

パワーエレクトロニクスが拓く電力システムの将来



研究室紹介

伊瀬 敏 史*

Future of Power Systems Utilizing Power Electronics

Key Words : Power Electronics, Power System, Renewable Energy,
Distributed Generation, Virtual Synchronous Generator Control

1. はじめに

地球温暖化防止の観点から低炭素化社会が推進されてきた。また、震災に伴う原子力災害により脱原子力発電の動きがある。一方では電気エネルギーに対する需要は増加の一方であり、今後電気自動車の普及も見込まれる。従って自然エネルギーやリサイクルエネルギーなどの再生可能エネルギーを活用して電気エネルギーを効率的に作り出し・集め、そして送る、発電・集電・送配電技術が重要となる。その中で特に重要な役割を果たすのが電力の形態を自由自在に制御する技術であるパワーエレクトロニクスである。

パワーエレクトロニクスと電力システムとの関わりは古く、1950年代に実用化された水銀整流器による直流送電から始まり、サイリスタを用いた他励式の無効電力補償装置 (Static Var Compensator, SVC) があり、その後パワートランジスタやGTOなどのオン・オフ制御可能素子の適用が可能となり高調波補償のための電力用アクティブフィルタや自励式無効電力補償装置 (Static Var generator, SVG あるいは Static Compensator, STATCOM) が1980年から1990年代に相次いで実用化された。日本では世界に先駆けて木曾川水系の送電系統安定化を目的として±80MVAの自励式無効電力補償装置

が犬山開閉所に設置されて注目を集めた。その後、1990年代半ばにFACTS (Flexible AC Transmission System) が提唱され、パワーエレクトロニクスを用いた交流電力システムの制御が注目を集めた。パワーエレクトロニクスを用いた位相調整装置を交流系統内に設置して電力潮流の制御を行うのが主たる趣旨であった。それと同時に瞬時電圧低下が産業プラントやIT機器などに与える影響が注目され二次電池、大容量キャパシタ、超電導コイル、フライホイールなどを用いた瞬時電圧低下補償装置の研究が活発に行われた。需要家側でパワーエレクトロニクス機器を用いて電力品質対策を行う技術はCustom Powerと呼ばれた。それと同時期にFRIENDS (Flexible, Reliable Intelligent Electrical eNergy Delivery System) の品質別電力供給やPremium Power Parkの概念が出された。2000年代になると分散形電源からなるマイクログリッドなどの地域電力システムの研究が活発となった。マイクログリッドの中でもパワーエレクトロニクスは分散形電源や電力貯蔵装置のインターフェイスとして重要な役割を演じている。その後、スマートグリッドの時代となり、需要の制御の概念が取り入れられるようになってきた。パワーエレクトロニクスは基幹系統の制御、地域系統の制御、需要の制御まで今後重要な役割を演じることが期待される。

2. 種々の周波数を活用する電力システム

図1にパワーエレクトロニクスの活用により種々の周波数を活用する将来の電力システムの概念像を示す。この図に示すように、太陽光発電や燃料電池などの直流出力の分散形電源、可変速風力発電、エンジン発電機、高速ガスタービン発電機などの種々の出力周波数の電源が系統の中で重要な地位を占め



* Toshifumi ISE

1957年7月生

大阪大学大学院 工学研究科 電気工学
専攻修了 (1986年)

現在、大阪大学 大学院工学研究科 電気
電子情報工学専攻 教授 工学博士
パワーエレクトロニクス

TEL : 06-6879-7689

FAX : 06-6879-7724

E-mail : ise@eei.eng.osaka-u.ac.jp

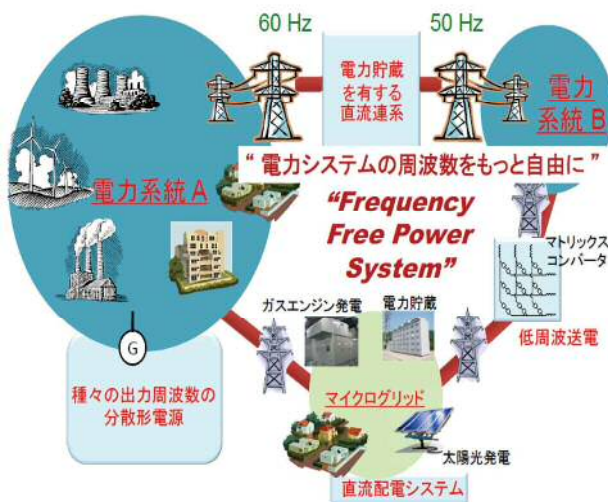


図1 種々の周波数を用いる電力システムの概念図

るであろう。直流送電、周波数変換所やBTB（Back-to-Back）連系などの基幹システムの非同期連系は自励式変換器の普及に伴ってフィルタや調相設備のスペースが軽減され、現在よりも適用が容易となり、ケーブル送電の適用、系統の潮流制御、日本の東西系統の連携強化に威力を発揮するであろう。それと同時に、直流系統にエネルギー貯蔵装置を有する直流系統の開発も行われて自然エネルギーの変動吸収や系統安定化に効果を発揮するであろう。また、直流送電と同様な特性を持つ低周波送電も期待できる。低周波送電はケーブル系統のキャパシタンスによる充電電流の抑制や超電導ケーブルの交流損失低減に効果を発揮する。同時に、直流系統で問題となる短絡保護に関しても周期的にゼロ点が発生するので問題が緩和される。多端子の連系にも低周波送電は有効である。周波数変換装置が問題であるが、他励式のサイクロコンバータに代わって自励式直接周波数変換装置であるマトリックスコンバータの開発により、波形改善や無効電力の低減が可能となる。マイクログリッドなどの地域系統においては交流システムもあるが、太陽光発電や燃料電池などの分散形電源や電力貯蔵装置の出力が直流であること、インバータを用いた負荷機器では内部で一度直流に変換されていることを考えると直流方式が有望であろう。なお、最新鋭の航空旅客機の電源システムでは従来の400Hzの一定周波数システムに代わり、可変周波数の電源システムが採用され、航空機の軽量化に寄与している。

3. 仮想同期発電機の制御方式とその応用

近年、持続可能で自然災害などに強いレジリエント（resilient）なエネルギーシステムの実現へ向けて、太陽光や風力など再生可能エネルギー電源（以後、再エネ電源）の導入が推進されてきている。日本では、2012年7月に始まったFIT（Feed In Tariff、固定価格買い取り制度）の影響で、2014年の太陽光発電の導入量は9GWを超え、2030年には設備容量は100GW程度になると予想されている。これら再エネ電源は、発電出力が日射や風況等の天候に依存して変動するため、その大量導入が電力系統の周波数や需給バランスに深刻な影響を与えることが懸念され、これまでも蓄電池の導入やデマンドレスポンスなど様々な需給バランス対策が検討されてきている。一方、上記のようなレベルに再エネ電源が導入されると、エリアによっては、系統電力の大部分をインバータを介した再エネ電源出力が担う状況が現出し、新たに“定態安定度”や“過渡安定度”といった電力系統の安定度問題が生じる可能性がある。これは系統内の同期化力（慣性力）不足に起因する本質的な課題であり、蓄電池やデマンドレスポンスの導入では回避できない。

本節では、将来の電力系統の安定度問題に解を与える“インバータの仮想同期発電機制御”について概説する。

3.1 仮想同期発電機制御の概要

太陽光等の主な再エネ電源は、インバータを用いた直流電力の交流電力への変換を介して電力系統へ連系している。この系統連系インバータは、一般的にPLL（Phase Locked Loop）制御により系統周波数と同期しており、連系時は、電流源として機能し系統周波数への追従運転を、系統が停電した際など自立時は、電圧源として機能し定電圧・定周波数運転を行う。そのため系統連系から自立へ移行する際には制御手法の切り替えが必要で、通常、連系しているインバータ側の電力システムを一旦停電させてから再起動させる必要がある。

インバータ電源は、回転体を有する同期発電機とは異なり、パワーエレクトロニクス・デバイスによって構成される静止器であるため、通常、回転体の

慣性力に相当する機能を具備していない。そのため再エネ電源などインバータ電源の容量が、同期発電機の容量に比べて大きくなった場合に系統不安定が生じる恐れがある。そこで再エネ電源のインバータに、仮想的に慣性・同期化力を持たせることで、インバータの容量が同期発電機に比較して同程度以上になっても系統を安定化できる仮想同期発電機制御 (Virtual Synchronous Generator, VSG) が提案されている。図2に、そのモデルと制御ブロック図を示す。仮想同期発電機制御では、インバータ制御において、ソフトウェア的に下記運動方程式を具備させることで、同期発電機と同様の慣性力メカニズムを実現している。

$$P_{in} - P_{out} = J\omega_M \frac{d\omega_M}{dt} - Ds \cdots (1)$$

ここで、 P_{in} は機械的入力電力、 P_{out} は電氣的出力電力、 J は慣性モーメント、 ω_M は回転子の角速度、 D は制動係数、 s は同期速度とのすべり、である。この微分方程式を解くことで ω_M が求められ、 ω_M を積分することで機械角変位 θ_M が求められる。この θ_M を位相とする正弦波をインバータで出力することで同期発電機と同じ特性が得られる。図2において、運動方程式を解く部分はVSG制御のブロックに搭載されている。更に、同期発電機のカバナ制御のブロックと、電圧制御のブロック (Automatic Voltage Regulator, AVR) を付与し、基本的なVSG構成となる。

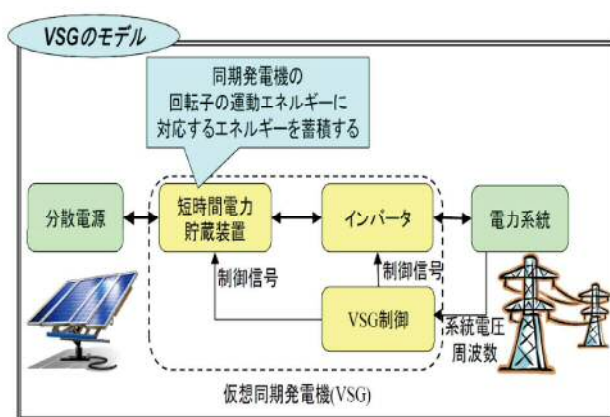


図2 仮想同期発電機制御 (VSG) の制御ブロック図

3.2 仮想同期発電機制御の更なる可能性

仮想同期発電機制御インバータには、上記で説明したような従来の同期発電機と同様の同期化力 (慣性力) の仮想的付与による系統安定化効果に留まらず、新たな可能性がある。それは、同期発電機では実現不可能な、慣性力などの可変制御による更なる安定性の向上である。即ち、電力相差角曲線上の動作点に応じて、VSGの慣性力を変えることで、安定動作点への早期収束を可能にする制御である。

4. むすび

パワーエレクトロニクスによる将来の電力システムの展望について述べた。パワーエレクトロニクスは電力の世界に周波数の自由度をもたらし、産業システムにおいては十分に活用され、省エネルギーや制御の高度化に寄与している。しかしながら、電力システムの中での周波数の自由度の活用は未だ十分ではないと思われる。

大阪大学工学研究科電気電子情報工学専攻システム・制御工学講座パワーエレクトロニクス領域 (伊瀬研究室) では、パワーエレクトロニクスの活用により

1) いつでも、どこでも、だれでもが電気エネルギーの「発生」「変換」「制御」「蓄積」を比較的手軽に行って「電力の地産地消」を行うことにより、環境に優しく、災害に強い安心・安全な社会を目指すこと

2) 基幹電力システムへの大量の再生可能エネルギー電源の導入が可能となるような送電、変電技術を開発すること

を目的としてパワーエレクトロニクス技術の研究に取り組んでいる。

今後、電力システムの中で種々の周波数の利用が進み、再生可能エネルギー電源の導入が一層進むことを期待する。