

菅原 徒  
J. Sugawara

柳橋 健  
K. Yanagihashi

水口 重則  
S. Mizuguchi

渡部 洋司  
H. Watanabe

電力系統は、日本経済の成長、高度情報社会の発展や昨今の人々のアメニティライフの欲求などを背景として拡大成長を遂げ、各電力会社ともに系統の大規模ネットワーク化がいっそう進んできている。これに伴い、これまでの系統では大きな問題としては上がらなかった動態安定度問題への対応の必要性が顕在化してきている。

この問題を解決するため、新しい系統安定化方式を開発した。この方式は、系統から取り込んだ時々刻々のデータから2地点間の電圧位相角差の動搖をリアルタイムに検出し、この動搖情報から将来の電圧位相角差を予測して安定化制御を行う方式である。

ここでは、この安定化方式で実用化した代表的なシステムとして東京電力(株)と東北電力(株)のシステムの概要を紹介する。

The power system network has been expanding in line with economic growth, the enhancement of information systems in society, and improvements in people's lives. The power system is still growing in the case of all Japanese power utilities, and new problems such as dynamic instability phenomena will emerge.

We have developed a new stabilizing method for dynamic stability. The new method performs measurement of the voltage phase angle between two nodes in the power system, predicts loss of synchronism, and decides control scheme.

This paper introduces two representative types of practical systems to deal with the problem of dynamic instability: one for The Tokyo Electric Power Co., Inc. and the other for Tohoku Electric Power Co., Inc. Both transient stability and dynamic stability controllers have been installed at each of these utilities.

### 1 まえがき

電力系統の大容量・緻(ち)密化とともに、系統安定度維持問題が各電力会社にとってますます重要な課題となってきている。特に、昨今の電力系統では負荷地域と電源地域の遠隔化が進んでおり、重潮流・長距離送電となるために500 kVによる基幹系統の拡充が進められている。このような大規模基幹系統において、2回線送電線での多重事故によるルート断といった万が一の重故障が発生した場合など、擾(じょう)乱による電力系統動搖が事故除去後においてもなお継続し、やがて脱調に向かう、いわゆる動態安定度問題が懸念される。このような動態不安定現象は動搖の周期が比較的長周期となり、また動搖が継続することが特徴で、電力会社間にわたる広域連系運用の拡大により、この傾向がさらに顕在化するものと予想される。動態安定度は発電機の励磁制御装置(PSSなど)により改善できるが、基幹送電線ルート断などの大事故時の系統全体の動搖に対してはその効果は十分でない場合がある。

大事故時の動態安定度問題への対応策として、発電機遮断などの緊急制御を行う安定化リレー方式を開発した。この方

式を、東京電力(株)と東北電力(株)の二つのシステムにおいて実用化した。いずれもオンラインデータに基づくリアルタイム予測演算により動態不安定を事前に判定し、安定化制御を行うもので、前者では系統分離、後者では主に発電機遮断による安定化制御を行っている。

以下に系統安定化の手法とシステム構成について紹介する。

### 2 動態不安定現象とその検出

系統不安定の様相・厳しさは事故点、事故様相、事故除去時間やそのときの系統構成、潮流状態などによって異なる。図1は大規模な系統において基幹系送電線2回線ルート断というきわめて厳しい事故を想定して計算機シミュレーションを行った結果である。図は着目するある2点間の電圧位相角差の時間変化を表しており、事故発生により位相差が定常位相角値から振動し始め、動搖を数回繰り返した後に脱調に至る、いわゆる動態不安定現象を示している。

このように動態不安定のような時間的に長い現象を正確に把握するためには、系統から取得した時々刻々のデータを用

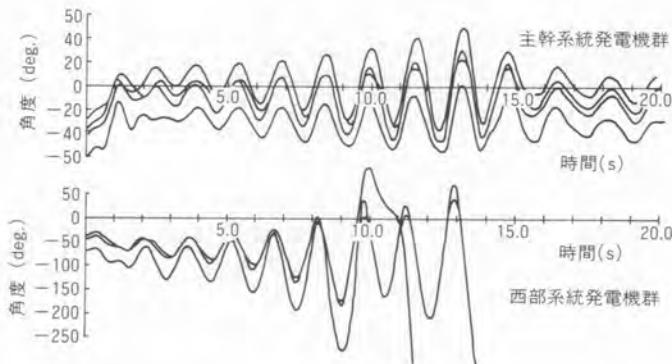


図1. 動態不安定現象のシミュレーション波形例 500 kV送電線事故でルート断となった場合の動搖を示す。  
Results of simulating power system stability

いてリアルタイムで動搖を検出していく必要がある。また、検出した動搖情報から系統の安定・不安定を判別するためには現象を予測し、不安定となる前に適切な処置を行うことが必要とされる。このため不安定現象の検出(動搖検出アルゴリズム)は、その系統で起こり得る現象に応じた検出方法が選択される。

東京電力㈱と東北電力㈱で実用化されている安定化システムを以下に説明する。

### 3 東京電力(株)基幹系統安定化システム

#### 3.1 基幹送電線事故時の系統安定度

東京電力(株)の基幹系統の概略構成を図2に示す。大容量の火力・原子力発電機プラントが主に北部、東南部、東部に配備され、500 kV送電線により大都市近郊負荷に電力が供給されている。また、比較的負荷に近い西部では火力機群が275 kV送電線を介して近郊に電力を供給するとともに変圧器を介して基幹系に連系されている。

電力供給がピークの状態で、基幹系統で重故障が発生するような厳しい場合を想定すると、西部系の火力機と他の発電機群を含む基幹系統との間で図1に示すような動態モードの

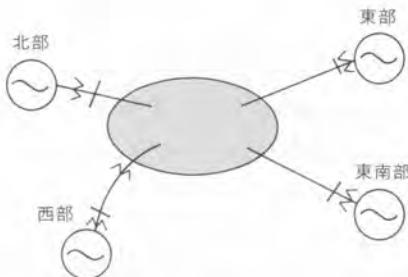


図2. 東京電力(株)の基幹系統の概略構成 西部系火力機と、東部・東南部・北部の原子力・火力機群とが基幹系送電線によって連系されている。

Simplified model of bulk power system of The Tokyo Electric Power Co., Inc.

位相角動搖が発生する。

この対策としてリアルタイムに動搖状況を検出し、適切なタイミングで制御を行う系統安定システムを適用している。

#### 3.2 動搖検出方式と安定化方式

3.2.1 動搖検出方式 西部系と主系統は2機系統でモデル化できる。この2機間の電圧の相対位相差 $\delta(t)$ は(1)式で表される<sup>(1)</sup>。

$$\delta(t) = \delta_0 + A e^{at} \cdot \sin(\omega t + \beta) \quad (1)$$

(1)式は、動搖の初期位相が $\delta_0$ で、時定数 $a$ で発散／収束する動搖振幅 $A$ をもつ周波数 $\omega$ の正弦波形を表している。実用化システムではこの性質を利用し、系統から観測された電圧位相角差を用いて正弦波外挿を行うことにより、将来時点(200 ms)の位相差の動きを予測演算している。

3.2.2 安定化方式 将来の位相差が、安定度限界値よりも大きくなる場合には、西部系を系統分離して動搖する発電機間の連系を壊ち、それぞれの系統の安定化を図る。

この方式による系統安定化のシミュレーション例を図3に示す。事故発生約6.6 s後に安定化システムで西部系分離制御が行われ、主系統の動搖が急速に減衰していることがわかる。

#### 3.3 安定化システム構成

図4に実用化されている安定化システムの構成を示す。西

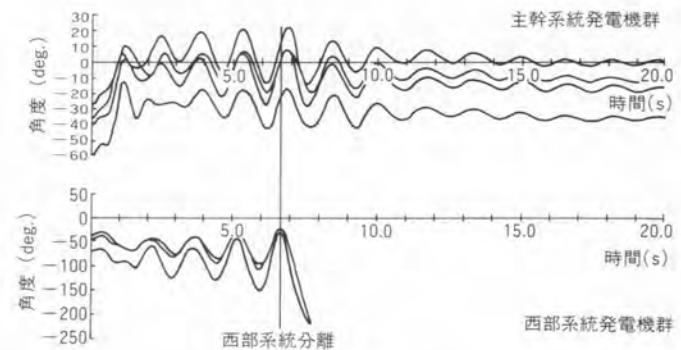


図3. 系統分離による安定化シミュレーション例 予測演算により脱調に至る前に安定化制御が行われる。

Stabilization by power system separation

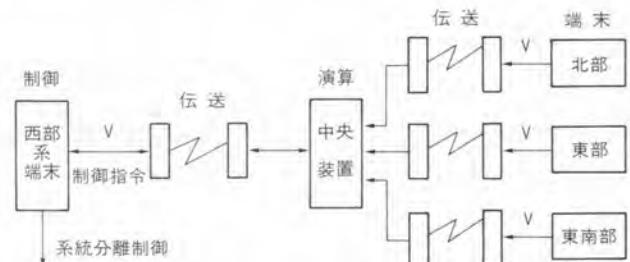


図4. 東京電力(株)基幹系安定化システムの構成 複数の端末装置から伝送されるオンラインデータに基づいて中央装置で安定化演算を行い、系統分離制御指令を出す。

Overall configuration of stabilizing system of The Tokyo Electric Power Co., Inc.

部系と各発電機間の位相の動きを観測するために各所に端末装置を設置し、安定化演算を行うための中央演算装置にオンラインで電圧データを伝送する。中央演算装置で不安定と判別された場合には系統分離制御指令を西部系端末装置に伝送し、西部系統を基幹系統から分離する。

## 4 東北電力 500 kV 系統安定化システム

### 4.1 500 kV 基幹系事故時の系統安定度

東北電力株の概略系統を図 5 に示す。東北電力内基幹系統および連系系統は、新たに 500 kV 系統を段階的に導入し拡充強化が図られつつあり、重潮流運用となる。基幹系統が重潮流運用中に、500 kV 基幹送電線に 2 回線事故が発生した場合、東北全系の発電機が 1 群となって脱調する。この様相は、事故線路の潮流状況や北部系発電機の運転状況などによって、過渡第一波脱調～動態 N 波脱調、振動継続などの各種現象となる<sup>(2)</sup>。図 6 は第二波で脱調するケースと振動が継続するケースを示している。この対策としてリアルタイム形の系統安定化システムを適用している。

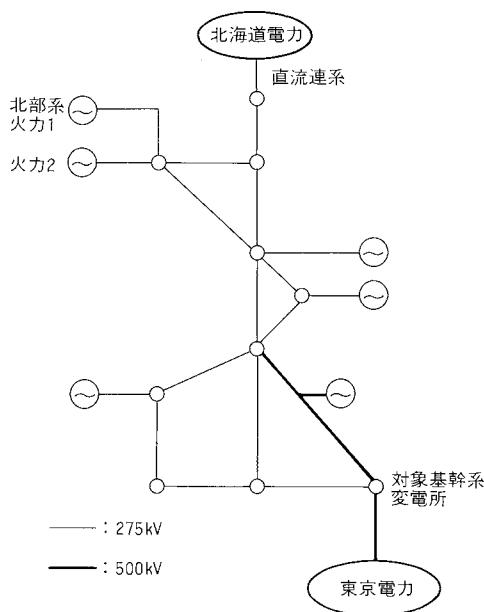


図 5. 東北電力株の基幹系統の概路構成 北部系火力機を中心とする電源が基幹系送電線により接続され、東京電力株とは 500 kV 送電線で連系されている。

Simplified model of power system of Tohoku Electric Power Co., Inc.

### 4.2 脱調予測方式と安定化方式

#### 4.2.1 脱調予測検出方式

脱調予測検出は、北部系火力発電所と 500 kV 基幹変電所の過去の母線電圧瞬時値データから最小二乗二次近似方式により将来時点 (250 ms) の両母線電圧位相角差  $\delta$  を(2)式で予測することによって行う。

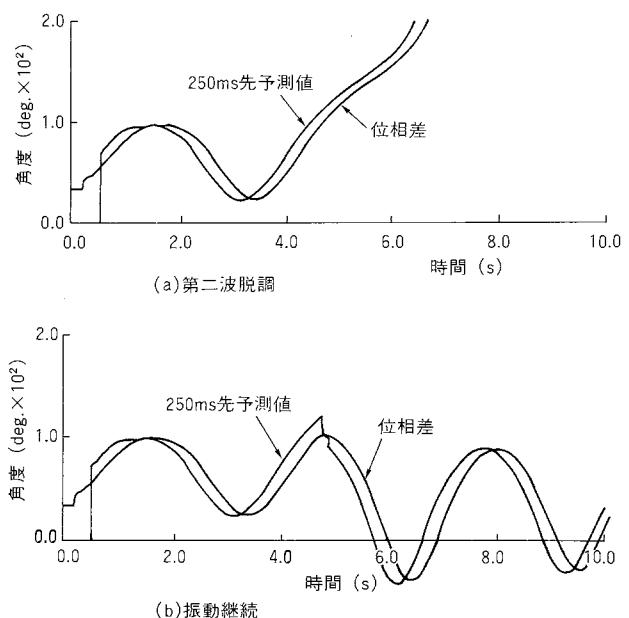


図 6. 東北電力株系統不安定現象のシミュレーション波形例 500 kV 送電線事故でルート断となった場合の系統動揺中の電圧位相角差とその予測値を示す。

Results of simulating power system stability of Tohoku Electric Power Co., Inc.

$$\text{予測式: } \delta(t) = k_0 + k_1 \cdot t + k_2 \cdot t^2 \quad (2)$$

( $k_0, k_1, k_2$  は最小二乗法により算出)

この方式は、過渡第一波脱調～N 波脱調、振動継続まで種々の現象を図 6 に示すように予測することができる。

**4.2.2 安定化方式** このシステムの制御内容を図 7 に示す。位相角差がある設定値を超えると予測された場合、直流連系をブロックあるいは北部系火力を遮断（第一段制御）する。また、収束の悪い持続性振動に対しては、動揺中の位相角差波形の振幅を比較し、その減衰比が 1.0 に近い場合に直流連系のブロックだけを実施する。さらに、第一段制御後に脱調が予測される場合はバックアップ制御を実施する。

### 4.3 システムの構成

このシステムは、基幹変電所に設置される中央演算装置と北部系火力発電所ほかに設定される端末装置により構成される。

このシステムの全体構成を図 8 に示す。

**4.3.1 中央演算装置** 端末装置からの受信情報により 500 kV 基幹送電線のルート断検出、脱調予測検出、減衰性持続振動検出を行い、その結果を基に図 7 に示す安定化制御演算を行い発電機遮断などの指令を端末装置へ送信する。

端末装置との間のデータ伝送は、端末装置 A と B との対向が PCM (Pulse Coded Modulation) リレーの伝送フォーマットによる伝送、端末装置 C と D との対向が高速 CDT (Cyclic Digital Telemeter) である。

**4.3.2 端末装置** ルート断検出変電所の装置は、基幹送

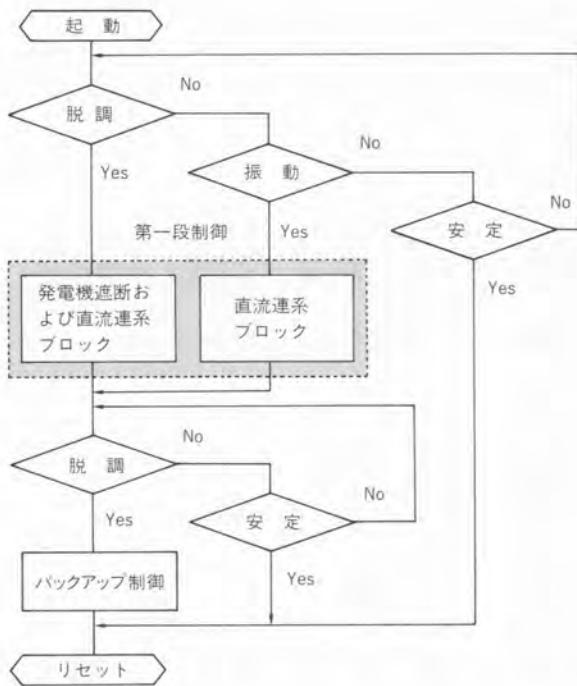


図7. 東北電力株安定化制御の処理の流れ 系統動搖現象に応じて発電機遮断、直流連系ブロックなどの最適な制御を行う。

Flowchart of stabilizing control at Tohoku Electric Power Co., Inc.



図8. 東北電力株系統安定化システムの構成 複数の端末装置から伝送されるオンラインデータに基づいて中央演算装置で安定化演算を行い制御指令を出す。

Overall configuration of stabilizing system of Tohoku Electric Power Co., Inc.

電線のルート断を検出し、その情報を中央演算装置へ伝送する。北部系火力発電所1の装置は、母線電圧瞬時値と発電機出力の計測値を中央演算装置への送信、中央演算装置からの

トリップ指令を受信して対象発電機へ遮断指令を出す。北部系火力発電所2の装置は、発電機出力の計測値を中央演算装置へ送信、中央演算装置からの指令を受信して対象発電機へ遮断指令を出す。交直連系線電気所の装置は、中央演算装置からの指令を受信して、直流連系をブロックする指令を出す。

## 5 あとがき

動態安定度問題への対応策として実用化されている代表的な二つの系統安定化システムについて述べた。これら二つのシステムは、オンラインデータに基づくリアルタイム予測演算により動態不安定を予測判定し、安定化制御を行う。

動態安定度問題は、今後の電力会社間の系統の緊密化に伴いさらに重要性を増すと予想される。より複雑化する系統動搖現象を的確に検出し、適切な安定化制御を行うシステムは今後ますます必要になってくるものと考える。今後とも新しい系統安定化技術の研究開発を推進する所存である。

## 文 献

- (1) K. Yanagihashi, et al: A Predictive Out-of-step Protection System based on Observation of the Phase Difference between Substations, IEEE 90 WM, 125-5 PWRD (1990)
- (2) 菅原 徹, 他: 500 kV 系統事故波及防止リレーシステムの開発, 平成7年電気学会全国大会, No.1571 (1995)

菅原 徹 Jun Sugawara

1962年東北電力㈱入社。電力系統保護・安定化に関する技術業務に従事。現在、東北電力㈱電力システム部副部長。  
Tohoku Electric Power Co., Inc.

柳橋 健 Ken Yanagihashi

1980年東京電力㈱入社。電力系統保護・安定化に関する技術業務に従事。現在、東京電力㈱系統運用部課長。  
The Tokyo Electric Power Co., Inc.

水口 重則 Shigenori Mizuguchi, D.Eng.

1979年入社。電力系統保護リレー、安定化システムの開発に従事。現在、府中工場電力システム制御部主査、工博。  
Fuchu Works

渡部 洋司 Hiroshi Watanabe

1979年入社。電力系統保護制御システム、安定化システムの開発に従事。現在、電力事業部電力系統技術部課長。  
Power Systems Div.