パワーコンディショナーの電源環境対応技術

目黒 光 Meguro Hikaru　堤 和哉 Tsutsumi Kazuya　一瀬 雅哉 Ichinose Masaya
伊藤 智道 Ito Tomomichi　菊池 輝 Kikuchi Akira

地球環境問題に対応するため，太陽光発電と風力発電による再生可能エネルギーの導入が世界的に活発化している。一方，設備容量の急増による電力系統の不安定現象が指摘されている。問題点は，系統事故時に発電設備が一斉に解列することによる系統不安定現象と，天候変化で発電電力が変動して電力系統の電圧と周波数が変動することの2点である。
日立グループは，これらの問題に対応するため，PCSを用いた瞬時電圧低下時の運転継続機能と系統電圧・周波数安定化技術を開発している。

1. はじめに

地球温暖化防止，CO_2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，再生可能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。中でも太陽光発電システムと風力発電システムは，機器の低コスト化が進み，世界的に導入が加速している。太陽光発電は2011年までに6,361万kW[1)]，風力発電は2012年までに2億8,248万kW[1)]に達するなど，飛躍的に導入量が増えている。

しかし，これらの発電システムが急速にかつ大量に電力系統に接続された系統においては，系統事故時の一斉解列，電圧上昇，周波数変動など[2)]電力品質の悪化が懸念されている。この電力品質の悪化の原因には，天候によって発電量が変化する太陽光発電システム・風力発電システムに特有の現象と，パワーエレクトロニクス製品であるPCS（Power Conditioning System）に起因する現象がある。

ここでは，PCSによって系統事故時の一斉解列，電圧上昇，周波数変動に対応する取り組みについて述べる。

2. 太陽光発電システムと風力発電システムの特徴

2.1 太陽光発電システム

太陽光発電用PCSの外観と仕様の一例を図1に示す。

メガソーラー向けPCSとして，直流電圧1,000 Vに対応したPCSである。インバータは，逆変換効率が高い3レベル変換回路を採用し，装置の最大効率は98.8％［DC（Direct Current）520 V時］を実現している。また，系統安定化機能として，電圧変動抑制機能，電圧上昇抑制機能，力率一定運転機能などの無効電力調整機能を標準装備し，FRT（Fault Ride Through）[3)]にも対応している。

項目		仕様
交流出力（系統側）	回路方式	3レベルインバータ
	定格容量	690 kVA/660 kW
	定格電圧	AC360 V
直流入力（電池側）	電圧範囲	DC520 V～900 V 最大DC1,000 V
逆変換効率		98.8％（DC520 V, AC360 V, 力率1.0）
運転温度範囲		0℃～40℃

注：略語説明　AC（Alternating Current），DC（Direct Current）

図1｜太陽光発電用PCSの外観と主要仕様
直流電圧1,000 Vに対応した太陽光発電用PCS（Power Conditioning System）の外観と仕様の一例を示す。

項目	仕様
対応発電機	二次励磁発電機（DFG）
定格容量	2,300 kVA/2,070 kW
定格電圧	AC690 V
過電圧対応	130% 0.1 s
回転子電圧	AC0 V～735 V
回路方式	2レベルインバータ
運転温度範囲	−20℃～+50℃

注：略語説明　DFG（Doubly-fed Generator）

図2｜風力発電用PCSの外観と主要仕様

二次励磁発電機（DFG）風力発電用PCSの外観と仕様の一例を示す。

2.2　風力発電システム

風力発電用PCSの外観と仕様の一例を**図2**に示す。

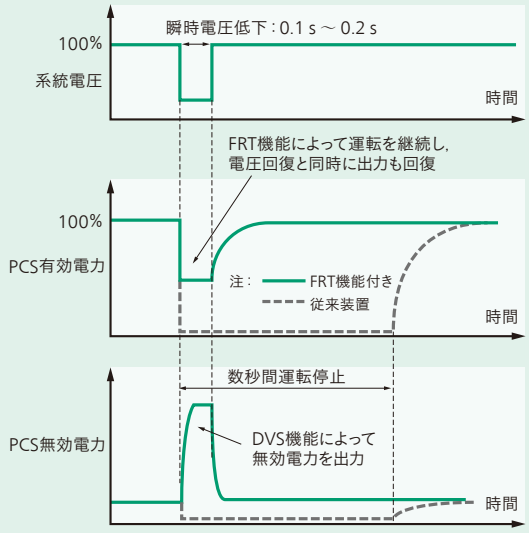
周囲温度－20℃～＋50℃，過電圧130％ 0.1 s，周波数変動50 Hz ± 10 Hz 0.2 sの厳しい温度・電源環境に対応し，有効電力／無効電力制御機能とFRT機能[3]を標準装備している。風車本体とのインタフェースはPROFIBUS※1)，CANopen※2)によるシリアル通信である。

3.　FRT対応技術（一斉解列の防止）

2006年11月の欧州大停電で発生した風力発電システムの一斉解列による不安定現象を機に各国・地域で系統連系要件が見直され，FRTに関する仕様[4]が制定された。

FRT機能は，**図3**の実線で示すように，系統事故による瞬時電圧低下時でも系統電圧低下レベルと電圧低下継続時間が規定の範囲内にある場合は，解列することなく運転を継続させる機能である。また，国・地域によっては，瞬時電圧低下時に無効電力を流す電圧回復支援機能（DVS：Dynamic Voltage Support）要件[5]がある。FRT機能とDVS機能により，一斉解列を防止して系統を安定化している。具体的なFRT手法について以下に説明する。

※1）PROFIBUSは，PROFIBUS Nutzerorganisation e.V.の登録商標である。
※2）CANopenは，CAN in Automation e.V.の登録商標である。



注：略語説明　FRT（Fault Ride Through），DVS（Dynamic Voltage Support）

図3｜系統事故時のPCSのFRT・DVS動作

上段に系統電圧の時間に対する変動と瞬時電圧低下を示す。中段にPCSが出力している有効電力を示す。実線はFRT機能付きの場合であり，瞬時電圧低下が発生しても有効電力の出力を続け，PCSが運転を継続していることが分かる。破線はFRT機能がない場合（従来装置）であり，瞬時電圧低下の発生後，しばらく有効電力が0％になり，PCSが停止している。下段はPCSが出力している無効電力を示す。実線がFRT機能付きであり，瞬時電圧低下の発生時，DVS機能によって無効電力を増やす動作をしている。破線がFRT機能がない場合（従来装置）であり，瞬時電圧低下の発生後，前述した有効電力と同様にPCSが停止している。

3.1　太陽光発電用PCSのFRT対応

太陽光発電システムの構成を**図4**に示す。

太陽電池で発電された電力は，チョッパによって昇圧され，系統側変換器から電力系統の電圧・周波数に合わせた発電電力が送られる。瞬時電圧低下時には，系統側変換器から系統に出力する電力が急激に低下するため，太陽電池

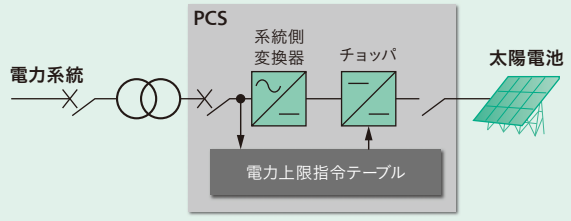


図4｜太陽光発電システム構成

日立のPCSは，電力上限指令テーブルを使用している。

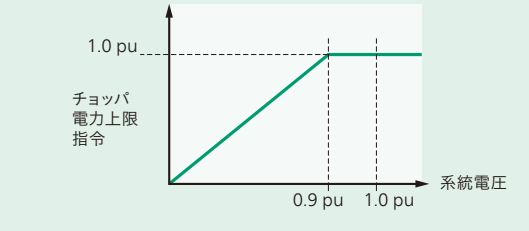


図5｜電力上限指令テーブル[6]

電力上限指令テーブルがどのようなテーブル（関数）であるかを示す。

から流れ込むエネルギーで系統側変換器－チョッパ間の直流電圧が上昇し，PCS保護のため停止する。

その対応策として，系統の状態に合わせてチョッパで出力を制限すると，直流電圧の上昇を抑制することができる。系統電圧に応じた電力上限指令テーブルを用いることで直流電圧の上限を抑制し，運転継続性を高めてFRTに対応している[6]（**図5**参照）。

3.2　風力発電用PCSのFRT対応

DFG（Doubly-fed Generator：二次励磁発電機）方式風力発電システムでは，系統側変換器から回転子側変換器に電力が供給され，回転子側変換器から励磁電流がDFGの回転子に供給される（**図6**参照）。発電電力は，この励磁電流によって固定子から電力系統に送られる。ここでは同図のFRT対応技術について述べる。

瞬時電圧低下時には，DFGの固定子と回転子に大電流が流れるため，PCSには，この大電流に耐えて運転を継続し，有効電力・無効電力を出力することが要求される。風力発電用PCSでは以下の2つの技術によって対応している。

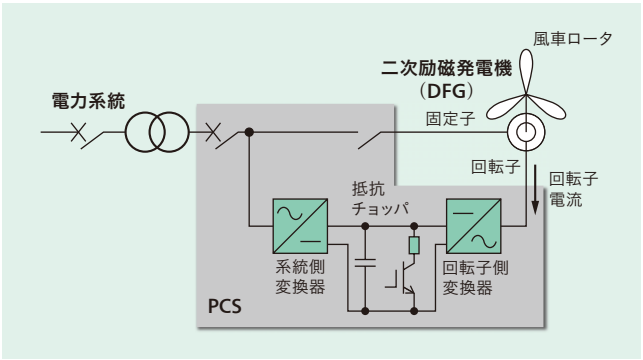


図6｜DFG方式風力発電システムの構成
日立の風力発電用PCSのシステム構成を示す。

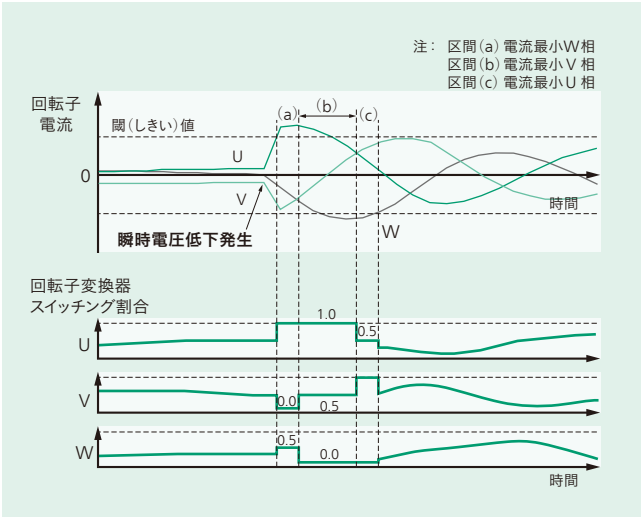


図7｜瞬時電圧低下時の回転子側変換器のスイッチング割合[7]
瞬時電圧低下が発生したときに，回転子に過大な電流が流れるため，回転子側変換器のスイッチング割合を0.0，0.5，1.0から選択して回転子の過大な電流に耐え，過大な電流を抑制する。

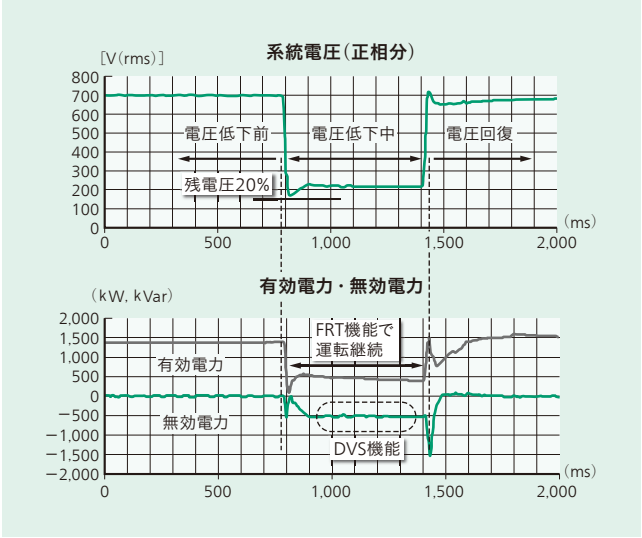


図8｜FRT波形（3線地絡，残電圧20%，容量1.5 MW）
日立の風力発電用PCSのFRTの実測波形を示す。上段に系統電圧の時間に対する変動と瞬時電圧低下を示し，下段にはPCSが出力している有効電力と無効電力を示す。FRT機能によって運転が継続し，DVS機能で瞬時電圧低下中に無効電力を多く出力している。

(1) 回転子側変換器のスイッチング割合の最適選択[7]
(2) 抵抗チョッパによる直流電圧の安定化

(1) は，瞬時電圧低下時に回転子に流れる大電流に耐えるため，回転子側変換器のスイッチング割合を**図7**のように選択する。スイッチング割合の選択によって瞬時電圧低下直後から電力の出力を可能にした。(2) は，瞬時電圧低下時にPCSに流れ込むエネルギーを抵抗チョッパで消費し，運転継続性を高めた。また，(1) の動作により，抵抗チョッパの消費エネルギーを小さく抑え，抵抗チョッパの小型化も図った。(1) と (2) を用いたFRT時の実測波形を**図8**に示す。電力を安定的に出力し，運転継続していることが確認できる。

4.　系統安定化技術

太陽光発電システム・風力発電システムのPCSに適用している系統電圧と系統周波数の安定化技術を以下に説明する。

4.1　系統電圧安定化対応

電力系統にはインピーダンスがあるため，天候によって発電電力が増減すると系統電圧も増減し，電力品質が悪化する。系統電圧は無効電力によって増減できるため，PCSから出力する無効電力を調整することでも系統電圧を調整できる。

太陽光発電用PCSにおける実施例を**図9**に示す。系統を抵抗分Rとリアクタンス分Xとした場合，系統電圧Vと有効電力Pの変動分から系統の $\alpha = R/X$ を自動推定し，PCSが出力する無効電力指令Qrefを $P \cdot R/X$ とすることで系統

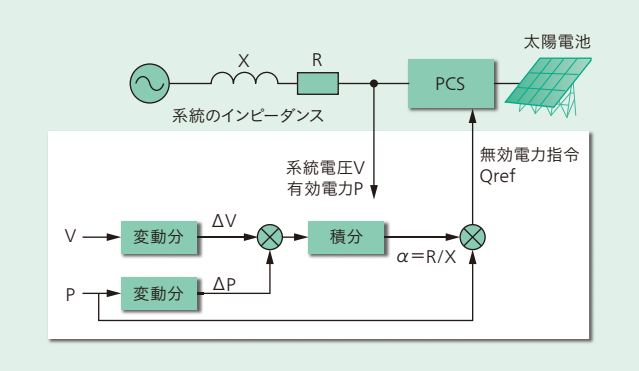


図9｜無効電力オートチューニング構成[8)]

系統電圧Vと有効電力Pから最適な無効電力指令Qrefを計算する。白い枠の中が無効電力オートチューニングの構成である。

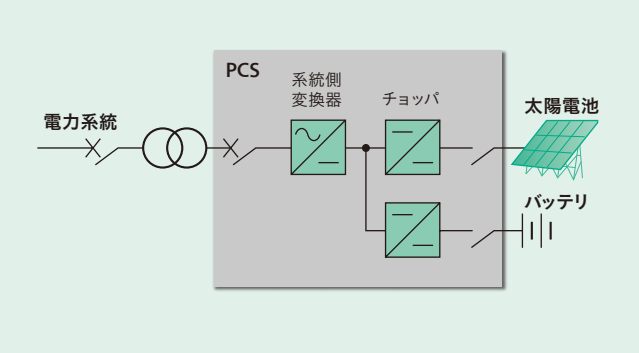


図10｜ハイブリッドPCS[9)]

バッテリと太陽電池を組み合わせたハイブリッドPCSのシステム構成を示す。

電圧の変動を最小化できる。この機能を無効電力オートチューニング[8)]と呼ぶ。

4.2　周波数安定化対応

有効電力は，需要と供給の同時同量性が必須であるため，短期間の有効電力の過不足分は，発電機の回転エネルギーで補われ，電力系統には周波数の変動として現れる。天候によって太陽光発電システム・風力発電システムの発電電力は増減するため，電力系統の周波数を変動させ，電力品質を悪化させることになる。

有効電力を安定化するために太陽電池とバッテリを組み合わせた太陽光発電用ハイブリッドPCSの例を**図10**に示す。ハイブリッドPCSは，天候による太陽電池の発電電力に応じて蓄電池に充電または放電することで，PCSから出力される有効電力を安定化し，電力系統の周波数安定化に貢献することができる。

5.　おわりに

ここでは，太陽光発電システムや風力発電システムの設備容量の急増で発生する系統事故時の一斉解列，電圧上昇，周波数変動の問題に対する，パワーエレクトロニクス製品（PCS）の回路方式や制御方式による解決策について述べた。

太陽光発電システムや風力発電システムなど再生可能エネルギー発電の導入がさらに進み，電力系統への影響が増大してくると，個々のPCS単独の制御だけでは，電力系統の安定化は困難となる。今後は，電力系統－PCS間や蓄電池システム－PCS間などの複数のシステムと連携し，電力融通を調整するといったトータルの制御が必須となる。

日立グループは，電力の安定供給のため，電力系統分野，蓄電池分野，パワーエレクトロニクス分野の技術を融合させ，柔軟性が高い電力ソリューションを提供していく。

参考文献など

1)　資源エネルギー庁：エネルギー白書2013，平成24年度エネルギーに関する年次報告（2013.06），
http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013html/
2)　独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：NEDO再生可能エネルギー技術白書（2013.12），
http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html
3)　日本電気技術規格委員会:系統連系規程JECA9701-2012 2013年追補版1（2013.03）
4)　Mapping of grid faults and grid codes, Risø-R-Report, Risø National Laboratory, Denmark (2007.07)
http://www.risoe.dk/rispubl/reports/ris-r-1617.pdf
5)　金尾：風力発電のFRT・DVSに関する研究，研究開発年報，第45号，北陸電力（2011.2）
6)　相原，外：電力変換装置及び発電変換システム，日立製作所，特許第5260092号
7)　阪東，外：二次励磁発電装置及び二次励磁可変速発電電動装置，日立製作所，特許第5401213号
8)　大原，外：分散型電源システム及び系統安定化方法，日立製作所，特許第4575272号
9)　日立蓄電池ソリューション，製品カタログ（2012.10）

執筆者紹介

目黒 光
日立製作所 インフラシステム社 電機システム本部 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設計開発に従事
電気学会会員

堤 和哉
日立製作所 インフラシステム社 電機システム本部 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設計開発に従事
電気学会会員，電気設備学会会員，日本風力エネルギー学会会員

一瀬 雅哉
日立製作所 インフラシステム社 電機システム本部 パワーエレクトロニクス設計部 所属
現在，大容量電力変換器の開発に従事
電気学会会員

伊藤 智道
日立製作所 インフラシステム社 パワーエレクトロニクス設計部 所属
現在，太陽光発電用PCSの設計開発に従事
IEEE会員，電気学会会員

菊池 輝
日立製作所 日立研究所 エネルギー・環境研究センタ 電力流通研究部 所属
現在，太陽光発電用PCSの研究開発に従事
電気学会会員