

大容量長距離送電安定化技術

Stabilizing Techniques for Bulk-Power Transmission

大容量長距離送電を行なう場合の過渡安定度及び定態(動態)安定度を向上させるための超速応励磁, 励磁系を用いた安定化信号, 制動抵抗, 直列コンデンサ並びにタービンの高速バルブ制御について紹介する。これらの方式は技術的, 経済的に可能で, 且つ近い将来必要になるとされている大容量長距離送電システムの安定化に大きな効率が期待できる。

超速応励磁方式による過渡安定度向上のためには, 界磁電圧の頂上電圧を大きくとるのが最も効果的である。また, 超速応励磁方式をとった場合の発電機の制動力向上のためには, 安定化信号は大きな効果を発揮する。制動抵抗方式においては, その効果を有効に利用するためには系統故障程度による投入時期の選択と発電機位相角動揺のピーク付近での開放が必要である。

磯野 昭* Akira Isono

後藤益雄* Masuo Gotô

奥田健三** Kenzô Okuda

1 緒 言

最近, 我が国では負荷に近い都市近辺に電源用地を確保することが困難になってきており, 負荷地点から遠く離れた場所に発電所を建設せざるを得なくなっている。また, 電源用地として適した地点や取得できる送電ルートも限られていることから, 少数の大容量発電所と送電線により大容量長距離送電を行なうことが必要とされている。この大容量長距離送電線の例として, 近い将来に10,000MWの電力を200km程度送電するための検討を行なっているものもある⁽¹⁾⁽²⁾。諸外国においては, 例えばアメリカの太平洋岸500kV連系系統のように1,000 km以上の長距離を送電するものがあり, またスウェーデンやソ連の諸系統のように数百キロメートルの長距離送電線は決して珍しくないが, それらの送電線の送電電力は1,000 MW程度か, 又はそれをわずかに上まわる程度である。

大容量長距離送電を行なう場合の大きな問題の一つに過渡安定度及び定態(動態)安定度の確保がある。これらはほぼ送電距離×送電電力に比例してその確保が困難になる。従って, 上述の10,000MW, 200km送電は距離こそ諸外国の例に比べて

決して長くはないが, 大容量長距離送電という観点からは難しい条件をもっていることが判断できよう。

ここでは安定度向上に効果の大きい方法のうち, 主として超速応励磁方式, 励磁系を用いた安定化信号方式及び制動抵抗方式についてその原理と効果について述べ, 更に直列コンデンサ方式及びタービンの高速バルブ制御方式についても簡単に触れる。

2 電力系統の安定度とその向上対策

電力系統の安定度には, 微小なじょう乱を与えた場合にじょう乱が収束するか否かで決まる定態安定度と, 短絡故障のような大きなじょう乱があった場合に安定であるか否かで決まる過渡安定度がある。前者のうち, 界磁電流及び発電機の機械的入力を一定の条件のものだけを定態安定度と呼び, 自動電圧調整器(以下, AVRと略す)や調速機などの動作を考慮に入れたものを動態安定度と呼び区別することが多い。ここでは, これに従って定態と動態とを分けて呼ぶことにする。

表1 電力系統の安定度向上法 安定度向上のためには種々の方法があるが, (1)等価的に系統リアクタンスを減少する, (2)故障時に機器の制御を行なう, (3)故障の高速除去に大別できる。

対 策		具 体 的 な 方 法	対 象 と す る 安 定 度
等価的な 系統リアクタンス の減少	送 電 電 圧 の 上 昇	同 左	過 渡, 定 態・動 態
	系 統 リ ア ク タ ン ス の 減 少	並列回線の増加, 複導体 機器リアクタンスの減少, 中間開閉所 直 列 コ ン デ ン サ	"
機 器 の 制 御	発 電 機 の 励 磁 制 御	超 速 応 励 磁	過 渡
		安 定 化 信 号	動 態
		二軸励磁発電機	過 渡, 動 態
	発 電 機 入 ・ 出 力 の 平 衡 化	制 動 抵 抗 タービンバルブ制御	過 渡
故 障 の 高 速 除 去		しゃ断器, 保護継電器の高速化	"

注: 内は本文中で言及する方法を示す。

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立研究所 工学博士

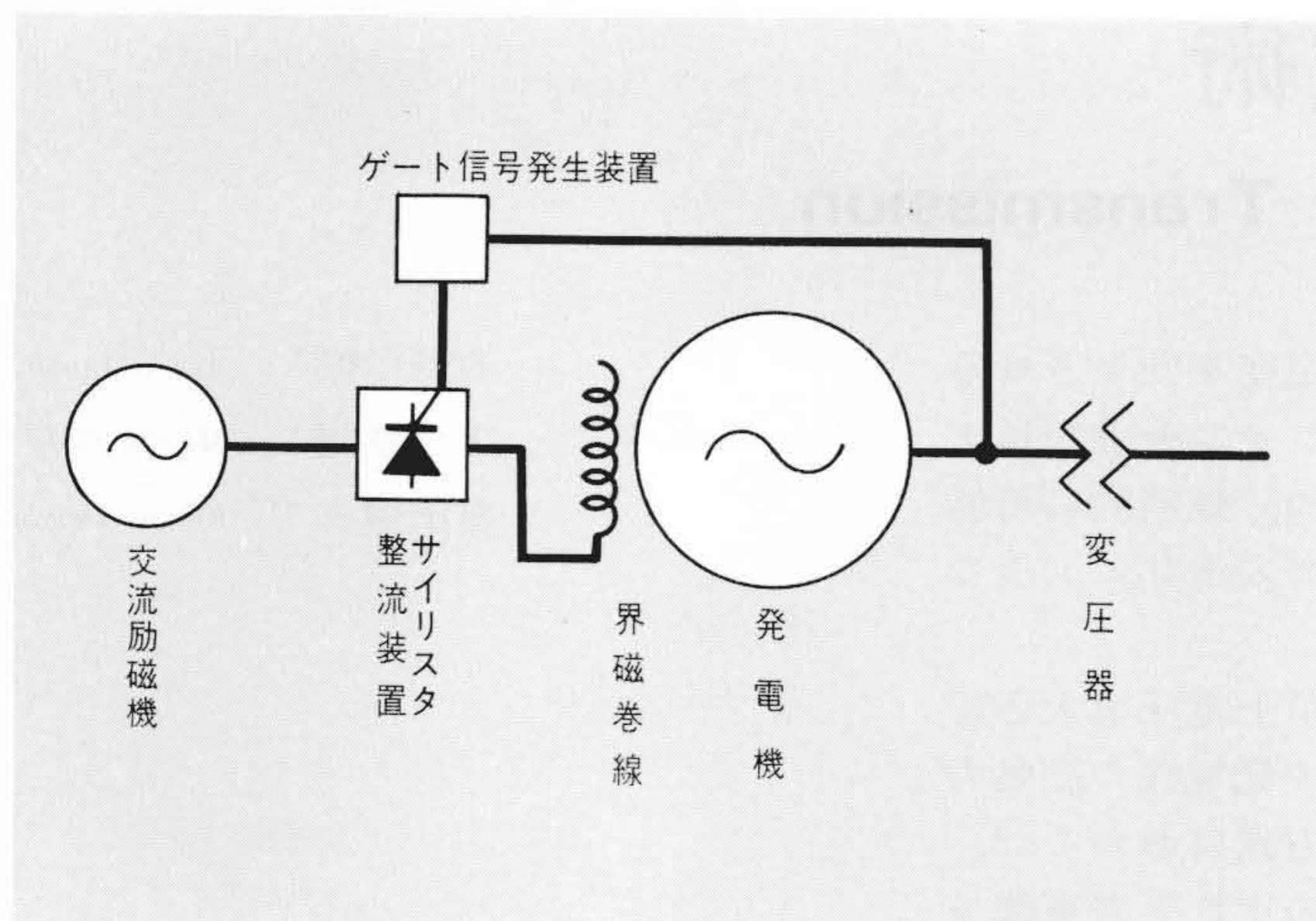


図1 超速応励磁方式の原理回路 サイリスタの点弧位相を制御することにより、発電機の界磁電圧を急激に増減できる。

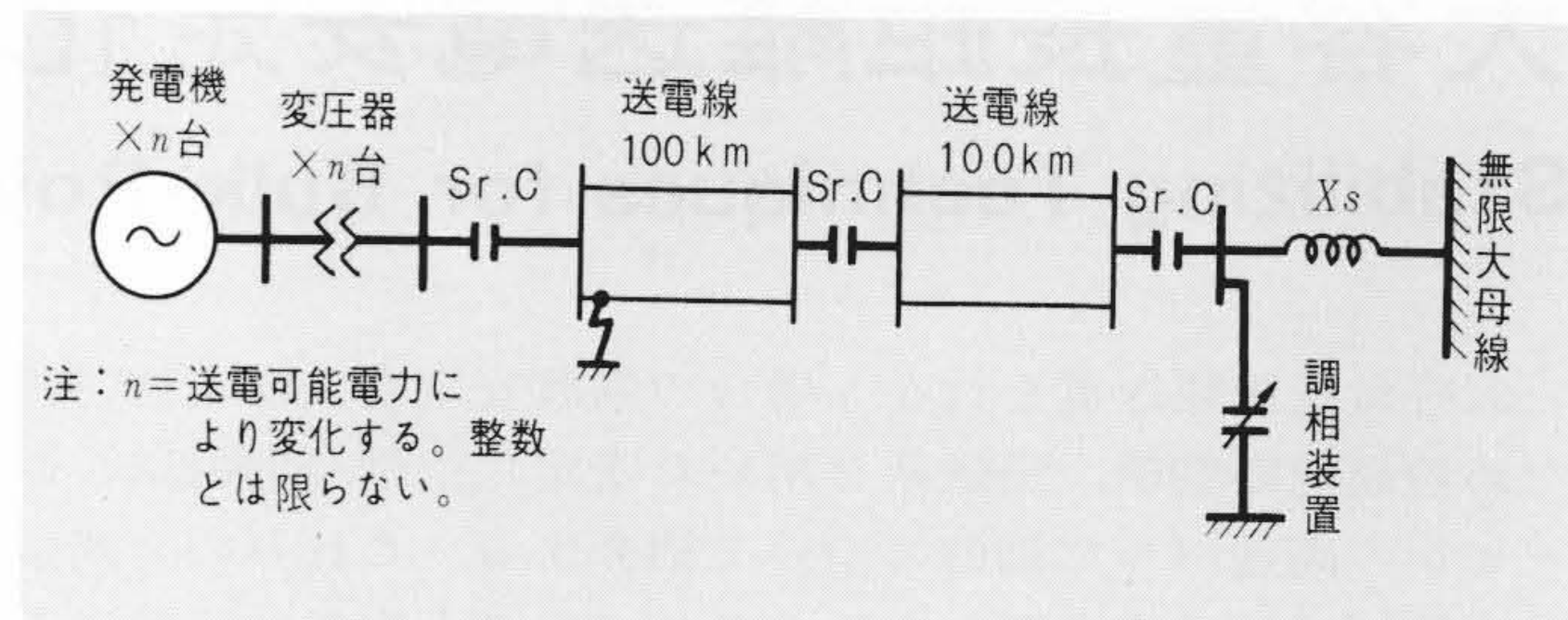
更に安定度に関しては、最近負荷電圧の維持に関する電圧安定度の問題が研究されだしてきている⁽³⁾⁽⁴⁾。これもまた大容量長距離送電に密接に結びつく問題ではあるが、ここでは一応言及の対象外とする。

安定度の向上法には表1に示すような種々の方法が考えられるが、ここでは技術的に一応の見通しが得られており、経済的にも有利で、且つ最初に述べた数少ない送電ルートという条件を満足する次の諸方式について述べる。

3 超速応励磁方式

図1のように発電機の界磁電圧をサイリスタにより制御し、系統事故時に界磁電圧を急増することにより過渡安定度の向上を図るものを超速応励磁方式⁽⁵⁾と呼ぶことにする。

この方式の効果を東京電力株式会社との共同研究により図2のモデル系統から解析した結果を用いて述べる。同図は、1,000 MW級の原子力発電機を複数台設置し、500kV並行2回線で200km送電するもので、送電線のリアクタンスの80%を直列コンデンサ(以下、Sr.Cと略す)で補償する。故障条件は送電線のF点において三相地絡故障が発生し、80msで故障区間をしゃ断し、再閉路せず、Sr.Cは故障発生と同時に短絡し、故障区間しゃ断後60msで復帰するものとする。この系統で安定度が保持できる送電可能電力と等しい定格電力をもつ発電機及び変圧器があるものとする。図3に励磁系のブロック線図を示す。励磁系の諸定数が過渡安定度に及ぼす影響をみるため、励磁系の頂上電圧、ループゲイン、時定数を変えた場合のデジタル計算機での解析結果を図4～6に示す。また比較のため図4に従来の回転増幅機形の励磁系での解析結果を併記する。ここで頂上電圧の大きさは発電機の無負荷定格電圧を発生させる界磁電圧を1puとして表わしている。同図に示すように、頂上電圧を大きくするほど過渡安定度からみた送電可能電力は増加するが、7pu程度から飽和してくる。これは頂上電圧が大きい場合、故障発生後の発電機位相角動揺の第1波のピーク以前に発電機の端子電圧が定格値に達し、界磁電流の減少が始まるからである。図4の点線は故障除去と同時に発電機端子電圧の設定値を10%大きくし、時定数2秒で元に戻したもので、これにより頂上電圧を大きくした場合の効果を更に大きな頂上電圧の所まで発揮させることが可能である。図5、6に示すようにループゲインや時定数はそれぞれ100、100msであれば十分である。これは超



機 器	機器仕様及び定数	ベース容量 (MVA)
発 電 機 (単機当たり)	1,111MVA, pf0.9 $x_d : 1.68 \text{ pu}, x_d' : 0.36 \text{ pu}, x_d'' : 0.26 \text{ pu}$ $T_{d0} : 8.4 \text{ s}$ $M : 6.4 \text{ s}, D : 5.0 \text{ pu}$ トルク/pu 速度	1,111
変 圧 器 (単機当たり)	1,111MVA, $x_{Tr} : 0.15 \text{ pu}$	1,111
送 電 線	$x : 0.905 \text{ pu}/100 \text{ km}, r : 0.027 \text{ pu}/100 \text{ km}$ $b : 0.01147 \text{ pu}/100 \text{ km}$	10,000
X_s	0.3pu	10,000
調 相 装 置	電圧が1.0puになるよう調整	—
直列コンデンサ (Sr.C)	送電線リアクタンスの80%を補償 1:4:1の比で配置	—

図2 モデル系統図 モデル系統は500kV 2回線送電線200kmで10,000 MWを送電することを目ざしている。

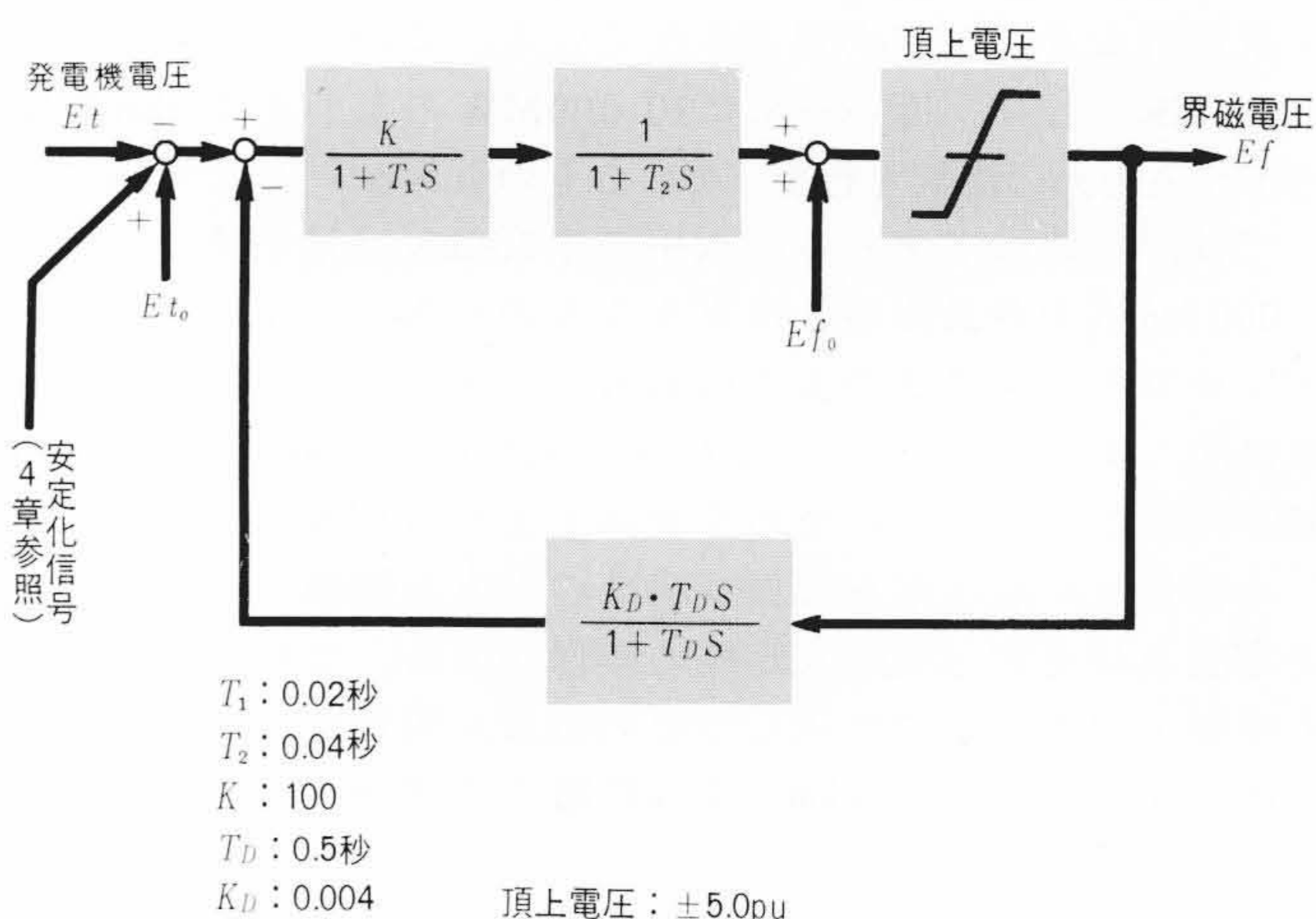


図3 励磁系のブロック線図 図3の定数をベースに、これらの定数を変えたときの送電可能電力を計算する。

速応励磁方式では上記の定数で故障発生時には、数ミリ秒以内に界磁電圧が頂上電圧に達するため、この値は発電機の位相角がピークに達する数百ミリ秒に対し無視できる値であり、この値をこれ以上小さくしてもその影響は小さい。

4 安定化信号方式

サイリスタにより直接界磁電圧を制御するような超速応励磁方式を用いて頂上電圧を大きくすれば、電力系統故障後の発電機位相角動揺の第1波は抑制され、過渡安定度は向上する。しかし、この場合動揺の減衰が悪くなり、場合によっては発散振動になることもある。この発散振動も発電機と系統側のインピーダンス及び発電機出力が大きいほど発生しやすく、大容量長距離送電上のネックとなる。この対策として、

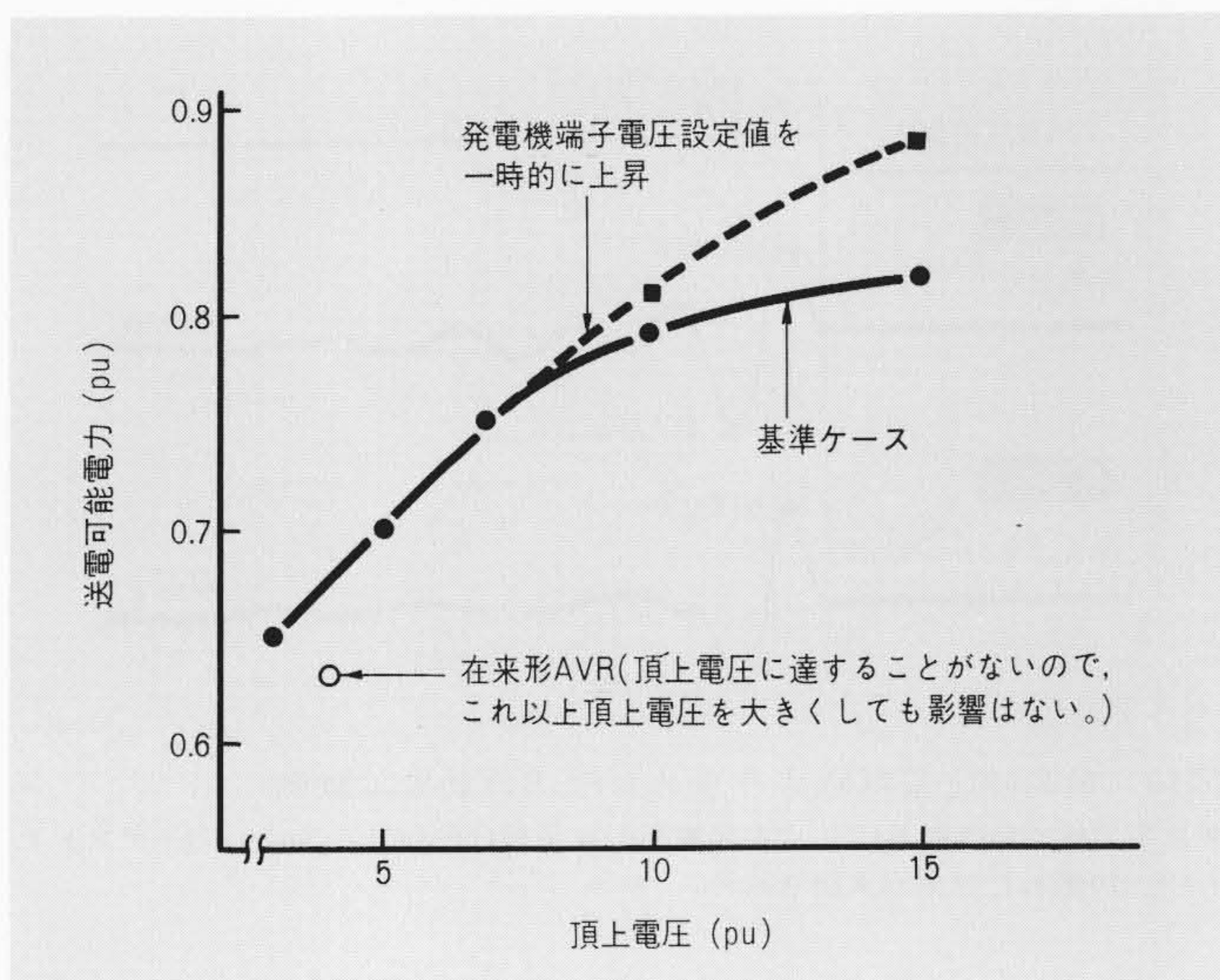


図4 頂上電圧が過渡安定度に及ぼす影響(10,000MVAベース)
超速応励磁を行なった場合、従来の励磁装置の頂上電圧である3.0～4.0puより大きな値とすることにより安定度を向上できる。

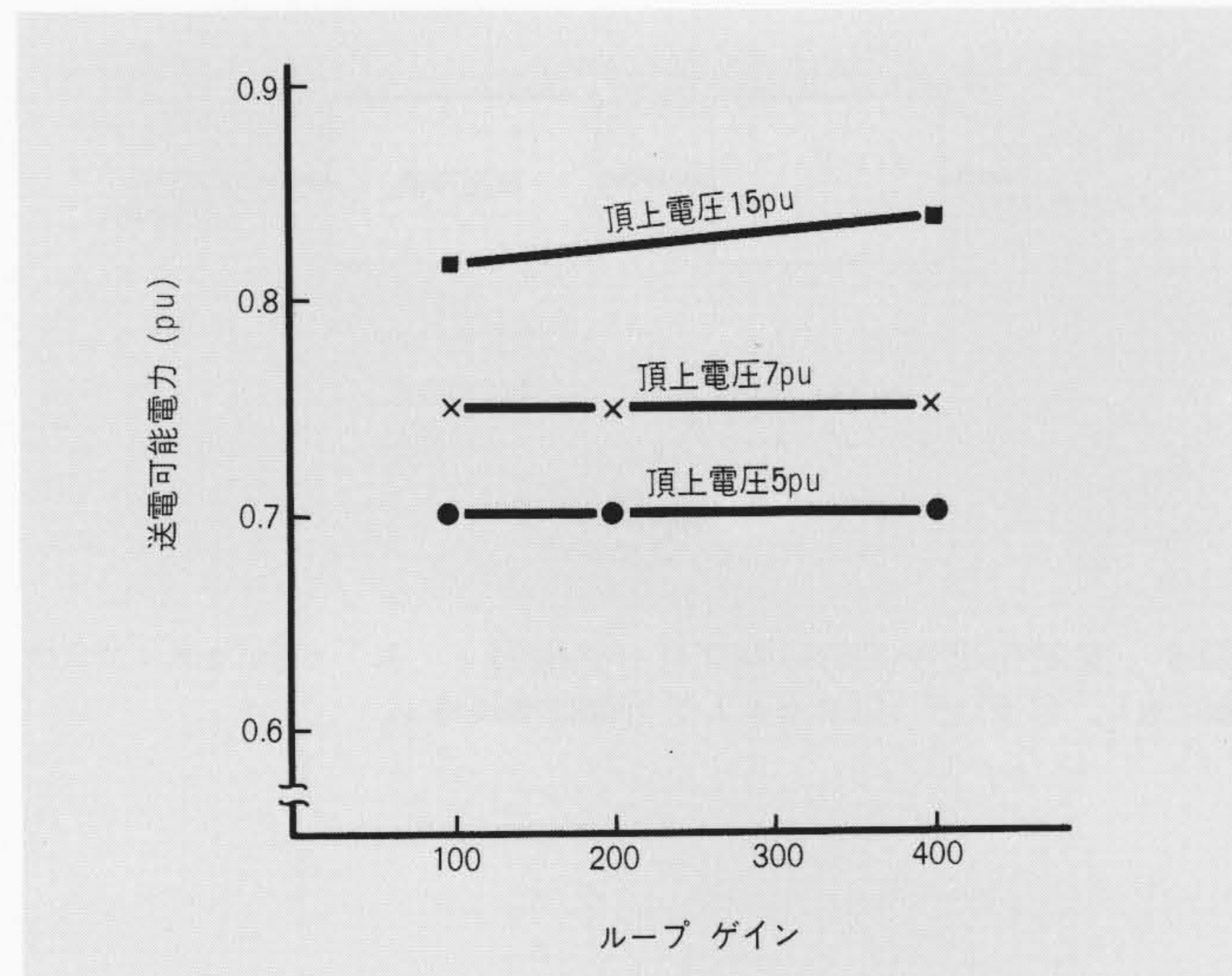


図5 ループゲインが過渡安定度に及ぼす影響(10,000MVAベース)
ループゲインは100でも400でもほとんど差は見られず、100程度で十分である。

最近開発されたのが安定化信号方式(以下、PSSと略す)である⁽⁶⁾。

PSSの原理を図7により説明する。同図(a)は1機—無限大系の微小外乱に対する発電機の動揺を界磁鎖交磁束一定として線形近似化して表わしたブロック図である。発電機の位相角の変動分 $\Delta\delta$ は(1)式で表わされ、 $\Delta\delta$ が収束するためには(1)式の特性根である(2)式の S が正の実数をもたないこと、すなわち制動係数 $D > 0$ 、同期化係数 $K_1 > 0$ となる必要がある。

$$\frac{M}{\omega_0} S^2 \Delta\delta + \frac{D}{\omega_0} S \Delta\delta + K_1 \Delta\delta = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$S = \frac{-D \pm j\sqrt{4K_1\omega_0 M - D^2}}{2M} \quad \cdots \cdots (2)$$

実際にはAVR及び発電機自身の特性から界磁束は一定ではなく、このため $\Delta\delta$ は(2)式以外の周波数成分をもつが、通常電力系統では図7(a)のブロックから近似される5～10rad/s

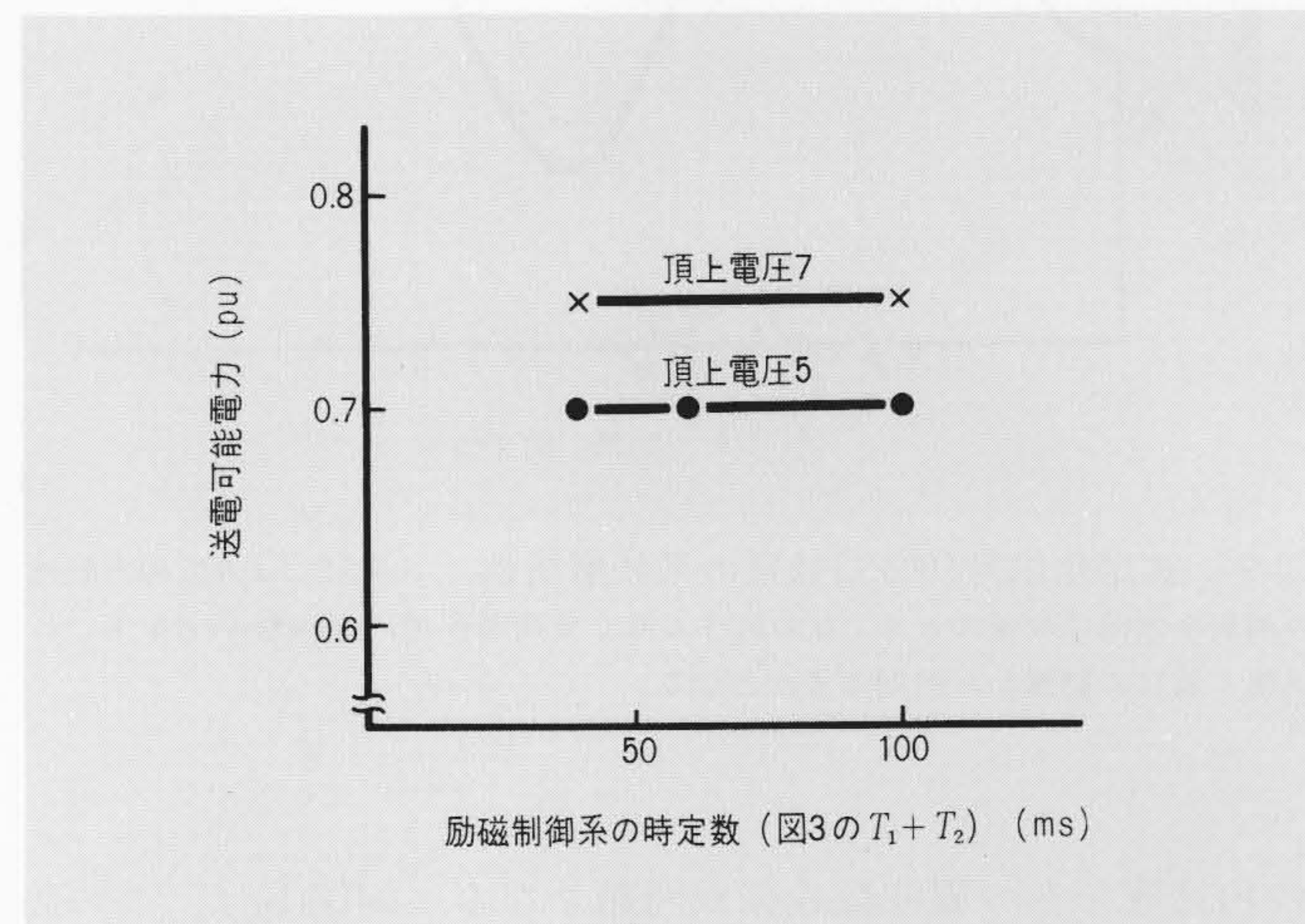
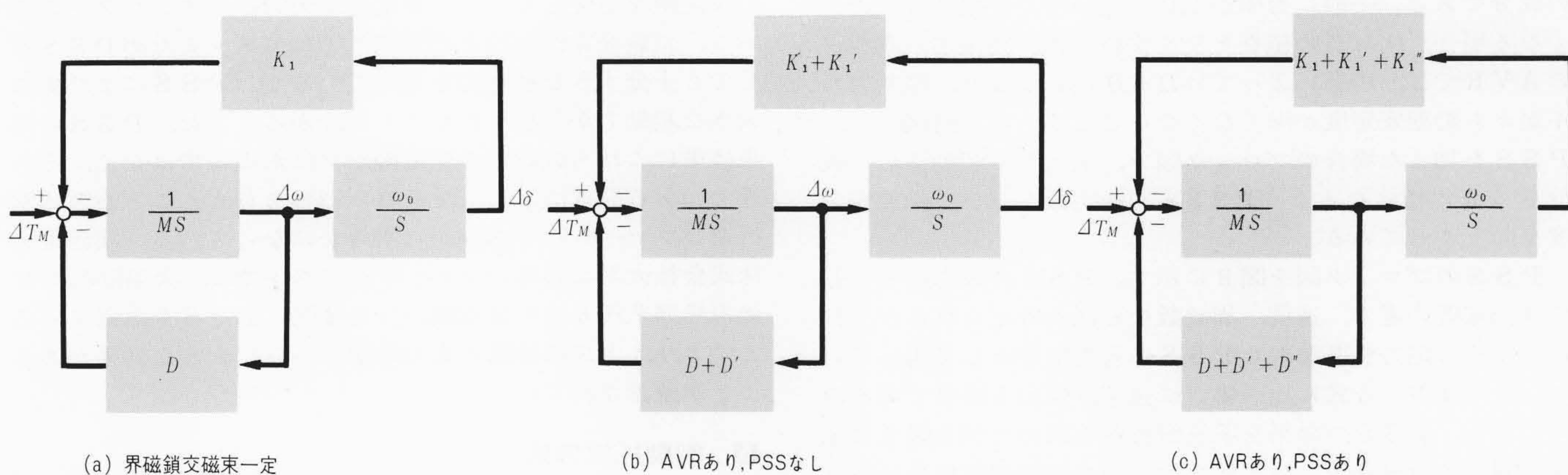


図6 励磁制御系の時定数が過渡安定度に及ぼす影響(10,000MVAベース)
励磁制御系の時定数は、100ms程度まで小さくすれば十分である。



注：記号の説明

M ：単位慣性定数 ΔT_M ：微小外乱入力 D, D', D'' ：制動係数
 S ：演算子 $\Delta\omega$ ：角速度変動分 K_1, K_1', K_1'' ：同期化係数
 ω_0 ：基準角速度 $\Delta\delta$ ：位相角変動分

図7 1機—無限大系の発電機の線形化近似ブロック図

大容量長距離送電時には D' が負の値をとりやすく、電力動揺が減衰しにくくなる。PSSにより正の値をもつ D'' を補償することにより電力動揺を減衰させる。

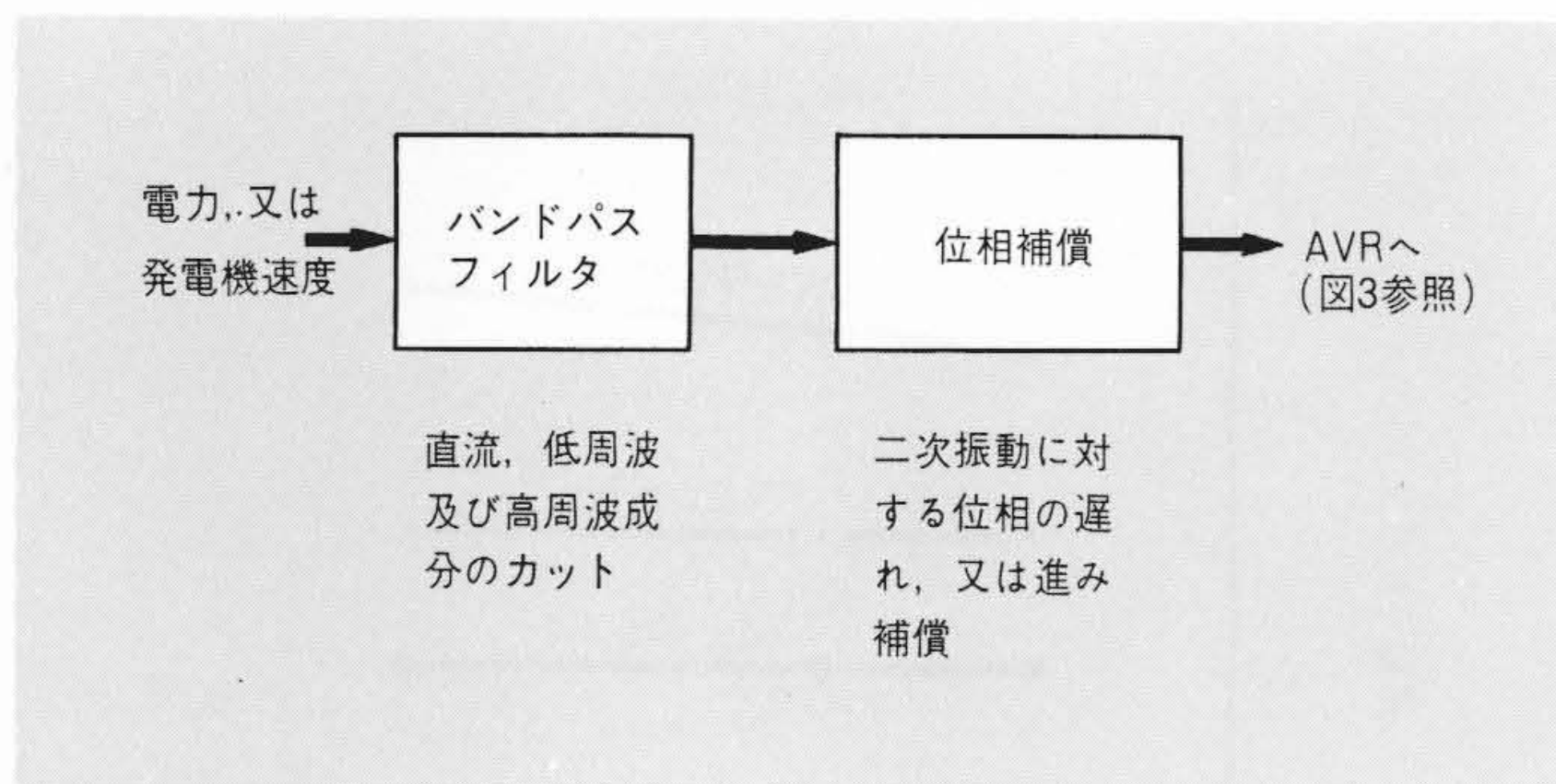


図8 安定化信号(PSS)のブロック線図 図7で近似される二次振動に対し、 D' 及び K' が正になるように回路定数を選ぶ。

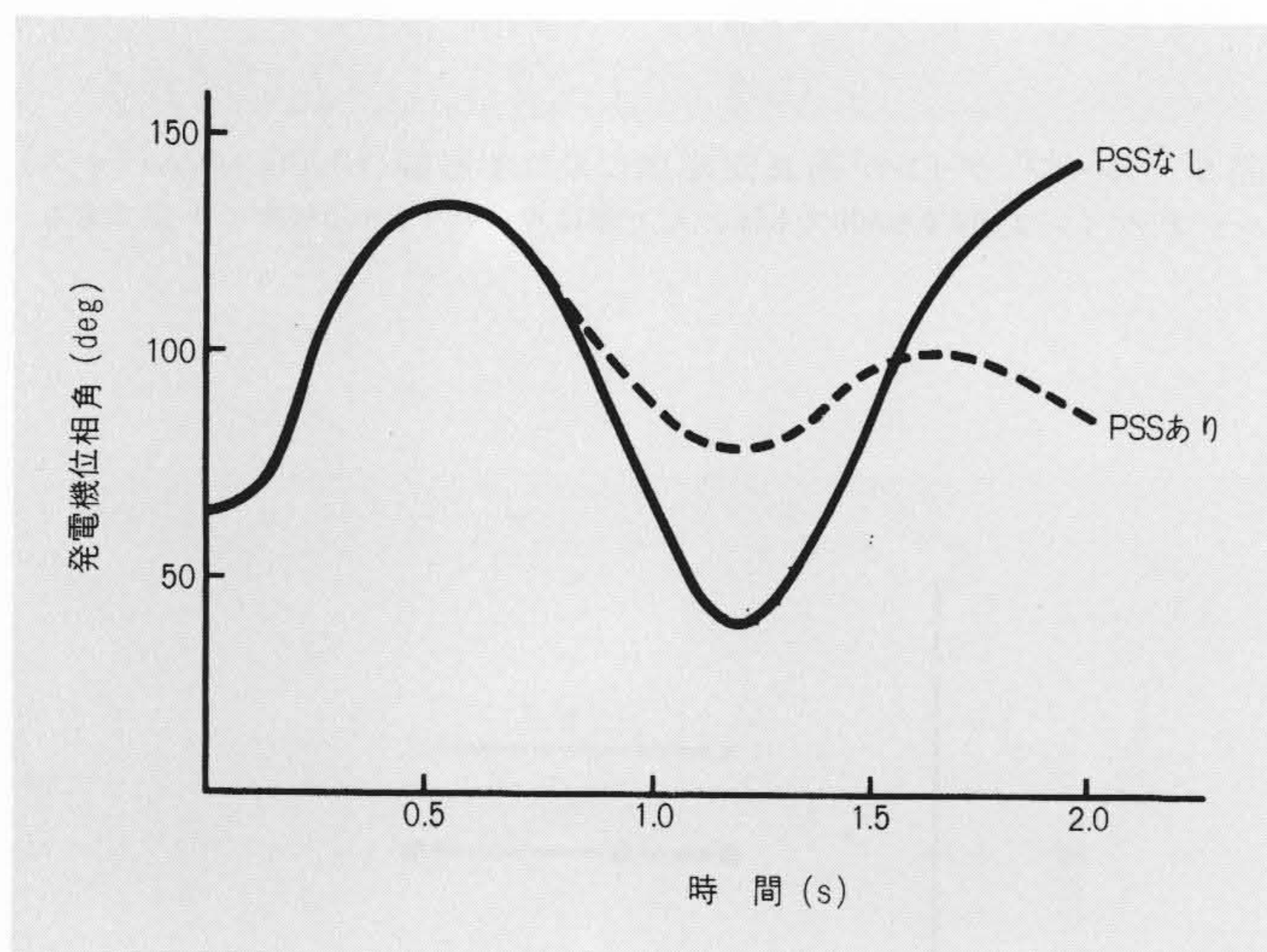


図9 安定化信号(PSS)効果の系統解析例 PSSにより位相角動揺の減衰を大幅に改善できる。なお図9と同じ負荷条件で、在来形AVRを用いれば第1波目の動揺から同期はずれとなる。

の角速度をもつ周波数成分が問題となる。同図(b)は、この周波数成分に着目して界磁鎖交磁束の変化を考慮に入れ、二次振動系として表わした発電機のブロック図である。ここで K_1 、 D' は主としてAVRにより発生した同期化係数及び制動係数の成分である。一般に力率が1.0に近い所で位相角 δ が大きくなる場合、 D' は負の値をとりやすい。特に高速応、高利得のAVRでは、場合によっては $D+D'$ が負になり、制動力の不足から動態安定度が保てなくなることがある。同図(c)は、PSSを加えた場合のブロック図で、主として制動係数の成分 D'' を正の値となるようPSSの回路定数を選び、動態安定度を向上させている。

PSSのブロック図を図8に示す。PSSの入力信号としては発電機の電力、速度、周波数など種々考えられるが、日立製作所は電力を標準的なPSSの入力信号として用いている。これは他の方式に比べ雑音に強く、検出も容易であるためである。PSSの効果を系統解析から求めた例を図9に示す。同図で故障発生、故障区間除去後の発電機位相角は故障直後の動揺に対しては同期を保っているが、PSSなしでは制動力の不足から第2波目で同期はずれとなる。なお図示されていないが、同図と同じ条件で在来形のAVRを用いた場合は、過渡安定度が保てず故障発生と同時に位相角が増大し続け、そのまま同期はずれとなる。

PSSは既に実系統に試作装置、又は製品として納入され

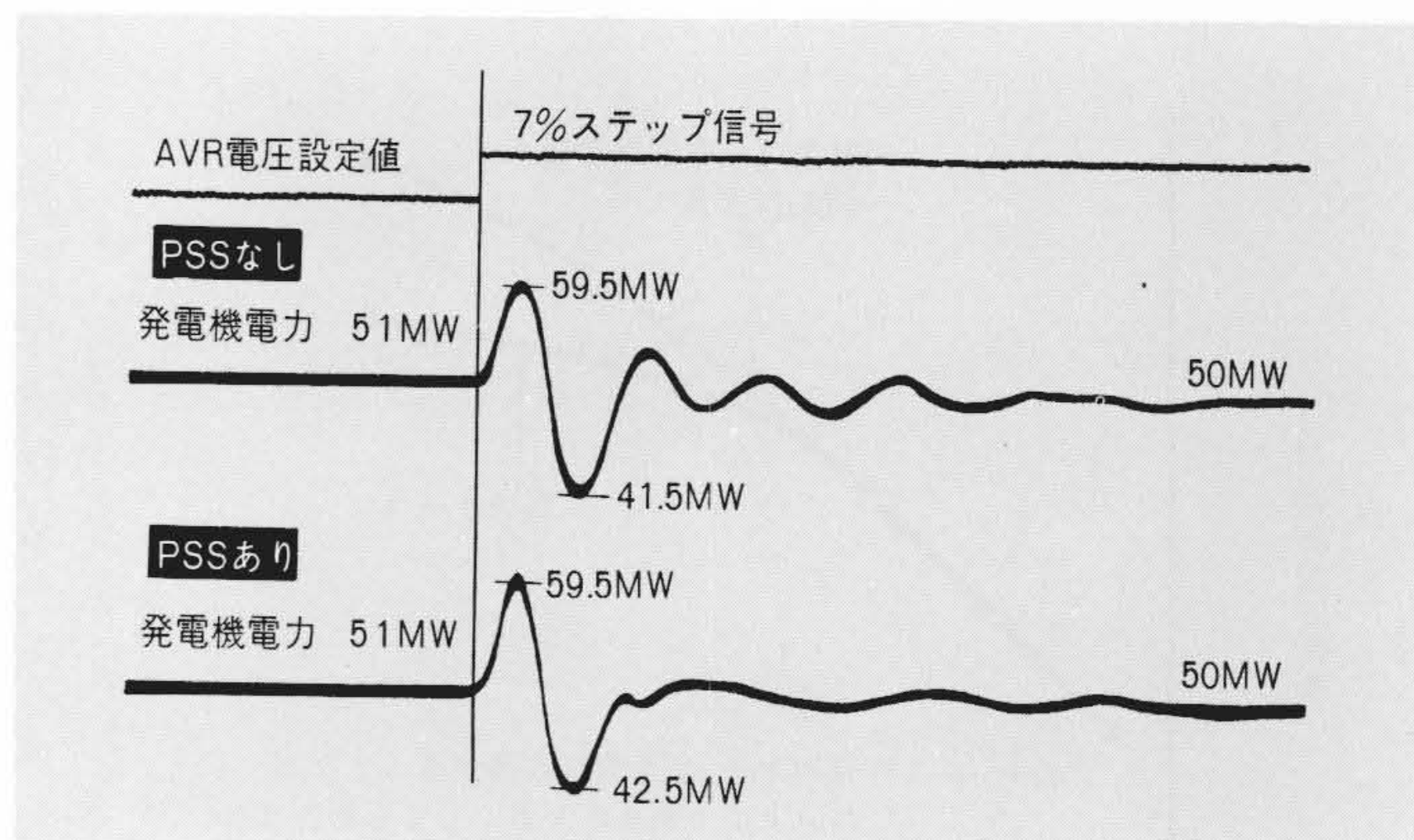


図10 負荷時応答試験より求めたPSSの効果試験例 東京電力株式会社鶴見「II」火力発電所、4号機(66MW)のフィールドテストでもPSSの優れた効果が実証された。

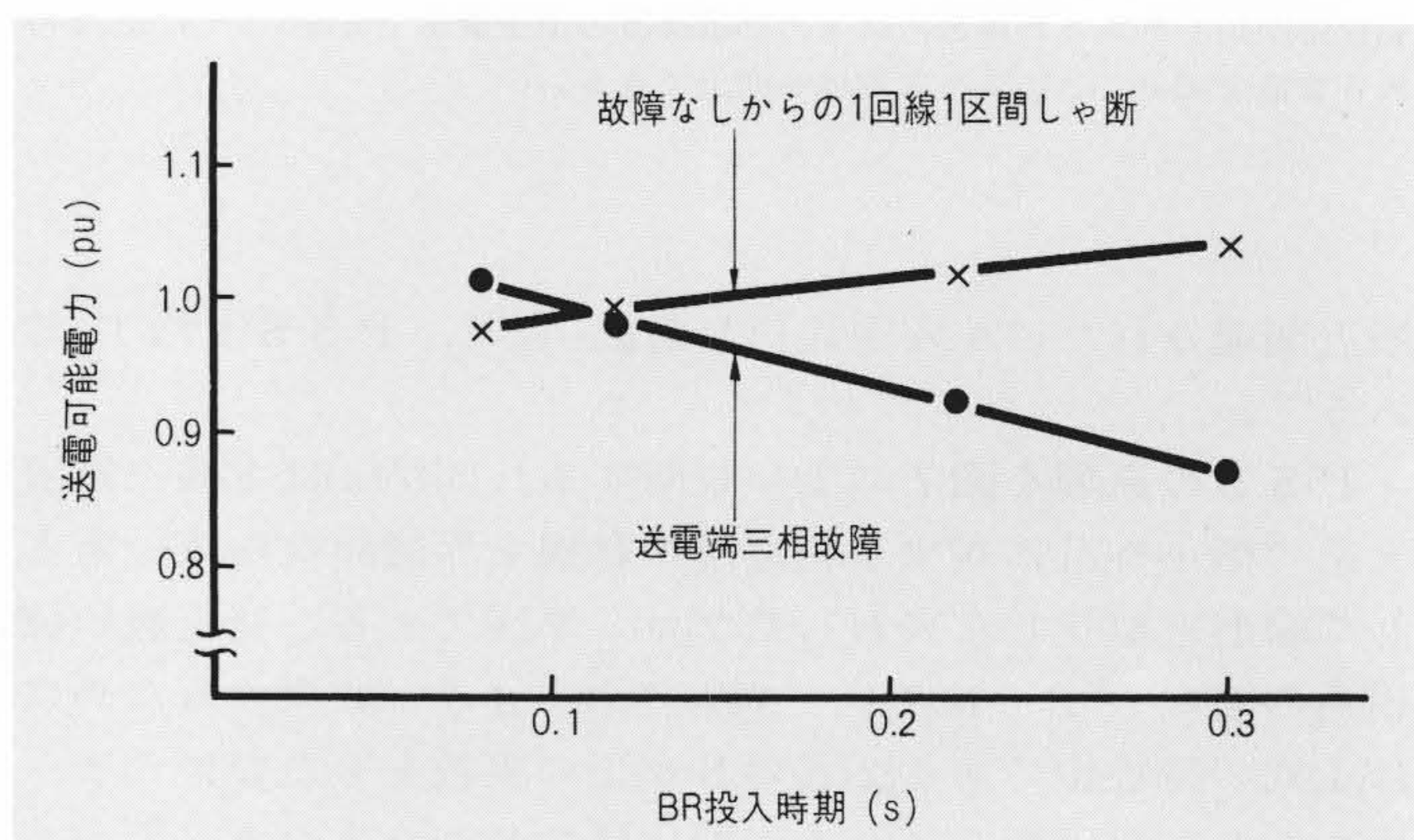


図11 BR投入時期と送電可能電力の関係(10,000MVAベース) BR投入時期は重故障時には早く、軽故障時には遅らせるのがよい。

た実績をもっており、フィールドテストでもその優れた効果が認められている。図10は東京電力株式会社との共同研究により、鶴見「II」火力発電所、4号機(81MVA, 66MW)に超速応励磁装置を取り付け試験したときの一例で、負荷時にAVRの設定値を急変したときの発電機電力動揺のオシログラムである。試験発電機は都市の負荷近くに位置するためPSSなしでも十分大きな制動力をもっているが、PSSにより更に大きな制動力が付加されたことが分かる。また、PSSの効果は単にこれを設置した発電機だけにあるのではなく、その近くにある発電機に対しても良い影響を与えることが系統解析及びフィールドテストから明らかになっている。関西電力株式会社大黒部幹線のフィールドテストでは、大黒部幹線背後の黒部系統8機の発電機のうち3機にPSSを設置することにより、大黒部幹線の電力動揺の減衰に大きな効果があることが確認されている⁽⁷⁾。

5 制動抵抗方式

電力系統に故障が発生したとき、発電機の電氣的出力は瞬時に減少するのに対し、過渡安定度が問題になる0.5秒程度までは機械的入力ほとんど変わらない。本方式は制動抵抗器(以下、BRと略す)を系統故障発生直後に一時的に発電機の近くに投入し、発電機入・出力のアンバランスから生ずる加速エネルギーを吸収するものである。BR方式は過渡安定

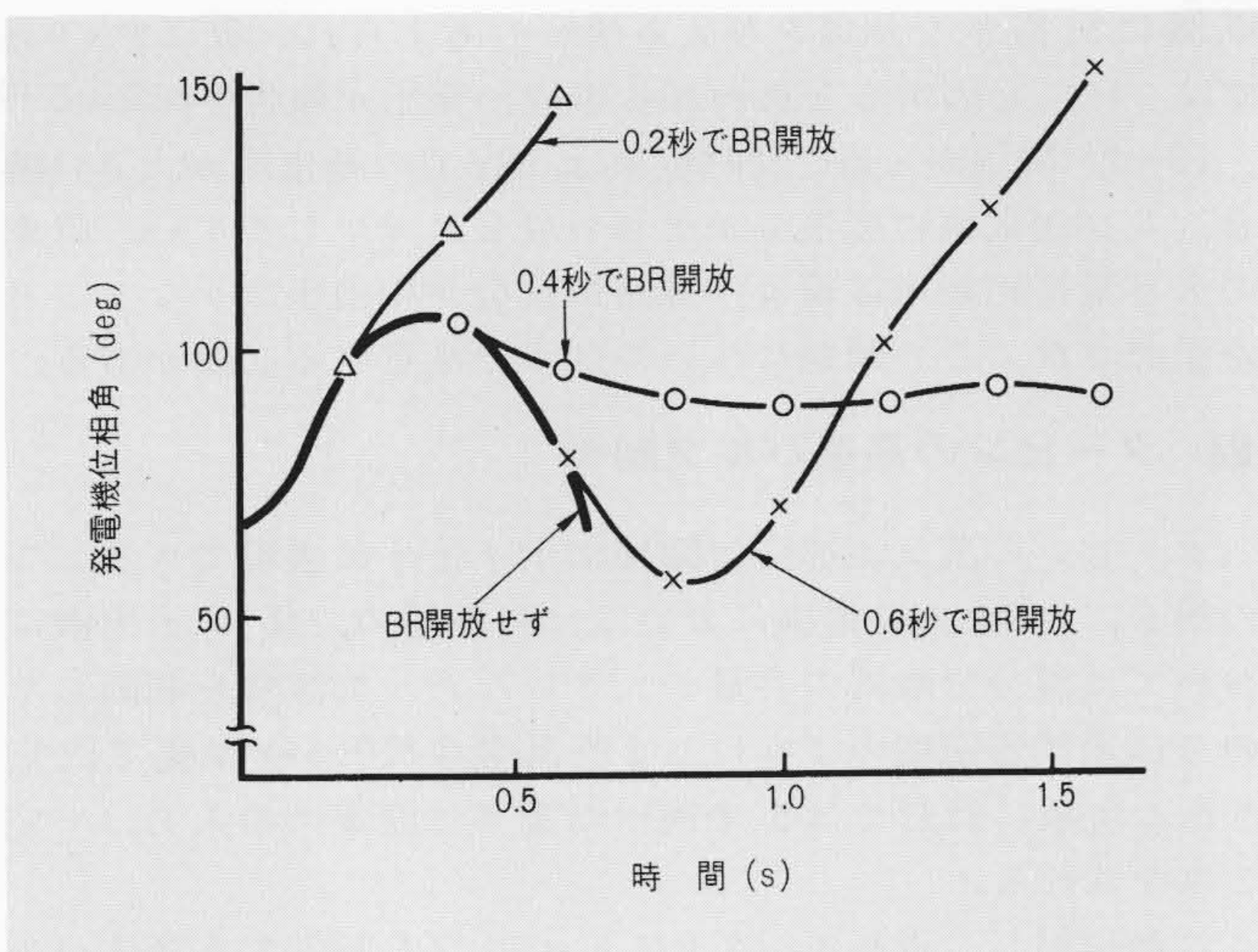


図12 BR開放時期と位相角変動の系統解析例 BRの開放時期は位相角ピークの付近、それもピークよりやや遅れた時点が最適である。

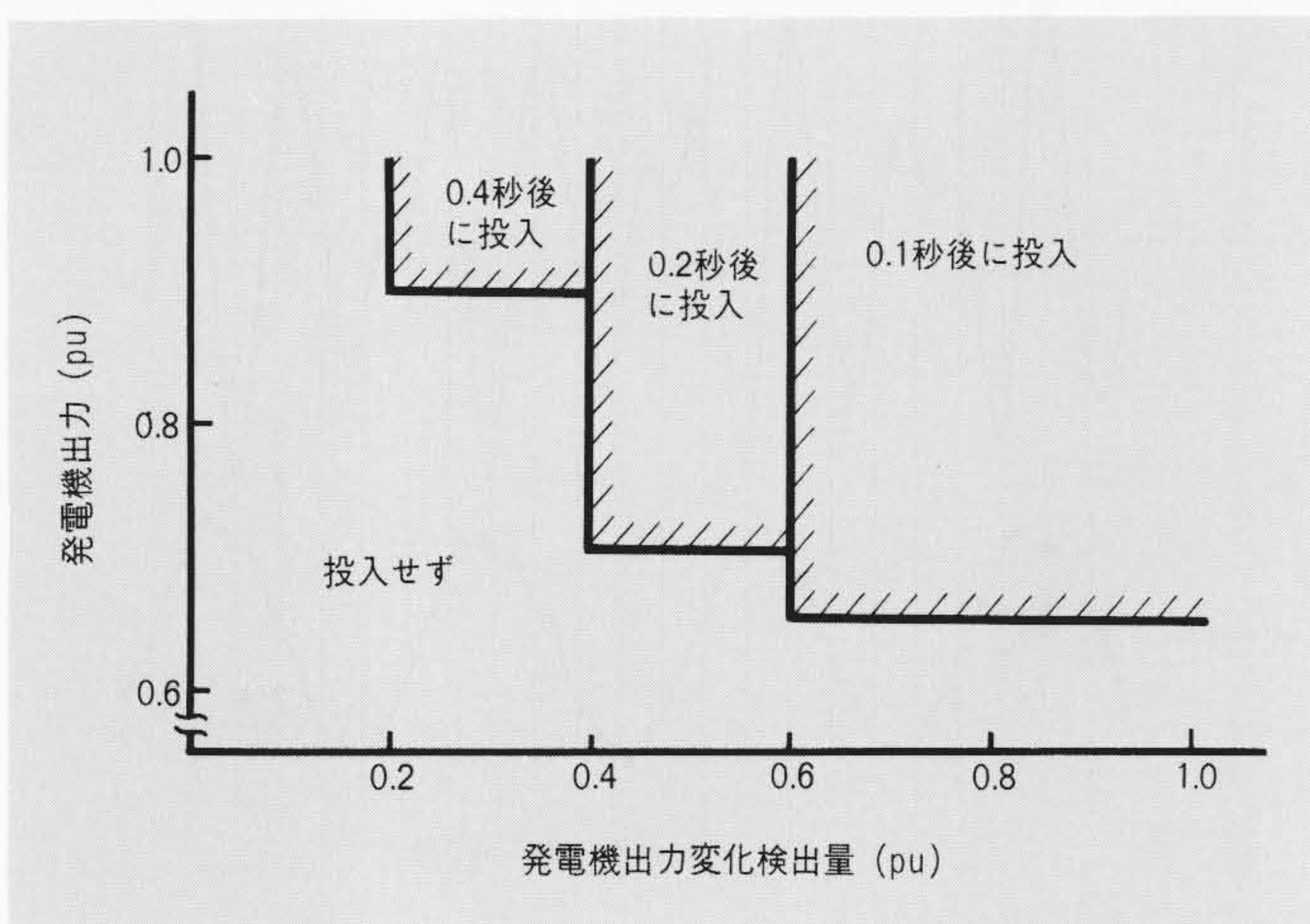


図13 BRの投入時期(10,000MVAベース) 故障の程度によりBRの投入時期を変えるのは効果があるが、3段階に分ければ十分で投入時間の変わりめでの送電可能電力はほとんど変わらない。

度の向上に対する効果が大きく、それほど高価ではないが、国内外ともその適用実績はまだ少なく⁽⁸⁾⁽⁹⁾、特に500kV系に適用したものはない。ここでは東京電力株式会社との共同研究により開発したBRの制御方式について述べる。

BRの投入時期は系統解析から故障の程度が大きい場合は故障区間しゃ断後直ちに、また軽度の故障については故障区間しゃ断後時間をおくのがよいことが分かった。この投入時間の制御を行わない場合、投入するBRの容量が大きいと軽度の故障時にBR開放後に発電機が加速脱調し、BRの容量が小さいと三相故障のような重故障時に発電機加速の第1波目を抑制できない。図11は前出図2の系統において、送電端F点での三相地絡故障時と故障なしから1回線1区間をしゃ断した場合のBR投入時期と送電可能電力の関係を計算したものである。ここで三相地絡故障条件は3.で述べたものと同じであり、1回線1区間しゃ断時はSr.Cの短絡、復帰はない。発電機、変圧器は並列台数合計の定格10,000MWのものが設置してあり、BRは容量5,000MWのものが変圧器高压側に設置してあり、BR投入後の発電機の位相角のピーク時点で開放するものとしている。

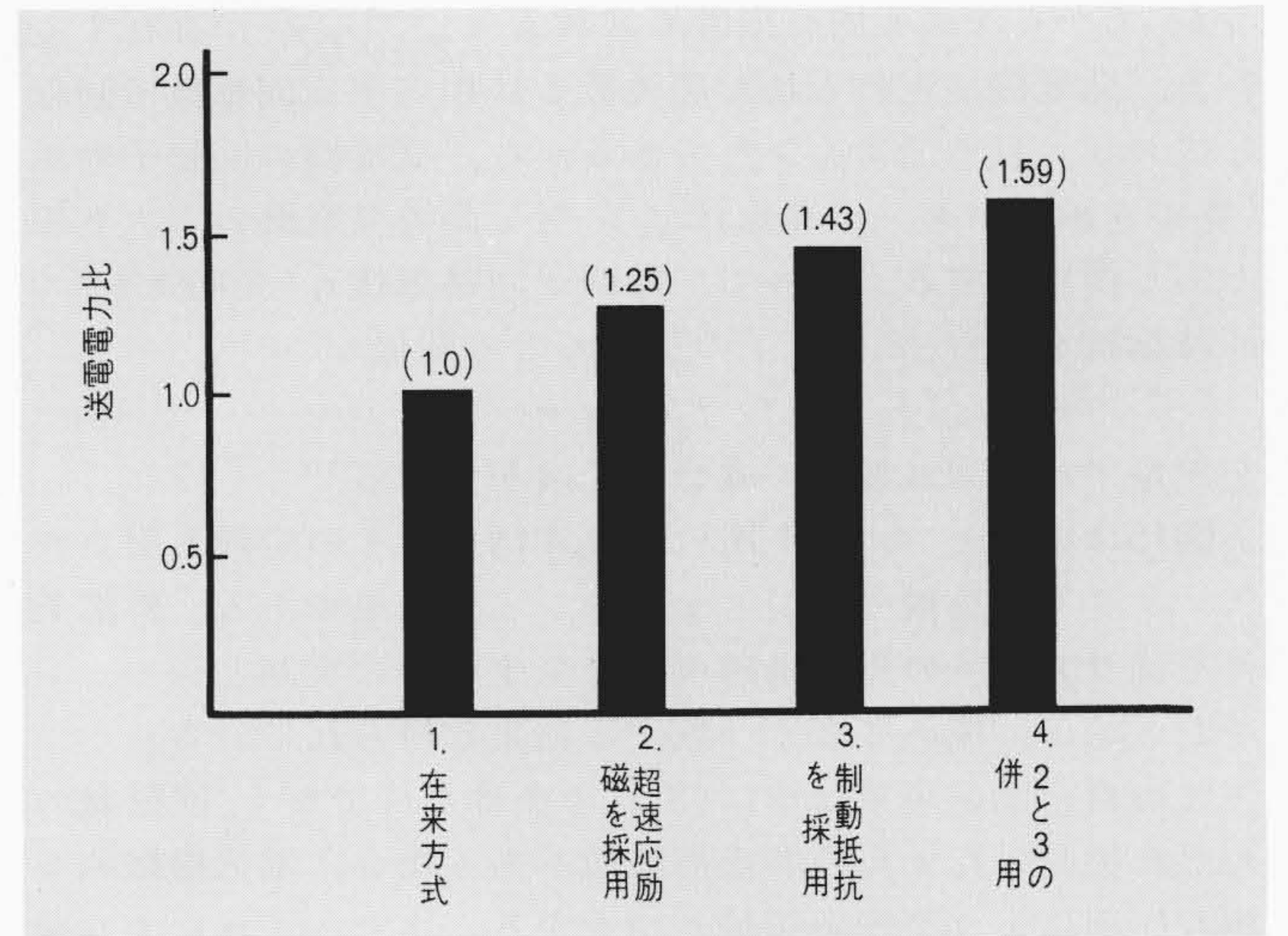


図14 過渡安定度からの制約による送電電力限界に対する超速応励磁と制動抵抗の効果の計算例 超速応励磁、制動抵抗、あるいは両者の併用により送電可能電力は大幅に増加する。

BRの開放時期は発電機の位相角のピークからやや遅れた時が最適であり、BRの容量が大きいほど位相角のピークに最適時点が近づく。図12は三相地絡時のBRの開放時期と位相角変動との関係を求めた系統解析例である。

その他BR方式において注意すべき点として、BRの容量が連続繰り返し使用及び周囲温度により大幅に変化することがあげられる。これは抵抗体として経済的な鋼帯を使用するため3回程程度の繰り返し使用を考慮した場合、消費電力は2%程度まで変化する。

以上の条件を考慮に入れてBR制御方式をおり込んだ系統解析を行なった結果、あらゆる故障を考え、BRの容量6,000～4,000 MW間の変化に対し、前出図2のモデル系統で10,000 MWまで送電可能であることが分かった。この場合、BRの投入時期は発電機出力の変化量によるものとし、図13のように発電機出力の変化量により3段階に行ない、発電機出力があるレベル以下でBRが不必要になればその投入は阻止されるものとした。図14に系統解析により求めたBR方式を用いることによる送電可能電力の増加の一例を超速応励磁方式の効果と併記して示す。

BRの制御装置については上記の方式をおり込んだ実装置を一式製作し、日立製作所日立研究所の模擬電力系統を用いて動作性能試験を行ない、所期の性能と過渡安定度の向上効果が得られることを確認してある。

BR本体についても東京電力株式会社との共同研究により500kV、三相4,500MWの一相分1,500MWの1/2相当部分を試作し、絶縁特性、機械的強度などを試験して、その実用性を確認してある⁽¹⁰⁾。

6 直列コンデンサ(Sr.C)方式

直接送電線のリアクタンスを補償するSr.C方式は、大容量長距離送電線の送電容量増加に極めて効果の大きい方法である。我が国の超高压系統では、関西電力株式会社の大黒部幹線に適用された例があるだけであるが、欧米諸国では早くから数多く採用されている。ここではSr.Cの補償度が高い場合に最も大きな問題である自己励磁現象について述べる。

発電機がSr.C補償をしてある送電線を通じて無限大系とみなせる系統に接続されている場合、発電機から無限大系まで

の L 、 C から決まる固有振動周波数 $f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ が存在する。一方、発電機は定められた周波数 f_0 に相当する回転数で回転しており、且つ通常 $f_0 > f_n$ であるから、発電機の回転子巻線（界磁巻線及びダンパ巻線）は f_n に対し誘導発電機の二次巻線と同じ作用をする。従って、電機子回路抵抗 r_1 （発電機外部の回路抵抗を含む）と回転子の抵抗 r_2 との関係が

$$r_1 < r_2 (f_0 - f_n) / f_n \cdots \cdots (3)$$

を満足すれば周波数 f_n の成分の発散が生ずる⁽¹¹⁾。

図15は小形モデル機を用いた実測結果とその定数を用いたデジタル計算機でのシミュレーション結果である。外部条件を種々変えての自己励磁現象の発生限界の実測とシミュレーションは、極めてよく一致する結果が得られている。

この自己励磁現象は単に(3)式の条件だけでなく、回転軸のねじれ振動に $f_0 \pm f_n$ の共振周波数がある場合、電気機械的な相互作用により不安定領域が増大する。また、これにより発

電機に機械的な損傷を与える場合も考えられ、現にアメリカではこれに起因すると思われる事故の発生が報告されている⁽¹²⁾。

(3)式の関係から自己励磁現象は、 $Sr.C$ の補償度が大きい場合、及び送電線の抵抗分が小さい場合に発生しやすい。将来の大容量長距離送電線は、線路抵抗分が相当小さくなることが予想され、この問題については十分注意する必要がある。

7 タービンの高速バルブ制御

タービンの蒸気流通路は図16に示すように表現できる。この場合、(a)火力発電機においては再熱器の、(b)原子力機においては湿分分離器の容量が大きいため、加減弁を制御したのでは過渡安定度のようにじょう乱発生後0.5秒程度で決定される現象に対しては5.で述べたように発電機の入力は一定とみなされる。

これに対し、近年インタセプトバルブを制御する高速バル

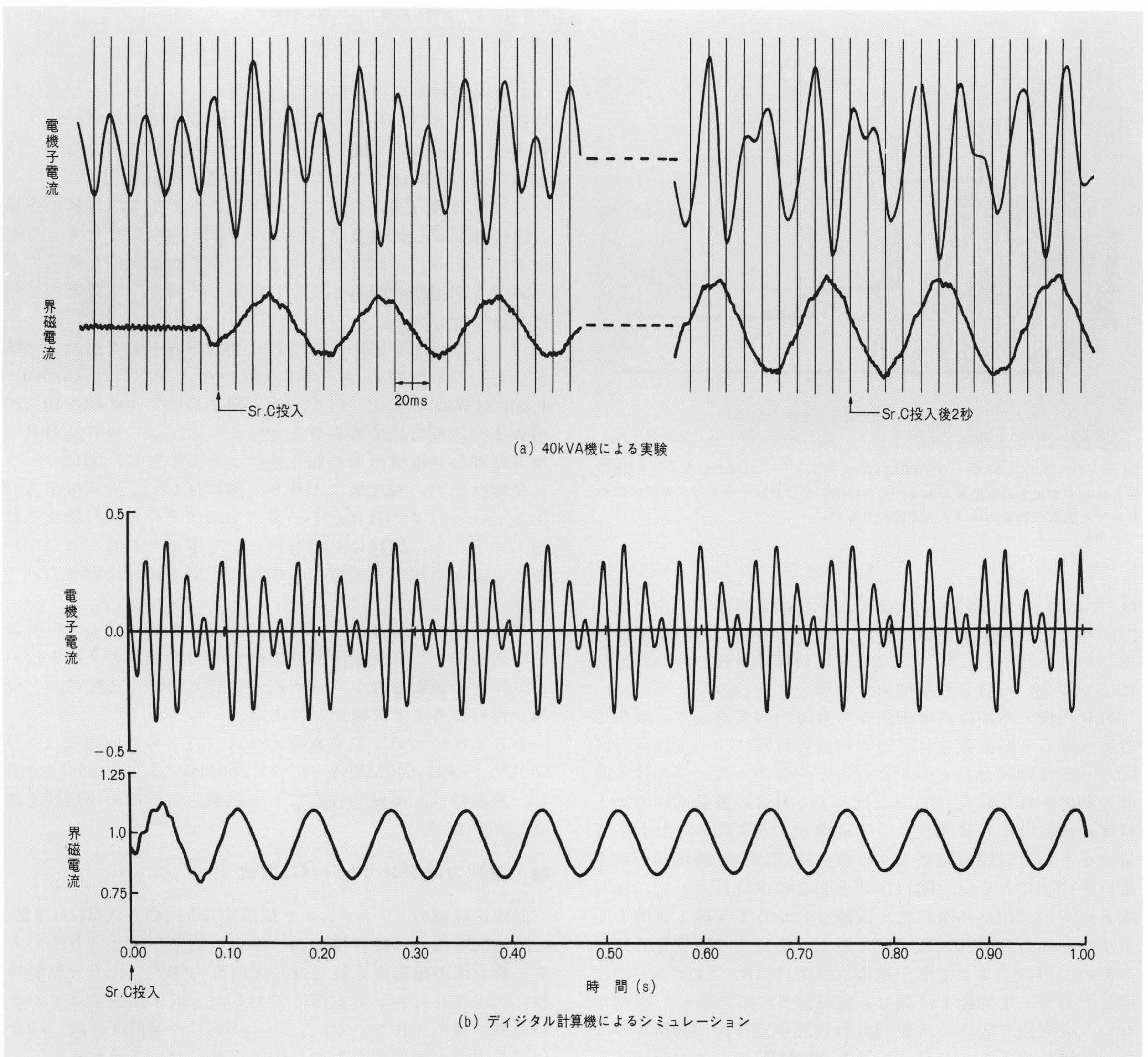


図15 Sr.Cによる自己励磁現象(ほぼ自己励磁発生の限界)

Sr.Cによる自己励磁現象の実験結果とシミュレーション結果はよく一致する。

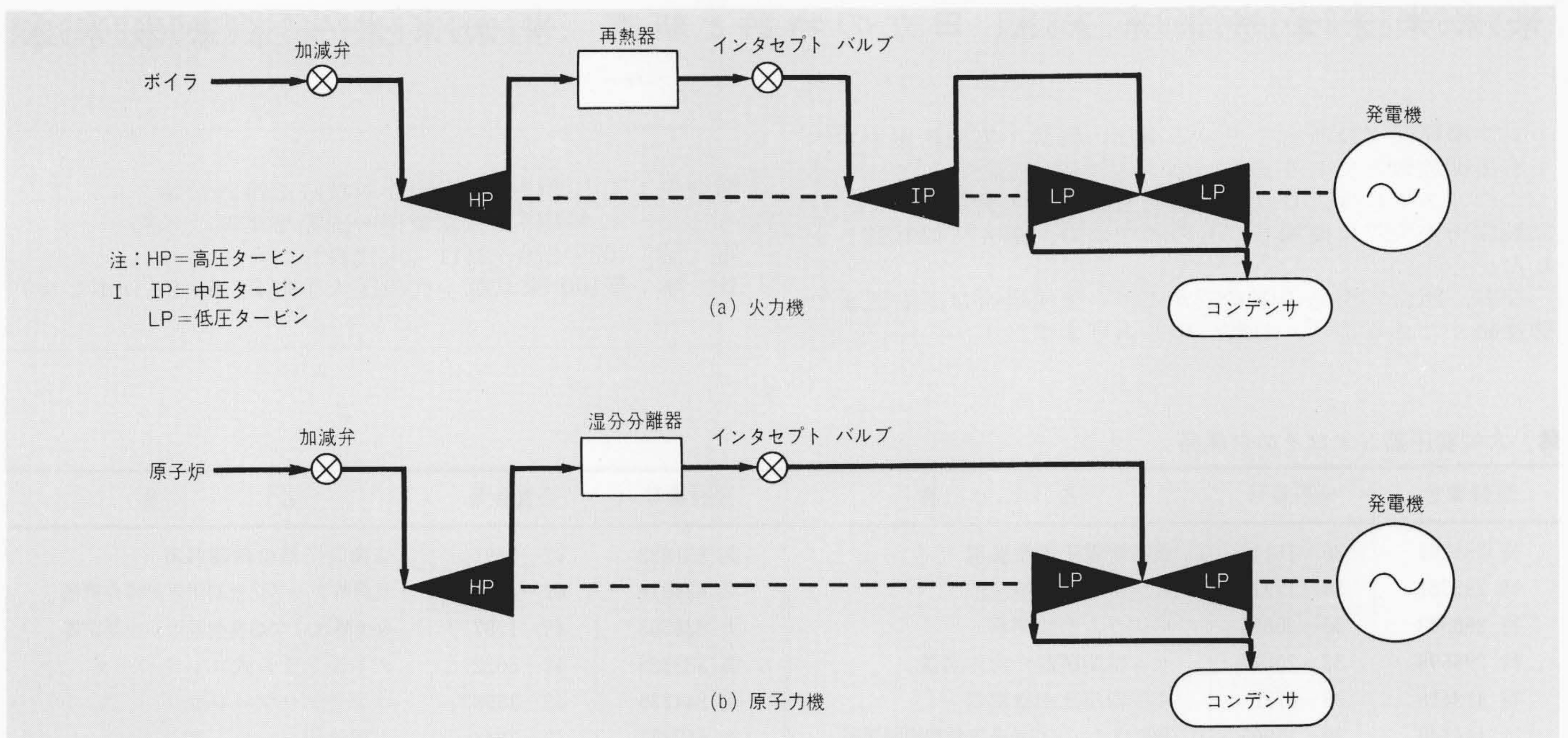


図16 タービンの蒸気流通路 タービンの蒸気流通路には容量の大きい再熱器，又は湿分分離器があるため，加減弁では過渡安定度に寄与できるほど高速な制御はできない。

ブ制御 (Early Valve Actuation, Early Valving, Fast Valve Control, あるいはFast Valvingなどと言われている。以下，EVAと略す) が取り上げられてきている⁽¹³⁾。これにより火力機で全出力の約70%を占める中圧タービン及び低圧タービンの出力を，また原子力機では全出力の約45%を占める低圧タービンの蒸気流量を制御できる。

BR方式が発電機出力を一時的に消費させるのに対し，EVA方式は発電機入力を制御するもので，発電機の入・出力のアンバランス是正という点では同じ効果を持ち，且つBR方式に比べはるかに小さな装置でよい。但し，中圧，低圧のタービントルクが20%程度となるまでに0.5秒程度の時間を要し，且つ高圧タービンに対してはほとんど制御能力がないため，大きな入・出力アンバランスの是正が必要な場合はBR方式との併用も必要である。

インタセプトバルブを制御した場合，通常タービントルクが元に戻るまでには10秒程度かかり，対象発電機群の出力が全系統出力に対し大きな割合を占めているときは，系統周波数の低下のような好ましくない現象が生ずる。これに対し，我々の検討結果ではバルブの開閉に際し，バルブを中間位置に戻しておくことによりBR方式同様発電機の位相角の第一波目のピーク値付近から出力増加が可能であり，またバルブ閉時にもより速い応答が期待できる⁽¹⁴⁾。

8 結 言

以上，大容量長距離送電時の安定度向上のための諸方式について紹介した。これらの方式はいずれも技術的，経済的に可能で大きな効果をもっており，今後の電力系統への適用が期待できる。

これらの新技術の開発，検討に当たり，御助言と御指導をいただいた東京電力株式会社，及び関西電力株式会社の関係各位に対し厚く御礼申しあげる。

参考文献

- (1) O.Saito et al: "Developments on Improvement of Stability for 500kV 10GW Power Transmission-Part 1" IEEE PES Winter Meeting C75 159-9 (1975-1)
- (2) O.Saito et al: "Developments on Improvement of Stability for 500kV 10GW Power Transmission-Part II" IEEE PES Winter Meeting C75 161-5 (1975-1)
- (3) 高木，関根：「基幹電力系統における受電圧の安定性について」電学誌95，1，17 (昭50-12)
- (4) S.Abe, A.Isono et al.: "Criteria for Power System Voltage Stability by Steady-State Analysis" IEEE Summer Power Meeting A75 435-8 (1975-7)
- (5) 齊藤，松尾ほか：「タービン発電機用超速応励磁装置」日立評論57，665 (昭50-8)
- (6) F.P.deMello, C. Concordia: "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control" IEEE PAS-88，4，316 (1969-4)
- (7) 小林，百地，磯野：「同期機励磁制御による電力系統安定化装置」日立評論56，1161 (昭50-12)
- (8) 吉田，福西，青井：「巨大電力輸送に伴う系統安定用制動抵抗装置 (SDR) の開発研究について」電学誌91，5，940 (昭46-5)
- (9) M.L.Shalton, P.F.Wenkelman et al.: "Bonneville Power Administration 1400 MW Breaking Resistor" IEEE PAS-94，2，602 (1975-3/4)
- (10) 安森，長屋ほか：「500kV大容量制動抵抗器の開発」日立評論57，505 (昭50-6)
- (11) J.W.Ballance, S.Goldberg: "Subsynchronous Resonance in Series Compensated Transmission Lines" IEEE PAS-92，6，1649 (1973-9/10)
- (12) D.E.Walker, C.E.J.Bowler et al.: "Results of the Subsynchronous Resonance Tests at Mohave" IEEE Winter Power Meeting T75 176-3 (1975-1)
- (13) O.J.Aansted, H.E.Lokay: "Fast Valve Control can Improve Turbine Generator Response to Transient Disturbances" WH Engineer, 30，7，114 (1970-7)
- (14) 青津，磯野，内山：「中間阻止弁制御装置」特開報49-83808 (昭49)