

大規模系統安定化システム

押田秀治* 前田 徹**
 小和田靖之** 京本寿美恵**
 黒瀬 健**

Large-Scale Special Protection Systems

Hideharu Oshida, Yasuyuki Kowada, Ken Kurose, Toru Maeda, Sumie Kyomoto

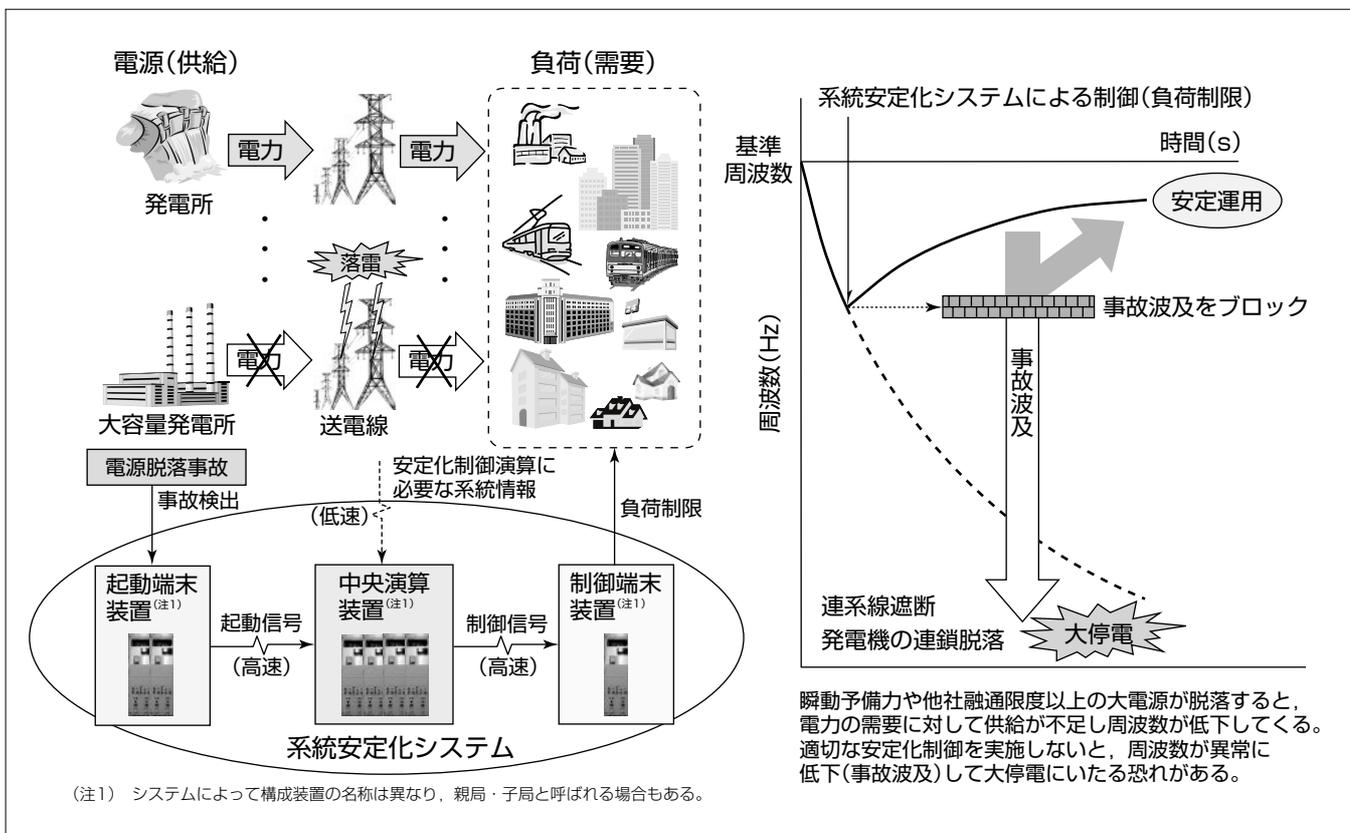
要 旨

系統安定化システムは、過酷事故の影響が波及し大停電にいたるのを未然に防止する機能を持つ。40年以上前から、日本は世界に先駆けてこのシステムを開発・導入し、以降、拡大・複雑化する電力系統に応じて更新・新設が図られてきた。電力流通の高い信頼度を支える最重要システムの一つに位置付けられており、その製作には系統解析からシステム構築にいたる幅広い分野で高い技術力が要求される。三菱電機は、導入当初から時代ごとのニーズに応じて、数多くの系統安定化システムを製作・納入してきた。

このシステムは事故波及防止リレーシステムとも呼ばれ、系統を面的に保護している点に特徴がある。その保護範囲が長距離系統、全系統、及び広域系統等、広がる程、一般にシステムは大規模化してくる。

近年、系統構成の変遷、新規大容量電源・長距離送電線の建設等を背景として、広範囲の電力系統を保護する大規模系統安定化システムの更新・新設の気運が高まってきた。これを受けて、最近、当社は関西電力向けBSS(Bulk power System Stabilizer)、沖縄電力向けSSC(System Stabilizing Controller)、中部電力向け長野方面ISC(Integrated Stability Control system)の各大規模系統安定化システムを、それぞれの電力会社と共同で研究開発し、製作を担当した。現在、どのシステムも現地搬入・調整試験が完了し、運用が開始されている。

本稿では、これらの各システムに関して、導入の背景、特徴、構成・制御論理(制御アルゴリズム)の概要等を運用開始順に述べる。



系統安定化システムの基本的な機能と装置構成

ここでは、大電源(大容量発電所)の脱落事故に対して、負荷制限によって周波数の異常低下を防止する周波数維持機能を示している。この他に、過渡～定態安定度や電圧の維持、過負荷防止等が主たる機能となる。装置構成としては、対象事故を検出してシステム起動させる起動末端装置、安定化制御演算や制御対象選択等を行う中央演算装置、安定化制御を実行する制御末端装置からなる集中型構成を例示している。一般に保護範囲が拡大するほど、各末端装置や通信ルートの数が増え、システムは大規模化してくる。この他に、全ての役割を一装置に集約した自端型構成などがある。各構成装置はデジタルリレーをベースに製作される場合が多いが、親局として計算機サーバを持つシステムもある。

1. ま え が き

系統安定化システムは事故波及防止リレーシステムとも呼ばれ、落雷などの原因で電力系統に過酷事故が発生した場合、その影響が波及して系統周波数の大幅低下や発電機脱調等、大停電を引き起こす恐れのある異常現象へ進展するのを未然に防止する。そのため、電力流通の高い信頼度を支える最重要システムの一つに位置付けられている。

安定化制御の手段としては、対象とする現象に応じて、負荷制限(負荷遮断)や電源制限(発電機遮断)等が適用される。また、その保護する系統の対象範囲が広がる程、一般にシステムは大規模化してくる。

本稿では、最近、当社が製作を担当した大規模系統安定化システムの関西電力向けBSS(広域系統対象)、沖縄電力向けSSC(沖縄本島全系統対象)、中部電力向け長野方面ISC(長距離送電系統対象)の各々について、導入の背景、特徴、構成・制御論理等を述べる。なお、どのシステムも、当社デジタルリレーの主力機種である“MELPRO-Cシリーズ”で構築した。

2. 関西電力納めBSS(更新)

2.1 開発の背景

関西電力では大容量電源脱落事故時の周波数及び動態安定度維持対策として、系統安定化システム(BSS)を40年以上前から導入している。このシステムは関西電力管内の大電源脱落によって周波数が大幅に低下し全系崩壊する恐れのある場合、又は中西60Hz系統の動態安定度が崩壊する恐れのある場合で、事故発生後すみやかに必要最小限の負荷を制限し、系統安定維持を図ることを目的としている。このBSSによ

る安定化制御を図1に示す。

旧BSSの経年が20年を超過して顕在化してきた保守部品確保の問題や、系統構成の変遷(放射状→ループ運用)、新規電源建設等に対応するため、新たなBSSの開発を行った。この新BSSは2011年5月に運転開始し、現在、実運用中である。次に、システムの特徴と構成、新規機能について述べる。

2.2 システムの特徴及び構成

BSSは親装置・事故検出装置・負荷制限装置で構成されている。システム構成を図2に、装置の外観を図3に示す。事故検出装置(23か所)は、大容量発電所及び基幹系統の変電所に設置しており、基幹系送電線のルート断や発電機脱落信号を親装置に伝送している。親装置は、事故検出装置からの信号を判定し、事前の系統状況から演算される制御対象を選択し、負荷制限装置に負荷制限信号を送信する。

従来は系統を2つに分ける放射状の運用に対応して2か所に親装置が設置されていたが、系統全体がループ運用へ変更となったため1か所に集約した。親装置は、事故検出装置及び負荷制限装置との通信を行う通信インターフェース盤、事故判定及び制御対象選択・出力を行う演算盤、整

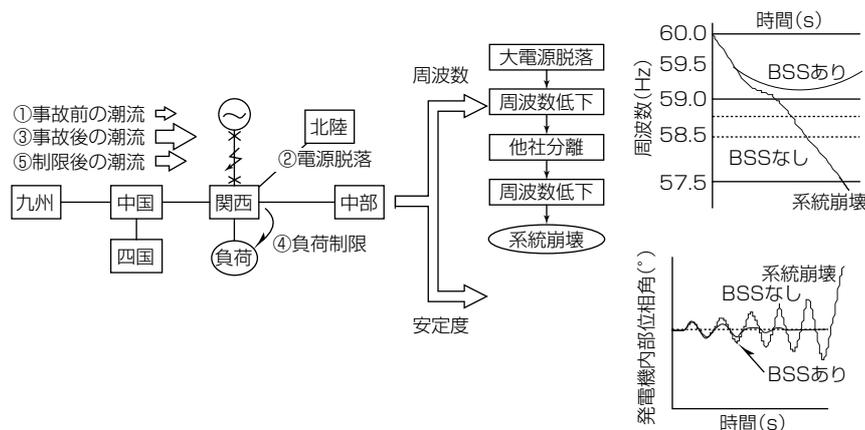


図1. BSSの安定化制御

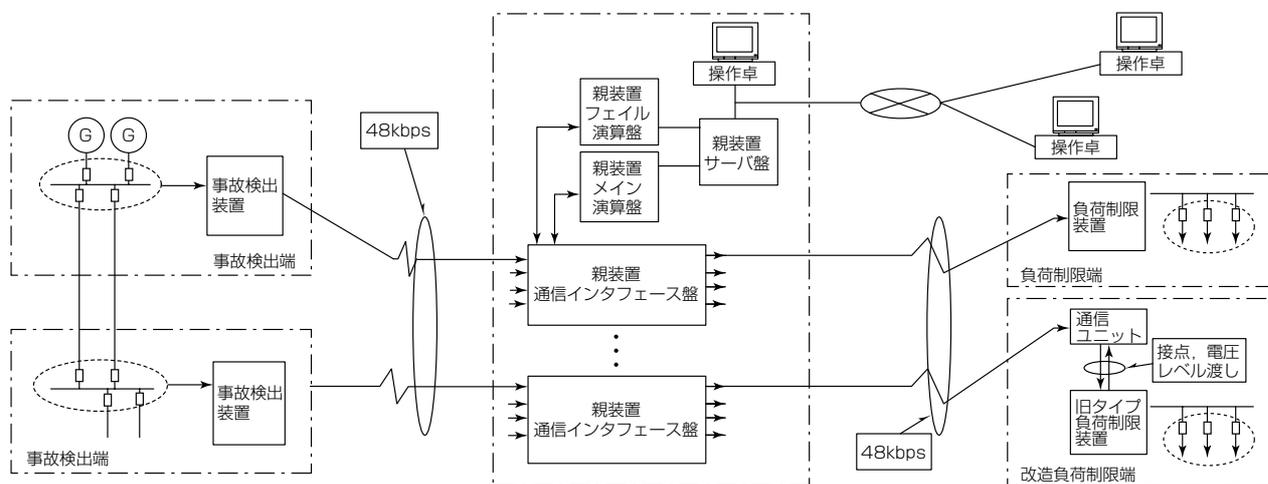
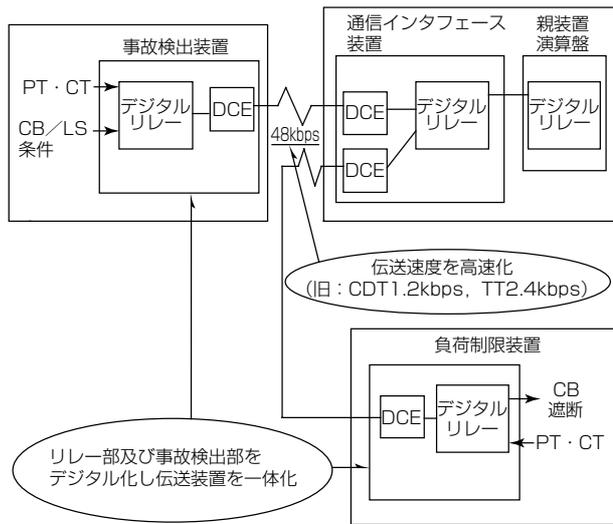


図2. システム構成



図 3. BSSの装置外観



CB : Circuit Breaker
 CDT : Cyclic Digital Transmission
 CT : Current Transformer
 DCE : Data Circuit terminating Equipment
 LS : Line Switch
 PT : Potential Transformer
 TT : Transfer Trip

図 4. 伝送系の構成

定・運用操作・状態表示等のヒューマンインタフェース機能を管理するサーバ盤と操作卓で構成している。

負荷制限装置(73か所)は、各変電所に設置されており、親装置からの制御信号に基づいて制御を行う。

2.3 新規機能

ハードウェアスペックの向上や、高速・大容量の伝送路構築が可能となったため、新たな機能を開発・適用した。次に代表的な内容を示す。

(1) 制御の高速化

従来は事故検出信号についてはTT・CDT装置を適用し、伝送速度はそれぞれ2.4kbps・1.2kbpsであった。今回、事故検出装置及び負荷制限装置に伝送部を内蔵し48kbpsの伝送速度を適用し高速化、大容量化を実現した。これによってTT・CDT装置の設置コストの削減も可能となった(図4)。

(2) ヒューマンインタフェースの高度化

従来は親装置設置箇所に併設した操作卓からだけ整定変更や各種表示の確認が可能なスタンドアロンの構成であっ

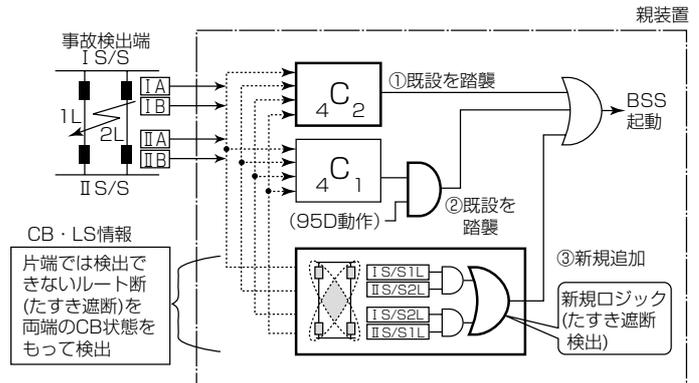


図 5. たすき遮断検出ロジックの追加

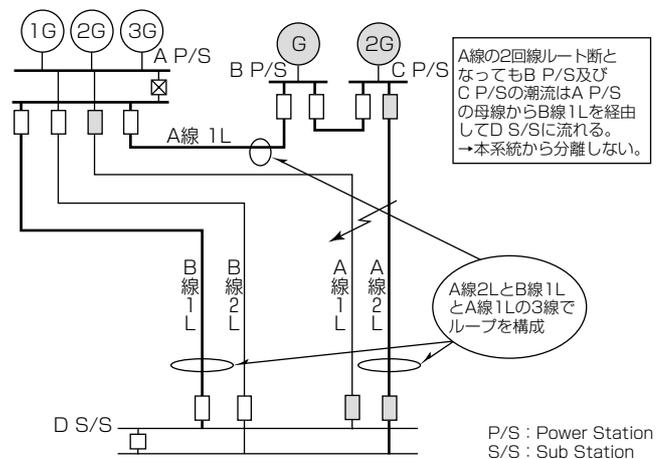


図 6. 系統構成の認識

た。今回、電力用IP(Internet Protocol)網を活用し、遠方の運用箇所、保全箇所についてもヒューマンインタフェースを提供可能な構成とし、操作・監視の効率化を図った。

(3) 事故検出の高度化

既設システムでは、事故検出端末ごとに送電線ルート断(自端の2回線断)検出を行っていたため、遮断器不動作(CBF)などが発生した場合に検出ができない可能性があった。今回そのようなケースにも対応するため、各端末からルート断検出信号に加え、1回線ごとのCB・LS状態を親装置に送信して、親装置側でルート断(たすき遮断)を判定する機能を追加した。図5に親装置のロジックを示す。

BSSが事故検出の対象とする一部の系統では、電源線が複数発電所にわたってループを構成する複雑な系統運用を行い、かつ送電線の配置から風雪害や山火事等による複数回線の多重・続発事故に対応する必要がある。しかしながら従来のルート断検出方式では、電源脱落の発生を正しく判断できない(図6)。このため系統パターン認識を用いた新たな事故検出方式を適用した。

3. 沖縄電力納めSSC(新設)

3.1 開発の背景

他社との連系のない小規模な沖縄本島系統は、併入発電機台数が少なく、電源脱落時に周波数が大きく低下する恐れがあるため、従来、不足周波数リレー(UFR)を全系に分散設置することで、電源脱落に伴う周波数低下に対処してきた。一方、沖縄本島系統では、環境面や経済性を考慮し、既存発電機と比べ出力の大きいLNG(Liquefied Natural Gas)火力機導入が進められている。単機出力割合の大きな発電機が脱落すると、分散型のUFRだけでは電源脱落時の周波数低下が回避できず、また他の健全発電機の安定運用に影響を与える可能性が出てきた。そこでこの度、オンライン情報を活用し、高速かつ適正な制御を実現できる集中型の系統安定化システム(SSC)を沖縄電力と共同で開発した。このSSCは2012年4月に運転を開始し、現在、実運用中である。次に、システムの特徴と構成、制御論理について述べる。

3.2 システムの特徴及び構成

SSCは、沖縄本島系統の諸特性を踏まえて開発しており、次のような特徴を持つ。

- ・集中型のシステム構成を採用し、全運転発電機、主要負荷及び系統周波数に関するオンライン情報を積極的に活用した周波数制御論理(起動方式・制御方式)を開発、適用している。
- ・最新の高性能デジタルリレーと高速・高信頼度な電力用通信網を使用している。

このSSCによって、系統周波数低下の主因である発電機の脱落や出力異常低下を確実に検出し、系統状況に応じた安定化制御を高速かつ適正に実現する。SSCのシステム構

成を図7に、装置の外観を図8に示す。各装置の機能は次のとおりである。

(1) 中央演算装置

給電指令所に設置され、各端末装置からの上り情報(発電・負荷情報、起動信号、周波数データ等)を基に制御演算を行い、下り情報として制御(負荷制限)指令を系統安定化端末装置に送出する(2系列構成)。

(2) 事故検出端末装置

発電所に設置され、発電機の出力情報や起動信号を中央演算装置に送信する(2系列構成)。

(3) 系統安定化端末装置

変電所に設置され、中央演算装置に負荷量を送信する。また、中央演算装置からの制御指令を受信し、所定の負荷制限を行う(1系列構成)。

3.3 制御論理

3.3.1 起動方式

運転中発電機の脱落や出力異常低下は、発電プラント側事故又は系統側事故に起因して生じる。この発電プラント側事故には、瞬時に主変圧器遮断器(以下“主変CB”という。)が開放される電気系故障、出力喪失後に主変CBが開放されるタービン・ボイラ系故障、及び主変CBが開放されずに緩やかに出力が低下するような補機などのその他機械的故障が、また系統側事故には、主に単機脱落となる片母線・主変事故など、及び複数機脱落となる二重母線事故等

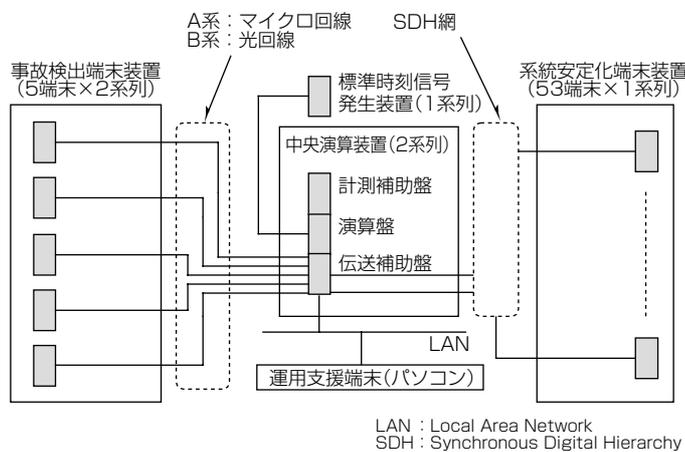


図7. SSCのシステム構成

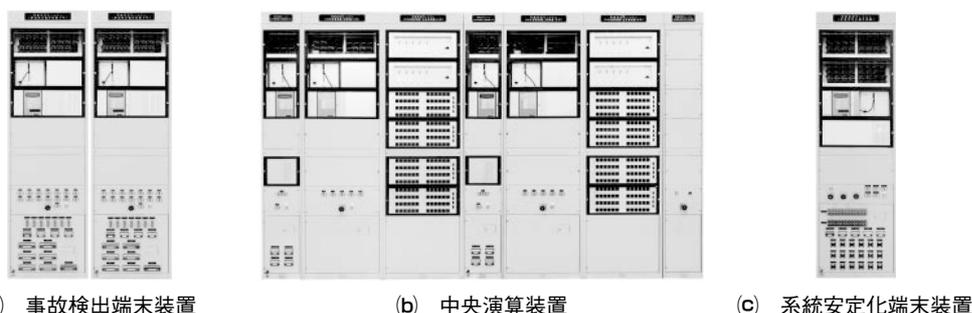


図8. SSCの装置外観

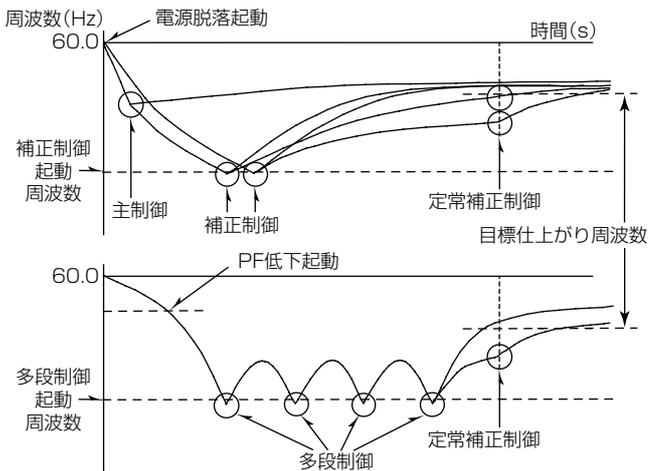


図9. SSC制御時の周波数変化イメージ

が含まれる。SSCではこれら事象の確実な検出のため、主変CB状態や電気量などの情報に基づき高速に発電機脱落を検出する“電源脱着起動”と、緩やかな出力(P)低下と周波数(F)低下を条件とした“PF低下起動”の2方式を開発して採用した。

3.3.2 制御方式

起動後は、次の各制御方式が系統状況に応じて適切に動作することで、周波数低下を確実に抑制する。制御実施時の周波数変化イメージを図9に、各制御方式を次に示す。

(1) 主制御

電源脱落率の大きな事故が生じた場合は、事故直前及び事故中の計測情報に基づき制御量を算出し、早期に負荷制限を実施することで迅速な周波数低下抑制を実現する。

(2) 補正制御

電源脱落率の小さな事故が生じた場合、又は制御誤差などに起因し周波数低下が継続する場合、事後除去後の計測情報などに基づき制御量を算出し、所定レベル以上の周波数低下を条件に負荷制限を実施する。

(3) 多段制御

発電機出力が緩やかに低下しPF低下起動を検出した場合、所定レベル以上の周波数低下を条件に複数段の負荷制限を実施する。

(4) 定常補正制御

起動後一定時間経過後も周波数回復が十分ではない場合、事後情報に基づき系統定数を推定した上で再度制御量を算出し、負荷制限を実施する。

4. 中部電力納め長野方面ISCシステム(新設)

4.1 開発の背景

新潟県上越市に大規模火力発電所(最大出力2,380MW)の新設を行っており、2012年7月から2014年5月にかけて順次運転開始を予定している。上越火力発電所の発電電力は、新設される275kV上越火力線から長野系統を経由して

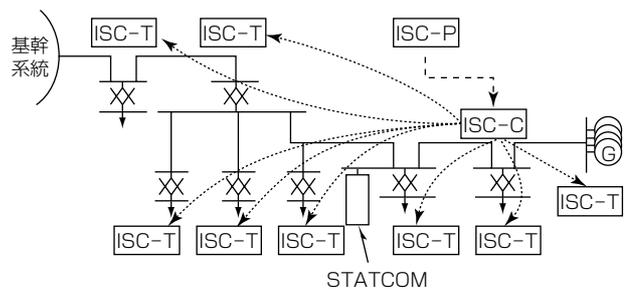
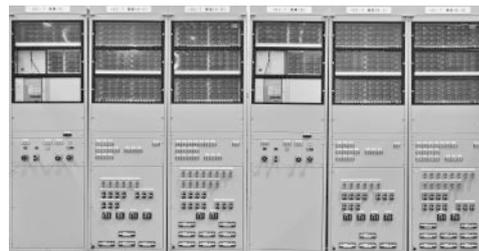


図10. ISCのシステム構成



(a) ISC-C



(b) ISC-T

図11. ISCの装置外観

500kV基幹系統へ送電される。上越火力発電所から500kV基幹系統までは約300kmの長距離系統となるため、過渡安定度対策及び周波数対策では、電圧変動を考慮した系統安定化対策が必要となる。加えて、平常時運用では、長野方面系統全体を監視した上で電圧・無効電力制御を行う必要がある。

これに対し、過渡安定度対策、周波数対策、電圧変動対策に対応する統合型の系統安定化システム(ISC)を中部電力と共同で開発した。このISCは2012年5月に運転を開始し、現在、実運用中である。次に、システムの特徴と構成、制御論理について述べる。

4.2 システムの特徴及び構成

ISCは、ISC-P(他社製)・ISC-C(当社製)・ISC-T(当社製)の3種類の装置で構成されている。システムの構成を図10に、装置の外観を図11に示す。

ISC-P~ISC-Cの異メーカー間の装置の結合はTCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)によってIP接続され、ISC-C~ISC-T間はPCM(Pulse Code Modulation)接続されている。

ISCは全装置とも2系列構成としており、DUAL構成の

表1. ISCの制御機能

事象	演算方式	制御機能(制御内容)
非ルート断事故	事前演算(ISC-P)	過渡安定度維持第1段制御(電源制限+調相制御)
	事後演算(ISC-C)	過渡安定度維持補正制御(電源制限)
ルート断事故	事前演算(ISC-C)	分離系統周波数維持第1段制御(電源制限+負荷制限+調相制御)
	事後演算(ISC-C)	分離系統周波数維持補正制御(電源制限+負荷制限+調相制御)
平常時運用	事前演算(ISC-P)	電圧・無効電力制御(VQC) (調相・変圧器タップ制御・ 発電機端子電圧制御)
		最適電力用コンデンサ投入量制御(SC制御)

2系列を採用しているが、事後演算を実施している一部のISC-Cは、数msの計測電気量の差によって制御結果にもわずかな差が出てくる可能性もあるため、DUPLEX(常用/待機)の2系列構成としている。

(1) ISC-P

計算機サーバで構成し、給電指令所に設置する。過渡安定度維持第1段制御及び平常時の電圧・無効電力制御の演算を、オンライン情報を基に30秒周期で行い、制御量をISC-Cへ送信する(2系列構成)。

(2) ISC-C

デジタルリレーで構成し、新北信変電所に設置する。ISC-Tで検出した事故情報に基づき起動判定を行い、ISC-Pの演算結果に基づく過渡安定度維持制御指令をISC-Tへ送信する。また、過渡安定度維持補正制御や分離系統周波数維持制御(第1段制御・補正制御)の演算を実施し、ISC-Tに制御指令を送信する(2系列構成)。ただし、事後演算を担当する装置は常用/待機の2系列構成としている。

(3) ISC-T

デジタルリレーで構成し、上越火力発電所から豊根開閉所までの各電気所9か所に設置する。ISC-Cからの制御指令とフェールセーフリレー動作を条件に系統安定化制御を実施する。また、計測情報や起動情報をISC-Cへ常時送信する(2系列構成)。

4.3 制御論理

ISCは長野方面系統の諸特性を踏まえて開発しており、様々な系統事故に対して、表1の各制御機能を事前演算と事後演算の融合によって高速かつ適応性の高いシステムとして実現している。

非ルート断事故時の過渡安定度維持制御では、ISC-Pで30秒周期で事前演算する第1段制御、及びISC-Cで事故発生後のデータを用いて事後演算する補正制御の2段階の制御で実現しており、電源制限に加えて、調相制御も実施し、発電機の脱調防止のみならず、過渡的な電圧変動も抑制している。

ルート断事故時の分離系統周波数維持制御では、ISC-

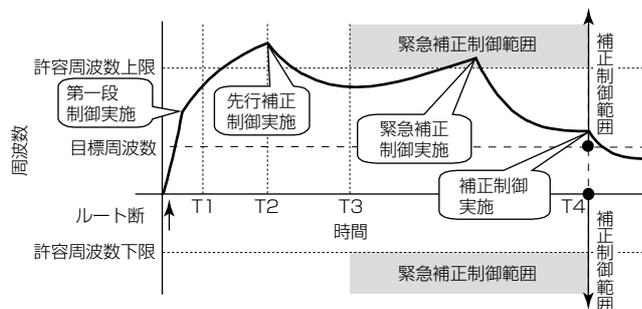


図12. 分離系統周波数維持制御実施時の周波数変化

Cで10秒周期で事前演算する第1段制御、及びISC-Cで事故発生後のデータを用いて事後演算する補正制御の2段階の制御で実現している。ただし、補正制御はさらに先行補正制御、緊急補正制御、補正制御の3段階としており、分離系統周波数維持のために、より細やかな制御を実施している。

平常時運用では、ISC-Pで30秒周期で事前演算しており、平常時の電圧プロフィールが最適になるよう集中型の制御を実現している。

一例としてルート断事故時の分離系統周波数維持制御の周波数変化のイメージを図12に示す。

5. むすび

最近、当社が製作を担当した3つの大規模系統安定化システムについて、導入の背景、特徴、構成・制御論理等を述べた。今後、再生可能エネルギーを始めとする分散型電源の普及・拡大、基幹送電線の増設や周波数変換容量の拡大による広域連系の強化等、我が国の電力系統は大きな変革期を迎えようとしている。これらに伴い、系統安定化システムに求められる機能・性能もますます高度なものになっていくと予想される。

当社は、長年培った系統解析技術と最新のICT(演算制御・通信技術等)を駆使して、これからも様々なニーズに応える系統安定化システムを提供し、電力流通の高信頼度維持に寄与していく所存である。

参考文献

- (1) 森田 誠, ほか: 広域系統安定化システムの再構築, 電気学会保護リレーシステム研究会資料, PPR-11-19, 95~99 (2011)
- (2) 喜納 篤, ほか: 小規模・独立系統向け集中型系統安定化システム(SSC)の開発と適用, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 31 (2011)
- (3) 木下貴史, ほか: 長野方面系統安定化(ISC)システムの開発(1)~(5), 電気学会全国大会講演論文集, 6-213~217 (2011)