超高圧系統全停電時の復旧操作における 電圧制御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 杉 原 弘 章 (中国電力)

Expert System for Voltage Control in Restoration of EHV Power System after Complete Blackout

Naoto Kakimoto, Member, Bunpin Lin, Member (Kyoto University), Hiroaki Sugihara,
Member (Cyugoku Electric Power Co.)

This paper deals with voltage control in restoration of EHV power system. Restoration of power system is performed by energizing transmission lines in sequence from initial power sources. These operations have already been programmed into the expert system developed by the authors. However, energizing no-load transmission lines causes some bus voltages to rise 20% more than rated voltages. Transformers can tolerate 20% voltage rise only for 1 minute. Here, we supplement the expert system with a function of checking bus voltages and reactive powers of initial sources, and automatically switching reactors on. Conditions for switching reactors and selecting appropriate reactors, are written by rules, hence it is easy to modify them. Target of voltage control is to keep bus voltages within $\pm 5\%$, and to keep reactive powers of generators within 30% of generator capacity. Applying this method to three basic restoration patterns of a model power system, shows that small adjustment of switching conditions is enough for two patterns, and some modification of restoration procedure is necessary for the other pattern to obtain good voltage profiles through the restoration process.

キーワード：超高圧系統，全停電，復旧操作，電圧制御，エキスパートシステム

1. はじめに

現代の電力系統は高い信頼度で電力を供給している。しかし、不測の事態により大規模な停電が生ずる可能性もある。社会的影響の大きさから、系統を迅速かつ安全に復旧するため、今日まで多くの検討がなされてきた^{(1)~(5)}。また、エキスパートシステムによる復旧が提案され、研究が行われている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

電力系統を復旧する初期の段階で問題となるものに、送電線の充電に伴う過電圧の発生がある⁽⁸⁾。定常的な過電圧を解消する方法として、次の二つが提案されている。一つは供給支障を最小化するよう目標系統

を作成した後、電圧問題を解決するための調相設備投入量を決定するものである⁽⁸⁾。もう一つの方法は、復旧電源から負荷や電源への復旧ルートを決め、過電圧の発生が予測されるときは、復旧ルート上の調相設備を投入するものである⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。これらの方法に共通していることは、操作後の目標系統または復旧ルートにおける電圧を検討の対象としている点である。前者を例にとると、目標系統に達した後、適当量の調相設備を投入すれば、確かに過電圧は解消されるであろう。しかし、一般に広域に及ぶ停電では、復旧に多くの操作が必要であり、目標系統に達するまでにかなりの時間を要する。操作の途中で過電圧が発生した場合、目

標系統に達してから調相設備を投入したのでは変圧器などの送電設備に長時間過電圧がかかることになる。電圧の大きさによっては、送電設備は短時間で損傷を受ける⁽¹¹⁾。また、事前に調相設備を投入しておくとも考えられるが、この場合には電圧が下がりすぎ、送電設備の正常な動作は保証されない。このように、ある一つの系統状態をもとに調相設備の投入量を決めるのは、復旧時における電圧制御の方法として十分ではない。

本論文では、上記の問題に対処するため、系統操作と平行してリアクトルを自動的に投入する方法を提案する。方針としては、操作ごとに潮流状態を調べ、母線の電圧や電源の無効電力供給量からリアクトルの投入が必要か否かを判断し、必要ならば適当な変電所のリアクトルを投入する方法をとる。潮流状態をフィードバックするため、操作手順の変更などにも柔軟に対応できる。また、リアクトルの投入条件や選定基準をプロダクションルールで表現し、これを既存の系統操作エキスパートシステム⁽¹²⁾⁽¹³⁾に組み込むことにより、操作とともにリアクトルの投入も自動化する。制御に必要な情報はオブジェクト表現を使って管理する。また、操作やリアクトル投入ごとに自動的に系統データを更新し、潮流計算により潮流状態を模擬する機能をシステムに付与する。この機能により、制御目標を満たすよう投入条件、選定基準、および操作手順を調整する。本論文では、第2章で対象系統の復旧時における電圧上昇について述べ、第3章では電圧制御のための基本方針を示す。第4章では基本方針に基づいて試作したシステムの具体的な内容を述べる。第5章では試作システムの検証および評価を行う。

2. 問題の記述

〈2・1〉 対象系統 図1に対象とする超高压モデル系統を示す。 $S_1 \sim S_{22}$ 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である。

〈2・2〉 復旧の流れ⁽¹²⁾⁽¹³⁾ 対象系統が全停電時に行うべき操作は、電気所ごとに操作規則により定められている。送電線の充電および送電線からの受電が主な操作である。各電気所が所定の操作を行うことにより系統の再構成が進む。初期電源の選択の仕方により図2に示す三つの復旧パターンが生じる。

パターン1は他系統変電所 N_1 を初期電源とするものである。復旧は矢印の方向に進む。操作規則により

図1 モデル系統
Fig. 1. Model system.

停電1分以降、 N_1 を起点として500 kV変電所が東から西へ順次復旧される。また、復旧された500 kV変電所から下位の275 kV変電所および発電所が復旧され、最終的には超高压系統すべてが復旧される。本パターンは対象系統における標準的な復旧方法である。

パターン2は何らかの原因で変電所 N_1 が初期電源として使用できないときに生ずる。操作規則により停電15分後、他系統の変電所 N_2 と N_3 を初期電源として復旧が始まる。まず N_2 から500 kV系と変電所 S_5 下位の275 kV系が復旧され、 N_3 からは変電所 S_8 を中心とする一帯が復旧される。しかし停電部分が残っているので、給電指令により S_2, S_3, S_4 から下位の275 kV系を復旧する。破線の矢印は給電指令による操作を示す。最後に S_8 で N_2 系と N_3 系を並列し、復旧が終了する。

パターン3は他系統の変電所がいずれも初期電源として使用できない最悪の場合に対し、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ものである。操作規則による復旧範囲はかなり限られている。そこで、給電指令により S_7, S_8 から下位の電気所を復旧した後、連絡線 L_8, L_{11} を充電して S_2, S_3 を復旧する。ここで、500 kV系と275 kV系のいずれを先に復旧するかで二つのケースに分かれる。(c)図では500 kV系をまず復旧した後、500 kV系から275 kV系を復旧している。一方、(d)図では予備線 L_{17}, L_{18} により S_9, S_{10} など275 kV系を復旧した後、500 kV系を復旧する。500 kV系の復旧は、 S_2 から L_3 を充電して S_2 と S_3 を並列し、続いて L_4, L_5, L_2 の順に充電する。

上記の操作は既にエキスパートシステムに組み込まれており、操作規則に記述されている自主操作は自動的に実行される⁽¹²⁾。また、給電指令によるべき操作は自動的に選択され、操作員に提示・確認の後、実行

(a) パターン 1

(b) パターン 2

(c) パターン 3-1

(d) パターン 3-2

図 2 復旧パターン

Fig. 2. Restoration patterns.

表 1 主要変電所の電圧 (pu)

Table 1. Voltages of main substations (pu).

変電所 S	復旧パターン			
	1	2	3-1	3-2
S ₁	1.050	1.181	1.293	1.274
S ₂	1.119	1.178	1.289	1.270
S ₃	1.188	1.158	1.300	1.280
S ₄	1.246	1.108	1.336	1.302
S ₅	1.276	1.053	1.345	1.309
S ₆	1.132	1.191	1.204	1.191
S ₇	1.128	1.187	1.200	1.187
S ₈	1.208	1.076	1.208	1.212
S ₉	1.251	1.112	1.341	1.292
S ₁₀	1.282	1.058	1.352	1.307

される⁽¹³⁾。しかし操作の進行に伴い、復旧した電気所の母線電圧を適正な範囲に維持することが新たな課題となる。以下、この点について検討する。

〈2・3〉 フェランチ現象 フェランチ現象とは、軽負荷の送電線を充電したとき送電線の充電容量の影響により、受電端電圧が送電端電圧よりも高くなる現象のことである。この現象は電圧階級が高くなるほど、また送電線のこう長が長くなるほど顕著になる。

表 1 は、復旧最終状態における主要変電所の電圧を潮流計算により求めたものである。ただし、各パターンとも初期電源のみを PV 指定とし、他の母線はすべて PQ 指定とした。初期電源から遠くなるほど電圧が高くなる傾向にあり、例えばパターン 1 では S₁, S₂, S₃, S₄, S₅ の順で電圧が高くなっている。電圧上昇の最大はパターン 1 で 28.2%，パターン 2 で 19.1%，パターン 3-1 で 35.2%，パターン 3-2 で 30.9% であり、いずれもかなり高い値となっている。また、初期電源の無効電力供給量はパターン 1 では 956 MVar であり、N₁ が有する調相容量をはるかに上回る。パターン 2 でも N₂ が 751 MVar, N₃ が 89 MVar と、大きな値を示す。パターン 3 では G₆ が 300~320 MVar, G₇ が 381~388 MVar となっている。それぞれ発電機の容量にほぼ等しい値であり、このような状況での運転は困難である。

以上、単に復旧手順により送電線の充電と受電を繰り返すだけでは母線電圧を適正な値に保てず、また、初期電源からの無効電力供給量も過大になることが確認された。従って、復旧を完全に行うには、送電線の手操作と平行して系統内のリアクトルを適宜投入し、電圧および無効電力を制御する必要がある。

次章では、復旧時の電圧制御について基本的な考え方を提案する。

3. 電圧制御の方法

〈3・1〉 制御目標 図3は系統が初期状態から最終状態へ移行するまでの操作とリアクトル投入の関係を概念的に示したものである。〈2・2〉節で述べたように、操作手順および系統の最終状態は初期電源の選び方により決まっている。問題は、リアクトルをどのように投入すれば電圧および無効電力を適正な範囲に保つことができるかである。これを具体的に書き表すと次のようになる。

〔制御目標〕 すべての系統操作とリアクトル投入の前後において

$$V_{li} \leq V_i \leq V_{ui} : \text{すべての母線 } i \cdots \cdots (1)$$

$$Q_{li} \leq Q_i \leq Q_{ui} : \text{すべての電源 } i \cdots \cdots (2)$$

ただし、 V_u, V_l : 電圧の目標上下限、 $Q_u,$

Q_l : 無効電力供給量の目標上下限

を満たすこと。

(1)式は電圧の目標範囲を示すが、事故時復旧中は定格電圧 $\pm 5\%$ となっている⁽¹⁾。(2)式は初期電源のほか、並列された発電機にも適用される。無効電力の目標値は電源により異なるが、並列発電機については定格容量の $\pm 30\%$ とする。

注意すべき点は、すべての操作とリアクトル投入の前後で、(1)、(2)式が満たされなければならないことである。既に述べたように、最終状態におけるリアクトル投入量を決定する⁽⁹⁾だけでは不十分である。なぜなら、最終状態に至るまでに電圧や無効電力が目標値を逸脱するからである。系統操作に要する時間を考えると、そのような状態が続くのは好ましくない。少なくとも逸脱が生じた時点で対処しなければならない。一方、系統操作ごとに最適なリアクトル配置を数理計画法などにより求めるのも一つの方法である。しかし、リアクトルの容量は送電線の充電容量と同程度であり、リアクトルの操作によっても電圧は大幅に変動する。系統操作のたびに多数のリアクトルを入切するのでは、その間に電圧や無効電力が大幅に変動する。

図3 系統操作とリアクトル投入
Fig.3. System operations and reactor switchings.

従って、リアクトルについても、投入ごとに系統の電圧や無効電力を適切な範囲に保つことが必要である。

〈3・2〉 制御方法 上述の制御目標を実現する一つの方法は、操作ごとに投入するリアクトルを事前に逐一検討するものである。しかし、系統内には多数のリアクトルがあり、投入時期および順序の組合せは膨大な数となって現実的ではない。本論文では、操作ごとに実際の潮流状態を調べ、それを参考にして適当なリアクトルを投入することにする。つまり、電圧や無効電力の状態からリアクトルの投入が必要か否かを判断し、更にどのリアクトルを投入するかを決定する。以下、具体的な方法について述べる。

(1) リアクトル投入の判断 リアクトル投入の判断基準となるのは、系統内の母線電圧および電源から供給する無効電力量である。投入条件を次に列挙する。

- (i) $V_i \geq 1.02$: 充電母線
- (ii) $Q_i \geq Q_{ei}$: $N_1 \sim N_3, G_6, G_7$
- (iii) $Q_i \geq 0.1 \times \text{発電機容量}$: $G_1 \sim G_5$
- (iv) $\sum Q_i \geq 0$: $G_1 \sim G_5$

ただし、 V : 母線電圧、 Q : 電源の無効電力供給量、 Q_e : 電源の無効電力供給量上限

無効電力は進相を正とする。投入条件(i)はすべての充電された母線の電圧を調べ、定格電圧より2%以上高い母線があればリアクトルを投入することを意味する。電圧の制御目標は定格電圧 $\pm 5\%$ であるが、送電線を充電すると電圧が数%上昇することがあるので事前に電圧を下げておく。条件(ii)は初期電源からの無効電力供給量を制限するものであり、供給量が上限 Q_e より多くなるとリアクトルを投入する。表2に発電機の容量を示すが、 G_6, G_7 は容量があまり大きくないので特に注意を要する。条件(iii)は火力発電所から供給する無効電力を抑制する。発電機はAVR運転により端子電圧を一定に保つが、無効電力の変動を発電機容量の $\pm 30\%$ 以内に収めるよう、ここでは Q が発電機容量の10%を超えた時点でリアクトルを投入す

表2 発電機容量 (MW)
Table 2. Capacity of generators (MW).

発電所	容量×台数
G_1	460
G_2	700
G_3	500
G_4	500×2
G_5	700
G_6	75×4
G_7	310×2

る。条件(iv)は火力発電所による無効電力供給量の総和が0を超えた時点でリアクトルを投入することを示す。条件(ii)～(iv)により、送電線の充電に伴う無効電力補償は主にリアクトルにより行われる。各条件の右辺の値は理論的に決められるものではなく、幾つかの値について検討を行い、その結果から適当なものを選ぶ必要がある。Q_cの影響については第5章で検討する。

(2) 投入リアクトルの選定 リアクトルの投入が必要と判断されると、次はどのリアクトルを投入するかを決定することになる。表3に変電所に設置されているリアクトルの容量を示す。リアクトルは系統内に均一に配置されているわけではなく、変電所ごとにかなり偏りがある。これらのリアクトルをどのような順序で投入するのが最適かを知ることは非常に困難である。ここでは簡単のため、次の選定基準に従って投入リアクトルを選定する。

(i) 最も母線電圧が高い変電所のリアクトルを、容量の小さい順に投入する。

(ii) リアクトルが配置されていない変電所や、すべてのリアクトルが既に投入された変電所では投入できないので、その次に電圧が高い変電所のリアクトルを投入する。

(iii) 母線電圧が定格電圧以下の変電所ではリアクトルを投入しない。

(iv) パターン3では、500 kV 送電線を充電する前、つまり 275 kV 系復旧中に 500 kV 変電所のリアクトルを投入しない。

(v) リアクトル投入の結果、ある母線の電圧が下がりがすぎたとしても、一度投入したリアクトルは開放しない。

基準(i)は、リアクトル投入の効果がかなり局所的であることに基づく。電圧の最も高い変電所のリアク

トルを投入するのが、電圧上昇を抑えるのに最も効果的である。また、投入したために電圧が目標値より下がる可能性も少ない。基準(ii)は電圧の高い変電所から次々と投入リアクトルを探していくことを示す。基準(iii)はリアクトルを投入することにより、電圧が目標値より下がりがすぎる危険を避けるためである。基準(iv)は 275 kV 送電線充電に伴う電圧および無効電力の調整は 275 kV 変電所のリアクトルにより行い、500 kV 変電所の大容量リアクトルの投入を防止するためである。基準(v)は、リアクトルの投入・開放がハンティングするのを避けるためである。これにより投入操作のみが行われることになる。なお、リアクトルの投入は投入条件(i)～(iv)を満たす電気所と電氣的につながっている変電所で行う。パターン2や3のように、充電部分が二つのブロックに分かれる場合は注意を要する。系統の接続状態の認識法については次章で述べる。

以上、リアクトルの投入法に関して投入条件および選定方法を規定した。しかし、それによって<3・1>節に掲げた制御目標が達成できるという保証はない。何らかの方法によりこれを検証する必要がある。

<3・3> 制御の検証 図4に制御の検証法を示す。まず、系統の操作手順を設定する。対象系統には、前述のような三つの復旧パターンがある。次にリアクトルの投入法を設定する。ここでは<3・2>節の投入条件および選定基準を採用する。設定した操作手順を投入法に基づいてシミュレーションを行い、制御目標が満たされるかどうか評価する。評価の結果、変更が必要であれば、まずリアクトルの投入法を調整する。しか

表 3 リアクトル容量 (MVA)
Table 3. Capacity of reactors (MVA).

発電所	容量×台数
S ₀	100×2
S ₁	100×4
S ₄	100×2
S ₅	60×1
S ₆	20×3
S ₈	20×3, 40×3
S ₉	40×1
S ₁₀	20×2
S ₁₁	20×2
S ₁₂	20×4
S ₁₃	40×1
S ₁₄	20×2

図 4 検証の手順

Fig. 4. Procedure for verification.

し投入法の調整で不十分なときは、操作手順にも修正を加える。変更により良好な制御結果が得られれば、そのときの操作手順および投入法を最終的なものとして採用する。操作手順の見直しもときには必要となるが、逆にこのような検討なしには操作手順の妥当性は保証されない。

一方、上記の検証には多くのシミュレーションが必要となる。それに伴う労力を軽減するにはできるだけ自動化することが望ましい。系統操作は以前に構築したエキスパートシステムにより自動的に行うことができる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。本論文では、リアクトルの投入についても、投入条件および選定基準をルールで記述し、エキスパートシステムに組み込むことにより自動化を試みる。この機能は検証だけでなく、実際の復旧において更に重要である。なぜなら、中央給電所の操作員がリアクトルの投入条件および選定基準を操作ごとに短時間で照合することは極めて困難なためである。また、操作による電圧や無効電力の変動を知るには、計算機で対話的にデータを更新しながら潮流計算を行うのが有効であることが知られている⁽¹⁴⁾。本論文では、これを更に効率化するため、系統操作やリアクトル投入ごとに自動的に系統データを更新し、潮流計算を行う機能をエキスパートシステムに付与する。次章では、これらの点を具体化した試作システムを提案する。

4. 試作システム

〈4・1〉 概要 図5に試作システムの概要を示す。破線の右側が新たに構築した電圧制御部であり、左側は既存の系統操作部である。系統には32の電気所があるが、系統操作部では各電気所ごとに操作内容を記述した知識源（ルールの集合）を用意している。いま、操作部で変電所Sが選択され、ある操作

図5 電圧制御の流れ
Fig. 5. Flow of voltage control.

が実行されると、電圧制御部ではまず系統の潮流状態を調査する。本論文では、潮流計算により潮流状態を模擬している。次に母線電圧や無効電力の値から、リアクトルの投入が必要か否かを判断する。不要ならば次の操作に移り、必要ならば投入リアクトルの選定を行う。そして投入可能なリアクトルがあれば投入する。投入した場合には、もう一度潮流状態を調査し、リアクトル投入が更に必要か調べる。上記のチェックは操作ごとに行うものとする。以下の部分では、電圧制御部における潮流計算、投入条件の照合、およびリアクトルの選定について、具体的な手法を述べる。

〈4・2〉 潮流計算 図6に本システムにおける潮流計算の方法を示す。電圧制御部はリスブ、潮流計算はフォートランで記述されており、両者間のデータ授受はファイルを介して行う。操作により系統の接続状態が変化するので、潮流計算用データを更新する必要がある。系統状態は電気的に接続された母線や送電線、変圧器の集合により表現する。母線の集合をノードブロック、送電線と変圧器の集合をブランチブロックと呼ぶ。図7は、復旧のパターン1により、 N_1 から S_2 まで復旧が進んだときの接続状態であり、ブロックは

ノードブロック：

$(N_1-500, S_1-500, S_2-500, S_2-275)$

ブランチブロック：

$(L_1-1, L_1-2, L_2-1, S_2-Tr_1, S_2-Tr_2)$

図6 潮流計算
Fig. 6. Load flow calculation.

図7 系統の接続状態
Fig. 7. Configuration of system.

S_2-500 母線：(甲, 乙) 電圧：1.03 位相：0.0 有効電力：0.0 無効電力：0.0 変圧器：(S_2-Tr_1, S_2-Tr_2)
L_2-1 両端：(S_1-500, S_2-500) S_1-500 ：on S_2-500 ：on 線路定数：(r, x, c)
S_2-Tr_2 両端：(S_2-500, S_2-275) S_2-500 ：on S_2-275 ：on 線路定数：(r, x, c) リアクトル：(100, 100)

図 8 オブジェクトの例
Fig. 8. Examples of objects.

となる。母線は二重母線であるが、ブスタイスイッチを投入し、一つの母線として扱う。母線や送電線の情報はオブジェクト形式で記述する。図 8 にオブジェクトの例を示す。電圧制御部では、操作のたびにブロック情報を更新するとともに、ブロックに属するノードやブランチの情報をオブジェクトから読み込んで潮流計算入力ファイルに書き込む。次に潮流計算プログラムを起動し、その出力ファイルから新たな電圧や無効電力の値を読み込んでノードオブジェクトの内容を更新する。

〈4・3〉 リアクトルの投入 電圧制御部では、以上のようにしてオブジェクトに記録された電圧や無効電力の値を参照することにより、リアクトルの投入が必要かどうかを判断する。リアクトルの投入判断および選定は別々の知識源で行う。各知識源は複数のプロダクションルールからなる。

(1) 投入の判断 投入判断に用いるルールを次に示す。

(i) もし、ある母線における電圧が定格電圧より 2% 以上高ければ、リアクトルを投入せよ。

(ii) もし、変電所 N_1 の供給する進相無効電力が 100 MVar 以上ならば、リアクトルを投入せよ。

.....
.....

(vii) もし、変電所 G_1 の供給する進相無効電力が 46 MVar 以上ならば、リアクトルを投入せよ。

.....
.....

(xii) もし、変電所 $G_1 \sim G_5$ の無効電力の和が 0 MVar 以上ならば、リアクトルを投入せよ。

上記のルールは、投入条件 (i) ~ (iv) をそのまま

ール形式に書き直したものであり、ルール (ii) ~ (vi) は条件 (ii) に、ルール (vii) ~ (xi) は条件 (iii) に対応する。ルールを順次調べ、一つでも成り立てばリアクトルの投入が必要と判断する。

(2) リアクトルの選定 投入が必要なブロックに属する母線を、電圧が高いものから順に、次のルールにより調べる。

(i) もし、電圧が定格以下なら、その母線にはリアクトルを投入しない。

(ii) もし、投入可能なリアクトルがなければ、その母線にはリアクトルを投入しない。

(iii) もし、500 kV 変電所の母線でなければ、その母線にリアクトルを投入する。

(iv) もし、初期電源が $N_1 \sim N_3$ なら、その母線にリアクトルを投入する。

(v) もし、初期電源が G_6, G_7 、かつ 500 kV 系復旧中なら、その母線にリアクトルを投入する。

ルール (i) から順に調べ、適合するものがあれば後のルールは調べない。リアクトルは正確には母線ではなく、変圧器の三次側に接続されている。図 8 の例から、母線 S_2-500 には変圧器 S_2-Tr_1, S_2-Tr_2 がつながり、 S_2-Tr_2 には容量 100 MA のリアクトル 2 台が設備されていることがわかる。投入時には容量を一符号としておく。このようにすることにより、リアクトルの投入状態を把握することができる。

以上、潮流計算およびリアクトル投入の具体的な方法を提案した。簡単にまとめると、本システムでは情報をオブジェクトで管理し、判断や選定をルールで行っている。これらの表現形式はモジュール性が高く、変更、追加、削除が容易である。次章では試作システムによって対象系統の電圧制御を行い、その有効性を検証する。

5. システムの検証と評価

〈5・1〉 投入条件の調整 リアクトルの投入は、投入条件 (i) ~ (iv) により制御される。従って、条件式右辺の値は、制御結果に大きな影響を及ぼす。ここでは、初期電源の無効電力供給量を制限する Q_c につき、その影響を調べる。表 4 (a) は、パターン 1 において、初期電源 N_1 の Q_c を変えた結果である。投入リアクトルの総量は 720 ~ 740 MVA であり、 Q_c による変化はあまりない。しかし、 N_1 の最大無効電力供給量 $Q_{\max}$ は 180 ~ 326 MVar の範囲で変化する。 N_1 の調相容量は 250 MVA であり、 Q_c をあまり大きくするのは適当でない。 $V_{\max}$ と $V_{\min}$ は系統を充電していく過程で生じる最大電圧と最小電圧である。 Q_c

を大きくすると、 $V_{\max}$, $V_{\min}$ とも、少しずつ上昇する。電圧の変動を定格の $\pm 5\%$ に抑え、かつ $Q_{\max}$ を抑えるには Q_c を 100~150 MVar とすればよい。(b), (c) はパターン 2 における制御結果である。ただし、初期電源は N_2 , N_3 であり、充電範囲がそれぞれ異なる。 Q_c によりリアクトルの投入量や N_2 , N_3 の無効電力供給量に若干の変化が見られるが、電圧はおおむね適当な範囲にある。初期電源により投入量などが大きく異なるのは、充電する系統の電圧階級による

表 4 電圧制御と Q_c の関係

Table 4. Relation between voltage control and Q_c .

(a) N_1 (パターン 1)

Q_c (MVar)	投入量 (MVA)	$V_{\max}$ (pu)	$V_{\min}$ (pu)	$Q_{\max}$ (MVar)
0	720	1.029	0.941	180
50	720	1.029	0.941	180
100	720	1.040	0.950	223
150	720	1.040	0.951	223
200	740	1.053	0.959	326

(b) N_2 (パターン 2)

Q_c (MVar)	投入量 (MVA)	$V_{\max}$ (pu)	$V_{\min}$ (pu)	$Q_{\max}$ (MVar)
0	600	1.017	0.945	206
50	600	1.017	0.945	206
100	580	1.024	0.949	206
150	580	1.045	0.954	206
200	560	1.046	0.955	330
250	560	1.046	0.955	330

(c) N_3 (パターン 2)

Q_c (MVar)	投入量 (MVA)	$V_{\max}$ (pu)	$V_{\min}$ (pu)	$Q_{\max}$ (MVar)
0	80	1.019	0.951	42
20	80	1.019	0.951	42
40	60	1.020	0.987	42
60	60	1.047	0.988	63
80	60	1.047	0.988	63
100	60	1.047	0.988	63

表 5 投入リアクトル (パターン 1)

Table 5. Operated reactors (pattern 1).

リアクトル S	(MVA)	操作内容	Q_s (MVar)	$V_{\max}$ (pu)	$V_{\min}$ (pu)
S_2	100	S_2 が L_2 より受電	180	1.009	0.987
S_2	100	S_2 から L_3 を充電	173	1.008	0.978
S_3	100	S_3 から L_4 を充電	223	1.034	0.986
S_3	100	"	120	1.008	0.969
S_4	100	S_4 から L_5 を充電	159	1.039	0.978
S_4	100	S_4 から L_{17} を充電	116	1.014	0.950
S_{10}	20	S_3 から L_6 を充電	134	1.040	0.985
S_6	60	"	116	1.027	0.964
S_{12}	20	S_3 から L_6 を充電	128	1.032	0.986
S_{10}	20	"	113	1.028	0.980

ものである。

表 5 は、パターン 1 の復旧過程でリアクトルがどのように投入されるかを示す。 N_1 の Q_c は 100 MVar とした。1 回目の投入は S_2 が L_2 から受電した後行われ、 S_2 で 100 MVar 投入されている。投入前の N_1 からの無効電力供給量 Q_s は 180 MVar である。これは S_1 にリアクトルがなく、 L_1 の 1, 2 号線と L_2 の 1 号線の充電容量 ($50.9 \times 2 + 77.1$) MVar を N_1 から供給しなければならないためである。投入は主に 500 kV 送電線操作時に行われるが、投入箇所は電圧や容量の関係から他の変電所となることがある。投入前の Q_s は常に 100 MVar 以上あり、投入条件を満たしている。 Q_s の最大は 223 MVar で、 S_3 が L_4 を充電した際に生じる。 $V_{\max}$ と $V_{\min}$ は投入前の系統最大電圧と投入後の最小電圧である。 $V_{\max}$ の最大は 1.040 pu で、 S_3 が L_6 を充電した際に生じる。一方、 $V_{\min}$ の最小値は 0.950 pu で、 S_4 でリアクトルを 100 MVA 投入した際に生じる。

<5・2> 系統操作の調整 表 6 (a) は、パターン

3 で 500 kV 系を優先復旧したときの結果である。ただし、 Q_c は G_6 , G_7 とも 0 MVar とした。ケース 1 は図 2 (c) に従って復旧を進め、ケース 2 では L_3 を充電する前に、 S_7 で S_2 , S_3 系を並列する。ケース 3 は、更に S_3 系の火力発電所 G_1 , G_3 , G_5 を並列し、その端子電圧を一定に保つ。電圧最大値はそれぞれ 1.086,

表 6 電圧制御と操作の関係

Table 6. Relation between voltage control and operation.

(a) パターン 3-1

	投入量 (MVA)	$V_{\max}$ (pu)	$V_{\min}$ (pu)	$Q_{\max}$ (MVar)				
				G_6	G_7	G_1	G_3	G_5
1	660	1.086	0.954	83	75	—	—	—
2	660	1.075	0.956	61	68	—	—	—
3	660	1.068	0.976	54	28	12	19	50
4	600	1.088	0.954	57	98	—	—	—
5	600	1.074	0.956	60	69	—	—	—
6	660	1.046	0.972	37	28	12	15	46

(b) パターン 3-2

	投入量 (MVA)	$V_{\max}$ (pu)	$V_{\min}$ (pu)	$Q_{\max}$ (MVar)				
				G_6	G_7	G_2	G_4	G_5
*	180	1.020	0.971	37	28	—	—	—
1	680	1.069	0.971	43	27	27	18	45
2	640	1.067	0.980	53	25	27	29	48
3	640	1.031	0.972	37	25	28	18	42
4	640	1.044	0.976	30	28	28	34	53
5	680	1.048	0.981	17	23	63	29	33
6	640	1.044	0.979	25	19	54	61	32
7	700	1.060	0.980	20	15	57	72	25

$G_1 \leq 12$, $G_3 \leq 21$

1.075, 1.068 pu であり、いずれも制御目標に達しない。ケース 4～6 では、ケース 3 で最大電圧が S_2 から L_3 を充電するときを生ずることに着目し、 S_2 の代わりに S_3 から L_3 を充電する。それぞれケース 1～3 に対応し、ケース 4, 5 は 1, 2 とあまり変わらない。しかし、ケース 6 では最大電圧が 1.046 pu, 最大電圧が 0.972 となり、制御目標を満たしている。 G_6, G_7 および火力発電機の無効電力も少なく、発電機容量の 10% 程度以下である。なお、 G_1, G_3, G_5 の中、 G_5 のみ並列でもほぼ同じ結果が得られる。以上から、500 kV 系の優先復旧には G_5 の並列と、 S_3 からの L_3 充電が必要であることがわかる。

表 6 (b) は 275 kV 系を優先復旧した結果である。 Q_c は G_6, G_7 とともに 0 MVar である。表の * は 275 kV 系復旧中の電圧と無効電力の変化である。 S_9 が予備線 L_{17} から受電する前に、 S_7 で S_2, S_3 系を並列しており、電圧、無効電力とも適当な値を示す。500 kV 送電線の充電は $G_1 \sim G_5$ を並列してから行う。七つのケースは最初に操作する変電所と送電線の組合せによる。ケース 1, 2 は S_2 から L_2, L_3 を、ケース 3, 4 は S_3 から L_3, L_4 を、ケース 5, 6 は S_4 から L_4, L_5 を、ケース 7 は S_5 から L_5 を、それぞれ最初に充電する。そして西へ順次充電し、その後東へ充電する。ケース 2 は図 2 (d) に対応する。表中の $V_{\max}, V_{\min}, Q_{\max}$ は 500 kV 系の操作に関するものである。ケース 3～6 では電圧が目標内にあり、発電機の無効電力も発電機容量の 10% 程度に抑えられている。 S_3 または S_4 から操作を始めるのが適当であるが、電圧的にはケース 3 が最も優れている。 $Q_{\max}$ が G_6, G_7 で若干大きい、275 kV 系復旧中とほぼ同じであり、問題とはならない。また、 G_5 が並列していれば G_1, G_3 の並列は必ずしも必要でない。

〈5・3〉 最終的な操作手順 復旧パターン 1 と 2 については、リアクトル投入条件を調整するだけでよく、操作手順は現在のままでよい。一方、パターン 3 については幾つかの変更が必要である。図 9 に変更後の復旧手順を示す。変更点は次のとおりである。

(1) 500 kV 系の優先復旧は G_5 が単独運転に成功し、すぐに並列できるときのみ行う。基本的には 275 kV 系を優先復旧し、火力発電所 $G_1 \sim G_5$ が並列してから 500 kV 系を復旧する。

(2) 275 kV 系の復旧においては、 S_9 が L_{17} から受電する前に S_7 で S_2 系と S_3 系を並列し、以後の電圧および無効電力の変動を抑制する。

(3) 500 kV 系の復旧は S_3 から L_3 を充電し、 S_2 と S_3 を接続してから、他の送電線を図 9 の順に充電

図 9 復旧パターン 3 (修正版)
Fig. 9. Restoration pattern 3 (revised).

する。

以上の操作はすべて給電指令により行うが、必要な指令が自動的に選択できるよう指令を追加登録した⁽¹³⁾。指令の数は S_7 における並列が 1、火力発電所の並列が 5、500 kV 送電線の充電操作が 7 である。操作数が図 9 より多いのは、逆向きの操作を加えたためである。これにより、 S_3 以外の変電所からも 500 kV 送電線を充電できる。ただし、操作には優先順位を設け、図の順に操作が選択されるようにしている。

以上の変更により、想定した三つの復旧パターンにおいて電圧および無効電力を常に適正な範囲に維持することが可能となった。これにより本論文の目標は一応達成された。また、復旧過程全体では約 70～130 回電圧制御部を通過するが、計算時間はルールの照合、潮流計算用データの更新などに約 8～10 s、潮流計算に約 2～5 s (計算機は FACOM-M 780) であった。また、すべての復旧操作作成に要する時間は約 1 s であり、計算速度の点でも問題はない。

〈5・4〉 評 価 本システムの特徴の一つは、系統の潮流状態に基づいてリアクトルの投入を行っていることである。これはフィードバック制御に相当するものであり、状況変化に対して柔軟に対応しうる、すなわちロバストであるという利点を有する。リアクトルを投入するもう一つの方法として、表 5 に従って操作ごとにリアクトルを投入する変電所および投入量を決め、それをルールとして明記することが考えられる。しかし、それでは何かの理由で操作手順に変更が生じた場合にうまく対応できない可能性がある。提案手法は表 6 (b) から明らかなように、少し制御結果が悪くなるが、手順の変更にも対応することができる。従って、本システムでは操作ごとにリアクトル投入の有無を記述することはしない。

もう一つの特徴は、リアクトルの投入判断や選定に

小数の比較的単純なルールを用いていることである。一般的に潮流状態から投入判断や選定を行うといっても、かなり具体的に乏しいものである。実際に行うには、判断および選定に必要な基準を明確なたちで書き表さねばならない。本システムでは制御上、必要と考えられる基準を幾つか列挙し、それをルールとして用いている。投入条件はパラメータを含んでおり、シミュレーションによりその値を調整することで、かなり良好な制御結果を得ることができた。ルールベース型システムの特徴として、ルールの追加、変更、削除が極めて容易である。従って、投入条件や選定基準の増減を容易に行うことができる。また、シミュレーションから得られる知見や系統運用者の知識を更に追加することもできる。これにより、制御性能の向上が図れるとともに、操作手順の変更にもより適切な対応が可能になると考えられる。

6. ま と め

本論文では、超高圧系統が全停電となった後の系統再構成時における電圧制御について検討した。以下にその結果をまとめる。

(1) フェランチ現象による電圧上昇を抑制するため、操作のたびに電圧および無効電力の状態を調べ、リアクトルを自動的に投入する手法を提案し、エキスパートシステムに組み込んだ。

(2) また、操作やリアクトル投入による系統状態の変化を潮流計算により自動的にシミュレーションする手法を提案し、その機能を追加した。

(3) シミュレーションの結果、パターン1と2についてはリアクトルの投入条件を調整すれば、適正な制御ができることが判明した。一方、パターン3では火力発電機の並列の有無や操作手順に配慮が必要であることが明らかとなった。得られた知見に基づいて、エキスパートシステムに変更を加えた。

(4) 以上の機能追加および変更により、対象系統の再構成を電圧面から安全に行えるようになった。なお、復旧過程で電圧制御に要した時間は、リアクトルの投入判断などに約8~10s、潮流計算に約2~5sであった。

今後は、系統再構成後における供給力回復に伴う負荷への供給や過負荷の解消について更に検討を進める予定である。

最後に、日ごろから御指導いただいております京都大学 林 宗明 名誉教授および本研究に協力された川内野寿博君に謝意を表します。

(平成5年1月22日受付、同5年8月26日再受付)

文 献

- (1) 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)
- (2) IEEE Committee Report: "Power system restoration—A task force report", *IEEE Trans., PWRS*, **PWRS-2**, 271 (1987)
- (3) IEEE Committee Report: "Power system restoration — The second task force report", *ibid.*, **PWRS-2**, 927 (1987)
- (4) IEEE Committee Report: "Special Consideration in Power System Restoration", *ibid.*, **PWRS-7**, 1409 (1992)
- (5) IEEE Committee Report: "Overvoltage Control during Restoration", *ibid.*, **PWRS-7**, 1464 (1992)
- (6) 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)
- (7) IEEE Committee Report: "New Approaches in Power System Restoration", *IEEE Trans., PWRS*, **PWRS-7**, 1428 (1992)
- (8) 藁科，他：「基幹電力系統における事故復旧操作ガイダンス方式」，電子論B，**109**, 49 (平元-2)
- (9) 藁科，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)
- (10) 金子，他：「火力プラントの動的な制約を考慮した電力系統自動復旧エキスパートシステム」，同上B，**110**, 286 (平2-4)
- (11) 調査専門委員会：「給電より見た電力機器運用限度」，電気学会技報(II部)，No.183 (昭60)
- (12) 垣本，他：「超高圧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」，電学論B，**110**, 495 (平2-6)
- (13) 垣本・林：「超高圧系統全停電時の系統再構成における給電指令の自動選択」，同上B，**113**, 613 (平5-6)
- (14) R. J. Kafka, et al.: "Role of interactive and control computers in the development of a system restoration plan", *IEEE Trans Power Apparatus Syst.*, **PAS-101**, 43 (1982)

垣 本 直 人 (正員)

昭和27年7月26日生。55年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。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。主として，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)

1957年12月16日生。1982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。

杉 原 弘 章 (正員)

昭和32年1月9日生。56年3月京都大学工学部電気工学科卒業。同年4月中国電力(株)入社。同社技術研究センター所属。電力系統関係の研究業務従事。