

同期機励磁制御による電力系統安定化装置

Power System Stabilizer Using Excitation Control System

In recent years, increases in generator unit capacity and in the distance of power transmission lines have caused deteriorations in transmission power stability, necessitating development of improved power stabilizer using an excitation system. And too, at new pumped storage power plants, a power swing is sometimes caused during pumping operations due to a cross-linking of its voltage with other power system voltages. To correct these problems, the most effective method has been felt to be an application of a braking torque compensating signal to the excitation equipment.

Recently Hitachi developed a power system stabilizer which uses a power variation signal which detects rotor angle oscillation from the output of synchronous machines. In field tests—including generator on-load indicial response tests, transmission line capability tests, and one line out of two transmission lines breaking tests—the stabilizer shortened the power swing period to less than 30% of the normal period.

小林倫明* *Michiaki Kobayashi*

百地 康** *Yasushi Momochi*

磯野 昭*** *Akira Isono*

1 緒 言

近年、発電所の単機容量はますます大容量化する方向にあるが、発電機容量の増大に比べ短絡比は小さくなる傾向にある。また、電源立地の問題から新設電源基地は需要地から遠隔化し、このため、送電系統は長距離大容量化してきた。これらの諸因により、電力系統は安定度が低下する傾向にあり、その対策の一つとして高速応の励磁制御装置が用いられ、また過渡安定度向上のために高い頂上電圧が用いられる傾向にある⁽¹⁾。

しかし、ここ数年来の理論的検討、デジタル コンピュータによる解析及び実機を用いての試験によれば、速応性能が高く頂上電圧の高い励磁装置は、系統事故時の過渡動揺の第1波の抑制には有効であるが、反面、相差角動揺に関してはその高ゲイン、高速応性の故に系統条件によっては、かえって第2波以降の減衰を弱めることのあることが明らかにされてきた。これに対しては、同期機の励磁系による制動トルクを強めることにより電力動揺を抑制する補償信号を励磁装置に加えることが有効であり、補償信号としては発電機の軸速度、周波数、電力などがよいことが分かってきた。

このたび日立製作所では、上記の電力動揺抑制を目的とした電力系統安定化装置（Power System Stabilizer 以下、PSSと略す）を開発し、フィールドテストにおいて良好な成果を得ることができた。本稿は、このPSSの動作原理、構成及びフィールドテストの結果などについて述べる。

2 動作原理

図1に示す無限大母線に接続された同期機の動作を微小電力動揺に関して線形化近似すれば、トルク及び速度、相差角、端子電圧の関係として図2のブロック図のように表わすことができる。同図において $K_1 \sim K_5$ で表わされる特性のうち、 K_3 のみが同期機と系統のインピーダンスの関係のみで定まるが、

残りはすべてインピーダンスの他に同期機の運転状態によって変わる。

そこで同期機の運動を振動系として取り扱い相差角と同相の同期化トルク及び速度と同相の制動トルクとによって表わせば図3のブロック図のようになり、その振動特性は振動周波数 $\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ 、制動特性 ξ を有し次式で表わされる⁽²⁾。

$$S^2 + \frac{D}{M}S + \frac{\omega_0 \cdot K_1}{M} = 0$$

但し、 $\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_0 K_1}{M}}$: 固有角周波数

$$\xi = \frac{D/2}{\sqrt{\omega_0 K_1 M}} : \text{減衰率}$$

ここで、

S : 微分演算子 (d/dt)

D : 制動トルク係数

K_1 : 同期化トルク係数

M : 発電機の慣性定数

ω_0 : ベース回転角速度

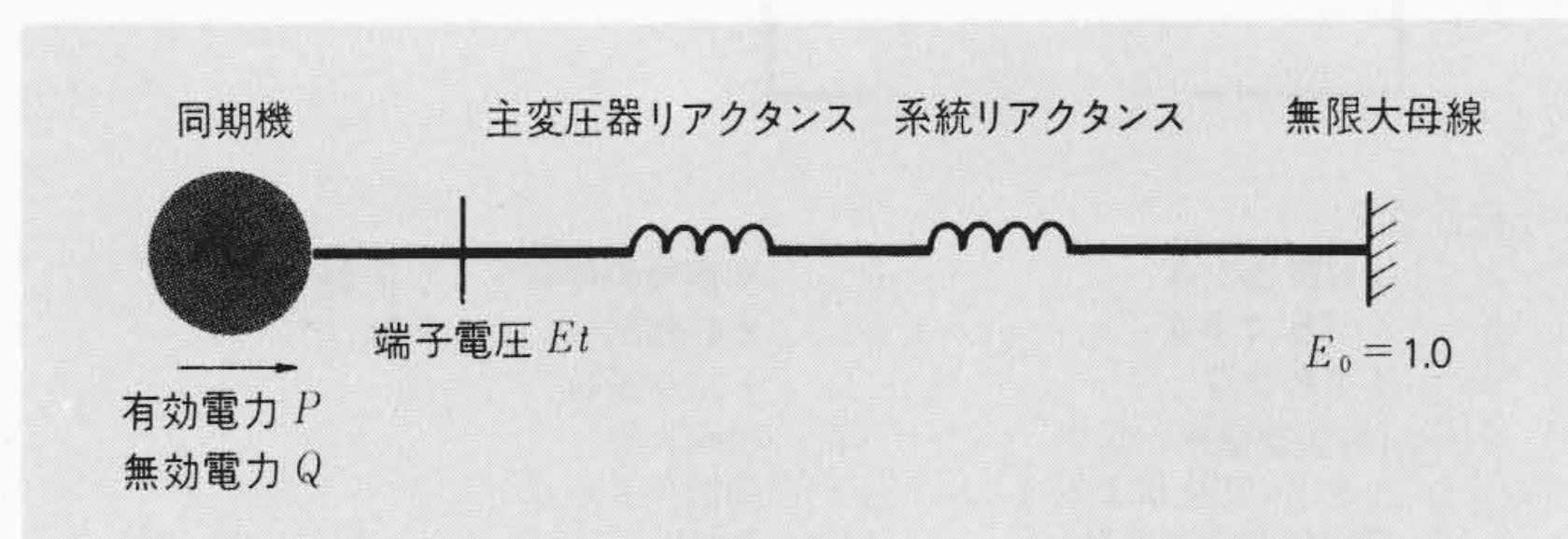
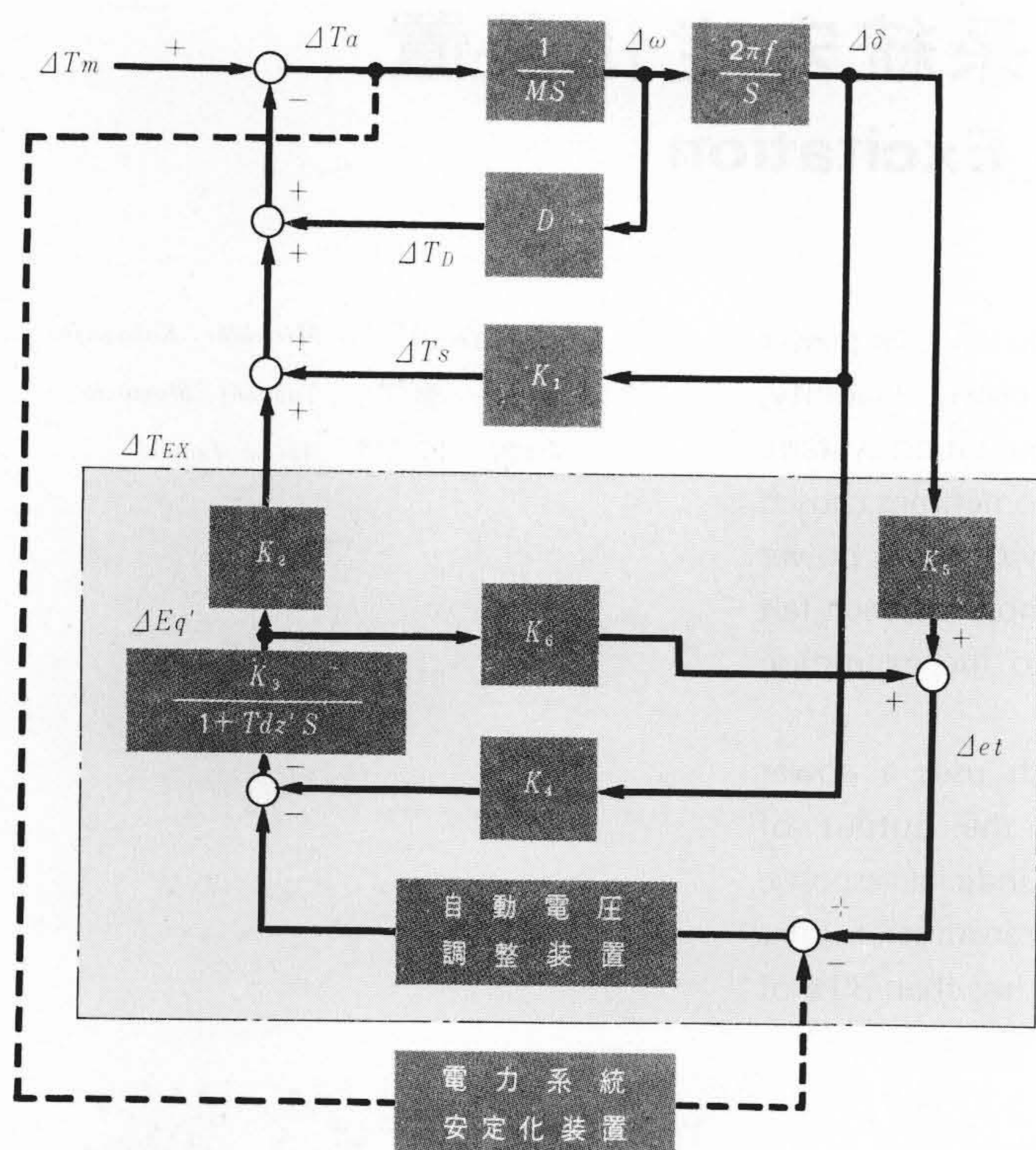


図1 対象とする系統 1機無限大系による電力動揺は、発電機の運転特性と系統インピーダンスとの関係によって説明される。

Fig. 1 System Representation

* 関西電力株式会社建設部電気課 副長 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所日立研究所



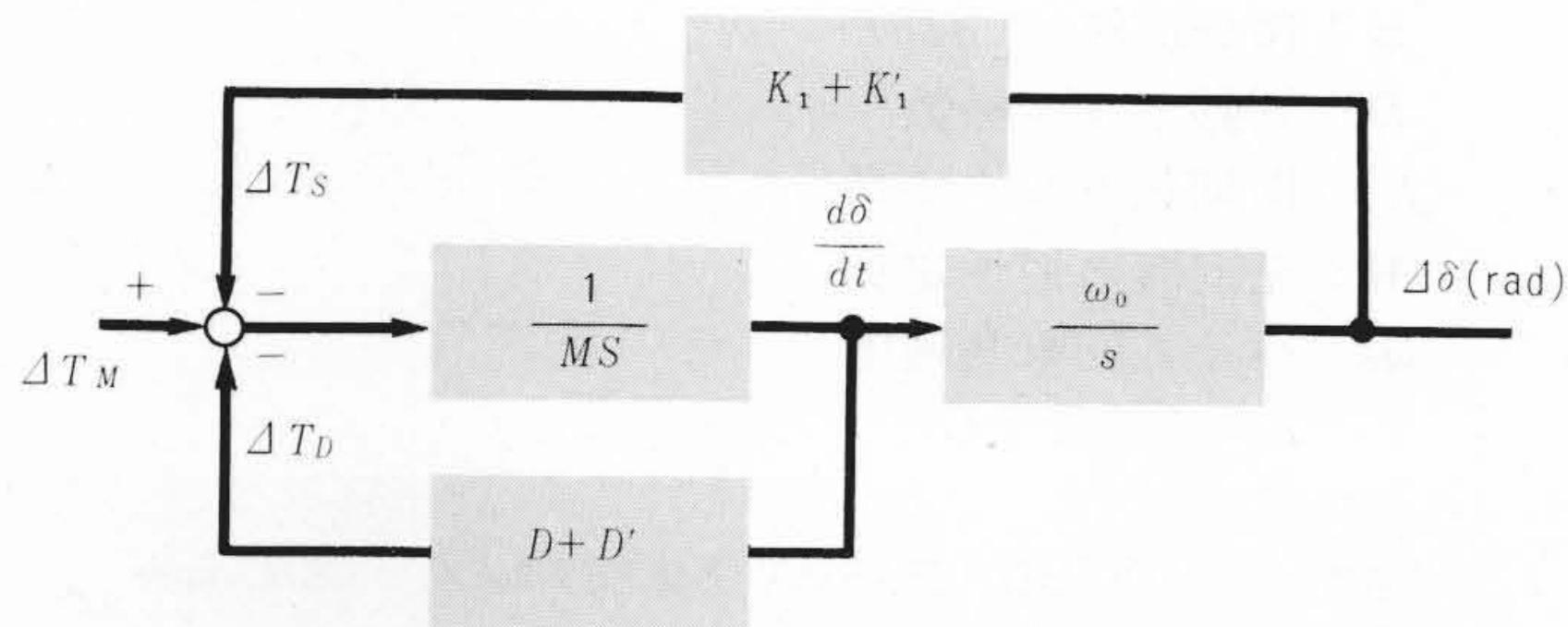
注：記号説明

M 単位慣性定数	ΔT_m 機械入力
S ラプラス演算子	ΔT_a 加速トルク
D 制動トルク係数	$\Delta \omega$ 速度
$T_{dz'}$ 発電機負荷時界磁時定数	$\Delta \delta$ 相 差 角
K_1 E_q' 一定時 $\Delta \delta$ 変化による電気トルクの変化係数	Δe_t 端子電圧
K_2 δ 一定のとき $\Delta E_q'$ 変化による電気トルクの変化係数	ΔT_{EX} 励磁系による電気トルク
K_3 外部リアクタンスと発電機リアクタンスにより定まる係数	ΔT_s 同期化トルク
K_4 位相角度変化による減磁効果	ΔT_D 速度変動による制動トルク
K_5 E_q 一定のときの $\Delta e_t / \Delta \delta$	
K_6 δ 一定のときの $\Delta e_t / \Delta E_q'$	

(Δは変化分を示す)

図2 同期機の線形化近似ブロック線図 系統インピーダンスを介して、無限大母線に接続された同期機の微小電力変動は、速度及び相角度と電気トルクの関係式として表わすことができる。

Fig. 2 Linearized Small Perturbation Relations of a Single Generator Supplying an Infinite Bus Through External Impedance



注：記号説明

M 単位慣性定数	D 同期機の制動トルク係数
S ラプラス演算子	D' 励磁制御系による制動トルク係数
ω_0 基準角速度	
K_1 d 軸鎖交磁束一定のとき $\Delta \delta$ 変化による同期化トルク係数	ΔT_m 機械入力
K_1' 励磁制御系による同期化トルク係数	ΔT_s 同期化トルク
	ΔT_D 制動トルク
	$\Delta \delta$ 相 差 角

図3 二次振動系としての同期機ブロック図 同期機の運動は、同期化トルクと制動トルクとの関係より二次振動系として表わすことができる。

Fig. 3 Torque-angle Loop Defining Synchronizing Torque ΔT_s and Damping Torque ΔT_D

通常この角周波数は5～10rad/s程度であり、系統構成が大きく変わってもせいぜい2～20rad/s程度である。同図において K_1 は d 軸鎖交磁束 E_q' 一定のとき相角度の変化分に対する発電機固有の電気トルクの変化係数であり、 K_1' は励磁制御系から発生する同期化トルク係数である。一方、同期化トルクと90度位相が異なり回転速度と同相の信号としてフィードバックされる電気トルク係数は制動係数 D として表わされ発電機固有の係数であり、 D' は励磁制御による制動トルク係数である。このうち、 K_1' は通常の機器定数の範囲では K_1 の10～20%以下であり、これが負値となっても余り問題にならないが、 D' は D と同じ大きさの負値となり得るので $D + D' < 0$ となるとその振動は発散系となり動態安定度が失われることが考えられる。そこで電力動揺の抑制のためには、負の制動トルクを補償するように正の制動トルクを加えることが必要であり、このために同期機の相角度動揺より信号を検出し、位相及びゲインを調整して励磁制御系に加え、励磁系トルクを補償する制御装置がPSSである。

PSSの入力信号としては相角度動揺を表わすものとして、同期機速度変動($\Delta \omega$)の外に速度変動を引き起こす加速トルク ΔT_a に着目し、同期機出力変動 ΔP_e を使用することができる。日立製作所では、PSSの開発に当たり各方式を解析検討した結果、制御系として他の方式に比べ雑音などに強く、検出の容易な電力信号方式を採用することにした。

PSSにより制動トルクを補償する一例を高速励磁系及び比較的応答の遅い励磁系について図4(a)と(b)に示す。同図(a)はサイリスタ式静止励磁装置を用いたもので、自動電圧調整装置(Automatic Voltage Regulator 以下、AVRと略す)を介して与えられる励磁系トルクは $K > 0$ 、 $D < 0$ となっている。この場合、PSSの位相補償を加速電力 P_a より遅れとし、ゲインを所望の値に選定することによりPSSによる励磁系トルクと、PSSなしの励磁系トルクの合成値を $D > 0$ としたものである。一方、同図(b)は直流励磁機を同一の発電機に適用した場合の特性を示しており、PSSなしの励磁系トルクは K 、 D ともに負値となっているがPSSにより位相進み補償を行なうことにより $D > 0$ としたものである。従って、PSSによる補償は励磁制御系の特性によってゲイン及び位相を決める必要があるが、サイリスタ分巻自励式の場合には一般にPSSのゲインは0.3～0.7P.U(V)/P.U(W)、位相は遅れ10～50度程度に設定されている。

3 制御方式

PSSの構成を図5に示す。本方式は同期機の電気出力をPSSの入力信号として作動するものであり、同期機の出力はホールコンバータを利用した電力変換器によって電圧信号に変換され、ローパスフィルタにより、リップルを除去した後、信号増幅器によって演算レベルを変換する。PSSのゲインは粗切換器と密調整器との組合せによって各種の励磁方式に適用できるものとしてあり、位相補償回路も回路切換によって遅れ、進みを切り換え、遅れ90度から進み90度まで調整可能としてある。この外、加速電力を検出するためにベース電力を除去するバンドパスフィルタを用い、系統の電力動揺の周波数に相当する信号を取り出している。更に制御装置には同期機の電力下限検出装置を内蔵し、発電機の負荷しゃ断時にPSSを自動的に除外することにより励磁制御系に対しじょう乱を与えないようにしているほか、制御回路異常時には装置をロックするものとしている。

図6は、PSSの伝達関数の一例を示す。

図4 励磁系によるトルク特性
制動トルク係数が負値となる励磁系トルクにPSSを付加することにより $D > 0$ とすることができる。

Fig. 4 Vector Diagram of Excitation System with Power System Stabilizer

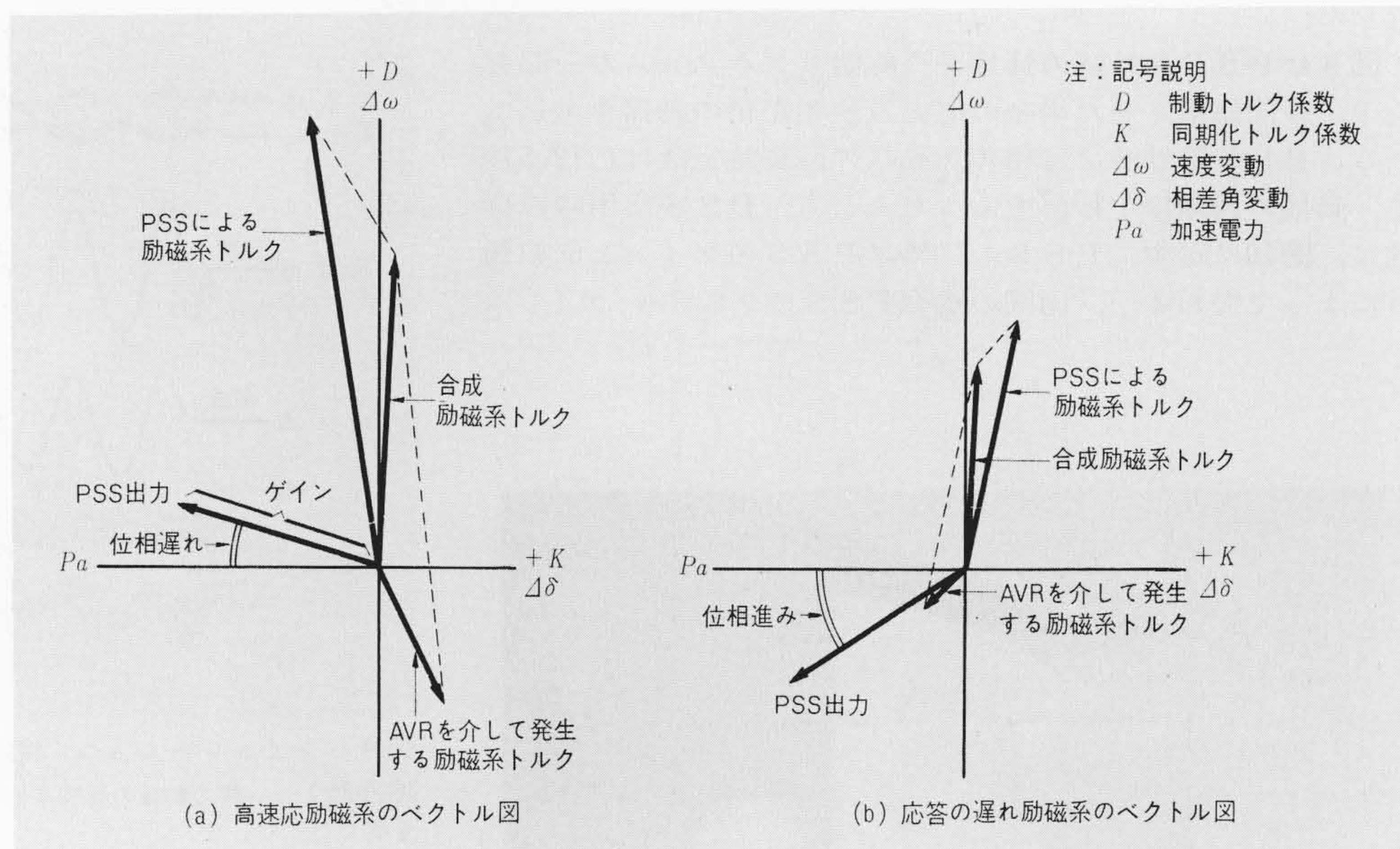


図5 電力系統安定化励磁制御回路
電力信号は、バンドパスフィルタにより電力動揺成分として取り出され、ゲイン及び位相を調整し、励磁制御装置に印加される。

Fig. 5 Schematic Diagram of Power System Stabilizer

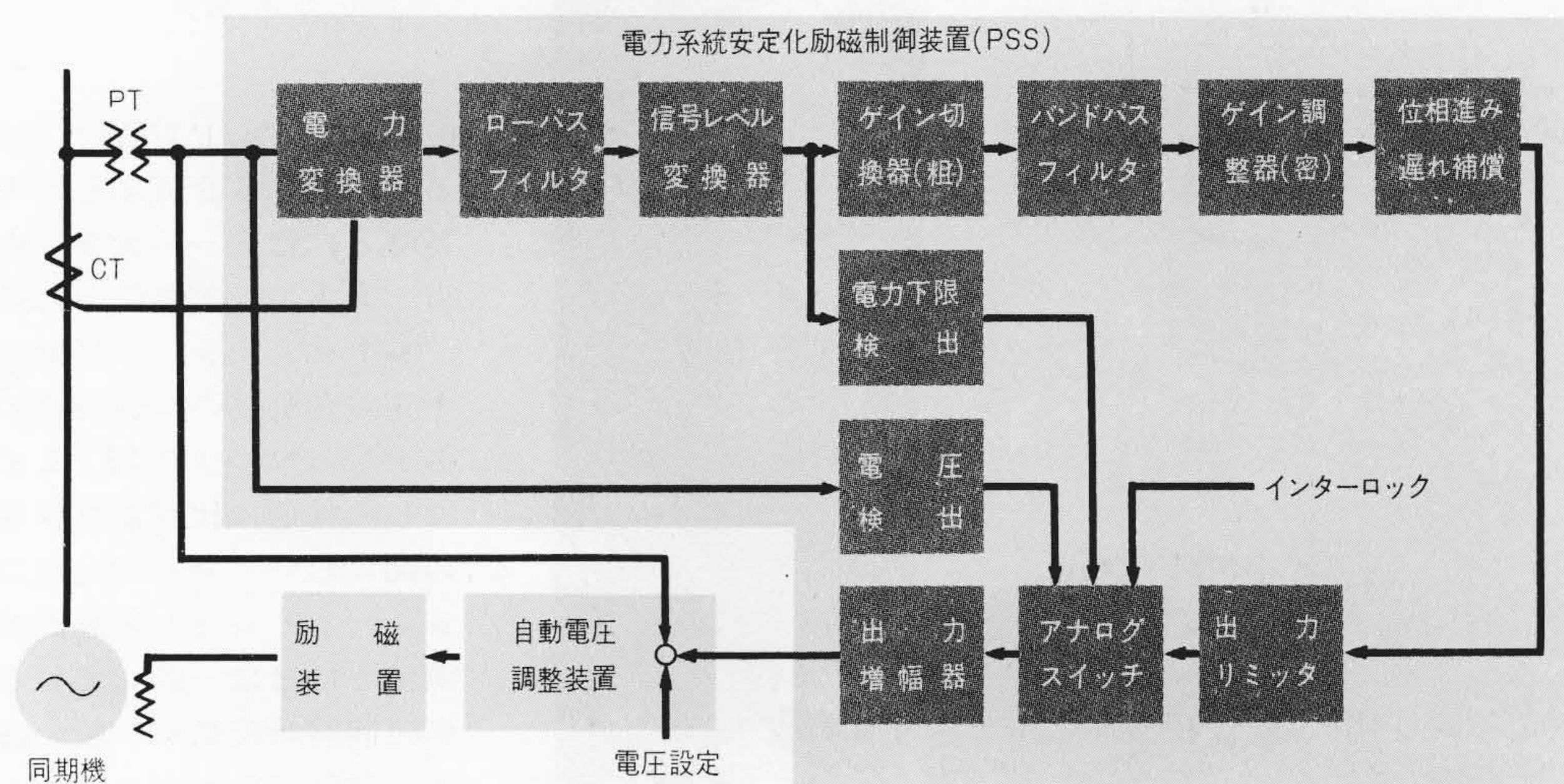
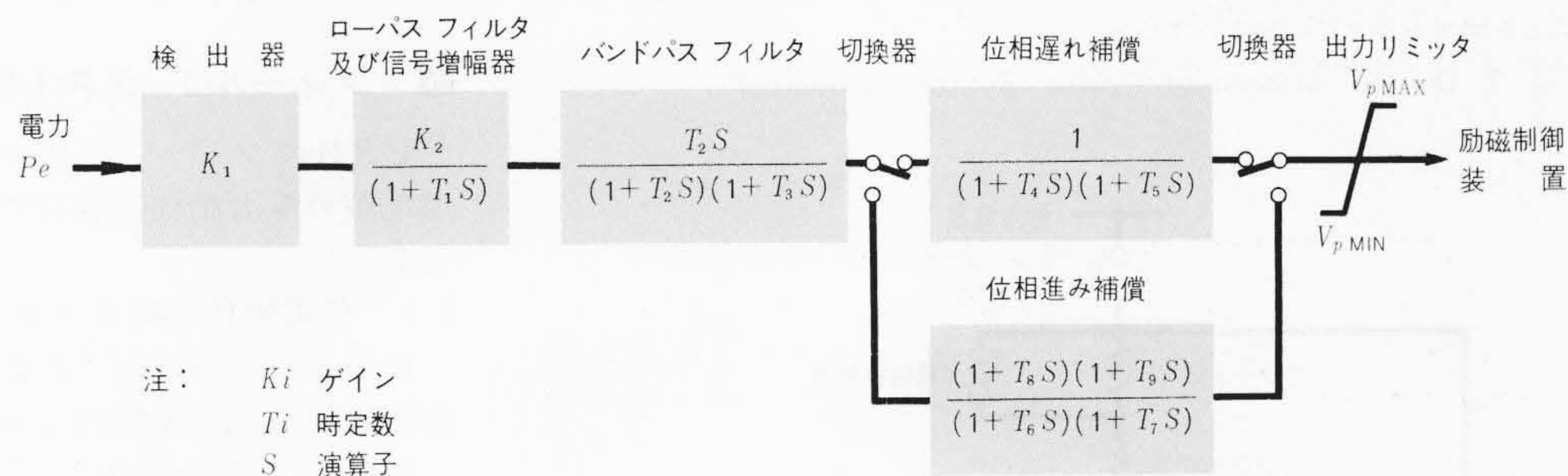


図6 電力系統安定化装置の伝達関数
同期機の出力は、バンドパスフィルタ及び位相補償回路により信号が調整されて励磁装置へ印加される。

Fig. 6 Block Diagram of Power System Stabilizer



同図においてバンドパスフィルタは、 $2 \sim 20 \text{ rad/s}$ の電力動揺を通過させるものであり、位相補償回路はそれぞれ約 $0 \sim 45$ 度の位相制御回路2組より構成されている。

PSSの演算回路は集積回路(IC)化により小形化されており、トランジスタ、あるいはICなどにより制御するAVRと組み合わせる場合には、制御電源を共用化することも可能である。一方、AVRが磁気式制御装置の場合には、PSS用の制御電源を設け、必要に応じて信号増幅器を追加することにより組み合わせ可能であり、新設の励磁装置だけでなく、既設の励磁装置に対しても適用可能である。

以下、このたび関西電力株式会社黒部川第四発電所(図7

参照)及び同新黒部川第三発電所用として納入したPSSの工場試験及びフィールドテストについて述べる。

4 工場試験結果

PSSのフィールドテストに先だち、PSSによる電力動揺効果を小形実験M-Gセットを用いて1機無限大系のシミュレーション試験により確認した。試験装置の励磁方式はサイリスタ励磁とし、PSSには電力信号方式の実機を用いた。試験回路を図8に示す。シミュレーション試験は、系統のリアクタンスを急変させることによって電力動揺を発生させ、PSSの設定値と電力及び相角動揺の減衰特性の関係を測

定した。

図9はPSS除外時の特性で、線路リアクタンスの一部を約0.2秒間急増させた場合の電力及び相差角の動揺を示している。PSS除外時には相差角動揺の減衰時定数は約12.5秒で、動揺の周期は1秒弱であった。一方、PSS使用時の特性は、図10に示す。PSSの効果はPSSのゲインと位相補償によって変わるが、同図の場合PSSのシステムゲインは



図7 PSSキュービクル PSSの制御ユニットはIC回路で構成され、ユニット用ボックスに収納されている。

Fig. 7 Control Cubicle of Power System Stabilizer

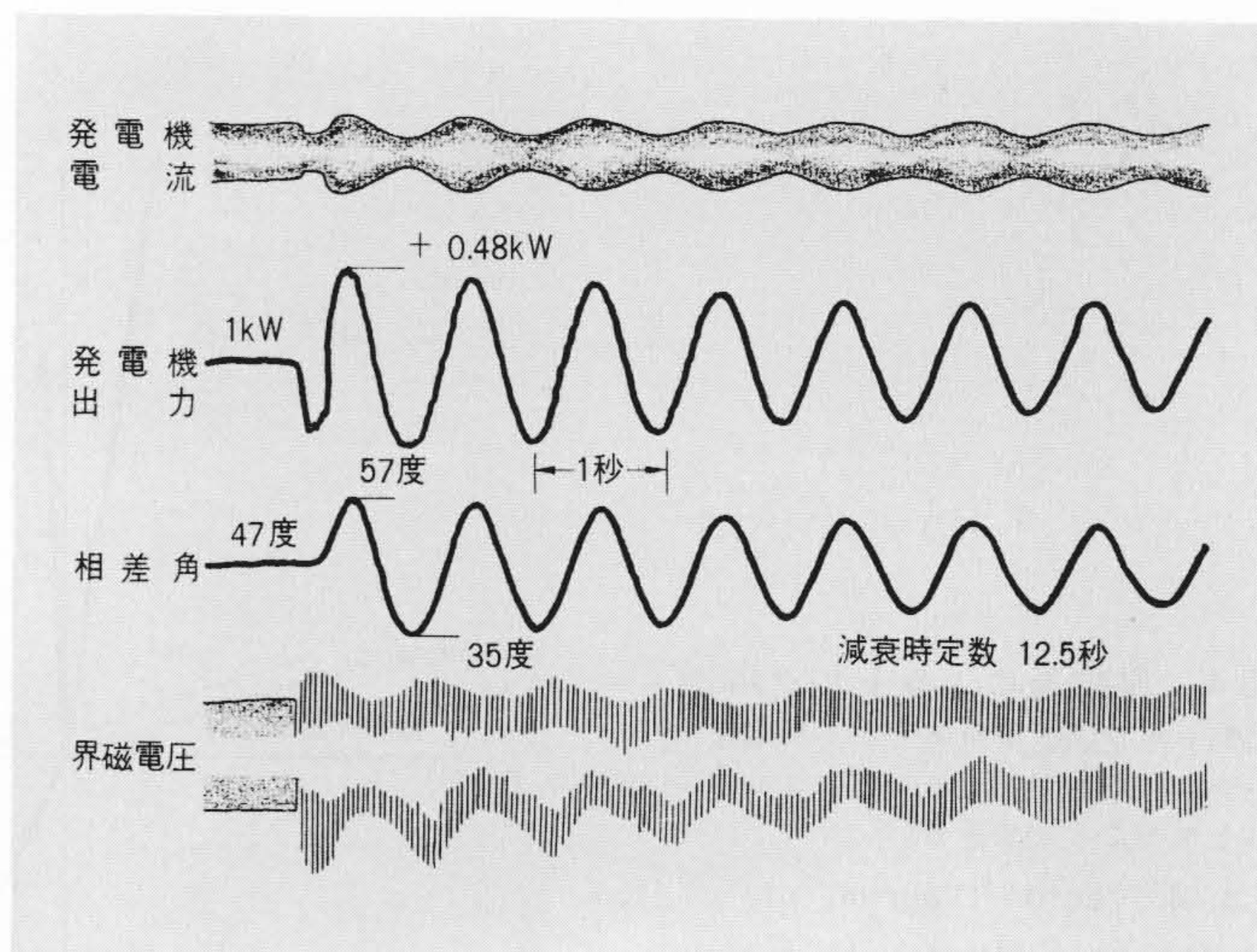


図9 シミュレーション試験における電力動揺試験結果(PSS除外時) 電力動揺の周期は約0.9秒で減衰振動したが、安定までに長時間を要した。

Fig. 9 Power Oscillation in Simulation Test without Power System Stabilizer

0.56 P.U(V)/P.U(W), 位相補償は遅れ53度の場合を示している。PSSを使用した場合、電力動揺の第1波はPSS除外時とほぼ同一の大きさを示しているが、第2波目以降の減衰が大きく、制動係数は約11倍に改善された。

シミュレーション試験によるPSSのゲイン及び位相補償と相差角動揺の減衰特性の関係を、図11に示す。PSSのシステムゲインが0.23, 又は0.56いずれの場合においてもPSSなしの状態に比べ減衰特性が極めて良く、位相20度から70度の間において減衰時定数は30%以下に短縮されている。また、シミュレーション試験回路の定数を用いて計算した結果と実測値とはほぼ一致している。なお本試験に用いた発電機は、界磁回路時定数が一般の商用機に比べ短いため、界磁回路による制御遅れが少なく、このため位相補償は、やや遅れ大においてPSSの効果が良くなっている。

5 フィールドテスト結果

PSSのフィールドテストは、発電機との組合せ試験及び送電線の電力動揺試験について行ない、PSSの効果を測定した。

5.1 発電機負荷時インデシャル応答試験

PSSの効果測定のために、昭和48年9月に関西電力株式会社黒部川第四発電所と同新黒部川第三発電所においてフィールドテストを行なった。本試験はAVRの電圧設定値を急変させたときの電力動揺特性を、PSS有無のケースについてそれぞれ測定した。この結果、AVRの電圧設定値を2%急変させた場合、黒部川第四発電所4号機の場合には、電力動揺の減衰時定数は約2.5秒であり、制動係数は6.6であったものがPSSを使用することにより約20まで大きくすることができ、PSSの効果を十分に裏付けすることができた。この試験において、AVRを除外し界磁一定制御とした場合と高速応励磁装置を用いた場合の特性とを比較した結果、高速応励磁装置を用いることにより、電力動揺が発生しやすくなっていることが認められた(図12参照)。

5.2 送電容量試験

関西電力株式会社大黒部幹線は、送電容量増強のために直列コンデンサが設置され、各種送電試験が昭和48年10月に実

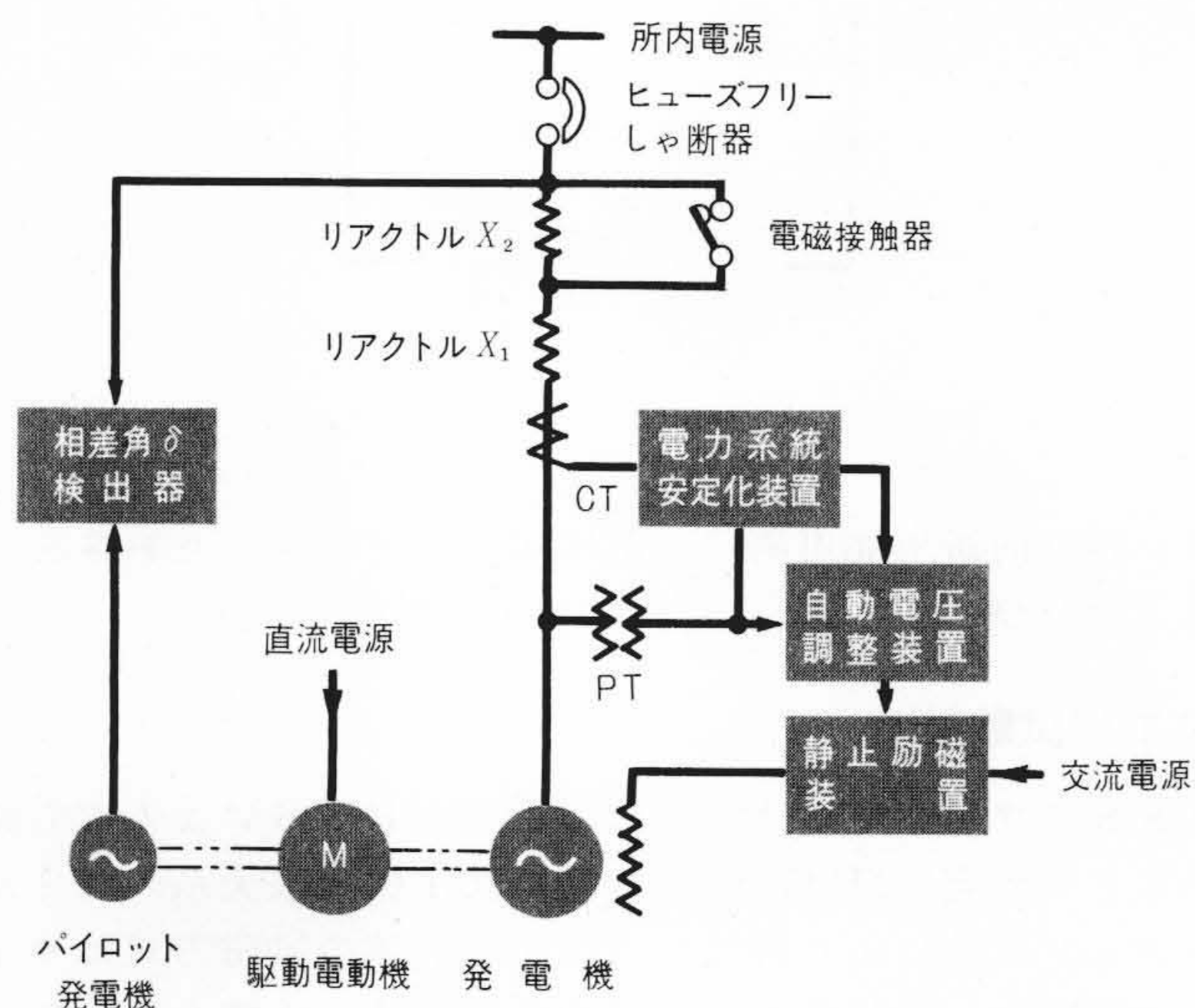


図8 シミュレーション試験回路 シミュレーション試験は線路リアクタンスを一定時間増加することによって電力動揺を発生させた。

Fig. 8 Simulation Test Circuit with M-G Set

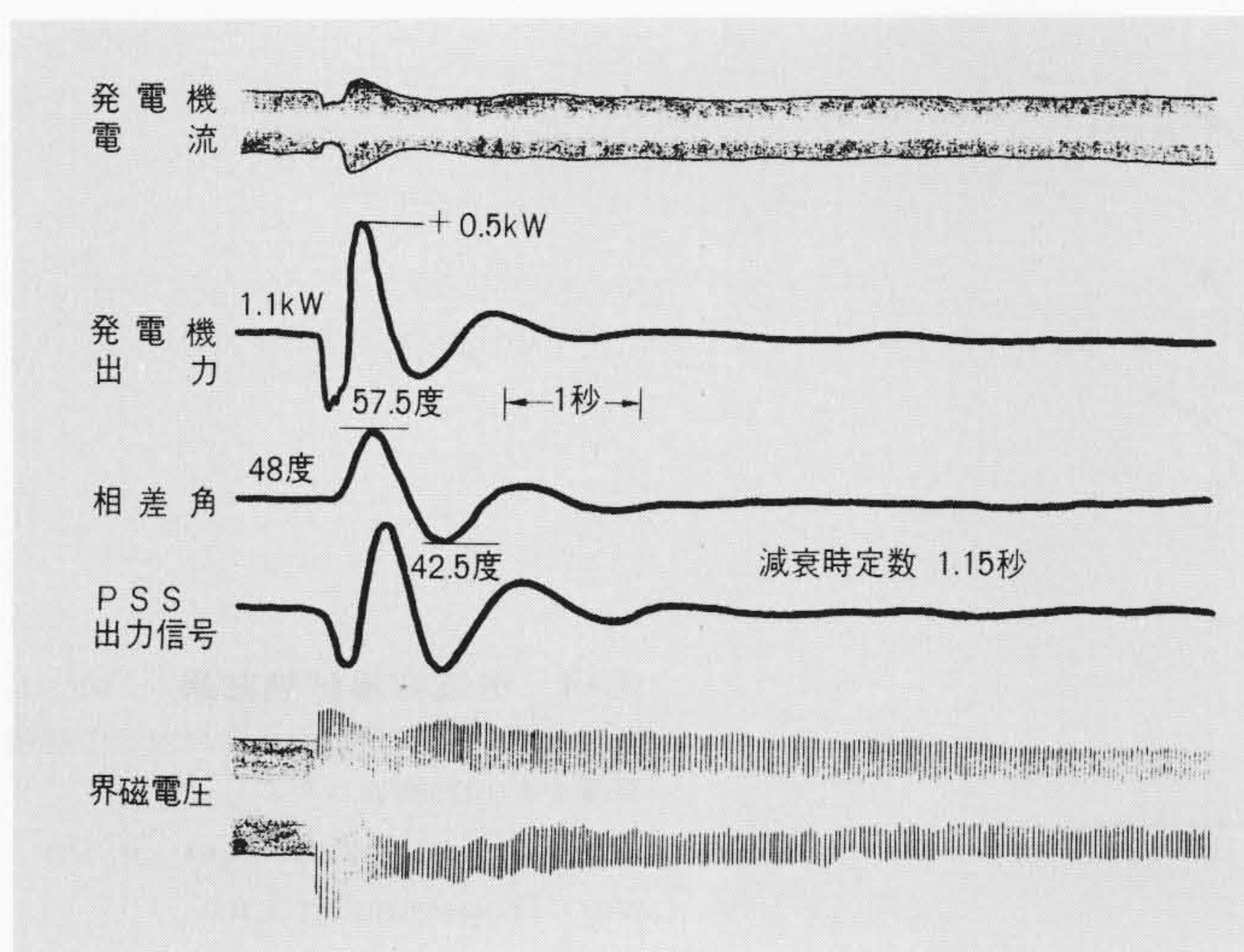


図10 シミュレーション 試験における電力動揺試験結果(PSS 使用) PSSを用いることにより、電力動揺の減衰は顕著に表われた。
Fig. 10 Power Oscillation in Simulation Test with Power System Stabilizer

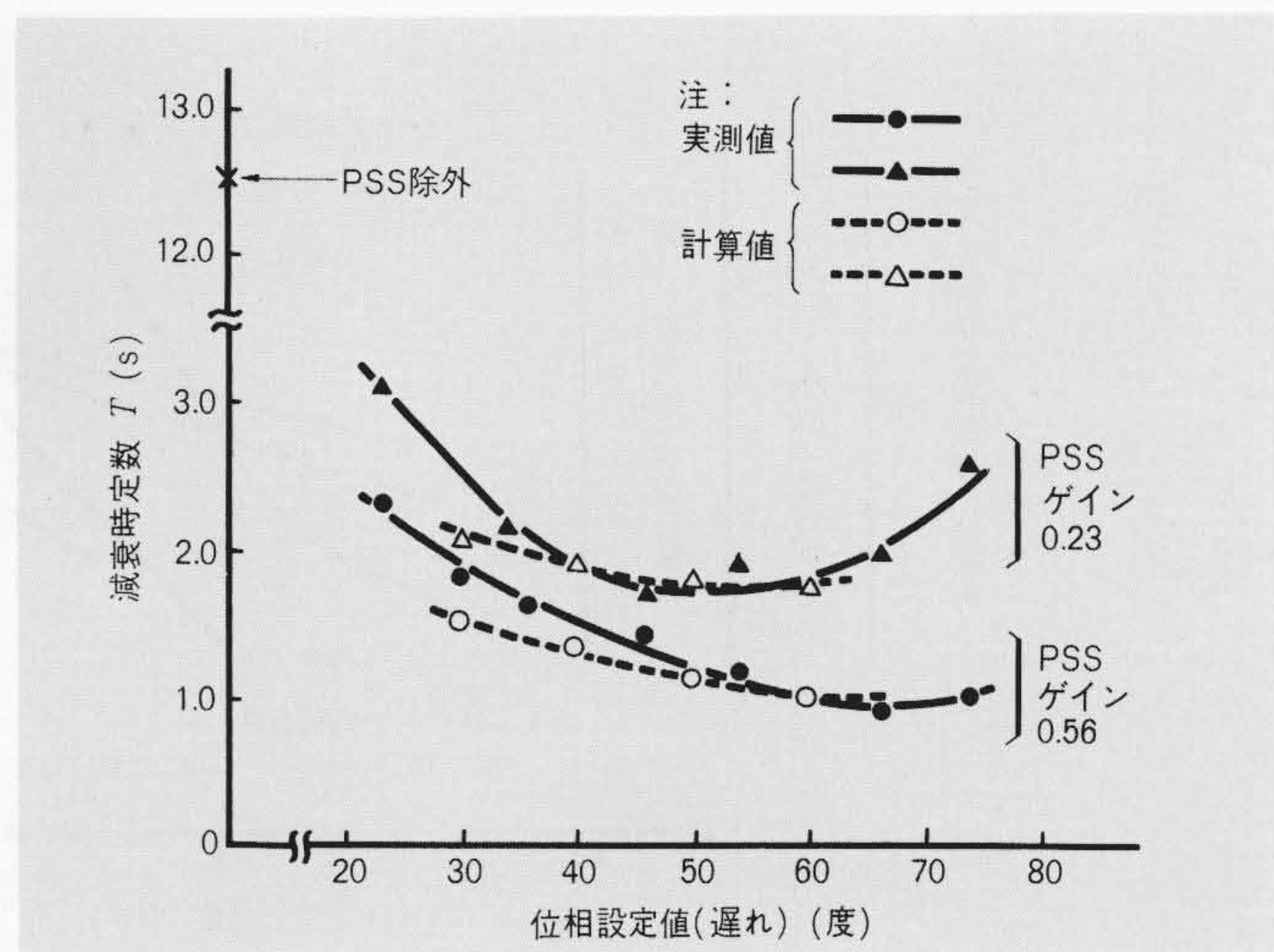
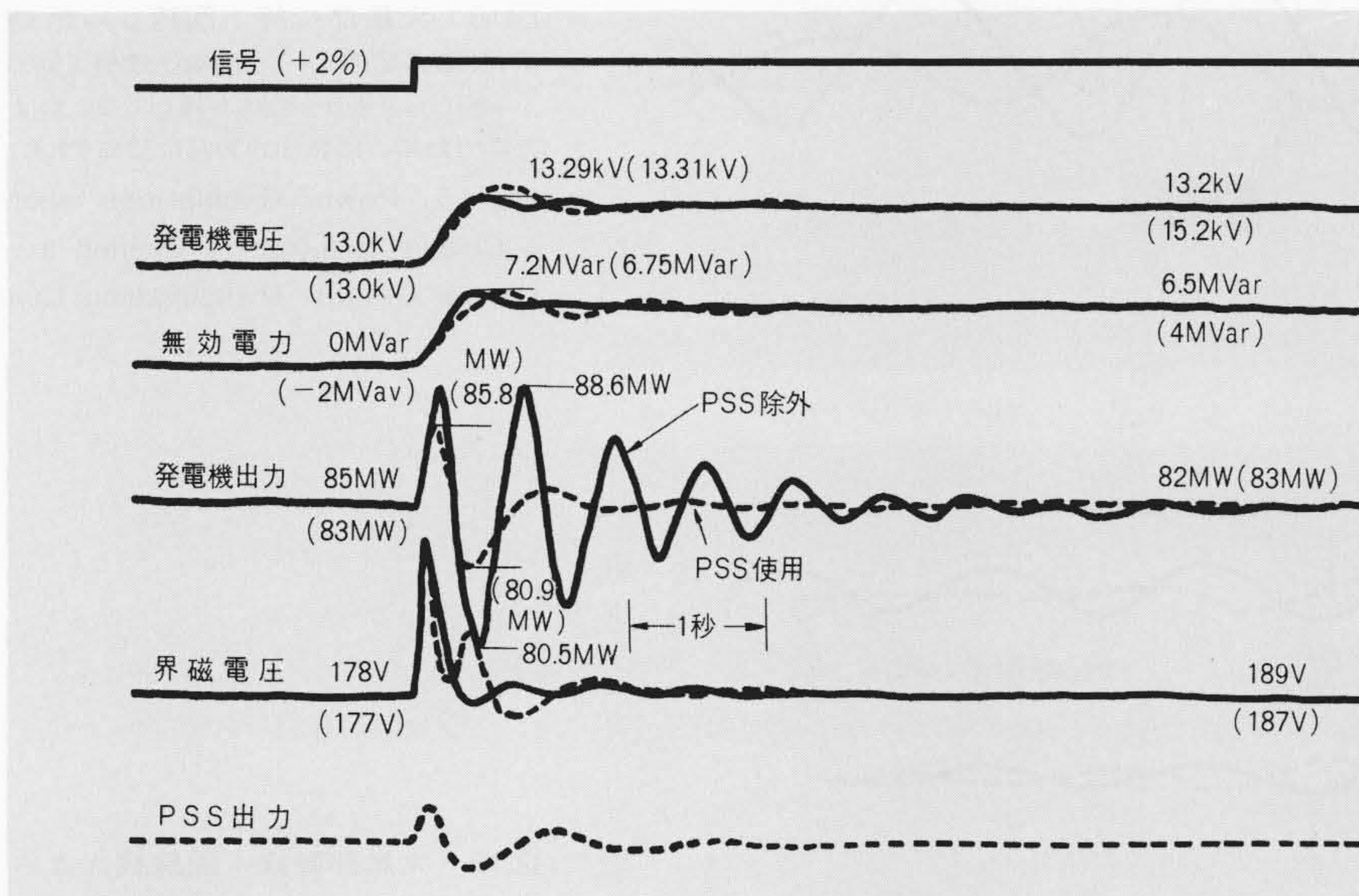


図11 PSSによる電力減衰特性 小形実験機によるシミュレーション結果は、計画値とほぼ一致した。
Fig. 11 Test Result of Power Swing Simulation Test



注：()内PSS使用時を示す。

PSSの有無		除 外	使 用
PSS 設定値	ゲイン	—	0.4
	位 相	—	遅れ10度
電力動揺減 衰時定数(s)		2.5	0.8
制 動 係 数		6.6	20

図12 負荷時インデンシャル応答 PSSを用いることにより、電力動揺の減衰特性が大幅に改善された。
Fig. 12 Step Response Test of a Generator On-load

施され⁽³⁾、そのとき同時にPSSによる送電容量増加についても確認された。試験時の系統構成は図13に示すように、発電機3台のみにPSSが取り付けられ、その発電量は全発電量の約35%に相当する。

この送電容量試験の結果、PSSなしの場合の送電容量420MWに対し、PSSを使用することにより電力動揺の連続回数がPSSなしの場合と等しくなる送電電力は約460MWに増加しており、PSSによる送電容量の増加分は相差点にして約2～3度に相当する。図14は、送電容量試験時の電力動揺連続回数、電力動揺振幅及び相差点を示す。

5.3 送電線の電力動揺試験

送電線の電力動揺試験は、大黒部幹線2回線中の1回線しゃ断と投入について行なわれた。図15、16はその結果について示す。図15は、PSS除外時と使用時における送電電力を示してあり、PSSを使用することにより、電力動揺の抑制に

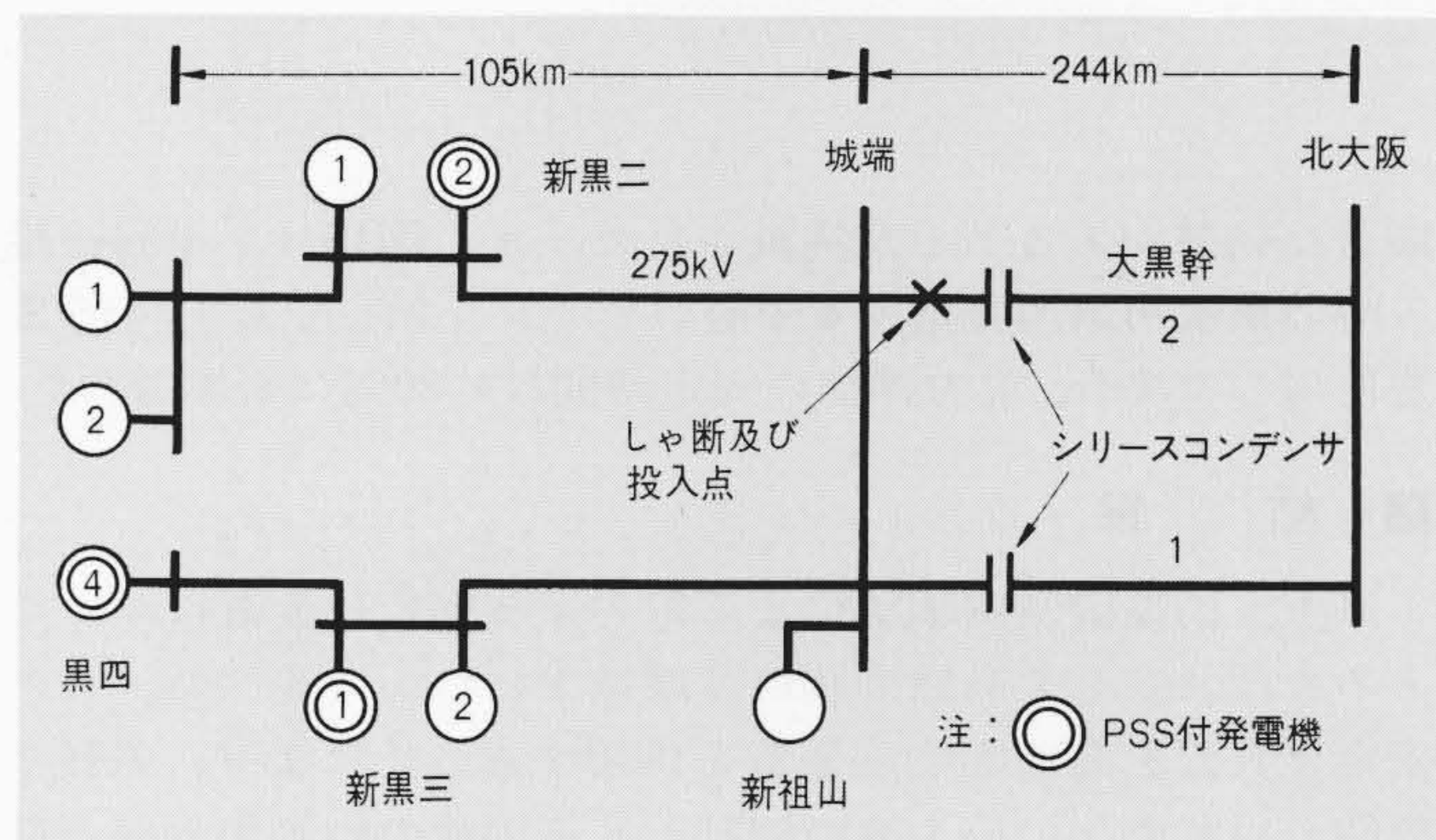


図13 試験時の黒部系統構成 PSS付発電機の出力は、全発電量の約35%に相当する。

Fig. 13 Power Transmission Line Used for Test

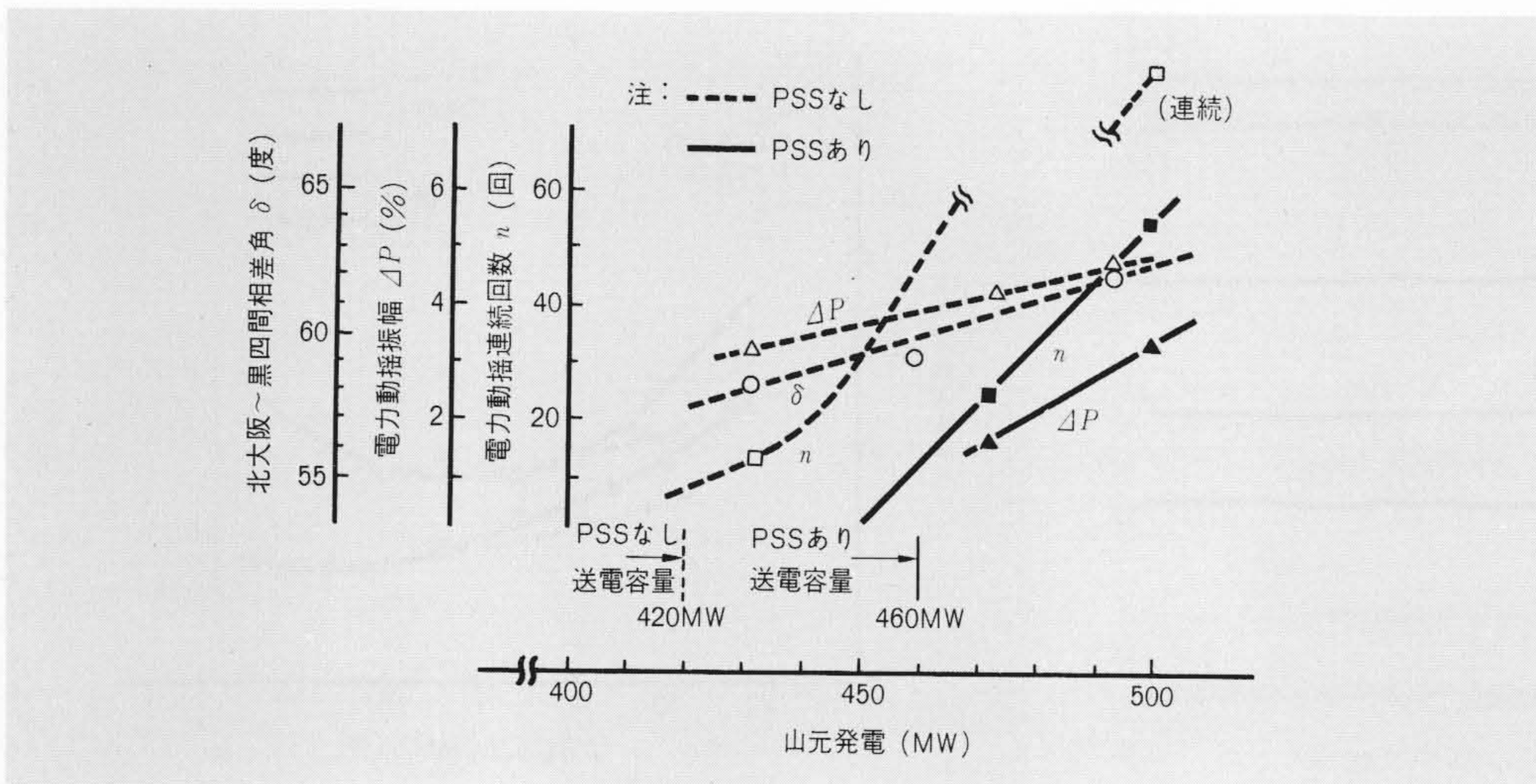


図14 送電容量試験結果 PSSありの場合、PSSなしの場合に対して送電容量が約10%増加した。

Fig. 14 Capability Test of Power Transmission Line

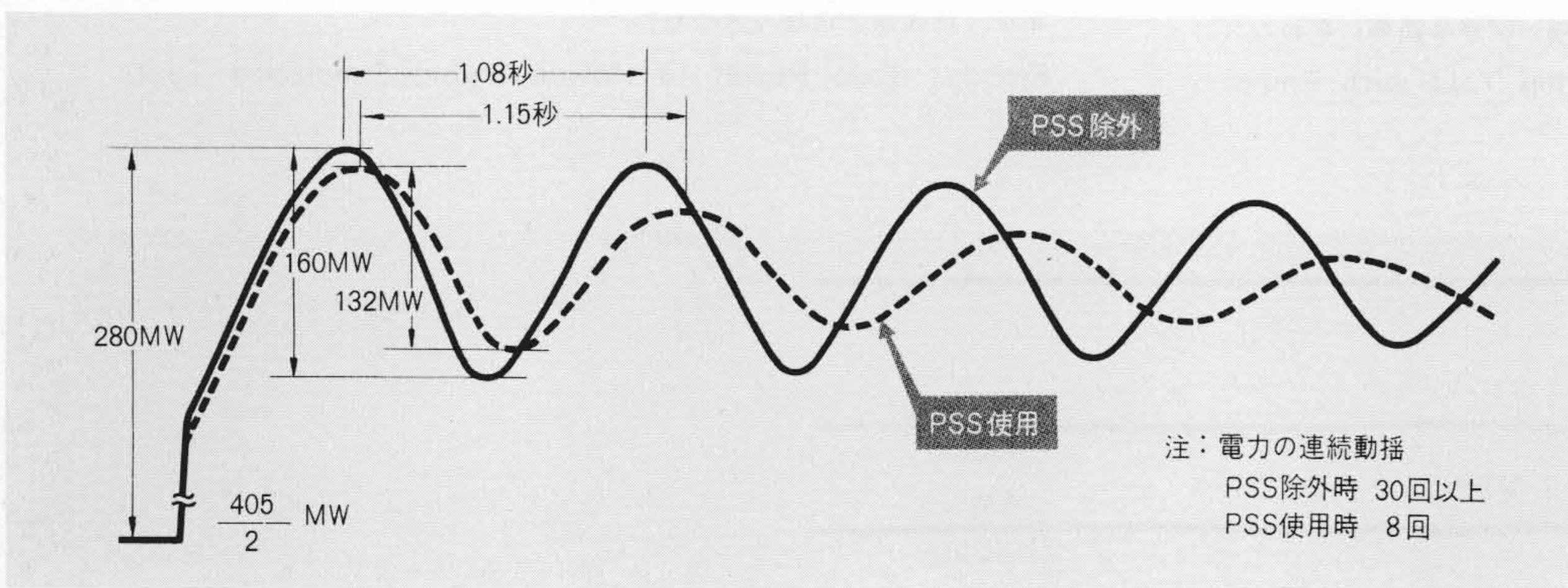


図15 大黒部幹線1回線しゃ断時のPSSの効果 2回線送電機1回線しゃ断したときは、PSSを用いることにより電力動揺の回数は約30%に短縮された。

Fig. 15 Power Oscillations when a Circuit Breaker is Opened in Double Circuit Transmission Line

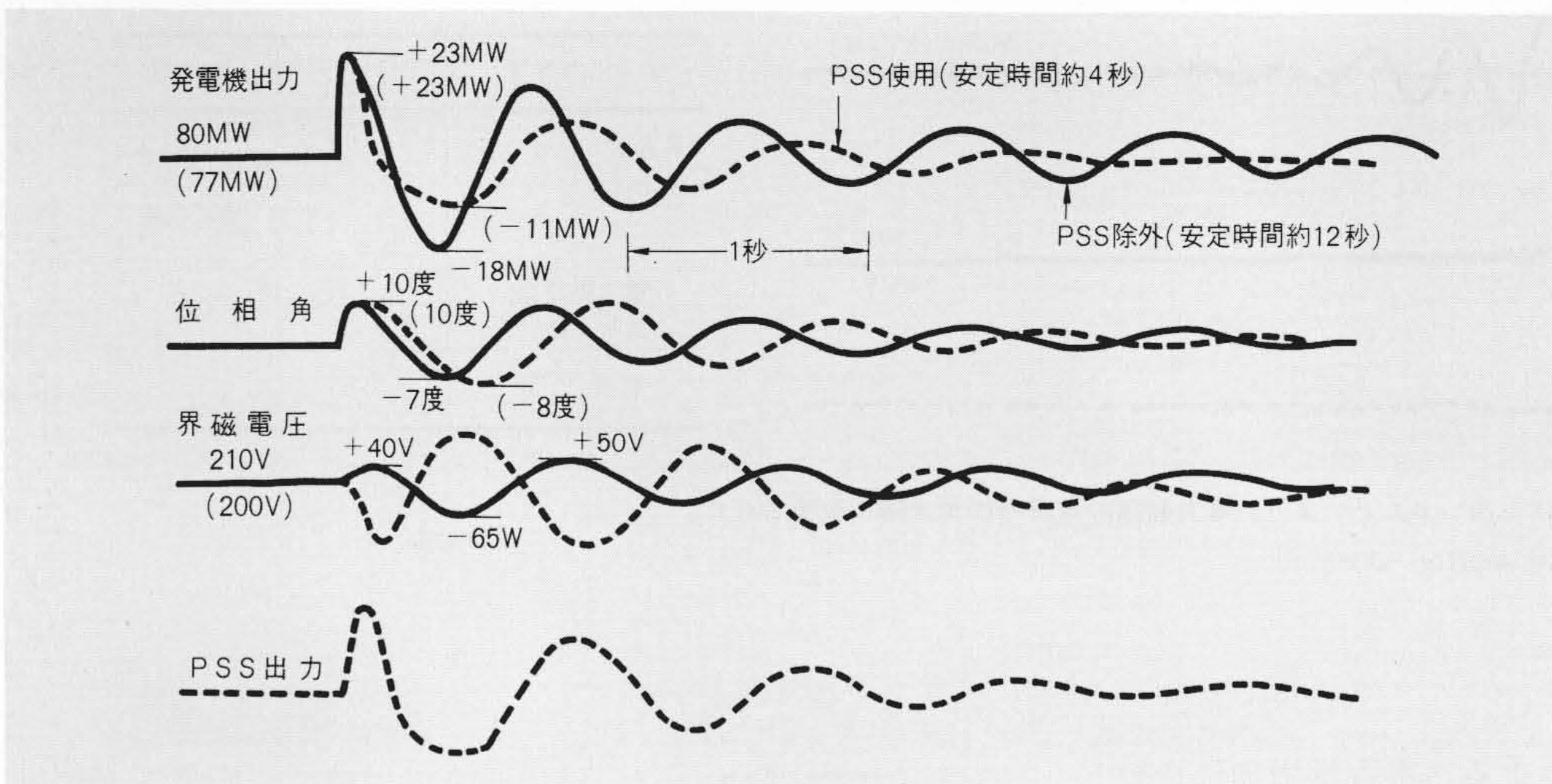


図16 大黒部幹線1回線投入ときの応答 PSSを用いることにより、電力の安定所要時間が約30%に短縮された。

Fig. 16 Power Oscillations when a Circuit Breaker is Closed in Double Circuit Transmission Line

顕著な効果があることが実証された。また図16は、1回線投入時の黒部川第四発電所4号機のデータを示してあり、PSSを使用した場合、電力動揺の安定時間は約30%に短縮できた。

6 結 言

以上、同期機励磁制御による電力系統安定化装置についてその原理及び電力動揺抑制の試験結果について述べた。この安定化装置を高速応励磁装置と併用することにより、系統事故時の過渡動揺の第1波の抑制と、その後の相差角動揺の抑制に効果を挙げることができ、長距離送電における送電電力の増加を図ることが可能となった。また、最近の揚水発電所において揚水運転時、系統電圧との関連により電力動揺がみ

られるが、この電力動揺に対しても本装置による電力抑制効果は大きく、今後の揚水発電所の建設に際しては、系統電圧の運用と関連して安定化装置の設置について検討する必要がある。

参考文献

- (1) 前沢ほか「最近の同期発電機用励磁装置」日立評論 51, 433(昭49-5)
- (2) F.P.Demello, C. Concordia: IEEE PAS-88 No.4 p.p.316~329(1969)
- (3) 飯田「大黒部幹線の直列コンデンサと現地試験の意義」電気学会誌 94, 261(昭49-4)