

特殊連系装置の方式開発

System Development of System Interconnector of Dynamic Characteristic

平山 尚* 広吉 秀高** 中山 敬造**
 Takashi Hirayama Hidetaka Hiroyoshi Keizō Nakayama
 村井 勝治** 奥田 健三*** 栗田 健太郎****
 Katsuji Murai Kenzō Okuda Kentarō Kurita
 加藤 寧*****
 Yasushi Katō

要 旨

東京電力株式会社の電力系統は巨大集中化の傾向が強いが、このような系統において全系を並列運用すれば多くのスケールメリットが得られる反面、事故の波及拡大による大停電の防止、短絡事故電流の抑制の面でじゅうぶんな対策を講じなければ、将来、系統の安定運転が困難になることが予想される。その抜本対策として系統を適正規模のブロックに分割し、これらの間を特殊な機能をもつ連系装置により連系する方式の開発を行ない、モデル試験およびデジタル計算機による系統計算により系統への適用効果を明らかにした。

1. 緒 言

東京電力株式会社の電力系統は年々その規模を拡大し、これが大都市を囲繞(じょう)する500kV外輪系に集中すると予想されている。このような巨大集中化した系統においては、これを並列運用すると、負荷、電源の不等性の利用、供給予備力の節減、経済運用などの面で多くのスケールメリットが得られる。しかし、反面事故の波及拡大による大停電の防止、短絡事故電流の抑制などの面でじゅうぶんな検討と対策を講じなければ、基幹系統の安定運転を行なうことがしだいに困難になるものと予想される。

このような情勢の中で、短絡事故電流の適正值への抑制を兼ね大停電事故の絶無を期した抜本的対策として、系統を適正規模のブロックに分割し、これらの間を直流もしくは750~1,000kVの新設高次電圧系統を介して連系する方式が検討されてきた⁽¹⁾。しかし、これには多大の設備投資を必要とし、また技術的にも今後の検討にまたなければならぬ多くの問題があると予想される。

そこで、東京電力株式会社と日立製作所は共同研究により、系統ブロック間を特殊な機能をもつ交流式連系装置によって連系する方式について開発を進めた。開発にあたっては系統の諸特性を把握して適切なものとする必要があり、モデル装置による模擬送電線試験、デジタル計算機による系統計算により系統への適用効果を明らかにした。また、新しく開発を必要とする開閉装置および制御装置については、SF₆ガス絶縁開閉装置製作技術ならびに最新のエレクトロニクス技術を駆使して実規模装置を製作し、その実用性を確かめた。以下に特殊連系装置の機能、方式動作および適用効果について述べる。

2. 開発にあたっての基本構想

2.1 所要基本機能

図1に示すブロック系統間を連系する特殊連系装置には、平常時の系統間の自由な連系、事故電流の抑制および大停電事故の防止が基本的な機能として要求される。

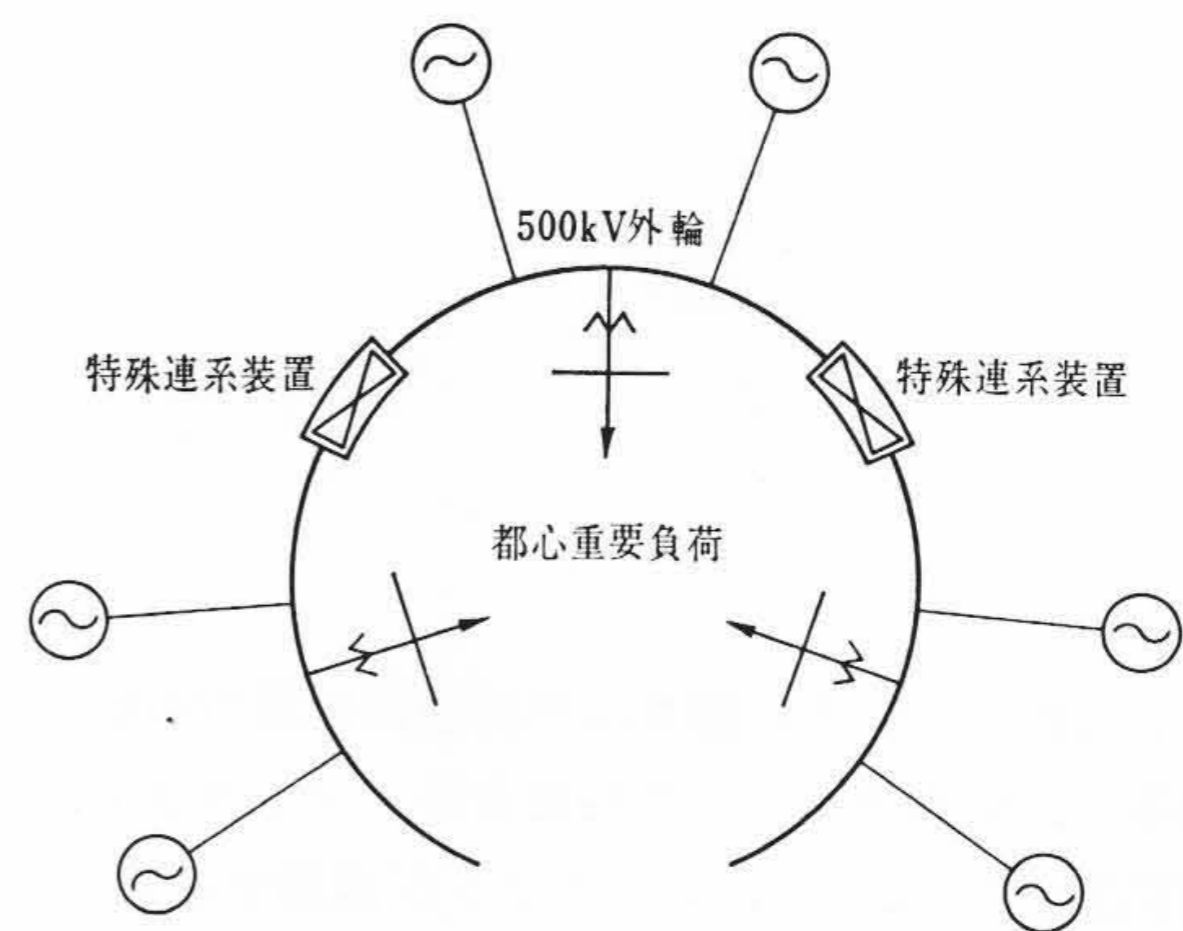


図1 特殊連系装置による系統連系

(1) 平常時の自由連系機能

特殊連系装置によって連系される系統ブロック相互間では、スケールメリットを生かすため、あたかも全系並列系統のように相互に自由な電力授受を行ないることが必要である。すなわち、平常時は予備力の相互融通とAFCなどの調整潮流を考慮する必要があり、発電ユニットの予定外停止が発生すれば不足電力分を連系装置を介して融通する。またいずれかのブロックに事故による電源脱落が発生したときは、健全ブロックの安定運転を維持できる範囲内で緊急応援電力を融通する。このように連系装置を介して電力融通を行なっている場合にも、下位系統における電源、負荷のブロック間切換えを円滑に行なう必要があり、そのため連系装置両側の電圧相差角を一定限度内に収めて自由な連系を行なう。

(2) 事故電流の抑制機能

系統容量が大きくなった場合、系統ブロック間を直接連系したのでは事故時の事故電流が過大となり、しゃ断器のしゃ断容量を超過するほか、通信線誘導障害の防除などきわめて困難な問題を生ずる。これに対し特殊連系装置は、あるブロックに事故が発生したとき、そのブロックに流入する事故電流を瞬時に抑制する。

(3) 大停電事故の防止機能

ある系統ブロックに発生した事故の影響がほかのブロックに波及し、大停電事故に進展することは絶対に防止されねばならない。すなわち、事故継続中および事故除去直後の電力擾(じょう)乱

* 東京電力株式会社技術開発研究所
 ** 日立製作所大みか工場
 *** 日立製作所日立研究所 工学博士
 **** 日立製作所国分工場
 ***** 日立製作所機電事業本部

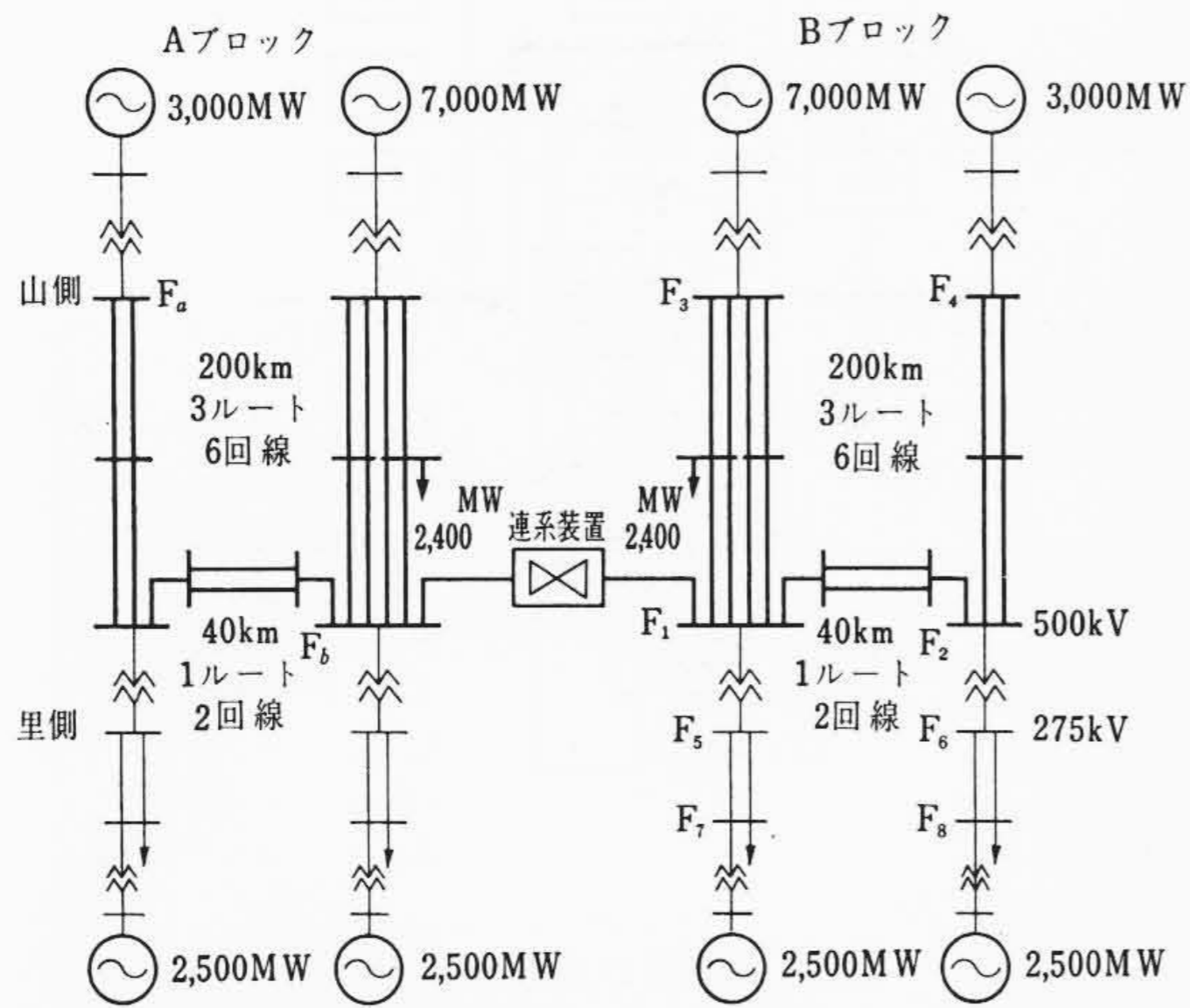


図2 特殊連系装置方式開発モデル系統

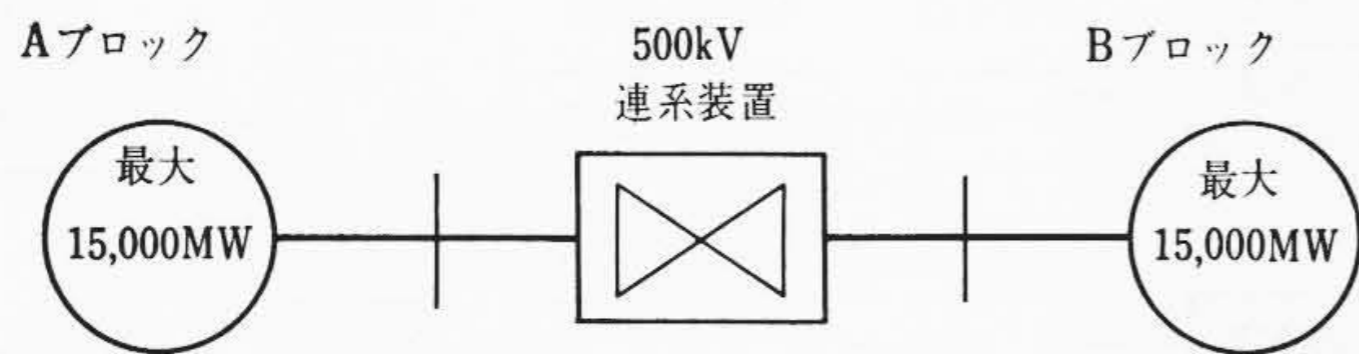


図3 簡略モデル系統

によって、健全ブロック内の発電機間同期はずれを生じないように、連系点を通過する動揺電力を限度内に抑制する必要がある。

また、事故ブロックで大電源脱落を生じたときは健全ブロックから緊急応援電力を融通することになるが、この値が過大になると健全ブロックも周波数または電圧の低下が大となり安定運転の継続が困難となる。これに対し、特殊連系装置は連系点の応援電力最大値を健全ブロックからの応援可能電力以下に抑制し、事故の拡大を防止する。

2.2 付加機能

特殊連系装置を実系統に適用する場合には、上記の基本機能のほかに系統運用上有利な機能を付加することが考えられる。たとえば、事故による電源脱落量が大きく連系装置を通過する応援電力が過大となった場合、健全ブロックへの事故波及を防止するために通過電力を抑制すると、各系統ブロックにおける発電力と負荷の平衡状態が変わるため相互に周波数差を生じ、系統間同期はずれとなる。このような場合、非同期連系機能を付加し、系統間同期はずれに至ったとき、これらを解列してしまう代わりに非同期連系を継続し、事故ブロックの周波数回復をまって再同期を図ることが復旧時間の短縮に有利である。

2.3 検討の対象としたモデル系統

特殊連系装置の方式を開発するにあたっては、その実用性能を検討するためモデル系統を設定することが必要である。今回は図2に示すような系統容量山側 20,000 MW、里側 10,000 MW、合計 30,000 MW（瞬動予備力保有量は3%）の比較的単純ではあるが基本的なケースを想定し、15,000 MWの2ブロック系統を500 kVの特殊連系装置で連系するものとした。図2をさらに簡略化すると図3のように表現できる。この場合、連系点通過電力は常時 750 MW 連続とし、大電源脱落事故時にはこれに応援電力分も加算して 2,000 MW と考えた。ただし応援電力は連続ではなく、適切な系統操作によって15分以内に常態に復旧するものとした。

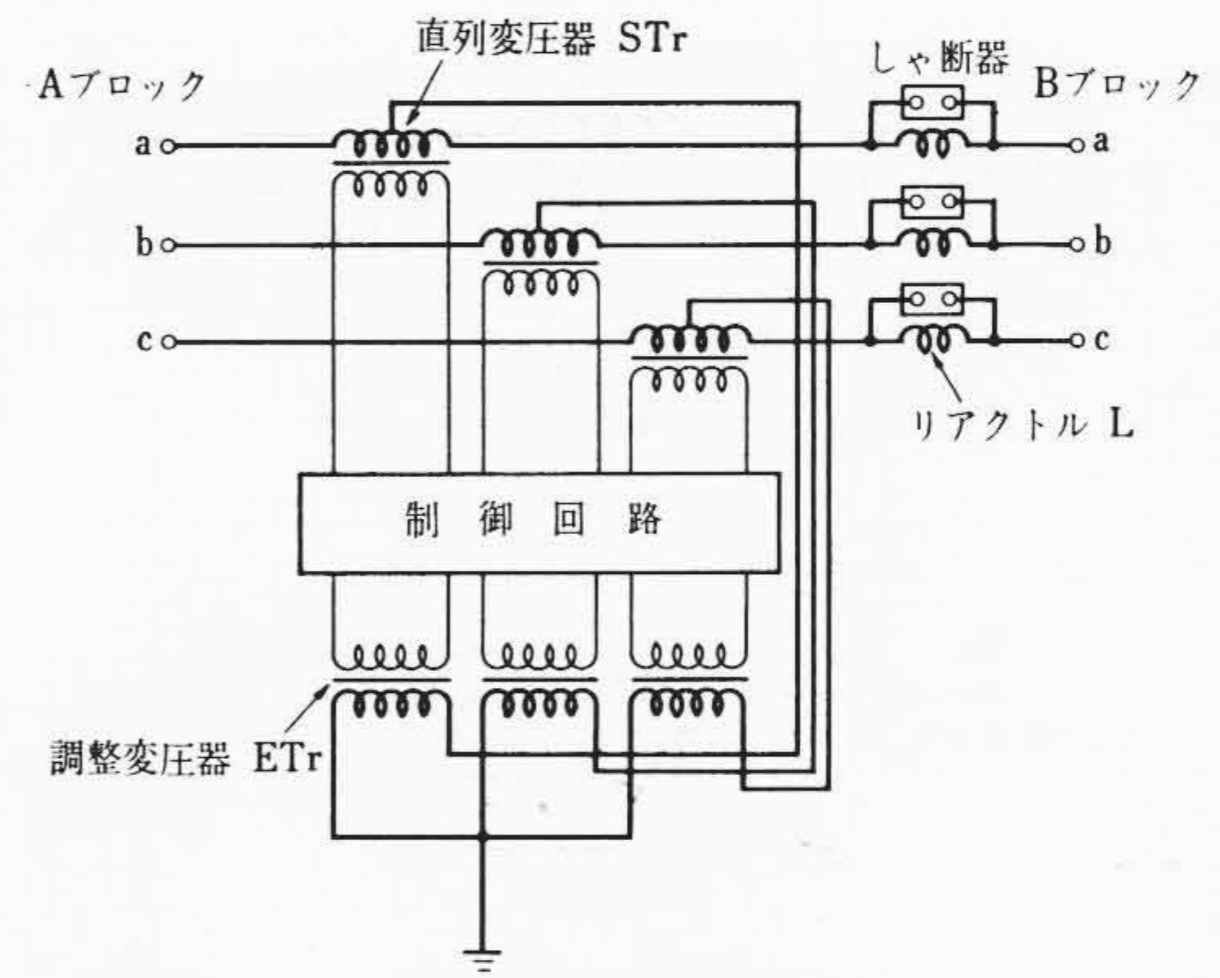


図4 電圧補償方式の回路構成

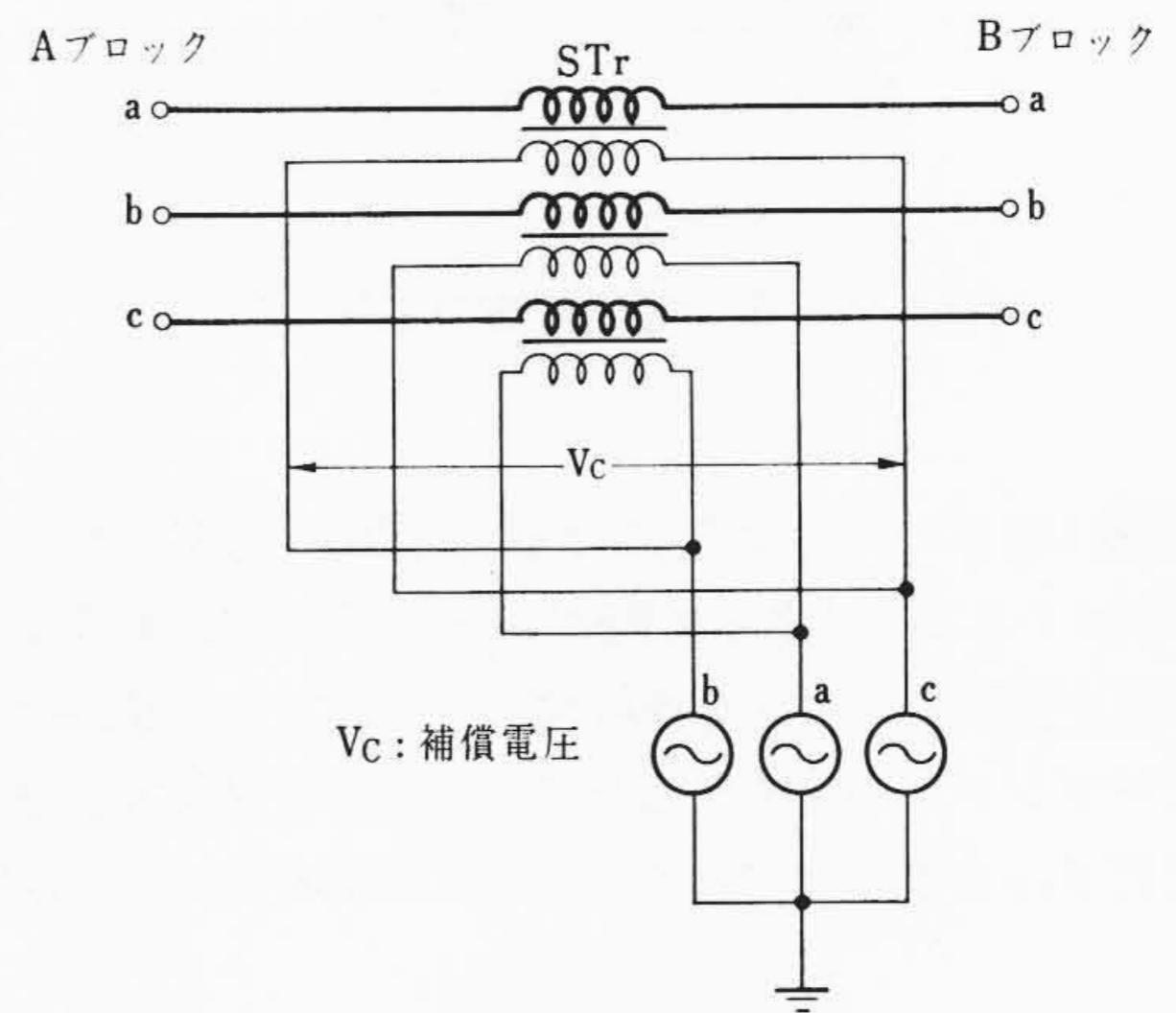


図5 補償電圧の印加方法

3. 電圧補償式特殊連系装置

3.1 回路方式

特殊連系装置に要求される機能を果たす回路方式としては、たとえば、半硬磁性鉄心や可飽和リアクトルなどの非線形インピーダンス素子を用い、電流が小さいときはインピーダンスが小さく、電流の増加につれてインピーダンスが大となり、電流の増大を抑制する特殊限流リアクトル方式が考えられる。またL-C直列共振を利用して、事故時にCと並列にそう入された短絡装置を動作させてCを短絡し、インピーダンスを大とするL-C直列回路方式などもある。これらの方式にはそれぞれ得失があるが、今回は電圧・電流の波形ひずみ、損失、経済性、信頼性の点を考慮して電圧補償方式を立案し詳細研究を進めた。本方式の内容は次のとおりである。

(1) 回路の構成

電圧補償式特殊連系装置の主回路構成を示したのが図4である。A、B両ブロック系統を直列変圧器STrを介して連系し、STr中点電圧を調整変圧器ETrによって取り出し、ETr二次電圧を制御回路で組み合わせてSTrの二次に印加する。またSTrと直列にリアクトルを接続する。

制御回路によってSTr二次に印加される電圧（補償電圧）は図5のように、たとえばa相に対してはbc相線間電圧を利用した直角成分電圧Vcとしている。

(2) 動作原理

(a) 平常運転時には図6(a)に示すように、STrの漏えいリアクタンスXによる電圧降下IXを、二次側から印加する補償電圧Vcによって補償する。等価回路は図6(b)のようになり、ベク

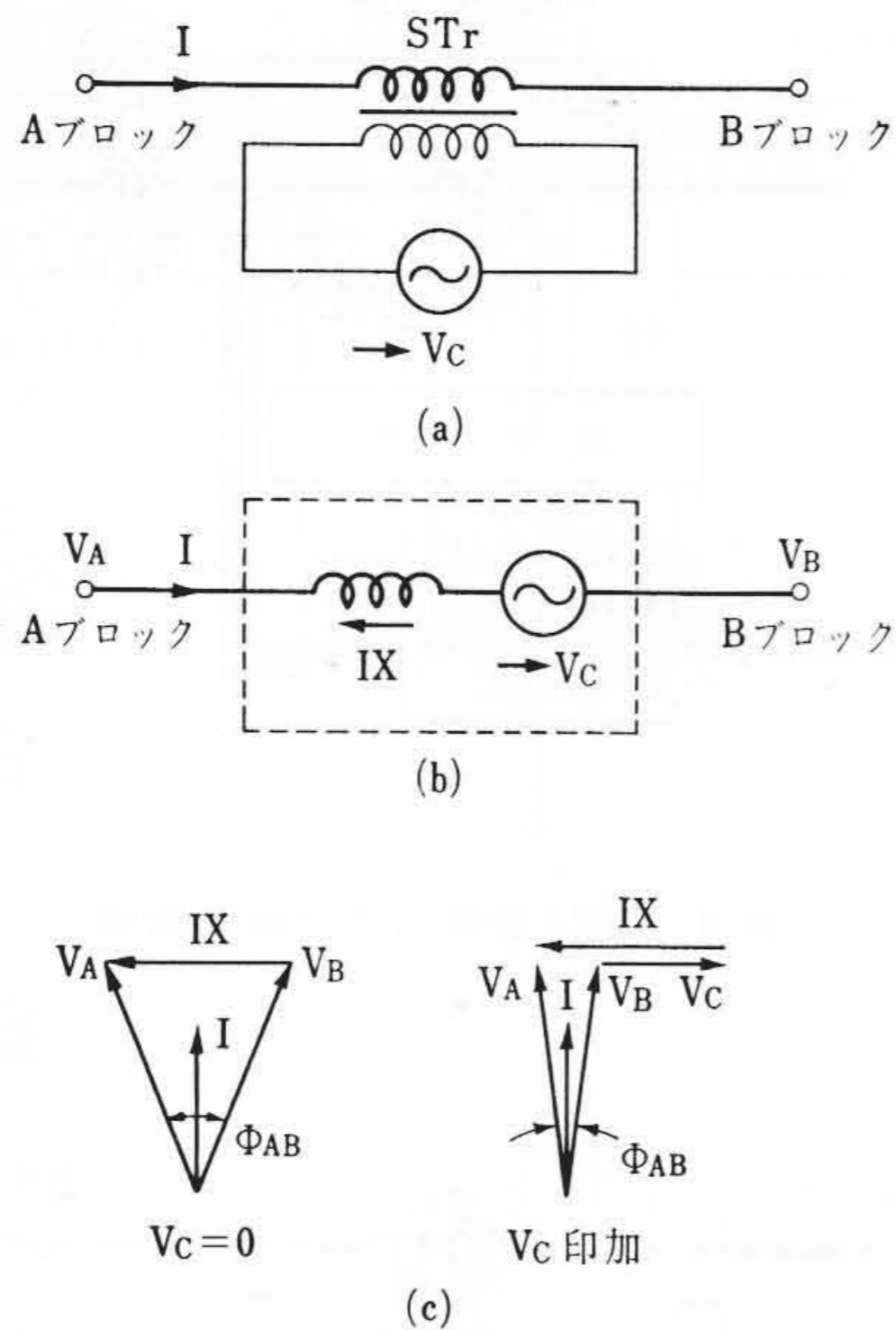


図6 電圧補償の原理

トル関係は図6(c)のようになる。同図から明らかなように、 V_c を印加することによって両ブロック系統電圧 $V_A V_B$ の相差角 ϕ_{AB} を規定値以下に小さく維持することができ、見かけ上の連系インピーダンスが小さくなるため系統間の自由な電力融通ができる。また ϕ_{AB} を小さくできるので下位系統のループ切換が容易となる。

(b) 系統事故時には、 ST_r の漏えいリアクタンス X により通過事故電流を抑制する。 V_c は V_A, V_B に比べて小さく、かつ直角成分電圧であるため、事故電流抑制効果にはほとんど影響はなく事故電流抑制はほぼ X により決定される。

事故が除去されれば、平常運転時と同様に、直ちに自由な電力融通ができる。すなわち事故電流抑制は ST_r の本質的なリアクタンス X によって行なわれ、事故発生時になんらの制御も必要としないため系統の状態に即応することが可能である。したがって連続事故に対しても全く同じ動作をくり返すことができ信頼度が高いと考えられる。また非線形要素や直列コンデンサがないため過渡的な異常現象や電流波形のひずみがない。

(c) 事故の程度が大きく健全系統の安定運転がおびやかされるおそれがある場合、または系統ブロック間の同期はずれ時には、図4に示すリアクトル L に並列のしゃ断器を開放してリアクトル L を系統間にそう入する。そのため連系インピーダンスが大幅に増大して連系点電力最大値を抑制することができる。

(d) リアクトル L のそう入により、系統ブロック間の同期はずれが発生しても、高インピーダンスを介しての同期はずれ現象であるため電力、電圧の動揺は非常に小さく、系統に悪影響を与えることなく非同期連系ができる。また事故系統側の周波数回復によって自動的に再同期が行なわれる。

(e) 補償電圧 V_c は調整変圧器 ET_r の二次側タップを切り換えて変化させることができる。したがって V_c を直列変圧器 ST_r の漏えいリアクタンス X による電圧降下分を補償するに必要な値から変化させることにより、ループ系統の潮流制御ができる。

3.2 制御方式

電圧補償式特殊連系装置においては、その機能を果たすために系統の運転状態を検出して下記の制御を行なう必要がある。

(a) 補償電圧制御

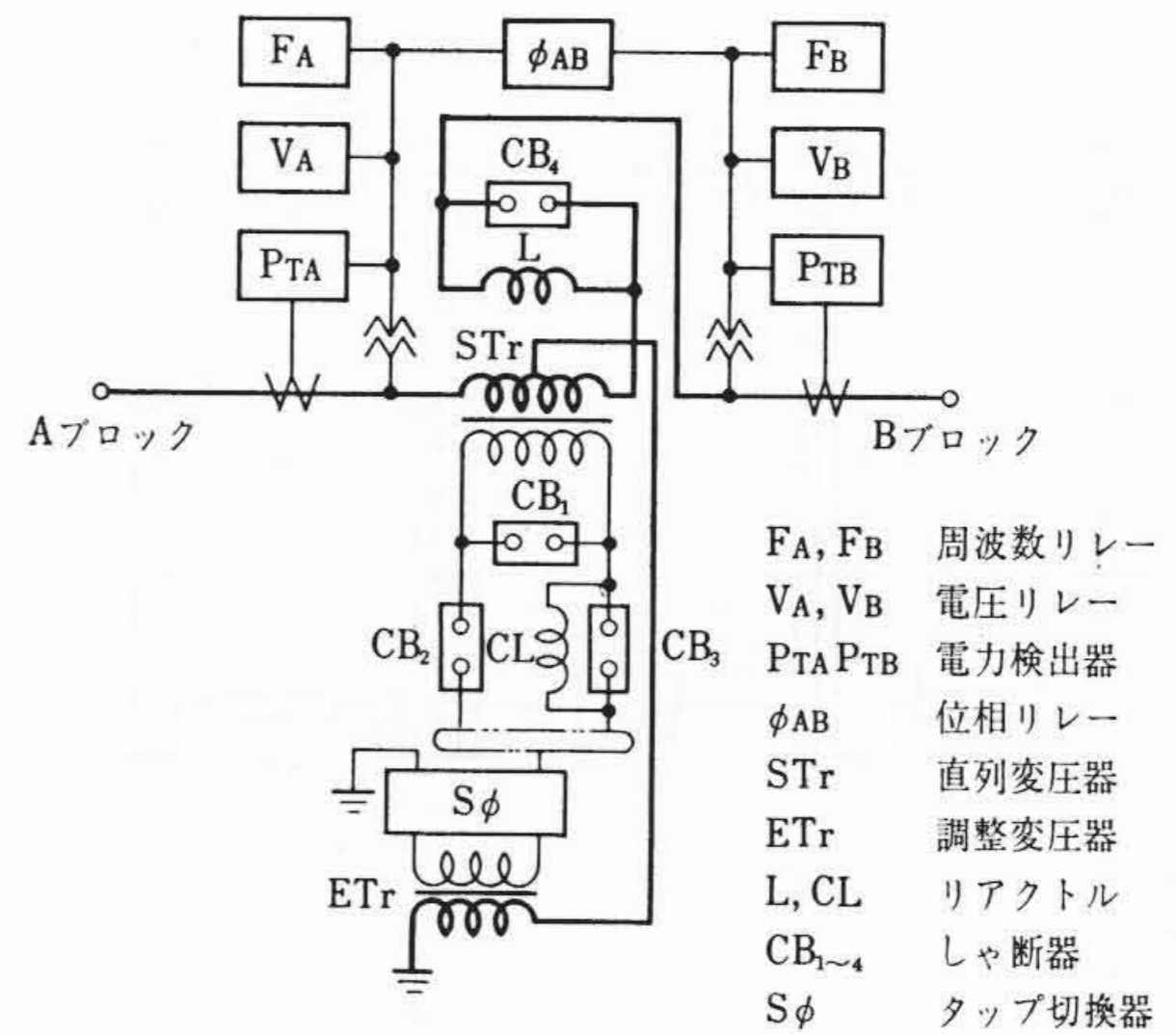


図7 制御方式の検出要素

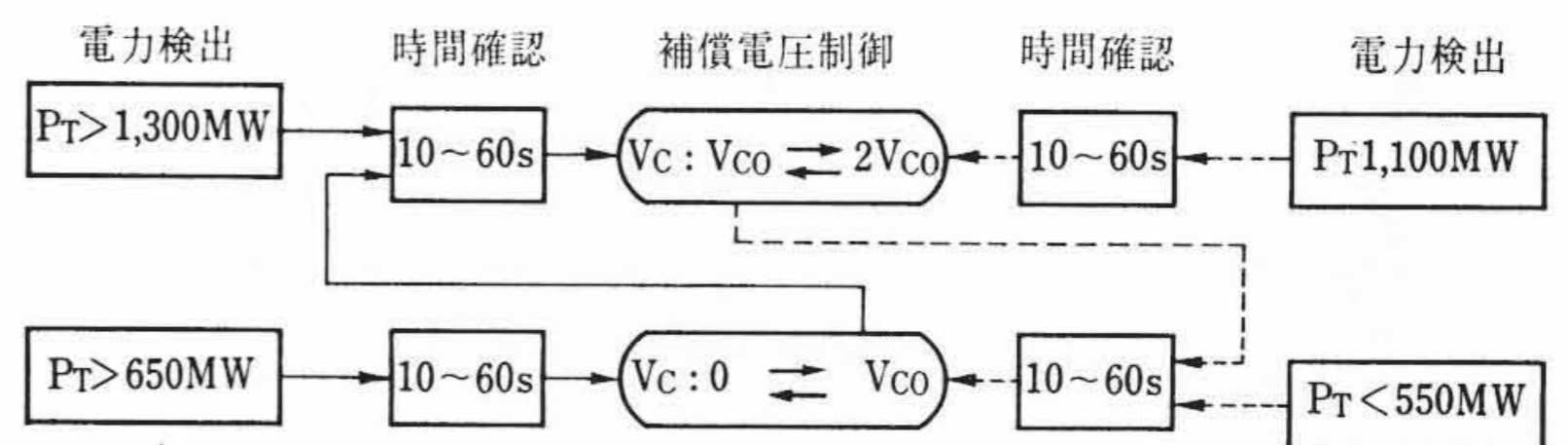


図8 補償電圧制御方式説明図

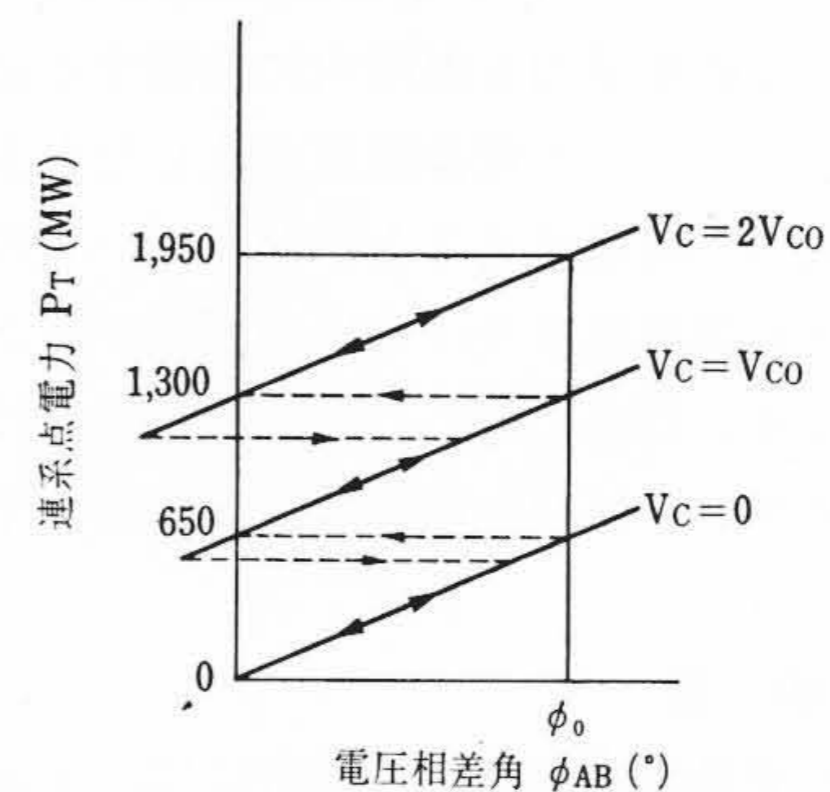


図9 補償電圧制御特性

(b) 連系リアクタンス制御

(a)は補償電圧を印加するため調整変圧器のタップ、極性の切換えを行なうものであり、(b)はリアクトル L をそう入するものがある。これらの制御は図7に示すように、連系点電力 P_T 、両ブロック系統の電圧 V および周波数 F 、さらにブロック間の電圧相差角 ϕ を検出することによって行なわれる。以下、モデル系統について具体的に説明する。

(1) 補償電圧制御

図8は補償電圧制御方式の説明図である。連系点電力の方向が $A \rightarrow B$ の場合を例にとると、連系点電力 P_T が小さい場合には補償電圧 V_c は印加されない。 P_T が増加し650 MWを越えると、 P_{TA} がこれを検出し、一定時間(10~60秒)確認したのち、第1段補償電圧 V_{c0} を印加する。 P_T がさらに増加し、1,300 MW以上になると第2段補償電圧 $2V_{c0}$ に切り換える。

このような制御を行なった場合の P_T と ϕ_{AB} の関係は図9のとおりであり、最大電力2,000 MWまで電圧相差角を所定値 ϕ_0 以下に収めることができる。また電力の方向が $B \rightarrow A$ の場合には P_{TB} が検出して動作する点と V_c の極性が逆になる点を除いて、その動作原理は同じである。

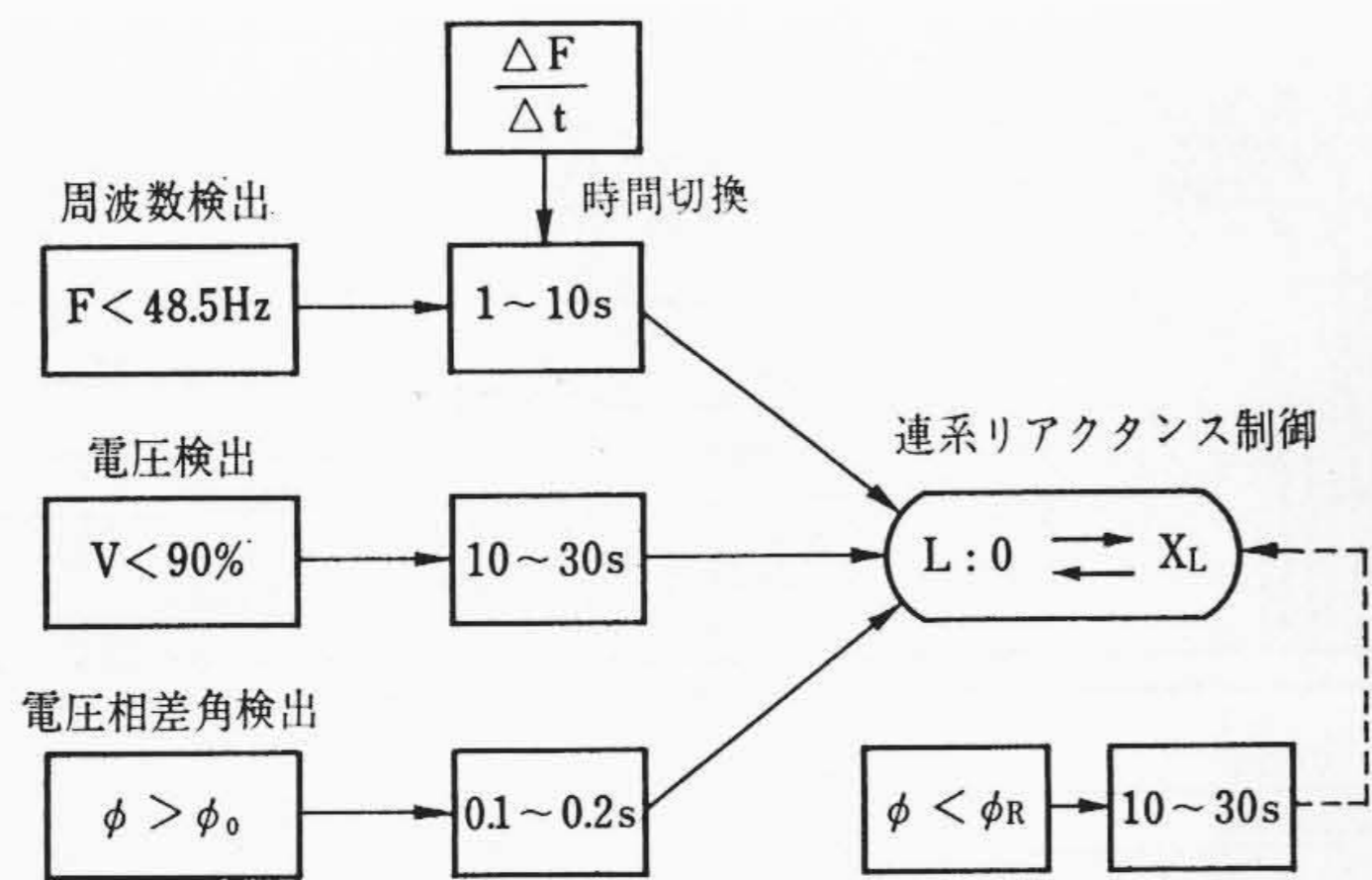


図10 連系リアクタンス制御方式説明図

この方式で、特に考慮した点は次のとおりである。

(a) 電力の大きさを検出して10~60秒の確認時間を経てから制御を行なうようにしているため、事故時などの電力動揺による不必要動作は完全に防止される。また増加時と減少時の検出値に図9に示すような差をもたせて、ハンチングなどの不安定動作を完全に防止する。

(b) 補償電圧のタップ数を少なくし(2タップ)、かつそれぞれの動作値を650 MW(ブロック系統容量の4.3%), 1,300 MW(同8.6%)としている。そのため平常運転時(融通電力はブロック系統容量の約3%以下)には動作不要となり、切換動作ひん度を減少することができる。また、タップ数を少なくしても、系統間電圧相差角をじゅうぶん小さくして自由な連系ができる。

(2) 連系リアクタンス制御

図10は連系リアクタンス制御の説明図である。すなわち、事故による電源脱落量が大きく健全ブロックからの応援電力が過大となり、健全ブロックも周波数、電圧の低下が大となって安定運転が困難になると予想される時、または事故の影響によって系統間同期はずれに至ったとき、適切な確認時間を経て連系リアクタンス制御を行なう。これら各条件がすべて回復すれば、確認時間を経て逆制御を行なう。

この方式で特に考慮した点は次のとおりである。

(a) 周波数低下による制御は、周波数が急激に低下する場合は早期に、緩慢な低下を示す場合は瞬動予備力および負荷制限による回復を期待して時間確認の後行なう系統状態に応じた方式とした。

(b) 周波数および電圧低下による制御は、系統の過渡動揺に反応しないようじゅうぶんな時間確認ののち行なう。しかし、いったん同期はずれを検出したときは直ちに復旧することは不可能であるため瞬時に制御するようにしてある。

(3) 制御動作

上記の各制御はそれぞれ検出動作条件が異なるが、これらが同時動作しないよう連系リアクタンス制御→補償電圧制御の順に優先順位を定め、上位順位の制御が行なわれているときは下位の制御は阻止されるようにしてある。また制御は図7のタップ切換器 $S\phi$ およびしゃ断器 CB_{1-4} を次のように動作させて行なう。

補償電圧制御 CB_3 切→ CB_1 入→ CB_2 切→ $S\phi$ 切換→ CB_2 入→ CB_1 切→ CB_3 入

連系リアクタンス制御 CB_4 切

4. モデルおよび系統解析による装置適用効果の検証

4.1 モデルによる模擬送電線試験結果

特殊連系装置の動作を確認するため、小形モデル装置を製作し、3.3 kV 大容量模擬送電線に設置して各種の試験を行なった。この

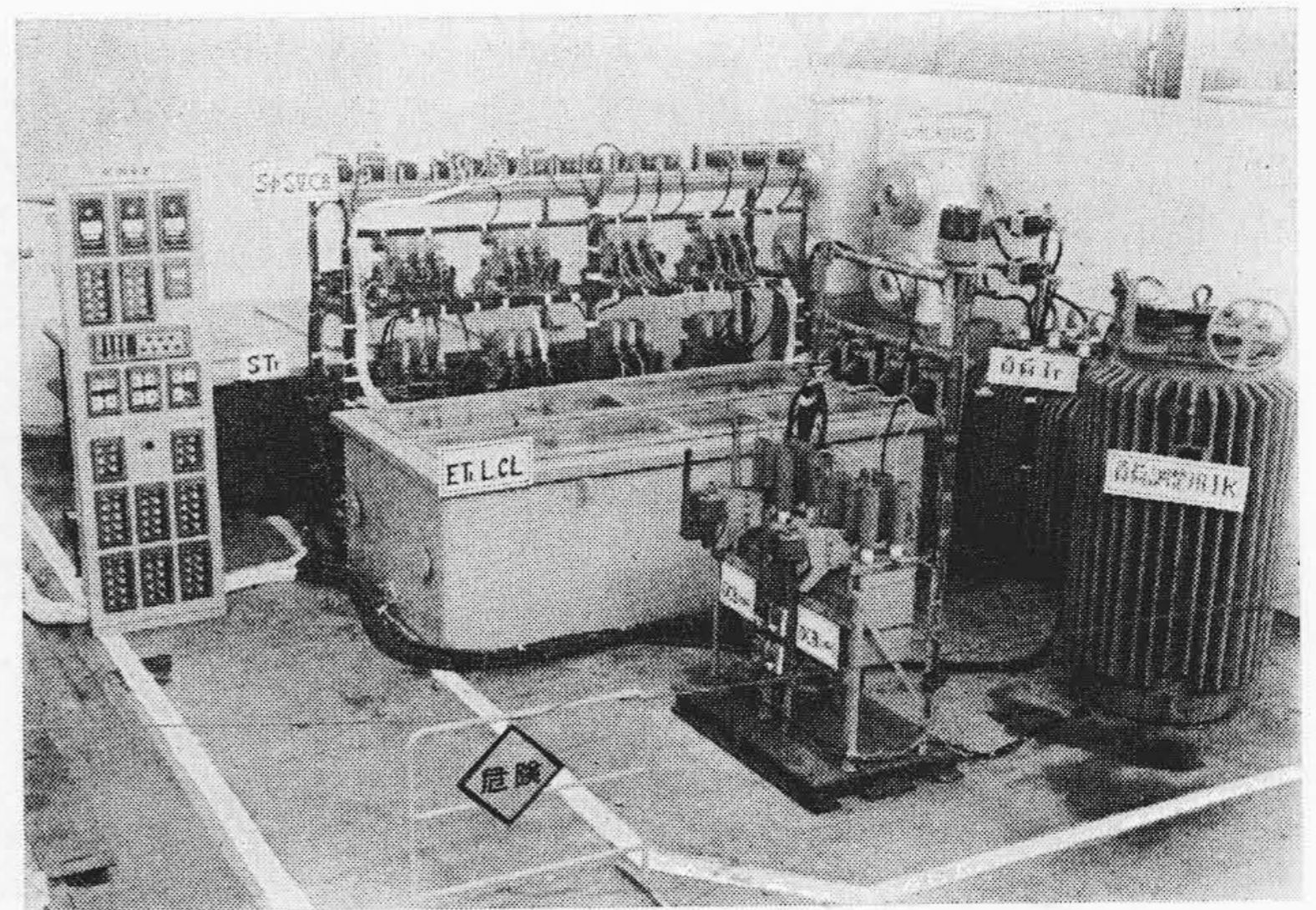


図11 モデル試験状況

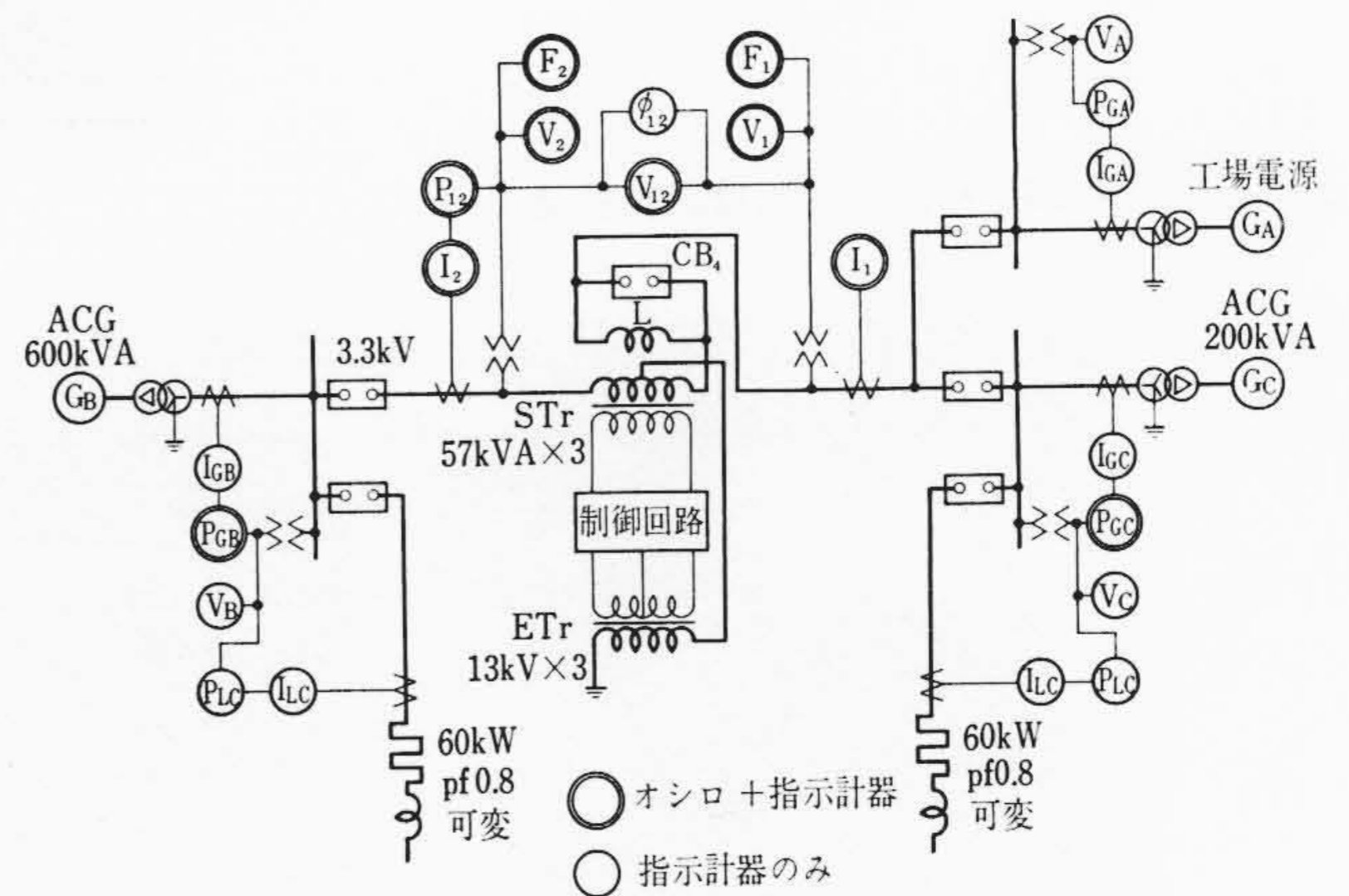


図12 モデル試験回路

試験は単なる計算では模擬困難な過渡状態における動作の実証を主眼としたものである。図11はこの試験状況を、図12は試験回路の構成を示したものである。

(1) モデル装置

変圧器類は小形モデルで、タップ切換器およびしゃ断器は高圧コンタクタを用いて模擬した。またタップ切換器としては実機相当品2極分を製作し、モデル試験および単体詳細試験を行なった。本切換器は多くの利点を有する SF_6 ガス絶縁方式とした。

さらに連系装置を3.2に述べた制御方式によって自動的に動作させるため、実機相当の制御装置を製作して使用した。本装置は検出部とシーケンス部からなり、前者は高速動作、安定性および精度の点からトランジスタ式とし、後者は電磁形補助継電器により構成した。

(2) 試験内容および試験結果

(a) 補償電圧制御試験

(i) 補償電圧制御はきわめて単純な方式となっているため動作上特に問題はなかった。事故時の連系点電力動揺に基づくハンチング動作は電力条件検出値に動作、復帰の幅(実測12%)をもたせたこと、確認時間(V_c 第1段用15秒、第2段用10秒に整定)をおいたことにより、全く問題にならなかった。

(ii) 制御結果は図13に示すようにいずれも計算値とよく一致し、所期の結果が得られた。

(b) 事故電流抑制試験

(i) 1線、2線、3線地絡および連系点をはさむ異相地絡事故に対し、連系装置を通過する事故電流は目標値どおりに抑制された。

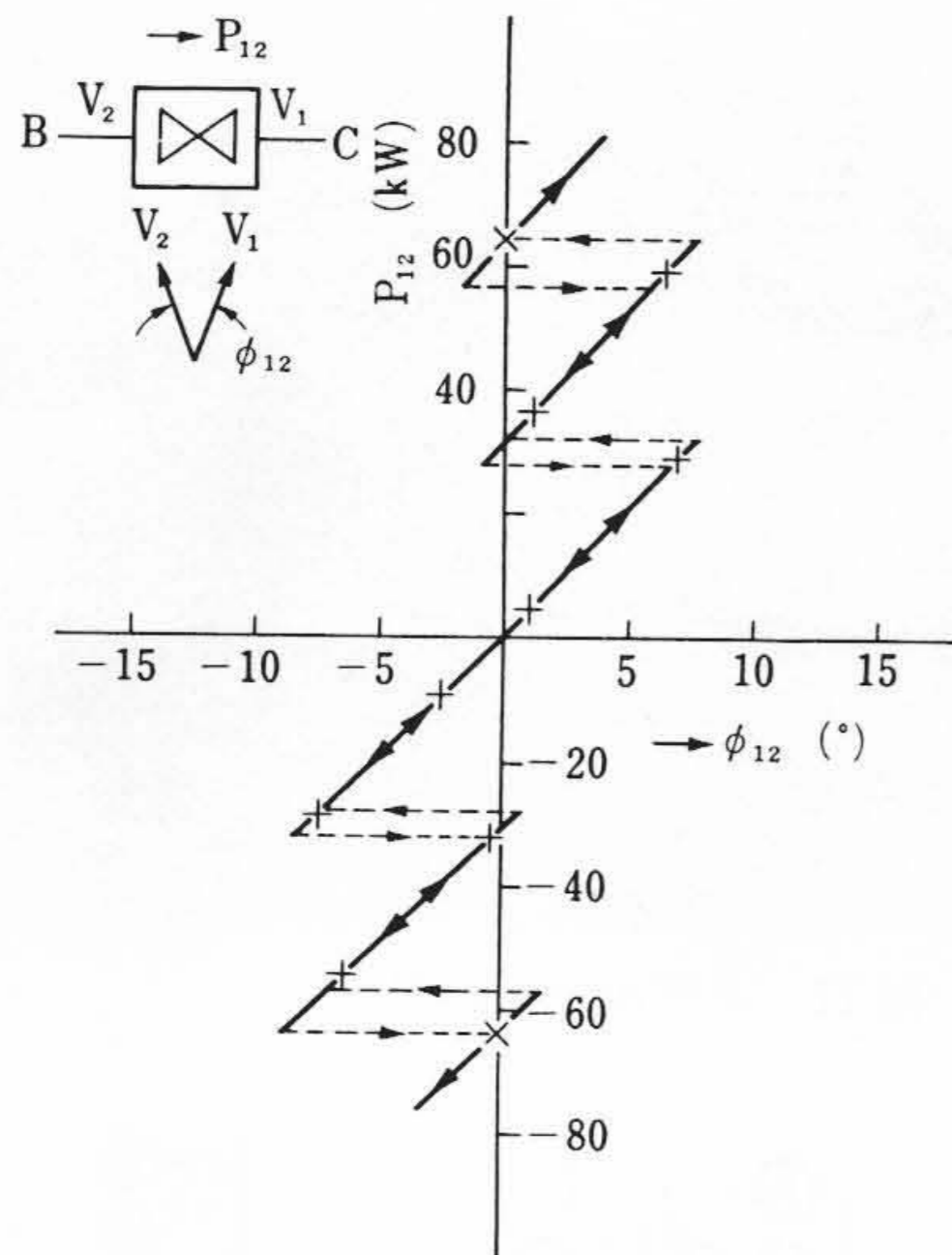


図13 補償電圧制御試験結果

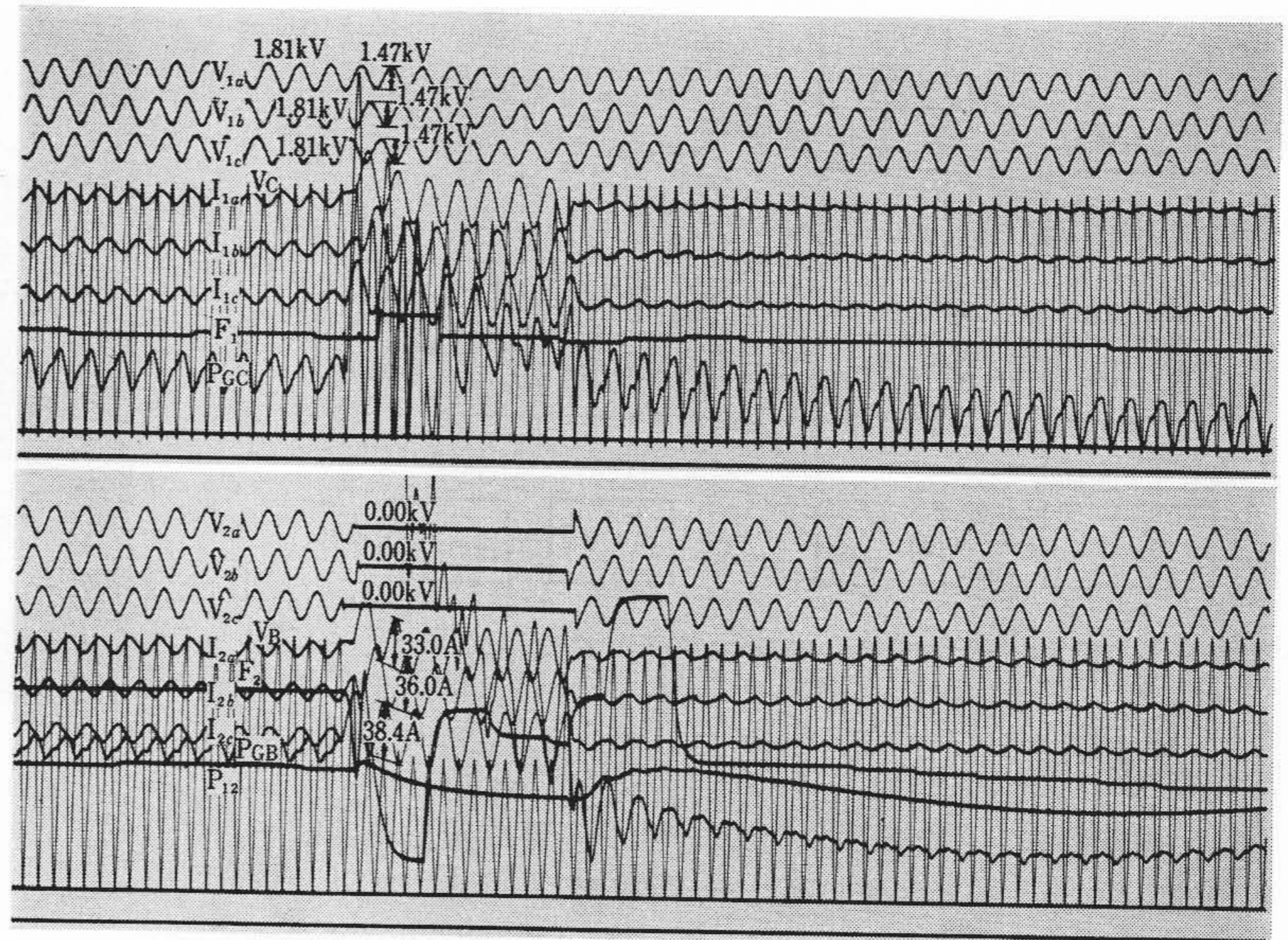


図14 事故電流抑制試験結果

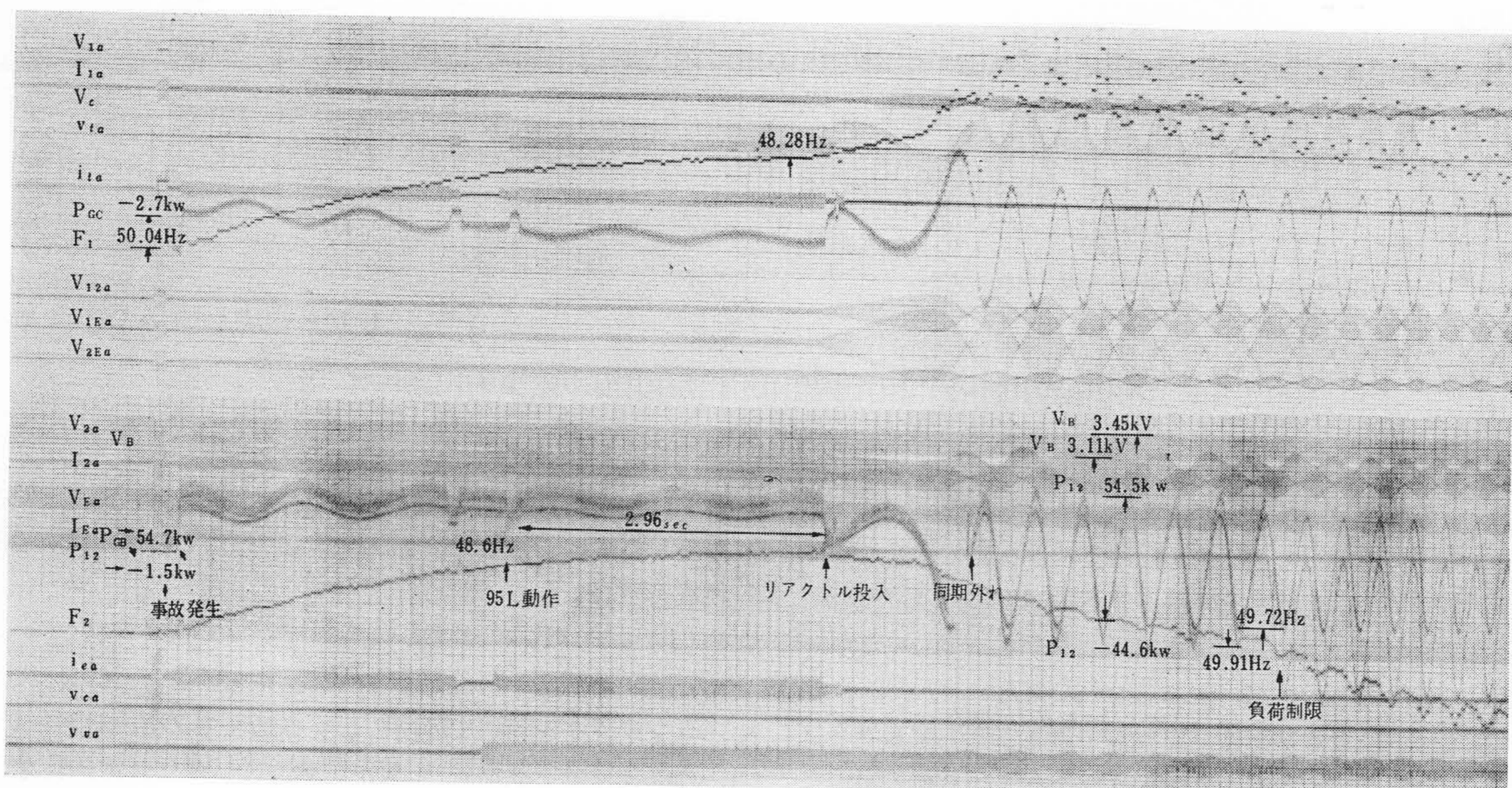


図15 連系リアクタンス制御試験結果

(ii) 補償電圧印加中の事故発生時にも事故電流値はほとんど変化なく、抑制効果に影響がないことを確認した。また過渡異常現象、事故電波形のひずみのないことも明らかになった。図14はその代表的オシログラムであり、図中 I_{1a-c} 、 I_{2a-c} が事故電流波形を示している。

(c) 連系リアクタンス制御試験

(i) 連系リアクタンス制御は周波数、電圧および系統電圧相差角の異常（同期はずれ）に応動して確実な動作を行なった。

(ii) 健全系統電圧は90%以上に保持することができ、連系点電力を目標値以下に抑制することができた。図15は代表的オシログラムの一例であり、リアクトル投入によって健全ブロック系統周波数 F_2 が回復していく様相を示している。

4.2 系統解析による装置適用効果の検証

特殊連系装置の開発にあたっては、電力系統の諸特性をじっくりと把握し最も適切なものとする必要がある。したがって特殊連系装置を設置した場合の系統特性や適用の効果を確認するため、

当初より系統解析に重点をおいて検討を進めた。検討はデジタル計算機(HITAC-5020 F)による計算を主体とし、図2に示す系統を主要対象として行なった。計算内容は短絡容量、過渡安定度、電源脱落時の過渡応動などについて数値的な検討を行なったほか、各種のパラメータの影響についても明らかにした。これらの結果の要点について次に述べる。

(1) 短絡容量

図2に示す系統各所の短絡容量は図16に示すとおりである。

(a) 最大短絡容量は45,000 MVA から30,000 MVA 以下に抑制され、特殊連系装置の効果は明らかである。

(b) 連系点を通過する最大短絡容量は連系装置がない場合22,500 MVA であるが、これが35% (8,000 MVA) 以下に抑制される。

(2) 過渡安定度

系統安定度について計算を行ない、安定限界を求めた結果は下記のとおりである。

(a) 山側水力電源(送電線200 km, 2回線)に対し図2母線 F_a 出口において3線短絡事故0.08秒しゃ断、再閉路無電圧時間0.6

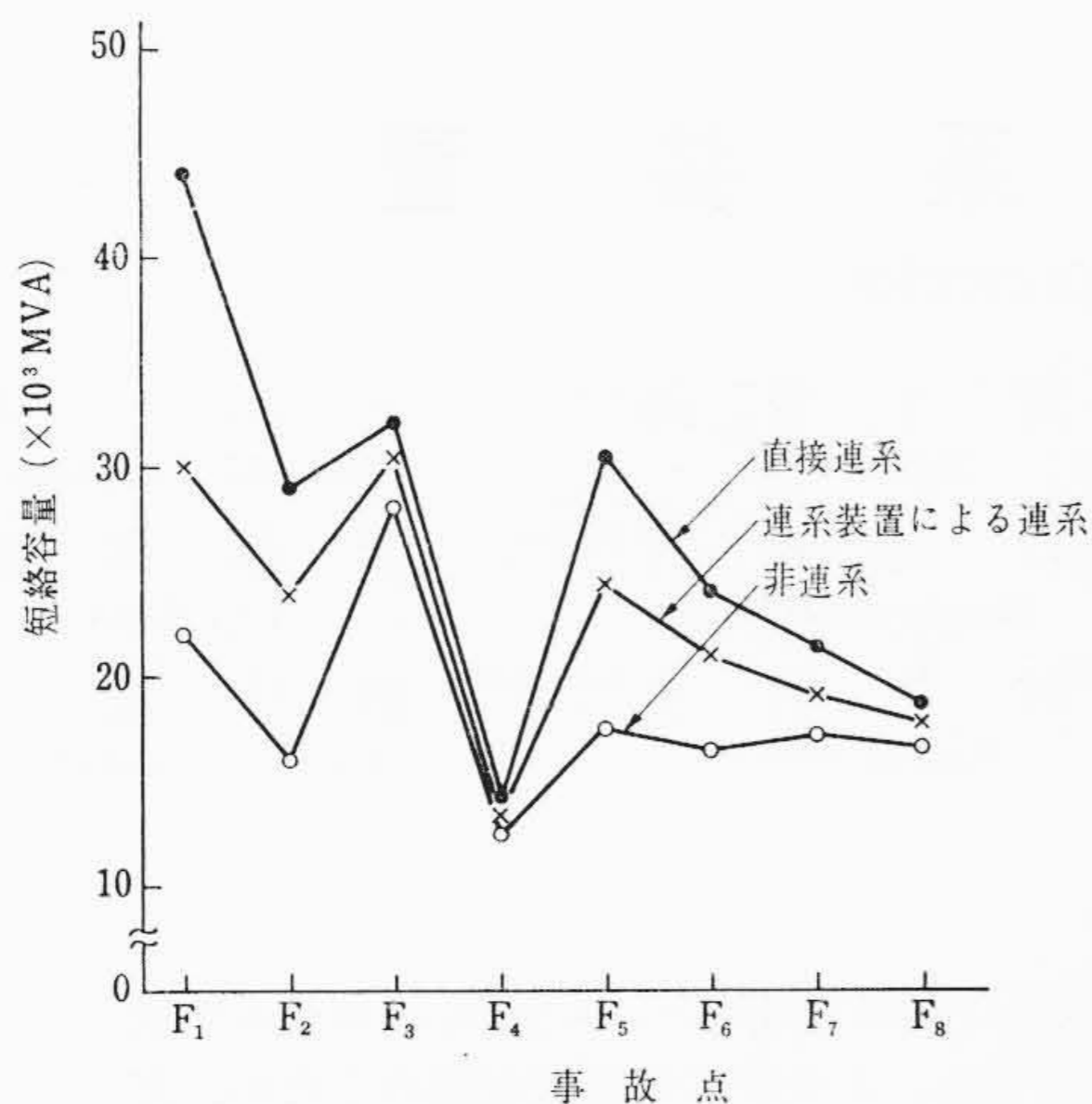


図16 短絡容量分布

秒で成功の条件で計算した結果、最大送電電力は約4,000 MWである。

(b) 里側連系装置至近端(図2母線F₆)において3線短絡事故を発生させたときの許容継続時間は約0.4秒である。

(3) 大電源脱落事故時の応動

図2の里側電源脱落時には負荷が里側に集中しているため負荷端子電圧の低下が大きく、負荷電力が減少するので周波数低下は軽減される。一方、山側電源脱落時には負荷端子電圧の変化が少ないので周波数低下が顕著である。図17は計算結果の一例であり、周波数低下を1 Hz以内にとどめるための脱落電源許容限度は3,000 MW(全系容量の10%)である。この結果から連系装置を用い同一規模の2ブロック系統を連系すれば、最大許容脱落電力は連系しない場合に比べて約2倍となり系統信頼度を大幅に向上することができる。

(4) 非同期連系と再同期

大電源脱落が発生して連系リアクタンス制御を行なったとき、健全ブロック系統の周波数変動は小さく、所期の目的を達している。この場合、電圧変動も小さく事故系統において適切な負荷制限が行なわれ、周波数が回復すれば再同期できる結果が得られた。図18は再同期の例を示したものである。

5. 結 言

以上、平常時の自由連系機能を維持しつつ、事故時の短絡容量を

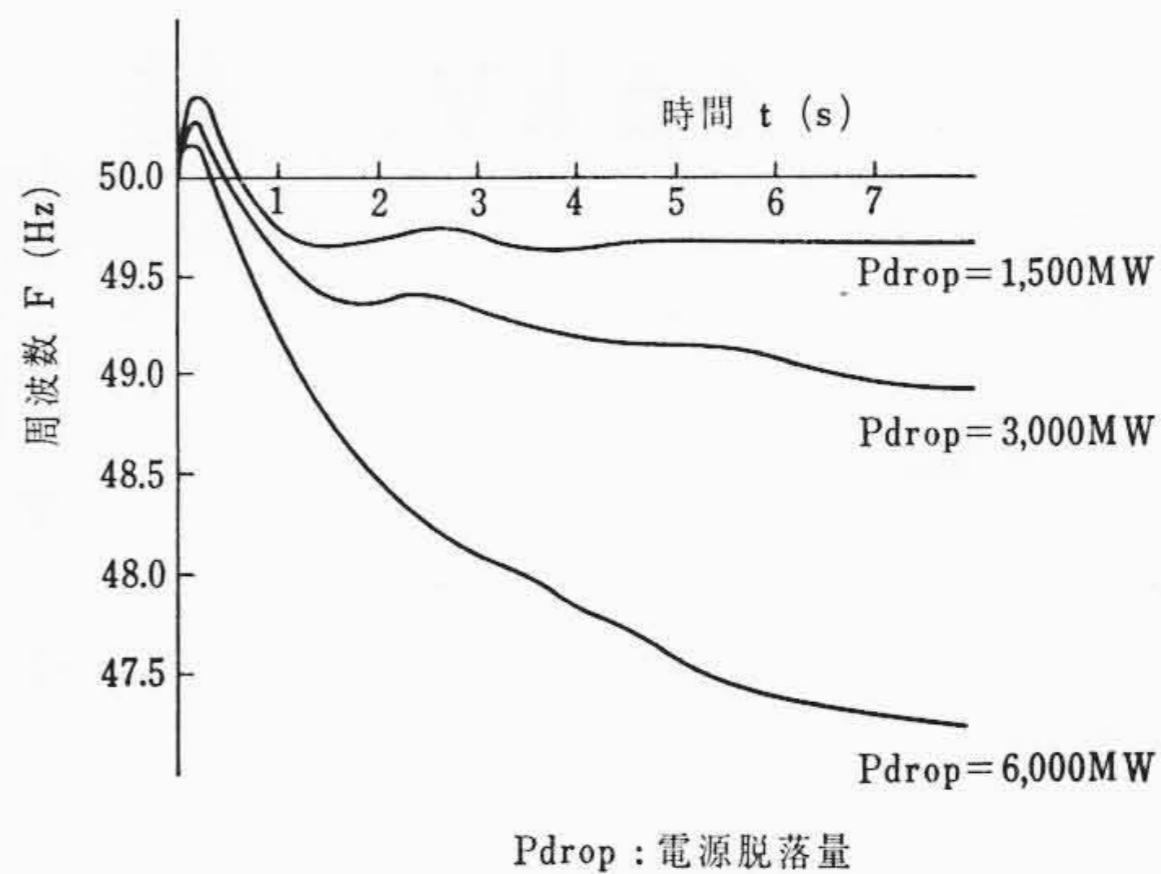


図17 山側電源脱落時の周波数変動曲線

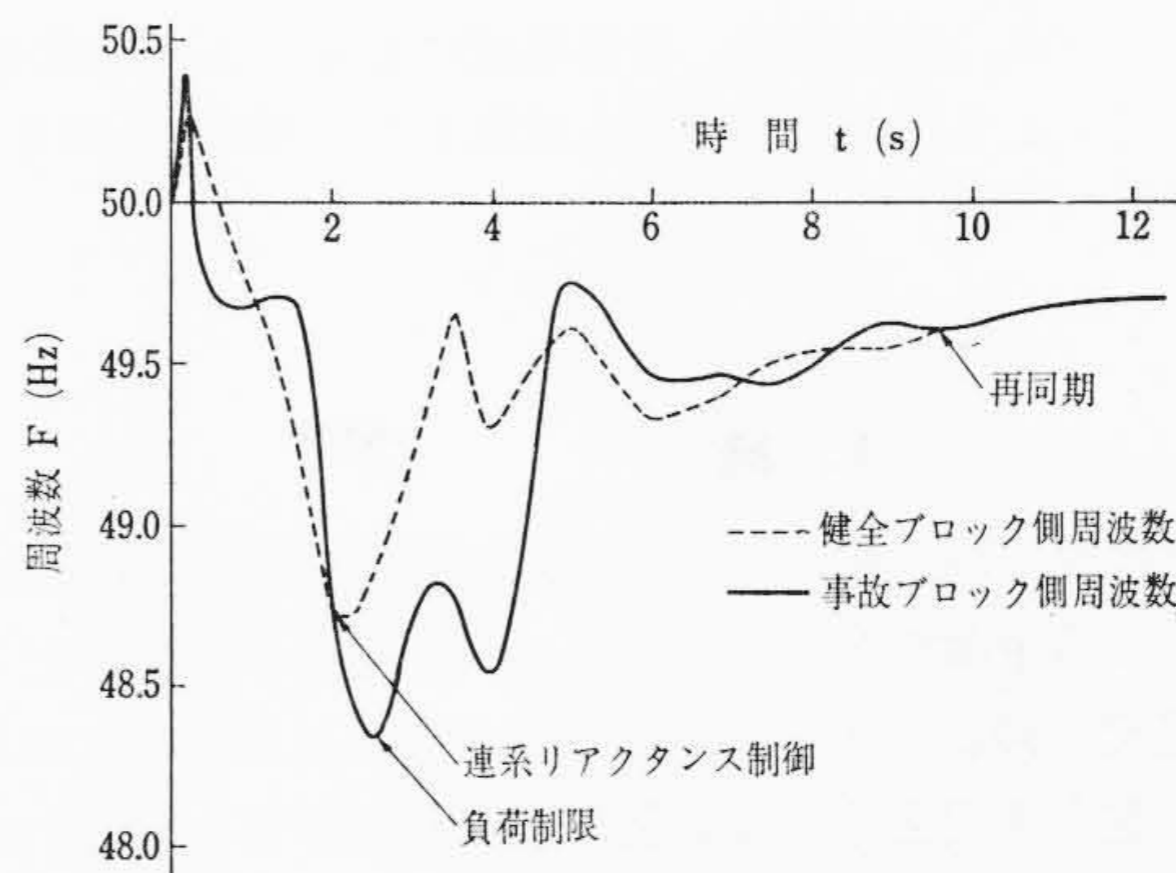


図18 再同期時の周波数変動曲線

抑制し、大停電事故の発生を防止する特殊連系装置の方式について検討した結果を述べた。本装置は将来ブロック系統間の連系および局所的な事故電流抑制や潮流制御を行なうために適用され、その機能をじゅうぶん発揮して系統信頼度の向上に役だつものとする。

本研究結果をもとに、500 kV用を最終目標として、とりあえず、66 kV実規模装置を製作し、目下実フィールドにおいて実用性能試験中である。

以上の研究を行なうにあたり、終始ご指導いただいた関係者各位に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 電気協同研究 第23巻4号 「短絡容量増大に対する実用対策」