二重シールドをもつ超電導同期発電機の電力系統内 特性とその改善法

牟 田 一 弥

佐賀大学工学部電気工学科 佐賀市本庄町一番地
(1985年12月11日受理)

Power System Performance Characteristics and Their Improvements
in Superconducting Synchronous Generators with Double Rotor Shield
Itsuya MUTA

Department of Electrical Engineering, Saga University, 1-Honjo, Saga-shi 840
(Received December 11, 1985)

Synopsis :

So as to increase both of the shielding effect for protecting the superconducting field winding against asynchronously rotated armature-reactive magnetic fields and the damping effect for rotor swings in transients, the double electromagnetic shielding scheme has been lately established in superconducting alternators.

One of electromagnetic features, which stem from the adoption of a shielding system with relatively large time constant and the superconducting field circuit with exceptionally-large time constant, is that an excitation voltage ceiling should be enormously raised in the case of typical field forcing control to provide supplementary damping force of the rotor, to ensure a good dynamic voltage regulation, and then to guarantee a power system stability. Nevertheless, in such a superconducting system, a high value of field current variation could not be acceptable from points of the limitation of a critical magnetic field changing rate, a temperature rise caused by ac losses in superconductors and other cryogenic rotor components, and so on. Even though a great deal of field forcing might be acceptable, only very little improvement could be achieved in the dynamic performance.

Hence it might be of necessity that new alternative control schemes have been proposed, for instance, a shield winding control and a static reactive power compensator control connected at the terminal of the generator, instead of the conventional field forcing control.

The paper has reviewed such new control schemes besides the conventional typical control, and discussed their control performances based on computer simulations which the author has done up to now.

1. はじめに

超電導同期発電機は効率向上、小形軽量化、また従来機（以下、常電導機と呼ぶ）の製作容量限界を越えた大容量化の可能性、さらに電力系統の安定度向上への寄与など、大きな期待がもたれ、次代の新形発電機として世界的に研究開発の注目を浴びている。

この超電導発電機においては、界磁巻線が超電導化

されて大きい磁界を空間に作るができることから電機子巻線及び界磁巻線を本質的に空心構造にできること、並びに超電導界磁巻線の安定化保護の目的で両巻線間に導電性のシールド円筒を設けることが、常電導機の構造と異なる点である。

この結果、従来の火力や原子力発電プラントの発電機が同期リアクタンス X_d の大きいいわゆる銅機械であるのに対して、超電導発電機は X_d が小さく短絡比

(SCR)が2～4程度のいわゆる鉄機械となる、また、導電性のシールド円筒に関する開路次過渡時定数 $T_{d0}''(s)$ 及び超電導界磁回路に関する開路過渡時定数 $T_{d0}'(s)$ が常電導機よりかなり大きい。したがって、これらの発電機定数の違いは電気的特性において常電導機とは違った特徴を与えるものである。これらの特徴については筆者らのこれまでの研究も含めた結果^{1)～9)}から既にほぼ明らかにされている。

現在、故障や負荷変化時等の回転子動揺の制動機能及び電機子反作用非同期磁界に対する超電導界磁巻線のしゃへい保護機能のため、さらに輻射熱しゃへの観点からその内側のものを低温に保った導電性の二重電磁シールド構造が実用機の概念として定着している⁹⁾。この二重シールドの電気的定数設定において、超電導線材の開発が目下発展的であるので必ずしも確定的な指標は一概に見い出せないのであるが、一応現在の実用線材を想定しなければならないだろう。

そのような事情から流動的ではあるが、上述の回転子動揺の制動機能よりもしゃへい保護機能を重視したシールドの設計が必要であって、 T_{d0}'' が比較的大きいものとなっている。このことは、界磁回路時定数が非常に大きいことと合わせて、常電導機で行われているような界磁の高速応励磁制御の効果を極めて小さいものとする。

超電導機は同期などのリアクタンスが小さいために本質的に定態安定度は高く、励磁制御がなくても電力系統内での過渡安定度は励磁制御を有する常電導機と同等以上であり⁹⁾、速応励磁制御は不必要であるとする見方もある。しかし、超電導機を電力系統へ適用する場合、さらにその安定度の向上を図り、高品質の電力供給を保証するに当り、制御の重要性は否定できない。したがって、高速応励磁制御法の適用が考えられる。PSS (電力系統安定化装置) を付加した高速応励磁制御は常電導機では電力系統の過渡安定度を著しく向上させることが指摘されているが¹⁰⁾、超電導機ではあまり期待できないようである⁹⁾。

よって、超電導機において上述のように超電導界磁巻線のしゃへい保護機能を重視した設計が必要である限り、ハード的に回転子の制動力を大きくできないうえに、従来の励磁制御の効果が小さいと見なされる現下では新しい制御法を考えることも必然性がある。

そのような考えから、本稿では、従来の高速応励磁制御法による特性を述べ、次に著者らの提案も含めたいくつかの新しい制御法を取り上げ、電力系統内での

超電導発電機の過渡特性向上を論ずる。

2. 系の解析モデル

以下に、三つの主要な制御法について論ずるが、共通する系の解析モデルをまず述べておく。

Fig. 1 はここで紹介する制御方式の一部を付加した系モデルを示す。また、Fig. 2 には界磁制御付超電導発電機がユニット変圧器と二回線送電線を通して無限大母線に連系された、いわゆる一機無限大母線系統モデルを示す。

本論文では発電機の動態安定性及び過渡特性を評価するが、過渡特性においては発電機が定格出力 (端子電圧 $V_{t0}=1.0$ pu, 有効電力 $P_m=0.8$ pu, 無効電力 $Q_m=0.6$ pu) を供給しているとき、変圧器の高圧側の線路1で三相突発短絡事故が生じ、0.15秒 (60Hzで9サイクル) 後にそれを除去し、線路2のみで再び定格電力を供給する場合を想定した。対象とする超電導発電機は筆者が概念設計した2 GVA (2極, 60Hz) 機であって、その定数及び系統定数を Table 1 に示している。

Fig. 3 は三つの主要な制御系の構成を示したもので、図中の K_W は PSS の利得を表わしている。ただし、本論文では特に断りのない限り、 $K_W=0$ とした。

二重シールド構造の同期発電機の数学モデルは、文献8)の(1)～(6)式、送電系統の方程式は同文献の(12)、(13)式、さらにガバナ (GOV) 系の式は(15)式と同一であり、ここでは重複を避け省略する。

3. 界磁制御の特性

この界磁制御法は常電導機に一般的に用いられるもので、その基本的構成は Fig. 3(a) のようである。

AVR 励磁系を一次遅れ系 (利得 K_r , 時定数 T_r) とし、さらに速度偏差を入力信号にもつ PSS (その純利得を K_W とする) を付加した励磁系の状態方程式は文献8)の(14)式と同一であるので割愛する。

ここで、界磁制御法によるシミュレーション特性をいくつか紹介する。まず、Fig. 4 は Fig. 2 の二回線送電線を一回線とし、その等価線路インピーダンスを $\hat{Z}_e=0.04+j0.4$ (pu) とした場合における AVR 励磁制御・GOV 制御並びに界磁回路の永久電流モード時の動態安定極限電力^{3),5)}を示したものである。

この図で、制御系がない場合と永久電流モードの励磁での動態安定度はまったく同じとなっているが、界磁回路の時定数が極端に大きいことによる。また、永

久電流励磁モードでGOV制御の有無にかかわらず同一の安定限界を示していることは、一般にGOV制御の動態安定度への影響は微小であることを意味する。また、本図は両制御系がない場合でも超電導発電機の動態安定限界は定格出力($\sqrt{P_m^2+Q_m^2}=1$ の半円上)以上にあつて、AVR励磁制御を加えるとさらに動態安定限界を拡大できることを示している。すなわち、平衡点近傍のゆっくりした微小外乱を対象とした動態安定度の面では、AVR励磁制御は有効であることを意味する。さらに、AVR励磁系の利得 K_r には最適な大きさがあつて、例えば、 K_r を200から2,000に

Fig. 1 Control system for superconducting alternator under study.

Fig. 2 System model for faults simulation.

変えた場合にみるように K_r が大きいと逆に安定限界は狭くなる。

次に、上述の三相突発短絡を想定した場合のシミュ

Fig. 3 Variation of control methods.

- (a) field forcing control
- (b) optimal regulator control
- (c) static VAR compensator control

Fig. 4 Influence of control system on dynamic stability power limit.

Table 1 Machine and system parameters.

Generator (2,000MVA, 30kV, 0.8pf, 2-pole, 60Hz)				
$H=3.0$	$V_{t0}=1.0$	$X_d=0.5088$	$X_{ad}=0.5088$	$X_{ffd}=1.6160$
$X_{11d}=0.7334$	$X_{f1d}=0.7334$	$X_q=0.5088$	$X_{aq}=0.5088$	$X_{11q}=0.7334$
$R_a=0.149 \times 10^{-2}$	$R_{ffd}=0.010 \times 10^{-3}$	$R_{11d}=0.421 \times 10^{-2}$	$R_{11q}=0.421 \times 10^{-2}$	
$T_{11d}=0.462$	$T_{11q}=0.462$	$T_{d0'}=300.0$	$T_{d0''}=0.241$	$T_{q0''}=0.462$
Transformer		$R_t + jX_t = 0.073 + j0.133$		
Transmission line		$Z_1 = R_1 + jX_1 = 0.0214 + j0.135$		
		$Z_2 = R_2 + jX_2 = 0.0856 + j0.520$		

レーション結果を Fig. 5, 6, 7 に示す。

Fig. 5 は AVR 励磁制御, GOV制御並びに永久電流励磁モード時の 過渡安定極限電力⁵⁾の比較を示す。安定判別には, 故障後 2 秒間を対象とし, 負荷角 δ が $0 < \delta < 180^\circ$ であることを基準とした。同図(a),(b)は励磁機の頂上電圧 $|V_c|$ をそれぞれ 5.6 と ∞ (pu) に設定した場合で, AVR の利得 K_r が小さいと V_c を変えても過渡安定限界に対する AVR 励磁制御の効果はほとんど認められないが, K_r を大きくするとある程度の効果が現われることが分る。例えば, $K_r=2,000$ とすると GOV 制御付の場合約20%アップの励磁制御効果がある。このことは先の動態安定限界への K_r の影響とは逆であって, 過渡利得は定常利得より大きくする必要がある。また, これらの図は GOV 制御の効果は著しく, 超電導機では良好な GOV 制御を行う必要のあることを示唆している。

Fig. 6, 7 は前述のように 発電機出力 $P_m=0.8$, $Q_m=0.6$ (pu) 時の三相短絡及びその故障除去のシーケンスにおける負荷角 δ の変動を示したもので, AVR 励磁制御では K_r が大きく, $|V_c|$ を大きくすると変動の様子が若干ではあるが変わり, 過渡動揺の第1波抑制効果¹⁰⁾が現われること, GOV 制御は回転子動揺を抑えることなど, 制御系のそれぞれの影響が明らかである。しかし, 本稿において比較していないが, 常電導機では過渡動揺の第1波抑制効果及び PSS による

Fig. 5 Influence of control system on transient stability power limit.
(a) ceiling voltage $|V_c|=5.62$ (pu)
(b) ceiling voltage $|V_c|=\infty$ (pu)

Table 2 Machine and exciting system parameters of conventional and superconducting alternators with rating of 1,000~1,500MVA.

parameters	conventional alternator	superconducting alternator
transient open-circuit time constant T_{d0}' (s)	5~ 10	100~ 3,000
subtransient open-circuit time constant T_{d0}'' (s)	0.02~ 0.06	0.1~ 4
synchronous reactance X_d (pu)	1.5~ 3	0.3~ 0.6
SCR (short circuit ratio)	0.4~ 0.7	2~ 4
self-inductance of field winding (H)	2~ 5	0.5~ 2
stored energy of field winding (MJ)	5~ 10	20~ 40
steady-state field excitation voltage V_{fd0} (V)	400~ 600	5~ 10
transient field excitation voltage V_{fd} (V)	1,000~ 3,000	3,000~10,000
AVR steady-state gain constant K_r	40~ 60	200~ 2,000
AVR transient gain constant K_r'	100~ 400	1,000~ 3,000
exciter polarity	unipolar	bipolar
exciter steady-state power (kW)	≈1,000	≈30
exciter instantaneous power (kW)	3,000~ 4,000	1,000~ 3,000
exciting current (A)	3,000~ 8,000	3,000~20,000

Fig. 6 Comparison of load angle transients.

第2波以降の制動効果など、AVR 励磁系の効果はかなり大きいことが分っている¹⁰⁾。

Table 2 には、超電導発電機の特徴的パラメータ及び界磁制御法での諸量の見積り値を常電導機と比較して示している。

1,000MVA 級の超電導機では、既存の常電導機の励磁電流と同程度の5,000A くらいにするのが常識的であろうが、界磁起磁力を上げ超電導機の単位体積当りの出力密度を高めるため、また超電導界磁巻線の自己インダクタンスを小さくして速応励磁が可能となるようにするため、励磁電流を大きくすることが望ましい。

この界磁制御法では、励磁電流を大きくするとブラシ、スリップリング及びパワーリードからなる励磁電力供給システムに大きな負担がかかり、大電流パワーリードからの低温部への熱侵入やパワーリード部の電力損失、スリップリングとブラシの接触面での火花の発生や摩耗など、問題点も伴う。したがって、常電導機の励磁法としては機械接触部の保守性、信頼性の観点から非接触化したブラシレス励磁方式が主流となっており、超電導発電機も将来はこのブラシレス化が要望されることになる。

4. シールド巻線制御の特性

前述のように、超電導機では導電性の電磁シールドがしゃへい及び制動機能の両面で重要な役割を果たすが、その機能は受動的であり、かつ界磁制御による能動的効果も小さいため、発電機の運転状態に十分対処できるものでない。したがって、二重シールドの外側の一つを常電導の巻線（以後、シールド巻線と呼ぶ）構造とし、その能動的制御によってしゃへい及び制動機能の改善、並びに制御性能の向上を図る方式を筆者らは提案した^{11)~14)}。これらの方式では主励磁は界磁

Fig. 7 Effect of ceiling voltage and AVR gain on load angle transients ($K_g = 0.0$).

巻線にて行い、補助励磁用のシールド巻線との組合わせて次下に述べるようなフレキシブルな制御法を構成できよう。

4-1 シールド巻線のみ励磁制御

界磁巻線は定励磁が永久電流励磁モードにするが、Fig. 4～6にみるように界磁回路時定数が大きい場合、界磁定励磁（無制御）と永久電流励磁モード（*印）の場合はまったく同一の特性となる。界磁定励磁で、シールド巻線制御を行う場合は、文献 8) の (2) 式において第 1 シールドの d 軸電圧方程式のみを次のように改め、

$$V_{1d} = (1/\omega_0) p\phi_{1d} + R_{11d} I_{1d} \quad (1)$$

また、シールド制御系を界磁制御と同様に一次遅れ系とし、同文献の (14) 式の界磁制御の式を第 1 シールドの制御式として次のように改めると、

$$pV_{1d} = (V_{1d0} - V_{10})/T_{1d} + \{(V_{t0} - V_t) + K_w(\omega - \omega_0)\} \times (K_{1d}/T_{1d})(R_{11d}/X_{ad}) \quad (2)$$

界磁制御の場合と同様、特性のシミュレーションができる。

このシールド巻線制御による発電機の特性は次節で合わせて述べることにする。

永久電流励磁モードは永久電流スイッチの採用で実現できるし、また磁気フラックスポンプや変流器構成にすると超電導閉回路を維持しながら電流調整が可能なプラシレス励磁方式^{16)~21)}となる。

4-2 界磁巻線及びシールド巻線の同時励磁制御

シールド巻線を界磁巻線と同時に励磁するもので、個々に独立に制御する方法も考えられるが、両巻線間に一定の制御律を適用した方法が有効である。これには以下に述べるように Fig. 3(b) に示した最適レギュレータ制御法^{12), 22), 23)}やシールドコイル制御法^{12)~15)}がある。

この二つの方法は、故障時等において超電導界磁巻線のクエンチの危険性を避けるために界磁電流の変動を抑制し、また制動力を高めて回転子動揺を抑えたり、端子電圧の回復特性を改善したりするなど、過渡特性の改善を図ろうとするものである。

(1) 最適レギュレータ制御法

この場合も系モデルの方程式は文献 8) に準ずるが、シールド巻線も制御するため本論文の (1) 式を加える。これらの方程式は状態方程式の形で、

$$pX = AX + GIU \quad (3)$$

となるが、平衡点近傍で線形化して次の状態方程式となる。

$$p\Delta X = A_1 \Delta X + B_1 \Delta U \quad (4)$$

また、観測方程式は

$$\Delta Y = C_1 \Delta X \quad (5)$$

ここで、状態変数ベクトル ΔX :

$$\Delta X = [\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta I_d, \Delta I_{1d}, \Delta I_{2d}, \Delta I_{fd}, \Delta I_q, \Delta I_{1q}, \Delta I_{2q}]^T$$

制御変数ベクトル ΔU :

$$\Delta U = [\Delta V_{1d}, \Delta V_{fd}, \Delta V_{1q}]^T$$

出力変数ベクトル ΔY :

$$\Delta Y = [\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta V_t, \Delta I_{fd}]^T$$

なお、係数マトリックス $A_1, B, C^{(22)}$ は紙数の都合で割愛する。

(4) 式及び (5) 式が得られると、周知のように次の評価関数 :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty [\Delta Y^T Q \Delta Y + \Delta U^T R \Delta U] dt \quad (6)$$

を最小化する最適制御則は

$$\Delta U = -R^{-1} B^T P \Delta X \quad (7)$$

となる。ここで、 P は次のリカッチの式の解である。

$$-PA_1 - A_1^T P + PBR^{-1}B^T P - C^T QC = 0 \quad (8)$$

なお、上式で重さマトリックス R は制御電圧 $[\Delta V_{1d}, \Delta V_{fd}, \Delta V_{1q}]^T$ に関する係数で $R = \text{diag} [a, b, a]$ 、一方重さマトリックス Q は出力変数 $[\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta V_t, \Delta I_{fd}]^T$ に関する係数で、当シミュレーションでは、 $Q = \text{diag}[1, 1, 30, 50]$ に設定した。

Fig. 3(b) に示すこの制御系は故障点が除去された後に投入するものである。

まず、除去時における状態量 X と定常量 X_0 を比較してその変化量 ΔX を求め、かつ一方では (8) 式により P を求める。その後 (7) 式の操作量 ΔU と定常値 U_0 より U を求め、 U を制限内に抑えて、 $pX = AX + GIU$ の式に入れることで次の時点の X を求める。このくり返しにより最適制御が実行される。

制御電圧に関する重み係数値 (a, b) をそれぞれ $10^5 \leq (a, b) \leq 10^{11}$ 間で変化させシミュレーションを行った。さらに、 $b = \infty$ すなわちシールド巻線制御のみ、並びに $a = \infty$ すなわち界磁巻線制御のみの最適制御を行った。この結果、同時制御の場合 a を大きくして界磁巻線制御に重みをかけても過渡特性の大幅な改善はみられず、反対に b を大きくしてシールド巻線制御に重みをかけると過渡特性の大幅な改善がみられた。したがって、界磁巻線制御はこの最適制御法でも効果は現われず、一方シールド巻線制御の効果は大きいといえる。

Fig. 8(a) は界磁巻線制御のみやシールド巻線制御のみ、またガバナ制御の効果を示す過渡特性のシミュレーション結果である。また、同図(b) はシールド巻線制御のみの特性で、これより重み係数 a に特性が大きく

左右されることが分る。

なお、シールド巻線のための最適制御においても、界磁電流の変動は他の制御法の場合とほとんど同一であったので、超電導界磁巻線のクエンチの危険性は同程度であろう。また、 $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ に関する重みの変更による過渡特性への影響は大きくなかった。

(2) シールドコイル制御法

筆者が提案したこのシールドコイル制御法の特徴については、既に文献13)~15)等において報告しているので、この方法の特徴の結論のみを述べ、詳細は割愛する。

本制御の基本原は $V_{sd} = V_{fd} + R_{11d} I_{1d}$ なる補償電源 V_{sd} をシールド巻線に加えることにあり、いかなる過渡的变化があっても超電導界磁巻線には交流電流が発生せず、したがって懸念される磁界変動はなく、クエンチの危険性を回避できる。さらに、回転子動揺や端子電圧回復などの過渡応答も改善される。この制御法では、シールドのしゃへい機能を考えずに制動機能を最大にとるようにシールド回路の q 軸回路時定数を独立に設定できる利点もある。

5. 無効電力補償装置制御の特性^{26,27)}

近年、電力系統の長距離、大容量化に伴い、無効電力不足及び系統安定度の低下という問題が生じている。この対策として、静止電力コンデンサ、界磁制御による系統安定化装置 (PSS) 等が実用化されてきたが、実用上限界があり、今日では電力用半導体の発達で静止形無効電力補償装置 (SVC: Static Var Com-

pensator) が実用化されるようになった。この SVC により無効電力供給と系統電圧維持、並びに系統安定度 (動態、過渡) の向上が期待されている^{24),25)}。

発電機の界磁制御は一種の無効電力制御であるが、超電導機ではその効果が小さいため、上述の SVC を発電機端子に外付けして用いることで、系統電圧の維持及び安定度の向上が期待できる。さらには、これは無効電力発生装置としてのみならず、その要素に最近研究が進んでいる超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES) を適用すれば有効電力の変成も可能である。

Fig. 3(c) は Fig. 1 の SVC のサイリスタ制御回路を示したものである。これには PSS と同様に速度信号 (場合によっては有効電力) を取りこむことができる。

ここでは、界磁巻線は定励磁とし、GOV 制御及び SVC 制御を行ったシミュレーション結果を紹介する。

系モデルの式は前述のように文献 8) に準じたものであるが、SVC を付加した場合送電系統の方程式は次のように変更を要する²⁷⁾。

$$\begin{aligned} V_d &= V_b \sin \delta - (\omega/\omega_0) (I_q - I_{rq} - I_{cq}) X_e \\ V_q &= V_b \cos \delta + (\omega/\omega_0) (I_d - I_{rd} - I_{cd}) X_e \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、

$$\begin{aligned} I_{rd} &= (\omega_0/\omega) \{1 - f(\alpha)\} V_q / X_T \\ I_{rq} &= -(\omega_0/\omega) \{1 - f(\alpha)\} V_d / X_T \\ I_{cd} &= -(\omega_0/\omega) V_q / X_C, \quad I_{cq} = (\omega_0/\omega) V_d / X_C \\ f(\alpha) &= (2\alpha - \sin 2\alpha) / 2\pi \quad (0 \leq \alpha \leq \pi) \end{aligned}$$

また、SVC 制御系は基本機能のみを考慮して次のように表す。

$$\begin{aligned} p\alpha &= (\alpha_0 - \alpha) / T_a + \{(V_{t0} - V_t) \\ &\quad + K_w(\omega - \omega_0)\} (K_a / T_a) \end{aligned} \quad (10)$$

以上の式において、 α : サイリスタの制御角、 K_a : SVC 制御器の利得、 T_a : SVC 制御器の時定数、 X_T : SVC リアクトルのリアクタンス、 X_C : SVC コンデンサのリアクタンス、またその他の記号は文献 8) に準じる。

$X_T = 1.8(\text{pu})$ とし、 K_a , X_C を変更したシミュレーション結果を他の制御と比較し、負荷角について Fig. 9 に示した。

まず、SVC 制御間の特性比較を行ってみよう。同図の (1), (2) は K_a の効果をみたもので、 K_a が大きいと負荷角の制動は良くなっている。GOV 制御がなく、 K_a が小さい (1) と GOV 制御を加えた (3) を比較した場合、GOV 制御の効果は明らかであるが、 K_a の大きい (2) と (3) を比べると GOV 制御の効果はほとんど認め

Fig. 8 Load angle transients for optimal regulator control.

- (a) effect of optimal regulator
- (b) influence of weighting coefficients a and b in optimal regulator

られない。このことは、SVC 制御の効果が K_a を大きくすることで GOV 制御の効果と同程度であることを意味している。また、GOV 制御のみの(6)と(3)を比較すると、SVC 制御の効果が顕著に認められる。

X_c の大小についてみれば、(1)と(4)の比較から X_c が小さい、すなわち SVC コンデンサの静電容量が大きい(1)の方が回転子制動は良い。

次に、GOV 制御の効果は、制御がまったくない(5)と GOV 制御の(6)と比べて判るように大きい、SVC 制御は(1)～(4)と(6)の比較にみたようにさらに大きい効果を呈する。

前に指摘した通りであるが、GOV 制御に AVR 制御を加えた(7)と GOV 制御のみの(6)を比べても AVR 制御の効果があまり認められないことが再確認できる。

以上のように、SVC を付加することで回転子動揺の制動が良くなり、安定度の向上、さらには界磁電流の変動抑制など極めて有効である。ただし、SVC 制御の効果はその容量との係りがあって、SVC の設定

容量の最適化が実用上問題となる。また、超電導機の界磁電流変動は抑えられ改善されるものの、その端子電圧及び有効電力の変動は避けられないようである。

なお、SVC 制御を行う場合には、界磁制御の速応効果が小さいので、界磁回路は永久電流スイッチや先に紹介したフラックスポンプによるブラシレス励磁方式を採用して永久電流励磁モードに維持する方が得策と思える。

6. む す び

超電導発電機において、常電導機のような界磁の速応励磁の実現性は超電導線材のクエンチ保護とのトレードオフ関係にあって、パルスあるいは交流用超電導線の今後の研究開発の成否にかかっているといつてよい。

それらの超電導線が得られない場合にあっては、本論文で提案考察したような SVC を発電機出力端子に取付ける VAr 制御方式、シールドの一つを巻線としてそれを強制的に界磁と同時に、またそのみを制御する方式などの採用を考える必然性があろう。

一方、超電導機は十分動態安定度が高いため、大幅な負荷変動や突発的な故障時以外では、それほど急激で大きな制御を要せず、定励磁または低速応答の励磁制御で十分であるから、この場合には永久電流スイッチを備えた界磁回路の永久電流励磁方式や、永久電流励磁モードを保ちつつ励磁制御も可能な磁気フラックスポンプによるブラシレス励磁方式などの適用が考えられよう。

以上、本論文では筆者らのこれまでの研究成果を紹介しながら、独断と偏見を交え、超電導発電機のソフト面での制御問題を考えた。しかし、超電導発電機の制御問題は単にソフト面のみならず、ハード的な設計問題にも絡むものであって、超電導実用線材の研究開発とも歩調を合わせた包括的検討を要する課題である。とくに、線材開発へのフィードバックを考えて、発電機の超電導界磁巻線の安定維持の観点からの経験磁界の過渡的挙動考察が要求される。これについて、研究の一部をすでに紹介したが⁹⁾、その後筆者らはかなりの研究成果を得ているので別稿で紹介したい。

終りに、本稿でまとめた最適レギュレータ制御法のシミュレーション研究は工学研究科修士課程修了生児島富美敏氏(現、(株)東芝)、またシールドコイル制御法及び SVC 制御法のシミュレーション研究は同修了生外園一夫氏(現、京都セラミックス(株))にそ

Fig. 9 Effect of VAr-control on load angle transients.

それぞれ協力頂いたもので、ここに記して両氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) T. H. Einstein: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. **PAS-94**, (1976) 310
- 2) T. H. Einstein: Sc.D Thesis, Mechanical Engrg., Massachusetts Institute of Technology (1970)
- 3) 牟田, 他: 電気学会論文誌, **B-100**, (1980) 739
- 4) H. E. Schwenk: Proc. of 1981 Electric Utility Engineering Conference, Subject No. 40 (1981) 44
- 5) 例えば, 牟田, 他: 電気学会論文誌, **B-102** (1982) 371
- 6) 例えば, J. L. Kirtley: IEEE Spectrum, 20, (1983) 28
- 7) 牟田, 他: 電気学会論文誌, **B-98** (1978) 829
- 8) 牟田, 他: 同上誌, **B-102** (1982) 227
- 9) 向井, 他: 電気学会論文誌, **B-104** (1984) 325
- 10) 例えば, 小林, 他: 日立評論, **56** (1974) 1161
- 11) 例えば, S. Y. Hahn, et al.: Electric Machines and Electromechanics, **5** (1980) 433
- 12) 牟田: 昭57電気四学会九州支部連大, 412(1982) 174
- 13) 牟田, 他: 電気学会論文誌, **B-101** (1981) 699
- 14) I. Muta: Electric Machines and Power Systems, **9** (1984) 179
- 15) 牟田, 他: 電気学会回転機/静止器合同研究会資料, RM-84-67/SA-84-38 (1984) 133
- 16) 牟田, 他: 昭58電気関係学会九州支部連大, 333 (1983) 159
- 17) 牟田, 他: 昭59同上連大, 458 (1984) 240
- 18) 牟田, 他: 第32回低温工学発表会予稿集, C1-3 (1984) 54
- 19) 牟田, 他: 昭60電気学会全国大会, 918 (1985) 1137
- 20) I. Muta: Proc. of ICEM in Lausanne, Swiss. (1984) 1118
- 21) I. Muta, et al.: Proc. of '85 SCEM in Shanghai, China, B-19 (1985) 139
- 22) 児島: 佐賀大学大学院工学研究科修士論文 (1982)
- 23) 牟田, 他: 昭58電気関係学会九州支部連大, 332 (1983) 158
- 24) 熊野, 他: 電気学会電力変換制御研究会資料, PCC-79-29 (1979) 1
- 25) 林, 他: 電気学会雑誌, **103** (1983) 803
- 26) R. M. Mathur, et al.: IEEE Trans. Power Apparatus Syst., **PAS-98** (1979) 1937
- 27) 外園: 佐賀大学大学院工学研究科修士論文, (1982)