

# 移相器のスライディングモード制御に基づく 一機無限大母線系統安定化の実験と解析

正員 貝津弘幸 (新潟工科大)  
 学生員 横山和哉 (新潟大)  
 非会員 佐藤孝雄 (新潟大)  
 非会員 菊池久和 (新潟大)

Experimental Study on Dynamic Stability Improvement of a Single-Machine Infinite-Bus Power System  
 based on a Sliding Mode Control of Phase Shifter

Hiroyuki Kaizu, Member (Niigata Institute of Technology), Kazuya Yokoyama, Student Member,  
 Takao Sato, Non-member, Hisakazu Kikuchi, Non-member (Niigata University)

This paper describes the experimental study on dynamic stability improvement of a single-machine (laboratory size 3kVA generator) connected to an infinite-bus power system using a phase shifter. A phase-shift injection is implemented by thyristor-associated fast tap-changes based on a sliding mode control during transient conditions of generator. Digital simulation studies are also carried out to test the control scheme and the dynamic performances of system. As a result, the numerical studies show good agreement with the experimental results. The proposed controller utilizing the microcomputer is verified to damp the transient swing caused by a fault in power system.

キーワード：電力系統，移相器，スライディングモード制御，過渡動揺解析

## 1. ま え が き

電力系統の安定化についてパワーエレクトロニクスとデジタル技術の発展に基づくFACTS (Flexible AC Transmission Systems) の提唱がなされ<sup>(1)</sup>，直列補償コンデンサや高速移相器を活用して送電網の能力を向上させる制御法が種々研究されている<sup>(2)~(6)</sup>。また，系統モデルに含まれる不確かさを許容できるロバストな制御法が研究され，そのなかで注目を集めている方法の一つにスライディングモード制御がある<sup>(7)~(10)</sup>。先に筆者らは，移相器の高速タップ切換えによって系統の過渡動揺を速やかに抑制する制御手法の有効性について，一機無限大母線系を模擬した小形の実験系統のオンライン試験によって検証した<sup>(11)</sup>。そのタップ切換え信号は，発電機の過渡時の相差角と角速度の状態量を利用して加速（または減速）エネルギーを減速（または加速）エネルギーで補償する考え方を「if（前件部）then（後件部）」形式の簡潔な制御規則によって与えている。この制御法は，系統動揺を便宜的に事故発生直後の初期動揺とこれに引き続く後続の動揺に分け，後続の動揺を速やかに抑制する方法としての有効性を示したが，制御規則構成上の制約から初期動揺を抑制することが難し

い点に課題を残した。事故発生直後の初期動揺を抑制して同期はずれを起こさないように制御すること，いわゆる過渡安定度の向上は系統安定化の重要課題の一つと考えられる。

本論文では，上述のように初期動揺と後続の動揺とに分けることなく過渡安定度の向上をはかる方法として，移相器のスライディングモード制御<sup>(12)</sup>に基づく安定化手法の有効性を実験系統装置のオンライン試験とシミュレーション解析によって考察した。実験はタップ付き移相器を用い，スライディングモード制御に基づくタップ切換え信号をパーソナルコンピュータにより演算しサイリスタスイッチの高速切換えによって構成した。実験系統のオンライン試験の結果，系統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とよく一致することを確認した。本文では，過渡動揺時の発電機出力特性など制御性能の実用可能性を検討するため現有のタップ付移相器を利用したが，今後連続調整可能な高速移相器による検討が必要と考える。

## 2. スライディングモード制御に基づく安定化手法

<2.1> 制御規則の原理 本文で実験と解析を行う模擬実験系統装置の概要を図1に示す。なお，図1(b)に示

すように励磁電圧制御としてデジタル化したAVRを用いているが、発電機の機械入力是一定としている。移相器制御による系統の基本的な動特性は次のように表される。

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{D}{M}x_2 - \frac{1}{M}f(\sigma) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma = x_1 - u \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$u = -(\alpha x_1 + \beta x_2) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに

$$x_1 = \delta - \delta s$$

$$x_2 = d\delta/dt$$

ただし

$\delta$  : 無限大母線電圧基準による発電機内部電圧の相差角

$\delta s$  :  $\delta$  の安定平衡点の値

$u$  : 制御入力 (移相角)

$M$  : 慣性定数

$D$  : 制動係数

$\alpha, \beta$  : フィードバック利得

(2) 式を安定平衡点まわりの線形化モデル導出の考え方を適用して次式で表す。

$$\dot{x}_2 = -a_2 x_2 - a_1 \sigma \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $a_2 = D/M$

このとき、系統の非線形特性を考慮できる制御則を簡潔に与えるために、原点を含むある領域で非線形関数  $f(\sigma)/M$  を図2に示す二つの直線で囲むようにその係数  $a_1$  を大幅なパラメータ変動として許容し  $a_{1min} \leq a_1 \leq a_{1max}$  のように設定する。 $a_{1max}, a_{1min}$  の選定については、原理的

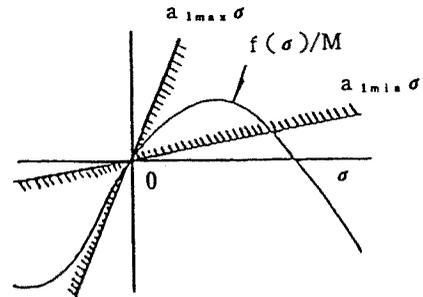
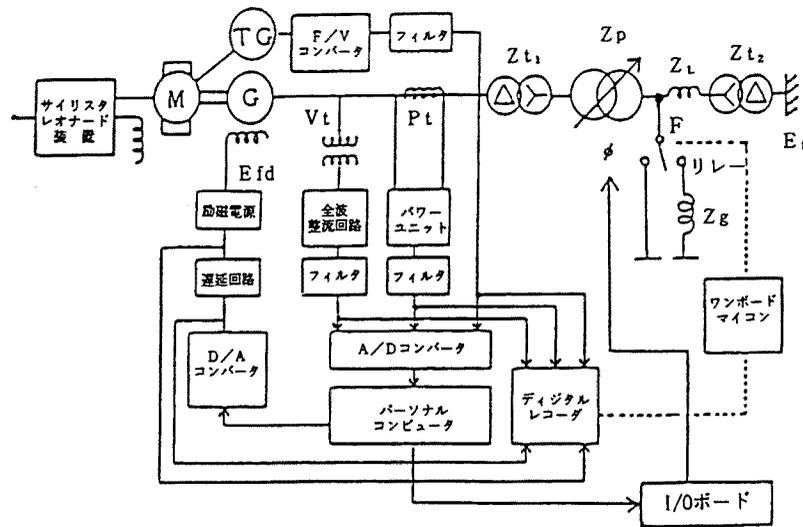
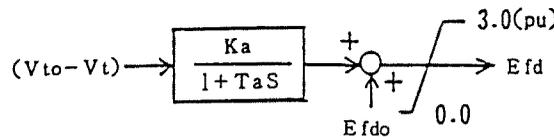


図2 電力特性曲線  
Fig.2. Output power curve.



(a) 模擬実験系統装置



(b) AVR

図1 模擬実験系統の構成とAVRの構成線図  
Fig.1. Structure of experimental system and block diagram of AVR.

に図2の縦軸と横軸を含まない第1象限と第3象限をすべて囲むように選ぶことが望ましいが、反面その囲む領域を必要以上に広げると制御入力が必要以上に大きくなる傾向をもつ。そこで $a_{1max}$ の選定方針は非線形関数(発電機出力特性) $f(\sigma)/M$ の原点( $\sigma=0$ )における接線の勾配を目安とし、図2に示す二つの近似直線で非線形関数を囲めるように若干の余裕をもたせた値を採用する。 $a_{1min}$ については小さい値の方が望ましいが上述の理由から具体的にはシミュレーションを含む経験的な観点から選定しなければならないのが現状である。また、AVRによる効果は $f(\sigma)/M$ の大きさの変化として現れるので、このことも考慮して $a_{1max}$ ,  $a_{1min}$ の値を選定することとした。

本制御システムは2次系であるので切換え線として

$$s = c x_1 + x_2, \quad c > 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

を選定する。このとき、直線 $s=0$ でスライディングモードの発生する存在条件は、リアプノフのテスト関数 $s^2/2$ を導入すると $\lim(s \dot{s}) < 0$ ;  $s \rightarrow 0$  で与えられる。(1),(3),(4),(5)式および(6)式により $s \dot{s}$ を計算すると次式の関係が得られる。

$$s \dot{s} = (c - a_2 - a_1 \beta) s^2 - \{c(c - a_2 - a_1 \beta) + a_1(1 + \alpha)\} s x_1 \quad \dots\dots\dots(7)$$

そこで、パラメータ変動を

$$\left. \begin{aligned} a_{1min} \leq a_1 \leq a_{1max} \\ a_{2min} \leq a_2 \leq a_{2max} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

のように限定できるものとすれば、上記の関係から切換え直線の勾配とフィードバック利得について次式<sup>(12)</sup>

$$\left. \begin{aligned} c \leq a_{1min} \beta + a_{2min} \\ \alpha_1 \geq \max_{a_1, a_2} [-1 + c(a_1 \beta + a_2 - c) / a_1]; \text{ if } s x_1 > 0 \\ \alpha_2 \leq \min_{a_1, a_2} [-1 + c(a_1 \beta + a_2 - c) / a_1]; \text{ if } s x_1 < 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

を満たすように選定することによって系統の非線形特性やパラメータ変動に対してロバスト性の高い制御系が構成できる。

### 〈2.2〉高速移相器を想定した数値シミュレーション解析

本章のシミュレーションでは連続・高速調整可能ないわゆる高速移相器を想定するが、その他の系統条件は次章の実験と解析における運転条件と同一である。図1の交流発電機は定格電圧、容量、回転速度が200V, 3kVA, 1500rpm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)されており、変圧器、タップ付移相器、線路リアクトル、更に変圧器を介して無限大母線に接続されている。系統機器定数および初期運転状態と制御パラメータを表1に示す。事故として1回線送電中に図1に示すF点で三相短絡故障の発生を想定し、次の二つのケースについてシミュレーション解析を行った。

表1 模擬系統の諸定数および運転条件  
Table 1. Constants of experimental system and operating conditions.

$M=0.0346s^2/\text{rad}$	$D=0.0063s/\text{rad}$	$X_d=X_q=0.5828\text{pu}$
$r_a=0.0254\text{pu}$	$X_d'=0.1585\text{pu}$	$X_d''=X_q''=0.0583\text{pu}$
$T_{do}'=0.1762s$	$T_{qo}'=0.0235s$	$T_{do}''=T_{qo}''=0.007s$
$Z_{t1}=0.0101+j0.0372\text{pu}$	$Z_{t2}=0.0150+j0.0239\text{pu}$	
$Z_p=0.0117+j0.0028\text{pu}$	$Z_L=0.0133+j0.3670\text{pu}$	
$Z_g=0.0033+j0.2252\text{pu}$		
-----		
$V_{ts}=1.015\text{pu}$	$P_{ts}=0.5\text{pu}$	$E_{fds}=1.129\text{pu}$
$T_a=0.1s$	$K_a=0.7$	
$a_{1min}=20$	$a_{1max}=52$	
$a_{2min}=0.14$	$a_{2max}=0.22$	( $a_2$ のノミナル値0.182)
$\beta=0.132$	$c=3.05$	$\alpha_1=-0.219$ $\alpha_2=-1$

pu: 200V, 3kVA 基準の値  
添字s: 初期運転状態を示す

ケース1: 故障発生から除去までが1秒間の場合(リアクトル $Z_g$ を介して短絡)

故障発生と同時に移相角制御開始

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)

故障除去後移相角制御開始

解析は系統機器の抵抗分をすべて考慮し、発電機の制動巻線効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。

図3および図4はそれぞれケース1およびケース2についてシミュレーション結果を示したもので、両図から分かるように(9)式に基づく制御入力 $u(t)$ の切換えによるチャタリングが現れる。そこで、このチャタリング現象を抑制するために準スライディングモード(quasi-sliding mode)制御の考え方を採用し<sup>(13)</sup>、図5で示す $\alpha_1$ と $\alpha_2$ の間の値を $|s x_1| \leq \epsilon$ の境界層で連続にする。

図6および図7はケース1およびケース2について、それぞれ $\epsilon=0.01$ とした場合のシミュレーション結果を示したものである。なお、 $\epsilon$ をどのように選定するかについて現在明確な方法がなく、この値についても経験的な観点から選定しなければならないのが現状と考えられる。図6および図7で採用した $\epsilon=0.01$ は $\epsilon$ を変えて種々シミュレーション解析を行った結果、この値でチャタリングがほぼ抑制される値として選定している。

### 3. 高速タップ切換え移相器による実験と解析

第2章のスライディングモード制御は、いわゆる高速移相器を想定した連続系の制御法である。本文では、既存の技術で制御系を構築するのが比較的容易と考えられるタップ付移相器を用いて実験的検討を行うこととした。そこで、連続系のスライディングモード制御に基づき演算した制御量 $u(t)$ を高速タップ切換え信号として利用することによ

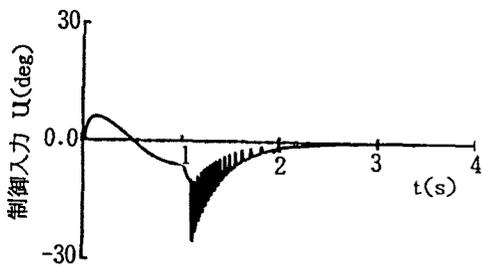
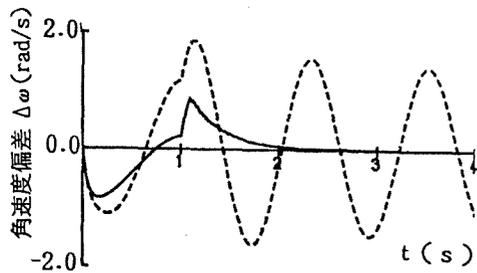
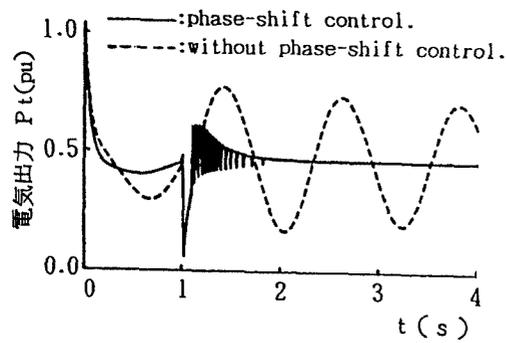


図3 移相器のスライディングモード制御による発電機の時間応答(ケース1)

Fig.3. Time responses of generator using sliding mode control of phase shifter(case 1).

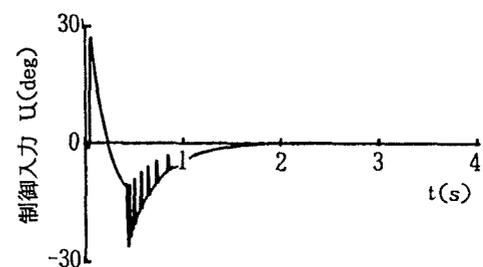
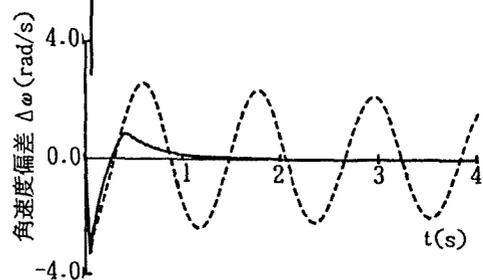
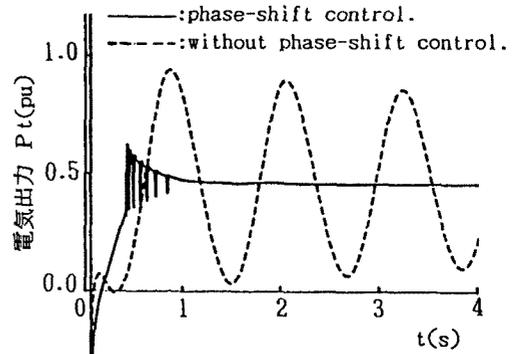


図4 移相器のスライディングモード制御による発電機の時間応答(ケース2)

Fig.4. Time responses of generator using sliding mode control of phase shifter(case 2).

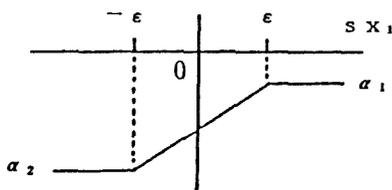


図5  $\alpha_1$ および $\alpha_2$ の切換え境界層における内挿  
Fig.5. Interpolation between  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  in the boundary layer.

ってFACTS関連の高速移相器による安定化手法の有用性を検討した。

連続系の入力信号 $u(t)$ を離散化して $U(k)$ で表し、挿入移相角を与えるための制御規則を次のように構成する。

$$\text{if } U(k) \text{ is } A \text{ then } \phi = \phi(k) \dots\dots\dots(10)$$

上式を具体的に実行するために、タップ切換え信号 $U(k)$ の具体値を $U^0(k)$ として前件部Aについては、実験に用いたタップ付移相器(3kVA)のタップ移相角を対応させ<sup>(11)</sup>、後件部のタップ切換えによる挿入移相角 $\phi$ を次のように与えた。

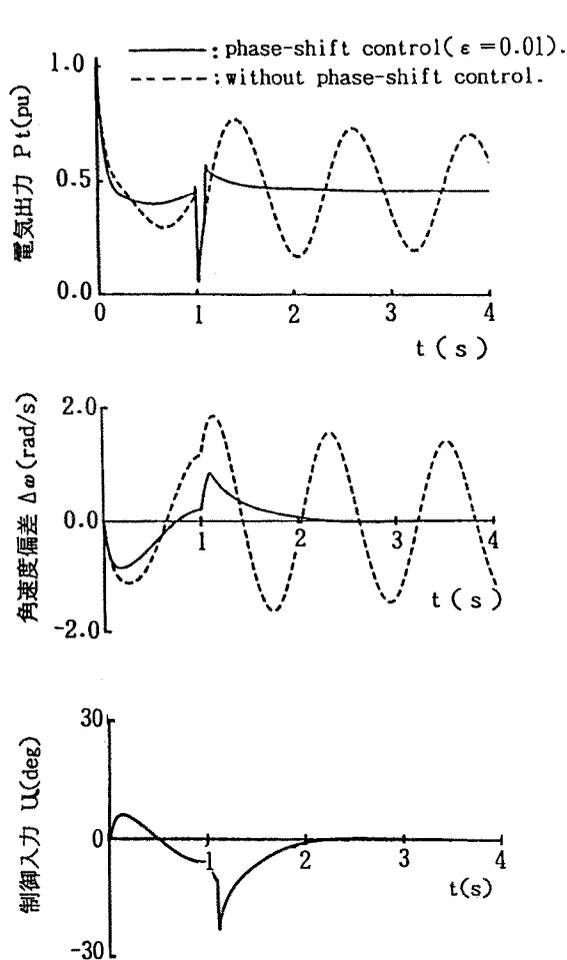


図6 移相器の準スライディングモード制御による発電機の時間応答(ケース1)  
Fig.6. Time responses of generator using quasi-sliding mode control of phase shifter (case 1).

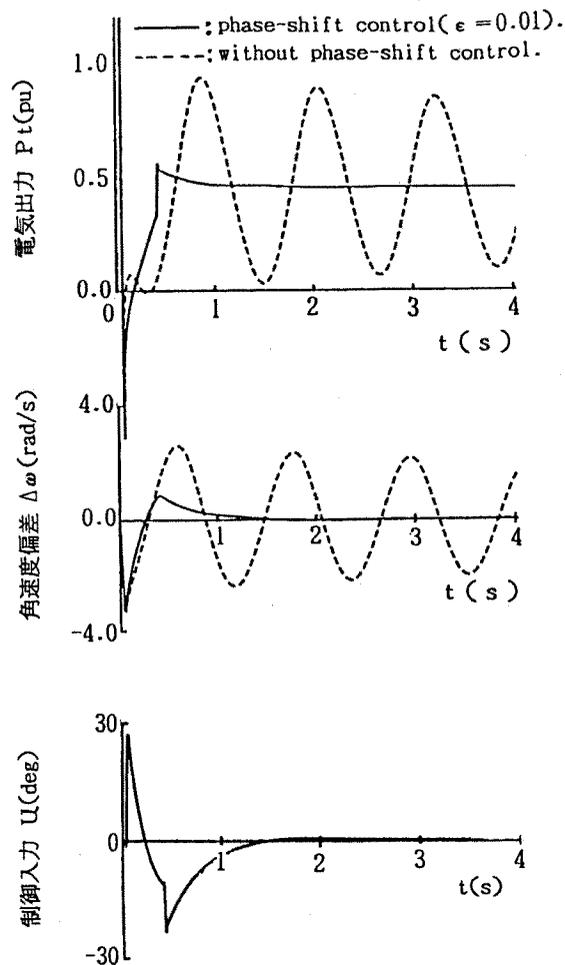


図7 移相器の準スライディングモード制御による発電機の時間応答(ケース2)  
Fig.7. Time responses of generator using quasi-sliding mode control of phase shifter (case 2).

「前件部」	;	「後件部」
$0^\circ \leq U^0(k) < 1.66^\circ$	;	$\phi(k) = 0^\circ$
$1.66^\circ \leq U^0(k) < 3.33^\circ$	;	$\phi(k) = 1.66^\circ$
$3.33^\circ \leq U^0(k) < 5.00^\circ$	;	$\phi(k) = 3.33^\circ$
$5.00^\circ \leq U^0(k) < 6.66^\circ$	;	$\phi(k) = 5.00^\circ$
$6.66^\circ \leq U^0(k) < 8.33^\circ$	;	$\phi(k) = 6.66^\circ$
$8.33^\circ \leq U^0(k) < 10^\circ$	;	$\phi(k) = 8.33^\circ$
$10^\circ \leq U^0(k) < 15^\circ$	;	$\phi(k) = 10^\circ$
$15^\circ \leq U^0(k) < 20^\circ$	;	$\phi(k) = 15^\circ$
$20^\circ \leq U^0(k) < 25^\circ$	;	$\phi(k) = 20^\circ$
$25^\circ \leq U^0(k) < 30^\circ$	;	$\phi(k) = 25^\circ$
$30^\circ \leq U^0(k)$	;	$\phi(k) = 30^\circ$
$\phi =  \phi(k)  \cdot \text{sign}[U^0(k)]$		

... (11)

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。タップ切換え信号を演算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ている。系統の状態量に関するサンプリング間隔は約5msであるが、タップ切換え信号の具体値 $U^0(k)$ のサンプリング間隔は約20msとした。実験は、第2章の表1に示した運転条件と同一である。なお、移相器制御の効果を顕著に引き出すため図1(b)に示したAVR利得は小さめの値を選定した。本文では、1回線送電を模擬した実験システムを用いているので安定平衡点における相差角の値 $\delta$ は平常運転時に推定計算を行っている。事故は1回線送電の平常運転中に第2章と同じ三相短絡故障を発生させ、ケース1とケース2について表1に示した制御パ

ラメータの値を用いて実験を行った。なお、実験では観測量に誤差が含まれることを考慮して $\epsilon$ については試行により $\epsilon = 0.3$ を採用した。

以上による実験結果のケース1およびケース2を図8に示す。図の実線が移相角制御を行った場合であり、破線は移相角制御なしの場合を示す。また、図9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、移相角制御を除いて他は第2章と同じ厳密計算法で実施している。移相器のタップ切換え制御のシミュレーションモデルについては、本実験系統装置でのタップ切換え応答が十分早いと考えられたので<sup>(11)</sup>タップ切換え応答の時間遅れを無視している。ただ、移相器容量が大きくなったような場合にタップ切換えの時間遅れを考慮したモデルの構成が必要になることも考えられる。

本論文では、実験と解析についてケース1およびケース2の二つの例を示し考察したが、実験系統の初期運転状態や故障除去時間を変えた場合、更には制御パラメータ( $\beta$ ,  $c$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ )選定の違いによる実験と解析についても検

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。

#### 4. まとめ

一機無限大母線系を模擬した実験系統装置を用いて移相器のスライディングモード制御に基づく安定化手法の有用性をオンライン試験と数値シミュレーション解析によって検討した。その結果、(i)高速移相器のスライディングモード制御による系統安定化の実用可能性は高いと考えられる。(ii)スライディングモード制御の原理に基づく移相器の高速タップ切換えによっても系統安定化は有効であり、その効果は高速移相器の場合に近い制御性能が得られるものとする。ただ、この場合タップ切換えのタイミング(切換え回数)などの検討が必要となる。

最後に、本研究を進めるにあたり御協力いただいた沼田謙二氏(現在、北陸電力)に謝意を表します。

(平成9年4月28日受付, 同9年8月11日再受付)

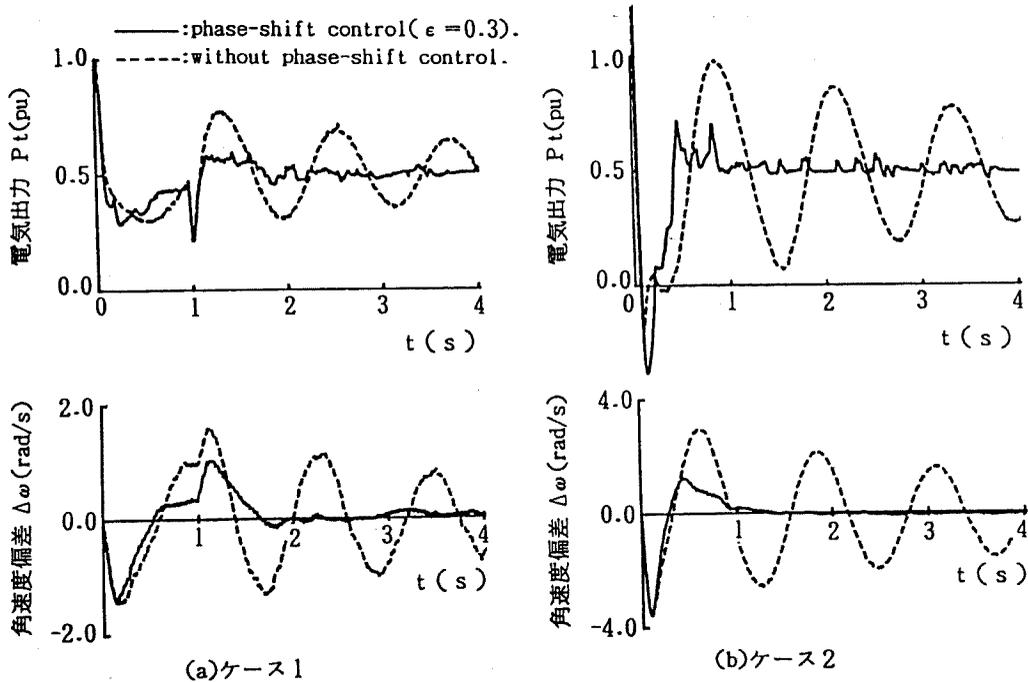


図8 準スライディングモード制御に基づくタップ切換え移相器による発電機の時間応答(実験結果)  
Fig.8. Time responses of generator by fast tap-changing of phase shifter based on quasi-sliding mode control (experimental results).

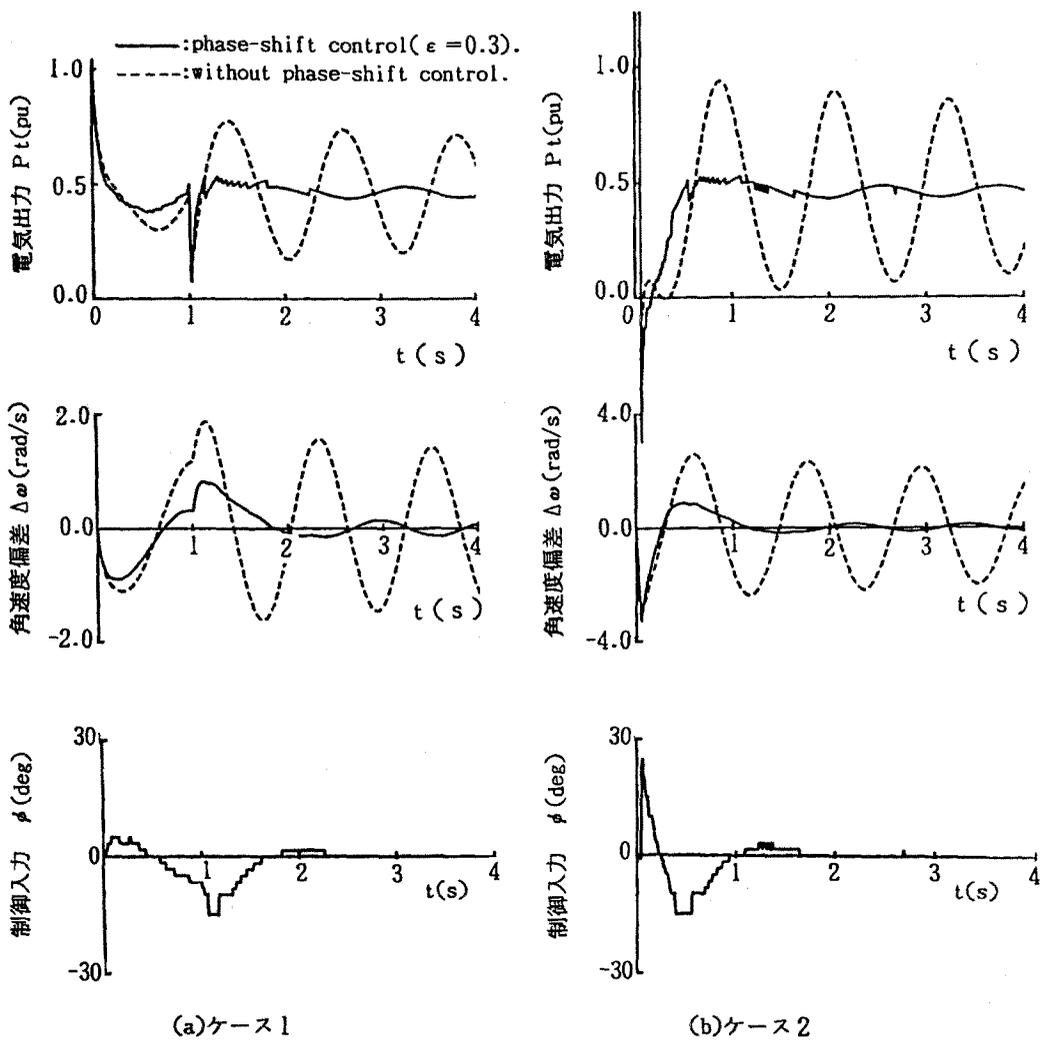


図9 準スライディングモード制御に基づくタップ切換え移相器による発電機の時間応答 (解析結果)  
 Fig.9. Time responses of generator by fast tap-changing of phase shifter based on quasi-sliding mode control (digital simulation results).

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」, 平成4年電気学会電力・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) W.C.Chan and Y.Y.Hsu: "An optimal variable structure stabilizer for power system stabilization", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-102, 1738 (1983)
- (8) 井坂・大山: 「VSS理論による電力システム制御に関する一考察」, 平成4年電気学会電力・エネルギー部門大会, 6
- (9) 石亀・川本・谷口: 「電力系統のファジモデルによるスライディングモード制御」, 電学論B, 113, 22 (平5-1)
- (10) 千住・宜保・上里: 「スライディングモードの考えに基づくAVR・GOVファジー協調制御による電力系統の安定化制御法」, 同上B, 114, 242 (平6-3)
- (11) 貝津・他: 「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」, 同上B, 115, 562, (平7-6)
- (12) 貝津・沼田・横山: 「移相器を用いた電力系統のスライディングモード制御」, 同上B, 115, 91 (平7-1)
- (13) J.J.Slotine: "Sliding controller design for non-linear systems", Int.J.Control, 40, 421(1984)

貝津弘幸（正員） 1963年 3月新潟大学工学部  
電気工学科卒業。66年 3月大阪府立大  
学大学院工学研究科修士課程修了。同  
年 4月新潟大学工学部助手，助教授を  
経て，95年 4月より新潟工科大学教授，  
現在に至る。工学博士。主として電力  
系統の解析，制御に関する研究に従事。  
計測自動制御学会，電子情報通信学会  
会員。



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，95年同大学院  
工学研究科修士課程修了。同年 4月同  
大学院自然科学研究科博士後期課程進  
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。



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。



菊池久和（非会員） 1974年 3月新潟大学工学  
部電子工学科卒業。76年 3月同大学院  
工学研究科修士課程修了。富士通(株)，  
新潟大学助手，助教授を経て，現在同  
大学工学部電気電子工学科教授。工学  
博士（東工大）。92年度文部省長期在  
外研究員（UCLA）。信号処理，画  
像圧縮符号化，ウェーブレット解析，  
移動通信方式等の研究に従事。IEEE，  
電子情報通信学会，日本応用数理学会  
各会員。

