

大規模系統周波数維持システム

Frequency Stabilizing Control System for Large-Scale Power System

束田 益男
M. Tsukada

佐藤 茂
S. Sato

首藤 逸生
I. Shuto

蜂須賀 勉
T. Hachisuka

系統の周波数を一定に保つためには、発電量と負荷量がつねにバランスしていることが必要である。ルート断故障などの過酷故障で系統が二つに分断されると、このバランスが大幅に崩れ周波数異常が発生する場合がある。周波数維持システムは、このような緊急時に需給バランスを確保するための制御を高速に行い、分離系統内の周波数の安定化を図るシステムである。このシステムは SSC (System Stabilizing Control) の名称で 1960 年代から実用化されてきた歴史の古いシステムであるが、今日までにさまざまな改良が繰り返してきた。

ここでは、大規模系統の周波数維持システムとして、中部電力㈱基幹系 SSC システムを紹介する。このシステムは任意の系統構成に柔軟に対応できるよう、系統の自動認識機能を備えた最新の大規模 SSC システムである。

To maintain the frequency in a power system, a balance is required between power generation and demand. In the case of a serious transmission line fault, the power system will be divided into several groups and it will be difficult to maintain the power balance. In other words, an imbalance in a power system causes frequency instability. The frequency stabilizing system can control the power balance at high speed and stabilize the power system frequency. Chubu Electric Power Co., Inc. (CEPCO) has been utilizing and upgrading such systems, called system stabilizing control (SSC), since the 1960s.

This paper introduces a new frequency stabilizing system applied to the EHV power system of CEPCO. This system has the ability to recognize the latest configuration of the power system, enabling it to be applied to a wide variety of power system configurations.

1 まえがき

電力系統が安定に運転継続できるためには、発電量と負荷量がつねにバランスしていることが必要である。このバランスが崩れると、発電機の回転数が変動し周波数の不安定現象を引き起こす。特に電力系統に故障が発生し系統が二つに分断されるような場合には、分離系統内に大幅な需給アンバランスが発生する可能性がある。

このような系統分断故障時に分離系統内の過剰な電源または負荷を制限し、速やかに周波数の安定化を図るシステムとして SSC がある。わが国では 1960 年代から実用化されてきた歴史の古い安定化システムであるが、系統特性の変化や規模の拡大に合わせて、さまざまな改良が繰り返してきた。

ここでは、大規模系統の周波数維持システムとして、中部電力㈱基幹系 SSC システムを紹介する。このシステムは、任意の系統構成に柔軟に対応できるよう、系統の自動認識機能を備えた最新の SSC システムである。

分離が発生した場合、分離された系統（分離系統）に対する周波数安定化と、広域系統に連系されている系統（本系統）の安定度維持にある。分離系統側の制御は、ルート断発生線路の事前潮流の向きにより、発電機遮断または負荷制限を行い、単独系統内の周波数安定化を図る。本系統側の制御は、60 Hz 広域系統における大電源脱落時の安定度維持のために、許容電源脱落量を上回る分に相当する負荷を制限する。

3 基幹系 SSC システム開発の背景と特長

3.1 開発の背景

基幹系 SSC システムでは大幅に従来のシステムを見直し、システムの再構築を図った。再構築のもっとも大きな理由は、系統が放射状を基本とした系統からループ系統に変化し、系統分離パターンが多様化することにある。放射状系統を対象としていた従来の SSC システムでは、分離点と分離系統の範囲が 1 対 1 に対応していたが、ループ系統では 2 か所以上のルート断で分離系統が発生し、この組合せは送電線の作業停止などの運用形態に応じて複雑に変化するため固定できない。したがって、設備形態や運用形態によらず普遍的に適用できる万能性と、系統変更への柔軟性を兼ね備えた新しい SSC シ

2 SSC システムの基本機能

SSC の基本機能は、送電線のルート断故障などにより系統

システムが必要となる。

3.2 基幹系 SSC システムの特長

基幹系 SSC システムの主な特長は次のとおりである。

- (1) 集中形システムの構成 従来のシステムは、ブロック分割・階層制御方式であったが、基幹系 SSC では全系統の情報を収集・演算する必要があるため、主演算部を中央に配置した集中形システムを採用した。
- (2) 系統運用形態への柔軟な対応 ループ系統、放射状系統またはその混在した系統など、現実の系統運用はきわめて多様な形態が予想される。SSC システムがこれらの運用形態に柔軟に対応できるためには、オンライン状態で系統を認識し現状系統での系統分離パターンを自動的に抽出する機能が必要である。この SSC システムでは、基幹系統の各電気所から伝送される接続情報を基に、任意の 2 点以内の多重故障で発生する系統分離パターンを自動的に抽出する機能を備えている。
- (3) システムの拡張性 アルゴリズムの汎用化、端末装置の標準化を徹底し、系統拡充時の増設対応の容易化を図った。特に、電気所標準モデルを採用することで、電気所ごとに異なる設備形態を意識しない汎用で高速な系統認識アルゴリズムが適用できる。系統拡充時には、標準の端末装置を増設するだけで容易にシステムの拡張が可能である。
- (4) 制御精度の向上 負荷の直接制御や各種補正制御の採用により、従来に比べて事後演算機能を大幅に強化し、制御精度の向上を図った。故障中電圧低下に伴う負荷の自然脱落を推定し制御に反映する負荷脱落補正や、第一段制御実施後の周波数変動の計測値から必要に応じて追加制御を実施する周波数補正制御も用いられている。

4 システム構成と伝送方式

4.1 システム構成

SSC システムは表 1 の装置から構成される。起動装置 (CSC-S) は各 500 kV 電気所に、中央演算装置 (CSC-P) は 500 kV 代表電気所に設置される。また、転送遮断装置 (CSC-T) は 257 kV 以下の電気所に設置される。

表 1. 装置の機能分担概要

Functions of individual equipment

装置名	機能概要
CSC-S (起動装置)	<ul style="list-style-type: none"> ・基幹系統のルート断検出 ・系統接続情報処理（標準モデルへの変換） ・幹線潮流、故障中電圧、周波数検出
CSC-P (中央演算装置)	<ul style="list-style-type: none"> ・系統接続認識、分離パターン抽出 ・分離系統制御演算、制御出力 ・本系統制御演算、制御出力
CSC-T (転送遮断装置)	<ul style="list-style-type: none"> ・制御可能量演算と CSC-P への伝送 ・トリップ出力（フェールセーフリレーとの AND）

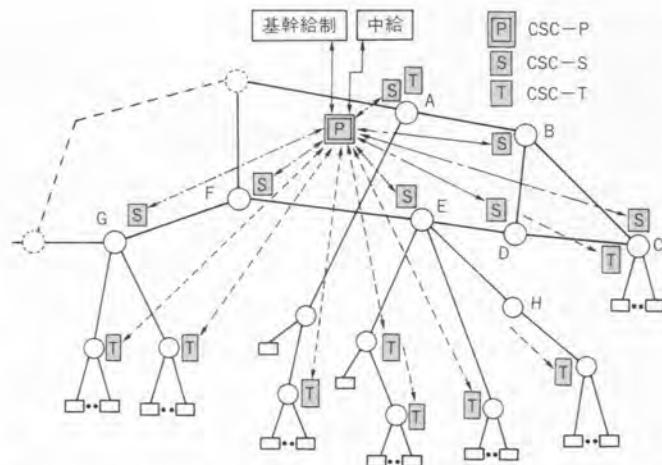


図 1. 全体システムの構成 運用開始当初の全体構成を示す。

Configuration of SSC system

すべての装置は 2 系列で構成され、常用／待機の切換え方式で運転される。装置間を高速な伝送系で結合し、次世代デジタルリレーの演算装置を適用することで、高速な制御仕上り時間（第一段制御：200 ms 程度）を実現した。

図 1 に全体システムの構成を示す。システムの最終規模は基幹系統電気所で 20 か所、制御対象数で 260 か所を想定し、CSC-P は設備の拡張時に改修が不要なよう、最大構成規模のハードウェア、ソフトウェアを実装している。

4.2 伝送方式

各装置間は、用途に応じてさまざまな伝送方式が用いられている。表 2 にこのシステムに適用されている代表的な伝送方式を示す。ルート断信号と転送遮断信号は高速性、高信頼性が要求されるため、信号を符号化し最大 16 要素を専用多重化伝送装置で伝送する。系統情報伝送のうち、幹線潮流・電圧・周波数情報は高速かつ多量の伝送が必要なため、デジタル同期網による 48 Kbps 伝送を採用した。

表 2. 伝送方式

Method of communication

	対象区間	伝送方式	伝送速度
系統情報	CSC-S ⇄ CSC-P	HDLC 伝送	48 Kbps
	CSC-T → CSC-P		1,200 bps
	基幹給制/中給 ⇄ CSC-P		9,600 bps
起動遮断	CSC-S → CSC-P	$_{\text{2}} \text{C}_1 \times 16$	48 Kbps
	CSC-P → CSC-T	$_{\text{2}} \text{C}_1 \times 16$	48 Kbps

HDLC: High-level Data Link Controller

5 系統認識機能

通常考えられるあらゆる系統運用状態に柔軟に対応するため、オンライン系統認識に基づく分離パターンの自動抽出機能を初めて SSC に適用した。系統の自動認識は次の手順で行われる。

(1) 電気所構成の標準モデルへの変換 基幹系統各電気所に設置される CSC-S では、500 kV 電気所の系統構成を統一した一つの標準モデルに変換する(図 2)。この変換は、電気所特有の設備情報と開閉機器の on/off 情報に基づいて自動的に実施され、標準モデルに変換された機器の開閉状態が CSC-P に伝送される。この標準モデルを用いることにより、電気所ごとの固有の設備形態を意識しないで済むため、系統認識アルゴリズムの標準化と処理の高速化が実現できる。

(2) 全系統モデルの作成 CSC-P では、それぞれの CSC-S から伝送されてくる標準モデルデータを電気所間を接続する送電線設備情報(整定で設定)を用いて接続し、全系統モデルを作成する。全系統モデルの例を図 3 に示す。

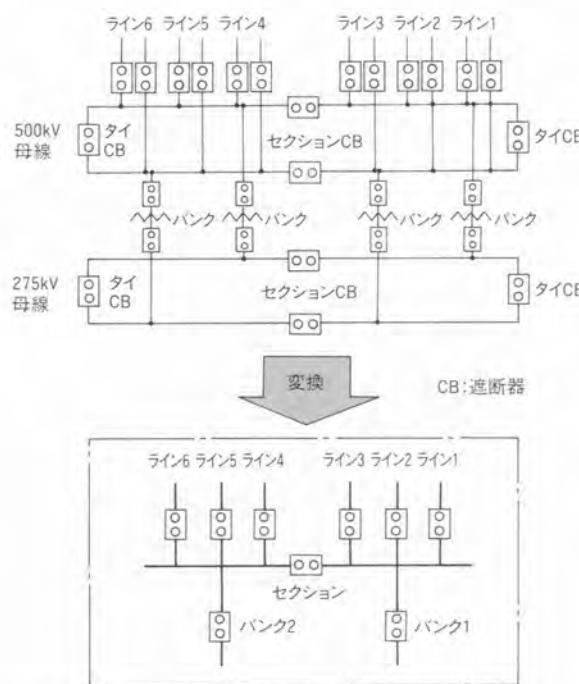


図 2. 電気所構成の標準モデル 実際の電気所構成を標準モデルへ変換してアルゴリズムの標準化を図る。

Modeling of substation configuration

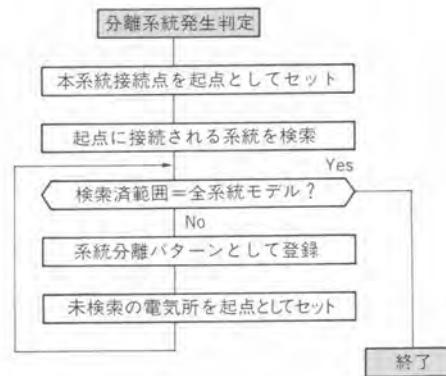


図 4. 系統分離パターンの抽出 2点以内のルート断故障に対して分離系統発生の有無が検索される。

Recognition of separate power system

(3) 系統分離パターンの抽出 全系統モデルにおいて、2点以内のルート断想定故障に対して系統分離が発生するか否かをすべての組合せで探索し、系統分離が発生する故障ケースを起動ケースとして抽出する。図 4 に系統分離パターン抽出の流れを示す。

なお、最大系統における想定故障ケース数は約 300 ケースであるが、処理に要する時間は 1 s 以下である。

6 制御方式と制御精度の向上策

6.1 制御の概要

SSC の制御には本系統制御と分離系統制御があるが、以下では周波数安定化を目的とした分離系統制御について述べる。分離系統制御は、事前潮流と負荷脱落を考慮して制御する第一段制御と、第一段制御後の系統周波数を監視し、追加制御を行う第二段制御からなる。制御目標量は分離点の事前潮流であるが、制御対象は事前潮流の向きによって電源または負荷が選択される。図 5 に基幹系 SSC の制御の流れを示す。

6.2 制御精度の向上

SSC の制御精度に影響を与える要因にはさまざまなものがある。

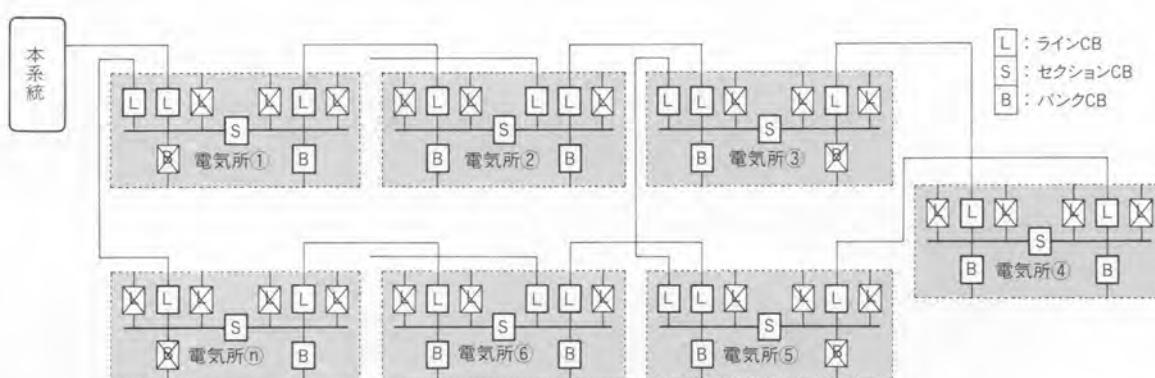


図 3. 全系統モデルの例 電気所標準モデルを送電線設備情報を用いて接続し、全系統のモデルを作成する。

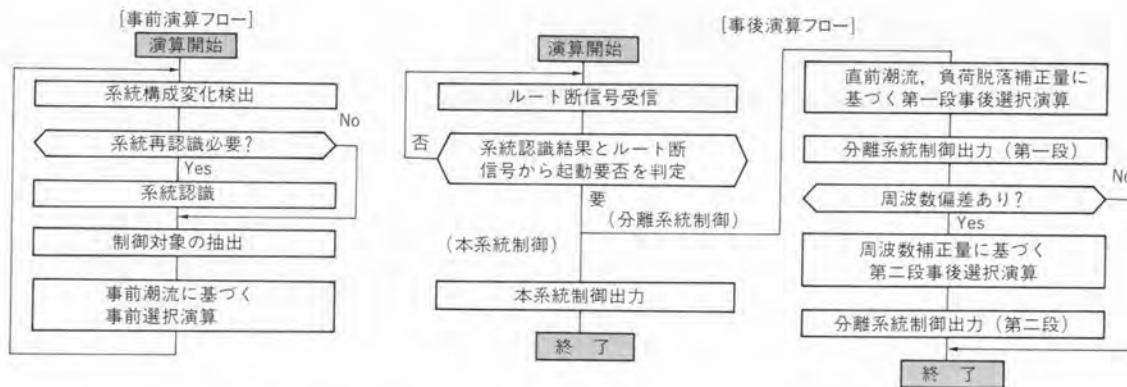


図5. 基幹系 SSC の制御処理の流れ
Processing flow of SSC-P

ある。基幹系 SSC システムでは、制御精度を向上させるためそれぞれの要因に対して次のような精度向上策を採用した。

- (1) 潮流補正(事前潮流の短時間変動) 制御目標量は事前潮流がベースとなるが、この事前潮流が短時間に急変すると制御誤差となる。従来は比較的伝送速度の遅い CDT (Cyclic Digital Telemeter) による取込みと SSC の事前演算周期の制約により、30 s 程度のタイムラグが発生していた。このシステムでは CSC-S から 48 Kbps の高速伝送系で直接取り込むこと、および起動信号受信後に制御量演算を行う事後演算機能の採用により、故障前 2 s 程度(再閉路失敗時の直前潮流や潮流のリップル除去を考慮)の直前潮流を使用することができる。
- (2) 負荷脱落補正(負荷の自然脱落) 最近 OA 機器などの電圧変動に過敏な負荷が急増し、系統故障時の電圧低下で自然脱落する負荷が増大している。種々の実測結果によれば、この脱落負荷は系統容量の 20~40%にも達する場合があり、SSC の制御精度に与える影響は無視できない。このため、脱落量と電圧低下量との相関関係を利用して、故障中の電圧低下量から負荷脱落量を推定する手法を採用した。
- (3) 負荷の直接制御 SSC の制御対象は発電機と負荷であるが、負荷については対象数が多いため従来では親 SSC から制御量を子 SSC に配分し、実際の制御対象の選定はそれぞれの子 SSC で選択している。今回は負荷もすべて CSC-P で直接選択・制御する方式を採用したため、制御目標量にもっとも近い制御対象の選択が可能となった。
- (4) 周波数による第二段補正制御 SSC の制御には負荷の自然脱落など、ある程度の不確定要因がある。この不確定性により生じた誤差は、周波数による第二段制御でカバーする。実測周波数による制御は実際の需給アンバランスを反映しているため、すべての不確定要因を含しておらず原理的には高精度が期待できるが、高速性が望めないため第二段の補正制御として使用する。

1 あとがき

大規模な周波数維持システムの最新の例として、中部電力株基幹系 SSC システムの概要を紹介した。周波数問題は古くて新しい問題である。コンバインド機のように周波数制御性の大きな発電機の出現や周波数に敏感な負荷の増大など、系統特性はつねに変化していく。このような変化に対応すべく今後も研究・開発を進めていく所存である。

文 献

- (1) 東田益男、他：系統自動認識機能を備えた大規模 SSC システムの開発、平成 7 年電気学会 電力・エネルギー部門大会、22 (1995)
- (2) 井上紀宏、他：500 kV 基幹系統のための新系統安定化システムの開発について、平成 4 年電気学会 電力技術研究会 PE-92-113 (1992)
- (3) 佐藤 茂、他：マイクロコンピュータ応用系統安定化システム、東芝レビュー、41, 11, pp.959-962 (1986)



東田 益男 Masuo Tsukada

1964 年中部電力㈱入社。電力系統の安定度の解析・維持に関する技術開発に従事。現在、中部電力㈱系統運用部主幹。
Chubu Electric Power Co., Inc.



佐藤 茂 Shigeru Sato

1973 年入社。電力系統の保護制御システム、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主査。
Power Systems Div.



首藤 逸生 Itsuo Shuto

1978 年入社。電力系統の保護リレー、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。
Fuchu Works



蜂須賀 勉 Tsutomu Hachisuka

1970 年入社。電力系統の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務。
Fuchu Works