信頼度とコストのトレードオフ評価を考慮した 中央給電指令所向け潮流制御支援システム

正 員 東西田憲一(関西電力) 正 員 田村 滋(日立製作所)
非会員 松本 哲也(関西電力) 正 員 石田 隆張(日立製作所)
正 員 河田 謙一(関西電力) 正 員 福井 千尋(日立製作所)

Advanced Power Flow Control Monitoring System with Evaluation of Security Index
for the Next Generation Central Dispatching Center.

Norikazu TOSHIDA, Tetsuya MATSUMOTO, Ken'ichi KAWATA(The Kansai Electric Power Co., Inc.)
Shigeru TAMURA, Takaharu ISHIDA, Chihiro FUKUI(Hitachi, Ltd.)

This paper describes a new advanced security monitoring system for Energy Management System(EMS). In this paper, we propose a new concept called successional static monitoring. The successional static security monitoring system evaluates each snapshot which has different network state. It has been difficult for dynamic security monitoring to simulate all the restoration process, because actual restoration process includes change of network configuration and change of power supply, and all the restoration process can not be simulated successively. In order to realize this new concept, this system includes two simulators. One is Network Simulator that calculates load flow and frequency dynamic characteristic of each snapshot. The other is Dispatch Center Simulator that decides the various command to control generators and searches for the restoration routes when a black out occurs. It includes the intelligent dispatcher model that emulates the various actions of human operators. Also this system calculates the running cost of generation that satisfies trade-off for various security index.

With these simulators, this system evaluates the restoration time and estimates restorable loads after contingent faults through the all restoration process.

キーワード：中央給電指令所、信頼度監視制御、系統状態予測、線形計画法、最適潮流計算、トレードオフ

1. まえがき

中央給電指令所は500kV基幹系統の監視、全系の需給制御を行う系統運用の中核である。今後、基幹系統の外輪線重潮流化、全系の需給逼迫状況が予想されており、この状況のもとで電力の安定供給が困難になるものと予想される。そのため、万が一事故が発生した際に備え、系統状況の事前把握を行い、その結果に基づいて適切な予防制御を行うための発電機出力調整、系統切替の手順、およびそれらの実施の可否を信頼度とコストの両面を考慮しつつ慎重かつタイムリーに検討する必要がある。

一般に、信頼度維持とコストはトレードオフの関係にある。現状でのトレードオフの算定は、長年培った経験的知識、ならびに過去における系統履歴情報を豊富に持つ、中央給電指令所の運用者により行われてきた。ところが、先に述べたように今後ますます大規模化、複雑化する電力系統のもとでは、従来行ってきた人手による予防制御案の作成と、それらの実施可否の検討を行うことは次第に困難になりつつある。

以上の問題を解決し、先に述べた困難さを増す系統運用において、適切な予防制御を継続して行うために、従来人

手で行ってきた予防制御に必要な対策の立案支援を計算機で行う必要がある。このニーズをもとに本論では、中央給電指令所の監視制御機能の増強の一環として開発を進めた^{[1,2,3,4,5,6,7])}潮流制御支援システムについて報告する。

本支援システムは運用者に対し、現時点および将来時点の系統の信頼度を評価し、信頼度を維持し、かつコストを考慮した系統運用状態および系統構成案を提示する。本論で述べる信頼度とは、系統設備のN-1永久事故あるいはN-2永久事故後の静的な断面での、供給支障量や潮流負荷などを対象とする。また、基幹系統の事故は希頻度であるものの発生すると影響が大きい。このことを考慮して、事故発生確率は考慮せず、考慮すべき事故内容を前もって設定し確定的に取り扱う。以上の目的のために本システムでは、現時点から10時間先までの系統状態を推定する機能と、将来時点の信頼度を評価し予防制御のための対策立案を可能とする信頼度制約型最適潮流計算(Security-Constraint Optimal Load Flow)手法を開発した。この手法を用いることにより、将来時点の潮流状態に対して(1)潮流制約を考慮した事故発生前信頼度チェック、(2)事故発生後信頼度チェック、さらに(3)事故発生後における事故の影響度とそれに必要な

対策案を立案することが可能となった。さらに、必要な信頼度を維持するための対策案の増分コストを算出し、運用者がコストと信頼度のトレードオフの評価を行える機能を実現した。

2. 予測先行制御に基づく潮流制御支援システム

本章ではまず、中給全体システムにおける潮流制御支援機能の概要を述べる。次に潮流制御支援システムを構成する各機能中、まず系統状態予測機能と想定事故計算、および信頼度指標算出機能について説明する。

<2.1>潮流制御支援システムの概要 本システムは各機能ごとに計算サーバを設置した分散システムである。図1に示すように系統監視計算機では、まず30秒周期で状態推定を実行し、母線負荷実績を保存する。次に15分間隔の10時間先まで40断面の潮流状態予測計算、および系統信頼度算定を15分周期で実行する。運用者が監視に用いる当直卓(ワークステーション)では、この系統監視計算機が行った任意の計算結果の表示と取り込みが可能である。この情報をもとに、運用者が指定した時間の系統状態に対して、系統信頼度チェック、あるいは融通中継可能量計算を実行することが可能となっている。

<2.2>総需要予測と母線負荷量予測 本システムでは<2.1>にて述べたように、10時間先までの需給状況と潮流

図1 潮流制御支援システムの概要
Fig.1 Configuration of Power Flow Control System

状況を予測する。潮流状況の把握は直流法潮流計算をもとに行うため、各予測断面での変電所母線負荷が必要となる。このために必要な総需要予測手法と変電所母線負荷量の予測方式を以下に述べる。

(1) 総需要予測値の補正

総需要予測値の補正では、需要想定支援システムで作成した予想値と、現在実績との差をオンラインで自動補正する。この補正は10時間先までの予想値に対して行われる。その概要を図2に示す。処理内容を以下に示す。

(a) 偏差平均の算出

補正計算の起動時点から過去1時間分(3分毎の有効データ)の総需要実績と総需要予測値との偏差の平均(ΔP)を算出する。

(b) 総需要予測値の算出

起動時点より15分以後の総需要予測値に対して、(a)で算出した偏差の平均(ΔP)を上積みし総需要予測値を算出する。

なお、偏差平均が零になるケース(たとえば過去一時間の前半が正の偏差、後半が負の偏差)に対応するため、偏差の大きさに閾値を設け、その閾値を越えた場合にはその旨のメッセージを運用者に与える。

(2) 変電所別母線負荷量の予測

潮流予測に必要な将来時点での各変電所の母線負荷量を、過去の実績値と総需要予測値より予測する。

予測は各変電所毎に過去の実績データをもとに、まず母線負荷毎の総負荷量に対する比率を算出し、曜日、祝日などの区分により保存する。

$$(\text{母線負荷比率}) = (\text{当該母線実績負荷量}) \div (\text{総負荷実績量})$$

ただし

$$(\text{当該母線実績負荷量}) = (\text{母線有効電力潮流}) - (\text{大口電力合計}) + (\text{ローカル火力出力合計})$$

図2 総需要予測値の補正
Fig.2 Adjustment method of forecasted Total Demand

保存された母線負荷比率をもとに、以下の式にて当該母線負荷量の予測を行う。

$$(\text{母線負荷予測値}) = (\text{総負荷量}) \times (\text{母線負荷比率}) + (\text{大口電力合計})$$

なお、ここでの大口電力とは電力需要量が総需要とは比例しない産業負荷を意味する。

<2.3> 需給バランス計算および潮流状態予測 本機能では、<2.2>での総需要補正にて算出した総需要予測データと、当日予想データ等により、各種電源の運用方法に合致した需給バランス計算を行い、その結果をもとに将来時点での潮流状態を予測する(図3)。

(1) 需給バランス計算

本機能では、まず以下の当日/翌日運用計画情報を収集する。

- ・ 10時間先までの各断面における系統の作業停止や系統構成の変更予定
- ・ 水力出力スケジュール
- ・ 電力融通スケジュール
- ・ 火力並解列スケジュール
- ・ 火力出力運用上下限値
- ・ 原子力/他社火力出力スケジュール

上記の情報をもとに各断面の供給予備力を算出する。予備力が不足していれば揚水発電を、余剰していれば揚水動力を並列する。なお、その並列は、各断面の上ダム発電可

能量と下ダム揚水可能量を考慮しながら行う。すなわち揚水発電は上ダム発電可能量の大きいものから、揚水動力は下ダム揚水可能量の大きいものから並列する。

以上より、供給力のうち火力発電機が担うべき火力分担量を算出する。火力発電機は発電機出力の変化速度を考慮するが、もし火力分担量が火力発電機で担えない場合、火力機の応答速度を再調整し、配分量を火力発電機で担えるように修正する。なお図3中での発電量と負荷量のアンバランスを負荷に再配分とは、負荷の大きさによってアンバランス分を按分することを意味する。

以上のバランス計算の結果より、供給信頼度指標として供給予備力を算出する。

(2) 潮流状態予測

以上の結果を用いて、超高圧系送電線の潮流を運用目標値以内に収めるために潮流制約付きELD(経済負荷配分)計算を実施し、火力発電機の出力を決定する。送電線潮流が制約違反を起こした場合、火力の出力調整および揚水発電の出力調整を実施する。本システムではどちらから優先して変更するかモード選択が運用者によって可能となっている。

なお、出力調整では制約解消できない場合は、自動的に揚水発電/動力の差し替えおよび並解列模擬を行い、できるだけ潮流を制約内に納めようとする。

以上の処理を各時間断面毎に行い潮流状態を作成する。

<2.4> 想定事故計算と系統信頼度算定 本機能では潮流予測計算で作成した10時間先までの系統において、想定事故計算・潮流違反チェックにより将来系統の問題箇所を提示する。本システムでの想定事故計算は、以下に示す自動想定事故計算、手動想定事故計算、任意想定事故計算からなる。

(1) 自動想定事故計算

15分毎に運用者が事前に設定してある事故ケースについて想定事故計算を実施する。

(2) 手動想定事故計算

15分毎に実行する自動想定事故計算を実行中に実系統の状態が大きく変わった場合、その状態をベースに想定事故計算を実施するため、運用者による割り込みを可能としている。

(3) 任意想定事故計算

運用者が任意の1断面の系統状況(系統構成、負荷量など)を設定し、任意の事故ケースについて計算を実行する。

以上の想定事故計算では周波数計算、経済負荷配分計算、総発電量算出計算、潮流計算等を用いて、以下に示す信頼度指標を算出する(表1)。

(a) 供給信頼度

- ・ 供給予備率
- ・ ブロック予備率(部分系統毎の供給予備率)
- ・ 追従予備率

図3 需給バランス計算および潮流値予測
Fig.3 Load flow forecasting functions

表1 想定事故計算にて算出する信頼度指標
Table1 Reliability Index for Contingency Evaluation

信頼度指標		算出に用いるアプリケーション
供給信頼度	供給予備率	周波数計算、ELD(経済負荷配分) 総発電量計算、潮流計算
	ブロック予備率	
	追従予備率	
	変電所母線電圧	
系統信頼度	潮流限度(2cct)	潮流計算 事故復旧模擬
	潮流限度(1cct)	
	供給支障量	
	復旧時間	

- ・ 変電所母線電圧
- (b)系統信頼度
 - ・ 潮流限度(2cct、1cct)
 - ・ 供給支障量
 - ・ 復旧時間

3. 運用者支援のためのトレードオフ機能

従来の給電所では前記の想定事故計算の結果をもとに、信頼度を維持する予防制御法を手作業で求めることが多かった。これに対し本システムでは、このような事前検討の省力化と図ると同時に、効率的な予防制御ガイダンスの提示を目的として、自動的に信頼度を維持するための対策候補を立案するトレードオフ機能を開発した。予防制御ガイダンスを提示する根拠として、本システムの特徴は、従来あいまいな関係にあった発電コストと信頼度の関係を定量化して評価し、どの予防制御ガイダンスが適切かを判断するための材料を運用者に与える点である。

以下では開発したトレードオフ機能の処理の概要について説明する。

<3.1>トレードオフ機能の概要 図4にトレードオフ機能の処理の流れを示す。この機能ではまず前記した想定事故計算結果中、信頼度指標違反が発生するケースを運用者が選択する。選択したケースに対して発電機持ち替え検討と系統切替対策検討を行い、それぞれの検討を行った際の発電コストの増分と信頼度指標を算出する。これらの結果の中から運用者は最も適切な予防制御案を選択することが可能となる。

次に、各発電機持ち替え機能と系統切替機能の内容について説明する。

<3.2> 発電機出力調整機能 発電機出力調整機能は、運用者が選択した時間断面に対して、発電機出力調整による潮流制約付き最適潮流計算または、運用者マニュアル設定(発電機出力設定)による潮流計算を実施するとともに、発電機出力調整量に対する火力発電機の燃料コスト増減量を算出する。潮流制約付き最適潮流計算は、系統構成が放射状である場合、信頼度の低い送電線を境界として分割した

部分系統間の発電機持ち替えにより、容易に潮流調整が可能である。しかし、系統切替時のループ運用ではこのような簡易的な方法の適用は困難である。そこで、本機能ではループ系統時の潮流調整を考慮し、線形計画問題として定式化した潮流制約付き最適潮流計算を実施する^[8,9]。また、ここでは同時にループ系統での潮流調整を支援するために、各母線の電力調整に対する線路潮流の感度を算出する機能も併せ持つ。

潮流制約付き最適潮流計算の定式化を以下に示す。

線形計画問題の定式化

目的関数

$$f(\Delta P) = C \cdot \Delta P \rightarrow \min$$

ただし

C : 発電機の燃料特性係数

ΔP : 発電量の変化分を表すベクトル

不等式制約条件

$$L_j^{\min} \leq A_j \cdot \Delta P \leq L_j^{\max} \quad (\text{for } j = 1 \dots s)$$

ただし

$$L_j^{\min} \leq \Delta P_j \leq L_j^{\max} \quad (\text{for } j = 1 \dots n): \text{発電機出力上下限制約}$$

$$L_j^{\min} \leq A_j \Delta P \leq L_j^{\max} \quad (\text{for } j = n+1 \dots s): \text{送電線潮流}$$

上下限制約

A_j : 係数行列

図4 トレードオフ機能の概要
Fig. 4 Outline of 'Trade-off' Function

潮流制御支援システムが対象としている中央給電指令所管轄の系統では、持ち替えを行う発電機の台数よりも、送電線に関する制約条件数の方がはるかに多い。この条件のもとで通常のシンプレックス法を用いて、上記にて定式化した線形計画問題を解く場合には、計算処理時間が大きくなる。一方、ここでの最適潮流計算はオンラインで実施するに耐えられる計算処理時間が要求される。この条件を満たすために、本システムでは定式化した線形計画問題を双対問題として再定式化を行い、計算処理時間の短縮を実現している。この効果を示す一例として、40時点の予測断面に対して、発電機調整を5時点で必要としたケースでは、発電機調整処理に必要とする計算時間が数100(msec)である結果を実システム上にて得ている。なお、万一シンプレックス法にて可能解が存在しない場合には、運用者にメッセージを与えて対策の再検討を促す。

<3.3> 系統切替機能 系統切替機能では、前記した想定事故計算結果より得られた系統の問題箇所に対し、運用者が行うべき最適な系統操作決定を支援する。具体的には、予め考えられる系統操作手順を用いて対象系統を切り替えた場合のそれぞれの発電機持ち替え量、増分コスト、過負荷解消時間の算出と提示を行う。ここでの系統パターンの作成は問題箇所が発生する潮流予測断面に対して随時行う。また、系統切替により制約解消を図る場合、切替ステップで必要な潮流調整方法や、切替後の制約解消のための増分コストも併せて提示する。

(a)各系統操作手順に対する計算

考えられる系統切替ケースの各ステップにおける操作手順(CB・LSの入/切、位相角チェックの要否)を設定し、系統切替操作手順として運用者が予め登録する。なお、系統切替ケースは最大5ケースとし、各ケースには最大5つの系統切替操作手順を定義する。

(b)系統切替ケースに対する潮流チェック

対策立案の対象となる潮流断面を選択し、(a)にて登録されている系統切替ケースに対して、系統切替後の系統に対する潮流制約の設定や母線負荷の調整等を行い、潮流計算や想定事故計算により過負荷解消等の評価を行う。

(c)系統切替ケースに対する操作手順毎の計算

(b)での信頼度計算の結果より、信頼度維持に効果的と思われる系統切替ケースを運用者が選択し、操作ステップ毎に、系統切替時の位相差調整に必要な発電機出力調整を、自動計算またはマニュアル設定により算出する。

(a),(b),(c)の結果より、問題箇所の解消の可否、および対策に伴う増分コストについて計算した結果を各系統切替ケース毎に表示する。

これらの結果は図5に示すように発電機持ち替えの場合

図5 トレードオフ機能出力結果の一例
Fig. 5 An Output Example of Calculation of 'Trade-off' Function

は先に設定した計算期間中の発電コストの合計と、発電機出力を表示し、過負荷解消系統切替ケースでは系統操作手順とともに解消の可否と増分コストを表示する。最終的に<3.2>、<3.3>にて得られた予防制御ガイダンスの中から最適と思われる一つを選択する。

<3.4>融通中継可能量計算 関西電力は中西地域以西から東部へ流れる融通電力の中継点となるため、系統信頼度を維持しながらどれだけ融通中継電力を増やすことが可能かを決定できなければならない。

本計算は、連系線潮流増加と融通中継送電線潮流の感度を用いて融通中継送電線が運用目標値をオーバーしない連系線潮流増加量を算出する。なお、運用目標値は固定ではなく、信頼度レベルに応じた運用目標値を運用者が設定可能である。

4. 信頼度指標と評価ランク

前記した想定事故に対する信頼度維持対策案は、信頼度評価指標(供給信頼度、系統信頼度)とコスト増分評価指標の観点から、想定事故ケースに対する可能解(実現可能な対策案)の集合となる。本システムでは最終的な意思決定を運用者に仰ぐため、得られた複数の対策案を以下の3種類の評価ランク概念に分類する。

(1)Green ゾーン

系統運用が比較的楽で、自社内供給力にて対策可能な場合

(2)Yellow ゾーン

系統運用は比較的厳しく、他社への融通要請、あるいはガスタービン発電機の起動が必要な場合

(3)Red ゾーン

系統運用は計り知れないほど厳しく、一般負荷制限、あるいは瞬調が伴う

2章、3章で得られた想定事故後、あるいは予防制御ガイ

表2 評価ランクを考慮した信頼度表示例
Table 2. An Example of Security Index Display.

信頼度指標		Red Zone	Yellow Zone	Green Zone
供給信頼度	供給予備率			
	ブロック予備率			
	追従予備率			
	変電所母線電圧			
系統信頼度	潮流限度(2cct)			
	潮流限度(1cct)			
	供給支障量			
	復旧時間			

ダンスを実施した後の信頼度指標が、表2中のいずれの欄に位置するかを視覚的に判断することにより、それぞれの対策案に対し、信頼度が現在どの程度であるかを視覚的に表現し、運用者の統合的な判断を行う手助けとなっている(表2)。

5. おわりに

本潮流制御支援システムは、平成7年6月より関西電力中央給電指令所にて、実運用を開始している。今後は本システムを増強するために、電圧・無効電力監視、安定度監視システムの開発を行い、監視機能の充実を計る予定である。

(平成9年4月25日受付、同9年9月30日再受付)

文 献

- [1] 東西田・田村・中田：「系統運用信頼度監視システムの開発」、平成4年電気学会電力・エネルギー部門大会, 1992, No. 153.
- [2] 吉川・中島・大久保・田村・中田・川上：「運用者の指令操作を考慮した電力系統信頼度監視システムの開発」電気学会電力技術研究会資料PE-93-19(1993).
- [3] S. Higashi, H. Nakajima, M. Ookubo, S. Tamura, K. Morita, C. Fukui, The Advanced Security Monitoring System to Simulate the Network Dynamics Controlled by Operator. Proceedings of the IASTED Wakayama, Japan, 1994, 40-43.
- [4] M. Yoshikawa, H. Nakajima, M. Ookubo, H. Kudou, S. Tamura, Advanced Security Monitoring System for a New Control Center. Proceedings of the ICPST'94 Beijing, China, 1994, 821-824.
- [5] 中島・大久保・松本・石田・田村：「次期中央給電指令所向け数時間先潮流状態予測(DPF)システムの開発」平成7年電気学会全国大会 1198(1995).
- [6] M. Yoshikawa, N. Toshida, T. Matsumoto, H. Kudou, T. Ishida, S. Tamura, Advanced Security Monitoring System Incorporated with Intelligent Operator Models. Proceedings of the ICEE'95 Taejon Korea, 1995, 271-274.
- [7] 野原・松村・松本・田村・石田：「予測先行制御に基づく中央給電指令所向け潮流制御支援システム」電気学会電力技術研究会資料PE-95-168(1995).

- [8] B. Stott, E. Hobson :「Power System Security Control Calculations Using Linear Programming, Part I」, IEEE Trans. PAS-97(1978), 1713-1720
- [9] B. Stott, E. Hobson :「Power System Security Control Calculations Using Linear Programming, Part II」, IEEE Trans. PAS-97(1978), 1721-1737

東西田憲一(正員)

1959年12月18日生。1983年神戸大学工学部電子工学科卒業。同年関西電力(株)入社、中央給電指令所運用技術者を経て、現在電力システム室系統技術課副長。主に電力システムの運用・制御方式の開発に従事。

松本 哲也(非会員)

1968年5月5日生。1991年京都大学工学部電気工学第二学科卒業。同年関西電力(株)入社、現在電力システム室系統技術課に所属。主に電力システムの運用・制御方式の開発に従事。

河田 謙一(正員)

1952年2月9日生。1977年大阪大学大学院工学研究科電子専攻修士課程修了。同年関西電力(株)入社、現在電力システム室系統技術課課長。主に電力システムの運用・制御保護の開発に従事。

田村 滋(正員)

1957年7月20日生。1983年3月早稲田大学大学院工学研究科電気工学専攻終了。同年4月(株)日立製作所入社、日立研究所にて電力システムの解析、制御およびAI応用に関する研究に従事。1993年より同社大みか工場にて中央給電指令所向けアドバンストソフトウェア開発に従事。

石田 隆張(正員)

1965年2月5日生。1990年北海道大学大学院工学研究科情報工学専攻修了。同年日立製作所入社。以来日立研究所にて電力系統制御システムの開発研究に従事。情報処理学会、日本ファジィ学会、IEEE 会員。

福井 千尋(正員)

1957年8月15日生。1980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システムの解析、制御およびAI応用に関する研究に従事。1987～1988年カーネギーメロン大学客員研究員。1987年電気学会論文賞受賞。人工知能学会、IEEE、AAAI 会員。