、ここでは簡単にその原理を説明する。

多数の同期発電機を含む電力系統は、一般に高次の微分

図 2 UPFC の構成

Fig. 2. Configuration of UPFC.

表 2 UPFC の仕様

Table 2. Specification of UPFC.

直列インバータ (単相 PWM インバータ 3 台)		
変圧器 T_{rs}	1 次側電圧	460V
	2 次側電圧	115V
インバータ	容量	2.6 kVA $\times$ 3
	直流側電圧	70V
	使用素子	IGBT
並列インバータ (三相 PWM インバータ)		
変圧器 T_{rp}	1 次側電圧	460V
	2 次側電圧	31.3V
インバータ	容量	8.0 kVA
	直流側電圧	70V
	使用素子	IGBT
直流側		
コンデンサ	電解コンデンサ C_{dc}	12000 μ F $\times$ 12 並列

方程式と代数方程式で記述される大規模な非線形システムである。そのうち、系統内のある同期発電機1機に注目すると、電力動揺は次の2次微分方程式で表される。

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_r \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{M}{\omega_r} \frac{d\omega}{dt} + \frac{D}{\omega_r} (\omega - \omega_r) = P_m - P_e \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 δ , ω は注目した発電機の回転子角 [rad] 及び角速度 [rad/s], ω_r は定格角速度 [rad/s], M は慣性定数 [s], D は制動係数 [p.u.], P_e は電気出力 [p.u.], P_m は機械入力 [p.u.] である。

このとき、(1), (2) 式は右辺 $P_m - P_e$ を加速入力とする線形な2次振動系と考えることができる。いま、(2) 式の右辺を発電機の加速電力 P_a [p.u.] として

$$P_a = P_m - P_e \dots\dots\dots (3)$$

とおく。このとき、発電機電力が発電機位相角の三角関数で表されることに代表される非線形性は、(1), (2) 式において P_a のみに現れていることに注意して、 P_a を次の指令値 P_a^* に完全に追従させる制御を施す。

$$P_a^* = \frac{M}{\omega_r} \{ \beta_1 \Delta\delta + (\beta_2 + \frac{D}{M}) \Delta\omega \} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\Delta\delta$ は回転子角 δ の初期値からの偏差 [rad], $\Delta\omega$ は回転子角速度 ω の定格角速度からの偏差 [rad/s] で $\Delta\omega = \omega - \omega_r$ であり、 β_1 [1/s²], β_2 [1/s] は制御のための定数である。

このような制御は発電機の出力電力を直接制御することで実現できるが、UPFCを用いた詳しい実現方法については次項で述べる。いま、この追従制御が十分速く動作し、(3) 式と(4) 式において $P_a = P_a^*$ とおくことができるものと仮定すると、動揺方程式は

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \beta_1 \Delta\delta + \beta_2 \Delta\omega \dots\dots\dots (6)$$

のように書き直すことができ、ここに動揺方程式は線形化される。(5), (6) 式の固有値 $-\sigma \pm j2\pi/T_e$ は(7) 式で与えられる。

$$-\sigma \pm j2\pi/T_e = \beta_2/2 \pm j\sqrt{\beta_2^2 + 4\beta_1/2} \dots\dots\dots (7)$$

従って、例えば線形化後のシステムの仕様として σ と T_e を指定すれば、(7) 式より β_1 , β_2 を求めて制御系を設計することができる。また、線形化が実現しているときには(5) 式及び(6) 式で記述される線形システムとなるため、運用点の変更の際しても制御系の再設計をすることなく一定の制御効果が得られるという意味でロバストな系統安定化制御系となっている。

(3・2) UPFCによる加速電力の追従制御 本項では、前項の電力動揺線形化制御の導出において仮定した加速電力の指令値 P_a^* に対する加速電力 P_a の追従制御について、図2のUPFCを用いて発電機出力を直接制御することにより実現する方法を述べる。

本研究では、UPFCの制御モードとしてSSSC (Static Synchronous Series Compensator)⁽¹⁰⁾ を模擬した制御モードを設定した。すなわち、直列インバータによる送電線の無効電力制御により発電機出力を制御することとし、一方で並列インバータは実験装置内での損失分を補償して直流コンデンサ電圧を一定に保つだけで電力系統に対して積極的な制御は行わないことにした。

直列インバータの無効電力 Q_s を、加速電力追従制御の誤差信号 $\tilde{P}_a - P_a^*$ に基づいて次式のようにゲイン K_v で比例制御することにする。

$$Q_s = K_v (\tilde{P}_a - P_a^*) \dots\dots\dots (8)$$

このとき、UPFC設置端の電圧 $\tilde{V}_i$ を位相基準とした直列インバータの出力電圧 $\tilde{V}_s$ の大きさ V_s 及び位相 θ_s は次のように決定される。送電線電流 $\tilde{I}$ の大きさを I , 位相を θ_I とすると、 $|Q_s| = 3V_s I$ より、

$$V_s = \frac{|K_v (\tilde{P}_a - P_a^*)|}{3I} \dots\dots\dots (9)$$

直列インバータの変調率を M_s , 直列変圧器の変圧比を n_s , UPFCの直流側電圧を V_{dc} とすると、

$$V_s = \frac{1}{\sqrt{2}} n_s M_s V_{dc} \dots\dots\dots (10)$$

であるから、変調率 M_s は

$$M_s = \frac{\sqrt{2}}{3n_s I V_{dc}} |K_v (\tilde{P}_a - P_a^*)| \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。

一方、制御角 θ_s は、 $\tilde{V}_s$ の位相は送電線電流に直交するように制御されるので、 θ_I を用いて、

$$\theta_c = \begin{cases} \theta_I + 90^\circ & (Q_s \geq 0) \\ \theta_I - 90^\circ & (Q_s < 0) \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

で与えられる。ここで、 θ_I は送電線路を流れる有効・無効電力 P_i , Q_i を用いて

$$\theta_I = \frac{Q_i}{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}} \dots\dots\dots (13)$$

で求めることができる。

ただし、この発電機出力制御の効果は一時的なものであり、時間が経つと発電機位相角が新しい平衡点へ移動し、それとともに発電機出力の値は制御前の値に復帰する。本研究の発電機出力制御は、与えられた指令値との偏差をフィードバックした比例制御を適用して、発電機の動揺中にその動揺よりも十分速い制御で所望の電力値に制御するものである。

図3 制御系の構成

Fig. 3. Configuration of the controller.

(3・3) 信号検出回路を含む制御系の構成 以上の電力動揺線形化制御を模擬実験装置へ実装するにあたっては、次のような問題が考えられる。まず、(4)式で必要としている同期発電機の回転子角 δ 及びその初期値 δ_0 、ならびに発電機の加速電力 P_a をリアルタイムに知ることは一般に困難とされている。また、1回線開放など、システムの構成が変更され、平衡点が移動するような場合、 $\Delta\delta$ には定常的な偏差が含まれることになる。

そこで、回転子角については角速度偏差 $\Delta\omega$ を用いて $\Delta\delta$ を近似的に得ることとする。(5)式より定義上は $\Delta\delta$ は $\Delta\omega$ の積分であるが、ここでは上で述べた δ_0 の定常的な変化分や雑音による直流偏差の除去を考慮して近似信号 $\Delta\tilde{\delta}$ を生成し、 $\Delta\delta$ の代用とする。

また、加速電力については、外乱発生後の比較的短い期間の安定化制御を検討するので調速機の応答は電力動揺に比べて十分に遅いと考えることとする。このとき、(3)式より $P_e = P_m - P_a$ であるから、発電機出力 P_e を検出し、1 [Hz] 付近を十分に通過させる帯域通過フィルタを通して P_m を除去して得た信号を P_a の近似値 $\tilde{P}_a$ として利用することとする。

以上、図2の直列インバータ出力制御部に電力動揺線形化制御を適用した場合の制御系構成を図3にまとめて示す。

4. 加速電力追従制御の周波数特性

電力動揺線形化制御のために必要な加速電力の追従制御の制御特性を確かめるために、システム安定化実験に先だって以下の実験を行った。模擬電力システムを $P_e = 8.0$ [kW]、 $V_t = 240$ [V] で運用中に、図2のように構成した制御系の上で安定化制御信号 P_a^* の代わりに

図4 加速電力の追従制御

Fig. 4. Results of generator power control.

$$P_a^* = \sin(2\pi f^* t) \quad [\text{kW}] \quad \dots \quad (14)$$

で表される一定振幅の加速電力の動揺信号を与えて発電機出力の制御実験を行った。ここで、追従制御のための比例ゲイン K_v は $K_v = -1.0$ としている。模擬電力システムの固有周波数が1 [Hz] 付近であることと、システム安定化制御では同期化力を高めるように制御信号を与えることから、動揺信号の周波数 f^* を1.0、1.5及び2.0 [Hz] としたときの加速電力の追従制御の結果を図4に示す。ただし、いずれの場合もUPFCの制御は時刻0.1 [s] に開始した。

図5 加速電力の追従制御 ($f^* = 0.1$ [Hz])

Fig. 5. Results of generator power control when $f^* = 0.1$ [Hz].

図4をみると、(a)と(b)の結果が良好であるのに対し、(c)の場合には追従の精度が悪化している。追従精度の改善のためには比例制御のゲイン K_v の値を増加することが考えられるが⁽³⁾、 K_v の値を増加すると後述するように模擬実験装置で使用した小型同期発電機に特有の現象である励磁制御とUPFCの制御との相互干渉に起因する振動現象を増長させる結果となった。しかし、通常の電力動揺の周波数領域である1[Hz]程度の波形に対しては、これまでに文献(6)で報告した実効値解析の結果と同様に、十分な追従特性を得ることができた。

一方、図5のように、 $f^* = 0.1$ [Hz] の場合には電力が小さく振動的になるのみで追従制御が実現していない。この場合、UPFCは P_a^* の変化に合わせてゆっくりと操作量を変化させるが、発電機の位相角がこれより速く変化して $P_a = 0$ となる平衡点に推移するため、図4のような発電機出力の過渡的な変化は生じないと考えられる。

5. 系統安定化実験による制御特性とロバスト性の評価

〈5・1〉 電力動揺線形化制御による系統安定化 まず、表3に示す実験条件のもとで系統安定化実験を行った結果について検討を行う。線形化後のシステムの固有値については、前節の追従制御の結果を踏まえて、外乱による動揺周期 T_e が1[s]、また減衰時定数 $1/\sigma$ は1[s]に設定した。このとき、(7)式より制御定数 β_1 、 β_2 は $\beta_1 = -40.5$ 、 $\beta_2 = -2.0$ である。

表3 実験条件

Table 3. Basic conditions for experiments.

系統運転条件	発電機出力 $P_e = 8.0$ kW 発電機端子電圧 $V_t = 240$ V
故障条件	場所 送電線の発電機端 故障 三相短絡故障 継続時間 時刻 0.5sより5サイクル
固有値指定	減衰時定数 $1/\sigma = 1.0$ 動揺周期 $T_e = 1.0$

また、(4)式のように制御系が使用する定数として、慣性定数 M は表1の値を用いた。また、系統固有の制動係数の算出が困難であるため、制動係数 D は0とした。(4)式をみるとわかるように β_2 の値を十分大きく設定すれば、 D の設定誤差が制御効果に与える影響は小さい⁽⁴⁾。

これらの実験条件のもとで、故障に続く過渡動揺に対する電力動揺線形化制御による系統安定化効果を実験により

図6 UPFCの制御を行わない場合の応答
Fig. 6. System response without UPFC.

図7 電力動揺線形化制御の効果

Fig. 7. The effect of control linearizing power swing.

検証した結果について述べる。ただし、故障継続中は直列変圧器の2次側を短絡し、UPFCの制御は故障除去直後から行った。また、測定した系統の諸量は図1あるいは図3で示した変数に対応し、UPFCの出力電圧については、電流に対して90度進む場合を正、遅れる場合を負として符号を付けた電圧の実効値 V_s' を図示した。

図6はUPFCによる制御を行わない場合の実験結果である。図6では、長距離大容量送電系統によく見られる、減衰の悪い振動が持続していることが確認できる。

これに対して電力動揺線形化制御を適用した場合の実験結果が図7である。図7の加速電力 $\bar{P}_a$ と安定化指令信号 P_a^* の追従の様子をみると、故障除去後の過渡的な応答においては追従精度がよいものの、その後は若干の位相遅れをもちながら徐々に追従制御が実現し、安定化制御の効果としてはほぼ期待通りの結果が得られている。

〈5・2〉 電力動揺線形化制御と発電機励磁制御との干渉 図7の応答には10[Hz]程度の振動現象がみられる。この理由については次のように考えられる。模擬電力系統で使

図8 瞬時値解析による電力振動現象の検証
Fig.8. Oscillating power verified by the EMTDC simulation.

図9 $T'_{do} = 6.91$ [s] のときの瞬時値解析の結果
Fig.9. Simulation result with $T'_{do} = 6.91$ [s].

磁回路の抵抗分が大きく電流の減衰が速い。その結果、開路時定数が、一般に数秒程度といわれている実機に比べて、表1に示したように極めて小さい値となっている。このためUPFCの動作速度とほぼ同等の応答速度を持って発電機励磁系が動作し、発電機の励磁系とUPFCによる発電機出力制御との間で相互干渉が生じた結果、問題の振動現象が現れたと考えられる。

そこで、模擬電力システムのパラメータ値を設定したシミュレーションモデル⁽¹¹⁾を用いて瞬時値解析⁽¹²⁾を行った結果、図8に示すように定常状態においてUPFCによる電力制御を投入した時点から過渡動揺中に渡って持続振動が観測された。

これに対して、界磁回路の時定数のみを文献(6)で用いた大型機の定数 6.91 [s] に変更して同条件のもと再度瞬時値解析を行ったところ、図9に示すように、振動現象は観測されなくなった。

また、大型機のパラメータを用いた実効値解析による数値計算結果⁽³⁾⁽⁶⁾においてもこのような振動現象は観測されていない。このことから、この現象は小型機を使用した模擬実験装置に特有の現象と考えられ、以下の実験においては振動現象が不安定とならない範囲で電力追従制御の比例ゲインをなるべく大きく設定し、 $K_v = -1.0$ としている。

〈5・3〉電力動揺線形化制御による固有値指定 電力動揺線形化制御では線形化後のシステムの特性を制御ゲイン β_1 , β_2 を用いて指定することができる。 β_1 は同期化力に、 β_2 は制動に関係する。そこで、前項で用いた定数に対して、表4に示したさらに2つのケースの極指定を行った場合の実験結果を図10及び図11に示す。

図10は、電力動揺の減衰を速くする目的で減衰時定数を0.5[s]と指定したときの制御結果である。図10の結果

表4 固有値指定の例

Table 4. Assigned eigenvalues

ケース	σ [1/s]	T_c [s]	β_1	β_2
表3の指定	1.0	1.0	-40.5	-2.0
1	2.0	1.0	-43.5	-4.0
2	1.0	0.6	-109	-2.0

図10 電力動揺線形化制御の効果（ケース1）
Fig.10. The effect of control linearizing power swing (case 1).

図11 電力動揺線形化制御の効果（ケース2）
Fig.11. The effect of control linearizing power swing (case 2).

と図7の結果を比較すると、制動が大きくなっており、減衰時定数を小さくした効果が表れている。ただし、この場合前項で述べた相互干渉による振動がやや不安定になっているが、これは電力動揺の制動を高めたことにより操作量が大きくなり、等価的に制御ゲインが大きくなったためである。

また、電力動揺の周期を短くすることを目的として、動揺周期を0.6[s]としたケース2の場合の制御結果を図11に示す。図11の結果をみると、追従制御のゲイン不足のために指定した動揺周期にはならなかったものの、図7の結果に比べて動揺周期を短くした効果が表れている。

以上のように、電力動揺線形化制御は固有値指定によって線形化後のシステムを希望する過渡特性に近づけることが可能であることがわかった。

〈5・4〉動態安定度向上効果の検証 発電機出力を増加していくと、9 [kW]を超えた付近から図12のように持続

図 12 不安定な発電機出力
Fig. 12. Unstable generator power.

図 13 発電機出力動揺の安定化
Fig. 13. Control effect of generator power.

図 14 制御を停止した場合の結果
Fig. 14. Generator power when the control signal is blocked.

的な動揺を始め、不安定な状態になる。

この状態で、UPFCによる制御を行うと、図 13 に示すように発電機出力の動揺は安定化される。ただし、制御は同図の時刻 1.5 [s] に開始している。

安定化制御を行った状態で発電機出力を 10.5 [kW] に設定しても系統は安定に運転することができた。このとき、ゲート信号をブロックし UPFC による制御を時刻 1.5 [s] に停止すると、図 14 のように再び動揺を始めるようになった。

この結果から、電力動揺線形化制御は系統の動態安定度の向上に効果があり、送電容量の増大効果が期待できる。

〈5.5〉制御系のロバスト性の評価 次に、制御系の設定はそのままにして、系統の動作点を変更した場合に、発電機出力の指定値を $P_e = 9.0$ [kW] として外乱に対する制御系の系統安定化効果を確認した実験結果が図 15 である。

まず、制御を行わない場合の図 15 (a) を図 6 と比べると、動揺の周期が若干長くなっている。これは、発電機出力を増加して動作点が変わったことにより同期化力が低下したことを表している。しかし、電力動揺線形化制御を適用すると、図 15 (b) のように、新しい動作点においてもほぼ一定の制御結果を得ることができた。

さらに、発電機出力 $P_e = 9.0$ [kW] で端子電圧の基準値

(a) 制御を行わない場合

(b) 制御を行った場合

図 15 各部の応答波形 ($P_e = 9.0$ [kW])
Fig. 15. System response when $P_e = 9.0$ [kW].

(a) 制御を行わない場合

(b) 制御を行った場合

図 16 各部の応答波形
($P_e = 9.0$ [kW], $V_g = 230$ [V])

Fig. 16. System response when $P_e = 9.0$ [kW], $V_g = 230$ [V].

を 230 [V] に下げて同じ実験を行った結果を図 16 に示す。図 16 (a) を見ると、基準電圧を下げたために系統がより不安定になっているようすがわかる。しかし、このような場合であっても、図 16 (b) から、電力動揺線形化制御によって、ほぼ一定の制御特性を実現できた。

以上のように、電力動揺線形化制御は系統の動作点変更に対して制御効果が一定であるという意味でロバストであることが確かめられた。

6. むすび

本論文では、著者らがこれまでに計算機シミュレーションによって検討を行ってきた電力動揺線形化制御を、模擬電力系統に設置された UPFC に適用し、実験を行った結果に

について考察を述べた。以下に実験結果と考察を要約する。

- (1) UPFC の直列インバータ出力電圧の制御により、発電機の出力を高速に直接制御する方法について述べた。
- (2) 制御に必要な信号処理を含めた電力動揺線形化制御系の模擬実験装置への実装を行った。
- (3) UPFC によって発電機の出力が直接制御可能であることを実験により確認した。
- (4) 電力動揺線形化制御による系統安定化実験を行い、効果的な安定化が達成できること、過渡動揺中の動特性を設計時に指定した線形システムの特性に近付けられること、動態安定度向上に寄与することで送電容量の増大が見込まれること、さらには制御効果が系統の運用状態によっても影響を受けないことが確かめられた。

以上の結果から、電力動揺線形化制御は実系統においても十分に有効であることが期待される。

(平成 10 年 12 月 25 日受付, 同 11 年 8 月 11 日再受付)

文 献

- (1) IEEE FACTS Working Group and Cigré FACTS Working Group: FACTS Overview, IEEE 95 TP 108, 1995.
- (2) IEEE Power Engineering Society: FACTS Applications, IEEE 96 TP 116-0, 1996.
- (3) 北條昌秀, 三谷康範, 辻穀一郎: 「直列可変インピーダンスを用いた発電機電力の直接制御によるロバスト系統安定化制御」, 電学論 B, Vol. 117-B, No.7, pp.985-990, 1997.
- (4) 北條昌秀, 三谷康範, 辻穀一郎: 「FACTS 機器を用いた発電機電力直接制御によるロバスト系統安定化」, 平成 9 年電力技術・電力系統技術合同研究会, PE(PSE)-97-164, pp.31 - 36, 1997.
- (5) 北條昌秀, 三谷康範, 石井潤一, 伊瀬敏史, 辻穀一郎: 「発電機制御における移相器の制御可能領域の定式化と評価」平成 10 電気学会電力・エネルギー部門大会論文 I, 24, pp.147 - 152, 1998.
- (6) M. Hojo, Y. Mitani and K. Tsuji: "Robust Control for Power System Stabilization by Solid-State Phase Shifter", Proc. of 13th Power Systems Computation Conference, Vol. 2, pp.1229-1234, 1999.
- (7) L. Gyugi, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson and A. Edris: "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp.1085-1097, April 1995.
- (8) 林孝典, 石井潤一, 伊瀬敏史, 熊谷貞俊: 「高速移相器による系統安定化制御」電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-97-29, pp.21-26, 1997.
- (9) C. D. Schauder, L. Gyugyi, M. R. Lund, D. M. Hamai, T. R. Reitman, D. R. Torgerson and A. A. Edris: "Operation of the Unified Power Flow Controller (UPFC) Under Practical Constraints", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp.630-639, April 1998.
- (10) K. K. Sen: "SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Applications", IEEE Trans. on Power, Vol. 13, No. 1, pp.241-246, January 1998.
- (11) 石井潤一, 林孝典, 伊瀬敏史, 熊谷貞俊: 「高速移相器を導入した模擬電力系統のデジタルシミュレーション」電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-97-28, pp.15-20, 1997.
- (12) O. Nayak, G. Irwin and A. Neufeld: "GUI Enhances Electromagnetic Transients Simulation Tools", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 8, No. 1, pp.17-22, January 1995.

北 條 昌 秀

(正員) 1970 年 10 月 23 日生。1999 年 3 月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。同年 4 月より徳島大学工学部電気電子工学科助手。電力系統へのパワーエレクトロニクス応用に関する研究に従事。博士 (工学)。IEEE, システム制御情報学会, パワーエレクトロニクス研究会会員。

Duangkamol Kamolyabutra (学生員) 1973 年 4 月 2 日生。1994 年

4 月 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 大学工学部電気工学科卒業。1999 年 3 月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月同大学大学院博士後期課程に進学, 現在に至る。電力系統の安定化制御に関する研究に従事。IEEE 会員。

三 谷 康 範

(正員) 1959 年 1 月 5 日生。1986 年 3 月大阪大学大学院電気工学専攻博士課程修了。1988 年 5 月同大学低温センター助手, 同工学部電気工学科講師を経て, 1994 年 10 月同助教授。電力系統の動特性解析に従事。工学博士。システム制御情報学会, IEEE 会員。

伊 瀬 敏 史

(正員) 1957 年 7 月 22 日生。1986 年大阪大学大学院博士課程修了。同年 4 月国立奈良工業高等専門学校勤務, 1990 年 7 月より大阪大学工学部電気工学科勤務, 講師を経て現在助教授。超伝導エネルギー貯蔵装置, 電力用アクティブフィルタ, 超伝導変圧器などのパワーエレクトロニクスと超伝導の応用に関する研究に従事。工学博士。システム制御情報学会, IEEE, パワーエレクトロニクス研究会会員。

辻 穀 一 郎

(正員) 1943 年 9 月 18 日生。1968 年 3 月大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。1973 年 6 月ケース工科大学大学院システム工学専攻博士課程修了。同年 8 月大阪大学工学部電気工学科助手, 同講師, 同助教授を経て, 1988 年 12 月同教授。この間, 一時国際応用システム解析研究所 (IIASA) 研究員。Ph. D.。電力・エネルギーシステムに関する応用システム分析に従事。エネルギー・資源学会, システム制御情報学会, 計測自動制御学会, IEEE 会員。