

電力供給安定化と広域連系を可能にする 電力系統技術への取り組み

Power System Technologies for Reliable Supply of Electric Power and Wide-area Grids

堀井 博夫
Horii Hiroo

谷津 昌洋
Yatsu Masahiro

相原 孝志
Aihara Takashi

日本では2012年7月に再生可能エネルギーの固定価格買取制度が施行され、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの導入が加速していくと考えられる。

太陽光発電所や風力発電所については、その設置上の制約などから、エネルギー大量消費地から離れた遠隔地に設置されるケースが国内外で増えていくと予想されており、今後、エネルギー消費地までの電力系統の安定化に関する課題が顕在化してくる可能性がある。これに対し、日立グループは、電力供給安定化と広域連系の実現に向け、系統安定化システム、SVC、蓄電システム、高圧直流送電など電力系統技術への取り組みを進めている。

1. はじめに

世界的に電力制度の改革が進められる中、再生可能エネルギーの導入が急速に拡大している。国によってエネルギー政策の方針は異なるが、2011年に導入された発電設備容量の約半分が再生可能エネルギーによる発電設備であるなど、日ごとに再生可能エネルギーの存在感が増している¹⁾。日本においても、低炭素化社会の実現に向けた再生可能エネルギーの固定価格買取制度の施行などにより、太陽光発電や風力発電をはじめとした再生可能エネルギーの導入が進んでいる。

太陽光発電や風力発電は、天候による出力変化や落雷などの外乱により、一斉脱落する可能性がある。高品質の電力を確保するためには、それらを考慮した電圧・周波数調整能力を確保する必要があるだけでなく、電力系統の安定性を維持するための対策が欠かせない。また、太陽光発電や風力発電の発電設備が、都市部などのエネルギー需要地から離れた広大な土地や洋上に建設される場合、エネルギー需要地まで電気を送電するための送配電システムや基幹系統の系統安定化対策が必要になると考えられる。

日立グループは、送変電システムとICT (Information

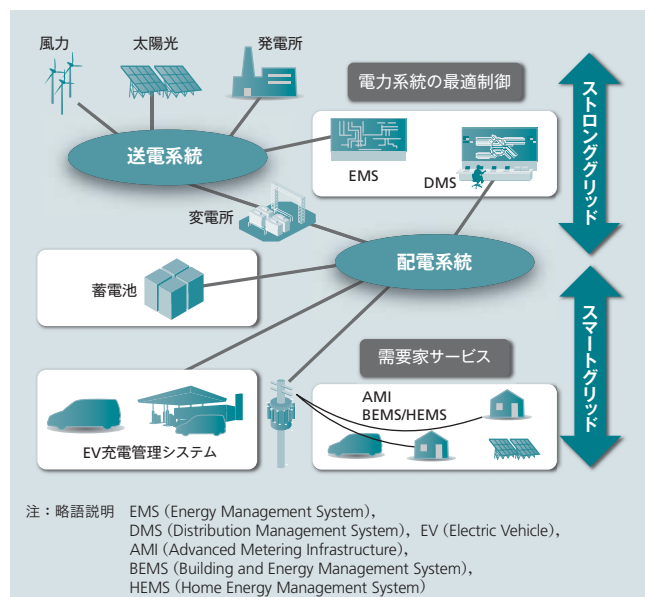


図1 | ストロンググリッドとスマートグリッドのイメージ

再生可能エネルギーの電力系統の最適制御・強化を図るストロンググリッド、および需要家サービスの拡充を図るスマートグリッドのイメージを示す。

and Communication Technology) の融合により、電力系統の最適制御・強化を図るストロンググリッド、および需要家サービスの拡充を図るスマートグリッドの実現をめざしている (図1参照)。

ここでは、電力系統安定化に寄与する日立グループのストロンググリッド技術、およびスマートグリッド技術に関する取り組みについて述べる。

2. ストロンググリッド/スマートグリッドを実現するシステム技術

2.1 系統安定化システム

電力系統において、送電線への落雷などの系統事故が発生すると、電圧低下によって送電電力が瞬間的に低下し、事故が除去された後に電力動揺が発生する。この現象は電力系統の過渡安定度と呼ばれ、動揺が大きい場合には擾乱

(じょうらん)が系統全体に広がり、大停電に至る場合がある。電力系統の送電線は、TTC (Total Transfer Capability: 送電可能容量) の制約内で運用することが要求され、特に長距離大電力送電系統では、過渡安定度による制約が支配的となる。これに対し、系統安定化システムによって高速かつ最適な量の電源制限(発電機の系統からの切り離し)を実施することにより、過渡安定度制約を解消させ、TTCを著しく向上させることが可能となる。

電力系統の潮流や母線電圧といった情報に基づいて演算する高度な信頼度評価とICTを組み合わせた代表的な系統安定化システムとして、オンラインTSC (Transient Stability Control) システムと呼ばれる系統安定度維持システムが実用化されている²⁾。このシステムでは、親局装置TSC-P (Parent) が電力系統データを取り込み、落雷などの多数の系統事故を想定した詳細な過渡安定度計算を事前に実施しておく。そのうち系統が不安定になる事故について安定化対策(電源制限など)を決定し、変電所に設置される子局装置TSC-C (Child) へ伝送しておく。実際に系統事故が発生すると、子局装置TSC-Cと端局装置TSC-T (Terminal) で高速に安定化制御を実施する。このように、親局装置における最適性(Adaptive)と子局/端局装置における自律性(Self-healing)を両立させたシステムを構成している。また、通常時の運用においてもTTCを引き上げることができるため、発電機運用の自由度が増し、経済性の高い運用が可能となる。

また、長距離大電力送電系統の問題点として、電力系統の事故発生時に電圧や周波数の対策が過渡安定度対策と同時に必要となることが挙げられる。これに対し、オンラインTSCシステムをベースに、過渡安定度対策に加えて電圧や周波数の対策を同時に行う統合型系統安定化システムISC (Integrated Stability Control) が開発されている³⁾。ISCシステムでは、過渡安定度・電圧変動対策、分離系統周波数維持・電圧変動対策、および平常時の電圧・無効電力制御が行われるが、ここでは過渡安定度・電圧変動対策について述べる。

ISCシステムの非ルート断事故時における過渡安定度・電圧変動対策は、以下の機能で実施している。

- (1) 系統事故に伴う過渡安定度維持のための電源制限
- (2) 過渡的な電圧低下防止のための追加電源制限
- (3) 電源制限後の電圧変動防止のための調相制御

これらによって事故発生後に過渡安定度対策を行うとともに、目標範囲内に電圧を安定化することが可能となる。

前述の機能を実現するためのISCシステムの親局装置の処理を説明する(図2参照)。システム制御サーバにおいて、電力系統からのオンラインデータを取り込んで状態推

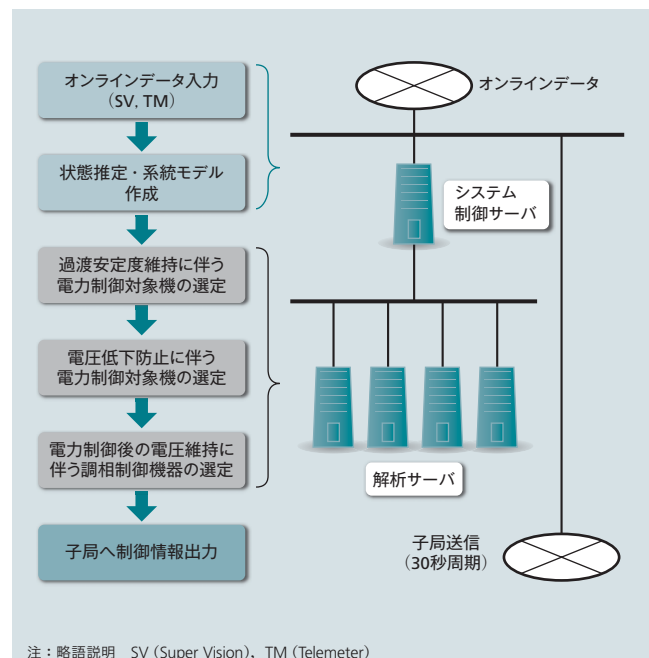


図2 | 中部電力株式会社に納入したISCシステムの親局装置システム構成と処理フロー

ISC (Integrated Stability Control) システムの親局では、オンラインデータを取り込み、100ケース程度の系統故障を想定した安定度計算を実施し、過渡安定度および電圧の安定化対策を実施する。対策結果は30秒周期で子局に送信される。演算能力の必要な安定度計算と対策処理は、高速なブレードサーバを複数並列計算することで対応する。

定を行い、収集タイミングや計測誤差を最小とした系統モデルを作成する。続いて、解析サーバにおいて100ケース程度の系統事故シナリオに対する詳細安定度シミュレーションを実施し、最適な安定化制御対象機器の選定を行う。最後に、全想定事故に対する安定化制御情報を子局に送信する。これらの情報に基づき、実事故時に系統安定化を図ることができる。

今後、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーが系統に並列され、さまざまな予期しない電力の流れによって電力系統の安定性を想定することが困難になると予想されるが、オンラインTSCシステムやISCシステムの導入により、電力系統の安定化に寄与できると考える。また、電力系統へのSVC (Static Var Compensator)、蓄電池などの導入状況により、電力系統をよりスマートに安定化することが必要になると考えられる。

2.2 SVC

SVCは、パワーエレクトロニクス機器を用いて、高速に無効電力を制御するシステムである。SVCには幾つかの種類があるが、代表的なものとしてはTCR (Thyristor Controlled Reactor) とSTATCOM (Static Synchronous Compensator) がある。

TCRは、逆並列に接続されたサイリスタのオンとオフの期間を制御し、リアクトルに流れる電流の平均的な大き

さを変えることにより、遅相無効電力を制御するものである(図3参照)。電力用コンデンサと組み合わせることで進相無効電力も制御可能である。

STATCOMは、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)などの自己消弧形半導体デバイスから構成される自動変換装置が出力する電圧の振幅・位相により、進相および遅相無効電力を高速に制御するシステムである(図4参照)。

無効電力を制御することで電圧を制御できるため、日照や風況の変化に伴う再生可能エネルギーの出力変動や、電気炉の激しい負荷変動に起因する電圧変動の抑制にSVCが活躍する。また、発電機・送電線のトリップや急激な負荷の増加に対して、電力系統が電圧を大幅に低下させることなく安定的に運転できる度合いを電圧安定度と呼ぶが、SVCは電圧安定度の向上に貢献するシステムである。

電力系統の安定度には、電圧安定度のほかに同期安定度がある。同期安定度とは、送電線故障などの擾乱が電力系

統に発生したとき、運転中の同期発電機が脱調せずに安定状態を回復して運転し続けられる度合いのことである。同期安定度は主として有効電力に関係するため、無効電力のみを制御するSVCは無用であるように思える。しかし、2点間の有効電力は電圧振幅と関係するため、SVCが電圧を制御することで、間接的に有効電力を制御することが可能になる。したがって、同期安定度向上についてもSVCは有効である。STATCOMによる同期安定度向上に関するシミュレーション例の波形を図5に示す。この例では、STATCOMを設置しない場合に系統故障によって発電機が脱調する系統が、STATCOMを設置して適切に制御することにより、安定的に運転されることを示している。

日立グループは、SVCの製作実績が多数ある。代表的な例を表1に示す。東北電力株式会社の能代火力発電所に納入したTCRは、電圧変動抑制に加えて電力動揺抑制を主目的としており、同期安定度の向上に寄与している⁴⁾。

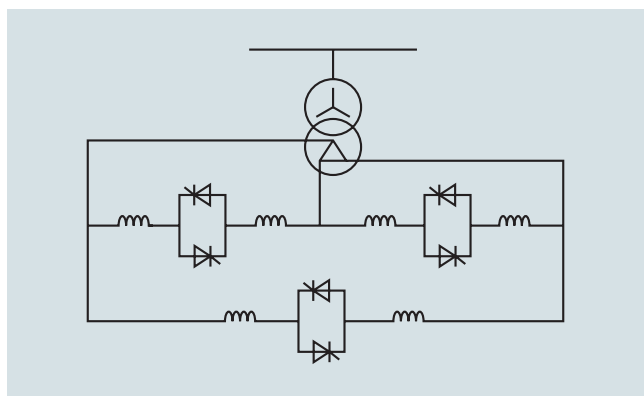
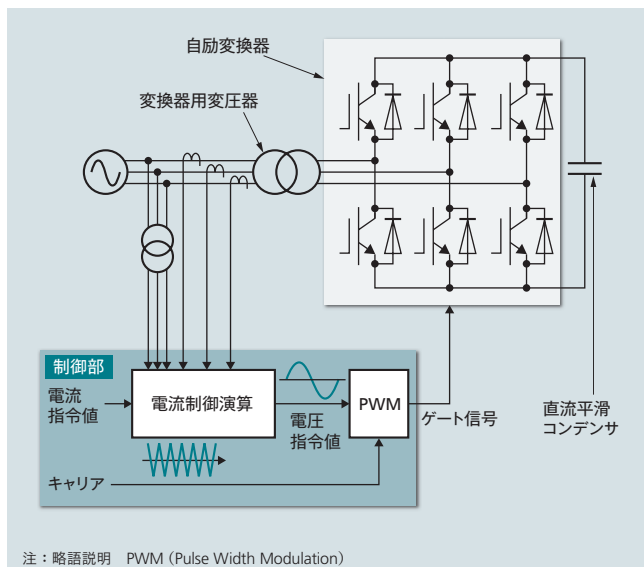


図3 | TCR回路概略

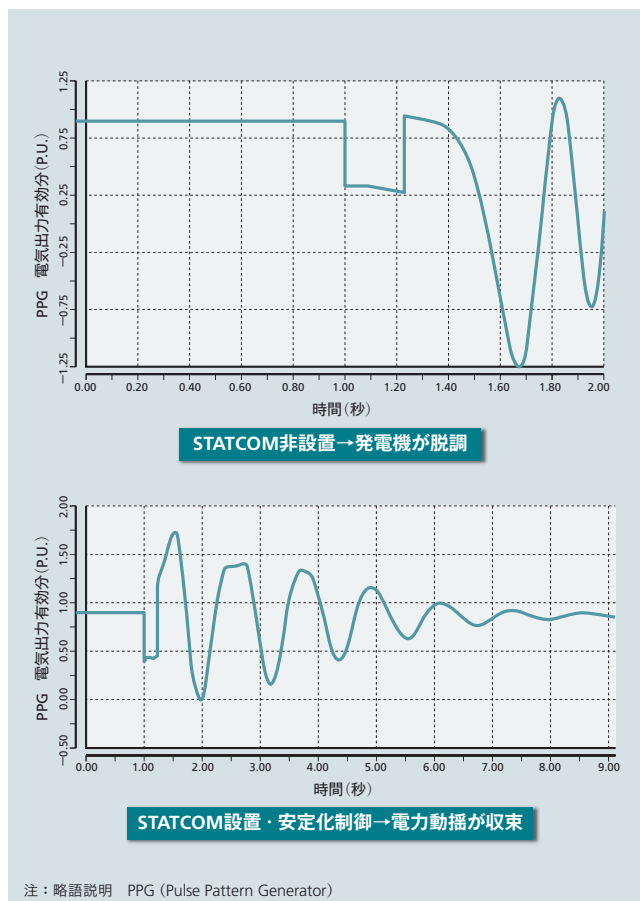
TCR (Thyristor Controlled Reactor) は、サイリスタを制御することで、リアクトルに流れる電流の平均的な大きさを変えることによって遅相無効電力を制御する。



注：略語説明 PWM (Pulse Width Modulation)

図4 | STATCOM回路概略

STATCOM (Static Synchronous Compensator) は、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などの半導体デバイスで構成された自動式変換装置により、無効電力を高速に制御するためのシステムである。



注：略語説明 PPG (Pulse Pattern Generator)

図5 | STATCOMによる同期安定度向上

STATCOMを設置して適切に制御することにより、系統が安定的に運転されることを表すシミュレーション例を示す。

表1 | SVCの主要な製作実績例

東北電力株式会社能代火力発電所に納入したTCRと、北陸電力株式会社伏木変電所に納入したSTATCOMの定格容量、主な目的などを示す。

	定格容量	方式	納入年	主な目的
能代火力発電所	100 MVA	TCR	1994年	電力動揺抑制
伏木変電所	20 MVA	STATCOM	2006年	フリッカ抑制

北陸電力株式会社の伏木変電所に納入したSTATCOMは、フリッカ対策に特長がある。アーク炉のような変動の激しい負荷がある場合、電圧の変動によって電灯などのちらつきが発生する。これをフリッカと言い、伏木変電所のSTATCOMはこのフリッカを抑制することを主目的としたものである⁵⁾。

海外では、英国の大手配電会社であるWestern Power Distribution (South West) plc, Western Power Distribution (South Wales) plc (以下、WPD社と記す。)に配電系統用のSTATCOMを2011年に納入しており、英国のエネルギー規制機関が推進する低炭素ネットワークのプロジェクトの一環として、WPD社が進めているスマートグリッド実証実験に用いられている。主な目的は、再生可能エネルギー特有の不安定な電圧変化を抑制し、電力網に安定した電力を継続的に供給することである。今後のステップでは、同様のSTATCOMを3台追加し、配電系統電圧制御システムの試験を行う予定である。

2.3 蓄電システム

日立グループの蓄電ソリューションでは、電力のピークカット／ピークシフトや風力／太陽光発電導入に伴う電源安定化など、さまざまな用途に合った蓄電システムを提供している。中でも、再生可能エネルギーの大量導入時の系統安定化を目的として、電力会社が個別に電力変動量を規定する系統連系要件が定められることがある。この要件に適応した電力脈動緩和ソリューションとして、期待寿命17年の鉛蓄電池(LL1500-W形)、PCS (Power Conditioning System)、およびこれらを最適に運用する制御装置で構成される蓄電システムを提供している。この制御装置は、再生可能エネルギーの電力脈動と蓄電池の充電状況を監視し、電力脈動を緩和するように蓄電池に対する充電／放電を指令する。PCSは、直流電力を交流に変換して系統連系する双方向電力変換装置である。例えば、2010年2月から運用開始しているくろしお風力発電株式会社所有の市浦風力発電所(青森県五所川原市、株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービスが製品化)では、風況データと系統連系要件から蓄電池容量を最適化(最小化)し、ウィンドファーム制御との併用で発電電力量を最大化した蓄電システムを開発している⁶⁾(図6参照)。

また、蓄電システムを含めた系統安定化ソリューションの海外展開の一例として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務として実施している「米国ニューメキシコ州における日米スマートグリッド実証」において、米国ニューメキシコ州ロスアラモス郡に、鉛蓄電池(LL1500-W形)と蓄電池用500 kVA PCSか

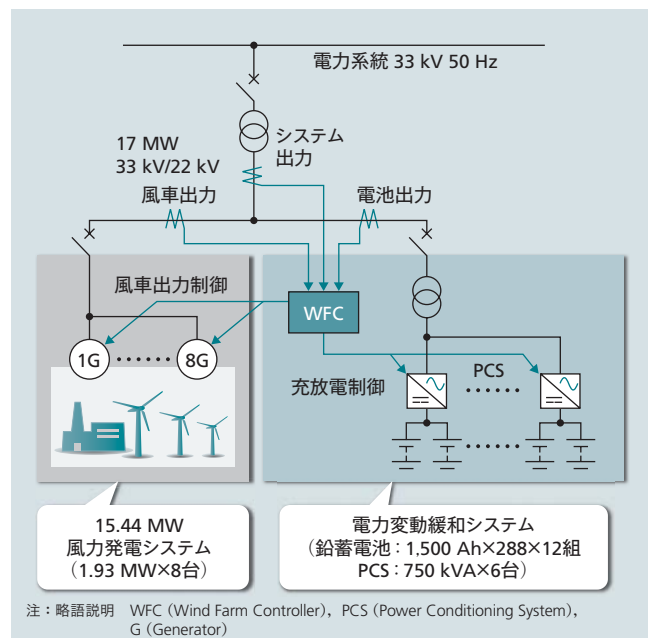


図6 | 市浦風力発電所のシステム構成

電力脈動緩和ソリューションとして、長寿命の鉛蓄電池、PCS、制御装置で構成した大型風力発電所である。

ら構成される鉛蓄電池システム、および、太陽光発電用500 kVA PCS、アモルファストランスを設置している。PCSは、蓄電池や太陽電池を接続可能な直流／直流変換器を2回路持つハイブリッド型PCSを採用している。この実証では、米国の配電系統に連系したシステムを構築しており、現在、鉛蓄電池の充電／放電による太陽光発電の短周期出力変動に対する抑制効果について実証研究を進めている(図7参照)。

離島など孤立した系統においては、再生可能エネルギーの導入に伴い、蓄電システムを用いたマイクログリッドの重要性が増大している。離島での蓄電システムは、ディーゼル発電機などをメインの電力供給源として、併設される風力発電や太陽光発電などの脈動補償、ディーゼル発電機トリップ時の非常用の電源、太陽光と風力の発電電力と蓄電池の運用による長期間の自立した電力供給などを目的としている。沖縄電力株式会社与那国風力発電所は、風力発電機(600 kW x 2機)、ディーゼル発電機(合計2,650



図7 | 米国ニューメキシコ州ロスアラモス郡に設置された鉛蓄電池システム「米国ニューメキシコ州における日米スマートグリッド実証」において設置している鉛蓄電池システムの外観を示す。

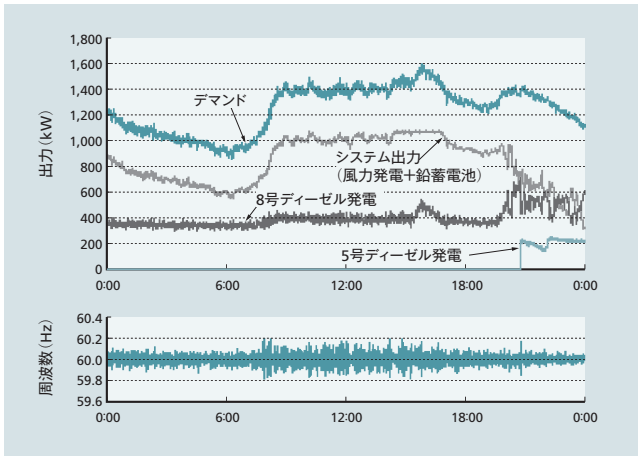


図8 | 与那国風力発電所における発電所運転結果

風力発電機、ディーゼル発電機、鉛蓄電池による出力と周波数を示す。風力発電の出力低下時に、鉛蓄電池の充放電によるシステム出力（風力発電+鉛蓄電池）の制御およびディーゼル発電機の自動起動により、系統周波数の安定化を図っている。

kW)、鉛蓄電池(1,000 Ah × 200セル)から構成されている(日立エンジニアリング・アンド・サービスが製品化)。与那国風力発電所の運転結果を図8に示す。

2.4 高圧直流送電(HVDC)

欧州では、自然条件や設置条件がそろっている中東や北アフリカの砂漠に設置された太陽熱発電や太陽光発電、風力発電によって発電された電力を、直流送電によって電力需要地である欧州などに送電するスーパーグリッド構想がある。スーパーグリッド導入の際にキーとなる技術の一つが、HVDC (High Voltage Direct Current : 高圧直流送電) である。

現在、日本ではHVDCが2,000 MW、周波数変換が1,200 MW (設備容量)、BTB (Back to Back) が300 MWあり、日立グループは国内すべての直流案件に参画してきた(計画のみの参画を含む)。HVDCのメリットとしては、以下の3点が挙げられる。

- (1) 充電電流が流れず、誘電体損失がないためケーブル送電に有利
- (2) インダクタンスによる電圧降下がなく、長距離送電に

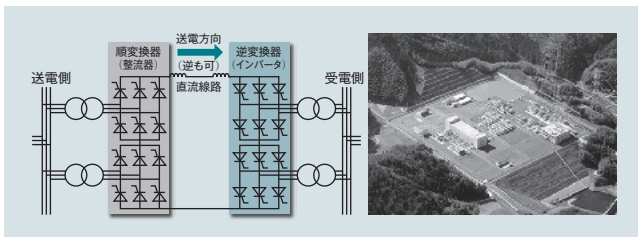


図9 | HVDCの構成概要と紀伊水道HVDC変換所

HVDC (High Voltage Direct Current) の運用値はDC±250 kV、1,400 MWであり、一部の機器については将来の増設を見込み、DC±500 kV、2,800 MWで設計している。なお、構成概要では遮断器、アレスタ(避雷器)、接地開閉器、フィルタなどは省略している。

有利

(3) 異周波数系統間連系により、システム容量の範囲で任意の潮流制御が可能

HVDCは、2台の交流/直流変換器で構成され、一方が順変換器(交流電力→直流電力)、もう一方が逆変換器(直流電力→交流電力)として運転されるものであり、その間を直流で送電する方式である。HVDCの構成概要と紀伊水道HVDC変換所の外観を図9に示す。変換器は、パワー半導体デバイス(サイリスタやIGBTなど)を組み合わせて構成されているが、一つの組み合わせ単位をアームと呼び、電力変換はアームから他のアームに電流を移すこと(転流)によって行われる。変換器には、大きく以下の2方式がある。

- (1) オフの際に通過電流をゼロにする必要があるパワー半導体デバイス(サイリスタ)によって変換器を構成する方式(他励式)
- (2) 任意の時点でオン/オフの切り替えが可能なパワー半導体デバイス(IGBTなど)によって変換器を構成する方式(自励式)

最近では、より系統安定化に寄与する自励式の変換器に対するニーズが高まる傾向にあり、現在開発を進めている。

HVDCを用いた系統安定化実現の具体的な例としては、日立グループも開発に参画した本州(関西電力株式会社紀北変換所)と四国(四国電力株式会社阿南変換所)を連系させる紀伊水道HVDC設備がある。このシステムは、交流系統の電力動揺抑制制御を目的としたPM (Power Modulation) の機能を有している。

PMの仕組みを簡潔に説明すると以下のようになる⁷⁾。

系統故障などの擾乱が生じると、系統に連系された発電機の原動機入力と電気的出力のバランスが崩れるため、発電機の回転に変動が生じることによって電力動揺が発生する。このとき、HVDCを適切に制御することによって電力動揺を抑制するのがPMである。交直並行2機系モデルの例を図10に示す。同図において、HVDCが送電する直流電力を ΔP_{DC} 変化させたとする。これは母線B2におい

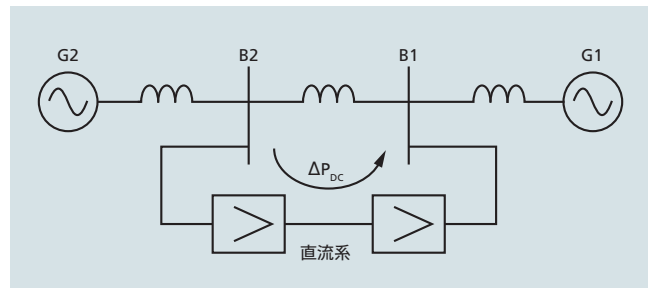


図10 | 交直並行2機系モデル

交直並行2機系モデルの例を示す。PM (Power Modulation) は、HVDCを制御することによって電力動揺を抑制する。

て有効電力 ΔP_{DC} を吸い出し、同時に母線B1において有効電力 ΔP_{DC} を押し込むことに相当する。この ΔP_{DC} のうちインピーダンス比で決まる分が発電機G2から吸い出され、G1に押し込まれる。ここで、発電機に与える有効電力出力変動の位相を、発電機の回転角速度変動 $\Delta\omega$ の位相に合わせることで、発電機に与える有効電力出力変動をダンピングトルクとして働かせることができる。このダンピングトルクが発電機の回転角速度変動を抑制し、結果として電力動揺を抑制することが可能になる。このような制御を行うためには、発電機の $\Delta\omega$ を検出し、HVDCの制御系に取り込まなければならない。 $\Delta\omega$ の検出方法は種々開発されているが、紀伊水道HVDCでは、 $\Delta\omega$ と同位相で変動する系統周波数変動 Δf を検出する方法を用いている。

上述のとおり、HVDCは系統安定度強化に大きく貢献するシステムである。今後は、国内でのHVDCに関する開発実績で蓄えた知見を基に、再生可能エネルギー導入に伴ってニーズが増大している海外での直流送電プロジェクトにも参画を図っていく。

3. おわりに

ここでは、電力系統安定化に寄与する日立グループのストロンググリッド技術、およびスマートグリッド技術に関する取り組みについて述べた。

日立グループは、ここで述べたもの以外にも、国内外を問わず、電力系統安定化の実現に向けた各種プロジェクトへの参画や、技術開発・システム構築を推進している。

今後も、海外や国内におけるストロンググリッド/スマートグリッドの実現に貢献するため、技術開発を進めていく。

参考文献など

- 1) UNEP NEWS CENTRE, <http://www.unep.org/newscentre/>
- 2) 小海, 外: 低炭素社会を支える電力系統安定化ソリューション, 日立評論, 92, 8, 580~583 (2010.8)
- 3) 村田, 外: 新たな系統安定化システムの開発とRTDSを利用したその検証技術, 平成23年電気学会電力・エネルギー部門大会 (2011.8)
- 4) 坂野, 外: 静止形無効電力補償装置 (SVC) の発電端設置例—東北電力株式会社能代火力発電所一, 日立評論, 76, 12, 873~878 (1994.12)
- 5) 加藤, 外: フリッカ抑制機能付き自動式無効電力補償装置の開発, 日立評論, 89, 2, 204~207 (2007.2)
- 6) 五味, 外: 新エネルギー導入をサポートする電力貯蔵を用いた系統安定化技術, 日立評論, 92, 3, 234~237 (2010.3)
- 7) 富山, 外: 交直並行送電系統における直流パワーモジュレーションによる電力動揺抑制制御, 電気学会論文誌, B, 117巻7号 (1997)

執筆者紹介



堀井 博夫

2004年日立製作所入社, インフラシステム社 システム統括事業部
電力システム本部 電力システム設計部 兼 電力システム社 電力流通
事業部 電力情報制御本部 電力情報制御部 所属
現在, 電力流通システム事業の取りまとめに従事
技術士 (情報工学部門)
電気学会会員



谷津 昌洋

1990年日立製作所入社, インフラシステム社 システム統括事業部
電力システム本部 電力システム設計部 所属
現在, 電力系統安定化システムの開発設計に従事
電気学会会員



相原 孝志

1992年日立製作所入社, インフラシステム社 システム統括事業部
電力システム本部 発電・電力制御システム設計部 送変電・系統ソ
リューションセンタ 所属
現在, 電力系統の解析業務および制御システムの開発に従事
電気学会会員, IEEE会員