

再生可能エネルギー電源の大量導入に対応した系統安定化システム

草場健一郎* 西野 宏*
久留島智博* 前田 徹*
佐々木孝志*

Special Protection Systems Adapted for Large - scale Renewable Energy Sources Installation

Kenichiro Kusaba, Tomohiro Kurushima, Takashi Sasaki, Hiroshi Nishino, Toru Maeda

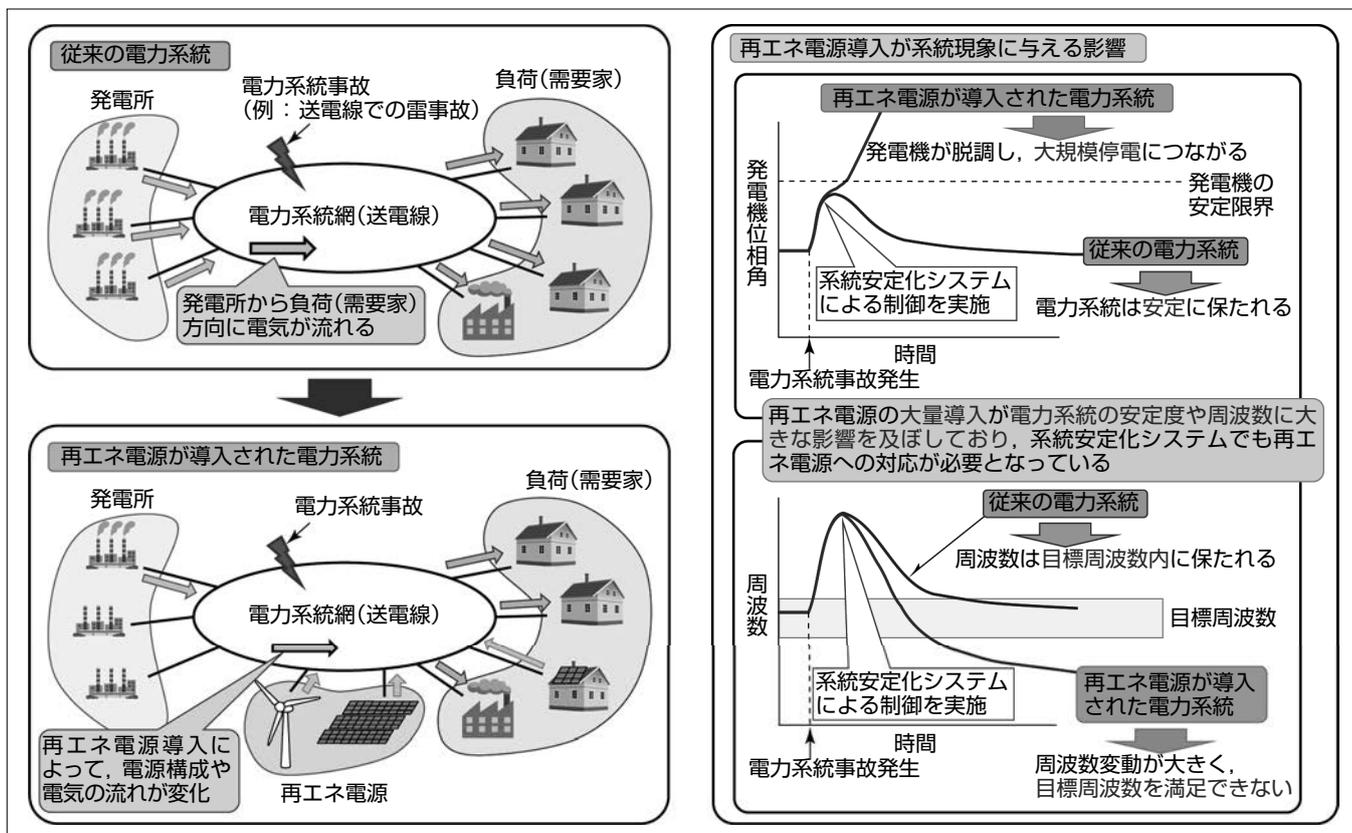
要 旨

系統安定化システムは、電力系統での過酷事故発生時に、電源制限等の制御を高速に実施することで系統全体への事故の波及を防止し、大規模停電を未然に防止するシステムである。三菱電機では、半世紀にわたって系統安定化システムを開発・製作し、電力会社に納入している。

近年、太陽光発電に代表される再生可能エネルギー電源（以下“再エネ電源”という。）の電力系統への連系が増加しており、今後も更なる導入量拡大が予想される。これに伴い、再エネ電源の挙動（出力変化や系統事故時の電力系統からの脱落、復帰）が系統の安定度や周波数に及ぼす影響が大きくなっており、系統安定化システムで再エネ電源の挙動を踏まえた制御演算を行うことが喫緊の課題となっ

ている。再エネ電源の出力は、時々刻々と変化する気象条件に影響され、また、系統事故時の挙動は、FRT (Fault Ride Through) 機能や単独運転防止機能等、再エネ電源が搭載する機能によって異なることから、これらの特性を考慮した系統安定化システムを構築することが求められている。

当社では、再エネ電源の大量導入に対応した系統安定化システムとして、中部電力(株)向け基幹系統合型系統安定化システム（基幹系ISC(Integrated Stability Control system)）、及び四国電力(株)向け500kV緊急制御装置(Emergency Control System : ECS)を開発・製作している。



再生可能エネルギーの電力系統への影響

近年、再生可能エネルギーの増加によって、電源構成や電気の流れが変化するとともに、系統事故時に再生可能エネルギーが電力系統の安定度や周波数に与える影響が大きくなっている。

*系統変電システム製作所

1. ま え が き

電力系統で過酷事故が生じた場合、発電機脱調や周波数の大幅な変動が生じ、大規模停電に至る可能性がある。系統安定化システムとは、このような過酷事故時に電源制限(以下“電制”という。)等の制御を高速に実施することで大規模停電を回避するためのシステムである。電力会社には様々な系統安定化システムが導入されており、現在の高品質な電力流通を支える重要なシステムの一つとなっている。

近年、再エネ電源の増加が、電力系統の安定度や周波数に大きな影響を及ぼしており、再エネ電源の更なる導入拡大に伴って系統安定化システムでもその対策が必要不可欠となってきている。

本稿では、再エネ電源の大量導入に対応可能な系統安定化システムとして、当社が製作している中部電力(株)向け基幹系統合型系統安定化システム(以下“基幹系ISCシステム”という。)と、四国電力(株)向け500kV ECSについて述べる。

2. 中部電力(株)向け基幹系ISCシステム⁽¹⁾

2.1 開発の背景

中部電力(株)では、電力安定供給の確保、及び低廉な電気料金を実現するため、これまで様々な系統安定化システムを開発・導入してきた。これらのシステムは、構築後20年余りを経過し、経年による劣化更新時期を迎えている。また、近年の電力系統は、再エネ電源の大量導入等、シス

テム構築時と比べて系統状況が大きく変化している。こうした状況変化に対応し、かつ、従来過渡安定度維持対策用と周波数維持対策用で別々に構築していたシステムを一つに統合化した基幹系ISCシステムを新たに開発・導入した。

2.2 システムの特長及び構成

基幹系ISCシステムの全体構成を図1に示す。基幹系ISCシステムは、親局装置(ISC-P(Processing equipment)), 子局装置(ISC-C(Control equipment)), 故障検出装置・計測装置(ISC-S(Sensing equipment)), 転送遮断装置(ISC-T(Transfer trip equipment))の4種類の装置から成り、親局装置は産業用計算機、子局・故障検出・計測・転送遮断装置はデジタルリレー装置で構成される。装置間はマイクロ回線やIP(Internet Protocol)網で結合され、制御に必要な情報をやりとりし、親局装置を他メーカー、子局装置以下を当社が担当しており、約220面の大規模システムである。

基幹系ISCシステムは、過渡安定度維持(Transient Stability Control : TSC)機能と周波数維持(System Stabilizing Controller : SSC)機能の大きく二つの機能を具備する。本稿では、TSC機能について述べる。

2.3 TSC機能

TSC機能は、電力系統での過酷な事故によって生じる過渡安定度問題に対して、電制を実施することによって、電力系統を安定的に保ち、大規模な停電に至ることを未然に防止する。TSC機能では、事前演算による第1段制御と事後演算による補正制御の2段階の制御によって、電

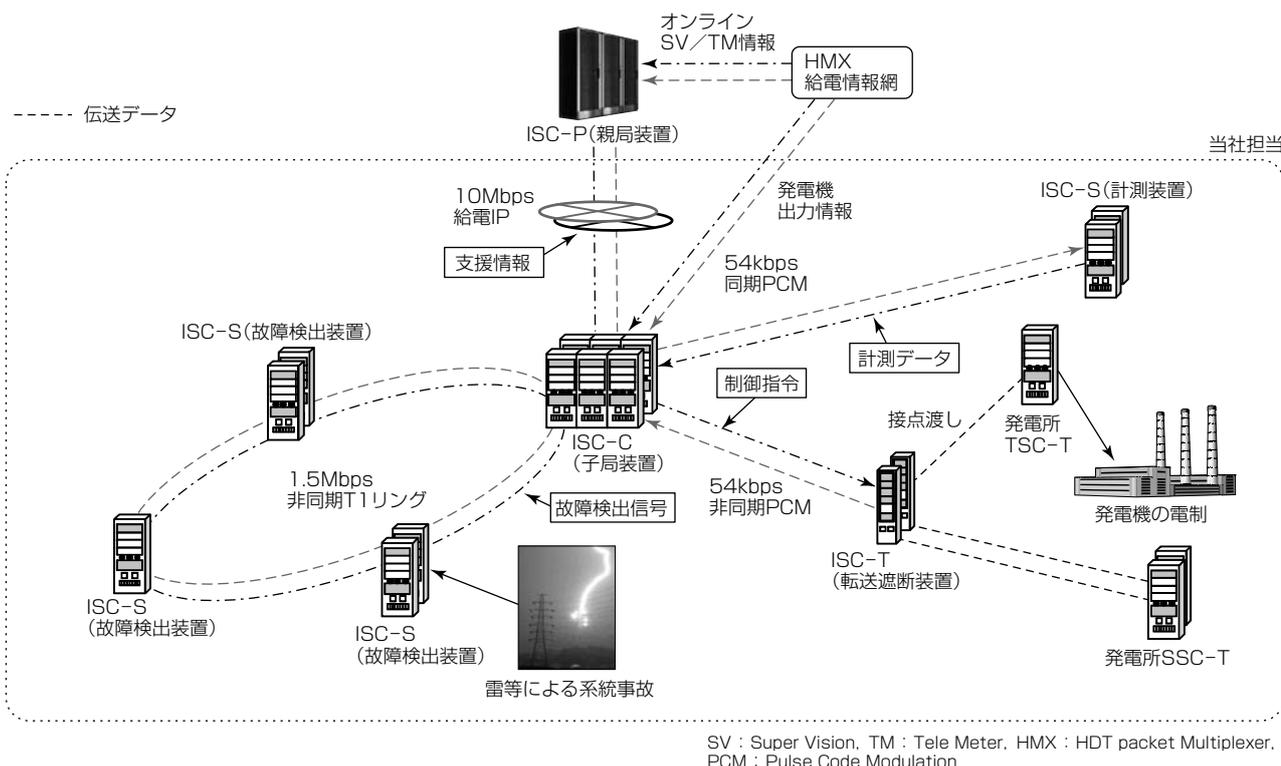


図1. 基幹系ISCシステムの全体構成

力系統の確実な安定化を図る。

過渡安定度問題に対する制御は、事故発生から制御までの時間が短いほど、制御量(遮断する発電機)を減らすことができるという利点がある。そこで、基幹系ISCシステムでは、高速な制御として第1段制御を導入している。第1段制御は、ISC-Pで系統オンラインデータを基に詳細安定度計算を行い、第1段制御で遮断する発電機の制御テーブルをあらかじめ決定してISC-Cへ送信する。ISC-Cは、電力系統で事故が発生した場合にISC-S(故障検出装置)で検出した事故情報に基づいて起動判定を行い、事前に決定した制御テーブルに従ってISC-Tへ制御指令を送信することで高速な第1段制御を実現している。

一方、近年の電力系統では再エネ電源の導入が拡大しており、系統現象に与える影響も大きくなっている。第1段制御で、ISC-Pは30秒周期でオンラインデータを収集して制御テーブルを決定するが、出力が変化しやすい再エネ電源の大量導入に伴い、30秒間の潮流変動が大きくなると、制御テーブル決定時点から系統状態も大きく変化する。その結果、第1段制御だけでは不足制御となり安定化できないおそれがある(図2)。その対策として、あらかじめ潮流変動を最大限想定して制御テーブルを決定する方法もあるが、必要以上の制御を行うことになる。そのため、第1段制御に加え、事故発生直後の潮流計測情報に基づき安定

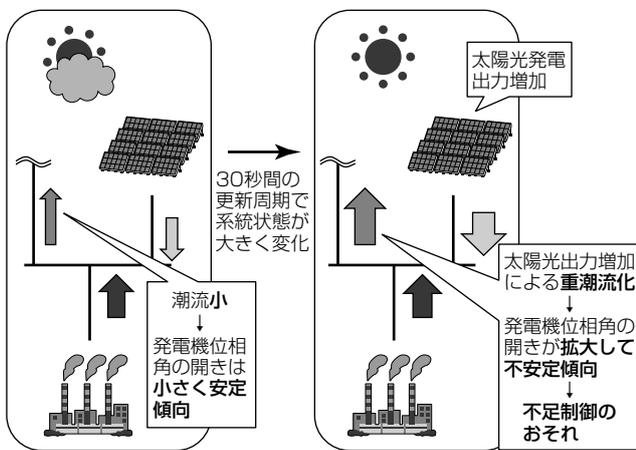


図2. 再エネ電源の出力変動

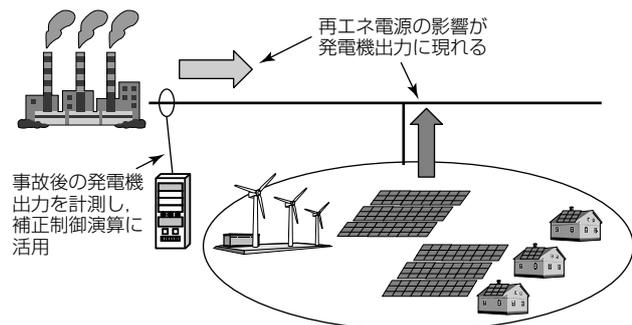


図3. 再エネ電源の考慮

判別を行い、追加の補正制御を実施することで、必要最小限の制御量で安定化を図ることができ、需給運用への影響緩和や電圧・周波数変動幅の抑制等も実現している。

電力系統での事故発生後の発電機の安定度は、事故後の発電機出力変化に現れる。事故後の発電機出力を用いた補正制御を適用することで、系統事故時の再エネ電源の特性を考慮した安定化を可能としている(図3)。

具体的には、事故後の発電機出力をリアルタイム計測し、それを基に電力相差角曲線(以下“P- δ 曲線”)を推定し、等面積法によって、安定度判別と制御量算出を行う手法を採用している(図4)。

再エネ電源導入に対する補正制御の安定化効果として、シミュレーション検証を実施した。第1段制御の制御テーブルでは安定(無制御)で、30秒間の潮流変動によって系統現象が変化した場合の潮流断面を用いた。図5に補正制御の適用有無による発電機位相角波形を示す。補正制御なしの場合は、発電機が1波脱調となり不安定であるのに対して、補正制御ありの場合は、補正制御で発電機が1台電制され系統は安定に維持されることが確認できる。また、

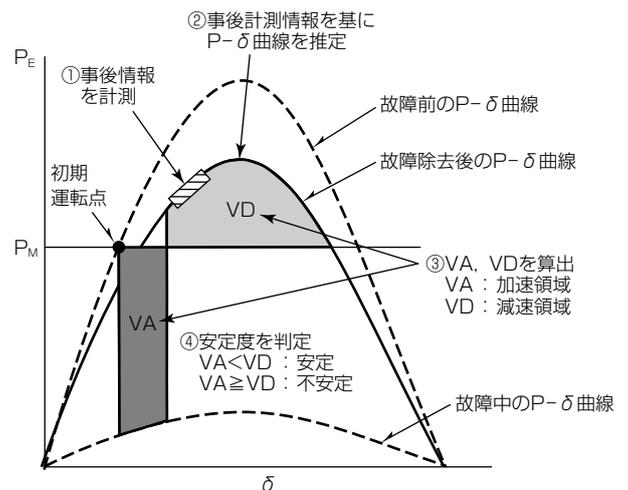


図4. 等面積法の手法

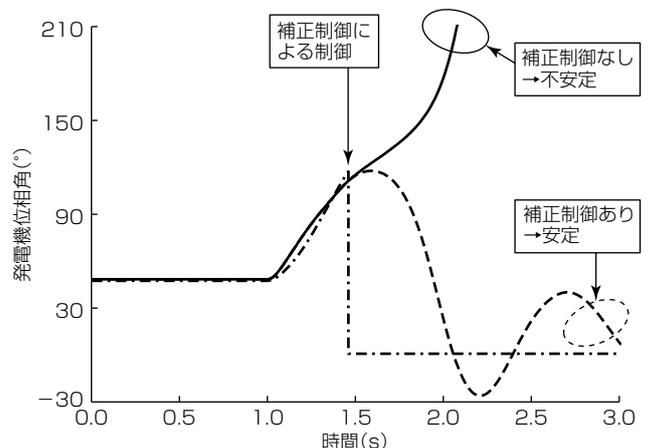


図5. 補正制御適用による安定化効果

リアルタイムシミュレータを用いた検証によって、その効果を確認した。

3. 四国電力(株)向けECS

3.1 開発の背景

四国電力(株)では連系線ルート断事故時の四国系統周波数維持、及び大電源脱落時の中西系統周波数維持を目的として、ECSを1994年から導入している⁽²⁾。一方、近年導入拡大が進む再エネ電源のうち、特に四国系統では連系線事故時での太陽光発電設備(以下“PV(PhotoVoltaics)”という。)の応動が周波数変動に大きく影響することが確認されている。そこでこのたび、経年によるシステム更新に当たり、事故時のPVによる影響を考慮した新たなECSの開発を行うことになった(四国電力(株)及び当社で共同研究実施)。

3.2 システムの特長及び構成

システム構成を図6に示す。ECSは、中央判定装置、発電所用端末装置、変電所用端末装置の3種類の装置から成り、全ての装置をデジタルリレーで構成する。また、全2系列構成であり、約50面で構築する大規模システムである。

ECSは、次の特長及び表1に示す制御機能を持つ。

- (1) 各発電機プラントの安定性を判定して制御を行うことで不要な電制を回避し、四国系統の周波数を維持(現ECSの長所踏襲)。

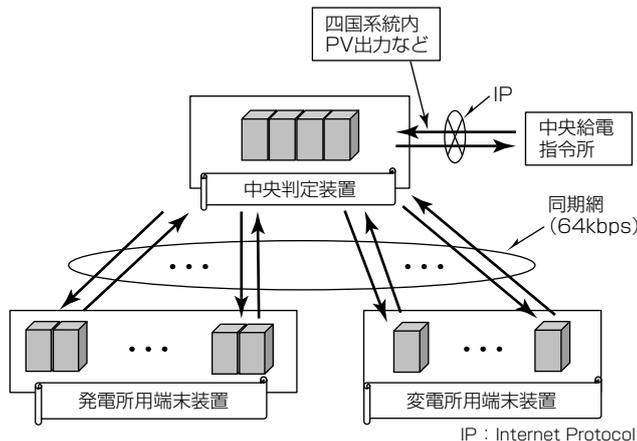


図6. ECSのシステム構成

表1. ECSの制御機能

制御目的	機能名	概要
四国系統周波数維持	地内ECS機能	連系線ルート断によって生じた四国系統の周波数維持を目的に電制、直流制御指令等を実施
	四国系統周波数低下対策	連系線ルート断によって生じた四国系統の周波数維持を目的に直流制御指令等を実施
中西系統周波数及び安定度維持	広域ECS機能	発電機複数台脱落事故時の中西系統周波数維持及び中西系統安定度維持を目的に制御を実施
発電機ローカル脱調対策	ローカル脱調検出制御機能	各発電機のローカル脱調時に電制を実施

- (2) 業界で初めて^(注1)PV出力を安定化システムに取り込み、制御に反映することで、事故時のPV応動に適応。
- (3) 直流制御、発電機ランバック^(注2)を活用し、制御量(電制量等)を削減。

これらの機能のうち、本稿では、PVの影響が大きい地内ECS機能(四国系統周波数上昇対策)について述べる。

(注1) 2018年7月20日現在、当社調べ

(注2) 系統周波数上昇時に発電機の出力を低下させる機能。発電機単独で制御を実施。

3.3 地内ECS機能

地内ECS機能(四国系統周波数上昇対策)は、連系線ルート断時に電制、直流制御等を行うことで、四国系統の周波数を維持する。この機能は、主制御と補正制御の組合せによって実現する。

一方、近年多数導入されたPVは、事故時の電圧低下に伴って出力停止(PV脱落)して電圧復帰後に出力復帰(PV復帰)する特性がある(図7)。FRT対応PVは出力停止後1s以内に出力復帰するため、周波数の過渡的な変化に大きな影響は与えないが、FRT非対応PVについてはECSの制御で考慮が必要であり、次にその内容について述べる。

主制御は、事前計測情報に基づき、制御パターンを事前に作成しておき、連系線ルート断検出時に制御を実施する。PV脱落は電制と同様の影響を与えるため、PV脱落を考慮せず主制御を行うと、過剰制御になるおそれがある。そこで主制御では四国系統内PV出力を中給システムから伝送し、事故時のPV脱落量を想定して制御に反映することでPVの影響を考慮する。具体的には、事故時の電圧低下レベルに応じたPV脱落量を3段階想定し、制御パターンを電圧低下レベルごとに作成しておく。不足電圧リレーを用いて事故時の電圧低下レベルを検出し、レベルに応じて制御パターンを切り替えることで適切な制御を行う。PV脱落量は、FRT非対応PV脱落特性に対して設定する脱落パターンを用いて算出する(図8)。なお、主制御はあくまでも事故前に演算して制御パターンを決定しておく事前演算

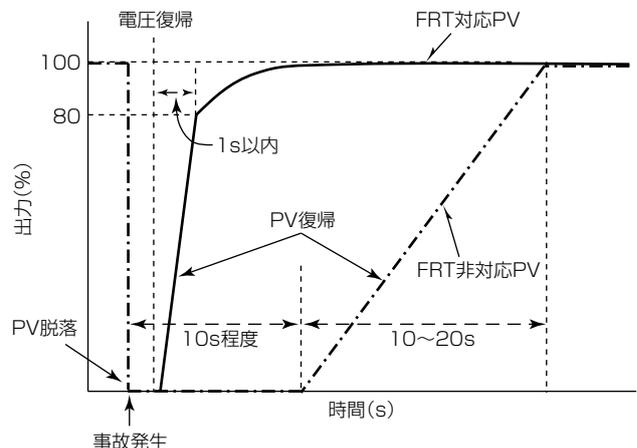


図7. 事故時のPV応動イメージ

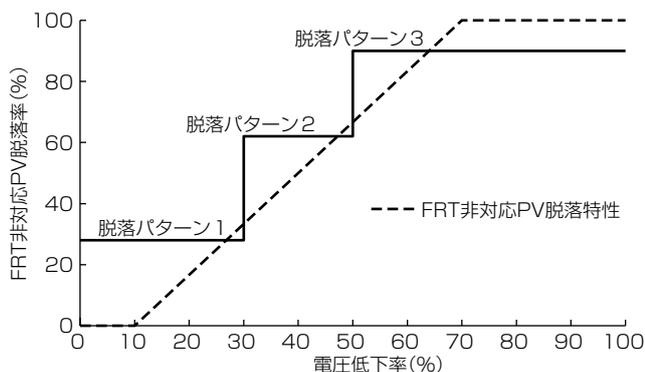


図8. FRT非対応PV脱落特性と脱落パターン設定例

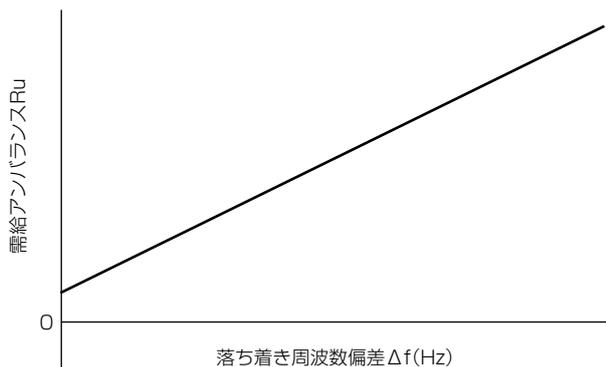


図9. 落ち着き周波数と需給アンバランスの相関イメージ

であり、事故前の想定が事故後の現象と必ずしも一致するとは限らない。ECSでは主制御のPV脱落、PV復帰の見込み違いに対して事後演算の補正制御でカバーすることにした。

補正制御では、先に述べたPV応動やその他の変動(負荷変動、発電機制御系の応動等)を含めた需給アンバランスが四国系統の落ち着き周波数偏差として現れ、線形の関係(図9)を持つことを利用する。具体的には、落ち着き周波数と需給アンバランスの相関を整定で持たせておき、計測周波数から現在の需給アンバランスを算出する。需給アンバランスと目標周波数から補正制御量を算出し、制御を行う。

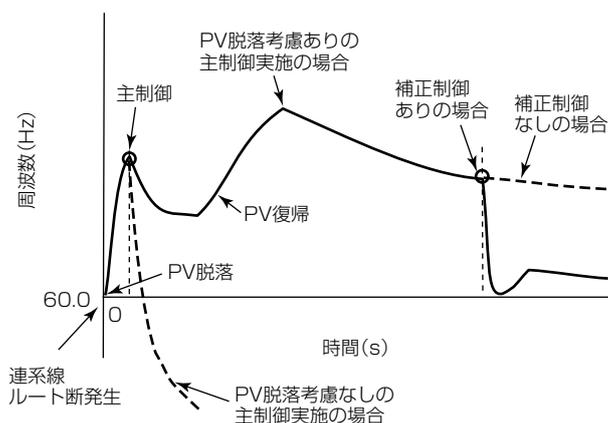


図10. 四国系統周波数上昇対策制御の実施イメージ

ECSでは、主制御と補正制御の多段制御方式にすることで事故時のPV応動に対して柔軟な制御を可能にした。図10に制御実施イメージを示す。

4. むすび

再エネ電源の大量導入に対応可能な系統安定化システムとして、中部電力(株)向け基幹系ISCシステムと、四国電力(株)向けECSについて述べた。

中部電力(株)向け基幹系ISCシステムは、西部方面が2017年5月から運用開始しており、現地試験を順次進めている。東部方面は2020年5月運用開始を予定している。四国電力(株)向けECSは、現在上流設計を進めており、2021年3月運用を予定している。

参考文献

- (1) 吉田 央, ほか: 次世代グリッドに適応した基幹系統合型オンライン系統安定化システム(ISC)の開発, 電気学会論文誌B, 137, No.6, 434~445 (2017)
- (2) 栗本繁徳, ほか: プラント特性を考慮した新しい系統安定化方式の開発と実用化, 電気学会電力技術研究会資料, PE-94, No.88-104, 57~66 (1994)