

中部電力(株) 長野方面系統安定化(ISC)システム

On-line Integrated Stability Control System of Chubu Electric Power Co., Inc.

草野 日出男

田口 広幸

西入 秀明

斎藤 宣俊

■ KUSANO Hideo

■ TAGUCHI Hiroyuki

■ NISHIIRI Hideaki

■ SAITO Nobutoshi

中部電力(株)は、上越火力発電所の新設に対応し、長野方面の系統を安定化させるため長野方面系統安定化(ISC: Integrated Stability Control)システムの運用を2012年5月から開始した。上越火力発電所と500kV基幹系統を結ぶ長距離送電線は約300kmに及ぶことから電力品質の維持を図るため、長野方面の系統全体の安定度と、電圧及び周波数を維持する複合的な新システムを導入した。東芝は、ISCシステムを構成する親局装置(A系)及び共通部を含む周辺装置を開発した。

Commercial operation of the on-line integrated stability control (ISC) system of Chubu Electric Power Co., Inc. started in May 2012. As the power transmission line extends over a long distance of approximately 300 km linking the 500 kV trunk network to the newly built Joetsu Thermal Power Station, the ISC system has been introduced to maintain the stability of the overall power system in the Nagano area, including the voltage and frequency, in order to ensure the quality of the electricity supply. Toshiba has developed a central processing unit (A series) and external equipment including intersection for ISC system.

1 まえがき

中部電力(株)では、上越火力発電所(総出力2,380 MW)の新設を行っており、初号機(1-1号機)が2012年7月に運用を開始し、合計4台の発電機が2014年までに順次運用を開始する予定である。上越火力発電所で発電した電力は、275 kV上越火力線から長野方面系統を経由して500 kVの基幹系統に送電されるが、上越火力発電所から基幹系統までは約300 kmの長距離系統となる(図1)。そのため、系統に事故が発生すると電圧変動を考慮した過渡安定度対策が必要になり、また平常時には長野方面系統全体を監視した電圧・無効電力制御が必要になる。

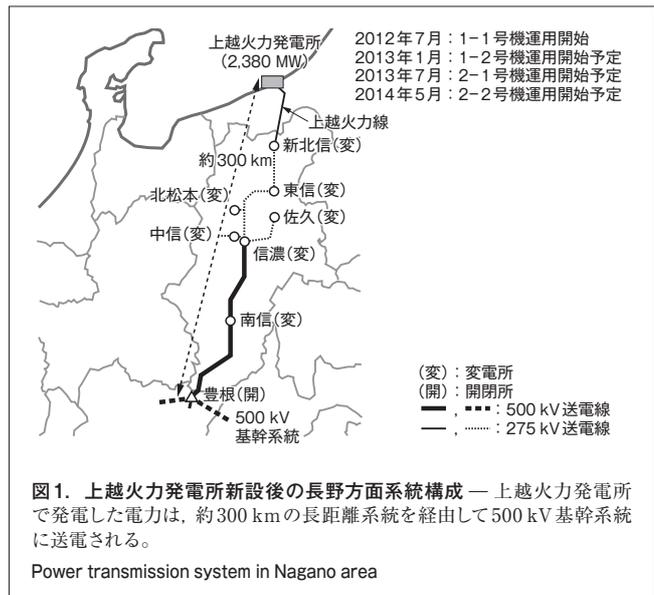
このような要求に応え、上越火力発電所の新設に伴って発生する長野方面の系統現象に対応するため、過渡安定度維持や電圧制御などの機能を統合した長野方面系統安定化(ISC)システムが開発された。ここでは、長野方面で起こる系統現象の概要及び、ISCシステムの概要と主な機能について述べる。

2 長野方面の系統現象⁽¹⁾

2.1 事故時の系統現象

長野方面系統で過酷な非ルート断事故^(注1)が発生すると、発電機が加速し、安定運転ができなくなる過渡安定度問題が生じる。更に、基幹系統から発電機までの系統インピーダンス

(注1)、(注2) ルート断事故は、電力系統を保護するために送電系統の一部が他の部分から切り離される事故。非ルート断事故は、切り離されるには至らない事故。



スが大きい場合、事故除去後に基幹系統と発電機との電圧位相差が大きく変動し、電圧が1~2秒程度大幅に低下してその後上昇するというように変動する(図2)。このため、過渡安定度の維持と電圧変動の抑制の双方を目的とした電源制限(以下、電制と略記)及び調相機器の開閉制御(調相制御)を行う、過渡安定度維持制御が必要になる。

また、ルート断事故^(注2)が発生した場合には、上越火力発電所と長野方面系統が他の系統から切り離されて分離系統が構成され、分離系統周波数の維持と電圧変動の抑制の双方を目的とした電制、負荷制限、及び調相制御を行う、分離系統周波数維持制御が必要になる。

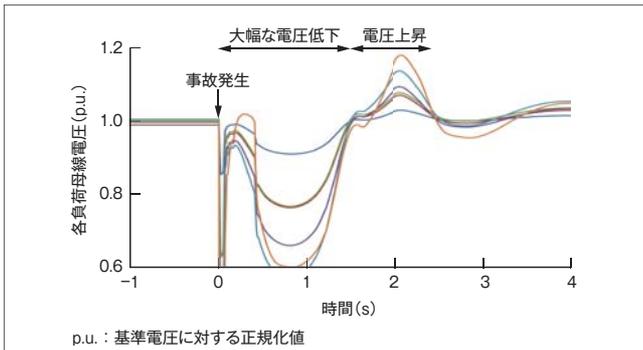


図2. 事故除去後の電圧変動(シミュレーション結果) — 事故除去後に電圧が大きく変動する。
Results of simulation of voltage oscillation in case of power system fault

2.2 平常時の系統現象

重潮流が流れる長距離送電線では、潮流変化に伴う無効電力損失の変化が大きいため、発電機の起動や停止に伴う送電線潮流の変化や日々の負荷変化により、電圧が大幅に変動する。また、ルート断によって分離系統が作られたときに発生する過電圧を抑制するため、平常時の運用で調相設備を適正に投入する必要がある。このため、系統状況に応じた電力用コンデンサや分路リアクトルの開閉、変圧器のタップ制御、及び発電機のAVR(自動電圧調整装置)目標電圧制御による平常時の電圧制御が必要になる。

3 ISCシステムの構成

2章で述べた事故時及び平常時の系統現象に対応するISCシステムは、親局装置ISC-P(Parent)、子局装置ISC-C(Child)、及び端局装置ISC-T(Terminal)の3種類の装置で構成される。

各装置の概要を表1に、ISCシステムが持つ主な機能の概要を表2に、ISCシステムの全体構成を図3に示す。ISC-Pの過渡安定度維持(TSC: Transient Stability Control)機能は、信頼度を確保するために、異メーカー及び異論理で安定度計算を行なう2重系構成とした。また電圧制御(VQC: Voltage and Reactive Power Control)機能は、同一ソフトウェアで常時制御を行う3重系構成とした。

東芝はISC-PのA系及び共通部を含む周辺装置を開発した。具体的には、A系のTSC機能、A系、B系、及びC系のVQC

表1. ISCシステムの各装置の概要

Outline of devices for ISC system

装置	概要
ISC-P	過渡安定度維持制御及び電圧制御のため、オンライン情報を元に30秒周期で演算を行い、結果をISC-Cに送信する。
ISC-C及びISC-T	ISC-CはISC-Tで検出した事故情報に基づき起動判定を行い、ISC-Tに制御指令を送信し、ISC-Tは系統安定化制御を実施する。また、分離系統周波数維持制御を行う。

表2. ISCシステムの機能の概要

Functions of devices for ISC system

機能	概要
TSC	系統事故に伴う発電機の過渡安定度維持及び過渡的な電圧低下防止のため電制を行う。また、電制実施時の仕上がり電圧維持のため調相制御を行う。
VQC	系統事故時の電圧変動防止のため調相制御を行う。また、平常時の電圧維持と、ルート断事故時の過電圧予防のため、調相制御、上越火力発電所発電機の端子電圧制御、及び信濃変電所変圧器のタップ制御を行う。

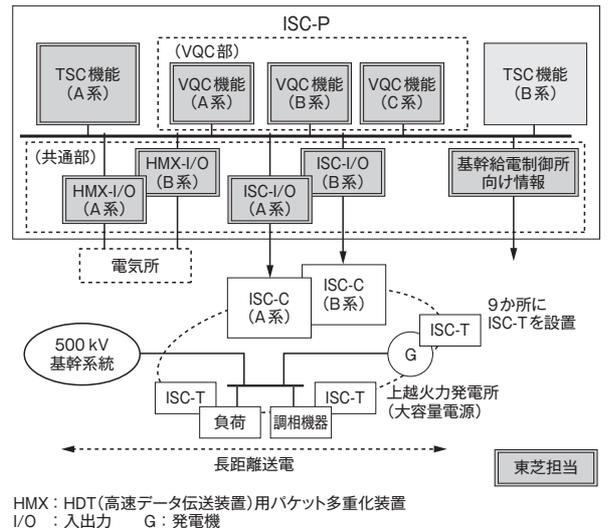


図3. ISCシステムの全体構成 — 東芝はISC-PのA系及び共通部を含む周辺装置を開発した。

Configuration of ISC system

機能、ISC-Cとの伝送装置、電気所からのSV・TM情報^(注3)の入力部、並びに基幹給電制御所向け運転支援情報の出力部である(図3)。

4 電圧変動を考慮した過渡安定度維持制御機能⁽²⁾

事故除去後の電圧低下とその後の電圧上昇という系統現象の要因と対策内容を表3に示す。

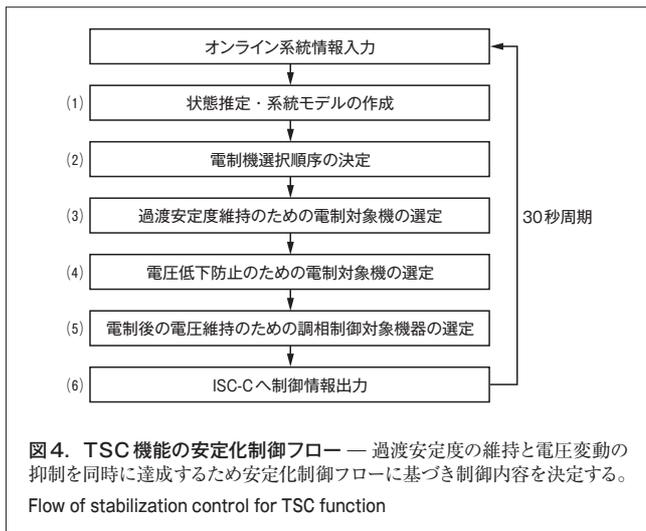
過渡安定度の維持と電圧変動の制御を同時に達成するた

表3. 系統事故時の電圧変動現象と対策内容

Voltage fluctuation phenomena and measures in case of fault

系統現象	要因	対策内容
事故除去後の大幅な電圧低下	発電機の動揺	電制による発電機加速抑制
電制実施後の系統母線電圧上昇	無効電力損失減少による調相投入量の余剰	調相設備の開閉制御による調相投入量の適正化

(注3) SV情報は、電力設備の動作状態などに関する2値情報。TM情報は、電圧や電流などの計測情報。



め、ISC-PのTSC機能は安定化制御フロー（図4）に基づき制御内容を決定する。動作の概要を次に述べる。

- (1) 状態推定・システムモデルの作成 オンラインシステム情報（SV・TM情報）を30秒周期で取り込み、重み付き最小二乗法による状態推定計算を行い、システムモデルを作成する。
- (2) 電制対象機選択順序の決定 同一事故点の進展事故時に電制機の重複を防ぐ包含関係を考慮し、発電機の電制効果に従った順序を決定する。
- (3) 過渡安定度維持のための電制対象機の選定 発電機の脱調^(注4)を防ぐため、作成されたシステムモデルを用いてシステム動特性シミュレーションを実施し、過渡安定度維持に必要な電制対象機を、運用上の制約も加味して選定する。計算は10ms刻みで、10秒間のシミュレーションを実施する。
- (4) 電圧低下防止のための電制対象機の選定 電圧の大幅な低下を防ぐため、システム動特性のシミュレーションを行い、事故除去後の過渡的な電圧低下を一定の範囲内とするのに必要な電制量を算出する。これにより、最適な電制対象機を(3)の結果に加えて選定する。
- (5) 電制後の電圧維持のための調相制御対象機器の選定 系統電圧の変動を防ぐため、電制後の電圧と無効電力のバランスを適正化する調相機器の開閉制御箇所と量を算出する。これに必要な系統状態は潮流計算で決定する。調相機器の開閉制御箇所と量は、電圧が事故前のレベルとなるような調相制御量を求めることにより算出する。調相制御量は、潮流計算により電制実施後の系統全体の電圧と無効電力のバランスを計算して求められる。現在の調相機器の投入状態と調相制御量から、調相制御対象機器を選定する。

(注4) 過酷な系統事故などで発電機の回転数が上昇若しくは動揺することにより、電力系統が不安定な状態になること。

- (6) ISC-Cへの制御情報の出力 決定した電制対象機と調相制御対象機器をISC-Cに対し、伝送情報として30秒周期で送信する。ISC-Cでは、伝送情報を基に制御テーブルを更新し、ISC-Tで検出した事故情報に基づき起動判定を実施する。更に、制御テーブルにある電制対象機と調相制御対象機器に制御指令を出力するため、当該機器のあるISC-Tへ制御指令を送信する。ISC-TではISC-Cからの制御指令とフェールセーフリレーの動作を条件に、電制及び調相制御を実施する。

5 過電圧を考慮した電圧・無効電力制御機能⁽³⁾

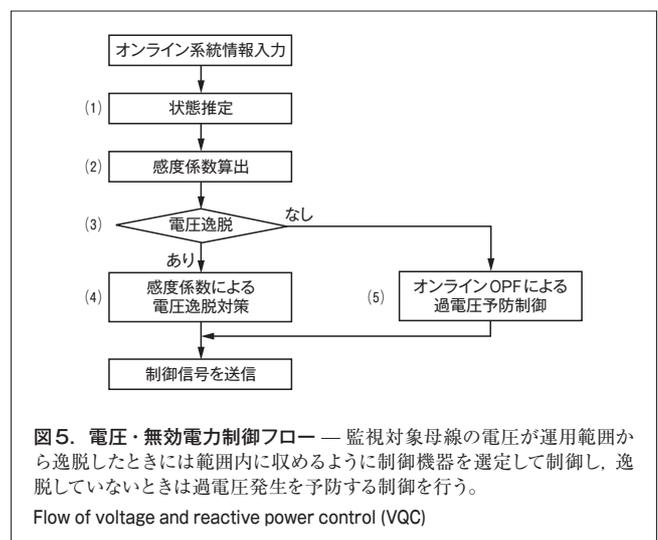
5.1 概要

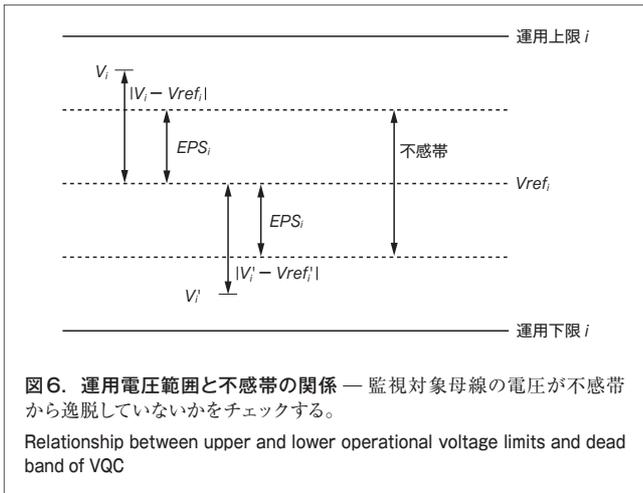
平常時の電圧・無効電力制御機能では、監視対象母線の電圧が受ける影響量を制御機器の感度係数として算出し、不感帯を逸脱した際、運用電圧範囲内に収めるためにもっとも効果がある機器を選定し、制御を実施する。また、ルート断事故時の過電圧発生を予防するための制御として、調相機器投入量の最適化を図る。

過電圧予防制御を加えた電圧・無効電力制御演算は、ISC-Pでオンラインシステム情報を基に30秒周期で行う。求めた制御信号を、ISC-Cを経由して制御対象が設置されているISC-Tに送信する。これにより、当該機器を制御して、系統の変化に対して電圧と無効電力を適切に制御できる。

5.2 電圧・無効電力制御機能

電圧・無効電力制御機能は、平常時の無効電力損失の大幅な変化などで監視対象母線の電圧が不感帯を逸脱した場合に、運用上下限幅内に維持する制御を行う。また、電圧逸脱が発生していないときには、ルート断事故時の過電圧を最小化するため、最適潮流計算（OPF）を用いた過電圧予防制御を実施する。このフローを図5に示し、概要を次に述べる。





- 系統情報 (SV・TM情報) を30秒周期でオンライン入力し、重み付き最小二乗法による状態推定計算を行う。
- 非線形である電圧・無効電力式を線形化し、制御対象機器 (電力用コンデンサ, 分路リアクトル, 変圧器タップ, 及び発電機 AVR) の単位操作量に対して監視点の電圧が受ける影響量を、感度係数として算出する。
- 母線電圧は、運用電圧範囲に対して±数%の裕度を持って運用されるため、運用上下限幅の内側に不感帯を設定し、監視対象母線の電圧が逸脱していないかをチェックする (図6)。
- 電圧が逸脱している場合には、それを解消するための制御を行う。式(1)で表される母線電圧逸脱量の2乗和 E を目的関数とし、これを最小化するように、(2)で求めた感度係数を使って電圧を不感帯内に収めるのにもっとも効果がある制御機器を選定する。

$$E = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{FF_i}{EPS_i} \right)^2 \times a_i \right] \quad (1)$$

$$FF_i = |V_i - Vref_i| - EPS_i \quad (|V_i - Vref_i| - EPS_i > 0 \text{ のとき})$$

$$= 0 \quad (|V_i - Vref_i| - EPS_i \leq 0 \text{ のとき})$$

V_i : 監視点電圧値 (p.u.)
 $Vref_i$: 監視点電圧基準値 (p.u.)
 EPS_i : 許容偏差 (不感帯/2) (p.u.)
 a_i : 重み係数
 N : 不感帯逸脱監視点数

- 発電機出力や負荷の変動が小さく、監視対象母線の電圧逸脱がない場合、OPFにより過電圧予防制御を実施する。過電圧予防制御では、調相投入量を目的関数とし、電圧が運用範囲内に収まるという制約条件下でこれを最小化するようにOPFを行い、最適系統に近づける制御を実施する。



6 あとがき

上越火力発電所の新設に伴う長野方面の系統現象、ISCシステムの構成、電圧変動を考慮した過渡安定度維持制御機能、及び過電圧を考慮した電圧・無効電力制御機能について述べた。ISCシステムは約1年間の現地検証試験を終え、2012年5月9日に運用を開始し、順調に運転を継続している (図7)。

文献

- 木下貴史 他. “長野方面系統安定化 (ISC) システムの開発(1) — 開発計画とシステム概要 —”. 平成23年電気学会全国大会論文集6. 電気学会, 2011, p.387 - 388.
- 武石 勝 他. “長野方面系統安定化 (ISC) システムの開発(2) — 電圧変動を考慮した過渡安定度対策手法の開発 —”. 平成23年電気学会全国大会論文集6. 電気学会, 2011, p.389 - 390.
- 原 有治 他. “長野方面系統安定化 (ISC) システムの開発(5) — 過電圧を考慮した電圧・無効電力制御手法の開発 —”. 平成23年電気学会全国大会論文集6. 電気学会, 2011, p.395 - 396.



草野 日出男 KUSANO Hideo

社会インフラシステム社 電力流通システム事業部 系統ソリューション技術部主務。電力系統監視制御システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。
Transmission & Distribution Systems Div.



田口 広幸 TAGUCHI Hiroyuki

社会インフラシステム社 府中事業所 電力系統システム部主務。電力系統監視制御システムの設計・開発に従事。電気学会会員。
Fuchu Complex



西入 秀明 NISHIIRI Hideaki

社会インフラシステム社 府中事業所 電力系統システム部主幹。電力系統監視制御システムの設計・開発に従事。電気学会、IEEE会員。
Fuchu Complex



齋藤 宣俊 SAITO Nobutoshi

中部電力(株) 系統運用部 系統技術グループ課長。電力系統計画・解析・運用、及び系統安定化システムの開発などに従事。電気学会会員。
Chubu Electric Power Co., Inc.