

発電所励磁・调速系の適応形多変数制御システム

横川 純男(よこかわ すみお)

植木 芳照(うえき よしてる)

花田 俊一郎(はなだ しゅんいちろう)

① まえがき

我が国の電力系統は経済の高度成長に合わせて急速な発展を遂げ、その後もますます巨大化されつつある。また、社会の電気への依存度は日々強まり、電気の質の向上と安定供給の必要性が一層高まってきている。そこで、電力システムでは、設備機能の拡充や系統運用、又は制御面で各種の安定度向上策が施されている。

このような背景に対し、マイクロプロセッサの高速化、高性能化、小形化が急速に進み、発電所制御・監視・保護システムへの適用が着々と進められている。なかでも、発電所のシーケンサは既に十数年の歴史を持つまでになっているが、発電所の励磁制御系及び调速系のデジタル化についても、ようやくその気運が高まってきた。

発電所用励磁制御システム、调速制御システムのデジタル化方式には次の3種類がある。

- (1) 従来のアナログ制御方式の置換形
- (2) 現代制御理論による適応形多変数制御を励磁系及び调速系に適用する適応制御形
- (3) 中小容量発電所用として、起動・停止用シーケンサに AVR, GOV 機能を有する一括制御形

本稿では、適応制御形の応用例として、発電機励磁系とタービン调速系を対象にした適応形総合発電制御装置 (Total Adaptive Generation Controller : TAGEC) の概要を紹介する。

② 発電機励磁系とタービン调速系

電力系統の安定度は、発電機励磁制御系に深く関連している。例えば、過渡安定度向上のための発電機の超速応励磁、あるいは動態安定度向上のための電力系統安定化装置 (Power System Stabilizer : PSS) がその例である。

速応励磁系を有する発電機が相対的に大きな外部リアクタンスを介して系統に並列する場合、負制動現象が発生する。これは発電機の界磁回路による位相遅れが原因である。そこで、PSS は例えば発電機の位相角動揺と同位相の電力

動揺成分を入力とし、位相補正回路を介して、発電機相差角動揺に伴う端子電圧変動を制御する AVR による負制動現象を打ち消すような補助信号を AVR に与える。この位相補正回路は電力動揺の変動周波数に合わせた周波数応答特性に固定される。そのために、系統構成変更に伴う当該発電機からみた等価外部リアクタンスが変わると、電力動揺周波数が変わり、PSS の抑制効果が低減する。また、二つの系統がそれらの発電容量を基準にして、相対的に大きなリアクタンスの送電線で連系されていると、数秒以上の長周期動揺が発生する。これらの問題を考慮すると、固定された位相特性の PSS では、十分な機能を発揮し得ない場合がある。特に後者の場合、1 秒前後の当該発電機の固有動揺周波数とこの長周期の複合動揺が発生するので、単一の周波数を対象にした位相調整回路では、解決が困難である。仮に、このような長周期の電力動揺を入力とした PSS で、AVR を補正制御すると、発電機の界磁が過励磁ないしは低励磁制御されるおそれもある。

また、高速バルブ制御 (Fast Valving Control : FV) はタービンサーボ系の閉方向の高速性を利用した安定度向上対策である。しかしながら、その起動信号、制御量、復旧タイミングなどは種々の条件判断を必要とするため、その最適調整は容易でない。

③ 適応形総合発電制御装置 (TAGEC)

3.1 装置概要

前章で述べたように、系統安定度維持のために、発電機励磁系及びタービンの调速系は、それぞれ本来の制御機能に加え、種々の機能を要求されている。そこで、励磁系及び调速系を対象に、TAGEC が開発された (図 1)。

従来の発電機励磁制御システム (AVR) 及びタービン调速制御システム (GOV) は、各々個別に一変数フィードバック制御系で構成されている。これに対し、本システムは図 2 (a) のように、現代制御理論による適応形多変数制御システムで、発電機及びタービンの各種の状態変数を入力とし、励磁制御及び调速制御のための二つの出力を最適演算



横川 純男

昭和33年入社。電力系統制御システムの開発設計、系統現象解析と系統診断技術に従事。現在、(株)富士電機総合研究所系統制御技術開発部長。



植木 芳照

昭和52年入社。電力系統の現象解析、及び電力系統・発電機への現代制御理論の適用に従事。現在、(株)富士電機総合研究所系統制御技術開発部課長補佐。



花田 俊一郎

昭和54年入社。電力系統・発電機の監視・制御装置の開発設計、及び試験に従事。現在、(株)富士電機総合研究所系統制御技術開発部。

図1 TAGECの外観

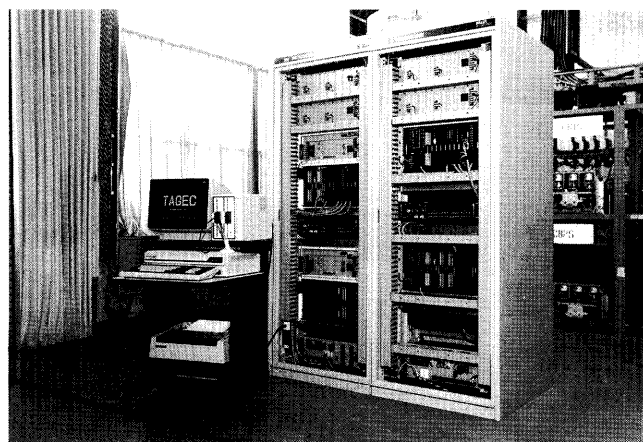
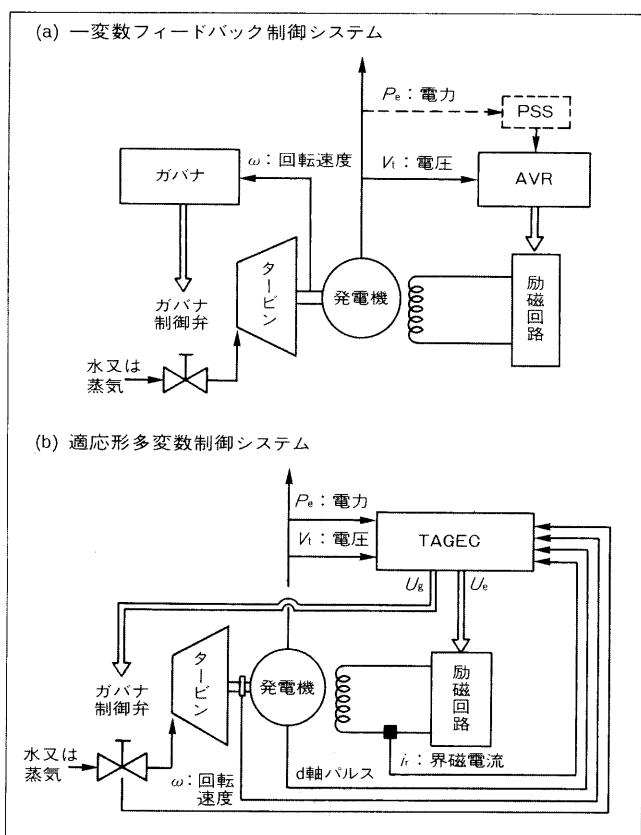


図2 励磁・调速制御方式



する方式である。その主な機能は次のとおりである。

- ・現代制御理論による適応形多変数制御システム
- ・励磁制御系、调速制御系を統合した協調制御
- ・運転状態によって大幅に変化する発電機の直・横軸リアクタンスの真値及び系統の等価外部リアクタンスを推定演算し、発電機の運転状態に即した適応ゲイン演算機能
- ・発電機端子電圧の直軸成分を用いた安定度余裕監視機能と、励磁強め制御、出力低減制御機能
- ・水力発電所の場合、水系動特性を加味した出力調整機能
- ・起動・停止・負荷遮断などのシーケンス条件の判断及び処理機能

- ・過度変化時の発電機状態量の記録機能
- これらの機能により、次のような特徴が得られる。
- ・負制動現象が解消できる。
 - ・系統構成変化、発電機運転状態変化に対し、適応した制御ゲインが与えられるので、常に安定な制御状態が維持される。
 - ・调速系への微小制御信号で、長周期動揺も抑制し、高速バルブ制御や制動抵抗に代わる効果を有する。
 - ・水力機の場合、水系動揺の抑制効果がある。

3.2 TAGECの適用方式

本システムには次のような2種類の適用方式がある。

(1) TAGEC-I

多変数制御モデルの電気系は電機子抵抗とダンパ回路を無視した Park の2軸モデル、連系系統は等価一機無限大系とする。また调速系はパイロットコイル以降を対象にしたモデルとする。すなわち、TAGECの制御出力は励磁系のサイリスタ点弧装置と调速系のパイロットコイルに直接与えられる(図3参照)。

(主として水力発電所用)

(2) TAGEC-II

多変数制御モデルの電気系は(1)項と同じであるが、機械系は従来の调速制御装置以降を対象にしたモデルとし、TAGECの励磁制御出力はサイリスタの点弧装置に与えられる。ただし、调速制御出力は所定のリミッタ範囲で、かつ制御信号の変動のみを補正制御的に与える(図4参照)。このことにより、タービンの熱的ストレス問題が避けられること、调速制御装置に必要な種々の制御条件はすべて従来の调速制御系で処理されること、などの利点を得られる。

(主として火力発電所用)

図3 TAGEC-I 構成図

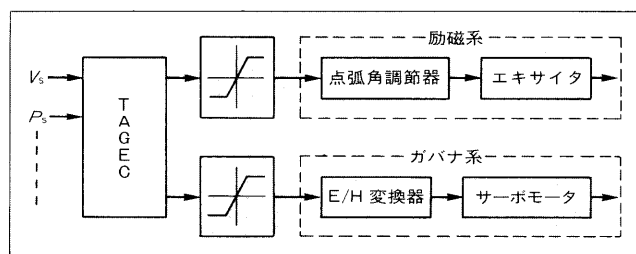
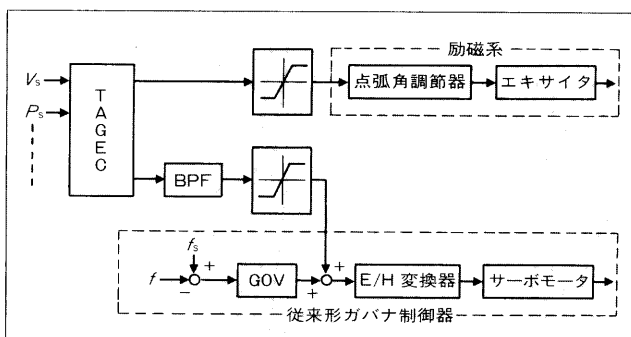


図4 TAGEC-II 構成図



3.3 TAGEC の多変数制御モデル

本システムの多変数制御モデルは、系統との並列運転状態における発電機の Park 基本式をベースとしている。また、TAGEC の演算サンプリング周期20ms に合わせて、発電機の電機子抵抗とダンパ回路特性は省略している。TAGEC-I, II に対応した基本モデルは次のとおりである。

(1) 発電機の基本式

$$\dot{\phi}_{fd} = [(r_f/x_{ad}) \cdot U_e - r_f(\phi_{fd} - \phi_{ad})/x_{lfd}] \cdot \omega_0 \dots\dots\dots(1)$$

(2) 系統並列時の運転方程式

$$\dot{\omega} = [(T_m - T_e) - D(\omega - \omega_0)]/M \dots\dots\dots(2)$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \dots\dots\dots(3)$$

(3) 発電機の出力

$$V_t = K_6 \cdot \Delta\phi_{fd} + K_5 \cdot \Delta\delta + \bar{V}_t \dots\dots\dots(4)$$

$$P_e = K_2 \cdot \Delta\phi_{fd} + K_1 \cdot \Delta\delta + \bar{P}_e \dots\dots\dots(5)$$

(4) 水力系ガバナ (水系モデルを含む)

$$\dot{P}_m = (1/T_g) \cdot (U_g - P_m) \dots\dots\dots(6)$$

$$\dot{q} = (2/T_w) \cdot (P_m - q) \dots\dots\dots(7)$$

$$T_m = 3q - 2P_m \dots\dots\dots(8)$$

式(8)は水系モデルを考慮した時の調速機開度 P_m と流量 q 、機械出力トルク T_m の関係を示すものである。

なお、式(6), (7), (8)は水系モデル $(1 - T_w S)/(1 + 0.5 T_w S)$ から得られる。

(5) 火力系ガバナ

$$\dot{X}_g = -K_g [K_f(\omega - \omega_0) + P_e - P_s]/T_g \dots\dots\dots(9)$$

$$\dot{T}_{mh} = [X_g - K_g \{K_f(\omega - \omega_0) + P_e - P_s + U_g - T_{mh}\}]/T_h \dots\dots\dots(10)$$

$$\dot{T}_{ml} = (T_{mh} - T_{ml})/T_{RH} \dots\dots\dots(11)$$

$$T_m = K_h \cdot T_{mh} + K_l \cdot T_{ml} \dots\dots\dots(12)$$

ただし、 ϕ_{fd} ：界磁磁束、 W ：回転角速度、 r_f ：界磁抵抗、 U_e ：界磁操作量、 ϕ_{ad} ：d 軸相互磁束、 x_{lfd} ：界磁漏れリアクタンス、 T_m ：機械トルク、 T_e ：電気トルク、 D ：ダンピング係数、 M ：慣性定数、 δ 、相差角、 V_t ：端子電圧、 $\bar{V}_t$ ：電圧線形化基準、 P_e ：電気出力、 $\bar{P}_e$ ：出力線形化基準、 K_1, K_2, K_5, K_6 ：線形化係数、 U_g ：調速機開度指令、 P_m ：調速機開度、 T_g ：調速機一次遅れ時定数、 T_w ：水系時定数、 q ：流量(水)、 T_m ：機械トルク、 X_g ：火力ガバナ PI 調節器の積分器出力、 K_g ：同ゲイン、 T_g ：同積分時定数、 K_f ：周波数偏差検出ゲイン、 P_s ：出力設定値、 T_{mh} ：高圧タービン出力トルク、 T_{ml} ：中低圧タービン出力トルク、 T_h ：高圧タービン車室遅れ(調速機遅れを含む)、 T_{RH} ：再熱器遅れ(中低圧タービン車室遅れを含む)、 K_h, K_l ：高圧、中低圧タービンの出力配分係数。

次に、状態方程式、出力方程式を線形化し、離散化し、評価関数 J によって各変数の適応ゲインが演算される。

$$J = \sum_{j=0}^{\infty} [Q_v (\Delta V_{tj})^2 + Q_p (\Delta P_{ej})^2 + R_e (\Delta U_{ej})^2 + R_p (\Delta U_{gj})^2] \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 Q_v, Q_p, R_e, R_p は重み係数で、 $\Delta V_{tj}, \Delta P_{ej}$ は j 時点の設定値に対する偏差、 $\Delta U_{ej}, \Delta U_{gj}$ は j 時点における励磁及びガバナ操作量の差分である。

3.4 TAGEC の構成

本システムは高速制御用マイクロコンピュータ (MIC REX シリーズ) により構成され、図 5 のような機能構成になっている。

(1) 操作量演算部

励磁系及び調速系操作量演算(図 6)、シーケンス条件判断、データ記録などの機能。

(2) マトリックス演算部

系統の等価リアクタンスの同定演算、制御モデルの適応化、発電機運転状態、系統状態の変更に伴う適応ゲインの演算。

(3) 安定度余裕監視制御部

発電機の直・横軸リアクタンスの演算、発電機端子電圧の直軸成分を演算、これを利用した安定度余裕監視、余裕確保のための発電機の増磁制御又は出力低減制御。

なお、発電機安定度余裕監視制御機能は従来の 91QLe リレー(進相無効電力監視制御)に対応するものである。

その原理は次のとおりである。一機無限大系において、発電機の励磁を一定の状態に、徐々に出力を増加すると、端子電圧 V_t の直軸成分 V_d が増し、その最大値 $V_{d(max)}$ の点を越すと発電機は加速状態になり、脱調する。しかし、こ

図 5 TAGEC の機能構成

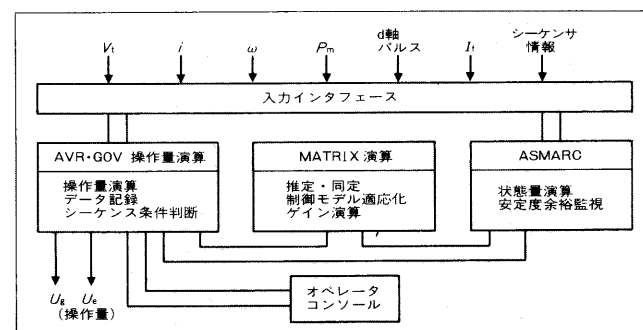


図 6 励磁・ガバナ多変数制御系ブロック

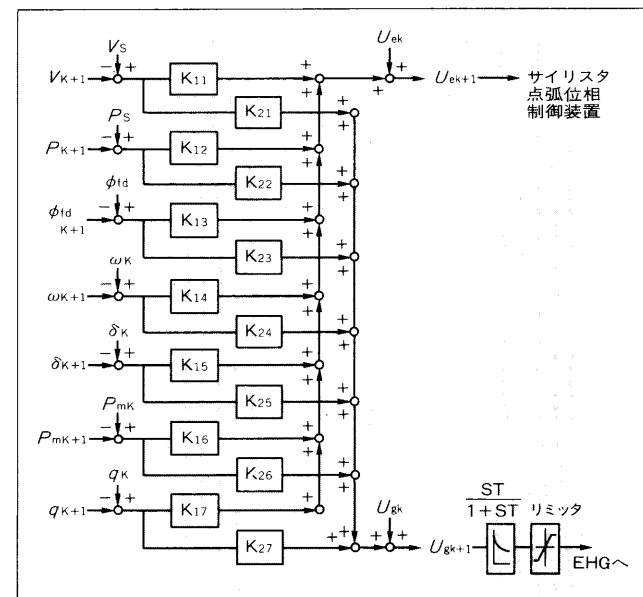


図7 $V_{d(max)}$ 原理説明図

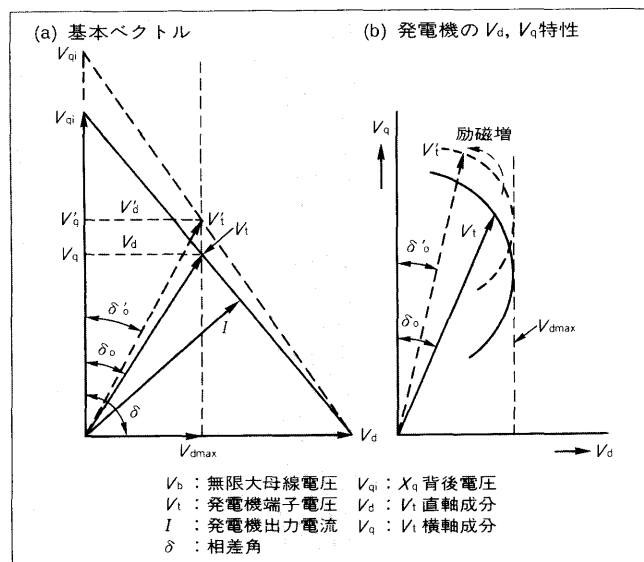


表1 TAGEC入出力信号

計 測 量	TAGEC内処理	状 態 量	備 考
d軸パルス	δ	V_t	TAGEC-I, II 共通
V_t 3相	ϕ_{ad}	P_e	
i_t 3相	V_t (r.m.s.)	ϕ_{td}	
i_t	P_e (r.m.s.)	W	
W	U_e (励磁出力)	δ	
P_m	V_s, P_s U_g (調速出力)	P_m q	TAGEC-I (水力発電所用)
P_s	U_g (調速出力) (BPF, $\pm 0.5\%$ リミッタ経由)	X_g P_m T_n T_l	TAGEC-II (火力発電所用)

の $V_{d(max)}$ は励磁を変えても変化しない (図7 参照)。

したがって、 $V_{d(max)}$ は式(11)で表現される。

$$V_{d(max)} = \frac{X_q}{X_q + X_{ex}} \cdot V_b \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 X_q : 運転状態における発電機横軸リアクタンス、 X_{ex} : 外部リアクタンス、 V_b : 無限大母線電圧。

図7(b)に示されるように、発電機の励磁を増すと、端子電圧 V_t (V_d , V_q)、相差角 δ_0 はそれぞれ、 V_t (V_d , V_q) δ_0' に変わり、 $V_{d(max)} \sim V_d > V_{d(max)} \sim V_d$ になる。

そこで、安定度余裕監視制御は想定される外部リアクタンスの最大変化 ΔX_{ex} を考慮した $V'_{d(max)}$ ($= \frac{X_q}{X_q + X_{ex} + \Delta X_{ex}} \cdot V_b$) に対し、現在値 V_d に余裕 ($V_d \leq V'_{d(max)}$) を与えるように制御範囲で増磁制御する。必要に応じて、発電機の出力低減制御機能も有する。

なお、TAGEC は X_q 及び X_{ex} を推定演算するが、特に X_q は出力状態に応じて、大幅に減小することが実測されている。700MVA 火力機で、 X_q が設計値1.65に対し、定格出力時1.40に減小する例がある。

(4) TAGEC の入出力

TAGEC で使用する各種の物理量は表1に示すとおりである。したがって、直接 TAGEC へ必要な計測入力 次の

とおりである。

・ d 軸パルス

タービン発電機の軸取付の界磁極位置検出用、又はこれに相当する信号

・ 発電機端子電圧 (PT 二次電圧 3 相) V_t

・ 発電機出力電流 (CT 二次電流 3 相) i_t

・ 発電機界磁電流 (界磁回路シャント) i_f

・ タービン回転速度 ω
タービン又は発電機軸取付の回転速度センサ出力

・ ガバナ開度 P_m

・ 出力設定値 P_s

(TAGEC-II のみに必要)

4 模擬送電線による性能検証

TAGEC-I, II 形の基本的な性能検証は、富士電機の模擬送電線設備の200kVA 火力機及び30kVA 水力機モデルを利用して行われた。その後、二機無限大母線系統において、TAGEC-II 形を適用した火力機と従来形制御方式による火力機が安定に並列運転し得るかなど課題を対象に、関西電力(株)と(財)電力中央研究所の御協力で、(財)電力中央研究所の交流・直流電力系統シミュレータでの検証試験が実施された。

4.1 検証条件

(1) 系統構成

送電線系統は500kV 系モデルで、2 回線300km (又は600 km) 相当が模擬された。

また、2 機の発電機は100kVA/90kW の4 極円筒機モデルで、その定格及び諸定数は表2のとおりである。

(2) 励磁・調速系制御条件

TAGEC の制御性能評価のために、次のような検証方法が採用された。

2 機の発電機励磁制御系は AVR, PSS 付 AVR, TAGEC-II 形の3 種類を適用し、タービンの調速制御系 (ガバナ) は電子式 EHG とする。ただし、TAGEC-II の適用機は、ガバナの開度調節部に TAGEC の補正制御信号を受けるものとする。

(3) 安定度向上効果の検証方法

2 機の発電機 G_1 , G_2 の励磁制御方式の組合せは AVR-AVR, AVR-RSS, PSS-PSS, PSS-TAGEC, (又は TAGEC-AVR, TAGEC-PSS) とする。

安定度限界チェックは G_2 出力定格値一定条件で G_1 出力増加調整による。

表2 発電機定格と定数

定 格	形式: 4極円筒機 3相, 出力: 100kVA 90kW
	電圧: AC220V, 回転速度: 1,500 1,800 rpm
定 数	X_d : 167% X_d' : 43% X_d'' : 37%
	T_a : 0.30秒 T'_{do} : 3.00秒

図8 二機系定態安定限界

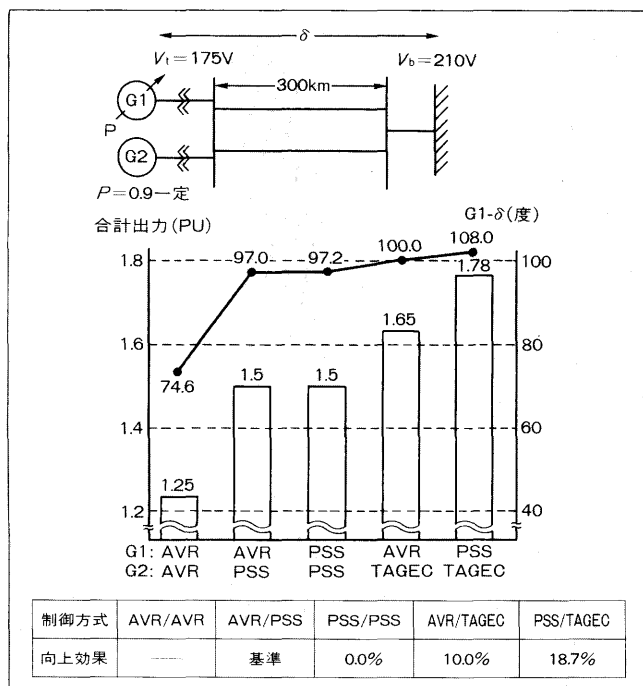


図10 二機系過渡安定限界

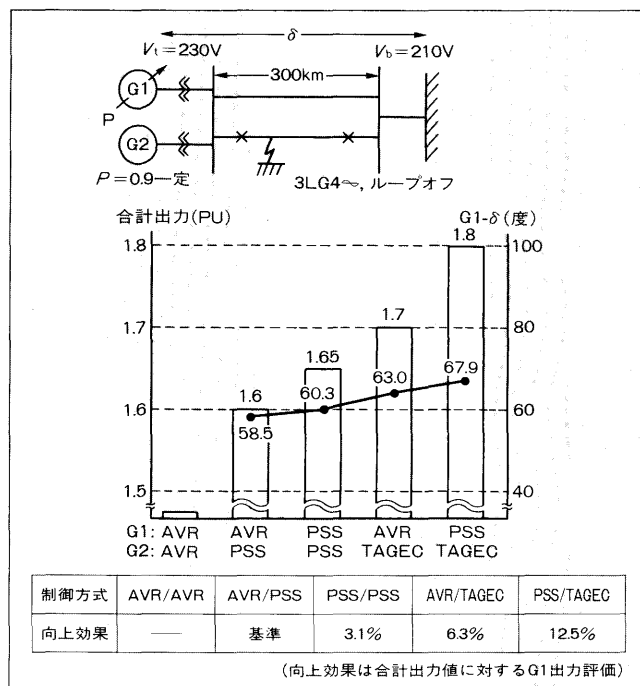


図9 二機系動態安定限界

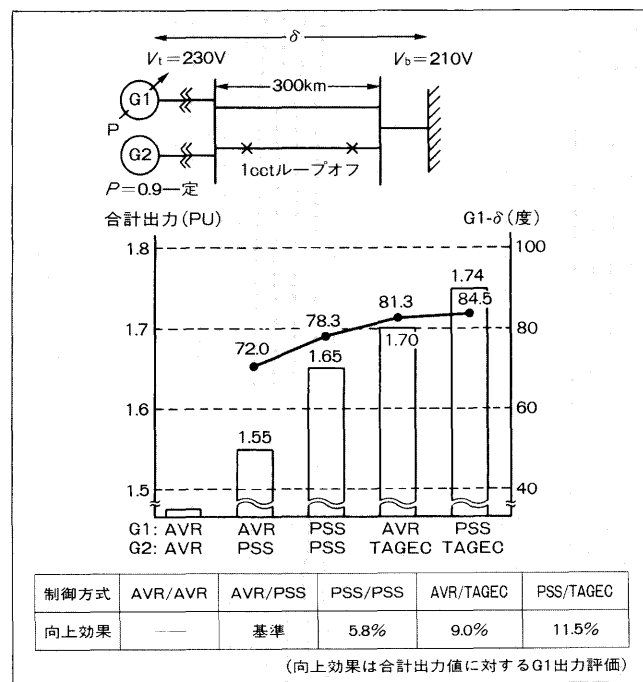
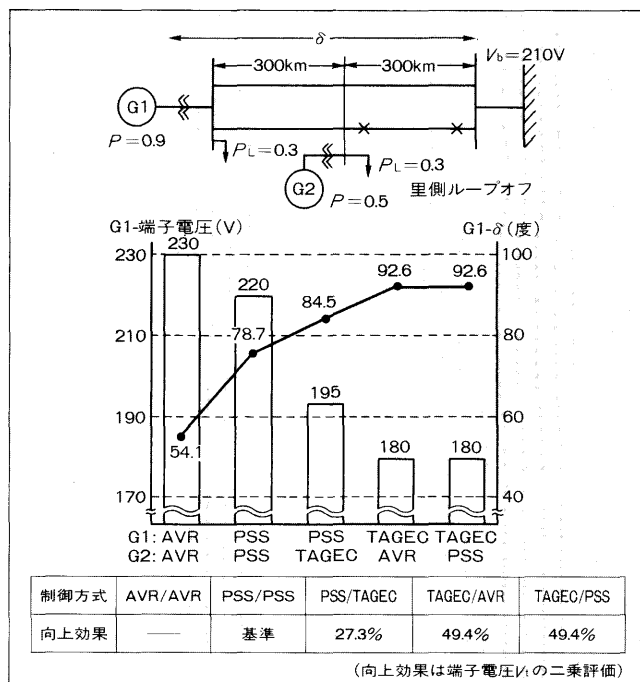


図11 二機長周期系動態安定限界



また、安定度向上効果の基準値は G_1 、 G_2 の励磁制御を AVR-PSS とした時の安定限界出力値とする。そこで、向上効果の評価は基準の安定限界出力に対する G_1 の出力増加量の割合とする。

主な検証テーマは二機無限大母線系における定態、動態、過渡安定限界と二機長周期系の動態安定限界の4ケースである。

(4) その他

TAGEC の性能検証テーマとして、一機、二機系における同相1LG、4LG（1回線3LG、他回線1LGで1秒後再開

路）など、不平衡故障時の TAGEC の安定性チェックも行われ、好結果が得られた。

4.2 検証結果

検証試験のうち、主な結果を図8～11に示す。その結果からわかるように、適応形多変数制御による発電機の励磁系及びタービン调速系の一括協調制御により、多くの特長が確認された。特に長周期動揺を発生しやすい系統では、その顕著な抑制効果が確認された。

⑤ あとがき

本稿では TAGEC の概要と、交流・直流系統シミュレータによる TAGEC-II 形の検証結果を中心に説明したが、これらのテスト結果を踏まえて、実系統における TAGEC-I 形の安定動作確認の目的で、昭和61年9月、関西電力(株)新大井発電所(水力機32MW)を対象に運転検証テストが実施された。引き続いて開発装置の製品化レビューを進め、実系統ランニングテストのため実用機完成に鋭意努力中である。

終わりに、本装置の開発に御指導を賜った上之園京都大学名誉教授、京都大学岡田教授、同荒木教授、並びに共同研究者の関西電力(株)山口総合技術研究所長、(財)電力中央研究所上之園理事をはじめ関係各位に心からお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- (1) Anderson, J.H.: The control a synchronous machine using optimal control theory, proc. IEEE 59, 1, 25 (1971-1)
- (2) Davison, E.J. et al.: The optimal output feed back control of a synchronous machine, IEEE Trans. Power Apparatus Syst, PAS-90, 5, 2123 (1971-9)
- (3) Moussa, H.A.M. et al.: Optimal power system stabilization through excitation and/or governor control, IEEE, S. M. TP 581-PWR (1971-2)
- (4) Kanniah, J. et al.: Excitation control of synchronous generators using adaptive regulators, IEEE PAS No.3, 5, 897 (1984-5)
- (5) Ohtsuka, K. et al.: A multivariable optimal control system for a generator, IEEE, Vol. EC-1, p.88-99 (1986-6)
- (6) Uenosono, C. et al.: Development and testing of an automatic stability prediction and control for a synchronous generator by air gap flux, IEEE PAS-89, 55 (1970)
- (7) 大塚敬ほか：発電機励磁/ガバナ多変数制御，電気学会論文誌 B, Vol.104, No.11, p.733-740
- (8) 田中裕幸ほか：現代制御理論による発電所適応形多変数制御システムの開発，電気学会電力技術研究会, PE-85-4 (1985)
- (9) 田中裕幸ほか：適応形多変数制御方式の発電所励磁・調速系への適用検証，電気学会電力技術研究会, PE-86-127 (1986)
- (10) 岡田隆夫・横川純男：安定度の予防制御・監視方式，電気学会雑誌, Vol.106, No.7, p.634-636 (1986)
- (11) 田中裕幸ほか：多変数最適制御の発電所励磁・調速系への応用，電気学会雑誌, Vol.106, No.7, p.657-664 (1986)
- (12) Cheng, Shi-jie et al.: An adaptive synchronous machine stabilizer, IEEE PWR5-1, No.3, p.101 (1986-8)

最近公告になった富士出願

〔特 許〕

公告番号	名 称	発 明 者	公告番号	名 称	発 明 者
特公昭62- 4946	超電導回転機の高スヘリウム排出装置	近藤 香	特公昭62- 7686	量産型薄膜生成装置	西浦 真治
特公昭62- 6343	ガラススラリ塗付装置	百瀬 昭 山田 敏総	特公昭62- 7773	スイッチングレギュレータ	野村 年弘 植木 浩一
特公昭62- 6428	電力変換装置のインバータ運転制御方式	木下 繁則	特公昭62- 8156	シンチレーション形放射線検出器	岡村 英輔
特公昭62- 6432	ダイレクト・デジタル制御装置における給電電流実値の取込方式	小原 正樹	特公昭62- 8216	移動磁界式粉碎，混合等処理装置	渡部 安雄 土井 正明
特公昭62- 6434	直流電動機の世界制御装置	鯉江 和裕 石田 紘一 高橋 一浩	特公昭62- 8217	移動磁界式処理装置のワーキングピース	高橋 武男 渡部 安雄
特公昭62- 6435	直流電動機の制御装置	石田 紘一 高木 健夫 鯉江 和裕	特公昭62- 8218	電磁式粉碎処理装置	鶴田 和博
特公昭62- 6438	直流式無整流子電動機制御システム	高橋 哲	特公昭62- 8219	移動磁界式粉碎，混合装置の被処理物取出方式	野間 義功 美麗賢次郎
特公昭62- 7484	光温度検出器	柴田 一喜 伏見 正一 矢部 正也	特公昭62- 8220	電磁式粉碎，混合等処理装置	鶴田 和博
特公昭62- 7514	放射性ガス捕集測定装置	山口 清治 山内 英嗣 河野 悦雄 山佐 哲	特公昭62- 8221	電磁式粉碎混合等処理装置	虎口 信
			特公昭62- 8222	電磁式粉碎処理装置	渡部 安雄 高橋 武男 米沢 栄一
			特公昭62- 8894	機械保持形電磁接触器	佐々木正俊 清水 源広



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。