

太陽光発電システム用 パワーコンディショナの動向について

(一財)建築コスト管理システム研究所・新技術調査検討会

1 はじめに

1.1 背景

コスト研では2008年春号において『太陽光発電の調査報告』を掲載し、太陽電池パネルの発電原理、開発経緯、パネルの種類について概要を報告した。その後、2011年の福島第一原子力発電所の事故を境に、電力需給環境を取り巻く状況は大きく変化した。そこで今回、太陽光発電（PV：Photovoltaics）関連の技術について改めて報告することとした。

2012年7月より「再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT制度）」がスタートし、再生可能エネルギーの導入量は急速に増加している。再生可能エネルギーの設備認定発電出力は、2013年6月末時点で22GWを超え、そのうち3.6GWが稼働している。中でもPVシステムは約3.5GWが稼働を開始しており、普及が著しい発電方式である¹⁾。

今回は、そのPVシステムの中で、直流（DC）の電力を交流（AC）へと変換する部分

にあたるパワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning System）にスポットを当て、最近の技術動向や普及状況について報告する。

1.2 電力系統と電気の流れ

図1に電力系統と電気の流れを示す。電気は“発電＝消費”の関係にあり、電力の消費に合わせて電力会社が発電をリアルタイムに制御している。これが電力の出力調整である。発電所やPVシステムなどで発電した電力を送電・配電線へと送るためには電圧・周波数・位相などの電気特性を制御する必要がある。例えば周波数を合わせ、電圧を高くしたり、位相を進ませたりする。PVシステムの中では、この役目をPCSが担っている。

1.3 PVシステムにおけるPCSの役割

PVシステムは、図2の機器類によって構成されている。太陽の光エネルギーは、太陽電池によって直流の電力へと変換され、接続箱（集電箱）と呼ばれる保護機能を持った盤でひとつに集められる。その後、PCSにより需要家で利用可能

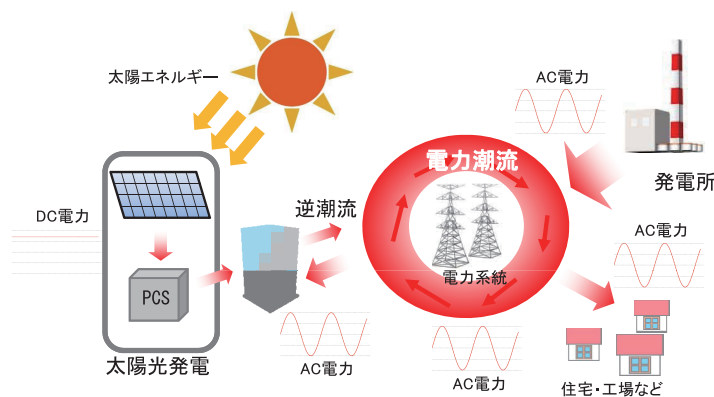


図1 電力潮流図

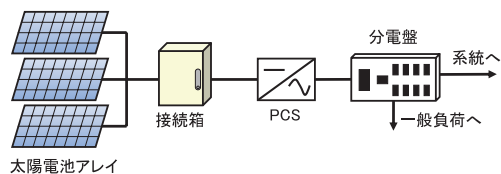


図2 太陽光発電システム（概略構成図）

（電圧・周波数）な交流の電力へと変換され、家庭内の負荷や一般負荷へと供給される。

PVシステムは、系統連系型と独立型に分類される。独立型はPVシステムを電力系統に接続しない方式であり、発電した電力はすべてビルもしくは住宅内の負荷で消費される。それに対し、系統連系型はPVシステムを電力系統と接続して利用するシステムである。“連系”とは、発電システムを電力系統に接続することを意味する。また、余剰電力（発電した電力が自家消費されず余った分）がある場合に、電力系統に電気を送る場合を「逆潮流あり」、送らない場合を「逆潮流なし」と呼ぶ。図2は系統連系型・逆潮流ありのシステムを表している。

経済産業省資源エネルギー庁は、2009年11月からPVシステムの余剰電力を、電力会社が決めた価格で買い取る「余剰電力買取制度」を開始した。また、2012年7月からは、PVシステムだけではなく、再生可能エネルギーによって発電した電力のすべてを電力会社へ売電することができる「固定価格買取制度」が施行された。電力会社への売電価格は、2012年度は42円/kWh、2013年度は37.8円/kWhであり、設備を導入した費用を売電電力の収入で相殺できるような価格設定であるため、PVシステムの普及に大きく貢献している。そして、この場合の設備方式は「系統連系型・逆潮流あり」であり、現在国内に導入されているメガソーラーなどはこの方式が採用されている。

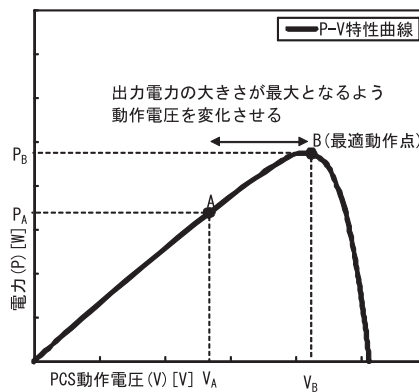
2 PCSの技術動向

前述のように、PCSは太陽電池から出力される

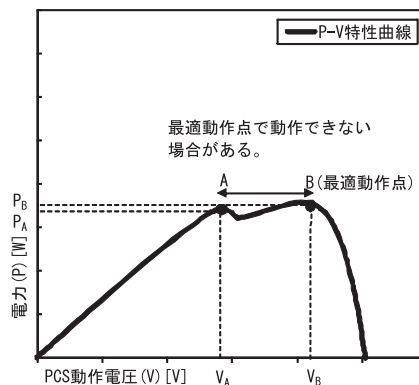
直流電力を交流電力に変換し、交流側に接続された負荷設備へ電力を供給すると同時に、電力を系統側へ逆潮流させるための制御をする装置である。接続可能な電力系統には、単相2線、単相3線、三相3線（ Δ 及びY結線）式などがあり、PCSも電力系統に合わせて単相用、三相用がある。ここでは、PCSの代表的な機能とその動向について示す。

2.1 最大電力点追従制御

PCSは、太陽電池から最大の発電出力を取り出すために電圧（動作電圧）を制御する。しかし、太陽電池の発電出力は日射強度や表面温度によって変動するため、常に最大出力を取り出すための制御が必要となる。この制御を最大電力点追従（MPPT：Maximum Power Point Tracking）制御という。一般的な制御方式として「山登り法」



(a) 正常時のPV特性曲線



(b) 各太陽電池の出力が揃っていない時のPV特性曲線

図3 最大電力点追従制御の例

が用いられている。

図3(a)に示すとおり、山登り法はPCSの直流動作電圧を一定時間間隔でわずかに変動させ、そのときの太陽電池出力電力を計測して前回との比較を行い、常に電力が大きくなる方向にPCSの動作電圧を変化させる手法である。

しかし、図3(b)に示すとおり、影や積雪などの影響により各太陽電池の出力が揃っていない場合、P-V(電力-電圧)特性曲線上にピークが2つ以上発生してしまうため、最適動作点に到達できない場合がある。この問題を克服するため、瞬時にI-V(電流-電圧)特性曲線を計測し、その最大出力点に動作電圧を設定する方式が開発されている(I-V特性スキャン方式)²⁾。この方式であれば、最適動作点で動作できないという問題を解消することが可能となる。また、その他には、電圧追従法³⁾、 dp/dv 法⁴⁾、二値制御法⁵⁾などがある。

2.2 DC/AC変換

DCをACに変換する装置はインバータと呼ばれている。インバータは、半導体スイッチング素子を複数個組み合わせて回路を構成し、そのスイッチング素子を決められた順序でON、OFFを繰り返すことにより、直流電力を交流電力へと変換する。

図4は単相2線式に用いられるインバータの回路構成の例である。

図において、Q1とQ4がON、Q2とQ3がOFFしているときは、交流出力は、「+」の電圧が供給される。その逆では「-」の電圧が供給される。

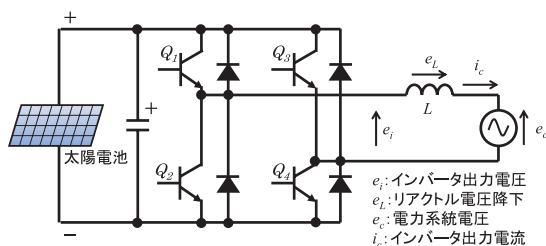


図4 電流制御電圧型インバータの基本回路⁶⁾

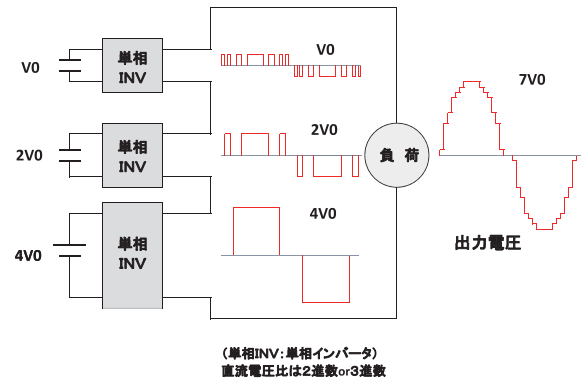


図5 階調制御型インバータ⁷⁾

このような単純な動作で直流電力から交流電力へ変換ができる。しかし、出力波形が矩形波となり、高調波が多く含まれてしまう。そこで、より正弦波に近づけるための技術として、PWM(Pulse Width Modulation)方式が用いられる。これはパルス幅を変化させることで疑似正弦波を作り出し、更に平滑用フィルタを通すことで正弦波に近い滑らかな交流波形とする技術である。

近年では、この平滑用フィルタが大容量であるため損失が大きいという課題に対し、階調制御型インバータ方式を用いた製品も販売されている。図5に示すこの方式は、複数の単相インバータを直列に接続し、それらの出力電圧の組み合わせで波形を出力する方式である。

2.3 単独運転検出

電力系統側に停電が発生すると、配電線の遮断器によって、一部の配電線が電力系統から物理的に切断される。このとき、そこに連系されているPVシステムが発電を継続してしまうと、電力系統へPVシステムから電圧が印加される。このような状況では、保守点検者がPVによる電圧印加に気付かず、停電により無電圧であると勘違いして配電線に触れ、感電するおそれがある。これを防止するために、PCSには単独運転防止機能が設けられている。

PCSには受動的方式と能動的方式の2種類の単独運転防止機能を内蔵するよう系統連系規程に定められている⁸⁾。受動的方式とは、連系運転から

表1 単独運転検出方式

方式	具体的検出方式
受動的方式	電圧位相跳躍検出方式 3次高調波電圧至急増検出方式 周波数変化率検出方式
能動的方式	周波数シフト方式 スリップモード周波数シフト方式 有効電力変動方式 無効電力変動方式 負荷変動方式
新型能動的方式	ステップ注入付周波数フィードバック方式

単独運転へ移行したときの電圧波形や位相などの変化を捉える方式であり、能動的方式とは、常にインバータ出力に周波数変動などの電氣的な変動要因を与えておき、連系運転時にその変動要因が出力に表れず、単独運転時には表れることを利用して異常を検出する方式である。各検出方式の例を表1に示す。

2013年2月に系統連系規程が改正され、単独運転検出装置に多数台連系時の単独運転防止技術として新型能動的方式（ステップ注入付周波数フィードバック方式）が追加された。この方式は周波数フィードバック機能及び無効電力ステップ注入機能（周波数変化助長機能）の2つの機能を搭載している⁹⁾。その他、電力システムの安全を担保するための追加設備の投資削減、7割ルール（区分開閉器単位で、PVの設置可能量を昼間の最低消費電力の7割に制限するルール）の適用除外可能などのメリットがあり、今後のPV普及に大きく貢献することが予想される。

2.4 直流回路保護

PVシステムのDC側で発生する地絡事故や短絡事故は、火災の原因になる場合があるため、それらを保護する装置が必要である。家庭用に多く採用されているトランスレス方式のPCSでは、太陽電池と電力系統側が絶縁されていないため、DC側が地絡すると地絡電流がPCS内部を通過する。通常、受電点（分電盤）には、漏電遮断器が設置されており、屋内配線や負荷機器の地絡を監視しているが、太陽電池では地絡が発生すると、地絡

電流に直流成分が重畳し、通常の漏電遮断器では保護できない場合がある。従って、PCS内部にDCの地絡検出器を設置し、地絡電流を検出、保護している。検出レベルは100mA程度に設定されることが多い。

2.5 産業用と家庭用の違い

PCSは、設置箇所により家庭用と産業用に大別される。家庭用PCSは室内に設置するタイプが一般的である。屋外に設置できるタイプでは保護等級IP65（完全な防塵形・防噴流形）の製品も販売されている¹⁰⁾。容量は2kW～5kW程度と小容量であり、低騒音（最大50dB、最小25dB）設計となっている。

産業用PCSは、10kWから500kWまでの製品がある。地絡事故における直流成分の流出を回避するため、商用トランス方式が主流だが、10kW機は小型・低価格化の要望が多いためトランスレス方式が多い。また、屋外の劣悪な環境でも使用可能のように周囲温度範囲が最大60℃（家庭用は40℃）となっている。

3 出荷台数とコスト

3.1 PCSの出荷台数

2012年7月の固定買取価格制度の導入もあり、住宅用（10kW未満）は2011年度413,026台に対し、2012年度は1.5倍の622,059台となった。産業用10kW以上（100kW以上含む）については、2011年度7,539台だったが、2012年度は53,814台となり、7倍強の伸びを示した（図6）¹¹⁾。

出荷容量の比率では、2011年度は10kW未満が支配的であったのに対し、2012年度には10kW未満と10kW以上（100kW以上含む）とが同程度導入されており、急激に導入が進んでいることが分かる（図7）¹¹⁾。特に100kW以上のシステムが多く設置されている。

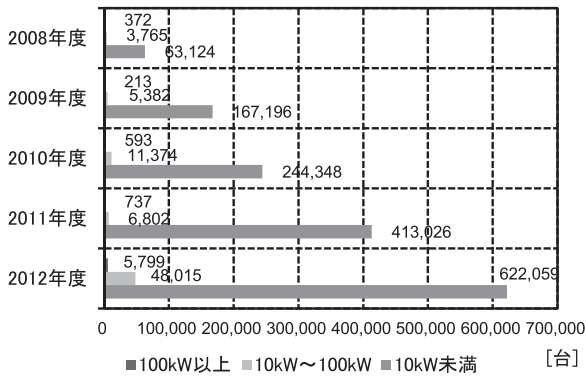


図6 PCS容量帯別 出荷台数¹¹⁾

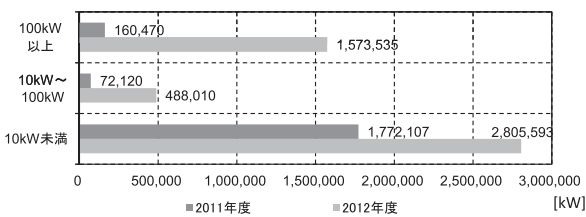


図7 PCS容量帯別 出荷容量¹¹⁾

3.2 PCSのコスト

システム全体価格に占めるPCSの価格割合と、その価格動向について述べる。

図8に建屋付帯設備として設置される10kW規模のコスト比率を示す。PVシステムの全体コストに占めるPCSの比率は1割程度であり、金額としては8～12万円/kWの価格帯にある。

大手メーカーにヒアリングを行ったところ、価格動向については、2008年以前の出荷量がほぼ一定の頃は価格も変化がなかったが、2009年以降の出荷量の急激な増大に伴い産業用・家庭用とも8～9割程度に下落しているようである。

産業用PCSについては、従来より（独）新エネ

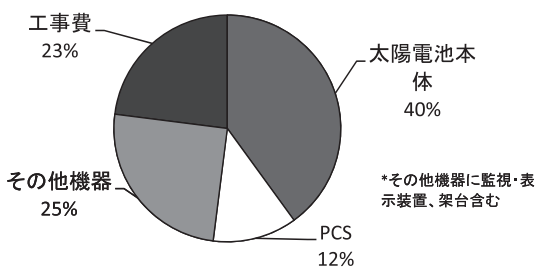


図8 PVシステムコスト比率¹²⁾

ルギー・産業技術総合開発機構（NEDO：New Energy and Industrial Technology Development Organization）の新技術関連や、その他の補助金により2000年前後から次第に導入量が伸びている。2009年の余剰電力買取制度以降、出荷量の増加に伴い国内参入メーカーが増加したことが、価格の下落に繋がった。

住宅用PCSについては、従来からの住宅向け導入補助金制度と、余剰電力買取制度により導入量が増加し、更に2012年7月より再生可能エネルギーの固定価格買取制度が実施されたため、市場が拡大し産業用同様に出荷数量が増加し、産業用と同様の理由により価格が変動した。

4 今後の動向と課題

4.1 PCSに求められる要件

NEDOの示したスマートグリッド技術ロードマップの中でも先進的なインターフェース技術として、PCSのカレンダー式出力抑制機能及びFRT（Fault Ride Through）機能の開発が挙げられている¹⁴⁾。

期待される機能の役割はいずれも、今後増大する分散型電源（太陽光発電、風力発電など）が、電力系統（潮流）を乱すことなく電力を送電するための機能である。

(1) カレンダー出力抑制機能

PVシステムが系統に大量導入された場合、軽負荷期の休日など電力消費が少ない時期に余剰電力が発生する。特に電力消費が極端に少ないGW（ゴールデンウィーク）等の特異日には、余剰電力が大量に発生する。GW等の特異日も含めて蓄電池によってカバーする場合は、極端に大きな蓄電容量が必要となり現実的ではない。

これに対し、国の低炭素電力供給システムに関する研究会においては、社会的費用の最小化という観点から、PVシステムの出力抑制が実際の

あり、そのあり方や具体的な方策について、今後検討が必要であると提言されている。このため、関係業界（電気事業連合会、日本電機工業会、太陽光発電協会の三団体）合同で出力抑制の各種方策について、技術的な検討を行っている。

カレンダー機能は、パワーコンディショナにカレンダー機能を搭載し、あらかじめ特定の軽負荷期間を定め、強制的にこの日の出力を抑制する手法である。出力抑制手法の中で、最も社会的な対策費用が少なく済むとされている。

(2) 電力平準化機能

PVシステムは天候の影響を大きく受けて、発電出力が急峻に変動する。そのため、同じ系統に大量に導入された場合、電力系統の電圧変動や周波数変動といった電力品質への悪影響を与えることが懸念されており、蓄電池を併設して発電出力の変動を抑制する電力平準化機能が必要となる。蓄電池の充放電はUPS（無停電電源装置）などで既に実用化されているが、PVシステムと蓄電池システムを組み合わせたシステム制御技術の確立が課題である。また、定置型蓄電池のコストパフォーマンスが見合わない点も課題である。今後、技術革新によるコスト低減が期待される。

(3) FRT機能

PVシステムが大量導入された電力系統が、事故や天災による故障により擾乱（系統が安定しない状態）した場合、一斉にPVシステムが停止（解列）し、電力品質に重大な影響を及ぼす恐れがある。FRT機能は、PVシステムが連系している電力系統に発生する瞬時的な擾乱に対して、PCSが運転を継続する機能である。

この機能は、特に大規模なシステムに使用されるPCSに要求されており、仕様策定が進められている。2013年2月に改正された系統連系規程（JEAC9701-2012）にはFRT要件が追記され、電圧低下時と周波数変動時それぞれに満たす要件が定められた⁸⁾。今後、FRT機能の試験方法や条件

等の策定が進められる。

4.2 保守・メンテナンス

PVシステムにはモーター、原動機などの可動部分がないため、メンテナンスフリーのイメージが強い。しかし、直射日光や風雨を受ける屋外の悪条件にさらされるため、出力低下や地絡、短絡による発電停止、系統波及事故などの可能性もある。

定期的な保守・メンテナンスを行い、長期にわたって安定した発電機能を保つことは重要である。

表2にPCSに必要とされるメンテナンス項目を示す¹³⁾。発電が停止した場合に、すぐに対応するためには遠隔監視などによる常時監視装置を導入することが望ましい。

太陽電池パネルとPCSの間には、保護機能を持った接続箱がある。この盤についても外観点検及び、保護素子である逆流防止ダイオードやサージブソーバーなどを点検されたい。

PCSには接続箱を内蔵したタイプがある。省スペースや施工コストの低減などのメリットがある一方で、点検作業の際には作業スペースが確保しづらいなどの課題がある。設備コストで考えるならば、接続箱内蔵型を選択することが多いと考えられるが、長期的なメンテナンス費用も含めて考

表2 PCSのメンテナンス項目一覧¹³⁾

点検種類	点検項目	
日常点検 (1回/月)	目視点検	<ul style="list-style-type: none"> ・外箱の腐食及び破損 ・外部配線の損傷 ・通気確認（通気孔、フィルタなど） ・異常音、異臭、異常な振動及び異常過熱 ・表示部の異常表示 ・発電状況
定期点検 (1回/4年)	目視点検	<ul style="list-style-type: none"> ・外箱の腐食及び破損 ・外部配線の損傷 ・通気確認（通気孔、フィルタなど） ・異常音、異臭、異常な振動及び異常過熱 ・表示部の異常表示 ・発電状況
	測定及び試験	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁抵抗（PCS入出力端子—接地間） ・動作確認（表示分表示、発電電力など） ・停電時の動作確認及び投入阻止時限タイマー動作試験

えるならば、接続箱は別に設置することが望ましい。

5 まとめ

本報告では、PVシステムの中のPCSにスポットを当て、機能・動向・技術要件について調査した結果を述べた。

エネルギー基本計画では、2030年までに総発電電力量に占める再生可能エネルギーの割合を21%まで増やす目標を立てている¹⁴⁾。この実現のため、経済産業省では固定価格買取制度などで支援を行い、安定化させるための技術開発から、より普遍的に継続させうるPVシステムの低コスト化技術の開発を促進しており、その技術動向には今後も注視する必要がある。

最後に本報告にあたり、株式会社トーエネック技術開発室より資料提供などの協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

(参考文献)

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：「なっとく！再生可能エネルギー」
<<http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/index.html>>
(2013.11.15)
- 2) 板子一隆 他：「太陽光発電システムにおける I-V 特性スキャン型MPPT制御の部分影時の効果」、電気設備学会誌、Vol.32、No.4、pp301-306 (2012.4.10)
- 3) 黒川浩助 他：「太陽電池単セル昇圧回路へのMPPT制御の適用」、IIP情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集2002,pp162-164 (2002.3.22)
- 4) Yeong-Chau Kou, Tsrng-juu Liang, and Jiann-Fuh Chen：「Novel Maximum-Power-Point-Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System」、IEEE Trans Industrial Electronics、Vol.48、No.3 (2001.6)
- 5) 大庭勝實 他：「太陽電池の動特性を考慮した最大電力点追従法」、電学論D、Vol.123、No.7、pp863-869 (2003.7)
- 6) (一社)太陽光発電協会：「太陽光発電システムの設計と施工[改訂4版]」(2012.1.20)
- 7) 三菱電機(株)：「産業メカトロニクス 階調制御型インバータ概要」
<<http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/list/mechatronics/b07/>> (2013.11.15)
- 8) (一社)日本電気協会：「系統連系規程 JEAC 9701-2012」(2012.8.10 改定)
- 9) (一社)日本電機工業会：「ステップ注入付周波数フィードバック方式(太陽光発電用パワーコンディショナの標準形能動的単独運転検出方式)」JEM 1498 (2012.8.27制定)
- 10) 山洋電気(株)：「屋外用PCS SUNUPS P61B」
<http://www.sanyodenki.co.jp/news/newslst/20130124_SANUPS_P61B.html> (2013.1.24)
- 11) (一社)日本電機工業会：「2012年度太陽光発電用パワーコンディショナの出荷量動向調査報告」(2013.10.15発行)
- 12) コスト研ヒアリング結果(産業用：山洋電機、住宅用：オムロン)
- 13) (一社)日本電機工業会：「小出力太陽光発電システムの保守・点検ガイドライン」JEM-TR228 (2012.9.27改正)
- 14) 経済産業省資源エネルギー庁：「エネルギー基本計画について」(2013.3.15)