

メガソーラー向け屋外設置型高効率 PCS 「PVI1000」

PVI1000: Outdoor High-Efficiency Power Conditioners for Mega Solar Projects

藤井 幹介 FUJII Kansuke

藤倉 政信 FUJIKURA Masanobu

菊池 貴之 KIKUCHI Takayuki

太陽光発電の市場は、家庭用の小規模発電からメガソーラーといった大規模発電に拡大している。富士電機では、メガソーラー向けに最適な単機 1 MW のパワーコンディショナ (PCS) を開発した。この PCS は、A-NPC 3 レベル IGBT モジュールを適用することにより、世界最高レベルの効率を実現している。また、高圧トランスと PCS を同一ベース上に一体化させたサブステーションタイプにしているため、設置コストを低減することができる。さらに、系統時の運転継続機能およびユニット並列冗長により、信頼性の高い太陽光発電が実現できる。

The solar power market ranges from home power generators to large-scale installations for Mega Solar projects. Fuji Electric developed an 1 MW power conditioner (PCS) that is optimal for these Mega Solar projects. This PCS achieves world-class efficiency through use of an A-NPC 3-level IGBT module. In addition, setup costs are reduced as the high-voltage transformers and the PCS are integrated on the same stage into a sub-station. Furthermore, it achieves highly reliable solar power generation through Fault-ride-through capability and unit parallel redundancy when connecting to a power system.

1 まえがき

世界的なエネルギー需要は増大の一途をたどり、CO₂ による地球温暖化が大きな問題となってきた。このような中、太陽電池をはじめとした再生可能エネルギーによる発電への期待がますます高まっている。世界の太陽電池の市場規模は、2010 年度に 10 GW を超え、2015 年には 35 GW を超えるとの予測もある。また、家庭用だけではなく、1 MW を超えるいわゆるメガソーラーの実績や計画が世界各地で急激に増大してきている。さらに、太陽電池の市場は、欧州だけでなく中国、米国、東南アジア、インドなどへ急速に拡大している。

一方、国内では、2012 年 7 月から“再生可能エネルギーの固定価格買取制度”が運用開始されることを踏まえ、全国各地で多数のメガソーラー発電所が計画されている。

富士電機は、メガソーラーに最適な屋外設置型高効率パワーコンディショナ (PCS) を開発した。この PCS には、富士電機独自の最新のスイッチング素子である RB-IGBT (Reverse-Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor) ⁽¹⁾ を適用した A-NPC (Advanced Neutral-Point-Clamped) 3 レベル IGBT モジュールを用いた新しい回路方式を採用し、世界最高レベルの運転効率を実現している。本稿では、メガソーラー向け屋外設置型高効率 PCS 「PVI1000」の特徴および機能・性能について述べる。

2 特徴

メガソーラーにおいては、太陽電池のワット単価を下げるだけでなく、主要な構成要素である PCS に発電単価を下げることに信頼性が高いことを同時に実現することが求められる。そのため、次の 3 点が必要である。

- (a) 発電効率が高いこと
- (b) トータルコストが低いこと
- (c) 系統に接続するため信頼性が高いこと

これらを実現する PVI1000 を開発した。外観を図 1 に示す。

2.1 高効率

(1) RB-IGBT と新回路方式の採用

RB-IGBT と従来の IGBT をワンパッケージ化した A-NPC 3 レベル IGBT モジュール (図 2) を世界で初めて実用化した。このモジュールを 3 レベル変換回路に適用することにより、電力ロスと部品点数の大幅な削減を同時に実現できる。

(2) 世界最高レベルの効率 98.5% の達成

3 レベル IGBT モジュールを新電力変換技術 (A-NPC 3 レベル変換回路) に適用することにより IGBT 素子のスイッチング損失を大幅に低減した。また、インバータが出力する PWM 波形に含まれる高調波成分を従来品より半

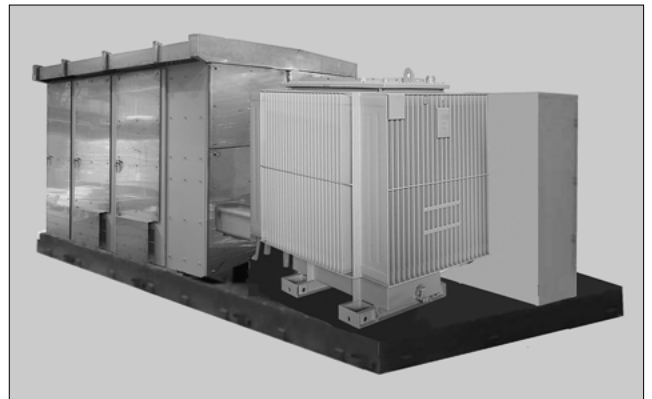


図 1 「PVI1000」

減させたことによってフィルタ損失が低減し、世界最高レベルの高効率 98.5% (IEC 61683 裕度効率, 内部電源含まず) を達成した。さらに、太陽光発電用 PCS の実態効率に近い部分負荷効率を考慮したユーロ効率においても 98.2% を達成した。

2.2 トータルコストの低減

(1) 単機容量 1MW

単機容量で 1MW の大容量化を実現した。大規模メガソーラー向けにおいては、単機容量を大きくすることにより PCS の台数を減らせるので、設置面積の低減につながる。

(2) 屋外サブステーションタイプ

PCS 盤を屋外設置対応としているので、PCS 盤を収納するための建屋や空調が不要である。さらに、オプションで直流分岐用ヒューズを PCS 盤に内蔵できるため、接続箱で集約した太陽電池の出力をそのまま PCS に接続できる。

また、PCS の構成は、PCS と系統間に必要なスイッチギヤと高圧変圧器 (屋外対応品) を共通のベース上に一体化させたサブステーションタイプとしている。生産工場からそのまま現地へ搬入できるので、設置コストを低減できる。

2.3 高信頼性

(1) FRT 機能

PVI1000 には、メガソーラー向け PCS に必須となりつつある FRT (Fault Ride Through) 機能を標準搭載した。FRT 機能は、系統での三相短絡や二相短絡事故時においても、インバータは規定範囲内 (各国にて要求される瞬低の時間と電圧低下範囲) で三相電流を出力し、系統の電源変動を抑制するように動作する。

(2) ユニット並列

単機容量 1MW のインバータを、250kW×4 台のユニットで構成している。ユニットの一つが故障になっても、残りのユニットで発電を継続できる。昼間に一つのユニットが故障しても、メンテナンスを行う夜間まで 1MW 分の

太陽電池が発電する電力 (上限 750kW) を出力することができるので、250kW ごとに PCS を分割したシステムよりも稼働率を上げることができる。

2.4 グローバル対応

連系する系統電圧は 4.15 ~ 34.5kV に対応し、直流入力電圧は世界標準である最大 DC1,000V まで可能となっている。さらに、装置の安全規格として IEC 62109 に対応し (第三者認証取得予定)、オプションで EMC 規格である IEC 61000-6-2 と CISPR11 に対応する。

3 仕様

表 1 に PVI1000 の仕様を示す。直流電圧範囲は、欧州および米国で標準となっている DC1,000V に対応し、定格出力する最大電力点追従 (MPPT) 範囲は 460 ~ 850V である。交流電圧は 270V であり、連系トランスにより各サイトにおける系統電圧に変圧する。なお、最高効率および部分負荷効率である欧州効率は、直流開放電圧が 540V

表 1 「PVI1000」の仕様

項目	仕様
容量	1 MW
直流電圧範囲	450 ~ 1,000 V
MPPT範囲	460 ~ 850 V
最大入力電流	2,440 A
交流電圧	270V (-12 ~ +10%)
周波数	50/60 Hz
力率	0.99
高調波ひずみ率	5%
最高効率*	98.5%
欧州効率*	98.2%
内部電源容量	2,000 W以下
待機損失	200 W以下

* IEC-61683 効率裕度表示, 内部電源含まず

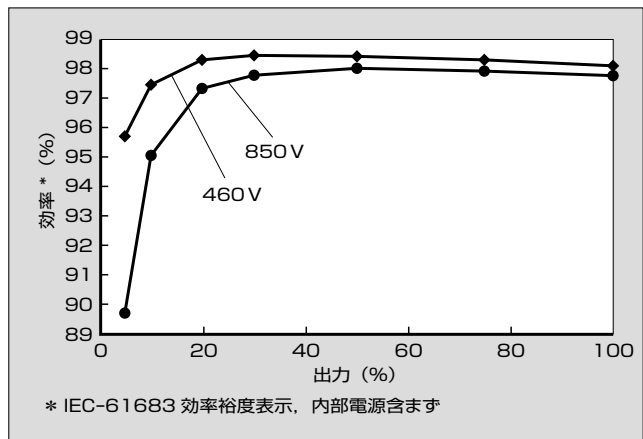


図 3 効率カーブ

<注 1> MPPT : 261 ページ「解説 4」参照



図 2 A-NPC 3 レベル IGBT モジュール

(定格で 460 V 相当) 時の値である。

図 3 に、太陽電池電圧が 850 V 時と 460 V 時の効率カーブを示す。太陽電池電圧の値によって効率は変化するので、上限値と下限値の効率カーブを示した。

4 装置構成と動作

4.1 回路構成

図 4 に示すように、PVI1000 の回路構成は 250 kW × 4 台からなる。直流入力は、図では 4 入力に記載しているが、最大 24 入力まで増やすことができる。2 入力を一つのブレーカに接続し、二つのブレーカ出力を一つの直流リンクに接続する。これにより、四つのインバータは同じ直流電圧で動作し、同じキャリアでスイッチングしているためユニット間の循環電流は存在していない。なお、起動時は各インバータがシステムと同期した電圧を出力した状態でコンタクトをオンしてシステムに連系するため、システムへの突流を発生することなく起動を完了できる。

インバータを実現する各ユニットは、3 レベルインバータ、ヒューズおよび LCL フィルタで構成されている (図 5)。このような 3 レベル回路は 1980 年代に既に提案されていたが、IGBT 素子の耐圧を下げるできないため普及していなかった。しかし、素子の直列が不要なインバータにおいては、出力電流の素子通過数を低減できるので導通損失を低減できるというメリットがある。そこで、

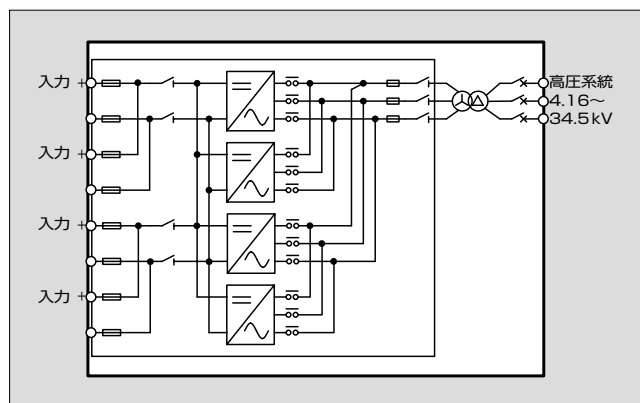


図 4 回路構成

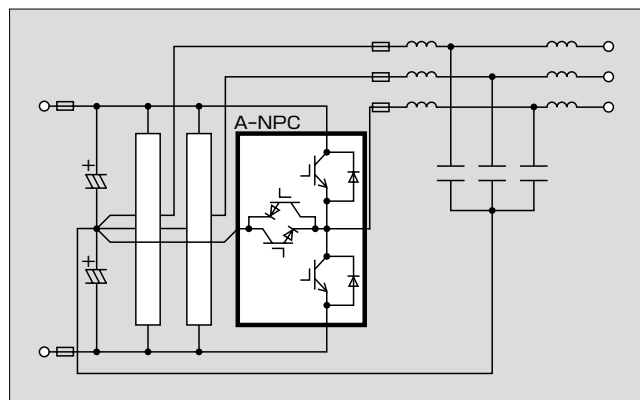


図 5 パワーユニットおよびフィルタ回路

富士電機は、逆耐圧が必要となる直流中間と交流出力を接続するスイッチに RB-IGBT を適用した 3 レベル IGBT モジュールを実用化した。これにより、従来の 2 レベルインバータと同じモジュール数で 3 レベルインバータを実現することができるため、装置コストを増大することなく高効率なインバータを実用化した。

4.2 屋外盤構造

従来、強制空冷式パワーエレクトロニクス機器を屋外に設置する場合、屋内盤を屋外用コンテナに収納し、エアコンで冷却することが多かった。しかし、この方式はエアコンが発生損失の 1/2 ~ 1/3 程度を占めるため、運転効率を重視する PCS では不利である。また、コンテナに収納せずに通常の屋内盤に屋外用フィルタを設ける場合は、フィルタの交換周期が非常に短くなるのでメンテナンスコストが増大するという問題もある。

そこで、図 6 に示すように塵埃 (じんあい) に弱いプリント基板と IGBT モジュール部分からなるパワーユニット (PWU) を気密エリアに配置して外気と分離し、冷却フィンやフィルタ回路を外気によって冷却する二重構造を適用した。この方式の場合、外気を導入する部分のフィルタはごみや小動物の侵入を防ぐ程度の金網にすることができるため、メンテナンスが不要となる。さらに、このようなフィルタを適用することにより、強制空冷のための風量を増加でき、装置全体を小型化することが可能となる。

また、気密エリアに配置された PWU から発生する熱は、ヒートパイプを利用した熱交換器により、外部に熱を排出する構造としている。これにより、気密エリアでは外気に含まれる塵埃を完全に遮蔽することができるので、塵埃による誤動作から PCS を守ることができる。

4.3 FRT 機能とインバータ制御方式

PCS には、システムへの大量導入に向けて FRT 機能が求められる。この FRT 機能は、欧州および米国ではすでに義務化され、日本においても 2013 年度以降に導入する機器は義務化されている。また、FRT 機能として要求されるレベル (残存電圧と継続時間) は国により異なっている。そこで、残存電圧 0% の運転継続を可能にし、継続時

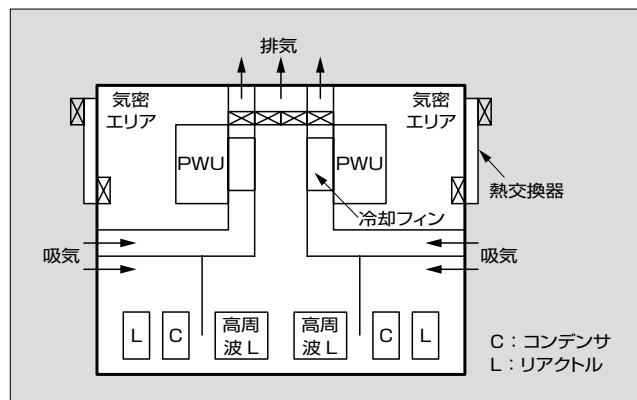


図 6 屋外盤構造

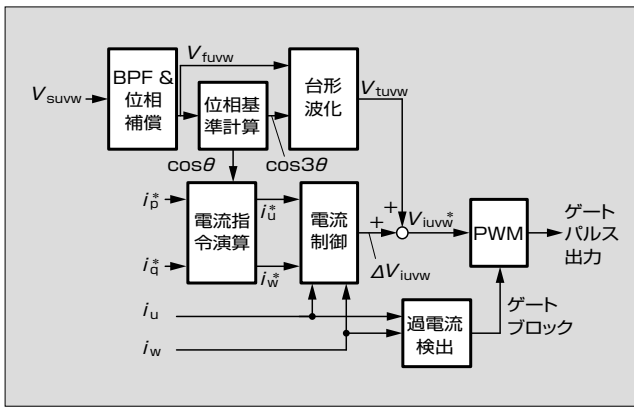


図7 インバータ制御ブロック

間は制御電源のバックアップ方法をオプション対応とすることでコストと要求仕様の両立を実現した。制御電源は、外部供給または系統からの自己供給を選択できるようにし、系統から供給する場合は1s以内の瞬断を内部のコンデンサでバックアップした。長い時間のバックアップが必要な場合は外部にUPSを設けることにした。

また、FRT機能に対応するため、図7に示すように従来PLL（位相同期回路）で生成していた電流位相基準 $\cos\theta$ および電圧ベース分（連系点の系統電圧に相当）を系統電圧から参照する方式を開発した。通常、系統電圧を直接参照すると、系統共振や出力電流ひずみを生じることがある。そこで、バンドパスフィルタ（BPF）を設けて検出した系統電圧から高周波成分を除去することにより、系統異常に対する高速応答と系統共振対策を実現した。このBPF出力に対して出力フィルタの位相遅れを補償した値を V_{iuvw} とし、この値から dq 軸電流指令 i_d^* 、 i_q^* を三相交流指令に変換するために必要な電流位相基準 $\cos\theta$ と、台形波の電圧ベース分 V_{tuvw} を求めた。さらに、電圧急変によって発生する過電流を防止するため、過電流を検出した際はすぐにゲートブロックを行う機構を設けた。

このような制御改良による動作検証を制御検証機（20kW）で行った。残存電圧0%では常時ゲートロック状態となるため、出力電流が0Aとなる。これに対し、残存電圧が20%の時は、図8に示すように瞬低発生から6ms後には断続的なゲートロックが発生しなくなり、約2サイクル後には定格電流を出力できていることを確認した。このように瞬低発生時にPCSは運転を継続できることを確認した。

また、系統補償（DVS：Dynamic Voltage Support）機能もオプションで対応している。DVSは、瞬低発生時および復電時の系統電圧を安定化させる機能であり、ユーザが定めた無効電流を系統電圧レベルに応じて出力する。系統が二線短絡したような不平衡状態になった場合においても、図7に示す V_{iuvw} を系統に応じた不平衡状態にするこ

〈注2〉 単独運転：商用電源から切り離された系統において、分散型電源から供給される電力のみで配電線に電気が通じている状態をいう。

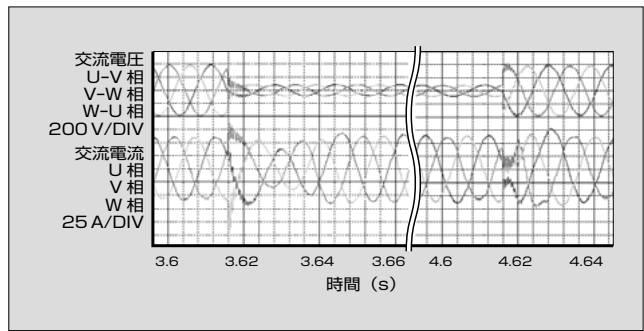


図8 FRT検証波形

とにより、三相平衡の電流を出力することができる。

FRT機能が動作する場合は、系統電圧の急変により単独運転を誤検出することがある。PVI1000では、無効電流変動にて単独運転^(注2)を能動的に検出する方式^(注5)と、周波数偏差にて単独運転を受動的に検出する方式を適用し、系統短絡時の運転継続と系統開放時の速やかな停止を両立できる。

4.4 ユニット並列

図5に示すようにこのパワーユニットの直流と交流部分にヒューズを設けているのは、ユニット内のIGBTや電解コンデンサが故障した場合に、他のユニットからの短絡電流を遮断するためである。ユニット内で温度異常・コンタクト異常・過電流保護継続が発生した場合は、一度運転を停止し、自動的に残りの健全ユニットで起動する。一方、ヒューズ断や素子異常など破壊を伴う異常は、異常部位の拡大を防ぐため重故障と判断し停止する。

このようにヒューズを設けたユニットを並列した構成により、ユニット1台が故障した場合でも太陽電池が750kW以下で発電している限りは、MPPTで定めた最大電力量を系統に出力することができ、装置の信頼性向上につながる。

5 あとがき

屋外設置型高効率PCS「PVI1000」は、単機大容量によるシステムコストの低減、サブステーションタイプによる設置コストの低減、ならびに高効率による発電電力の増大という特徴により、メガソーラーに最適なPCSである。

今後、さらなる大容量、高効率化を推進し、低炭素社会実現のために貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Nakazawa,H. et al. “Hybrid isolation process with deep diffusion and V-groove for reverse blocking IGBTs”, ISPSD, 2011.
- (2) Yatsu,M. et al. “A Study of High Efficiency UPS Using Advanced Three-level Topology”, PCIM Europe Conference, 2010.
- (3) Nabae,A. et al. “A New Neutral-Point- Clamped PWM Inverter”, IEEE Trans. on industrial applications, 1981.

vol.1 A-17, no.5, p.518-523.

- (4) Fujii.K. et al. “Fault Ride Through Capability for Solar Inverters”, EPE Conference, 2011.
- (5) 山田歳也ほか. “太陽光発電システム用パワーコンディショナの開発”. 電気学会全国大会. 2010, p.4-115.



藤井 幹介

自励式フリック補償装置，無効電力補償装置，無停電電源装置，太陽光 PCS の開発に従事。現在，富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター製品技術開発部主査。博士（工学）。電気学会会員，IEEE 会員。



藤倉 政信

UPS，PCS の開発，設計，エンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社パワエレ機器事業本部パワーサプライ事業部パワーサプライ技術部主査。



菊池 貴之

UPS および応用電源装置の開発・設計に従事。現在，富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター製品技術開発部課長補佐。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。