

# 新エネルギー分野を開拓する パワーエレクトロニクス製品

Power Electronics Products for Renewable Energy

一瀬 雅哉 Masaya Ichinose  
宮田 博昭 Hiroaki Miyata

堤 和哉 Kazuya Tsutsumi  
内山 倫行 Noriyuki Uchiyama

長谷川 勉 Tsutomu Hasegawa



( a )



( b )

図1 新エネルギー発電システム

新エネルギー発電システムの事例として、山梨県北杜市のメガソーラー発電設備を(a)に、茨城県神栖市波崎の2 MW風力発電システム「SUBARU 80/2.0」を(b)に示す。

地球環境問題から全世界で再生可能なエネルギーへの関心が高まっている。その中でも、自然エネルギーを用いた発電システムはクリーンなエネルギーとして注目を浴びている。EWEA(欧州風力エネルギー協会)では、2020年に風力発電で世界の電力の12%を賄うことをめざした活動が行われており、わが国でも2020年までに風力発電を1,000万kW導入することを目標とするなど、今後、急速な伸びが期待されている。

風力、太陽光などの発電システムでは、発電電力が直流や可変周波数である場合が多く、電圧振幅や周波数を変換して電力系統に接続するために、パワーエレクトロニクス製品である電力変換装置が重要な役割を担っている。また、電力変換器は、発電電力の調整が可能であり、単なる周波数変換だけではなく、システムの電力コントロールの一部として重要な役割を果たしている。

## 1.はじめに

地球温暖化防止、CO<sub>2</sub>排出量削減への効果が期待される新たなエネルギー源として、全世界で自然エネルギーによる発電システムへの関心が高まっている。中でも風力発電システムや太陽光発電システムは機器の低コスト化が進み、近年急速に導入が進むと予想されている。

これらのシステムでは、周波数変換、電圧レベル調整、発電電力調整のためにパワーエレクトロニクス製品である電力変換装置が重要な役割を担っている。例えば、太陽光発電システムでは、太陽電池が発生する直流電圧(日射により変動)を、一般家庭で使用できる交流50 Hz 100 Vの電圧に変換するために、電力変換装置が用いられる。風力発電システムにおいては、発電機が出力する電圧の周波数を50 Hzに調整する機能と、電圧振幅を調整する機能を電力変換装置が担っている。

自然エネルギー発電は、その出力が日射や風速の変動の影響を受けることから、電力系統に大量連系した場合には、電圧変動、周波数変動などの面で電力系統側に影響を及ぼすことが想定される。

ここでは、新エネルギー(風力、太陽光)発電装置に関するパワーエレクトロニクス製品(電力変換装置)と系統への影響を低減するための日立グループの技術について述べる(図1参照)。

## 2. 風力・太陽光発電の動向

風力、太陽光発電システムの総発電量は今後も伸びていくと予想されており、2030年には風力6,300 TWh、太陽光2,800 TWhの総発電量が予測されている(図2参照)。

設置された総容量で見ると、風力は、2006年には総容量74 GWが2007年には総容量94 GWに達している<sup>2)</sup>。現在、太陽光発電よりも先に、風力発電システムの導入が進んでいる状況にある。

風力発電システムは、現在の主流が単機容量1.5 MWから2 MW級に移りつつあり、装置の大容量化および大規模なウインドファーム(複数の風力発電機システムの集まり)が今後も増加していくと予想される。

太陽光発電は、欧米では、すでに数メガワット規模のメガソーラー発電設備が稼働している。日本国内でも、各地で自治体や企業、電力事業者によってメガソーラー発電設備が計画されつつあり、大容量のシステムが今後増加してくると予想される。

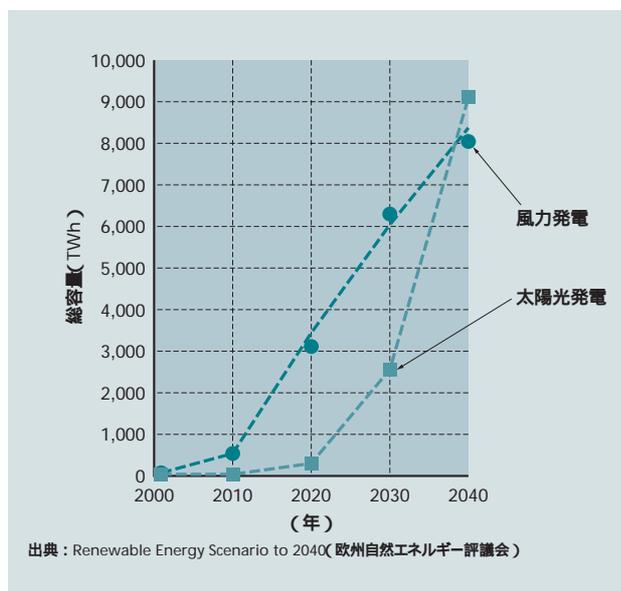


図2 新エネルギー(風力・太陽光)発電導入量予測  
風力発電および太陽光発電の総容量予測を示す。風力よりも遅れて太陽光の総容量が伸びてくると予想されている。

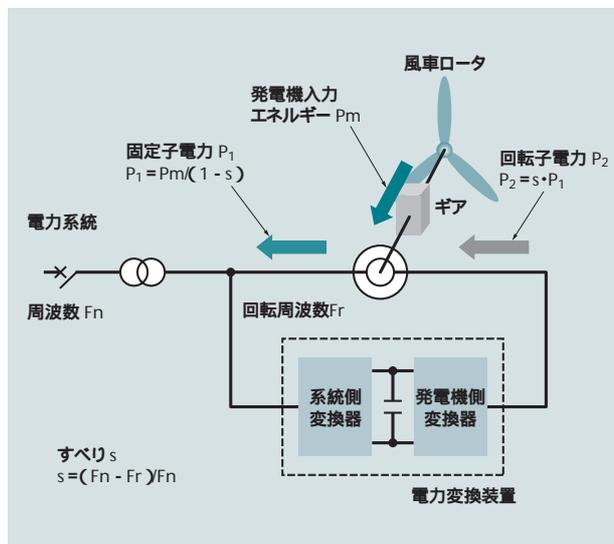


図3 交流励磁発電機の電力の流れ  
固定子電力と回転子電力の合計が、電力系統に出力される。回転子電力は、すべりsがマイナスのとき、図の矢印の方向とは逆の方向に流れる。

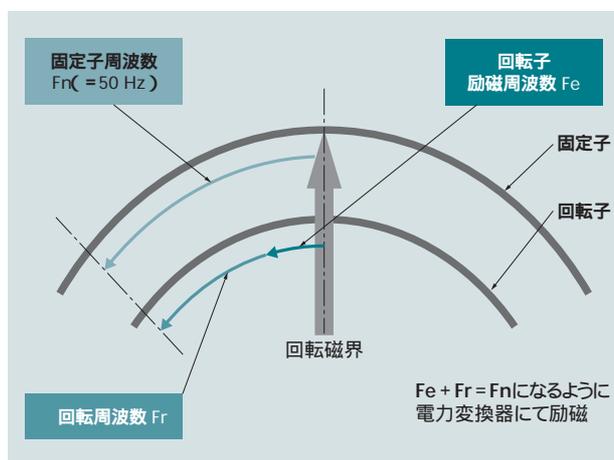


図4 交流励磁発電機の励磁  
系統電圧(50 Hz/60 Hz)が作る回転磁界に一致するように、回転子をすべり周波数で励磁し、回転子の磁界を系統と同じ周波数にする。

## 3. 風力発電システム用電力変換器

### 3.1 大容量風力発電システム

近年、変動する風力エネルギーを有効利用するために、可変速度型の風車が主流になってきている。また、発電機方式の主流は交流励磁発電機(DFG:Doubly-fed Generator)を用いた風力発電システムである。

DFG風力発電システムの主回路は、DFGと、DFGの回転子を可変周波数で励磁する発電機側変換器、および発電機側変換器に電力を供給(回生)するための系統側変換器で構成される(図3参照)。

DFG風力発電システムでは、電力変換装置は固定子発電電力( $P_s$ )に対して発電機回転周波数と系統周波数の差の周波数で定義されるすべりs分の電力( $s \cdot P_1$ )を通過させる。

すべり範囲(可変速度範囲)は、通常0.3 ~ -0.3程度(回転周波数35 ~ 65 Hz。ただし、系統周波数50 Hzの場合)の範

困が一般的である。電力変換器を通過する最大の電力は、最大のすべりが0.3であれば、発電システム定格の30%程度となる。したがって、DFG風力発電システムは、電力変換装置をシステム定格に比べ、小型化できる利点がある。

発電機側変換器は、可変速する発電機からシステムの周波数の電力を取り出すため、スリップリングを介してすべり周波数 $F_e$ の電圧で回転子を励磁する。このとき、すべり周波数 $F_e$ は、 $F_e + F_r = F_n$ となるように決定すると、固定子周波数と同期した回転磁界が発生できる(図4参照)。回転磁界の大きさと位相を調整することで、発電機側変換器は発電機の発電電力を調整する。

### 3.2 電力系統に配慮した電力変換器の制御

富士重工業株式会社と共同開発した風力発電システム「SUBARU 80/2.0(2 MW)システム」の制御方式には、可変速揚水発電システムにも適用されている電気制御で、有効電力を制御する有効電力優先制御<sup>3)4)</sup>を適用した(図5参照)。この制御方式は、系統側変換器と発電機固定子を合わせたシステム有効電力を検出し、風速によって計算された有効電力指令に一致するように電力変換器を使って電力を高応答に制御する方式である。

発電電力はトルクと回転速度の積に比例するため、従来のトルク制御方式では風速変動で回転速度が変動すると発電電力が変動する傾向があった。しかし、このシステムではDFGの有効電力を直接制御するので、風速が変動しても電

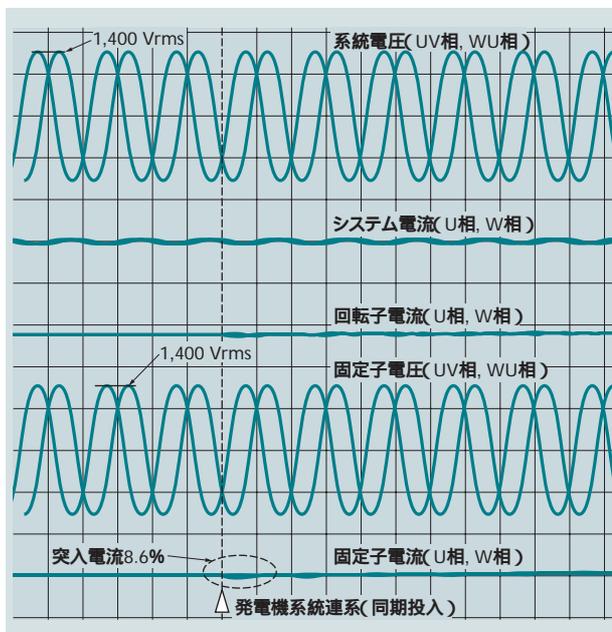


図6 風力発電機系統連系波形  
回転子電流の励磁電流成分とすべり周波数を制御して、連系時突入電流を抑制する。

力変動が少ない安定した電力を供給できる。このため系統インピーダンスが大きな系統に導入する場合に、フリッカなどの電圧変動など電力系統への影響が小さくなる特徴がある。

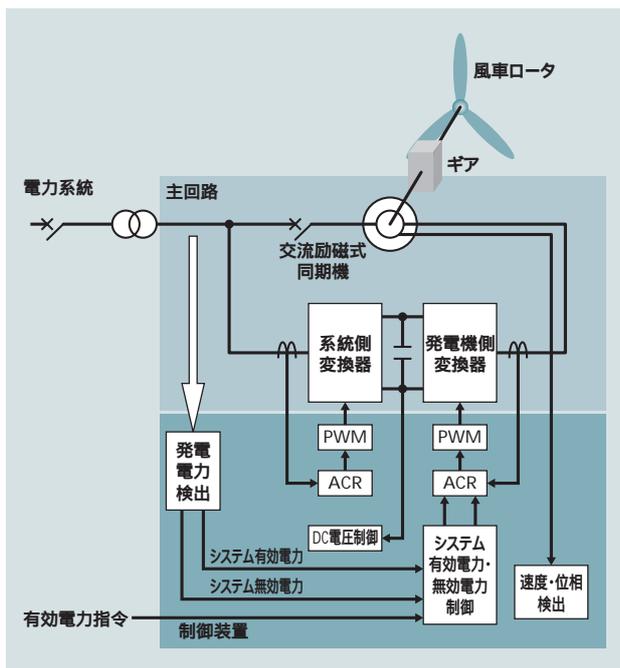
電力の高応答制御を実現するためには励磁位相検出が重要であり、電力変換器の制御装置は、系統電圧の逆相や高調波成分に影響を受けにくい、ロバスト性を持つ離散フーリエ変換を用いた位相検出方式を用いている。

無効電力に関しては、系統インピーダンスが大きい場所への連系技術として、無効電力の最適制御による系統電圧の安定化技術を開発している。この方式は、系統インピーダンスを常時推定し、発電システム自身の電力変動による電力系統の電圧変動が最小となるように、無効電力を制御する方式<sup>5)</sup>である。この方式により、発電電力変動による電圧変動を常に小さく抑制できる。系統インピーダンスが大きい場所への風力発電システム導入にメリットがある制御である。

また、発電開始時にDFGを電力系統に並入する際には、回転子電流の励磁電流成分とすべり周波数を発電機側電力変換器で制御し、固定子電圧を系統電圧の振幅と位相に同期させる。この同期連系制御によって連系時突入電流を抑制(突入電流約8.6%)し、系統に与える擾(じょう)乱を低減している(図6参照)。

### 3.3 電力変換装置

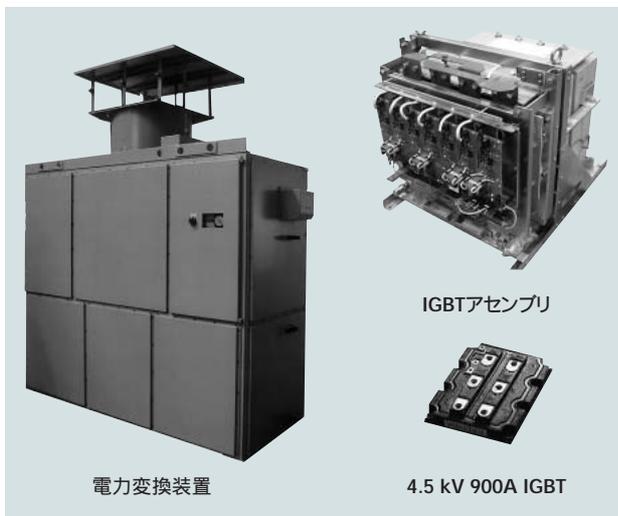
発電機端子電圧、電力変換装置入力電圧を、従来の690 V程度から1,400 Vに上げることによって、ナセルからタワー下の電力変換装置までの電線質量および電力損失の低減を実現した。電力変換装置は、タワー内下部に設置し、メンテナンス



注:略語説明 PWM( Pulse Width Modulation ), ACR( Automatic Current Regulator ), DC( Direct Current )

図5 風力発電システムの構成

発電システムの有効電力・無効電力制御により、電力系統に配慮した発電電力を実現する。



注:略語説明 IGBT( Insulated Gate Bipolar Transistor )

図7 電力変換装置, 高圧IGBTおよびアセンブリの外観

高圧のIGBTを使用することによって, 発電機の高電圧化に対応する。電線質量および電力損失を低減している。

が容易な配置とした。

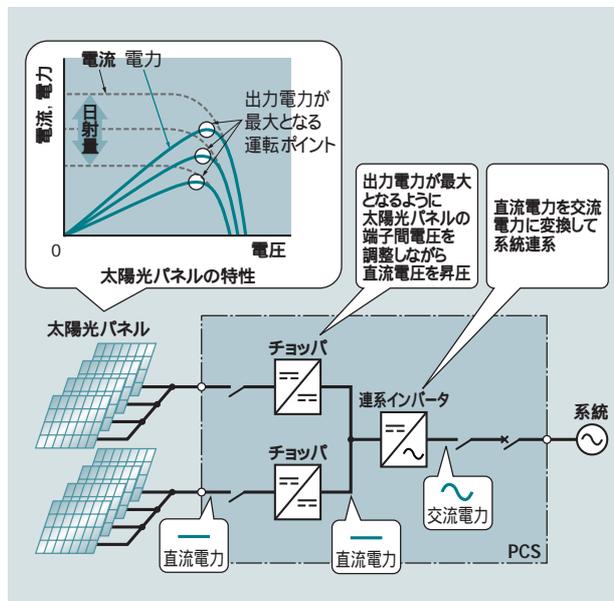
交流1,400 Vの電力変換装置, IGBT( Insulated Gate Bipolar Transistor )およびアセンブリ外観を図7に示す。電力変換装置は三相フルブリッジ構成で, 4.5 kV 900 AのIGBTを用い, 素子の冷却には不凍液を用いた水冷方式を採用した。

#### 4 . 太陽光発電システム用電力変換器

##### 4.1 メガソーラー発電設備

太陽光発電は, 地球温暖化防止, CO<sub>2</sub>排出量削減への効果が期待される新たなエネルギー源の一つとして注目されており, 急速な普及拡大が望まれている。これまで, わが国の太陽光発電設備は, 住宅用などの比較的小規模なものを中心に発展してきたが, 太陽光発電の導入量の飛躍的増加には, 大規模な太陽光発電設備の導入が必要不可欠である。欧米においては, すでに数メガワット規模のメガソーラー発電設備が稼働しており, 日本国内でも, 各地で自治体や企業, 電力事業者によってメガソーラー発電設備が計画されつつある。

風力発電や太陽光発電などの自然エネルギー発電では, その出力が不安定であることから, 電力系統に大量連系した場合に, 電圧変動, 周波数変動や高調波などの面で電力系統側に影響を及ぼすことが想定される。これらがメガソーラー発電設備の普及拡大の制約とならないようにすべく, 現在, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) において「大規模電力供給用太陽光発電システム安定化等実証研究」が行われている。日立製作所は, 山梨県北杜市と株式会社NTTファシリティーズがNEDOから委託を受けて2 MW級のメガソーラー発電設備を構築する実証研究のプロジェクト<sup>6)</sup>に参画し, 電力送変電分野およびパワーエレ



注:略語説明 PCS( Power Conditioning System )

図8 太陽光発電システム用PCS

太陽光パネルの端子間電圧を調整して出力電力を最大化するチョッパと, 直流電力を交流電力に変換する連系インバータから構成される。

クトロニクス分野での経験を生かして, 系統安定化機能を持った大容量パワーコンディショナー( PCS:Power Conditioning System )の開発を担当している。

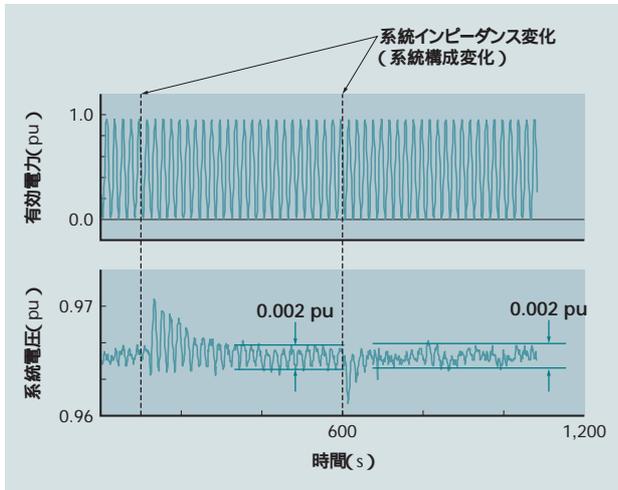
##### 4.2 太陽光発電システム用PCS

PCSは, 図8に示すように, 太陽光パネルで発電された直流電力を交流電力に変換して, 電力系統に連系するインバータ装置である。太陽光パネルは, 日照状態や端子間電圧に応じて取り出せる電流が変化する特性を持っており, 端子間電圧と電流の積で決まる出力電力もこれらに依存する。PCSは, それぞれの日照状態で発電電力が最大になるように, 太陽光パネルの端子間電圧を最適値に調整する最大電力追従機能を持っており, より効率的に発電を行えるようになっている。

メガソーラー発電システム用の大容量PCSでは, これらに加えて電力系統安定化のための機能が必要となる。NEDOの実証研究では, 系統電圧変動抑制, 瞬低( 瞬時電圧低下 )時運転継続, 高調波抑制などの機能を持った400 kW級の大容量PCSの開発を行っており, 2009年度から実証試験に入る予定である。

自然エネルギー発電の拡大普及のためには, コストについても留意が必要である。初期の導入コストや日常のメンテナンス・定期部品交換に要するランニングコストに対して, 発電による収入が十分に大きくなるようにすることで, 設備を導入するメリットができる。

開発中の400 kW PCSでは, 交流出力の400 V級化, 部分負荷状態を含めた高効率化により, 発電電力アップを図っている。また, 汎用性が高い主回路スイッチング素子や開閉器



注:略語説明 pu(Per Unit)

図9 大容量PCSの系統電圧変動抑制機能による効果

66 kV特別高圧系統に連系した太陽光PCSの系統電圧変動抑制機能のミニモデル試験結果を示す。系統構成が変化しても系統電圧変動が0.2%程度に抑えられている。

類を使用して、それらの容量を最大限利用するように容量選定することで、初期の導入コストを低減するとともに、長寿命部品の採用による定期交換部品の削減などによってランニングコストを低減している。

### 4.3 系統電圧変動抑制機能

電力系統システムでは、負荷需要に合わせて各発電所の発電電力を調整したり、無効電力補償装置などの電圧安定化機器を設置したりすることによって、電圧変動や周波数変動を抑制して安定な電力供給を実現している。

これに対して、自然エネルギー発電システムは、自然の状況に応じて発電電力が変動することから、場合によっては電力系統の安定性に影響を及ぼす。太陽光発電システムの場合には、雲の流れなどによる日射量の変化によって発電電力が脈動する。メガソーラー発電設備が増え、電力系統の全発電容量に占める太陽光発電システムの容量が大きくなると、電力系統が受ける脈動の影響は無視できなくなる。

脈動による影響を低減するためには、太陽光発電システムに脈動電力を吸収・放出する装置を併設して、電力系統側から見た発電電力の平滑化を行ったり、発電電力を制限したりする方法が考えられるが、前者は設備コストが大きくなり、後者はエネルギーを有効に利用できない。そこで、発電による有効電力とともに、電力系統の状態に応じて適当な量の無効電力を連系インバータから出力することで、系統電圧の変動を抑制する機能を開発して、メガソーラー発電システム用の大容量PCSに搭載している。この機能によって、付加設備なくエネルギーを有効利用しながら電圧変動を抑制できるようになる。この機能の効果をミニモデルで確認した結果を図9に示す。

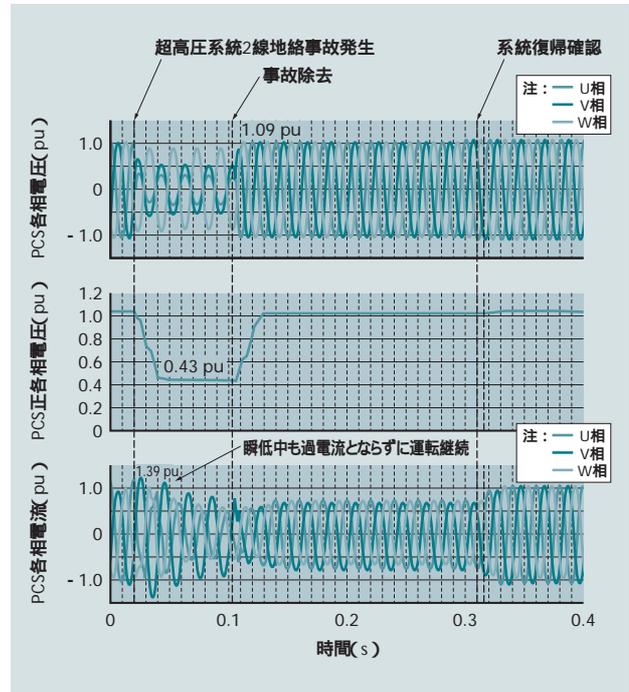


図10 大容量PCSの瞬低時運転継続

超高压系統の系統事故による瞬低(瞬時電圧低下)時におけるPCS運転継続のミニモデル試験結果を示す。瞬低中でも可能なだけ発電電力の出力を行っている。

### 4.4 瞬低時運転継続機能

一般にインバータ装置は、発熱部品である半導体の熱容量が小さいことから、回転機などと比べて過電流通流に対する耐量が小さい。このため、従来の太陽光発電システム用PCSでは、連系インバータが過電流になる可能性がある瞬低発生時には発電運転をいったん停止していた。このような挙動のPCSを電力系統に連系すると、系統事故などによる瞬低が発生したときに、PCSが電力系統から一斉に脱落することになる。負荷需要と発電電力のバランスが崩れている系統事故時に、さらにPCSからの発電電力が一斉に喪失すると、系統電圧が大きく変動したり、場合によっては系統崩壊による大規模停電にもつながったりする。

メガソーラー発電設備では、容量が大きい分だけ電力系統に及ぼす影響も大きい。これを低減するために、瞬低発生時にも運転を継続して、可能な限りの発電電力を出力することが必要となる。そこで、瞬低時運転継続機能を開発した。高速で波形ひずみなどにも強い電圧位相検出や高速の電流制御系によって、瞬低時の系統電圧の振幅・位相の急変による連系インバータの過電流を防止するとともに、系統へ出力可能な電力とバランスがとれるように発電電力を制御することでPCS内部での過電圧を防止して、交流正相電圧が定格の35%程度まで低下しても運転継続できる見通しを得た(図10参照)。この結果、瞬低の9割近くについて発電電力の喪失を回避できることになる。

#### 4.5 高調波抑制機能

電力系統にPCSを大量連系するときには、高調波電流によって系統電圧ひずみやPCS周辺に接続された機器の異常過熱などを発生させないようにする必要がある。パルス幅変調(PWM:Pulse Width Modulation)方式のインバータの場合、インバータから流出する低次の高調波電流は原理的には比較的小さいが、系統電圧ひずみに起因して高調波電流が流入する可能性がある。そこで、系統電圧ひずみの影響を考慮した制御系を連系インバータに適用することで、高調波電流を低減している。

#### 5 .おわりに

ここでは、新エネルギー発電システムに関するパワーエレクトロニクス製品と系統への影響を低減するための日立グループの技術について述べた。

自然エネルギー発電設備の容量が大きくなると、発電電力を電力系統に供給するための電力変換器の機能以外にも、多くの機能がPCSに対して要求されるようになると思われる。

#### 執筆者紹介



一瀬 雅哉

1995年日立製作所入社、日立研究所 インバーティノベーションセンタ パワエシステムユニット 所属  
現在、大容量風力向け電力変換器の開発に従事  
電気学会会員



宮田 博昭

1994年日立製作所入社、情報・通信グループ 情報制御システム事業部 パワーエレクトロニクス設計部 所属  
現在、大容量UPS、系統連系インバータの開発設計に従事  
電気学会会員



堤 和哉

1980年日立製作所入社、情報・通信グループ 情報制御システム事業部 パワーエレクトロニクス設計部 所属  
現在、風力発電向け電力変換器の開発設計に従事  
電気学会会員、電気設備学会会員

例えば、自然エネルギー発電設備を含む、小規模電力系統(マイクログリッド)相互間や大規模電力系統との間の電力融通調整といった系統制御の機能や、無停電電源装置(UPS: Uninterruptible Power Systems)など、他用途のインバータ装置と兼用できる機能などが考えられる。

日立グループは、電力系統分野、パワーエレクトロニクス分野の技術を融合させて、これらの開発に取り組んでいく所存である。

#### 参考文献など

- 1) European Renewable Energy Council:Renewable Energy Scenario to 2040(2008)
- 2) GWEC:Global Wind 2007 Report ,2007 final
- 3) 日立製作所、電力優先制御による発電機制御、特許第2555407号広報
- 4) 渡辺、外:CO<sub>2</sub>排出量を削減するエネルギー利用技術、日立評論、88、12、974~979(2006.12)
- 5) 大原、外:風力発電システムの電圧変動抑制制御による設置可能容量増大効果の検討、平成19年電気学会全国大会予稿集、4-082、125~126(2007)
- 6) NEDO、大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証研究、<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p06005.html>



内山 倫行

1990年日立製作所入社、電力グループ エネルギー・環境システム研究所 電力流通プロジェクト 所属  
現在、分散型電源の運用制御技術の研究に従事  
電気学会会員



長谷川 勉

1982年日立製作所入社、電力グループ 電機システム事業部 発電機システム本部 所属  
現在、風力発電システムの全体取りまとめ業務に従事  
電気学会会員