作業時操作手順自動作成システム

正員 幅 敏 明* (中部電力)

非会員 前 田 繁 男 (中部電力)

正員 渡 部 悌 (日 立)

正員 福 井 千 尋 (日 立)

非会員 野 本 正 明 (日 立)

An Expert System For Switch Operation Planning On Line Dispatching

Toshiaki Haba, Member, Shigeo Maeda, Non-member (Chubu Electric Power Co.), Dai Watanabe, Member, Chihiro Fukui, Member, Masaaki Nomoto, Non-member (Hitachi Ltd.)

An expert system is presented that produces the operation sequence for disconnecting apparatuses from a power system under normal operating conditions.

To keep the reliability of power supply on the network during the operation, the operation sequence must be produced in due consideration of network states, such as load factors and routes of transmission line. Besides, since the network which system manages, includes many high-voltage consumers, the operation sequence for each consumer should be divided into detailed switch operation sequence.

So as to produce detailed switching operation sequence simultaneously with macro network operation sequence, we introduce the multi-layered object-oriented network model for the knowledge base of this expert system.

Each layer of this model represents network configuration in the different degree of detail, and the consistency between states of layers is maintained by inter-layer message-passing mechanism. On the layer which represents apparatuses and their connections in detail, the inference engine can generate the switching operation sequence. On another layer which represents control centers and consumers, the inference engine can search for routes of power supply and can generate the sequence of changing over the network. Therefore, by using each layers properly, the inference engine can produce various kinds of operation sequences.

Furthermore the object-oriented network model makes easy maintenance and extension of the system.

キーワード：電力系統，エキスパートシステム，オブジェクト指向，知識表現

1. ま え が き

電力系統において系統の保守と拡張のために、機器の整備や新規設備の追加などの作業が日常的に行われる。この平常時の作業に伴う系統操作は、電力供給の

信頼性を維持しつつ実行されなくてはならない。しかし、電力系統の規模が拡大し複雑になるにつれ、これらの作業のための操作手順作成と手順の確認作業は運転員にとって大きな負担となってきた。

このようなシステムの自動化には、手順の論理生成手法を用いたシステム⁽¹⁾やデシジョンテーブルを用いた例⁽²⁾がある。平常時操作への知識処理の適用例

* 現在 (株)コンピュータ・テクノロジー・インテグレータ

は、事故判定・復旧操作への適用例に比べ少なく、そのなかでも、ほとんどは作業計画に対しての例⁽³⁾⁽⁴⁾である。開閉器操作などの詳細な操作手順を対象としたシステムの例としては、変電所内の操作支援⁽⁵⁾や知識獲得の学習方式の適用例⁽⁶⁾があるが、知識処理の適用例として見るかぎり、支店給電所レベルの広範囲なシステムを対象に、系統切換えから特別高圧需要家の開閉器操作までといった様々な操作手順作成を同時に作成することを目標とした例はない。

本論文では、このような目的の作業時操作手順自動作成システムに知識処理手法を有効に適用するために必要な、オブジェクト指向の適用と系統表現についての基本構成を議論する。また、プロトタイプシステムの開発についても報告する。

2. システム概要

〈2・1〉 作成する操作手順 作成する操作手順は、主に変電所および特別高圧の需要家（以下、需要家とする）へ指示する開閉器操作である。需要家内の機器操作は電話連絡によつての指示となるため、地方給電所が開閉器操作までの手順を作成しなければならない。需要家ごとに設備構成が多種存在するため、煩雑な操作票の作成が必要となる。本システムの大きな特徴は、このような詳細度が異なる多種の手順を同時に作成する機能をもつ、という点である。

〈2・2〉 システム構成 図1は操作手順自動作成システムの位置づけと構成を示している。本システムは運用計画支援システム⁽⁷⁾と連係して動作する。運

図1 システムの位置づけと構成
Fig. 1. Role and configuration of system.

用計画支援システムは設備の保守や交換といった複数の作業間の調整をし、それぞれの作業日時が決定された後、その結果が本システムにわたされ、操作手順が作成される。

本システムは以下のサブシステムから構成されている。

- (i) マン・マシンインタフェース
- (ii) 推論エンジン
- (iii) 知識ベース
- (iv) 数値計算プログラム

マン・マシンインタフェースは様々な入出力をグラフィックディスプレイで表示する。推論エンジンと知識ベースはエキスパートシステム構築支援ツール EUREKA-II 上に構築されている。知識ベースには系統のデータや操作手順作成の知識が定義されており、多種の手順作成を可能にするように構成されている。詳細は知識表現の項で述べる。数値計算プログラムは系統状態を予測し、種々のチェックを行う。現状では潮流計算プログラムがメインで、系統中の潮流値、電圧、電流、位相角などを計算して、操作時の系統状態をチェックする。

3. 操作手順作成

〈3・1〉 手順作成と制約条件 操作手順作成の流れを図2に示す。まず初めに、推論エンジンは潮流計算プログラムを起動して系統の初期状態を求める。そして、目的の設備の停止による系統状態変化を推論して系統操作時に制約条件に違反しないかをチェックす

図2 操作手順作成フロー
Fig. 2. General flow of network operation planning.

る。操作における制約条件は多数あるので、最適な操作手順を作成するにあたり、図2のフローに示すように、制約条件ごとに問題をサブゴールに分解し、順番に制約違反を回避していく。制約違反がすべて回避されたならばサブゴールごとの仮定された条件に従って操作手順を作成する。

チェックされる制約条件は以下のとおりである。

(1) 停電 作業による停止予定のない負荷への電力供給の停止は回避しなくてはならない。また、構内停止を前提とした作業もあるので推論においてはこれを考慮し、もしくは除外する機能も必要である。

(2) 信頼性 送電線の多くは信頼性を保つため2回線（またはそれ以上）である。作業によって1回線を停止すると、下位の変電所の電力供給の信頼性を下げることになる。よって下位の変電所は、可能ならば2回線で電力供給を受けることができる別のルートを探索する。この制約条件は他の制約条件と比べ弱い制約であり、停電の制約条件と同時に判断される。

(3) 負荷率 負荷率は過負荷の発生を防ぐのに用いられる。もし操作後に負荷率が危険なレベル、もしくは過負荷になる場合、回避策を立てなくてはならない。負荷率の計算は潮流計算の結果と設備ごとに定義されている定格容量を比較して求められる。許容範囲は設備、運用状態によって異なるので、柔軟な推論が必要である。

(4) 位相角 CBやLSといったスイッチを充電時に投入する場合、スイッチの両端の位相角を調べる必要がある。もし位相角が設備の許容限度より大きければスイッチを投入することはできない。そこで、このような場合は位相角を引き下げるほかの手順を推論しなければならない。一般には後述の補助ループを用いる。

図2に示すように、以上の制約条件が満たされるまで手順作成の推論が繰返される。

〈3・2〉 系統操作の例 前節での制約条件を考慮した設備停止の流れを、図2のフローに従って図3の系統を例に説明する。

Line-1の停止操作の目的指令は以下のようになる。

- (i) Bus-2を系統Aから系統Bに切換える
- (ii) 需要家1をLine-2受電に切換える
- (iii) Line-1停止

また、(i)の系統切換え操作の詳細は、

(i-a) sw02投入

(i-b) sw01開放

となる。実際の作業はこのような幾つかの定型的なパターンの組合せからなることが多い。この手順が導出される過程を以下に示す。

初期状態：系統AはLoad-1、Load-2に電力を供給。系統BはLoad-3に供給。

切離し設備：Line-1を指定

切離し後の系統状態を予測：

- ・Line-1の停止によって需要家1が停電する。

停電回避用切換操作作成：

- ・需要家の受電先をLine-1からLine-2に切換える手順を作成。

潮流計算による系統状態予測：

- ・Line-1停止によりLine-4上の潮流はLine-3に移り、Line-3に過負荷発生。

潮流値低減操作作成：

- ・Line-1の潮流値を下げるため、Load-2を系統Aから系統Bに切換える。

この操作の後、Line-1は支障なく切離しができる。

図3(a)、(b)は、系統の操作前と操作後の最終状態

図3 系統切換操作の例
Fig. 3. Example of network operation.

を示している。

4. 知識表現

ここでは操作手順作成のために有効な知識表現、特に系統表現方法について述べる。前章までに繰返し述べたように、本システムの作成すべき手順は幅広い詳細度が要求される。よって、大まかな目的指令と詳細な操作指示を同時に導き、かつ大量な系統に関するデータの作成、保守を容易とするためオブジェクト指向に基づいた階層的系統表現を用いている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

〈4・1〉 オブジェクト指向モデル 各階層中の設備、機器は単なるデータではなく、推論に必要な特定の処理手続き（メソッド）が実行されるオブジェクトとして定義されている。

これらのメソッドは、プログラムまたはほかのオブジェクトからのメッセージパッシング、推論ルールなどから呼び出される。

このようなオブジェクト指向モデルによる処理動作の例として単純な停電判定を図4に示す。(a)図は対象となる系統の電力供給関係、(b)図はオブジェクトの表現内容の例、(c)図はオブジェクト間のメッセージパッシングの流れを示している。オブジェクト「Line-1」に「切り離し」というメッセージが送られると、「Line-1」は接続している設備「Bus-2」に「電力供給停止」というメッセージを送る。メッセージを受け取った「Bus-2」は供給停止のメソッドを起動し、続いて他の電力供給源を探すメソッドを起動する。本システムではメソッドはCプログラムで表現されており、オブジェクト内に記述されている供給ルートや

図4 オブジェクト指向モデルとメッセージの流れ

Fig.4. Message passing on object-oriented network model.

状態を参照して、他のオブジェクトにメッセージを送る。この場合、他に供給源がないので「Bus-2」の負荷である「Load」に「停電」のメッセージを送る。このように、設備の状態変化と推論の起動は自動的に関係する設備に広がるので、系統を構成する個々の設備に依存する処理を簡単に記述できる。

〈4・2〉 階層的系統表現 本システムでは、系統構成と機器に関する知識を詳細に記述するため図5に示すような階層的系統表現を用いている。三つの階層はそれぞれ、変電所、設備グループ、機器を表現しており、各階層ごとに定義された情報を参照し様々な推論手法を用いるという点で一種の黒板モデルと考えられる。各階層中のデータの単位はオブジェクトとして定義されている。以下、各階層の内容と機能を説明する。

最上位の変電所層は変電所と送電線の接続関係を表現している。部分系統や電力供給ルートの探索はこの層を用いて行われる。大域的に系統を把握できるので系統切換えや広域にわたる停電判定を能率的に処理できる。

設備グループ層では、系統は機能別に分類したひとまとまりの設備グループの集合として表現される。設備グループは、母線、変圧器、送電線などを表現しており、系統のノードブランチ表現と極めて近い。よってこの階層は潮流計算プログラムと深く関係している。停電推定、過負荷チェックを含む負荷率チェック、受電切換えなどの設備の切替操作はこの層で実行される。

最下位の機器層では、系統を構成している個々の機器について詳細な定義が記述されており、主として切替操作での開閉器操作の詳細な手順を作成するのに用いられる。

図5 階層的系統表現と推論機能の参照関係
Fig.5. Relation between multi-layered network model and inference function.

5. 階層表現を用いた手順作成

〈5・1〉 切換操作 前述の階層表現が、どのように実際の手順作成の処理に用いられるかを示す。系統操作は最終的にはほとんどが開閉器操作による切換作業とそれに付随する処置である。変電所や開閉所への指令ならば「母線停止」、「系統切換え」といった目的指令だけでよいが、最初に述べたように多数の需要家に対しては開閉器操作までを指示しなくてはならない。本システムでは階層的系統表現を用いることによって、これらの詳細度の異なる手順を導出している。

既に述べたように、知識ベース中の系統モデルは、機器、設備グループ、変電所の三つの階層からなっている。切換操作はこれらの階層を利用して推論される。例えば電力供給源の探索の場合は、下位の階層から上位の階層へ処理対象を代えて、局所的な視点から全体的な視点へ探索対象を広げることができる。逆に下位の階層のメソッドを起動することによって、需要家内の開閉器操作といった詳細な手順なども必要に応じて作成することができる。

図6の切換操作は、それぞれ目的の処理に応じて階層に対応づけられる。いずれの場合も対象となる機器（または設備グループ、変電所など）の属する階層内に処理が指示され、状況に応じて他の階層にメッセージが送られて階層が切換えられる。

図6の上段は母線停止に伴う切換操作である。停止対象である母線は単体の設備として最下位の機器階層に定義されている。停止のメッセージを受けたBus-bは、自分自身に接続している開閉器と電力の供給関係を調べることによって母線停止のための開閉器操作を求め、また、Bus-bから電力供給を受けている設備に対して電力供給停止のメッセージを送る。Bus-cはこのメッセージを受けて受電先を変更する。このように母線切換えの処理は、機器階層内にあるオブジェ

クト間のメッセージパッシングによって処理される。

図6の中段は受電切換操作を示している。このケースでは処理対象が変電所や需要家内の母線などのオブジェクトとなり、まず設備グループ内から処理が起動される。どの階層で手順作成が処理されるかは、目的とする操作手順をどの程度の詳細に作成するかによって変化する。例えば、需要家への操作指令のために詳細な開閉器操作までが求められるときは、下位の機器階層へのメッセージによって開閉器操作手順を求める処理が起動されて、詳細な手順が作成される。また、処理対象が変電所であり、手順作成が目的指令だけでよい場合は、下位の階層にメッセージは送られず、設備グループ階層内で切換手順が作成される。

図6下段の図は変電所の系統切換操作であり、変電所階層からの処理の起動を示している。この図中のSS、系統A、系統Bはそれぞれ変電所階層に定義されている1個のオブジェクトである。切換処理を設備

図6 切換操作の例
Fig. 6. Example of change over operation.

図7 過負荷回避処理
Fig. 7. Procedure to avoid over load.

または機器単位で表現されたデータを用いて実行すると、設備の条件判定や系統探索が複雑となる。しかし、変電所階層での切替処理作成では、切替処理の起動後、複雑な処理は下位の階層にまかされるので、推論知識も単純化され推論実行効率も良くなる。

〈5・2〉 手順作成に用いられる処理手法 手順作成に用いられる様々な処理は、〈5・1〉節で述べた階層的系統表現を用いた切替操作に基づいて実行される。以下、主要な処理について説明する。

(1) 停電判定 操作手順を作成するにあたって電力供給の確保がなされているかの確認が推論の基礎となる。電圧、電流、位相角などの厳密な数値は潮流計算によって調べなければならないが、切替操作に伴う停電の発生は、あらかじめ各設備間の電力供給関係を調べておくことによって容易に探索できる。切替操作がどの階層で実行されても、階層間の系統構成内容の整合は自動的に保たれるので、どの階層でも容易に系統状態の把握が可能である。例えば、開閉器操作に

よる系統構成の変化は、階層的系統表現の上位階層にただちに伝えられる。よって、変電所階層では変電所間の電力供給関係といった大局的な変化を、また、設備グループ階層では母線の受電切替えの様子を、といったようにそれぞれの階層を参照することによって複数の視点から系統の電力供給状態を把握することができる。

(2) 過負荷の回避 操作手順作成中に過負荷の発生が予測されると、過負荷回避の手順作成の処理が

図 8 補助ループを用いた切替え
Fig.8. Change over with approximate loop.

an

図 9 プロトタイプシステムの画面 (部分)
Fig.9. Display of proto-type system.

起動される。過負荷を回避するためには、過負荷が生じている送電線な変圧器を通じて電力が供給されている負荷を、別の供給源に割り当てればよい。

このプロセスを図7のモデル系統で説明する。最終目的は送電線-Y-Mの2Lを停止することである。この2L停止により二つの制約違反が起こると考えられる。一つは需要家Cの停電、もう一つは送電線-Y-Mの1Lでの過負荷発生である。需要家Cでの停電は受電を2Lから1Lへ切換えることで回避できる。1Lの負荷を引き下げるために1Lから受電している需要家A、B、C、下位の変電所-M、変電所-Nに対して他の電力源を探索するようメッセージが送られメソッドが起動される。これらの需要家、変電所の系統を切換えれば送電線-Y-Mの過負荷が解消するこ

とができる。この場合、系統Gと接している変電所-Nが切換対象となり、1Lの過負荷を変電所-N内の負荷量分下げることができる。過負荷が解消されなければ同様に系統切換えを繰返す。(c)図は変電所-Mの切換えによって過負荷が解消された場合である。

このように求められた過負荷が発生しない系統状態に基づいて操作手順を作成する。

(3) 位相角と補助ループ 前項までに多種の切換操作の例を示してきたが、切換操作を実行するにあたっては、開閉器両端での位相差が設備の許容限度を超えないようにしなくてはならない。例えば図8中の変電所Aに示すような構成では、1Lから2Lへの受電切換えはCBの許容範囲である限り特に問題はない。一方、変電所Bのような構成では、開閉器が

指令パターン 指令操作ライン 種別順序件名NO	所名	母線 機	線路 器	名 名 名	開閉器番号 <停止・復旧>	操作種別 操作	事前の確認 事後の確認	発令者 受令者 発令時刻	実施 時刻
	-								:
	-								:
	-								:
	-			(1L -> 2L)					:
給	1	-	藤枝変	1L LS	755	in	補助ループ		:
図	2	-	東海鉄道 藤枝	2L LS	L764	in			:
図	3	-	東海鉄道 藤枝	2L CB	764	in			:
図	4	-	東海鉄道 藤枝	1L CB	762	off			:
図	5	-	東海鉄道 藤枝	1L LS	L762	off			:
図	6	-	東海鉄道 藤枝	1L LS	L762	電気鎖錠付			:
給	7	-	藤枝変	1L LS	755	off	補助ループ		:
	-								:
	-								:
	-								:
給	1	-		<志太焼津1L 停止>					:
	-								:
	-								:
	-								:
給	1	-	志太変	志太焼津2L 再送電給電指令の措置		適用			:
	-								:
	-								:
	-								:
図	1	-	中外製薬 藤枝	1L LS 767 のラバ側		E付			:
	-								:
	-								:
	-								:
	-								:

図 10 操作手順票の出力例 (部分)

Fig. 10. Example of operation sheet.

LSしかないので一般に切換操作は実行できない。しかしLSの種類によっては、LSの両端の位相差が十分小さければ切換えが可能なものもあり、変電所BのLS構成でも停電することなく受電切換えを実行できる場合がある。そこで、このような状況で開閉器両端の位相差を十分小さくするために、補助ループを用いる。この手法は近くの変電所でループを構成することにより位相差を引き下げるものである。補助ループ構成の例を図8に示す。変電所Aで1L, 2Lがループされ、変電所BのLS両端の位相角が小さくなる。この結果、変電所Bの受電切換えが可能となる。

現実の手順作成では補助ループのための変電所は、固定された知識であり、補助ループの必要な需要家ごとに補助ループを構成する変電所を指定している。本システムではこの固定知識に加え、需要家と同一送電線にある変電所から、補助ループをつくるのに最適な変電所の選択のために、システムの探索、潮流計算、設備の許容限度を考慮する推論も準備している。

補助ループの手順は機器の構成に依存するので、各変電所ごとに手順作成メソッドが定義されており、切換手順が作成されると自動的にこのメソッドが起動され操作手順の中に補助ループが組込まれる。

6. プロトタイプシステム

本システムは、電圧階級が154 kV以下の支店給電所のシステムを対象としている。

図9にプロトタイプシステムの操作画面、図10に実際に出力される操作手順票の1部を示す。

図9の操作画面は運用計画支援システムと連係する予定で、グラフィック上のシステムを操作することによってシステムの状態を修正できる。システムの構成を作業実行時の状態に設定した後、あらかじめ運用計画支援システムに用意されている作業計画を選択し、目的の操作手順を作成する。プロトタイプシステムではシステムの状態設定は手動で行われているが、運用支援システムからシステム運用上のデータを得られれば、作業実行時のシステム状態を自動的に設定できる。

図10の手順表の指令種別の欄で、黒く反転している項目は給電所が自家設備(変電所、開閉所など)以外の設備に対して指令されるもので、開閉器の細かい操作まで手順が展開されている。また、<>で囲まれている指示は目的指令であるので、細かい操作に展開する必要がない。その他、アースの確認や特殊な措置の記述も、個々のオブジェクト内に停止内容のパターンに依存したデータとして出力内容が定義されてい

る。データの保守、拡張は停止内容のパターンごとに出力内容を追加、修正すればよい。

プロトタイプシステムは静岡支店給電所の実システムのデータを用いて開発した。変電所・開閉所が120箇所、需要家が169箇所を手順作成の対象としている。システムの規模は今のところ推論ルールが119、全階層のオブジェクト数が約7,000となっている。プロトタイプは操作管理票ならびに操作手順票をレーザービームプリンタで出力する。

7. おわりに

平常時操作手順作成システムへの知識処理の応用について、オブジェクト指向と階層型システム表現の適用を議論し、支店給電所のシステムを対象としたシステムのプロトタイプを開発した。プロトタイプはオブジェクト指向と階層型システム表現法によって、システム内の多種類の変電所、需要家に対して、システム切換えから需要家内の個々の開閉器操作までの詳細度の異なる多様な操作手順出力を可能としている。

本論文で議論したシステムの基本構成とシステム表現の技法は、特にシステムとアプリケーションに依存していないので、他のアプリケーションのエキスパートシステムへの拡張も容易である。今後の検討によって異種のアプリケーションを容易に統合できるシステム構成に拡張できると思われる。(平成4年4月30日受付)

文 献

- (1) 永田 武・奥寺祐直・北口 保・武田次男:「平常時操作指令手順の論理方程式」, 電学論 B, 109, 97 (平元-3)
- (2) 林, 他:「電力系統機器操作手順の自動作成」, 情報処理学論, 29, 488 (昭 63-5)
- (3) 沖 道雄・倉岡幸男, 他:「作業停電計画システムの開発研究」, 電気学会電力技術研資, PE-89-20 (平元)
- (4) 白崎 隆・小西達也, 他:「電力系統作業停止計画支援システムの開発」, 同上, PE-91-125 (平 3)
- (5) 長谷川次夫・田中 明, 他:「エキスパート手法を用いた電力系統操作支援システムの開発」, 同上, PE -90-82 (平 2)
- (6) 吉澤純一・高野富裕, 他:「階層的概念関係に基づく学習方式HCLと系統操作手順作成知識の獲得」, 同上, PE-91-34 (平 3)
- (7) 矢田公一・福井千尋, 他:「電力系統運用計画支援システムの構想」, 平 2 電気学会大会, No. 1033
- (8) 渡部・福井, 他:「電力系統の多層型知識表現法」, 電気学会電力技術研資, PE88-27 (昭 63)
- (9) 渡部・福井, 他:「電力系統用ドメインシェルの構想—多層型知識表現法を用いたシステム構成—」, 同上, PE90-79 (平 2)
- (10) 鈴木英行・尾出和也・幅 敏明:「定常時系統自動操作推論の開発」, 電学誌, 90, 1825 (昭 54-9)
- (11) T. Haba, S. Maeda, C. Fukui, D. Watanabe&M. Nomoto: "An Expert System For Switch Operation Planning In Line Dispatching", Proc. The Third Symposium On Expert Systems Application To Power Systems Tokyo-Kobe, p. 300 (1991)

幅 敏 明 (正員)

昭和 11 年 10 月 20 日生。39 年名古屋工業大学第 2 部電気工学科卒業。30 年中部電力(株)入社。平成 3 年(株)コンピュータ・テクノロジー・インテグレータに出向。この間、自動給電システムの開発、給電運用業務に従事。35 年電検 1 種。49 年電気学会論文賞, 58 年同進歩賞受賞。

福 井 千 尋 (正員)

昭和 32 年 8 月 15 日生。55 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社, 日立研究所にて電力系統の解析, 制御および AI 応用に関する研究に従事。62~63 年カーネギーメロン大学客員研究員。62 年電気学会論文賞受賞。人工知能学会, IEEE, AAAI 会員。

前 田 繁 男 (非会員)

昭和 21 年 6 月 6 日生。40 年中部電力(株)入社。平成元年から系統運用部に在籍し, 主に将来の系統運用体制構築, 推進に従事。

野 本 政 明 (非会員)

昭和 33 年 9 月 17 日生。59 年 3 月東北大学大学院修士課程精密工学専攻修了。同年 4 月(株)日立製作所入社, 同社大みか工場にて電力系統計算機制御システムの開発設計に従事, 現在に至る。

渡 部 悌 (正員)

昭和 37 年 10 月 8 日生。62 年 3 月京都大学工学部電気第 2 学科卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社, 日立研究所にてエキスパートシステムの電力系統制御への応用の研究に従事。情報処理学会会員。