

高精度な発電機群脱調未然防止リレーシステム

Precise Predictive Out-of-Step Prevention Relay System for Electric Power Systems

犬飼 道彦

■ INUKAI Michihiko

井上 泰典

■ INOUE Yasunori

安田 忠彰

■ YASUDA Tadaaki

西 哲哉

■ NISHI Tetsuya

脱調未然防止リレーシステムは、電力系統で重大事故が発生したとき発電機の脱調を予測し、一部の発電機を選択的に解列させることにより、電力系統に生じる影響を最小限に抑制するために使用される。千葉県房総方面の電力系統は大電源を含む異電圧ループで形成されており、従来のアルゴリズム^(注1)では精度の良い脱調予測が困難であった。

東芝は東京電力(株)と共同で、この課題を解決できる新方式を採用した脱調未然防止リレーシステムを開発した。電力系統内の各所で取得される有効電力量から得られたパラメータによる重回帰分析結果に基づき、複雑な系統でも精度良く発電機の選択的な解列を行うことができる。

An out-of-step prevention relay system minimizes the impact of serious accidents in an electric power system by periodically predicting the out-of-step condition of generators and tripping the selected generators in an effective manner. As the electric power system of The Tokyo Electric Power Company, Inc. (TEPCO) in the Boso area has a complicated loop configuration with transmission lines of different voltages and includes large-capacity generators, difficulties were experienced in accurately predicting out-of-step conditions using the conventional algorithm applied to existing systems.

To overcome these problems, Toshiba and TEPCO have developed a precise predictive out-of-step prevention relay system that makes it possible to selectively parallel off generators, by applying a novel method based on multiple regression analysis utilizing parameters calculated from active power values sampled at various substations.

1 まえがき

電力系統に接続されている発電機は、通常時、ほかの発電機と位相や周波数が同期した状態で運転されている。しかし、送電線への雷撃などにより電力系統に事故が発生して、発電機が出力する電力を系統に送り出しきれない状態になると、一部の発電機が加速し、ほかの発電機と同期が保てない脱調という現象が発生する場合がある。

脱調現象が発生すると、電力系統に擾乱(じょうらん)が発生するとともに、同期を失った発電機の運転を継続することができなくなる。このため、電力系統に事故が発生した時点で、迅速に脱調現象が発生する事故様相であるかどうかを判別して、一部の発電機を選択的に解列させることにより脱調現象の発生を回避し、残りの発電機の運転継続を図る脱調未然防止リレーを導入する場合がある。

東京電力(株)の千葉県房総方面の大電源を含む電力系統では、頻度はまれであるが、500 kV送電線で2回線にまたがる重大事故があった場合、発電機の運転状態や電力需要によって、脱調現象とこれに伴う大規模な電源の脱落が発生する。

東芝は東京電力(株)と共同で、これらの課題を解決するために、新方式を採用した脱調未然防止リレーシステムを開発した。ここでは、このシステムの概要と特長について述べる。

2 房総系統の構成と特徴

房総方面の電力系統は、500 kVと275 kVの送電線から成る異電圧ループに、複数の発電所と負荷が接続された複雑な構成となっている(図1)。

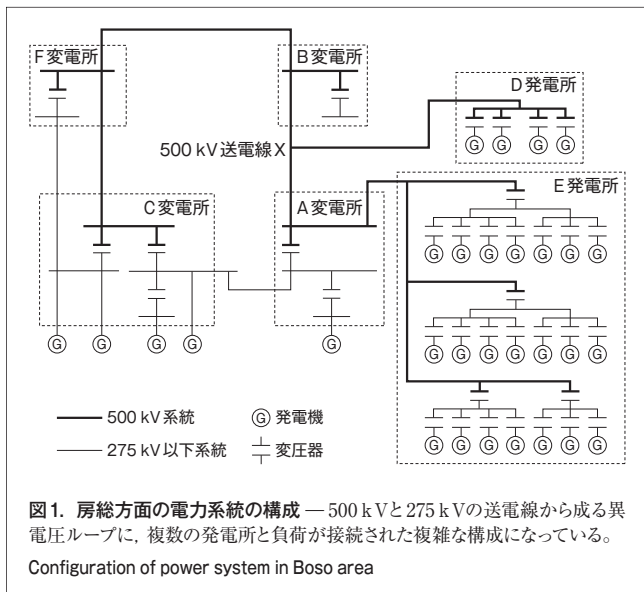
図1の500 kV送電線Xで重大事故が発生した場合、房総系統で発生しうる脱調現象は、この系統に含まれる発電機が一体となって加速脱調するという特異なものである。

従来の脱調未然防止リレーシステムは、脱調現象を予測するために、脱調する可能性のある発電機以外の電力系統を1機の発電機に縮約化した、単純な近似モデルに基づくアルゴリズムを使用している。したがって、複雑な構成の房総系統での脱調予測に適用できない。

従来のアルゴリズムの一例を以下に述べる。

- (1) 発電機と送電線の既知のインピーダンスや電流計測値から、縮約された2機の発電機間の初期位相角を求める。
- (2) 前述の初期位相角、発電機に対する機械的入力と発電機が出力する有効電力の差分、及び質量を用い、運動方程式から現時点の位相角を求める。
- (3) 位相角の時間的推移を用いて将来の位相角を推定し、しきい値を超える場合に脱調が生じると判断する。

(注1) コンピュータを使ってある特定の目的を達成するための処理手順。



3 基本演算原理

この脱調未然防止リレーシステムでは、重回帰分析の結果を用いて、脱調を回避するために必要な発電機の解列量を求める方式を採用した。

重回帰分析では、複数のパラメータP、パラメータに掛かる係数a、及び補正項bを用いて、求める結果Yを(1)式で表される直線に近似する。

$$Y = \sum a \cdot P + b \quad (1)$$

このシステムでは、脱調を回避させることができる発電機の解列量を求めるため、重大事故発生前の系統内各所の有効電力量を基にしたパラメータを用いる。

この方式では、オフラインで実施される重回帰分析によって係数aと補正項bが決定されていれば、この結果と、実系統で計測された有効電力量から計算されたパラメータPを用い、簡易な演算によって発電機の解列量を求めることができる。一方で、最適なパラメータの選定や、将来にわたる多様な発電機の運転状態を想定するために、事前に行っておくべきシミュレーションの種類は膨大になる。しかし、最近の計算機の演算能力向上とシミュレーション作業の自動化ツールの開発により、重回帰分析の結果に基づく脱調未然防止リレーシステムが実現された。なお、演算原理の提案、シミュレーション作業、及びシミュレーションの自動化ツールの開発は、東京電力(株)において行われた。

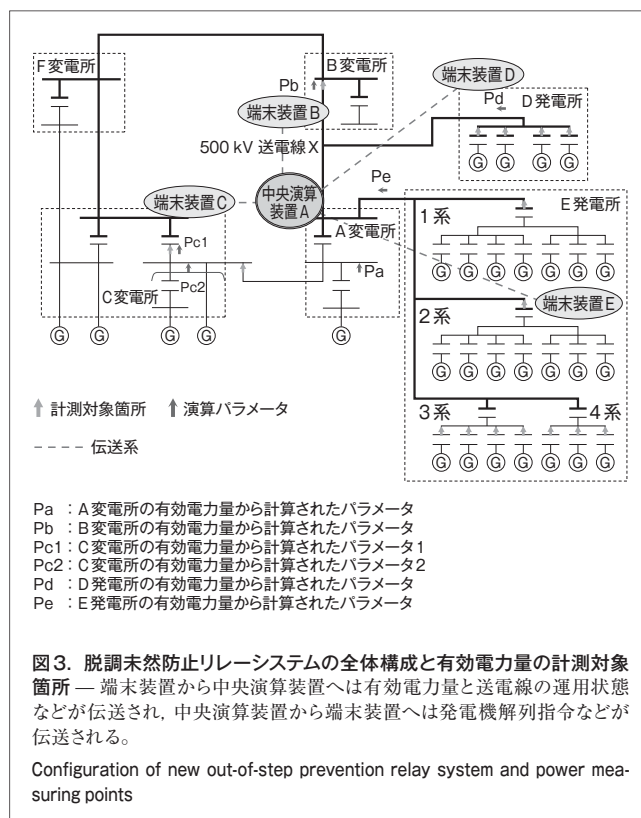
4 システムの全体構成

この脱調未然防止リレーシステムは、脱調予測演算を行う中央演算装置(図2)と4か所に設置された端末装置から構成さ

れる。端末装置は、事故発生前の房総系統各所における有効電力量、このシステムの起動対象である500 kV平行2回線送電線Xの運用状態、及び事故の発生を検出する。

このシステムは、信頼性や保守性を考慮して2系列構成としている。運用上、2系列化されたシステムのうち1系列を出力系とし、もう1系列は待機系として出力系の故障や保守の場合に使用される。

このシステムと同様に2系列化される275 kV系統などに適用される系統保護装置では、常時、2系列ともに事故除去のための指令出力を行うよう構成されている。しかし、このシステ



ムでは、装置固有の計測誤差などの影響により解列対象となる発電機が系列間で相違し、過剰に発電機を解列させる可能性があることから、2系列のうち1系列を待機系としている。

中央演算装置と端末装置間は、系列ごとにリアルタイム伝送系で接続されている。端末装置から中央演算装置へは有効電力量と送電線の運用状態などが伝送され、中央演算装置から端末装置へは発電機解列指令などが伝送される。

端末装置では、三電力計法を用いて事故発生前の有効電力量を高精度に計測しており、このために、システムの1系列当たりで取得される電流は60チャンネル分、電圧は51チャンネル分となっている。このシステムの全体構成と有効電力量の計測対象箇所を図3に示す。

5 中央演算装置における処理

中央演算装置Aと端末装置Bでは、送電線Xの運用状態や系統事故の発生を検出するため、A及びB変電所に設置された送電線遮断器の開閉状態を取得している。

端末装置Bは、リアルタイム処理でB変電所における送電線Xの遮断器の状態を取得し、中央演算装置Aへ伝送する。遮断器の動作時間や処理遅延時間、A変電所からB変電所までの伝送で要する遅延時間などの影響により、中央演算装置Aが取り込むA変電所の遮断器情報との間で時間遅れが生じる。中央演算装置Aでは、遮断器情報到着の時間遅れを許容するよう配慮しながら、以下の4種類の事故様相を判別し、各様相に応じた発電機解列処理の制御を行う。

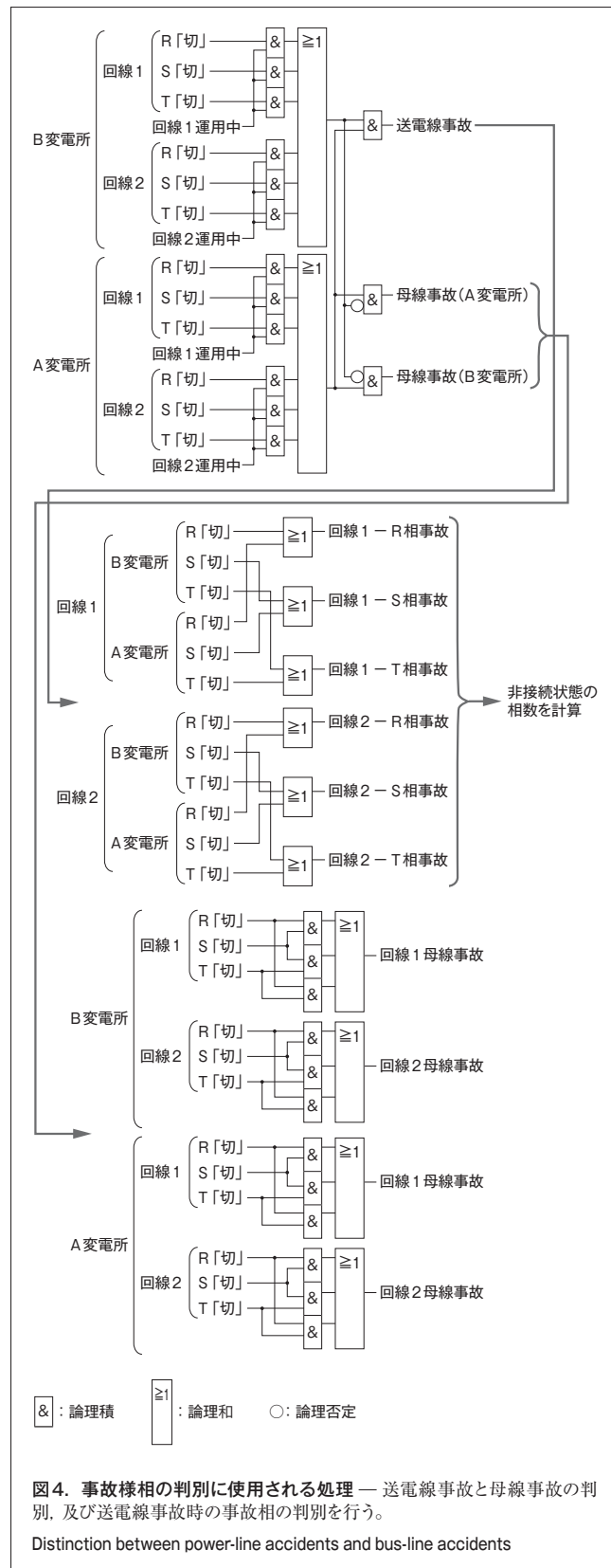
- (1) A変電所の母線事故
 - (2) B変電所の母線事故
 - (3) 送電線Xで6相中4相が非接続状態
 - (4) 送電線Xで6相中5相以上が非接続状態
- 事故様相の判別に使用される処理の概要を図4に示す。

6 発電機の解列判定処理

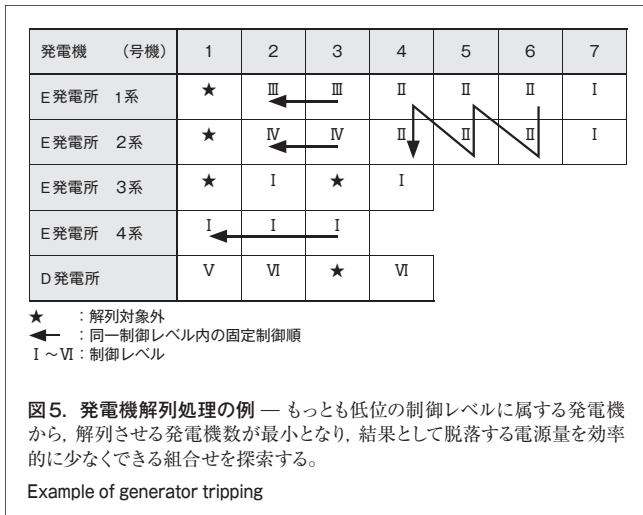
脱調現象を回避するため中央演算装置が端末装置D、Eを介して解列指令を出力する対象の発電機は、D発電所の4機とE発電所の21機である。

E発電所の発電機は4系列あり、1、2系にそれぞれ7機、3系に4機、4系に3機の発電機が属している。D発電所の発電機は個々に独立しているが、運用では、1、2号機と3、4号機がそれぞれ1組として見なされている。前述の25機の発電機のいずれを解列するかを決定する処理では、以下に述べるような多様な要求を満足する必要がある。

- (1) メンテナンス中の発電機を解列対象から除外する設定を行うことができる
- (2) 発電機解列後の迅速な復旧のため、E発電所1、2系で



- (3) 発電機間の依存関係、発電機解列後の復旧の早さ、



脱調現象を抑制する効果などを考慮し、6段階の制御レベルを設ける。

(4) 同一制御レベル内に属する発電機の中でも、一部に固定的な解列順序を持つ発電機がある。

前述の(1)、(2)に該当せず、解列させる発電機数が最少となり、結果として脱落する電源量を効率的に少なくできる組合せを、もっとも低位の制御レベルに属している発電機から探索する。該当する制御レベルに属する発電機をすべて解列させても脱調を回避できない場合には、より上位の制御レベルへと遷移し、改めて解列対象の発電機を探索する処理を繰り返す。

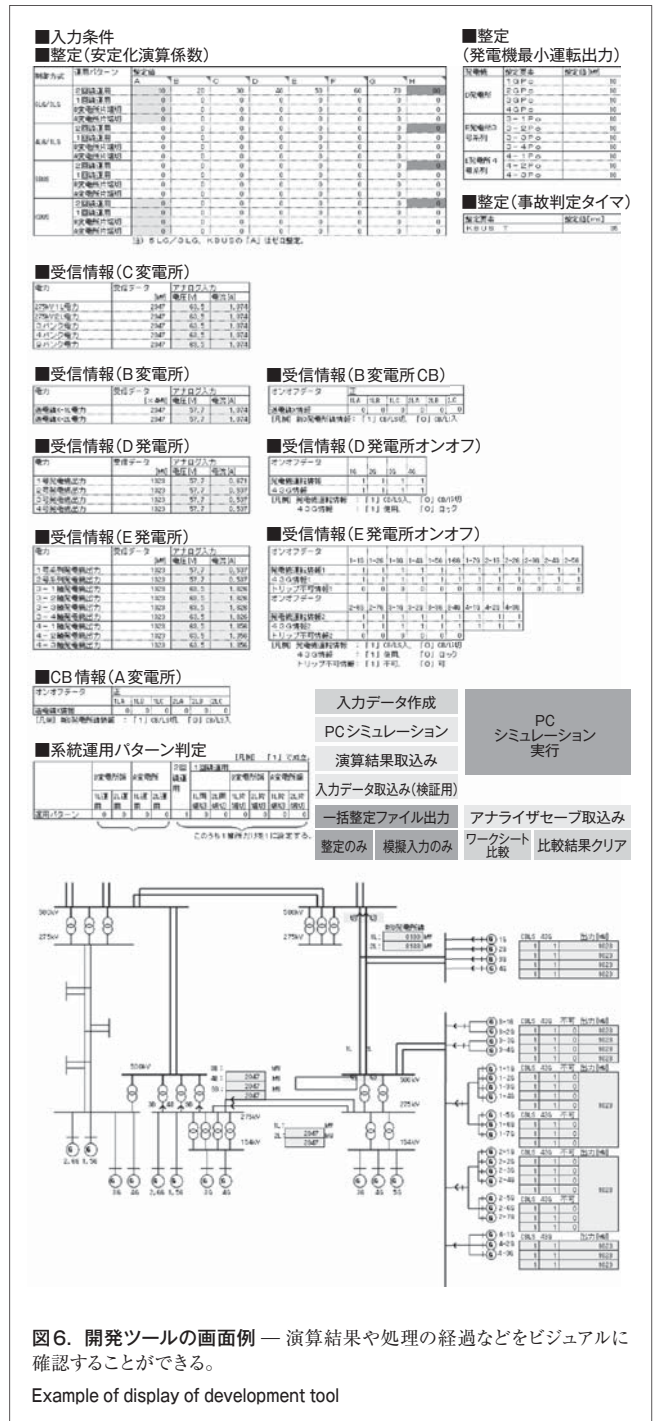
解析処理の例を図5に示す。これは、DとEの発電所の発電機がすべて稼働中であり、前述の(1)に該当する発電機がなく、(2)に該当する発電機が初期設定である1系-1号機、2系-1号機、3系-1号機、3系-3号機だった場合である。各セルに記載されたIからVIが制御レベルを表し、矢印が同一制御レベル内での固定的な解列順位を表している。

7 システム専用の開発ツール

従来のシステムに比べて複雑な中央演算装置の発電機解列処理の品質を確保するため、このシステム専用の開発ツールを作成し、パソコン(PC)上で効率的に開発できる環境を構築した。このため、発電機解列処理プログラムにはC言語を用い、実機でもPC上でも動作するコードとしている。

この開発ツールを用いることで、中央演算装置が端末装置B～Eからリアルタイム伝送系を介して収集した情報のダンプファイル(注2)を、PC上で動作する発電機解列処理プログラムに対して、自動的にパラメータとして与えることができる。また、パラメータの一部の書換えや、処理の途中経過の表示も可能な機構を設けたことで、効率的に開発できるようになった。

(注2) メモリの内容をそのままファイル化したもの。



なお、この脱調未然防止リレーシステムが実際に動作した場合、装置内部に保持される情報についても、この開発ツールで読み込めるデータ形式に合致させてある。したがって、システムが正しく対応したかどうかを追検証する際にも、この開発ツールは有用である。

開発ツールの画面例を図6に示す。演算処理や処理の経過などが可視化され容易に確認できる。

8 機能検証試験

このシステムは電力用規格に基づき、装置と機能の単位に細分化して個々に機能検証を行った後、中央演算装置と端末装置とを結合した状態で総合試験を行った。

機能検証試験では、発電機解列処理がシステムの運用状態と計測値とに従い、正確に指令出力が実施されることを確認する必要があった。しかし、試験器が出力する電流と電圧や、供試装置のアナログ入力部の微小な誤差の影響により、発電機解列出力が理想的な結果と差異を生じる場合がある。このため、試験器出力を用いた試験では、この差異の原因が処理の誤りによるものなのか、ハードウェアの誤差によるものなのかを判断しなければならないケースが考えられる。更に、実機を用いた検証が数千パターンに及ぶこと、各パターンで系統条件や試験器出力の調整などを行うと、開発段階以上に時間が必要になることが想定される。

このため、中央演算装置にも開発ツールに相当する、入力データを設定可能な試験機能を設け、試験器出力を用いた検証が難しいと考えられるケースでも、この機能を活用することで効率化を図った。

なお、このシステムは、納入後に実際の伝送系を用いた組合せ試験を行い、所定の性能が実現されていることを確認している。

9 あとがき

東芝は東京電力(株)と共同で、新方式を採用した脱調未然防止リレーシステムを開発した。電力系統内各所の有効電力量から得られたパラメータによる重回帰分析結果に基づき、複雑な系統でも精度良く発電機の選択的な解列を行うことができる。

このシステムは2008年6月から本運用が始まっており、房総方面の東京電力(株)の電力系統で、発電機運転の制約緩和に寄与している。

文献

- (1) 安田忠彰, ほか. 房総系統脱調未然防止リレーの開発. 電気学会研究会資料. 東京, 2008-09. 電気学会 (保護リレーシステム技術委員会). 2008. p.31-36.
- (2) 安田忠彰. 都心単独系統並列装置, ならびに脱調未然防止リレーシステムの開発. 電気評論. 94, 4, 2009. p.34-39.



犬飼 道彦 INUKAI Michihiko

電力流通・産業システム社 電力流通システム事業部 電力系統技術部主査。変電所保護制御装置の設計・開発に従事。電気学会会員
Transmission & Distribution Systems Div.



井上 泰典 INOUE Yasunori

電力流通・産業システム社 府中事業所 電力システム制御部主務。系統安定化装置及び保護リレー装置の設計・開発に従事。電気学会会員。
Fuchu Complex



安田 忠彰 YASUDA Tadaaki

東京電力(株) 電力流通本部 系統運用部 系統保護グループ副長。保護リレー・系統安定化装置の開発に従事。電気学会会員。
The Tokyo Electric Power Co., Inc.



西 哲哉 NISHI Tetsuya

東京電力(株) 電力流通本部 系統運用部 系統保護グループ主任。保護リレー・系統安定化装置の開発に従事。電気学会会員。
The Tokyo Electric Power Co., Inc.