

# ループ投入による過負荷解消を考慮した 事故時自動復旧操作手法\*

奈良 宏 一\*\*

山城 迪\*\*

(昭和 53 年 4 月 28 日受理)

## Power Systems Automatic Restorative Operation with Over-load Removal Based on the Loop Closing

by Koichi NARA and Susumu YAMASHIRO

In a power system, it is essential to restore the system as quickly as possible, when it is broken by a fault. So, it is desired that the automatic restorative operation will be put to practical use by developing a reliable restorative logical sequence.

In this paper, an algorism by which the power system is restored as that of before fault, in restoring the faulted point at the last of the sequence, is proposed subject to that the faulted point is known.

In case that over-load happened in the midst of the sequence, it is removed by closing the loop along the over-loaded apparatus.

The good results of the simulation tests justified the algorism proposed.

### 1. ま え が き

我国における電力系統運用の自動化は昭和 30 年代、自動周波数制御 (AFC)、経済負荷配分 (ELD) がアナログ的になされたのが始まりであるが、その後、デジタル型電子計算機と通信技術の目覚しい発達によって監視・制御に関する運用上のほとんどの機能が自動化されて今日に至っている。さらに最近は、系統の拡大に伴い、これら監視・制御を多数計算機の階層化構成で実用化されつつある。

しかしながら、系統規模での自動操作については、操作が複雑すぎることもあって、最適操作の一般的論理を見出すことが困難であり系統運用自動化における残された問題の一つとなっている。

系統自動操作に関する研究は系統の状態により、平常時操作、事故時操作、復旧時操作に分けてなされているが、本稿は復旧時操作に関するものである。本稿では、電力系統に系統規

\* 電気四学会北海道支部連合講演会 (昭和 52 年 10 月) で一部発表

\*\* 北見工業大学電気工学科

模の事故が発生したとき、事故区間が確定したと仮定して、事故区間の投入を最後にして復旧する過程において、途中で過負荷が発生する場合に過負荷区間を含むループを投入することによって潮流をループに分流させ、系統に過負荷が生じない範囲で優先順位にしたがって事故直前系統まで復旧する手法について報告する。

## 2. 電力系統の操作

電力系統の操作（系統操作）は系統の状態によって

- (1) 平常時操作
- (2) 事故時操作（緊急時操作）
- (3) 復旧時操作

の3つに分類して考えることができる。

平常時操作とは、事故時操作と復旧時操作を除くすべての操作をいう。大別して

- (1) 機器・線路の運転・停止のための操作
- (2) 切替・変更のための操作
- (3) 調整のための操作

があり、目的別に表-1のように分類して表わすことができる。

表-1 平常時操作

Table 1. Operations at normal condition

分類	目的	操作種別
運転・停止	運転(使用) 安定化(系統強化)	充電 受電 並用 並列 ループ投入
	停止(不使用)	解列 ループ解放 停止
系統切替	系統変更	ループ切替 並列切替 解列切替 停电切替
調整	周波数調整(有効電力)	発電機出力変更
	電圧調整(無効電力)	発電機無効出力変更 L, C 並列 L, C 解列

表-2 事故時(緊急時)操作

Table 2. Operations at emergency condition

分類	目的	操作種別	入切の別
事故除去	人畜・設備の安全 事故波及防止	解列(故障点除去)	切
	需給不平衡調整	解列(負荷しゃ断)	切
		解列(電源制限)	切
系統安定化	安定化	解列(系統分離)	切
	過負荷解消	発電調整	—
		ループ開放	切
		ループ投入	入
系統切替(表-1参照) 並列(他系統受電等々)		入, 切 入	
復旧準備	復旧準備(停電時操作)	停電時操作	切

事故時操作とは、系統に事故が発生したとき

- (1) 故障点を捜して除去する操作(故障除去)
- (2) 系統を安定化する操作(事故波及防止)
- (3) 事故前系統へ復旧するための準備操作

等をいい、表-2のように分類できる。

復旧時操作とは、系統に事故が発生し、事故時操作終了後、事故前系統へ復旧するための操作をいい、大別して

- (1) 充電または強行送電のための操作
- (2) 受電・並列または並用操作(含、ループ投入)
- (3) 停止操作

に分けて考えることができ、表-3のように分類して表わすことができる。

なお、停電時操作は復旧時操作の一部として扱われることがあるが、ここでは復旧のための準備操作とみなし、表-2に示すように事故時操作の一部として扱っている。

表-3 復旧時操作

Table 3. Operations at restrative condition

分類	目的	操作種別
CB両端に 電圧あり	系統強化	並用 並列 ループ投入
CB片端の みに電圧あり	運 転	充 電 強 行 送 電
停 止 そ の 他	停 止 ループ開放	解 列 停 止 ループ開放

### 3. 過負荷解消を考慮した事故時自動復旧操作<sup>1)</sup>

#### 3.1 復旧の範囲

復旧の範囲を明確にするため、復旧操作の内容を検討してみる。

充電または強行送電とは、すでに充電のある端子(母線)から充電のない線路へ運転電圧

で直接加圧する操作であり、具体的には、母線側に電圧があり、線路側に電圧がないしゃ断器の投入を意味する。また、受電とは、電圧のある線路より、電圧のない負荷、発電機または母線に電圧を引加する操作であり、線路側に電圧があり、母線側に電圧がないしゃ断器の投入を意味する。

一方、並用とは、すでに運転状態にある機器または線路に、現在停止中であつた機器または線路を並列に投入することであり、並列とは、周波数・電圧を独立にとって運転している2つの機器又は系統を接続することである。並用・並列ともに、両端に充電のあるしゃ断器の投入を伴う。

停止操作とは、事故時操作において、系統安定化のためにやむを得ず投入した停止中の機器または線路を旧状（停止状態）にもどすための操作である。一般に停止操作は、すべての負荷・発電機または線路が復旧され（脱落機器の復旧完了）、当該機器を停止することによって系統に異常や無理な運転状態が生じないことを確認してからなされるのが普通であり、平常時操作として考えてもさしつかえない。

したがって、停止操作を除けば、復旧時操作は

- (1) 片端のみに充電のあるしゃ断器の投入
- (2) 両端に充電のあるしゃ断器の投入

の2種類の操作に限られる。それらの簡単な系統での例を図-1に示した。

以下の議論では、事故時操作におけるしゃ断器の投入は系統の強化または安定化のための操作に限られ、また、一度投入されたしゃ断器を再びしゃ断するのは脱落機器の復旧が完了した後であることから、事故時操作においては、しゃ断器の投入操作はないと仮定する。一方、事故時操作において断路器の操作はないから、上記仮定により、復旧操作は、しゃ断器の投入操作に限られ、復旧論理を「事故でしゃ断したしゃ断器を与えられた条件の下でいかなる順序で投入すれば良いか」という問題の解決に限ることができる。

なお、事故復旧はあらゆる観点から見て最適になされることが望ましいが、ここでは、段

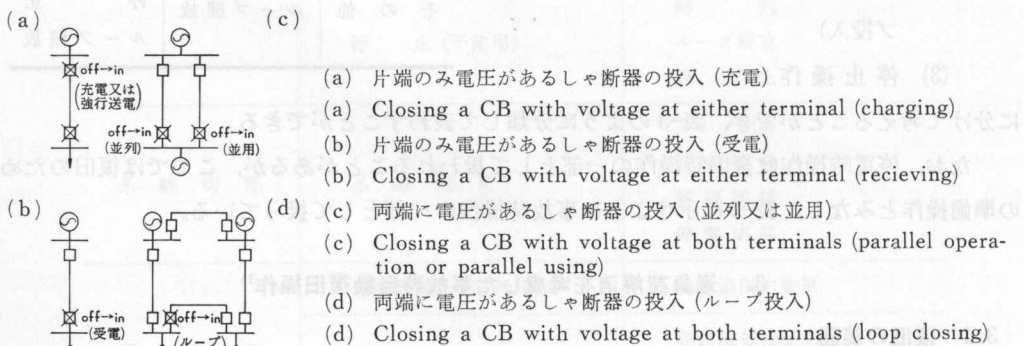


図-1 簡単な系統における復旧操作の例

Fig. 1. Examples of restorative operation for simple systems.

階を踏むため、系統に過負荷が生じた場合、過負荷を含むループを投入して過負荷解消を試みることを制約として、復旧の優先順位にしたがって復旧することのみを条件とした。

### 3.2 復旧の優先順位

復旧の優先順位は次の順序とした。

- (1) 脱落負荷
- (2) 脱落発電機
- (3) 未復旧線路
- (4) 事故区間

これは、事故発生により停電負荷が生じた場合、できる限り早急に負荷を復旧することが望ましいことによる。したがって、第一に故障区間と脱落発電機を除いた状態で復旧可能な負荷をあらかじめ付した負荷の優先順位にしたがって復旧し、復旧不可能な負荷は脱落発電機を復旧して需給バランスがとれた状態で復旧している。この場合、負荷復旧に要する操作回数を少なくするため、負荷復旧に直接関係しない線路は、復旧可能なすべての負荷の復旧を待って投入することとし、第三の優先順位としている。また、巡視等で故障点の確認に時間がかかる事故区間は最後に復旧している。

なお、負荷と発電機にはあらかじめ優先順位を付して、その順位にしたがって復旧していくが次に述べる過負荷の解消が困難な場合には、優先順位を繰り下げて復旧可能な負荷または発電機から復旧を続行している。

### 3.3 過負荷の取扱い

系統を構成する線路または機器に過負荷が発生したとき、過負荷を解消する手法は次の3つに大別できる。

- (1) 負荷の移動（系統切替，母線切替，異系統運用等）
- (2) 発生電力の移動（発電調整等）
- (3) 電流の分流（並用またはループ投入）

負荷の移動は過負荷を解消する有効な手段であるが、復旧途中の異常系統において健全系統も含めた系統構成の変更には十分な注意を要するばかりでなく、操作回数も増加する。また発電調整に関しては、すでにいくつかの提案もあるが<sup>2)</sup>、ELD、AFCとの関連もあり、復旧時に多数の発電機出力を変更すること自体、一つの問題として検討を要するものと考えられる。

一方、並用またはループ投入による電流の分流は、脱落系統に存在する線路の投入によって生じるループのみを対象として考える限り、健全系統に与える影響は小さく、全系統復旧までの操作回数は増加しないため、ここでは、この手法による過負荷解消策を採った。

ループ投入による電流の分流は以下のように考えることができる。

系統内の隣り合う端子  $i, j$  間のインピーダンス  $X_m$  を通って流れる電流  $I_m$  は次式で与えられる

$$I_m = (e_i - e_j) / X_m \tag{1}$$

ただし  $X_m$ ;  $i, j$  間のインピーダンス

$$\left. \begin{aligned} e_i &= \sum_k X_{ik} I_k \\ e_j &= \sum_k X_{jk} I_k \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

$X_{ij}$ ; インピーダンスマトリクス の  $ij$  要素

$I_k$ ; ノード  $k$  への注入電流

今、端子  $k, l$  をインピーダンス  $X_n$  で接続したとき、 $X_n$  を通して電流  $I_n$  が流れたと仮定すると、端子  $k, l$  をインピーダンス  $X_n$  で接続することは、ノード  $k$  に  $-I_n$ 、ノード  $l$  に  $I_n$  の電流源を接続したと等価である (図-2 参照)。

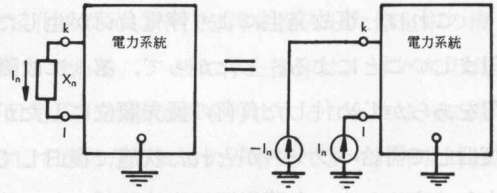


図-2 端子  $k, l$  をインピーダンス  $X_n$  で接続した場合の等価回路

Fig. 2. An equivalent circuit for the connection of branch  $X_n$ .

この時、ノード  $i, j$  の電圧の変化分のみを考えると

$$\left. \begin{aligned} \Delta e_i &= -X_{ik} I_n + X_{il} I_n \\ \Delta e_j &= -X_{jk} I_n + X_{jl} I_n \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

したがって、 $i, j$  間の電流の変化分は次式のようになる。

$$\Delta I_m = \frac{\Delta e_i - \Delta e_j}{X_m} = \frac{(-X_{ik} + X_{il}) - (-X_{jk} + X_{jl})}{X_m} I_n \tag{4}$$

ただし  $I_n$  は Thévenin の定理から次式で与えられる。

$$I_n = \frac{e_k - e_l}{X + X_n} \tag{5}$$

$$X = X_{kk} + X_{ll} - 2X_{kl}$$

$X$ ; 端子  $k, l$  を開放した時、端子  $k, l$  より回路を見たインピーダンス

$e_k, e_l$ ; 端子  $k, l$  を開放した時の  $k, l$  の端子電圧

以上から、端子  $k, l$  をインピーダンス  $X_n$  の枝路で接続した時

$$I_m \leq I_m + \Delta I_m \leq \bar{I}_m \tag{6}$$

$I_m, \bar{I}_m$ ;  $I_m$  の下限値, 上限値

となるような端子  $k, l$  を見い出せば良いことになる。

なお、直流法計算の場合、 $e = \theta, I = P$  と置き換えができるから、 $I$  の代りに  $P, e$  の代りに  $\theta$  を用いても同様である。

一方、ノード  $k$  からノード  $l$  に  $I_n$  の電流を流したとき、線路  $ij$  の電流  $I_m$  が影響を受け

るのは  $i, j, k, l$  を通るループが存在するときのみであることは明らかであり、線路  $ij$  に過負荷が発生したとき、過負荷を解消するためには  $i, j, k, l$  を通るループを構成する端子  $k, l$  のみを検討すれば良いことになる。

また、このような  $k, l$  が多数存在し、どの一対をとっても過負荷が解消されない場合、あ  
る一対をとるとその後のインピーダンスマトリクス値が変わるので、各対を単純に重畳して  
過負荷解消可能な組合せを見つけることは困難となる。したがってここでは

$$\max_i \left\{ \min_j (\bar{I}_{ij} - I_{ij}) \right\} \tag{7}$$

ただし  $I_{ij}$ ;  $i$  番目のループの  $j$  番目の線路の電流  
 $\bar{I}_{ij}$ ; 同上 上限値

で指定されるループ  $i$  より優先的に過負荷が解消されるまで並列する手法を採った。ただし、  
並行2回線の場合は、残りの1回線を第一優先としている。

この手法をすべての過負荷線路に適用し、過負荷を解消していくが、もし、すべてのルー  
プを並列しても過負荷が解消されない場合は、過負荷解消不可能として、対応する負荷の投入  
をロックしている。

### 3.4 復旧論理

#### (1) 系統構成の記憶

系統構成は母線をノード、線路をアークとした有向グラフとして表わし、しゃ断器はノー  
ド番号と線路番号の対で表わすこととした。簡単な系統での系統構成の記憶例を図-3(a), (b),  
(c) に示す。

#### (2) 復旧論理

全体の復旧論理を図-4のフローチャートに示す。図-4において

① 復旧が開始されると、あらかじめ定められた優先順位にしたがって、事故後 OFF に

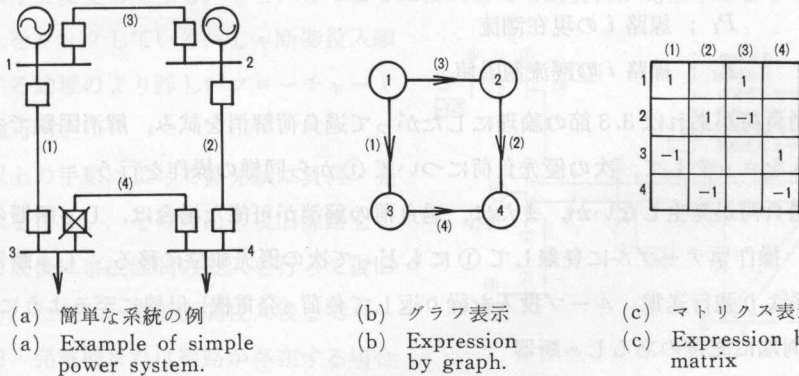


図-3 系統構成の表し方

Fig. 3. Expression for system configuration.

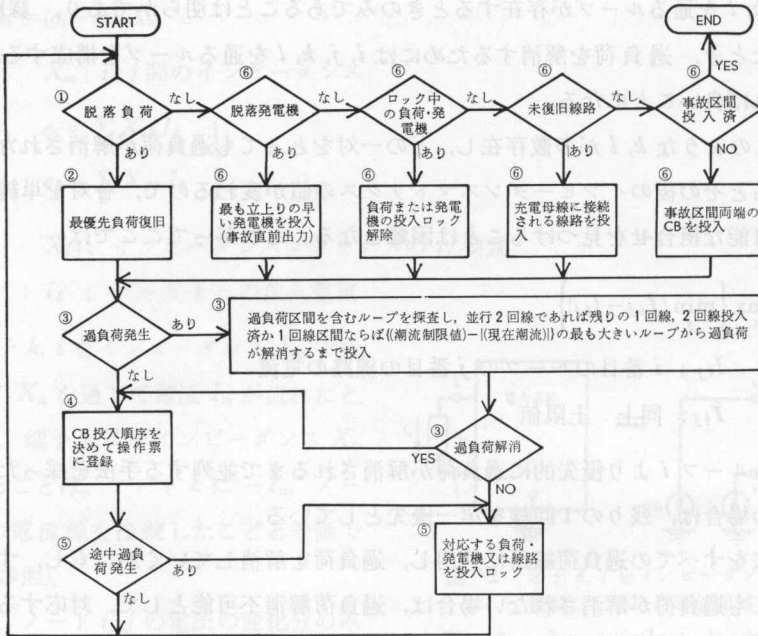


図-4 自動復旧論理の全体フローチャート

Fig. 4. Flow chart for automatic restrative operation.

なった復旧対象が接続される母線を選択し、充電のある母線（健全系）から当該母線までのしゃ断器操作回数最小のルートを図-5に示すフローチャートの論理によって選ぶ。

② 選択したルートを通して負荷（または発電機）へ電力を供給（または発電機より受電）したと仮定して過負荷が発生しないかどうかを調べる。過負荷の判定は、構成された系統についてフロー直流法で潮流計算した後、次式を用いて行なう。

$$FR = \bar{P}_i - |P_i| \quad (8)$$

ただし  $FR$  ; 送電余力 ( $FR \geq 0$ ; 過負荷なし,  $FR < 0$ ; 過負荷あり)

$P_i$  ; 線路  $i$  の現在潮流

$\bar{P}_i$  ; 線路  $i$  の潮流制限値

③ 過負荷があれば3.3節の論理にしたがって過負荷解消を試み、解消困難であれば当該負荷の投入をロックして、次の優先負荷について①から同様の操作を行う。

④ 過負荷が発生しないか、または、過負荷の解消が可能な場合は、しゃ断器の投入順序を決定し、操作票テーブルに登録して①にもどって次の優先順位に移る。しゃ断器の投入順序は健全系より強行送電、ループ投入を繰り返して負荷（発電機）母線に至るように

(a) 両端に充電のあるしゃ断器

(b) 片端に充電のあるしゃ断器

の優先順に決定していく。



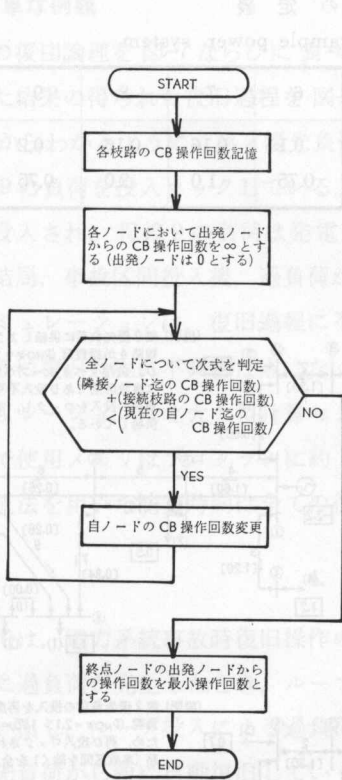


図-5 最小操作回数のルートを求めるフローチャート

Fig. 5. Flow chart for finding a pass of minimum CB operation.

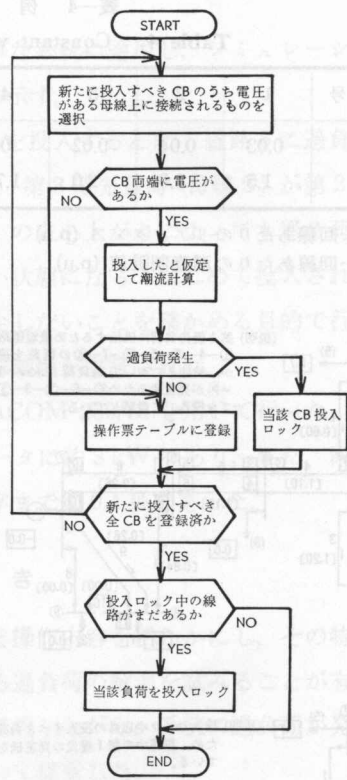


図-6 シャ断器投入順序決定のフローチャート

Fig. 6. Flow chart for decision of CB closing sequence.

⑤ 両端に充電のあるシャ断器を投入した場合は、新たなループが構成され、過負荷が生じる恐れがあるため、一線路投入の都度潮流計算を行って過負荷の有無を確認し、過負荷があれば投入順序を変更してみる。もし、どのように投入しても過負荷が発生するようなら、その負荷の投入をロックしている。シャ断器投入順序を決定する論理のより詳しいフローチャートを、図-6に示す。

⑥ 以上の手順によって優先順に負荷・発電機の投入を行ない、その後に未復旧線路をすべて投入し最後に事故区間の投入を行って復旧を完了する。ただし、事故区間投入後までロック中の負荷・発電機または線路が存在する場合には事故区間投入後に再度ロック中の負荷発電機または線路の投入を試みて復旧を完了する。

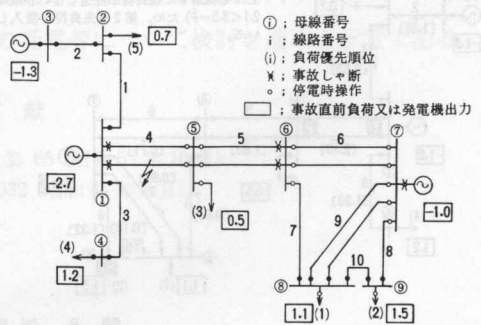


図-7 簡単な事故系統の例

Fig. 7. An example of simple faulted power system.

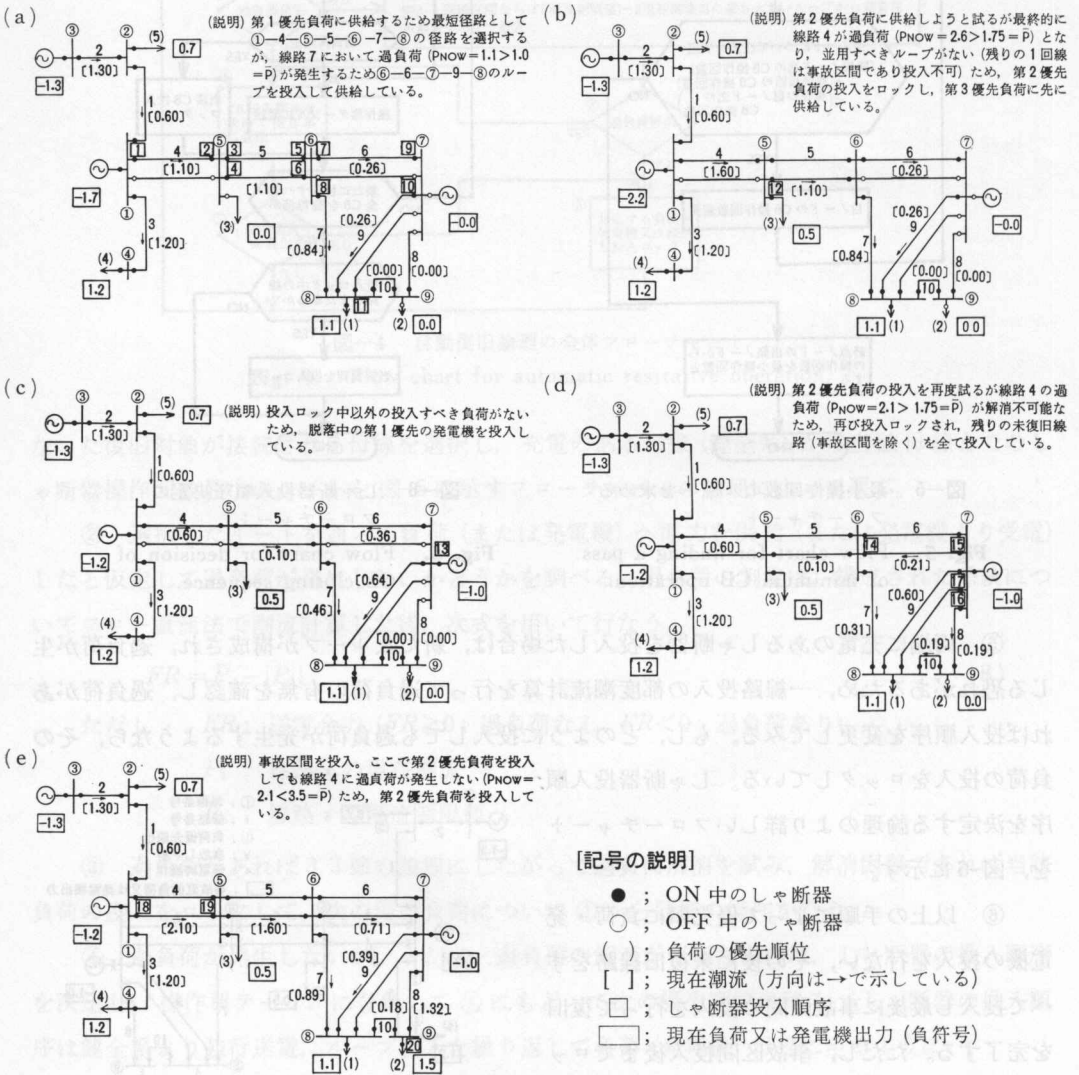
表—4 例題系統の定義

Table 4. Constant values for example power system

線路番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X$	0.03	0.04	0.02	0.1	0.1	0.1	0.16	0.16	0.2	0.05
$\bar{P}$	1.5	3.0	2.0	1.75	1.0	0.75	1.0	2.0	0.75	0.3

$X$ ; 一回線あたりのリアクタンス (p.u)

$\bar{P}$ ; 一回線あたりの潮流制限値 (p.u)



図—8 例題の復旧過程

Fig. 8. Restorative sequence for the example.

### 3.5 簡単な例題

以上の復旧論理を図-7ならびに表-4に示す簡単な系統に適用し、シミュレーションテストを行った結果の得られた復旧過程を図-8(a)~(e)に示す。

図-8からわかるように、第2優先負荷(母線9)を投入するとき、線路8に過負荷が発生し、母線9の負荷を投入ロックしている。そのため、第3優先負荷(母線5)が第2優先負荷より先に投入され、母線9の負荷は発電機(母線7)の立ち上がりによっても過負荷が発生するため、結局、事故区間投入後、過負荷が発生しない状態になってはじめて投入されている。

本シミュレーションは、復旧過程に不具合が発生しないことを確かめる目的で行ったが、以上のように復旧過程に不具合な点はなく、論理の有効性が立証された。

シミュレーションは北大大型計算センターのFACOM-230/75を用いて行った。モデル系統の構成で使用メモリはプログラムに約15kW、データに約3kWであり、また、潮流計算にフロー直流法を用いた演算時間は全ての復旧手順印字まで約0.4秒であった。

## 4. あとがき

本稿では、電力系統事故時復旧操作の位置付けと操作内容を明らかにし、その特徴から、復旧途中に過負荷が発生したとき、ループ投入による過負荷の解消を試みることが有効であることを見出し、ループ投入による過負荷の解消を考慮しながら、系統に過負荷が発生しないように優先負荷から順に自動復旧していく論理について提案した。

提案した論理のシミュレーションテストの結果、復旧過程に不具合はなく、論理の有効性が立証された。

提案した論理では、事故前OFFであった機器の操作については考慮に入れておらず、故障除去に要する時間が長時間に及ぶ場合等事故前系統と系統構成を変更して負荷の復旧を行う必要がある場合については、復旧を事故区間投入の直前で打ち切り、以降を平常時操作にまかせる必要がある。

今後、全負荷復旧までの操作回数最小化、過負荷が発生した場合に投入すべきループのより簡単な決定手法、常時分離系統からの応援電力の受電等について検討を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 奈良・山城：電気四学会北海道支部連会講演会論文集 65 (昭和52年10月)。
- 2) 例えば鈴木・尾出：電中研技術研究所報告 No. 66032 (昭和41年8月)。