

電力システムのセキュリティ制御のための 意思決定支援システムの構築

長谷川 淳, 北 裕幸

1. はじめに

高度情報化の進展, 都市機能の高度化・多様化, 制御しやすくクリーンなエネルギーへの指向などの諸要因によって, 電力需要は経済成長を上回る伸び率で増加している. そのため, 電力の安定供給に対する社会の要請はより一層の高まりをみせている.

電力システムの大規模停電は事故波及に起因していることが多い. 近年の電力システムは, 部分系統間や構成要素間の相互依存性を一層強めてきており, 事故波及の可能性は増大している状況にある. このため, 事故による影響を極力抑制して系統全体の信頼性を高めること, すなわちセキュリティの確保が重要な課題となっている.

セキュリティの確保は, 系統計画面および系統運用面の双方から検討されているが, ここでは特に系統運用面に焦点を当て, セキュリティ監視および制御の考え方, 技術の現状と今後の可能性などについて概説する.

2. 電力システムセキュリティの基本概念

2.1 電力システムにおけるセキュリティとは?

電力システムのセキュリティは, たとえ系統内に事故などに起因する擾乱が発生したとしても, 事故の波及による大規模停電を引き起こさずことなく安定に電力供給を継続できることを表わす概念である. 電力システムでの1次的事故の発生を完全に回避することは不可能なことである. しかし, この1次的事故を引き金として事故がつぎつぎと拡大波及し, もともと健全であった部分までも故障させる, いわゆる事故波及は, 系統構成や系統運用状態のいかにきわめて大きく関係しているから, 適切な対策を講じることでその発生を十分に制御することが可能である.

はせがわ じゅん, きた ひろゆき
北海道大学 工学部 電気工学科
〒060 札幌市北区北13条西8丁目

セキュリティを系統運用面から確保する対策は, 変化する系統状態に応じてオンラインでセキュリティを監視するとともに, 必要に応じて運用状態を適切に制御することであり, 設備の最大限有効活用と運用コストの低減をもはかったより信頼性の高い系統運用を可能とする.

この運用段階での制御がセキュリティ制御である.

2.2 セキュリティ監視制御の基本的考え方

運用面からセキュリティを維持する基本的考え方は, 1967年に, Dy Liacco により体系的に提案された[1]. この考え方は, 基本的には, 電力システムの状態を常時的確に把握し(セキュリティ監視), 問題があればその状態に最も適した制御を実施して(セキュリティ制御), セキュリティを高度に維持しようというものである.

電力システムの運用状態は, 負荷の変化, 発電所や送電線の開閉列, 事故の発生などに伴い時々刻々変化するが, セキュリティ面からは, 正常状態, 調整可能正常状態, 警戒状態, 調整可能緊急状態, 調整不可能緊急状態および復旧状態に分類できる. 図1はこれらの状態間の遷移を表わしており, 実線の矢印は負荷変化や事故などによる状態の遷移を, 点線は各状態でのセキュリティを維持するための制御を示している. なお, 各状態は次のように定義されている[2].

(1) 正常状態——レベル1:

停電はなく, 想定される事故の中には事故波及の原因となるものもない. 特別な制御は不要である.

(2) 調整可能正常状態——レベル2:

停電はない. いくつかの事故発生に対しては事故波及を引き起こすが, そのいずれも事故後の適切な制御動作により停電を起こさずに回避できる. この状態では, 事故前に特別な制御を必要としないが, この状態がなお不満であれば, レベル1へ移行させるための制御(予防制御)が必要である.

(3) 警戒状態——レベル3:

停電はない. いくつかの事故発生に対しては事故波及を引き起こし, しかも事故後にいずれかの負荷を停

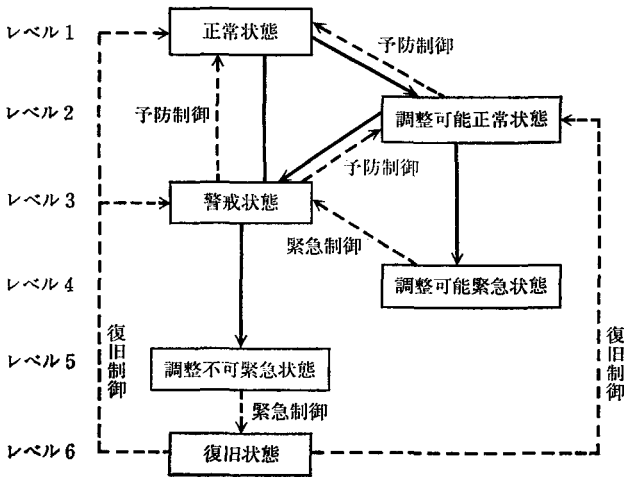


図 1 セキュリティレベルと制御

電させなければこの原因を解消できない。そのためこの状態では、レベル 1 または 2 に状態を移行させる制御（予防制御）が必要となる。

(4) 調整可能緊急状態——レベル 4 :

停電はないが、事故発生によりすでに事故波及の原因を生じている。しかしこれらの原因は、適当な制御により停電を起こさずに解消できるので、ただちにそ

のための制御（緊急制御）が必要である。

(5) 調整不可能緊急状態——レベル 5 :

停電はないが、事故発生によりすでに事故波及の原因を生じている。しかもこれらの原因はいずれかの負荷を停電させない限り解消できないので、直ちに適切な負荷の遮断を必要とする（緊急制御）。

(6) 復旧状態——レベル 6 :

停電が発生している。そのため、停電を速やかに解消するような制御が必要である（復旧制御）。

2.3 セキュリティ監視制御の位置づけ

電力系統の運用は現状においてもかなり自動化が進んでいるが、各電力会社とも、さらに高度な系統運用総合自動化システムを実現するため多くの開発努力を払ってきている。図 2 は近未来の系統運用総合自動化システムの制御機能ブロック図を、中核をなす中央給電指令所について例示したものであり、東北電力幹において現在開発が推進されているシステム例である[3]。同図の、状態変化監視、信頼度監視、信頼度制御の機能ブロックがセキュリティ監視制御機能に相当しており、システム高度化の中核機能となっている。

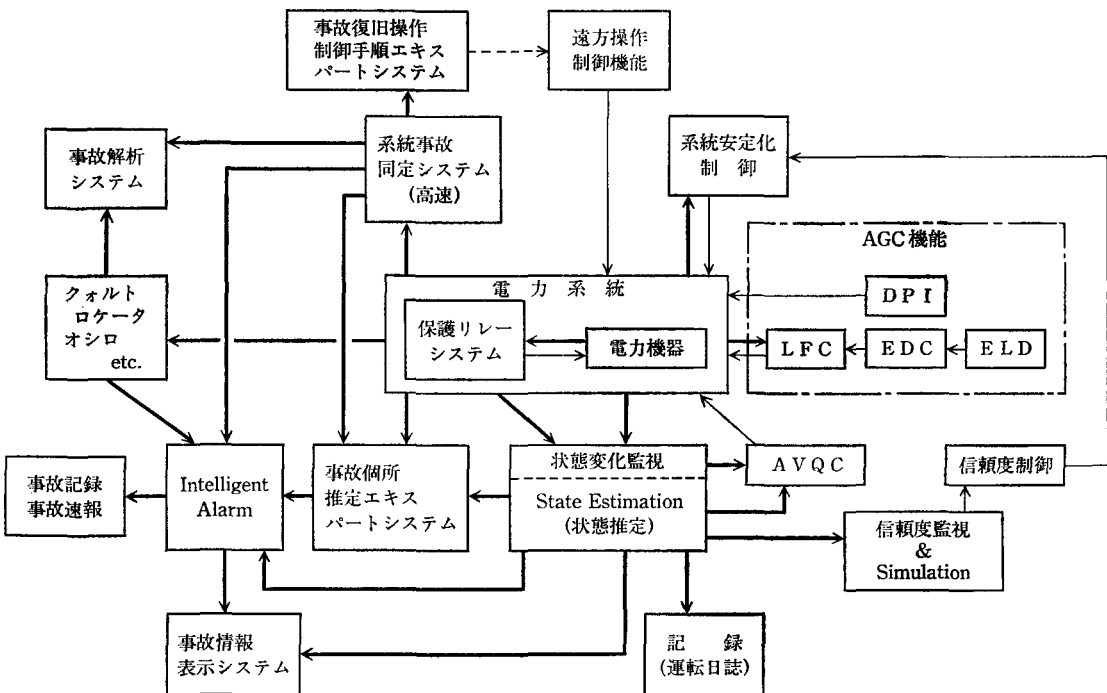


図 2 系統運用総合自動化システムの例

系統運用総合自動化の最終目標は計算機を中核とする完全自動化である。セキュリティ監視制御機能も同様であり、これに向けて次の4つの段階を踏んで最も合理的な自動化へと進んでいる。

- (1) 自動化レベル1(系統監視)：生情報が加工されずに表示され、運転員がそれを見て判断する段階
- (2) 自動化レベル2(系統状態評価)：計算機により入力情報が運転員の判断・意思決定に便利なように加工処理・表示され、運転員はこれを見て、必要な対策を検討する段階
- (3) 自動化レベル3(対策表示)：計算機が入力情報にもとづいて系統の状態を評価し、必要に応じてとるべき対策を立案して、ガイドラインとして表示する段階。運転員はこれをもとに対策を実施に移す。
- (4) 自動化レベル4(自動制御)：計算機により完全自動制御が行なわれる段階。この段階でも、運転員の適応性・創造性に依存する部分が残るものの、それはごく限られた範囲にとどまる。

現状の自動化レベルは、系統運用に関する多くの機能に対して、レベル3あるいはレベル4にある。しかし、セキュリティ監視制御機能について見れば、その多くは実現レベルが低く、機能強化が強く求められている。

3. 総合セキュリティ監視制御 (ISMAC) システム

3.1 セキュリティ監視制御の一般的流れ

セキュリティ監視制御は、一般に以下のような流れに沿ってなされるものと考えられる。

ステップ1(セキュリティ監視)：リアルタイムの系統の観測を用いて、現在の系統運用状態に事故波及を引き起こす原因が生じているか否かを同定する。もしすでに緊急状態にあるならばステップ4に、緊急状態にはないが停電があればステップ5に、またそれ以外ならばステップ2に進む。

ステップ2(セキュリティ評価)：あらかじめ設定された一連の想定事故に対して、その事故が発生したとき系統が緊急状態に陥る危険性はないかどうかを評価する。

ステップ3(予防制御)：もし系統が不安全(緊急状態を引き起こす想定事故が少なくとも1つある)であるならば、系統をできる限り安全な状態に移行させるために取られるべき予防制御方を決定する。

ステップ4(緊急制御)：系統を事故波及を引き起こす原因のない状態にするための適切な制御を実行する。

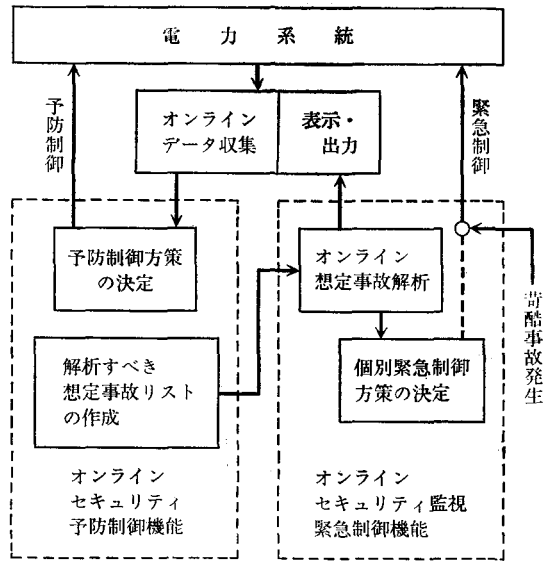


図3 総合セキュリティ監視制御システム

ステップ5(復旧制御)：停電負荷を順次復旧する。

3.2 ISMACシステムの基本構成

図3は、オンライン運用での実現をめざして筆者らが想定し研究開発を進めている総合セキュリティ監視制御(Integrated Security Monitoring And Control, 略称 ISMAC) システムの構成である[4]。

本システムは、基本的には次の3つの機能から構成されており、前述のステップ5(復旧制御)の部分を除く各ステップをカバーするシステムとなっている。

- (1) オンラインデータ収集機能[5]
- (2) オンラインセキュリティ予防制御機能[6]~[8]
- (3) オンラインセキュリティ監視・緊急制御機能[9]

(1)の機能は、現在の電力系統の状態(機器や送電線などの開閉列状態、電圧や潮流の分布状態)を常時、正確に把握し、その最新情報を次の予防および緊急制御機能に対し基礎データとして提供するものである。この機能においては状態推定技法が中心的な役割を担うが、数分~数時間先の負荷の推定・予測も重要である。

(2)の機能は、予想されるすべての事故ケースについて事故後の系統状態を解析する(想定事故解析)[10]と同時に、それらの事故ができるだけ他へ波及しないようにあらかじめ事故前の状態を安全側へ移行させておこうとするものである。この予防制御方は、たとえば20~30分ごとに立案・実施される。もちろん、この予防制御を実施したとしても事故波及を抑えきれないような想定事故も存在し得るから、これらを想定苛酷事故としてリス

トアップ(想定事故選択)するとともに、(3)の機能の一部として対策を別途考える必要がある。

(3)の機能は、リストアップされた想定苛酷事故に対しオンラインでその影響を監視することと、事故波及を速やかにくい止めるために事故発生後にとるべき緊急制御方策をあらかじめ立案・リストしておくことである。実際に当該事故の発生が検知されたときには、リストされていた緊急制御がただちに実施されることになる。緊急制御立案の対象となる過酷事故の数とその苛酷さの度合いは、(2)の予防制御の実施の結果ある程度抑制されているから、より頻繁(たとえば1~5分ごと)にきめ細かく立案しておくことが可能になると考えられる。

3.3 予防・緊急制御方策立案問題の構造と解法

2.2で述べた状態レベルで表現すれば、予防制御、緊急制御とともに、現在の状態レベルを他の状態レベルへ移行させる制御機能である。したがって、制御の目標レベルを規定する条件を制約条件として問題を構成し、現運用状態を初期状態としてこの問題を解けば、必要な制御方策が立案できる。たとえば、目標レベルがレベル1の場合は、現在の運用制約のみならず、すべての想定事故後の運用制約も満足される必要があるから、多くの制約条件により定まる比較的狭い実行可能領域をもつ問題を扱うことになる。また緊急制御の場合は、事故後の状態における運用制約の逸脱が解消されていけばよく、特定の想定事故に対する制約条件のみを考慮すればよい。

一般的には設定した問題に複数の実行可能解が存在し得るから、実行可能解の中でより望ましい解を見いだすことが必要となる。したがって、各々の制御目的に適合させて適当な目的関数を定義し、これを上記の制約の下で最小(もしくは最大)とするような制御方策を求める必要がある。

結局、予防制御および緊急制御方策の立案問題は次のような制約付き非線形最適化問題として定式化される。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize (or Maximize)} \quad f(\underline{u}) \\ & \text{subject to} \quad g(\underline{u})=0 \text{ and } \underline{h}(\underline{u}) \geq 0 \end{aligned}$$

ここで、 \underline{u} は制御変数ベクトルであり、発電機電圧の大きさ、スラックを除く発電機の有効電力出力、変圧器の変圧比、移相器の移相角、調相設備の無効電力などが含まれる。また緊急制御の場合には、制御の最終手段として負荷遮断(一部負荷の強制停電)をも考慮される。

目的関数 f には、予防制御方策立案問題では事故発生前の系統状態における発電機燃料費の総和が、また緊急制御方策立案問題は全体としての制御努力(制御量、制

御に要する時間など)がとられ、その最小化をはかるのが一般的である。等号制約は、電力の需給バランスを規定する制約で、すべての負荷に必要な電力が供給されていることを保証する。不等号制約は、事故波及要因に関連する監視対象変数(被制御変数)と制御変数の上下限制約を表わしている。制御変数は一般に、逸脱を許さない厳しい制約として取り扱われる。被制御変数には、負荷母線の電圧の大きさ、発電機の無効電力出力、送電線の有効・無効電力潮流が含まれ、過渡安定性、動態安定性および電圧安定性などの動的要因を含める場合もある。

予防制御では、事故発生前の系統状態に対する制約はもとより、すべての想定事故に対しても、事故発生後の系統状態に対して制約が課せられることとなる。しかし緊急制御では、当該事故発生後の系統状態についてのみ制約を考えればよい。また予防制御においては、すべての事故に対してセキュリティが確保できるとは限らないから、多少の制約逸脱をも許容した解を求め得るように、不等号制約を緩い制約条件として取り扱う必要がある。

この制約付最適化問題は種々の数値計画手法を応用して解くことが可能であるが、電力系統固有の特徴や制御の性質などを考慮して、効率的かつ高速な演算が求められる。また近年、エキスパートシステムなどのAI応用により、この問題を解こうとする研究開発も見られる。紙面の都合上、ここではその詳細は省略するので、参考文献[2],[6]-[9],[12]などを参照されたい。

4. おわりに

これまで、電力系統のセキュリティ監視制御システムの構築に関する基礎事項について概説してきた。最後にセキュリティ監視制御のための意思決定支援システムの今後の可能性に言及し、おわりにかえたい。

セキュリティ監視制御をも含め、これまでの電力系統運用の自動化は、階層構造をもった集中処理方式により進められてきた。しかし、近年のEWS(Engineering Work Station)の進歩は、電力系統運用自動化に対して自律分散並列処理方式という新しい可能性をもたらしている[11]。セキュリティ監視制御は、取り扱うべきデータ量、および計算量が大きいことと、きわめて高速な処理が必要であることとの相反する要求から、これまで自動化が遅れ、機能強化が緊急課題の1つとなっているが、新しい分散並列処理制御という枠組みの中でこれを解決できる可能性が高い。特に、想定される多くの事故に伴う電力系統への静的および動的影響を、同時に、き

わめて高速（リアルタイムあるいは超リアルタイム）に評価することができるようになれば、より安全でより経済的な系統運用戦略を、きめ細かに立案できることとなり、強力な意思決定支援システムを構築できることとなる。もちろんそのために解決すべき課題も多いが、今後の技術進展を期待したい。

参 考 文 献

- [1] Dy Liacco, T.S.: The Adaptive Reliability Control System. *IEEE Trans.*, Vol.PAS-86, No.5 (1967), 517
- [2] Stott, B., Alsac, O. and Monticelli, A.J.: Security Analysis and Optimization. *Proc. of the IEEE*, Vol.75, No.12 (1987), 1623—1644.
- [3] 皆川, 他: 次世代系統運用自動化モデル・システムの開発と実用化, 電気学会電力技術研究会資料, PE-92—137 (1992)
- [4] 長谷川: 電力系統の総合セキュリティ監視制御システムに関する基礎的研究, 昭和62年度科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書(1988)
- [5] 西谷, 長谷川: 目的協調法に基づく電力系統の階層形動的状態推定, 電気学会論文誌B分冊, 111巻, 8号(1992), 887—895
- [6] 北, 田中, 長谷川: 経済性を考慮したオンラインPQ分離形予防制御手法, 電気学会論文誌B分冊, 108巻, 10号(1988), 475—482
- [7] 北, 西谷, 長谷川: エネルギー関数法に基づいた電力系統のオンライン過渡安定度予防制御手法, 電気学会論文誌B分冊, 110巻, 9号(1990), 745—752
- [8] 北, 水野, 西谷, 長谷川: パターン認識に基づく過渡安定度評価を用いた電力系統の動的予防制御手法, 電気学会論文誌B分冊, 111巻, 6号(1991), 611—618
- [9] 北, 田中, 西谷, 長谷川: 総合セキュリティ監視制御システムにおけるオンラインPQ分離形緊急制御手法, 電気学会論文誌B分冊, 109巻, 10号(1989), 467—474
- [10] 李, 田中, 長谷川: PQ分離等価回路による高速想定事故解析手法, 電気学会論文誌B分冊, 107巻, 1号(1987), 9—16
- [11] 栗原・高橋: 自律的な分散方式による電力系統の監視制御論理の開発, 電気学会論文誌B分冊, 111巻, 11号(1991), 1199—1207
- [12] 電気協同研究会電力技術A I 応用専門委員会: 電力技術へのA I 応用, 電気協同研究, 48巻, 1号(1992)