超高圧系統全停電時における初期復旧操作の エキスパートシステム化

正員 垣 本 直 人 (京都大)

正員 林 文 彬 (京都大)

正員 林 宗 明 (京都大)

Expert System for Initial Stage Restoration from System Blackout of EHV Power System

Naoto Kakimoto, Member, Bunpin Lin, Member, Muneaki Hayashi, Member (Kyoto University)

In this paper, an expert system was developed for initial stage restoration of EHV power system from system blackout. The operations to be done in case of blackout, are usually determined at every electric station by operation rules, and the power system is restored to the prefault state by carrying out the determined operations at each electric station. In case a regular operation should not work well, several supplementary operations are prepared. This method has some merits that it can restore along normal operation state, that its logic is simple, etc. Because of these merits, a part of the operation rules have been automated by automatic restoration equipments, but in case of system blackout, such human judgements as to secure initial power source are required, and operations by commands from a load-dispatching office become dominant. In this paper, an outline of restoration process was firstly clarified through analysis of the operation rules. Next, the operation rules were transformed into production rules, and were put in order at every electric station. An individual knowledge base was prepared for each group of electric stations in construction of the expert system, and a proper order was introduced in choosing a station to be restored, by which vain search of rules was eliminated. The expert system was applied to a model power system, and it was shown that the computation time for generating all restoration operations is about 0.5 s, and that the system can deal with cases where there are some damaged equipments.

キーワード：超高圧系統，全停電，初期復旧，操作，エキスパートシステム

1. はじめに

電気エネルギーは現代社会において必要不可欠であり、その消費量は年々増加している。電力系統は巨大化、複雑化すると共に、設備の近代化や信頼性の向上が図られ、大規模な停電の発生は少なくなっている。しかし、一度大規模な停電が起ると、停電に伴う心理的要因に加え、復旧経験の少なさから、操作員が適切な復旧操作を行うのは困難となることが予想され

る。そこで、系統操作に関する規則や経験則を知識ベースに蓄え、それに基づく推論により操作を行ったり、操作員の判断を支援するエキスパートシステムの導入が提案されている⁽¹⁾。

基幹系統の復旧については、幾つかの研究が既になされている^{(2)~(4)}。主なものには、運用上の制約を満たす目標系統状態を決定し、その状態へ移行するための操作を自動作成して操作員に提示するもの⁽²⁾、復旧電源から電気所への復旧ルートを求め、優先順に復

旧していくものなどがある⁽³⁾⁽⁴⁾。前者は供給支障量を最小化するため、二、三の手段により常時の運用形態を変更して目標系統を作成する。従って、目標系統は常時に近い運用形態となる。しかし、広域停電のように初期状態と目標系統の差が大きくなると、その間の操作作成が困難となる。一方、後者は電気所を個別に復旧するのを主としており、復旧後の系統状態にはあまり留意していない。操作作成は容易であるが、復旧後の系統が常時の運用形態から大きくずれる可能性がある。また、広域停電では復旧ルートを選択にかなり時間を要する。従って、いずれの方法も停電範囲がかなり限られている場合に有効であると考えられる。

本論文では、停電範囲が最も広域に及ぶ系統全停を対象とし、その初期復旧のためのエキスパートシステムを構築する。実系統では一般に目標系統を幾つか設定し、その状態に到達するための手順を電気所ごとにあらかじめ検討し、操作規則として定めている。本方式の特徴は、常時の運用形態に沿った復旧ができ、かつルート探索が不要なことである。操作規則の一部は、自動復旧装置により既に自動化されているが⁽⁵⁾、系統全停時は初期電源の確保など人間の判断が介在するため不動作に終る可能性が大きい。そこで、操作規則を基に本方式のエキスパートシステム化を行う。操作規則のルールへの変換により、自動復旧装置では扱えない細かな操作まで自動化が可能である。第2章では、まず系統全停時における復旧について操作規則を基に分析する。第3章では操作規則のルール化を行い、電気所ごとにルールを整理する。第4章では試作したエキスパートシステムの概要を述べる。第5章では実行例を示し、システムの検証と評価を行う。

2. 復旧操作の分析

図1に対象とする超高压モデル系統を示す。系統は

図1 モデル系統
Fig. 1. Model system.

七つの発電所と25の変電所から成り、変圧器、遮断器、断路器など、多数の機器が存在する。系統電圧は500 kVと275 kVである。系統は500 kV送電線を基幹とし、その下に275 kV送電線がくし形につながる。常時の運用は放射状で、破線で示した送電線は予備とする。 $S_1 \sim S_{22}$ は管轄下の変電所、 $N_1 \sim N_3$ は他系統の変電所、 $G_1 \sim G_7$ は発電所とする。本論文では、この系統が何らかの原因により全停状態になった場合を想定し、その状態からの初期復旧操作について検討する。

〈2・1〉 復旧の手順 初期復旧では初期電源の確保、送電系統の再構成、および発電機の起動・並列を行う。復旧は、電気所ごとに停電時の受電準備操作と受電線回復時の受電・送電操作を定め、その手順に従って各所が操作を行う方式である。操作は電気所が自主的に行う自主操作と、給電所からの指令により行う操作に分けられるが、ほとんどが自主操作である。

表1にモデル系統の500 kV変電所 S_2 が全停状態となったとき、変電所で行うべき操作を定めた例を示す。停電後1分以内は500 kVおよび275 kV遮断器を切り、受電の準備をする。これは復旧過程で一挙に負荷がかかり、送電系統側にじょう乱を与えたり、再び停電したりしないようにするためである。停電1分以後、東側の500 kV送電線 L_2 が再送電されれば受電する(図1参照)。受電後は西側にある送電線 L_3 を停電1分後10分以内に再送電する。 L_3 の再送電に続いて275 kV送電線 L_8 と L_9 を再送電する。送電線 L_3 を再送電できないときは、変電所 S_3 から停電15

表1 操作規則例(変電所 S_2)
Table 1. Example of operation rules
(Substation S_2).

状 況	操 作
全停電後 1分以内	(1) 500 kV, 275 kV 各遮断器を切る。 (2) 送電線 L_2 の再送電を待つ。
全停電後 1分以降	(1) 送電線 L_2 を再送電してくれば受電し、送電線 L_1 一 号線を停電1分後10分以内に再送電する。再送電 が不良の場合は二号線とする。 (2) 送電線 L_6 一号线、 L_9 一号线を停電1分後に再送電 する。 (3) 送電線 L_6 一号线、 L_9 一号线の再送電が不良の場合 二号線とする。 (4) 送電線 L_3 を再送電できなかった場合は変電所 S_3 から停電15分後再送電してくるから受電または並 列する。 (5) 送電線 L_2 を再送電してこない場合は停電15分後25 分以内に一号线を再送電する。不良の場合は二号 線とする。 (6) 以後の操作は給電指令による。

図2 再送電の方向

Fig. 2. Directions of recharging transmission lines.

分後に同線を逆に再送電してくるから受電または並列する。送電線 L_2 が再送電されないときは、変電所 S_2 から停電 15 分後 25 分以内に同線を東に向けて再送電する。

再送電の方向は、電源容量の大きなほうを再送電端とする、火力・原子力発電所端からは再送電しない、需要家端からも再送電しない、などの原則に基づきあらかじめ決められる。図2はモデル系統における再送電方向を電圧階級ごとに定めた例である。実線は再送電の方向を示している。1~10などの数字は停電後の経過時間(分)を示し、その時間内で再送電を行う。再送電がうまくいかないときは、逆方向に再送電を行うことがある。逆再送電と呼び、破線で示している。500 kV 系では東から西へ、275 kV 系では 500 kV 変電所から末端の電気所へ向かって再送電を行う。主要変電所では逆再送電により多重に電源確保を図る。また、他系統との連系操作は給電指令による。表1の操作規則は、図2を基にして決めてある。ただし、再送電には1号線を使い、1号線不良時は2号線とするなどの細かな点を文章により補っている。

〈2・2〉復旧パターン 図2のように再送電方向を決めると、モデル系統が全停電になった際、初期電源の選び方により次の三つの復旧パターンが生ずる。

(1) 第一のパターンは他系統の変電所 N_1 を初期電源とする場合である。停電1分後以降、500 kV 変電所が東から西へ順次復旧されていく。また、復旧された500 kV 変電所から次々に275 kV 系が復旧され、最終的には超高压系統すべてが復旧される(図2参

図3 復旧パターン

Fig. 3. Restoration patterns.

照)。これが初期復旧における基本である。超高压系統には負荷は直接つながっていないが、下位系統の復旧もほぼ同じ要領で行われ、負荷端にまで再送電が行われた時点から負荷への供給が始まる。発電所は単独運転に成功しておれば直ちに発電機を系統に並列し、発電を行う。停止状態にあれば起動後、系統へ並列する。

(2) 第二のパターンは、何かの原因で変電所 N_1 が初期電源として使用できない場合である。図3(a)に復旧範囲を破線で示す。他系統変電所 N_2 と N_3 が初期電源となり、停電15分後に連系線 L_6 と L_{21} を逆再送電する。給電指令により連系線 L_6 から受電した変電所 S_5 は、東側の500 kV 送電線 L_5 に再送電し、その後275 kV 送電線を再送電する。500 kV 系は以後、西から東へ逆再送電により復旧されていく。ただし、 S_5 を除く500 kV 変電所は275 kV 系を自主的には復旧しない。従って、変電所 N_2 が復旧する範囲は500 kV 系と S_5 変電所下流の275 kV 系となる。これは N_2 の電源容量が小さいためである。一方、変電所 S_8 は変電所 N_3 より受電した後、送電線 L_{12} と L_{17} を再送電する。これらの送電線の先端には発電所

G_1 , G_3 , G_7 があり、変電所 N_3 は変電所 S_8 を中心とする一帯を復旧する。

(3) 最後に、他系統の変電所がいずれも初期電源として利用できない最悪の場合、二つの揚水発電所 G_6 と G_7 を自立起動して初期電源とする。図3(b)に復旧範囲を示すが、電源容量の関係上、あまり広い範囲の復旧はできない。 G_7 は送電線 L_{12} に再送電し、発電所 G_1 の電源を確保する。変電所 S_8 は給電指令により送電線 L_{12} から受電する。変電所 S_7 も同じく指令により、発電所 G_6 から受電する。

上記の復旧パターンには時間差を設け、混乱を避けている。第一パターンの起動が最も早く停電1分後、次に第二パターンが停電15分後、最後に第三パターンの順となっている。第一パターンでは系統全体が復旧できるが、他のパターンでは停電部分が残る。停電部分の復旧には、発電機を並列して系統供給力の増加を待つ必要がある。本論文は初期復旧を対象としており、そのような段階に立ち入ることはしない。

〈2・3〉 手法の特徴 図2では、すべての電気所に電気がいきわたるように、再送電が行われる。従って、各所が各々の決められた操作を支援なく行えば、最終的には常時の運用状態に到達することができる。本方式は、各所で行う操作は単純であるにもかかわらず、その集合により系統全体の復旧がなされる点で優れている。また、再送電方向が決まっているため、電気所の復旧順序も自然に決まり、復旧の進行状況が把握しやすいという利点がある。従って、システムから操作員に復旧の主導権が移行した後も、操作の継続が容易である。

一方、論理が単純であることから自動復旧装置の導入がかなり進んでおり、特にエキスパートシステム化を行う必要はないように見える。しかし、再送電回線の変更や逆再送電などのきめ細かな操作を自動復旧装置で行うのはハード面で複雑になる。エキスパートシステムにしておけば、逆再送電のための操作などもルールを追加するだけで容易に組込むことができ、拡張性に優れている。また、事故による破損機器の再充電を避けるなど、事故に関する情報を復旧操作に利用することもできる。以上の点からエキスパートシステムの構築は有意義であると考えられる。

最後に、本論文では系統全停を検討の対象としているが、他の部分停電も若干の変更により扱うことが可能である。例えば、図1において、何かの原因で送電線 L_8 が停電し、電気所 S_6 , S_7 , S_{13} , S_{15} , S_{16} , S_{17} , G_6 が全停となったとする。この場合も、健全な変電所 S_2 を初期電源として L_8 を再送電し、図2に従

て受電と再送電を繰返せば、系統全停と全く同様に、停電部分の初期復旧を行うことができる。従って、本手法は部分停電にも拡張が可能な一般的な手法であると言える。各電気所では、一部の送電線が停止したときの操作も規則により定めている。再送電および逆再送電の向きや時間は図2と同じである。しかし、一回線と二回線、電圧の有無などにより、操作内容が電気所ごとに微妙に異なり、また全停時とも若干異なる。それらの規則について詳しく述べるのは混乱を招く原因となる。以下では、全停時の操作規則のみを扱い、部分停電は扱わない。

3. 規則のルール化

本論文では、全停時における操作規則を基にエキスパートシステムを構築する。しかし、操作規則をそのままプログラムすることは困難である。まず操作規則を整理し、プロダクションルールへ変換する。

〈3・1〉 規則の整理 電気所における操作は、受電、再送電、逆再送電、その他から成る。これらの操作を各電気所が自主的、または給電指令により行うことで、系統が再構成されていく。以下、各操作に関するルールを述べる。

(1) 受電操作 受電操作については、次の4ルールがある(図4参照)。

- ①：停電1分後、A線が再送電されたならば、A線より受電する。
 - ②：停電1分後、A線が再送電され、給電指令があれば、A線より受電する。
 - ③：停電1分後、A線が再送電不良、B線が再送電され、給電指令があれば、B線から受電する。
 - ④：停電15分後、B線が再送電不良、B線が逆再送電されれば、B線より受電または並列する。
- ①が基本であり、正規の送電線(A)からの受電を

図4 受電操作

Fig. 4. Operations to receive power.

図5 再送電操作

Fig. 5. Operations to send power.

表す。ほとんどの電気所に適用される。②は受電に給電指令を必要とする場合を示す。③は予備線(B)からの受電を表す。給電指令が必要である。④は逆再送電による受電を示す。停電15分後に行われる。

(2) 再送電操作 受電後、電気所は担当送電線の再送電を行う。再送電に関するルールは以下のとおりである(図5参照)。

- ①: 停電1分後、A線より受電したら、B線1号線を再送電する。1号線不良なら2号線とする。
- ②: 停電1分後10分以内、A線より受電したら、B線1号線を再送電する。1号線不良なら2号線とする。
- ③: 停電1分後、A線より受電したら、B線を1、2号順に再送電する。
- ④: 停電1分後、給電指令があれば、B線を1、2号順に再送電する。

基本は①である。決められた送電線(A)から受電後、担当送電線(B)を再送電する。1号線を使うが、1号線不良時は2号線を使う。②の停電1分後10分以内という時間制約は、停電15分後に逆再送電を行うためである。③は負荷線の再送電を示す。1、2号線ともに再送電する。④は連系線の再送電を示す。給電指令によって行う。

(3) 逆再送電操作 逆再送電については次の3ルールがある(図2参照)。

- ①: 停電15分後25分以内、A線が再送電されていないならば、A線1号線を逆再送電する。1号線不良のときは2号線とする。
- ②: 停電15分後、A線が再送電されておらず、給電指令があれば、A線を逆再送電する。
- ③: 停電1分後、A線が再送電されていない、給電指令があれば、発電機を自立起動し、A線を逆再送電する。
- ④: 500 kV 送電線に適用する。停電15分後25分

以内という制約時間を過ぎると無効になる。

②は変電所 N_3 に適用する。他系統からの逆再送電であるため給電指令を要する。③は給電指令により揚水発電所の発電機を自立起動し、逆再送電を行う。

(4) その他 以上の操作のほか、電気所が受電後に行う操作がいくつかある。

- ①: A線より受電したら275 kV 母線を充電する。
- ②: A線より受電したら154 kV (77 kV) 系を復旧する。
- ③: A線より受電したら、発電機を並列する。

①は500 kV 変電所における275 kV 母線の充電操作である。②は下位系統の復旧、③は発電機の並列を指示する。

〈3・2〉 電気所ごとの適用ルール 以上のように整理すると、操作規程は基本的に14の操作ルールから成り立っていることがわかる。従って、表1のような各電気所の操作規程は、これらの操作ルールを適当な順に並べることにより記述することができる。ただし、すべてのルールが各電気所に適用されるわけではない。表2に各電気所に適用されるルールを整理する。

受電操作においては基本ルールがほぼすべての電気所に適用されるが、 S_1 は給電指令により連系線から受電する。また、 $S_1 \sim S_{10}$ など主要変電所ではそれ以外に、逆再送電や予備線による受電が用意されている。特に S_7 と S_8 では揚水発電所からの受電も行う。再送電では、基本ルールが九つの電気所に適用されるが、時間制約付きルールも500 kV 変電所など6電気所で適用される。負荷線の再送電は六つの275 kV 変電所で行う。ただし、 S_{13} では給電指令を要する。連系線への送電は N_1 , N_2 , S_5 で行う。末端の電気所では再送電は行わない。逆再送電を行う電気所は限られている。500 kV 変電所 $S_2 \sim S_6$, 変電所 N_3 および揚水発電所 G_6 , G_7 の7箇所である。その他、500 kV 変電所では275 kV 母線の充電を行う。また、下位系統をもつ電気所では、それらの復旧を行う。発電所では、受電に続いて発電機を並列する。

4. 試作システムの概要

前章のルールを基にエキスパートシステムを試作した。構築用ツールとしてESHELL⁽⁶⁾を用いた。使用言語はリスプ⁽⁷⁾である。知識ベースは、知識源(KS)と呼ばれるルールの小さな集合からなり、知識源を切換えながら推論を進める。各知識源における推論方式は前向き推論である。図6に本システムにおける処理の流れを示す。まず、自主操作が可能な電気所があるか否かを調べる。なければ、適当な電気所に給電指令

図 6 復旧処理の流れ

Fig. 6. Flow of restoration process.

を発する。あれば、その一つを選択する。次に、その電気所が属するグループのルールを順次調べ、実行可能な操作はすべて行う。操作終了後、すべての電気所が復旧されておれば、復旧は終了する。そうでなければ復旧を継続する。以下では、給電指令、電気所の選択および電気所の操作などの処理における本システムの特徴を述べる。

〈4・1〉 給電指令 復旧操作の大部分は、電気所が自主的に判断して行う自主操作から成る。従って、給電所から指令を出さなくても、系統は自動的に復旧されていく。しかし、幾つかの操作は給電指令を必要とする。表2のルール中、受電②、③、再送電④、逆再送電②、③がこれに該当する。数は多くないが、系統全停時には他系統変電所から連系線を再送電したり、揚水発電所を自立起動して初期電源を確保するのに重要である。例えば、変電所 N_1 を初期電源とするには、変電所 N_1 に給電指令を送り、連系線 L_1 の1、2号線を再送電するよう指示しなければならない。変電所 S_1 が指令により連系線から受電すると、以後は自主操作により系統内の復旧が進行する。しかし、可

表 2 適用ルール
Table 2. Application rules.

電気所	受 電	再送電	逆再送電	その他
S_1	② ④	②		②
S_2	① ④	① ②	①	①
S_3	① ④	① ②	①	①
S_4	① ④	① ②	①	①
S_5	① ③	① ④	①	①
S_6	① ③	③		②
S_7	① ② ③	① ②		
S_8	① ② ④	① ② ③		②
S_9	① ③	① ③		②
S_{10}	① ③	① ③		②
S_{11}	①			②
S_{12}	①	①		②
S_{13}	①	③ ④		②
S_{14}	①			②
S_{15}	①			
$\vdots$	$\vdots$			
S_{22}	①			
G_1	①			③
G_2	①			② ③
G_3	①			② ③
G_4	①			③
G_5	①			③
G_6	①		③	③
G_7	①		③	③
N_1	②	④		
N_2	②	④		
N_3	②		②	

能な自主操作がすべて行われてしまうと、再び給電指令を待つ状態となる。

本システムでは、給電指令はオペレータが行うものとした。給電指令が必要な状態になると、システムはオペレータに指令を送る電気所名とルール番号の入力を促す。入力済むと対象電気所の操作ルールを調べ、目的の操作を実行する。また、指令を行うには系統の復旧状況を知り、適当な電気所と操作を選択しなければならないが、「HELP」と入力すれば

- ・ 指令待ち電気所とルール番号
- ・ 初期電源となる電気所
- ・ 停電中の電気所

などの情報を得ることができる。給電指令を自動化することも考えられるが、適切な指令を選択するための機構や情報が必要であり、更に検討を要する。

〈4・2〉 電気所の選択 図7に復旧が進行していく様子を示す。図中、 $S_{i,j}$ ($i=1, 2, 3, \dots$) は電気所を復旧順に並べたものである。復旧は初期電源を起点として始まる。初期電源が担当送電線を再送電すると、

図7 電気所の選択
Fig. 7. Choice of electric station.

その反対側にある電気所(図では $S_{\#1} \sim S_{\#3}$)が受電する。受電した電気所は更にその担当送電線を再送電する。このような操作を繰返すことによって系統が再充電されていく。操作は電気所ごとに独立に行われるため、時間的にみると破線で囲んだ複数の電気所がほぼ同時に復旧される。第一段階では初期電源に隣接する電気所群、第二段階では更にそれに隣接する電気所群が復旧される。つまり、復旧は並列分散的に進行し、初期電源から同心円状に広がっていく。

しかし、これを逐次処理形の計算機で行うには、若干の工夫が必要である。一度に一電気所の操作しか行えないため、どのように電気所を選択するかが問題となる。すべての電気所を順に選択し、適用できるルールがないかどうかを調べるのも一つの方法である。しかし、この方法では全く操作の行われる見込みのない電気所まで調べることになり、むだが多くなる。更に、例えば $S_{\#1}$ の操作終了後、 $S_{\#4}$ を $S_{\#2}$ より先に選択したとする。既に受電線が充電されているため、 $S_{\#4}$ は受電操作を行う。従って、 $S_{\#2}$ よりも早期に復旧されるが、これは実際の順序と一致しない。

この問題に対処するため、本システムでは初期電源から再送電を行った送電線の反対側にある電気所を変数 #NEWS にすべて記憶し(図7参照)、第一段階ではその中から電気所を順次選択するようにしている。また、それらの電気所から担当送電線の再送電を行うたびに、送電線の反対側にある電気所を変数 #ADDS に記憶し、次の段階ではその中から電気所を選択することにより、復旧順序の前後を避けることができる。また、選択した電気所では常に何らかの操作が行われるので、ルール探索のむだも少なくなる。

〈4・3〉 電気所の操作 電気所における操作ルールは全部で14である。しかし表2から明らかなように、各電気所に適用されるのは一部にすぎない。例え

表3 電気所のグループ化
Table 3. Grouping of electric stations.

グループ名	電気所	ルール数
500 kV 変電所	$S_1, S_2, S_{17}, S_4, S_5$	10
275 kV 変電所 1	$S_9, S_7, S_{10}, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}$	8
275 kV 変電所 2	S_8	7
275 kV 変電所 3	$S_{15}, S_{16}, S_{17}, S_{18}, S_{19}$	1
火力発電所	S_{20}, S_{21}, S_{22}	3
揚水発電所	G_1, G_2, G_3, G_4, G_5	3
他系統変電所	G_6, G_7	3
	N_1, N_2, N_3	3

ば、変電所 S_1 に適用すべきルールは四つである。従って、14 の操作ルールを順に調べていく際、まず S_1 に適用すべきルールか否かを知る必要がある。本システムでは、ある電気所にどのルールを適用するかを、電気所ごとの属性データとして与えている。もし、適用すべきルールであれば、そのルールの評価と実行を行う。そうでなければ、次のルールへ移行する。いずれにしても、すべてのルールを調べるが、 S_1 に適用するルールの全ルールに対する割合(以下、適用率と呼ぶ)は28.6%である。更に、全電気所について適用率を平均すると、23.1%となる。従って、14 の操作ルールから成る知識源を一つ作り、すべての電気所で共用すると、むだなルールの探索が多くなる。

この問題を解決するには、電気所ごとに知識源を作ればよい。適用率は100%となり、理想的である。しかし、電気所は全部で32箇所あり、そのすべてに別々の知識源を用意するのは手間がかかる。一方、表2を検討すると、同じようなルールをもつ電気所が少なくない。そこで、本システムでは電気所をよく似たルールをもつ7グループに分類し、各グループごとに知識源を用意した。分類は表3のとおりである。500 kV 変電所は1グループとした。275 kV 変電所は、各地域で中心的役割を果たすもの、変電所 S_8 、および末端に位置するものの3グループに分けた。操作規則では S_8 を500 kV 変電所に準じた扱いとしているので、他の275 kV 変電所と区別した。発電所は火力と揚水の2グループに分け、他系統の変電所は1グループとした。図6の処理フローでは、選択した電気所がどのグループに属するかを判断し、該当グループの知識源を調べている。以上のような複数の知識源を用いると適用率は大幅に向上する。すなわち、グループごとの平均適用率は、500 kV 変電所が56%、275 kV 変電所1が45.3%、同2, 3がともに100%、火力発電所が80%、揚水発電所が100%、他系統変電所が67%となっている。全体の適用率は73.2%であり、

一つの知識源を使用する場合(23.1%)に比べ、かなりの改善が見られる。

5. システムの検証と評価

〈5・1〉 実行例 システムが何かの原因により全停となったときの典型的な復旧例としては、第2章で述べた三つの復旧パターンがある。しかし、系統全停後、一部の機器が破損していたり、正常に動作しないこと

図 8 実行例

Fig. 8. Example of execution.

図 9 変電所 S_2 の構成

Fig. 9. Structure of substation S_2 .

表 4 変電所 S_2 における操作
Table 4. Example of operations at substation S_2 .

番 号	操 作	備 考
①	CB101投入	500 kV 甲母線受電
②	CB103投入	L_3 一号线再送電
③	CB103自断*	再送電不良
④	CB100投入	500 kV 乙母線充電
⑤	CB104投入	L_3 二号线再送電
⑥	CB104自断	再送電不良
⑦	CB121投入	主変圧器一号线充電
⑧	CB131投入	275 kV 甲母線充電
⑨	CB141投入	L_8 一号线再送電
⑩	CB143投入	L_8 二号线再送電

(*:自動遮断)

も予想される。図8は変電所 S_2 , S_3 間の 500 kV 送電線が2回線とも、永久故障となったときの復旧結果である。破線で囲んだ三つの部分が復旧される。系統の東部は変電所 N_1 を初期電源として復旧される。まず、変電所 N_1 から変電所 S_1 が、次に S_1 から変電所 S_2 が復旧される。 S_2 は変電所 S_3 を復旧すべく、 L_3 の再送電を試みる。しかし、永久故障のため失敗し、 S_3 は復旧されない。復旧は S_7 , S_{14} など 275 kV 系へ進行する。 S_3 より西側の系統は変電所 N_2 を電源として復旧され、変電所 S_8 一帯は変電所 N_3 により復旧される。

表4と図9に変電所 S_2 における具体的な操作と変電所構成を示す。機器の操作については第3章のルールには示されていないが、機器の接続情報を基に自動的に生成する。そのためのプログラムはリスプにより記述した。機器の接続情報や開閉状態は属性データとして記憶しており、容易に参照できる。操作①は L_2 からの受電、②～⑥は L_3 の再送電、⑦、⑧は 275 kV 母線の充電、⑨、⑩は L_8 , L_9 の再送電のための操作である。特に L_3 の再送電では1号線が不良であったため、ブスタイスイッチを閉じて乙母線を充電した後、2号線の再送電を試みているが、これも不良に終わっている。すべての電気所における操作の数は全部で82であった。ただし、そのうち12操作は発電機並列や下位系統復旧などの指示である。操作作成に要する時間は約0.5秒(計算機はFACOM-M780)であり、十分高速である。

一方、図8の状態では、まだ電気所 S_9 , G_2 , S_{21} , S_{11} , G_5 , S_{18} が復旧されておらず、以後の復旧はすべて給電所からの指令によって行われる。このように、本システムでは系統を完全に復旧することはせず、操作規則の定める範囲にとどめている。しかし、この状態は常時の運用状態からあまりずれておらず、以後の復旧もそれほど困難ではない。本システムの目標はこのような状態に系統を移行させることであり、その目標は一応達成されている。

〈5・2〉 評価 本システムは、実際の復旧にできるだけ忠実な操作を行うことを目標とし、操作規則に基づいて作成された。その特徴として、電気所の操作は基本的には14のルールにより行われ、比較的小数のルールから成り立つことがあげられる。以下、この観点からシステムの適用範囲や有効性について評価を行う。

ルールが少ない理由の一つは、問題をかなり限定していることである。まず、系統全停を検討の対象としている。復旧方式そのものは部分停電にも拡張可能で

あるが、そのための操作規則は組込んでいない。次に初期復旧を対象とし、その後の負荷への供給、需給制御、過負荷解消などは扱っていない。最後に、操作規則が定める操作を忠実に実行し、それ以外を行わない。そのため、図8では停電部分が残っている。以上より、本システムの適用範囲は系統全停時の初期復旧に限られる。部分停電、負荷への供給、過負荷解消、規則以外の操作などを扱うにはルール追加が必要であるが、本システムはその基礎をなすものであると言える。

もう一つの理由は、操作規則からルールを抽出する際、できるだけ一般的な形で表現するよう工夫したためである。すなわち、送電線はA線やB線などの変数で表し、固有名詞は電気所ごとに属性データとして与えた。これにより電気所ごとに別々のルールを用意するのを避けている。雑多な規則をルールで表現することがエキスパートシステムの特徴の一つであるが、できるだけルールを抽象化することもその分野に関する知識の整理という意味では重要と考えられる。また、受電や再送電時における具体的な機器操作をリスププログラムにより作成していることもルール数が少ない原因の一つである。細々とした手続きをすべてルールで記述するのは得策ではなく、本システムではそれらをリスププログラムにより行っている。以上は、特別な工夫ではないが、本システムを構築するうえで留意した点である。

6. ま と め

本論文では、超高压系統が全停電となったときの初期復旧操作のエキスパートシステム化を検討した。以下にその結果をまとめる。

(1) 操作規則を整理してルール化を行い、それを基に知識ベースを構築した。これにより、現実の復旧操作に近い自然な操作手順を作成できるようになった。

(2) 知識ベースを電気所グループごとに作成したり、電気所の選択を適切な順序で行うことにより、むだなルール探索を減らすことができた。

(3) モデル系統へ適用した結果、すべての復旧操作作成に要する計算時間は約0.5秒であった。また、故障設備がある場合にも対応できることを確認した。

今後は、初期操作では復旧できなかった停電範囲の復旧、発電量の回復に伴う負荷への供給など、初期復旧以後の操作について検討を行う予定である。最後に、本研究の遂行にあたり、卒業研究として御協力い

ただいた井原健喜君と中山圭介君に謝意を表します。
(平成元年9月22日受付、同2年1月10日再受付)

文 献

- (1) 松本・坂口：「知識ベースに基づく電力系統復旧方式の決定法」, 電学論B, **103**, 175 (昭58-3)
- (2) 薬科, 他：「基幹電力系統における事故復旧操作ガイダンス方式」, 同上B, **109**, 49 (平元-2)
- (3) 薬科, 他：「基幹系統事故復旧エキスパートシステム」, 同上B, **108**, 517 (昭63-11)
- (4) N. Kakimoto, et al.: "An application of artificial intelligence to restoration of bulk power system", Proc. Expert System Application to Power System, p.8-17 (1988)
- (5) 給電調査専門委員会：「電力系統における系統操作」, 電気学会技報(II部), No.107 (昭56)
- (6) ESHELL マニュアル VOILO3 (昭61) 富士通
- (7) UTILISP マニュアル (昭59) 富士通
- (8) 垣本, 他：「超高压系統全停電時における復旧初期操作のエキスパートシステム化」, 電気学会電力技術研資, PE-89-18 (平元)

垣 本 直 人 (正員)

昭和27年7月26日生。55年3月京都大学大学院博士課程修了。同年4月広島大学工学部助手, 61年4月京都大学工学部講師, 現在に至る。電力系統の安定度に関する研究に従事。工学博士。IEEE 会員。

林 文 彬 (正員)

昭和32年12月16日生。57年6月国立台湾工業技術学院電気工学科卒業。平成2年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程前期修了。同年4月同後期課程進学。現在に至る。主として、エキスパートシステムによる電力系統操作に関する研究に従事。

林 宗 明 (正員)

昭和2年7月26日生。27年3月京都大学工学部電気工学科卒業。同年4月住友電気工業(株)入社。30年京都大学工学部電気工学科助手, 34年同助教授。工学博士。現在, 電力工学, 高電圧工学に関する研究に従事。43, 44年度電気学会関西支部評議員。57年電気学会論文賞, 60年同電力賞受賞。電子情報通信学会, IEEE 会員。