制御用電子計算機による電力系統事故後自動操作

Automatic Operation of Power System with Control Computer

尾 出 和 也*
Kazuya Ode

鈴木英行**
Hideyuki Suzuki

城 条 雄 征**
Katsuyuki Jôjô

金 丸 嘉 幸**
Yoshiyuki Kanemaru

奥 田 健 三***
Kenzô Okuda

後 藤 益 雄**** Masuo Gotô

要旨

電力系統操作の自動化の一環として,事故波及防止を主目的とする需給対策や,送変電設備の過負荷対策を行なうオンライン事故後自動操作プログラムを開発した。さらに「電力系統シミュレータ」を用いて実験を行ない本プログラムによる手法が所期の目的を満足し、実運用にも適用し得ることを確認した。本文ではこれらの対策手法、プログラムの概要および「電力系統シミュレータ」による実験結果についてその概要を述べている。

1. 緒 言

電力系統に事故が発生した場合適切な継電方式によって、事故点の切り放しを行ない、事故後数秒間にわたる系統の過渡安定度が保たれれば系統全体の安定運転が継続できるという従来の考え方は最近の電力系統には必ずしもあてはまらなくなってきた。すなわち系統連系による系統容量の巨大化、系統構成の複雑化、発電機単機容量の増大などから第1次の事故のために、第2次、第3次的な事故を引き起こす、いわゆる事故波及の問題が発生してきたためである。この波及事故は最悪の場合には全系崩壊を引き起こす危険性すらもっている。たとえば大容量電源の脱落による系統周波数の異常変動や送電線の過負荷により縦続的に次々としゃ断されるという事故は波及事故の代表的例である。この種の波及事故の防止には事故後の系統状態を正確には握し、適切な判断と迅速な操作が要求されるが、これら一連の判断、操作をすべて人間の力に待つことはきわめて困難である。このため関係各所において計算機を用いた総合的判断により事故の波及を防止する場合の各種方式の検討がなされている。

本文では上記の目的に沿って電力中央研究所と日立製作所が共同で開発したオンライン事故後自動操作プログラム (System Emergency Operation: SEO) の概要および「電力系統シミュレータ」を用いて行なった SEO プログラムによる事故波及防止の実験結果についてその概要を述べる。

2. SEO プログラムによる事故波及防止対策

2.1 需 給 対 策

事故により発電力が脱落して系統内の需給バランスが破れたり、 送電線のしゃ断に伴って系統がいくつかの分離系統に分断されて各 分離系統内での需給バランスがくずれると各分離系統の周波数が変 動する。この系統周波数の変動は特に新鋭火力に悪影響を与えるの で、できるだけ早く系統周波数の回復、すなわち系統内の負荷と発 電力の需給バランスを回復する必要がある。また需給対策としての 発電機出力の増減方式には電力会社の運用方針とも関係して、種々 の方式が考えられるが今回開発したプログラムでは次のような方針 で発電機出力を決定することにした。

(1) 発電力不足のとき

発電機容量の大きい順に出力を増加する。全発電機を上限値まで増加してもなお発電力が不足しているときはその不足発電力を ΔP として系統周波数変動 Δf を (1)式により算出し、 Δf が規定

値内ならば発電力の不足分は負荷の周波数特性に依存させる。

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K}$$
 (Hz)(1)

ここに、*JP*: 電力過不足量 (%MW) *K*: 系 統 定 数 (%MW/Hz)

(2) 発電力過剰のとき

発電機容量の小さい順に出力を減少させる。全発電機を下限値まで減少してもなお発電力が余っているときは系統周波数 Δf を (1)式により算出し、 Δf が規定値内ならば発電力の過剰分を負荷の周波数特性に依存させる。

2.2 過負荷対策

送電線の過負荷は次のような点で系統に大きな影響を及ぼす。

- (i) 送電線の焼鈍、ディップの増大による異回線混触のおそれ
- (ii) 多回線送電線またはループ系統において過負荷検出継電器 による縦続的なトリップ。

このうち(i)についてはいずれも送電線の温度上昇によるものであり、時間的に数分以内に対策を施せば良いが、(ii)については過負荷検出継電器の整定時限とも関連し時間的には数秒~数十秒以内の操作が要求される。そのため次に述べるような過負荷解消論理によって過負荷を解消する計算を行なう。SEO プログラムの中核をなす過負荷解消論理は直流マトリックス法潮流計算に基づくものでその論理の特長は次のとおりである。(詳細については文献(1)参照)

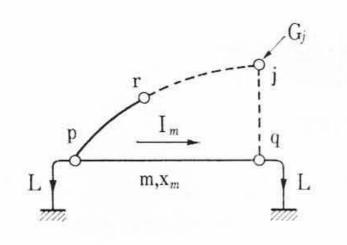
- (1) 本論理で用いるインピーダンスマトリックス(以下[Z]と記す)は線路の抵抗分を無視したリアクタンス・マトリックスで従来の方法と異なっている点は負荷(負荷インピーダンスとしては需用電力に逆比例したリアクタンスを用いる)をマトリックスに含めた点である。
- (2) 負荷を含んだ[Z]を用いることにより潮流計算ではスイングノードが不要となり、過負荷解消効果指数の計算が有意となり、また系統分離時の[Z]の修正計算が可能となる。
- (3) 系統分離の判別と分離状態のは握は事故状況に応じて修正された [Z] を使用してきわめて簡便に行なっている。この方法は [Z] の性質として異系統間の [Z] 要素がゼロ (実際は計算機の丸め誤差などによりきわめて小さな値となる)となることを利用した方法である。
- (4) 本論理の中核をなす過負荷解消対策の基本的な考え方は過 負荷が生じた場合その抑制のために最も効果のある設備を操作し て過負荷を解消しようとするものである。その手法の大要を示す と次のとおりである。
- (i) 過負荷解消用設備としては発電機を主体として考え、この

^{*} 電力中央研究所 工学博士

^{**} 電力中央研究所

^{***} 日立製作所日立研究所 工学博士

^{*****} 日立製作所日立研究所



p,q,r,j はノードの番号 m はブランチの番号 x_m , I_m はブランチインピーダンス, および ブランチを流れる電流

日

図1 直流ネットワーク

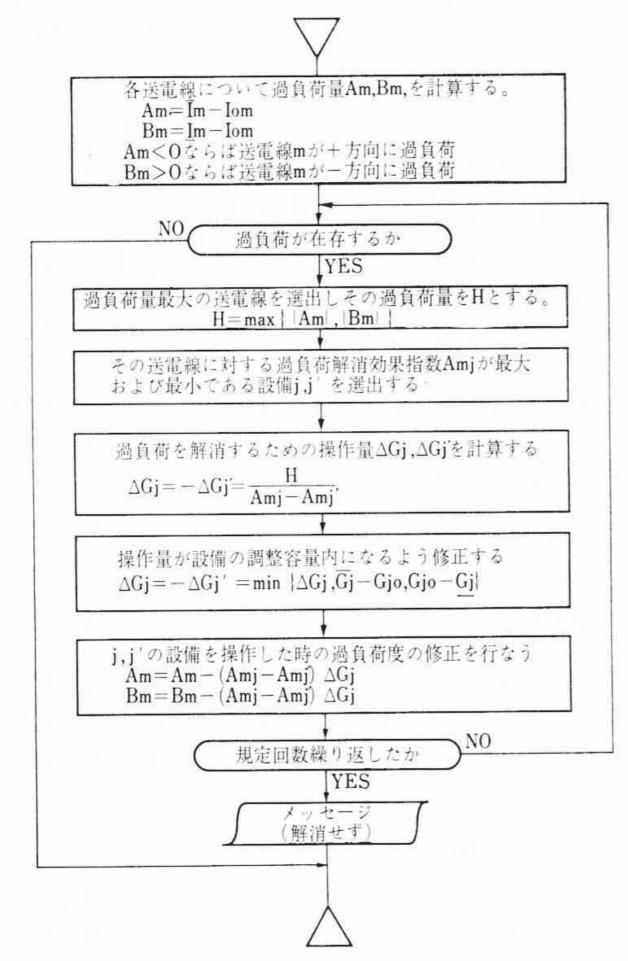


図2 過負荷解消計算フロー図

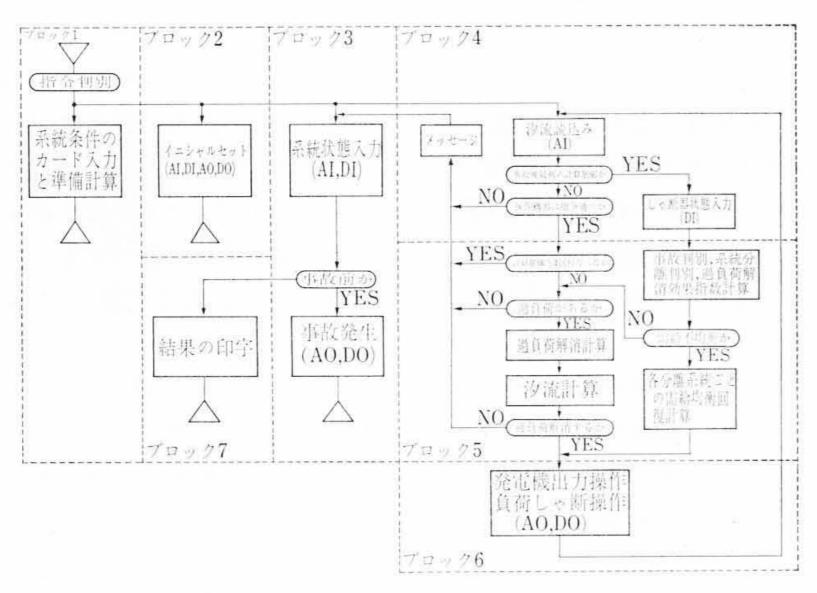


図3 SEOプログラム概略フロー図

ほか、他系統からの融通、負荷なども考慮している。

(ii) 過負荷解消効果の程度を表わすために過負荷解消効果指数なる値を採用する。この指数は過負荷解消設備jを単位量操作したとき,送変電設備mに対する過負荷解消効果の関係を示す係数で次のように[Z]から誘導し, A_{mi} なる記号で表わす。

すなわち図1に示す送電線mの電流 I_m は、

$$I_m = \frac{\sum\limits_{j} (X_{pj} - X_{qj}) \cdot G_j}{x_m} \qquad \dots (2)$$

ここに、p,q: 送電線mの始端ノード、終端ノード

xm: 送電線 m のリアクタンス

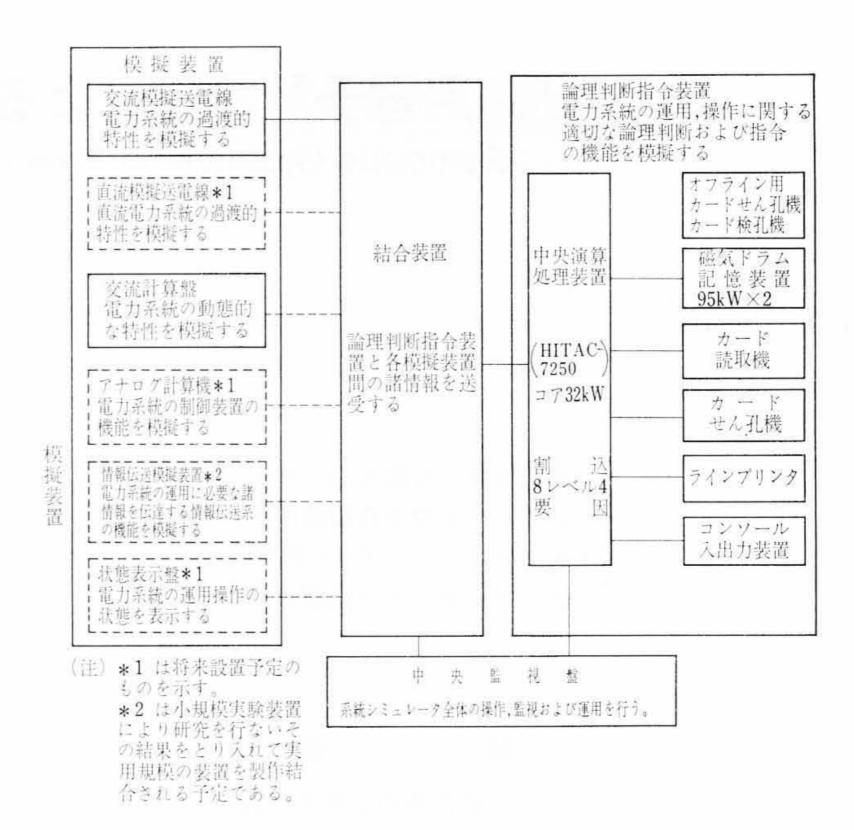


図4 電力系統シミュータの構成

表1 計 算 規 模

規	模	内	Ź	ř	動的交流計算盤	交流模 擬 送電線設備
,	-	۴-	総	数	46	46
ブラ	ン	チ	総	数	55	55
発	電	栈	×	数	23	3
負	1	苘		数	16	2
発電機	と 十 負	荷娄	なのり	最大	24	5
分	維	系	統	数	5	5
送 電	線事	故	多]	直 度	5	5
発 電	機事	故	多	重 度	3	3
需	給	文	ţ	策	1	1
過	負 石	苛	対	策	2	2

 G_{j} : ノードjにつながる発電機出力

 X_{pj}, X_{qj} : [Z]の要素 (負荷 L を含む)

で表わされる。

今(2)式において特定のjに対する G_i を ΔG_i だけ変化させたときの I_m の変化量を ΔI_m とすれば、

$$A_{mj} \equiv \frac{\Delta I_m}{\Delta G_j} = \frac{X_{pj} - X_{qj}}{x_m} \dots (3)$$

となり A_{mj} は [Z] および送電線のリアクタンスから算出できる。

(iii) 過負荷解消のための計算法としては次の連立不等式を満足 するように繰り返し計算を行なう。

ここに, I_m , I_m , I_m , I_m : 送変電設備 m の潮流, 初期潮流, 潮流上下限値

Amj: 過負荷解消効果指数

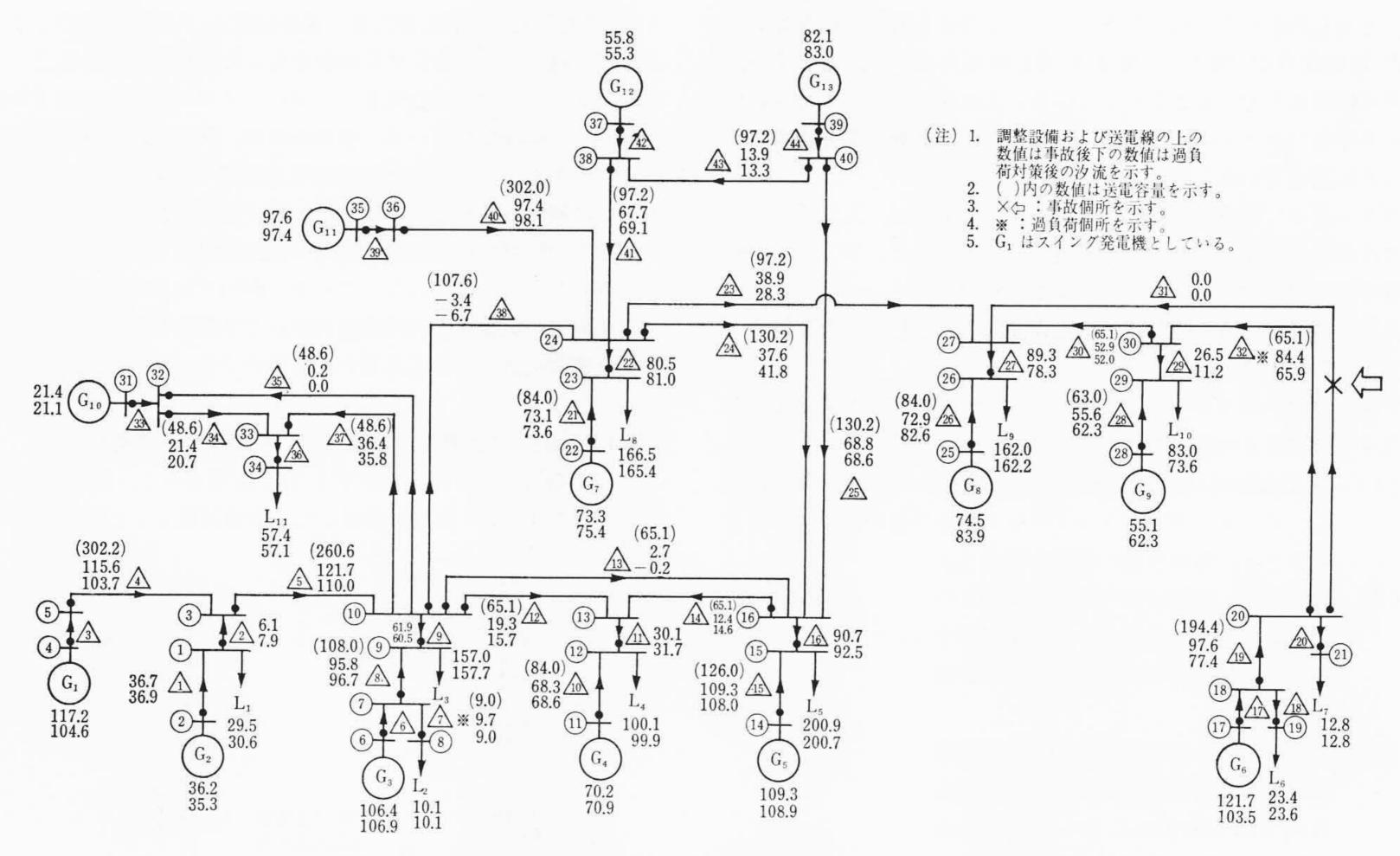
 ΔG_i : 過負荷解消設備jの操作による電力変

化量

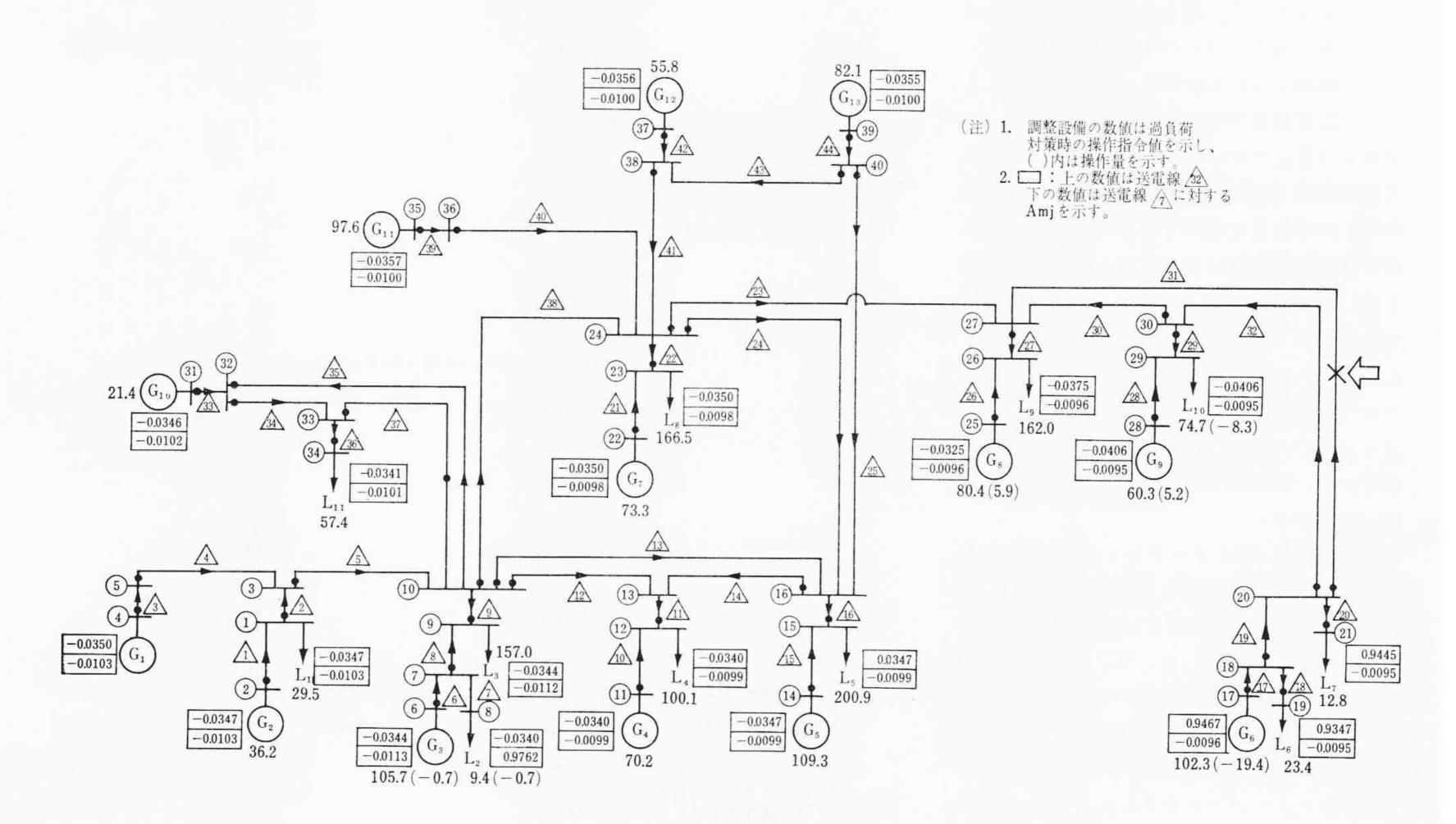
図2は繰り返し計算の手順を示したものである。

3. プログラムの概要

上で述べた論理によって系統制御を行なった場合の系統の応動状態については従来オフライン計算によって研究されてきたが⁽¹⁾,この論理を実系統に適用した場合の問題点をより詳細に検討するため従来のオフラインプログラムを基にして新たにオンラインSEOプログラムを開発した。今回開発したプログラムは「電力系統シミュ



(a) 事故後,対策後の汐流 (汐流は1,000MVA基準の%値で示す)



(b) 対策計算結果 (操作指命値は1,000 MVA基準の%値で示す)

図5 交流計算盤との結合運転における実験結果

レータ」を対象にしたもので図3はSEOプログラムの概略フローを示したものである。プログラムを機能別にみれば次の7ブロックに分けることができる。

ブロック1:系統条件をカード入力し、インピーダンスマトリックスなどの準備計算を行ない、必要に応じて各種データをコア、またはドラムのデータエリアに格納する。

ブロック 2: 制御機器 (発電機出力制御装置, しゃ断器) を単独運転から計算機制御運転に切換える際に系統にじょう乱を与えないように計算機に初期値をセットする部分である。

ブロック3:本ブロックにおける系統状態入力は事故前および計算制御終了後に行なわれるもので、前者は系統状態を常時サンプリングすることを模擬しており、後者は計算制御結果を検討する

日

ことを目的としている。したがってここでは各電気所の有効電力 P, 無効電力 Q, 電圧 V, 電流 I, 電圧位相角 θ_V , 送電線の P, Q, V の情報を入力するようにしている。またあらかじめ入力されている事故パターンに従って系統に事故を発生させる部分を本ブロックに設けている。

ブロック 4: 事故後の系統状態を入力する部分で,入力情報としては直接計算制御に必要な発変電所,送電線のP,およびしゃ断器の状態を入力する。また端末機器の動作をチェックする意味で入力前に操作指令を出しているときは入力値と指令値を比較するようにしている。

ブロック 5: 本ブロックは SEO プログラムの計算部分の中心をなすもので計算内容から次の三つの部分に分けることができる。

- (i) 事故状況のは握,事故前後の系統状態から事故状態をは握し,インピーダンス・マトリックスその他の諸元を修正するとともに系統分離の判別を行なう。
- (ii) 需給対策,系統分離や電源脱落などの 事故においては需給バランスを回復す るよう発電調整または負荷制限の計算 を行なう。
- (iii) 過負荷対策,過負荷度の最大な送電線 から過負荷解消計算を実施し(規定回 数内で解が収れんしない場合も含めて)計算結果に基づいて潮流計算を行ない過負荷が解消されるかどうかをチェックする。過負荷が解消する場合は次のステップ(ブロック6)に移るが,解消しないときはメッセージを出して計算制御を中止する。

ブロック6: ブロック5の計算結果に基づいて制御機器(発電機出力制御装置,しゃ断器)に対し操作信号を送出する。なお第2回目以後の計算制御(SEOプログラムでは需給対策1回,過負荷対策2回)に対しては操作機器の動作が終了してから情報を入力する必要があるので入力時点はこのブロックでコントロールするようにしている。

ブロック7: 計算制御終了時に計算に用いた 諸データ, 諸情報および計算結果を整理, 編 集し印字する。

今回開発した SEO プログラムはほかの自動 給電用プログラム (VQC:電圧無効電力制御, ELD:経済負荷配分計算など)と多重処理を行な えるよう考慮して作成している。このため SEO プログラムの占有する計算機のコアメモリを約 4K 語に制限しているが、SEO プログラム全体 の長さは約 34K 語あるため プログラムの構成 を 16 個のチェーンプログラムに分割してコアメモリの占有語数 4K 語内で処理できるようにしている。なおそのほかドラムメモリに約 12K 語,コアメモリに 90 語のデータエリヤを使用している。表 1 は今回開発した SEO プログラムで扱える計算規模を示したものである。

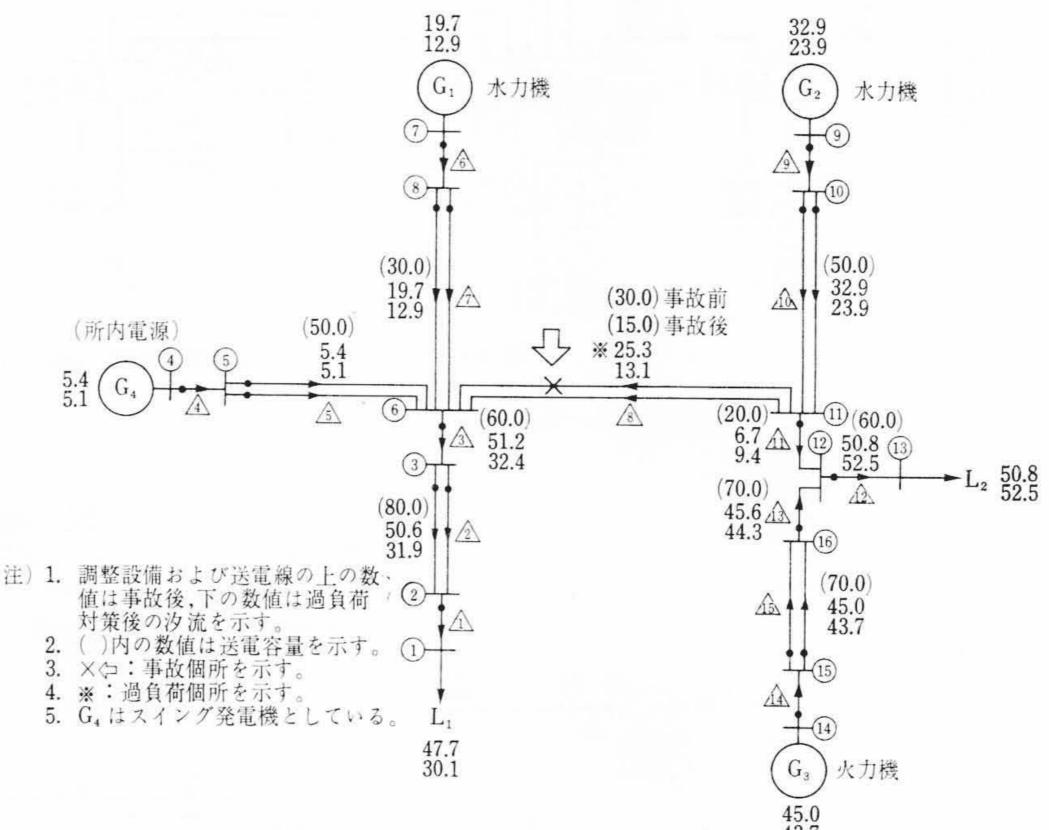
電力系統シミュレータ による実証実験⁽⁴⁾

「電力系統シミュレータ」(2)(3)は図4に示すよ

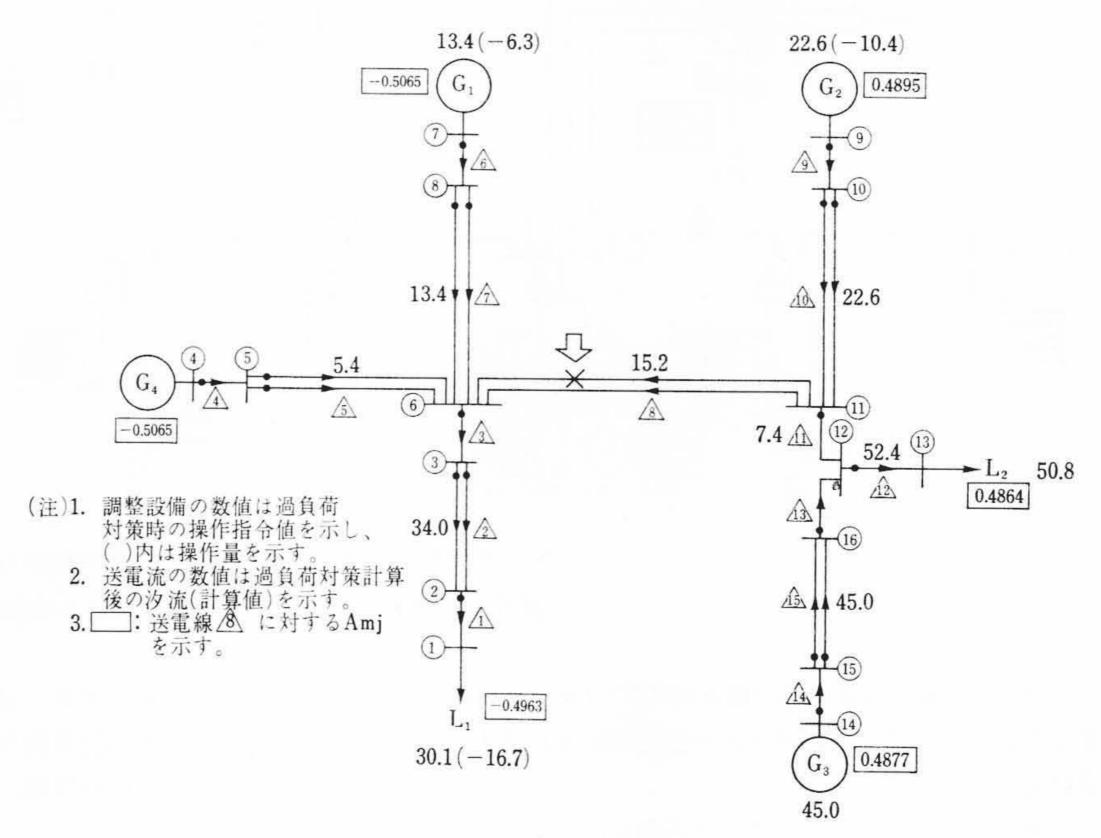
うに、電力系統の機能を持たせた模擬装置と、人間の頭脳のように電力系統の運用操作を決定する機能をもった論理判断指令装置、これら両者を結びつける結合装置ならびにシステム全体を監視する中央監視盤から構成されている。模擬装置は、動的交流計算盤と交流模擬送電線からなっているが前者は電力系統の動的特性を、後者は電力系統の過渡特性をより実際に近い形で模擬したもので、研究対象に応じて論理判断指令装置と動的交流計算盤または交流模擬送電線と結合運転できるようになっている。SEOプログラムによる事故波及防止対策の実証実験では論理判断指令装置と動的交流計算盤および交流模擬送電線とを組み合わせて動的特性および過渡特性を検討した。

4.1 動的交流計算盤との結合運転における実証実験

モデル系統は図 5 (a)に示すように 13 機系とし、超高圧 275 kV 系統および 154 kV 系統を模擬した。調整設備としては発電機 10~



(a) 事故後,対策後の汐流(汐流は50kVA基準の%値で示す)



(b) 対策計算結果 (汐流は50kVA基準の%値で示す)

図6 交流模擬送電線との結合運転における実験結果

12 台および負荷 11 個所とし、 G_1 はスイング発電機である。また 系統分離事故に対してはあらかじめ各分離系統に1機のスイング 発電機を設けこれらは調整対象外とした。このようなモデル系統を 用いて送電線事故(系統分離を伴なわない)2ケース,送電線事故 (系統分離を伴なう)6ケース,発電機事故3ケースの計11ケースの 事故に対する事故波及防止を目的とした計算制御の実験を行なっ た。実験結果から線路事故のみならず系統分離を生じるような事故 ならびに発電機事故をも含めた事故パターンに対して、SEO プログ ラムによる需給対策および過負荷対策が所期の目的を満足すること を確認した。次に実験結果の1例をとりあげその対策内容について 述べる。ここでとりあげた事故ケースは図5(a)において送電線& がしゃ断されたケースである。図5(a)は事故後および対策後の潮 流を示し、図5(b)は対策計算結果および調整設備に対する操作指 令値を示している。事故状況,対策内容は次のとおりである。送電線 金が事故によりしゃ断されたために、この送電線の事故前の潮流が 送電線金に重畳されて19.3%の過負荷となった(過負荷量は上下限 値を越えた量を1,000 MW 基準%電力表示した)。また負荷フィーダ に対する対策を検討するためあらかじめ負荷フィーダ事故を想定し ている変圧器止は 0.7% 過負荷となっている。 送電線 & についての 過負荷対策としては、この送電線に対する過負荷解消効果指数 Ami が最大である G_6 の発電機出力を 19.4% 絞り、電給バランスを考慮 しているため A_{mj} の小さい順に G_9 , G_8 の出力を上限値まで, それぞ 1.5.2%, 5.9% 増加し、 L_{10} の負荷電力を8.3% 制限している。この 計算結果に基づいて調整設備を操作した後の潮流は図5(b)に示す ようになり送電線風には0.8%の過負荷が残っているが許容値(送 電容量の5%とした)以下の過負荷量であるので過負荷は解消した とみなし以後の対策は行なっていない。また人の負荷フィーダにつ いての過負荷対策は A_{mj} が最大である L_2 の負荷電力,および A_{mj} が最小である G_3 の出力をそれぞれ 0.7% ずつ減少して、過負荷を解 消している。以上のように第1回目の過負荷対策において2個所の 過負荷とも解消し計算制御を終了している。

4.2 交流模擬送電線との結合運転における実証実験

モデル系統は図6(a)に示すように水力発電機2機,火力発電機 1機ならびに無限大母線(所内電源)を合わせた4機系で、送電線路 は超高圧 275 kV (模擬系統では 3,000 V) 系統および 154 kV (同 1,500 V) 系統を模擬した。調整設備としては発電機 3 台負荷 2 個所 とし、無限大母線はスイング発電機として取り扱った。交流模擬送 電線との結合運転では送電線事故4ケース,発電機事故3ケースの 実験を行ない良好な結果を得た。実験結果の1例についてその対策 の概要を述べる。ここでとりあげた事故ケースは図6(a)において 送電線&が2回線のうち1回線がしゃ断されたケースである。図6 (a)は事故後および対策後の潮流を示し、図6(b)は対策計算結果 および調整設備に対する操作指令値を示している。事故状況および 対策内容は次のとおりである。超高圧系連絡送電線&の1回線が事 故によりしゃ断され、残る1回線が10.3%の過負荷となり(過負荷量 は上下限値を越えた量を 50 kW 基準%電力表示した), これを解消 するため A_{mj} が最大である G_2 の出力を 10.4% 絞り、 需給バランス をとるため A_{mj} が最小である G_1 の出力を同量だけ増加することに なるが、G1の出力は30.1%となって上限値(28.0%)を2.1%越え るので、 G_1 の次に A_{m_i} が小さい L_1 の負荷を選択して、2.1% だけ 負荷制限を行なうことになる。しかし交流模擬送電線設備での負荷 制限は実系統と同様にしゃ断器によりフィーダごとの負荷をしゃ断 する方法をとっており、しゃ断負荷量は連続的とならず、計算値に等 しい負荷量をしゃ断できない場合がある。この場合は需給バランス をとるために再度発電調整の計算を行なう必要が生じる。このよう な理由から L_1 の負荷制限量は計算値の2.1%より大きくなり16.7%

の負荷をしゃ断することになり、この過剰負荷しゃ断量 (14.6%) は G_1 の出力を減少することにより需給 バランスを とっている。 した がって G_1 の最終的な操作指令値は 13.4% となりその操作量は -6.3% となる。このような操作を行なうことにより送電線 & の過負荷を 解消している。なお、負荷しゃ断量が計算値よりかなり大きくなっているが今回の実験では実験設備の都合上、負荷しゃ断の量を 2 段階に区分したためで、区分数を増加することによりこのような現象 はさけられる。

4.3 検 討

以上「電力系統シミュレータ」を用いてSEOプログラムによる事故波及防止を主目的とする計算制御の実験を行なった結果,動的交流計算盤との結合運転では実系統規模に対しても実用上問題のない程度の計算精度が得られ各種操作が所期の目的を満足することをたしかめた。また模擬送電線との結合運転では制御装置,動作などを実系統のそれに近い形で模擬し各種操作がじゅうぶん実運用にも適用し得ることを確認した。なお紙面の都合で割愛したが一連の実験ケースのうちにはプログラムの次の部分を改良すれば、いっそう実運用に即すると思われるケースがあった。

- (i) 需給対策および過負荷対策計算における調整設備の選定方法
- (ii) 系統分離時の過負荷対策計算における調整設備の選定方法
- (iii) 需給対策後の処理方法

次の計算処理時間についてはたとえば選択呼出計測,計算過程, および結果の印字などシミュレータ特有の計算ならびに動作がふく まれており実運用における時間より長くなっている。計算部のみの 処理時間については事故判別,事故後の諸元の修正計算,ならびに A_{mj} の計算をも含めた需給対策計算部で約15秒,また過負荷対策計 算で約15秒であった。なお今回のプログラムで計算途上の処理状 況を監視できるよう各部における処理内容をコンソールタイプライ タに印字するようにしており,上記の計算時間にはこれらの印字に 要する時間が含まれている。実運用において,これらの処理内容を たとえばブラウン管表示装置に出力するようにすれば,計算処理時 間はさらに短くなり10秒以内に処理できるものと思われる。

5. 結 言

以上電力系統に事故が発生した後の操作として事故波及防止の観点から系統内の需給対策および送変電設備の過負荷対策をとりあげその対策手法を示すとともに、本手法に基づき開発したオンラインSEOプログラムの概要を述べた。さらに「電力系統シミュレータ」を用いたオンライン制御の実験によりこれらの手法がじゅうぶん実系統にも適用し得ることを示した。

今後 4.3 で述べた問題点を解決しさらに発電機の応動特性や負荷の優先順位などを考慮し、いっそう実運用に即したものにしたいと考えている。

終わりに臨み,本研究を進めるにあたり種々ご指導をいただいた 電力中央研究所梅津部当任,中島室長,小宮主査研究員に対し深甚 の謝意を表するとともに,ご激励いただいた日立製作所日立研究所 小林副所長,高林部長,同国分工場三田部長,広吉部長,中野主任 技師に対し衷心よりお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 鈴木,尾出:「事故後自動操作論理に関する研究」技研報告 No. 66032 (昭 41)
- (2) 自動給電研究委員会: 「基礎研究用系統シミュレータの仕様 に関する調査研究」 技研報告 No.66081 (昭41)
- (3) 梅津,三田,中野:「電力系統シミュレータ」 日立評論 Vol. 51, 159 (昭 44-2)
- (4) 城条,金丸,鈴木,後藤:「系統シミュレータによる事故後自動操作に関する研究」 技研報告 No. 68092 (昭 44)