一機無限大母線系統の移相器制御による 過渡動揺抑制効果の実験と解析

正員 貝 津 弘 幸 (新潟大)

非会員 佐 藤 孝 雄 (新潟大)

学生員 沼 田 謙 二 (新潟大)

学生員 横 山 和 哉 (新潟大)

Experimental Study on the Damping Effect of Transient Swings in a Single Machine Infinite-Bus Power System using a Phase Shifter Control

Hiroyuki Kaizu, Member, Takao Sato, Non-member, Kenji Numata, Student Member, Kazuya Yokoyama
Student Member (Niigata University)

This paper describes the experimental study on the damping effect of transient swings in a laboratory size 3 kVA generator connected to an infinite-bus power system using a phase shifter with tap-changes. The phase-shift injection is implemented by thyristor-associated fast tap-changing based on a simple control rule consisting of the speed and angle deviations during transient conditions of the generator. The digital simulation studies are also carried out to test and compare the control scheme and its dynamic performances. As a result, the numerical studies show good agreement with the experimental results. The phase shifter control, as an efficient on-line controller utilizing the microcomputer, is verified to damp the transient swings caused by a fault in this system.

キーワード：電力系統，移相器，系統模擬実験装置，過渡動揺解析

1. ま え が き

近年，パワーエレクトロニクス技術の発展に基づく FACTS(Flexible AC Transmission Systems) の提唱がなされ⁽¹⁾，直列補償コンデンサや移相器を活用し，送電網の能力を向上させる試みが種々提案されている^{(2)~(6)}。これら直列コンデンサの調整量や移相器の移相角などを可変にすることは，一種のパラメータ制御を行うことに対応することから，可変インピーダンス型電力系統 VIPS (Variable Impedance Power System) の安定化制御法として統一的に取り扱う方法が提案されている⁽⁷⁾。可変直列コンデンサなどと並んで高速移相器 (Solid State Phase Shifter ; SSPS または High Speed Phase Shifter ; HSPS) は電力の流れを連続可変し，逆流も可能にする点で新送電技術を構成する有力な制御器の一つと考えられる^{(8)~(10)}。著者らも，この移相器を用いた過渡動揺抑制法についてタップ切換制御や連続移相角制御法の原理を提案し，その有効性を例題系統の数値シミュレーション解析によって検討してきた⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

そこで本論文では，系統擾乱中の加速（減速）エネルギー

ーを移相器制御による減速（加速）エネルギーで補償して過渡動揺を速やかに抑制する効果の有用性について，一機無限大母線系を模擬した小型（発電機容量 3 kVA）の実験系統装置を用いて検証した。その結果，オンライン制御による実験結果の過渡応答が数値シミュレーション解析で予測した制御性能の応答特性とよく一致することを確認した。制御系はタップ付き移相器をサイリスタスイッチの高速切換えによって構成し，発電機の過渡時の相差角と角速度の状態量を利用して「if(前件部) then(後件部)」形式の簡単な制御規則をパーソナルコンピュータで比較演算することによってタップ切換信号を与えている。なお，本論文では，移相器の移相角挿入時の発電機出力特性の過渡応答など，制御性能の実験的検証を目的として現有のタップ付き移相器（3 kVA）を利用したが，FACTS 関連の制御器として今後連続的調整可能な高速移相器⁽¹³⁾を利用した検討が必要と考えられる。

2. 加・減速エネルギーの補償による過渡動揺抑制効果の検討

送電線路に地絡故障などが発生した場合の系統動揺は便

宜的に、(i)事故に起因する加速エネルギーによって故障除去後も発電機の相角度が増大して最大値に至る初期動揺と、(ii)この初期動揺に引き続く後続の動揺に分けることができ、その原理は周知のように等面積法によって説明される。図1の一機無限大母線系統において、初期動揺に対応する電力-相角度($Pe-\delta$)曲線と相角度-角速度($\delta-\Delta\omega$, $\Delta\omega=d\delta/dt$)の位相面軌跡を図2に示す。図2の平常運転時の相角度 δ_s において事故が発生したとすると、故障中の電力曲線 C_f に沿って発電機は加速エネルギーを受けて相角度が増大し、故障回線除去後の電力曲線 C_1 に沿って減速エネルギーを得る。このとき面積 S_1 の加速エネルギーと面積 S_2 の減速エネルギーの補償($S_1=S_2$)によって相角度の増加は止まり最大値 δ_{max} に至る。次に、これに引き続く後続の動揺は、図3に示すように面積 S_3 の減速エネルギーを受けて相角度は減少するが、目標の相角度 δ_s' (安定平衡点:再閉路を行わない場合)にとどまらず加速エネルギー S_4 について $S_3=S_4$ が成立するまで相角度は減少し、以後振動する。

以上、初期動揺を抑制して同期はずれを起こさないようにに制御することが第一義的に重要であるのはいうまでもないが、本論文では、加・減速エネルギーの補償による後続の過渡動揺抑制に対して、移相器制御の特長を最も有効に活用できることを実験と解析によって検証する。

〈2・1〉 タップ切換規則 図3で考察した後続の動揺を抑制するための制御規則として、図4に示すように系統

状態 δ_{max} ; $\Delta\omega=0$ を検出した時刻に減速エネルギー S_5 と加速エネルギー S_6 について、 $S_5=S_6$ の成立する最適移相角⁽¹⁾ ϕ_{opt} を挿入すれば図の実線の軌跡となり、2回目の $\Delta\omega=0$ を検出した時刻に ϕ_{opt} を除去することによって動揺は δ_s' の平衡点に収束する。

しかしながら、加、減速エネルギー S_6 および S_5 を正確に予測することは系統の不確定性などのため、通常かなり難しいと考えられる。もし電力特性が線形であれば、挿入すべき移相角は $(\delta_{max}-\delta_s')/2$ がその目安となるが、電力

図3 後続の動揺に対応する電力-相角度曲線と位相面軌跡

Fig.3. Power-angle curve and phase-plane diagram for the subsequent swing.

図4 最適移相角 ϕ_{opt} による電力-相角度曲線と位相面軌跡

Fig.4. Power-angle curve and phase-plane diagram by an optimal shift-angle ϕ_{opt} .

図2 初期動揺に対応する電力-相角度曲線と位相面軌跡

Fig.2. Power-angle curve and phase-plane diagram for a first swing.

図5 挿入移相角の選択例による位相面

Fig.5. Phase-plane diagram by the examples for selecting the phase-shift injection.

特性は基本的に正弦関数を含む形で表されることを考えれば、図5の位相面で考察できるように $\delta_{\max}; \Delta\omega=0$ を検出した時刻に挿入する移相角は、ひかえめな値として $\phi = (\delta_{\max} - \delta_s')/\gamma$, ($\gamma > 2$) で与えるのが適切と考えられる。このことは、図5において $\delta_{\max}; \Delta\omega=0$ を検出した時刻で過大な移相角 ϕ_1' を挿入すると目標点 δ_s' へ至る前に2回目の $\Delta\omega=0$ が検出され、この時点で2回目の移相角 ϕ_2' を挿入する必要がある。これに対して、 $\delta_{\max}; \Delta\omega=0$ でひかえめな移相角 ϕ_1 を挿入すれば、図の実線で示すように2回目の移相角 ϕ_2 の挿入を必要とする場合でも軌跡はらせんを描くことになり、2回目に $\Delta\omega=0$ を検出した時点の移相角切換えによる角加速度の符号に変化はない。このことから、挿入移相角はややひかえめな値であることが望ましいと考える。

以上は2回線送電線で連系される一機無限大母線系統について制御規則の基本的な考え方を述べたが、具体的には系統構成や故障回線除去後再閉路を行うか否かなどに対応してタップ切換規則を適切に構成する必要がある。そこで、挿入可能な移相角のタップ間隔や移相範囲の上下限に関する制約があるため、本論文では擾乱整定後に次の擾乱に備えて移相制御量を零に戻しておくことにする。また、前述の目標の相角 δ_s' (最終形態の安定平衡点) は故障回線除去後再閉路を行わず当面1回線送電で安定運転を確保する方策として述べたが、故障除去後の運転形態の変化に対応して目標の相角を推定する機構、例えば TAGEC⁽¹⁴⁾ で構築されているような系統状態を把握する演算機構を必

要とする。本論文では、1回線送電を模擬した実験システムを用いているので平常時の相角差を目標の相角差として δ_s^0 で表し、平常運転時に δ_s^0 の推定計算を行っておくことにする。

そこで、系統動揺時における検出量 $\Delta\delta = \delta - \delta_s^0; \Delta\omega = 0$ に基づき移相器のタップ切換えによる挿入移相角 ϕ のための制御規則を次のように構成する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } X(k) \text{ is } A \text{ then } \phi = \phi(k) \\ \text{ここに、} \\ X(k) = \Delta\delta(k)/\gamma; \Delta\omega(k) = 0, \quad k = 1, 2, \dots \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、故障除去後最初に $\Delta\omega=0$ を検出した時点の相角偏差と角速度偏差について $\Delta\delta(1); \Delta\omega(1)=0$ で表し、以後 $\Delta\omega=0$ を検出する順に $k=2, 3, \dots$ とする。また、 γ は前述のように $\gamma > 2$ として具体値はシミュレーションなどの経験的な知識から決定する。本論文では、試行により $\gamma=2.15$ を採用した。更に、(1)式を具体的に実行するた

表 1 模擬系統の諸定数
Table 1. Constants of the experimental system.

$M=0.0346 \text{ s}^2/\text{rad}, D=0.0063 \text{ s/rad}, x_d=x_q=0.5828 \text{ pu}$
$r_a=0.0254 \text{ pu}, x_d'=0.1585 \text{ pu}, x_d''=x_q''=0.0583 \text{ pu}$
$T_{d0}=0.1762 \text{ s}, T_{d0}'=0.0235 \text{ s}, T_{d0}''=T_{d0}'''=0.007 \text{ s}$
$Z_{t1}=0.0101+j0.0372 \text{ pu}, Z_{t2}=0.0150+j0.0239 \text{ pu}$
$Z_p=0.0117+j0.0028 \text{ pu}, Z_L=0.0133+j0.3670 \text{ pu}$
$Z_g=0.0033+j0.2252 \text{ pu}$
$E_B=1.0 \text{ pu}, K_a=0.7, T_a=0.1 \text{ s}, \text{ pu: } 200 \text{ V}, 3 \text{ kVA (base)}$

(a) 模擬実験系統装置

(b) AVR

図 6 実験系統の構成と AVR の構成線図

Fig. 6. Structure of the experimental system and block diagram of AVR.

めに、 $X(k)$ の具体値を $X^0(k)$ として前件部の A については移相器のタップ移相角を対応させ、後件部のタップ切換えによる移相角 ϕ を次のように与える。

$$\begin{array}{l} \text{「前件部」} \quad ; \quad \text{「後件部」} \\ 0^\circ \leq |X^0(k)| < 1.66^\circ ; |\phi(k)| = 0^\circ \\ 1.66^\circ \leq |X^0(k)| < 3.33^\circ ; |\phi(k)| = 1.66^\circ \\ 3.33^\circ \leq |X^0(k)| < 5.00^\circ ; |\phi(k)| = 3.33^\circ \\ 5.00^\circ \leq |X^0(k)| < 6.66^\circ ; |\phi(k)| = 5.00^\circ \\ 6.66^\circ \leq |X^0(k)| < 8.33^\circ ; |\phi(k)| = 6.66^\circ \\ 8.33^\circ \leq |X^0(k)| < 10^\circ ; |\phi(k)| = 8.33^\circ \\ 10^\circ \leq |X^0(k)| < 15^\circ ; |\phi(k)| = 10^\circ \\ 15^\circ \leq |X^0(k)| < 20^\circ ; |\phi(k)| = 15^\circ \\ 20^\circ \leq |X^0(k)| < 25^\circ ; |\phi(k)| = 20^\circ \\ 25^\circ \leq |X^0(k)| < 30^\circ ; |\phi(k)| = 25^\circ \\ 30^\circ \leq |X^0(k)| < 30^\circ ; |\phi(k)| = 30^\circ \\ \phi = |\phi(k)| \text{sign}[\Delta\delta(k)], \quad k=1, 2, \dots \end{array} \quad (2)$$

なお、上式によるタップ切換制御は故障除去後開始するものとした。

〈2・2〉 実験と解析 提案した制御手法の実用性を検証するために模擬系統装置を使用した実験を行った。模擬実験系統装置の概要を図 6 に、系統機器定数を表 1 に示す。また、サイリスタスイッチの高速タップ切換えによる移相器の概要を図 7 に示す。交流発電機は定格電圧、容量、回転速度が 200 V、3 kVA、1,500 rpm の非突極機でサイリスタレオナード装置に制御された直流電動機により定トルク運転（発電機の機械入力一定を想定）されており、変圧器、移相器、線路リアクトルを介して無限大母線に接続されている。系統の状態量として発電機の角速度、

端子電圧、電気出力を観測している。励磁電圧制御としてディジタル化した AVR を用いているが、移相器制御の効果を顕著に引き出すため図 6 (b) に示した AVR 利得 K_a の値は小さめに設定している。移相器のタップ切換信号を構成するために必要な状態量のうち、発電機の角速度は直接観測値を用い、相差角偏差については観測した角速度偏差を台形公式の近似積分によって推定した。状態量を A/D 変換してコンピュータに取り込み比較演算してタップ切換信号を出力するまでのサンプリング間隔は約 5 ms である。なお、短絡事故の発生・除去を行うためのリレーの ON-OFF 制御および過渡応答記録のためのディジタルレコーダの制御にワンボードマイコンを使用した。

実験は、発電機の平常運転として端子電圧 1.015 pu、電気出力 0.5 pu、励磁電圧 1.129 pu を設定した（pu は 200 V、3 kVA 基準）。また、事故の想定として一回線送電中に三相短絡を発生させ、次の二つのケースについて実験を行った。

- （ケース 1） 故障発生から除去までが 1 秒間の場合（故障突入電流を軽減するためにリアクトル Z_0 を介して短絡）
- （ケース 2） 故障発生から除去までが 0.04 秒間の場合（リアクトルを挿入せず直接短絡）

以上による実験結果の（ケース 1）を図 8 (a) に、（ケース 2）を図 9 (a) に示す。両図とも実線が移相器制御を行った場合であり、破線は移相器制御なしの場合を示す。図 8 (b) および図 9 (b) はケース 1 およびケース 2 について、それぞれ数値シミュレーション解析を行った結果を示したものである。解析は、系統機器の抵抗分をすべて考慮し、数値計算の刻み幅を 5 ms として発電機の制動巻線効

図 7 サイリスタスイッチの高速タップ切換えによる移相器
Fig. 7. Phase shifter with thyristor-associated fast tap-changes.

図 8 加・減速エネルギーの補償に基づく移相器制御による発電機の時間応答 (ケース 1)
Fig. 8. Time responses of generator using phase shifter control based on the compensation between acceleration and deceleration energy (case 1).

図 9 加・減速エネルギーの補償に基づく移相器制御による発電機の時間応答 (ケース 2)
Fig. 9. Time responses of generator using phase shifter control based on the compensation between acceleration and deceleration energy (case 2).

果と電機子側の過渡現象を考慮した厳密計算法で行っている⁽¹⁵⁾。移相器のタップ切換制御のシミュレーションモデルについては、移相器の挿入移相角の時間遅れおよびサイリスタスイッチの遅れを無視し、タップが瞬時に切り換わる理想的な場合を想定しているが、両ケースとも実験結果とのよい一致を見た。本論文で使用した移相器は小容量のため比較的速い時間応答が得られたが、移相器が大容量となり、またオンライン制御のサンプリング間隔を小さくするような場合、挿入移相角の遅れ (一次遅れ系近似など) やサイリスタスイッチの遅れ (転流や点弧角など) を考慮したモデルの構成を必要とすることが考えられる。

本論文では、実験と解析について二つの例を図 8 および

図 9 に示したが、故障時間を変えた場合や平常時の電気出力を変えた場合についても検討している。その結果、制御性能は図 8 および図 9 と同様、本制御で対応でき有効であることを確認している。

3. ま と め

一機無限大母線系統における移相器制御について、加・減速エネルギーの補償の考え方に基づく簡単な制御規則による安定化手法の有用性をオンライン制御実験と数値シミュレーション解析によって検討し、制御性能に対して有効な結果を得た。本論文では、高速タップ切換移相器を用いた制御法を検討したが、今後は連続的調整可能な高速移相

器を用いたオンライン実験と解析について検討を進めた。

最後に、本研究を進めるにあたり御協力いただいた高木政幸氏(現在、富士電機)に謝意を表します。

(平成6年7月20日受付, 同6年11月4日再受付)

文 献

- (1) N.G. Hingorani: "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", IEEE Winter Power Meeting, Atlanta, Georgia (1990)
- (2) 嶋田: 「パワーエレクトロニクス応用による新送電システム」, 電学誌, **112**, 35 (平4-1)
- (3) Y. Wang, et al.: "Variable-Structure FACTS Controllers for Power System Transient Stability", *IEEE Trans. Power Systems*, **7**, 307 (1992)
- (4) A. A. Edris: "Enhancement of First-Swing Stability using a High-Speed Phase Shifter", *ibid.*, **6**, 1113 (1991)
- (5) 秋山, 他: 「電力系統におけるパワーエレクトロニクス応用機器適用の効果」, 平4電気学会電力・エネルギー部門大会, 176
- (6) 千住・上里: 「直列可変インピーダンス機器による電力系統の安定化制御法」, 電学論 B, **114**, 161 (平6-2)
- (7) 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」, 同上 B, **113**, 203 (平5-3)
- (8) 力石・嶋田: 「半導体化高速移相器による同期機のフライホイール効果を利用した電力制御とその応用」, 同上 B, **111**, 1192 (平3-11)
- (9) 佐藤, 他: 「高速移相器による過渡安定度の向上」, 平4電気学会電力・エネルギー部門大会, 181
- (10) 藤田, 他: 「高速移相器によるループ系統制御」, 電学論 B, **114**, 475 (平6-5)
- (11) 貝津・谷口: 「直列コンデンサおよび移相器を用いた過渡安定度の向上」, 同上 B, **96**, 131 (昭51-3)
- (12) 貝津・谷口: 「リアプノフ関数の利用による電力系統の安定化制御法」, 同上 B, **104**, 600 (昭59-9)
- (13) B. T. Ooi, S. Z. Dai & F. D. Galiana: "A Solid-State PWM Phase-Shifter", *IEEE Trans. Power Delivery*, **8**, 573 (1993)
- (14) 田中・植田・横川: 「多変数最適制御の発電所励磁調速系への応用」, 電学誌, **106**, 657 (昭61-7)
- (15) 横山・佐藤・貝津: 「一機無限大母線系統における同期機逆動揺現象の実験と解析——故障点アークの等価抵抗表現による検討——」, 電学論 B, **113**, 1450 (平5-12)

貝 津 弘 幸

(正員) 1966年3月大阪府立大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、新潟大学工学部助教授。工学博士。計測自動制御学会会員。

佐 藤 孝 雄

(非会員) 1971年3月新潟県立新津工業高校電気科卒業。現在、新潟大学工学部電気電子工学科文部技官。

沼 田 謙 二

(学生員) 1993年3月新潟大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科修士課程入学, 現在に至る。

横 山 和 哉

(学生員) 1993年3月新潟大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科修士課程入学, 現在に至る。