

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*

— 送電余力最大ループ法 (その2) —

奈良 宏 一**

山城 迪**

(昭和53年9月30日受理)

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

— Maximum Reserve Capacity Loop
Method (Part 2) —

by Koichi NARA and Susumu YAMASHIRO

In the previous paper, the algorithm was proposed that the power system was restored as to that of before the fault, in restoring the faulted point at the last of the sequence. In cases where the over-load happened in the midst of the sequence, it was removed by closing the loops along the overloaded apparatus. If it was not removed by this operation, the corresponding load was inter-locked, and its sequential priority was decreased.

In this paper, we wish to report on the results of simulation adding to the previous algorithm the method which removes the over-load by receiving power from another power system that is disconnected in normal operating situation.

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

1. ま え が き

前稿¹⁾において、電力系統事故時復旧操作の内容を明らかにし、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を知り、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順位にしたがって復旧する論理について提案した。しかし、前稿では、過負荷解消が困難な場合は、その負荷の優先順位を繰り下げる処置をとり、その他の過負荷解消の手法については考慮していなかった。そこで、事故時に常時分離系統を並列し、そこからの応援電力の受電によっても健全系統に影響することなく過負荷を解消し得ることを考慮し、前稿の手法に常時分離系

* 電気学会全国大会 (昭和53年4月) で発表

** 北見工業大学電気工学科

統からの応援電力受電手法を加え、ループ投入と応援電力受電による過負荷解消を考慮した復旧手法としてシミュレーションを行った²⁾。

本稿では、まず、他系統からの応援電力受電によって過負荷解消が可能であることを示し、次に、これと、ループ投入による過負荷解消を考慮した復旧論理を述べ、さらに、その論理をシミュレーションした結果とその考察を示している。

なお、復旧操作開始直前における操作上の仮定や、シミュレーションにおける系統構成の記憶方法は前稿と同一である。

2. 復旧の条件

2.1 復旧の優先順位

復旧の優先順位は、すでに記した理由¹⁾から次の順序としている。

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

なお、負荷と発電機はあらかじめ付された優先順位にしたがって復旧し、未復旧線路については系統の優先順（線路番号を系統の優先順に付しておくとし線路番号順で良い）に復旧していくものとした。しかし、ループ投入による過負荷の解消が困難な場合には、常時分離系統からの応援電力を得るため、当該母線の充電を復旧順位に無関係に実施し、該当する線路の投入を行っている。もし、ループ投入と常時分離系統からの応援電力によっても過負荷の解消が困難な場合には、対応する負荷または発電機の優先順位を繰り下げ、復旧可能なものから順次復旧を続行している。

2.2 過負荷の取り扱い

系統に過負荷が発生した場合、過負荷線路を含むループを投入することによって過負荷を解消できることについてはすでに示した¹⁾が、同様に、常時分離系統から応援電力を受電することによってもまた過負荷の解消が可能なことがある。この場合、復旧系統と分離他系統を並列することによって、健全な他系統にじょう乱を与える恐れがあると考えられるが、連絡線潮流に、健全系統にじょう乱を与えない範囲の制限を設けて、その範囲を逸脱しないことをあらかじめ計算によって確認してから並列すれば、このような恐れは回避できる。

さて、いま、系統内の母線 k は他系統と接続可能であるが、常時分離して運転しているものとし、この時、母線 i, j 間の線路 m に過負荷が発生したと仮定する。この系統は、他系

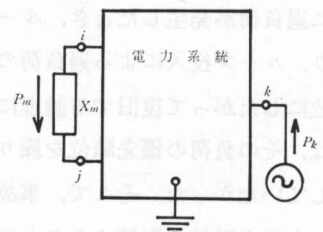


図-1 電力系統のモデル

Fig. 1. A Model for Power System.

統を等価な一台の発電機として扱い、図-1のようにモデル化することができる。

図-1で、等価発電機の出力変化 ΔP_k による過負荷線路 m を流れる潮流 P_m の変化 ΔP_m は、

$$\Delta P_m = (\Delta e_i - \Delta e_j) / X_m = \Delta P_k (X_{ik} - X_{jk}) / X_m = a_{mj} \cdot \Delta P_k \quad (1)$$

ただし、

$$a_{mj} = \frac{X_{ik} - X_{jk}}{X_m} \quad (\text{過負荷解消効果指数})$$

X_{ij} ; インピーダンスマトリクスの ij 要素

X_m ; 線路 m のインピーダンス

となることが知られている³⁾。

いま、負荷が一定の場合、損失を無視すると、発電量と総負荷量が等しい。すなわち、

$$\sum_i P_i = \sum_j L_j \quad (2)$$

でなければならないから、等価発電機の出力変化分 ΔP_k をいずれかの発電機によって補償してやる必要がある。この発電機を基準ノード（普通、大容量発電機ノードにとる）に選ぶならば、 ΔP_m は ΔP_k と基準ノードの出力変化 $\Delta P_o (= -\Delta P_k)$ によって影響を受けるので、(1)式から、

$$\Delta P_m = a_{mj} \cdot \Delta P_k + a_{mo} \Delta P_o = (a_{mj} - a_{mo}) \Delta P_k \quad (3)$$

となり、

$$P_m - \underline{P}_m \geq \Delta P_m = (a_{mj} - a_{mo}) \Delta P_k \geq P_m - \overline{P}_m \quad (4)$$

ただし、

$\overline{P}_m, \underline{P}_m$; 線路 m の潮流上下限值

となるような、

$$\underline{P}_k \leq \Delta P_k \leq \overline{P}_k \quad (5)$$

ただし、

$\overline{P}_k, \underline{P}_k$; 受電可能最大、最小電力（健全他系統にじょう乱を与えない範囲の制限）

を満足する ΔP_k が存在すれば過負荷を解消することができる。

以上から、系統に過負荷が発生した場合、まず、過負荷線路を含むループを投入して過負荷の解消を試みる。もし、すべてのループを投入しても過負荷の解消が困難な場合には、常時分離系統を並列して、その応援電力によって過負荷が解消できないか前記手法によって調査し可能な場合は必要な応援電力を受電する。

この手順をすべての過負荷線路に適用し、過負荷解消を試みるが、この手順によっても解消されない場合は、過負荷解消不可能として当該負荷の投入をロックし、次の優先負荷の投入に移行する。この手順をフローチャートの形で図-2に示している。

一方、過負荷解消のため投入した連系線の潮流は、脱落した発電機または負荷の立ち上り

の都度、零になし得ないか調査し、可能な限り零に近い値を維持するよう潮流を配分する。他系統は事故系統が事故直前状態にまで復旧した時点で再びしゃ断し、分離運転にもどされる。

3. 復旧論理

全体の復旧論理を図-3のフローチャートに示す。図-3に付した番号にしたがって復旧論理を説明する。

①あらかじめ定められた優先順位にしたがって事故後停電に至った母線を選び出し、充電のある母線(健全母線)から当該母線までのしゃ断器操作回数最少のルートを選択する。

②選択されたルートを通して負荷(または発電機)へ電力を供給(または受電)したと仮定して過負荷が発生しないか調べる。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、次式を用いて行う。

$$FR = \bar{P}_i - |P_i| \tag{6}$$

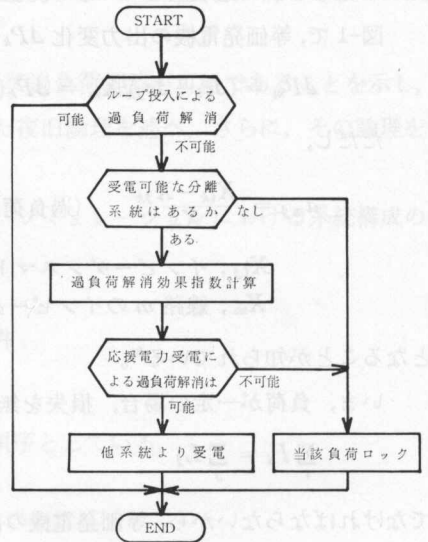


図-2 過負荷解消手順のフローチャート
Fig. 2. Flow Chart for Over-load Removal.

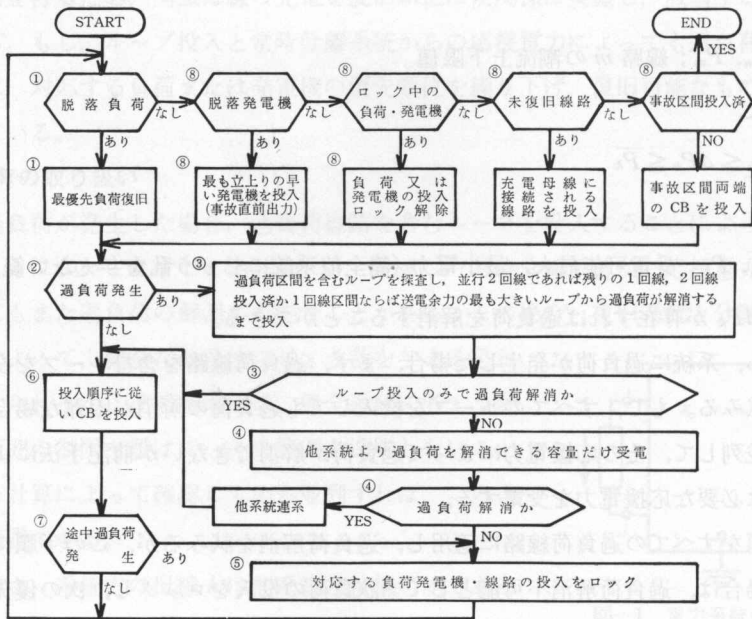


図-3 自動復旧論理の全体フローチャート
Fig. 3. Flow Chart for Automatic Restorative Operation.

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, \bar{P}_i ; 線路 i の現在潮流並びに潮流制限値

③ 過負荷があれば、過負荷区間を含むループを図-4のフローチャートに示すような手法(数え上げ法)によって探査し、並行2回線区間であれば残りの1回線、2回線投入済みか1回線区間であれば、送電余力の最も大きいループから順に投入して過負荷の解消を試みる。

④ すべてのループを投入しても過負荷の解消が不可能な場合、常時分離系統を並列し、図-2(2.2節参照)に示す手法を用いて過負荷の解消を試みる。

⑤ これによっても解消困難であれば、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。

⑥ ③または④項で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には、過負荷解消のための操作も含めたしゃ断器投入順序を決定し、操作票テーブルに登録した後、①にもどって次の優先順位に移る。

⑦ 両端に充電のあるしゃ断器を投入した場合は新たなループが構成され、そこに過負荷が生じる恐れがあるため、その都度、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する。もし、どのような順序で投入しても過負荷が発生する場合には、その負荷の投入をロックする。

⑧ 負荷、発電機、未復旧線路の順に以上の手順で復旧し、最後に事故区間を投入して復旧を完了する。ただし、ロック中の負荷がある場合には、発電機または未復旧線路を投入の都度ロック解除し、再び投入を試みる。もし、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。この後、もし、事故前に分離して運転されていた系統が並列されているならば、連系線をしゃ断し、分離運転とする。

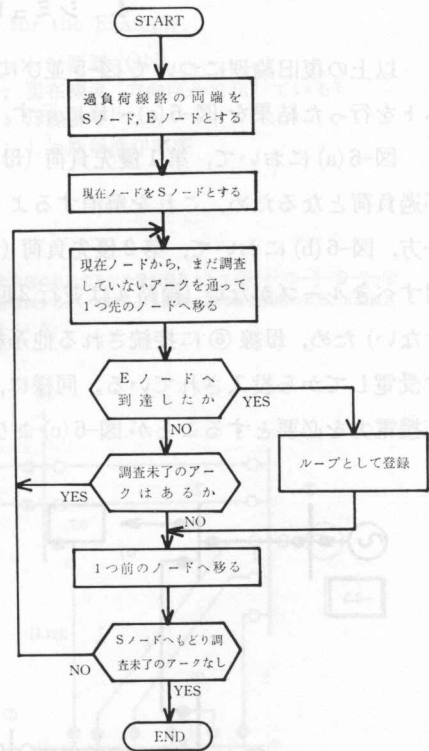


図-4 ループ探査のフローチャート

Fig. 4. Flow Chart for Finding Loops.

4. シミュレーションの結果と考察

以上の復旧論理について図-5並びに表-1に示す簡単な系統においてシミュレーションテストを行った結果を図-6(a)~(f)に示す。

図-6(a)において、第1優先負荷(母線⑧)が投入される途中で、最少操作ルート of 線路5が過負荷となるため、これを解消するように並行2回線が共に投入されていることがわかる。一方、図-6(b)において、第2優先負荷(母線⑨)を投入するとき、線路4が過負荷となり、並用すべきループがない(線路4は並行2回線であるが、残りの1回線は事故区間であり投入できない)ため、母線⑥に接続される他系統から、線路4の過負荷を解消する容量(0.85 p.u.)だけ受電してから投入されている。同様に、第3優先負荷を投入する場合も、さらに0.5 p.u.の応援電力を必要とすることが図-6(c)よりわかる。ここで、応援電力は1.35 p.u.となるが、次

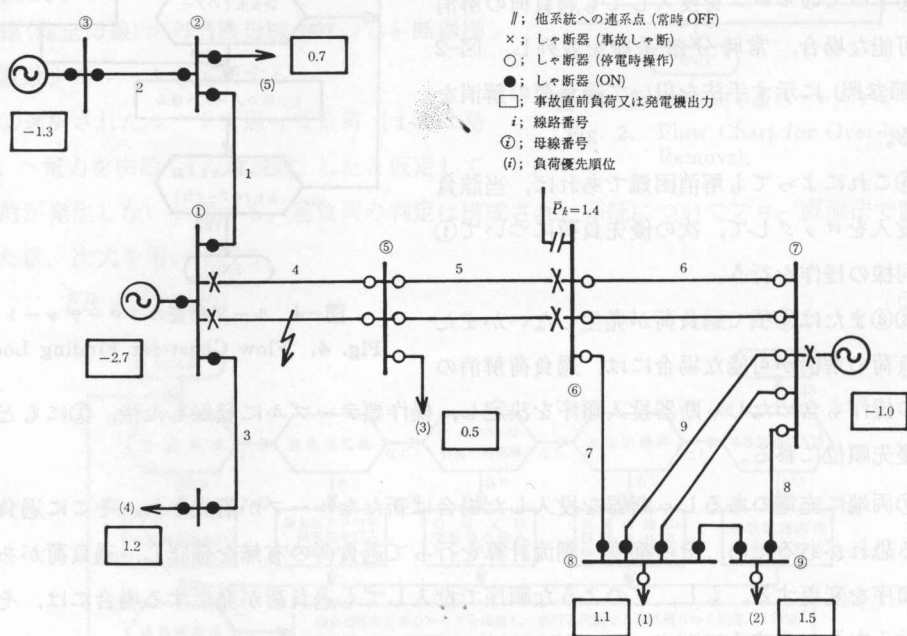


図-5 簡単な事故系統の例

Fig. 5. An example of Simple Faulted Power System.

表-1 例題系統の定数

Table 1. Constant values for the 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	1.6	2.0	0.75	0.3

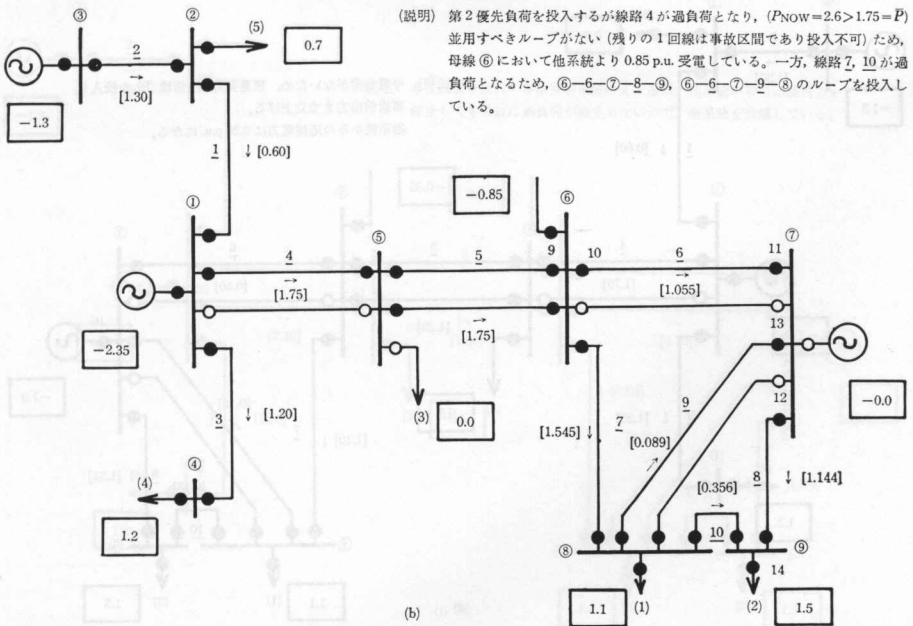
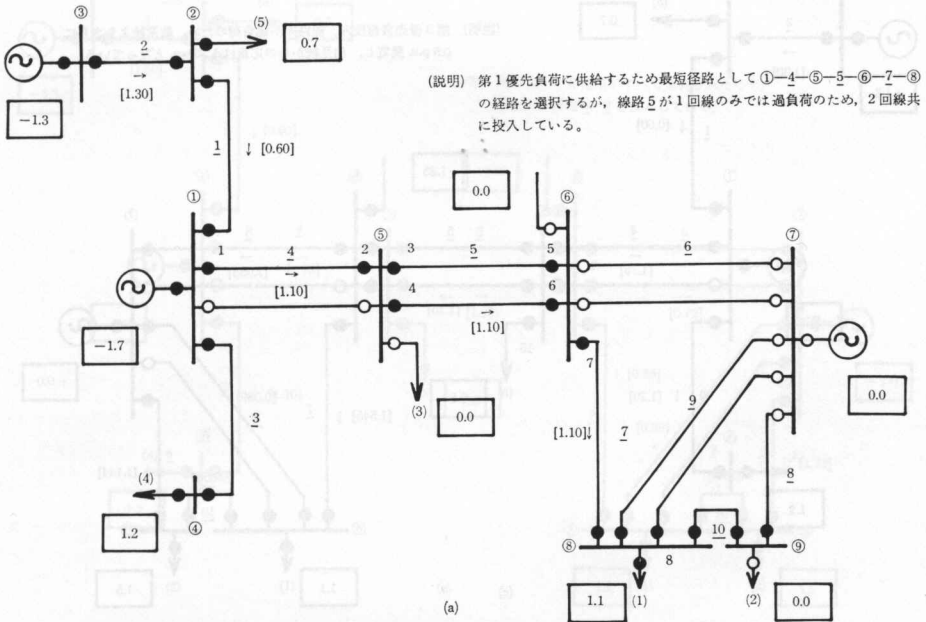
X ; 一回線あたりのリアクタンス (p.u.)

\bar{P} ; 一回線あたりの潮流制限値 (p.u.)

図-6 例題の復旧過程

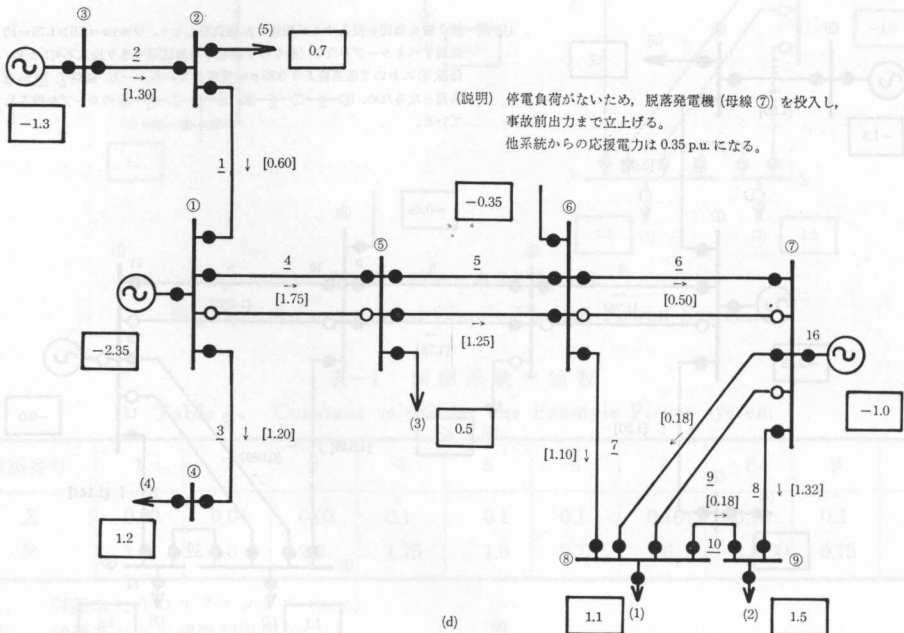
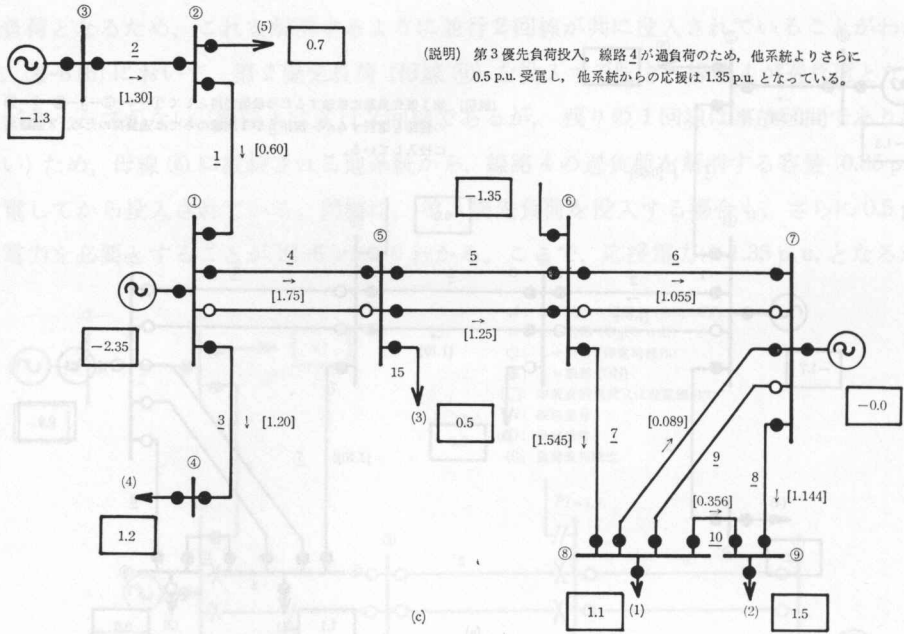
Fig. 6. Restorative Sequence for the Example.

- ; シヤ断器 (OFF)
- ; シヤ断器 (ON)
- ; 現在負荷又は発電機出力 (負符号)
- [] ; 現在潮流 (方向は→で示している)
- () ; 負荷の優先順位
- Ⓜ ; 母線番号
- i ; 線路番号
- j ; シヤ断器操作順序



に投入される発電機 (母線 ⑦) の立ち上りによって応援電力を減少することができ、発電機が事故前出力 (1.0 p.u.) となったとき、応援電力は 0.35 p.u. となる。(図-6(d))

連系線潮流は、事故区間投入後 (図-6(f))、零とすることができ、ここで、他系統は再び分離されている。



例題の系統では、都合よく他系統連系によって(4)式、(5)式を満足しているが、場合によっては(4)式、(5)式を満足しないこともあり得る。しかし、一般に、電源がある程度分散して配置されていることを考慮するならば、多くの場合、有効であろうと考えることができる。

シミュレーションは北大大型計算センタの FACOM-230/75 を用いて行った。モデル系統の構成で、所容記憶容量はプログラムに約 16 kW，データに約 3 kW であり、すべての復旧手順を出力するまでに要した演算時間は約 0.7 秒であった。

5. あとがき

本稿では、他系統からの応援電力によっても過負荷の解消が可能であることを示し、これと、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論理について述べた。この論理のシミュレーションの結果、復旧過程に不具合な点はなく、その有効性が立証された。また復旧時に、他系統からの応援電力を得ることによって、負荷の停電時間が短縮されることがあり、復旧過程に他系統からの受電を考慮することがこの面でも有効であることを確認できた。

今後、本手法の実規模系統への適用、全負荷復旧までの操作回数の最少化、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、停電損失の最少化などの検討を進める予定である。

終りに、一連の研究において、御指導と御支援をいただく小池東一郎北見工業大学長に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 奈良・山城：ループによる過負荷解消を考慮した事故時自動復旧操作手法，北見工大研報，第 10 巻，第 1 号，p. 65 (昭和 53 年 11 月)。
- 2) 奈良：昭和 53 年電気学会全国大会講演論文集，826，p. 1039 (昭和 53 年 4 月)。
- 3) 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)。