

太陽光発電用インバータ(PVI)の開発

Development of Photovoltaic Inverter

佐藤 徹[※]
Toru Satoh
神部 晃[※]
Akira Kanbe
桑原 祐[※]
Tasuku Kuwahara
有川 清二[※]
Seiji Arikawa

Recently, the utility interactive photovoltaic system without batteries has attracted attention. This interactive type is suited to residential PV systems for domestic use by reason that it simplifies system structure and reduces system cost.

In the PV system, a photovoltaic inverter (PVI) has to be used as a power conditioner for interface of photovoltaic modules and electric power distribution lines. It is necessary for wider adoption of PV system that the PVI is also reduced in size and cost.

We have developed single-phase 3kVA PVI adopting new technologies. IGBT's in the third generation are used for switching devices in the PVI. PWM frequency of the inverter is increased to 40kHz. Down sizing and audible noise eliminating are achieved by high frequency PWM design. Output current of this PVI is controlled by instantaneous feedback using two degrees of freedom robust control. New procedure of photovoltaic P_{max} tracking is applied for this PVI.

This paper describes general outline of PV system and introduces our new developed PVI.

1 まえがき

1973年のオイルショック以来、化石燃料に代わる代替エネルギーの開発・研究が各方面で活発に行なわれてきた。さらに最近では、温暖化現象などの地球規模の環境問題がクローズアップされ、自然エネルギーの有効利用がより一層重要視されるようになった。なかでも太陽電池による発電システムは、無尽蔵かつ無公害の太陽光エネルギーを利用していること、メンテナンス性に優れていること、小容量から大容量のものまで容易に構成可能などの多くの利点を持っている。このため今後、大きく発展が期待できる発電システムである。

太陽電池の発電電力は、日射量や温度などの自然条件により大きく変動する。このため、発電装置と負荷を単純に接続しただけの独立システムでは、負荷が必要とする電力に対し過不足を生じることになるので、蓄電池を用いて負荷に対する電力供給の安定化を図っている。

一般家庭を対象にしてみると、この様な独立システムは必要な負荷電力に対し過大な設備規模となるという問題がある。また日本の土地事情を考えると、一般の家庭に設置できる太陽電池は、数kW程度であり、この程度の発電量で独立型システムを構成することは困難である。

しかし、日本では配電線網が充分整備されているという事情から、商用電源と常時連系して太陽電池の発電量を補うという方式が適用できる。この常時連系型の太陽光発電システムは太陽エネルギーの有効利用の点では最

適でもあり、今後は、この方式が日本での主流になると考えられる。

このような連系発電システムには、太陽電池による直流発電電力を商用系統交流に変換するインバータ(PVI)が必要とされ、このインバータには、汎用インバータとは全く異なった連系制御や太陽電池出力制御といった機能・性能が要求される。太陽光発電システムの普及のためには、小型・安価・高性能のPVIの開発が要望されている。弊社においても、これらの社会的要請を背景として、この要望に応えるべく、新技術を用いた小型PVIの開発に着手し、このほど完成をみた。本論文では、太陽光発電システムの一般概要に併わせて、当社の新開発PVIの技術内容について紹介する。

2 太陽電池の最大出力電力特性

太陽電池は、半導体(主にシリコン)の光起電力効果によって太陽光エネルギーを電気エネルギーへ直接変換するエネルギー変換器であり、通常いわれる電池とは全く特性を異にする。

図1にシリコン太陽電池モジュールの出力電圧-電流特性を示す。この図から分かるように、太陽電池は、入力日射量により垂下点に変化する電流垂下特性を持ち、垂下点以上の電流領域では定電流源とみなすことができ、垂下点以下の電流領域では定電圧源となる。したがって、太陽電池の発電能力を最大限引き出すためには、常に最

※システム開発本部 開発部

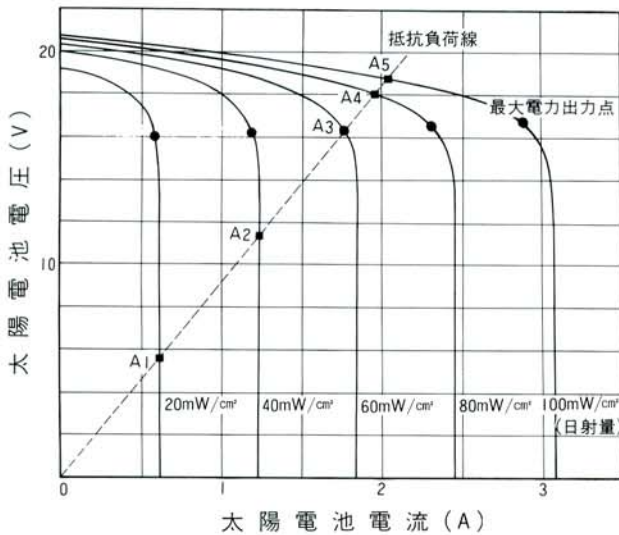


図1 / 太陽電池の特性

Fig.1/Characteristics of a solar cell module

大電力出力点で太陽電池を動作させる工夫が必要である。この最大電力出力点は、電圧-電流特性の肩にあたる部分にある。

太陽電池に抵抗を負荷として接続して、動作点の変化の様子を考えてみる。この場合の太陽電池の動作点は日射量によって、図1のA1点～A5点のように変化する。この例では日射量が60%の時に、太陽電池が最大電力出力点で動作するように負荷抵抗を選んである。しかし、日射量が増加した場合には太陽電池は最大電力出力点からずれた点で動作することになり、その発電能力を下廻った電力しか得られないことになる。

このため、日射量によらず、太陽電池を常に最大電力出力点で動作させるには、次のような操作が必要になる。すなわち、日射量が60%から減少した場合には、動作点は定電流領域に入るの、抵抗値を増加させることによって出力電力を増加させる。一方、日射量が60%から増加した場合には動作点は定電圧領域に入るの、抵抗値を減少させることにより、出力電力を増加させる。したがって、太陽電池の動作点を最大電力出力点に常にもっていくためには、その時点の動作点が定電圧領域か定電流領域のどちらにあるかを判断し、抵抗の増減の方向をきめて抵抗値を変化させる必要がある。このように、その最大電力出力点は、日射量や温度といった不安定な条件により常に変動するので、常に上述のような操作・制御を繰り返す必要がある。

3 太陽光発電のシステム構成

太陽光発電システムの構成方式は図2～図4に示すように、独立型と連系切換型、並列連系型の3方式に大別される。その他に直流系だけのシステムやソーラーエアクンなどの特殊な方式もある。

(1) 独立型システム(図2)

主に商用系統の給電が困難な離島、山間部などに用いられるシステムである。日照の無い場合の電源として、太陽電池とは別に比較的大容量の蓄電池を備えている。したがって、蓄電池は数日分の電力をバックアップできる大容量品を用いなければならず、システムの小型化や低コスト化が困難であると同時に蓄電池のメンテナンスも必要となる。

なお、ここに用いられるインバータはCVCFやUPSと同じ従来型の電圧制御方式である。

(2) 連系切換型システム(図3)

太陽光発電量が不足したり、蓄電池の残存電力量が不足した場合には負荷の使用電源を太陽電池側から商用系統に切り換えて、負荷の停電防止を図った発電システムである。

蓄電池は独立型システムに比べて小容量品で済み、また、商用系統と太陽光発電システムが接続されることがないので、逆潮流や逆充電の問題が原理的に発生せず、連系制御は不要といった利点がある。しかし、切換を完全な無瞬断とするのは困難であり、さらに、太陽光エネルギーを完全には有効利用できないなどの問題がある。

(3) 並列連系型システム(図4)

太陽電池発電出力と商用系統を常時並列連系する方式

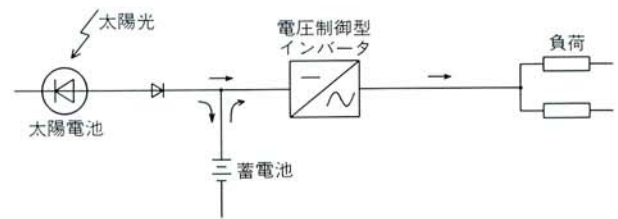


図2 / 独立型システム

Fig.2/Stand-alone system

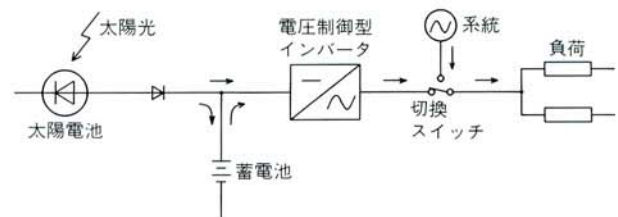


図3 / 連系切換型システム

Fig.3/Interconnection changing system

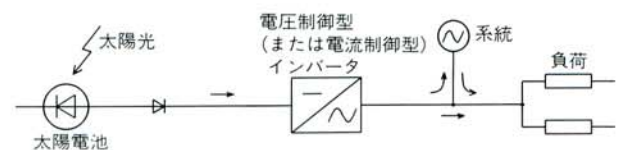


図4 / 並列連系型システム

Fig.4/Utility interactive system

であり、(1)や(2)で使用されていた従来型のインバータは使用できない。従来型インバータには、電力潮流制御機能がないため、系統と並列連系した場合には即時に過電流などの故障が発生する。このため、並列連系するには、特殊な機能を持ったインバータが用いられる。一般には、この目的のための並列連系可能な制御機能をもった太陽光発電インバータをPVインバータと呼んでいる。

この発電システムは、太陽電池の発電電力の全てを商用電源系統と負荷とに送り込むことになる。したがって、太陽電池の発電電力を、効率を除外して、100%利用できる。

また、蓄電池が不要となるため、システムの簡素化、低価格化が可能である。このような利点から、現在はこのシステムが主流になっている。

4 PVインバータの制御方式

PVインバータには制御方式により、内部に交流正弦波の電圧基準を持って正弦波の電圧を出力する電圧制御型と、電圧基準を持たずに系統電圧波形を参照し、それと相似の正弦波電流を出力する電流制御型の2種類がある。

(1) 電圧制御型

通常のインバータに、出力電圧を系統電圧と同期させ、その上で潮流 (P, Q) 制御を行なう機能を持たせた方式で

ある (図5)。インバータの出力電圧の実効値および系統との位相差の2項目を操作して潮流を制御するという原理は、機械式の発電機と同じである。瞬時値制御を行わないので、低周波PWMでよく、スイッチング素子も低速型で済む。また、従来のUPS用インバータ技術が使えるなどの利点を持つ。しかし瞬時電流制御でないために、出力電流歪み補償や、短絡電流抑制ができないなどの欠点がある。また、内部に交流電圧基準を持っているために、系統が停電したときに自立運転し、系統を逆充電する可能性が高いという問題点もある。

(2) 電流制御型

インバータ内部には基準信号源を持たずに、系統の電圧波形を基準波形として、出力電流を基準波形に追従させるべく瞬時値制御する方式である (図6)。この方式では、系統電圧と出力電流は常に同相となり、力率は自動的に1に保たれ、特別なPQ制御が不要となる。

また、電流波形そのものを瞬時制御するために、高周波PWMや高速スイッチング素子、瞬時フィードバック技術が必要であるが、出力電流を低歪化できるとともに、短絡事故時にも過電流とならないなどの利点を持つ。さらに、インバータ自身に正弦波電圧を発生させる機能が無いので、系統停電時には電圧波形・周波数ともに大幅に変化し運転が持続できなくなり、インバータは自動的に停止し、系統の逆充電防止に寄与するなどの特性を持つ。このように、電流制御型には多くの優れた特徴がある。

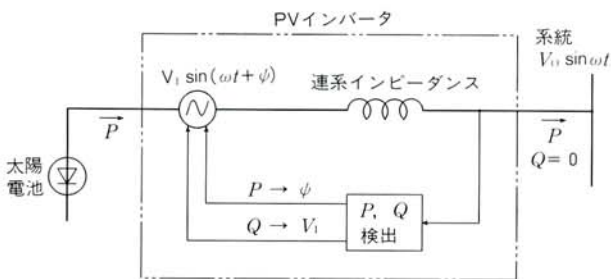


図5/電圧制御型インバータ
Fig.5/Voltage controlled type inverter

5 当社のPVインバータの特長

最も普及が期待されている太陽光発電システムは、数kWの小容量システムである。このことを考慮して、単相3kWの小容量PVインバータを今回開発した。本機は、小型・低コスト化と同時に、制御性能の向上を図った新製品である。図7に本機の外観を、表1に仕様を示す。

主な特長を以下に示す。

① 高効率

第3世代IGBTと高効率連系トランスの採用により、変換効率93%の高効率を達成した。このため、インバータ部での電力損失が減少し、太陽光エネルギーがより有効利用できることになった。

② 力率1低歪出力電流

PVインバータは、系統と直接接続されるので、系統に悪影響を与えない良質な電力を出力しなければならない。本機は出力電流総合歪率を2.8% (系統歪率1%を含む)、また、出力力率を定格出力から1/8低出力時まで0.99の高力率に保持するなど、出力電力の良質化を図っている。

③ 小型・軽量・無騒音

従来のPVインバータは、PWM周波数が10~20kHz

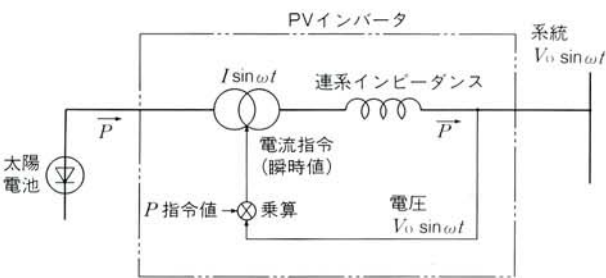


図6/電流制御型インバータ
Fig.6/Current controlled type inverter

表1/PVインバータの仕様

Tab.1/Specifications of the PVI

項目		仕様	備考	
直流入力	定格電圧	200V		
	運転電圧範囲	170~230V		
	許容最大電圧	320V		
交流	定格容量	3kW		
	定格電圧	101V		
	定格周波数	50/60Hz		
流	相数	単相・2線式		
	変換効率	91%以上	定格出力時	
出	電流歪み率	総合	5%以下	定格出力時
		各次	3%以下	
	出力力率	0.95以上	1/8~定格出力時	
力	運転追従範囲	電圧	±10%	
		周波数	±0.5%	
	過負荷耐量	110% 3時間		
総合	設置場所	屋内		
	周囲温度	0~40℃		
	冷却方式	強制空冷		



図7/PVインバータの外観

Fig.7/Appearance of the PVI

程度であったが、本機では40kHzと高周波化を図った。そのため、出力フィルタが小形化され、耳障りなスイッチング音も除去され、騒音は冷却ファン音のみとなっている。

6 回路構成と新技術

6.1 回路構成

図8に本機の電気回路のブロック図を示す。本機は、前述の電流制御型インバータである。

スイッチング素子に高速・低損失の第3世代IGBTを用いた高周波40kHz PWMにより、低損失かつ高速制御性能を実現した。IGBT用の冷却ファンはインバータ出力電力の大小により回転速度を切換えて、低出力時の高効率化と低騒音化を図っている。

コモンモードフィルタを、入力側と出力側両方に設け、コモンモードノイズが太陽電池と系統へ流出するのを防止している。出力側に設けたPWM周波数成分除去用のノーマルモードフィルタには、今回開発した板厚50μmの高周波用珪素鋼板鉄心のリアクトルと低損失コンデンサとを採用して効率の向上を図っている。

夜間等の太陽電池が発電していない時に、インバータを商用系統から切り離しておくための連系リレーには、汎用の小型パワーリレーを用いている。

インバータの出力電圧と商用系統の電圧レベルを合わせ、かつそれらを絶縁する目的の連系トランスは、その損失が全体の効率に与える影響が大きいため、励磁損が小さくかつ負荷損も小さい高効率トランスを新規設計した。

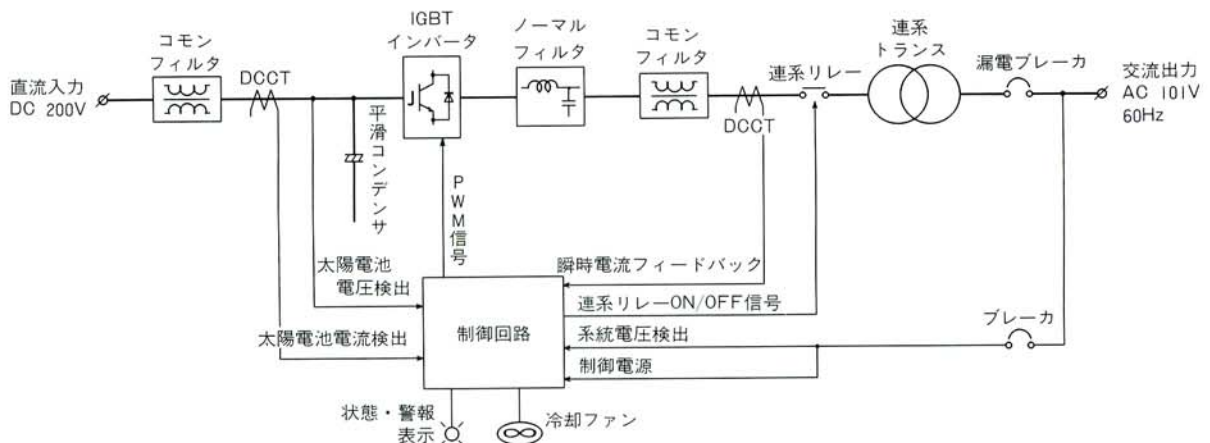


図8/PVインバータのブロック図

Fig.8/Block diagram of the PVI

インバータ用の制御電源とIGBTのゲート電源には、商用系統側からの電源を用いている。

PVインバータの制御回路は、1枚のプリント基板にまとめて小形化を図り、また調整箇所を1箇所のみと極限まで減少させ、調整工数の低減化を図っている。制御回路構成については、ワンチップマイコンでデジタル制御系を構成し、高速制御が必要な瞬時電流制御系はアナログ回路で構成している。

6.2 太陽電池最大出力制御 (P_{max} 制御)

本機では、太陽電池の動作点を最大電力出力点に自動追従させる P_{max} 制御法を採用している。この制御法をマイコンによる山登り法により実現している。

以下、その制御法について概略説明する。図9に太陽電池の電圧-出力電力特性を示す。図10には本機の制御ブロックを示す。

図9において太陽電池が (V_1, P_1) の点で動作していた場合に、インバータの入力電圧すなわち太陽電池の出力電圧を微小電圧 ΔV だけ上げる操作を行なうと、動作点は (V_0, P_0) に移る。 P_0 は、動作点に移る前の電力 P_1 よりも小さく、電力は減少する。この場合は、電圧を上げて電力が減ったのでその時の動作点は最大電力出力点より右側にいることがわかる。したがって、この場合には電圧を下げる操作を行えば、出力電力を増加させることができる。一方、動作点が最大電力出力点より左側にいた場合は、電圧を上げる方向へ操作すればよい。

このように山登り法は、太陽電池電圧を ΔV だけ常に微

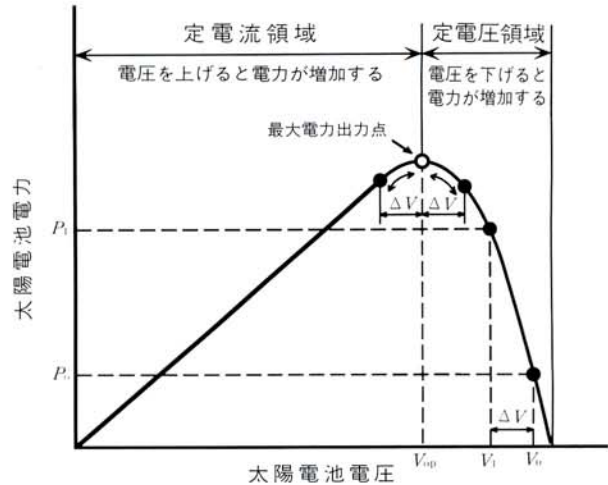


図9 / 太陽電池の特性と P_{max} 制御方法

Fig.9/Characteristic of a solar cell and P_{max} control procedure

小変化させてその前後の電力を測定することによって、現在の動作点が定電流領域にあるか定電圧領域にあるかを判定し、太陽電池電圧の変化させる方向を決める方式である。

したがって、定常状態での太陽電池電圧は、最大電力出力点 V_{OP} を中心として $\pm \Delta V$ だけ振動していることになる。そのため、 ΔV は通常数V以下とし、電力変動が大きくならないようにしている。本機では、 ΔV の値を2Vとし、その制御周期は1秒としている。また、太陽電池電圧をステップ状に変化させると、インバータの出力電流も急激に変化して、系統に擾乱を与える恐れがある。そのため、本機では、その変化電圧 ΔV を0.5秒で直線的に変化させるソフト P_{max} 制御アルゴリズムを用いている。

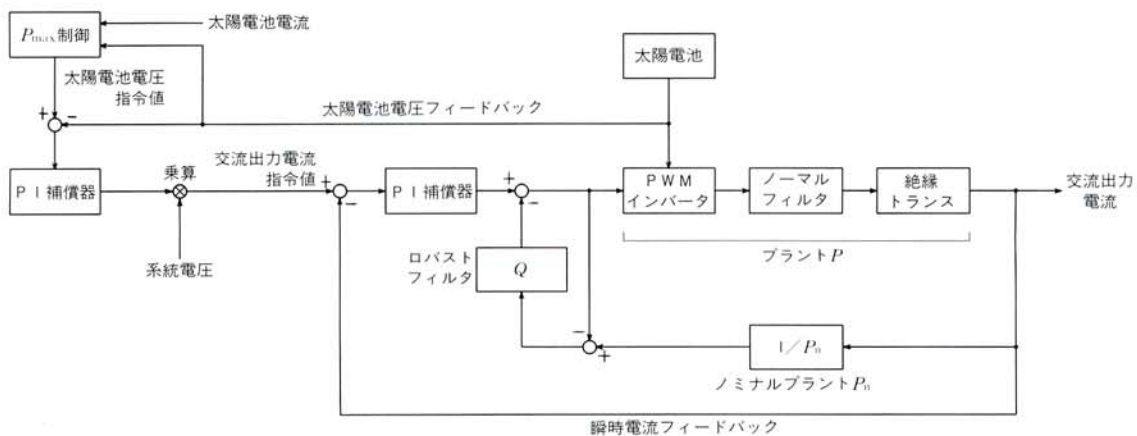


図10 / 制御回路ブロック図

Fig.10/Block diagram of the control circuit

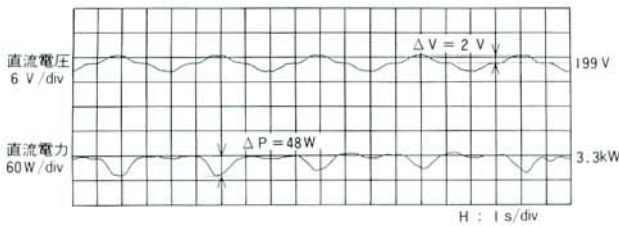


図11 / P_{max} 制御時の直流電圧・電力波形
Fig.11/Waveforms of dc voltage and power at P_{max} operation

実際の動作波形を図11に示す。太陽電池電圧が0.5秒で直線的に変化し、その後の0.5秒間は一定値を保っていることが分かる。この一定期間中の電力を測定し、マイコン内で統計処理と判断処理を行ない、次の変化電圧 ΔV の極性を決定している。

6.3 瞬時電流制御系

瞬時電流制御系は、インバータの電源状態、負荷条件の変動に拘らず、常に電流指令値通りの出力電流を得るために設けられる制御系である。PVインバータでは、この電流指令値は商用系統電圧と同相の正弦波になる。

PVインバータの瞬時電流制御系は次の2点を同時に満足しなければならない。

① 指令値追従性能

交流出力電流の瞬時値をフィードバック制御するので、高速制御が要求され、応答限界周波数を高くする必要がある。

② 外乱抑圧性能

PVインバータは、出力が系統に直接接続されるので、出力端には常に商用の交流電圧が印加される。このことは、インバータから見ると、定格出力電圧に等しい外乱が常に加わっていることと等価である。また、太陽電池の電圧が変動したり、系統との接続箇所により連系インピーダンスが異なったりするので、制御対象の特性変動が大きい。したがって外乱抑圧度を大きくし、その変動を補償する必要がある。

本機では高速制御の実現のために、IGBTをほぼ限界周波数である20kHzでスイッチングさせ、PWM周波数を40kHzとした。従来のインバータはPWM周波数が10kHz程度であったため、出力フィルタの遮断周波数も低くなり、その結果、応答周波数限界が数百Hzと高くできず高調波歪みの抑制が不十分であった。しかし本機は、高周波PWM制御と高い遮断周波数(7kHz)の出力フィルタによって、応答限界周波数を2kHzと高くすることが可能になった。

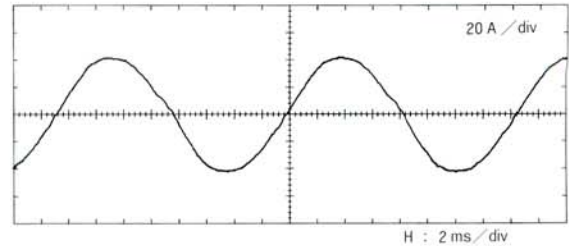


図12 / PVインバータの出力電流波形
Fig.12/Output current waveform of the PVI

また、外乱抑圧度の向上とプラント(制御対象)変動の補償のため、PI補償の他に2自由度ロバスト制御を採用した。図10のブロック図の $1/P_n$ と Q で構成されるマイナーループが、ロバスト制御部である。この制御により外乱抑圧度はPI補償のみの場合に比べ数十dB向上し、プラントの変動もほぼ完全に補償され、出力電流の歪抑制、系統電圧急変時の過渡応答特性などの制御性能を大幅に向上させることができた。¹⁾

図12に定格時の出力電流波形を示す。

6.4 自動起動・停止

PVインバータを夜間も運転した場合、インバータの無負荷損を消費してしまう。また太陽電池が発電を始めた場合は、すぐにPVインバータの運転を開始しなければ、太陽エネルギーの有効利用ができない。このような理由でPVインバータは、太陽電池の発電量によって、自動で起動・停止する必要がある。

本機は、起動を太陽電池開放電圧の監視により、停止を商用系統と連系時の太陽電池出力電力の監視によりそれぞれ行なっている。

停止レベルは、太陽電池出力電力がインバータの無負荷損と等しくなる62Wとした。また、当社独自の積分アルゴリズムを用いたデータ演算法により停止電力レベルの検出精度を上げている。このためインバータと系統間の電力潮流がちょうど零となるまで太陽光エネルギーを利用できる。

起動については、太陽電池が、停止レベルよりも若干大きな電力を出力できる開放電圧を起動レベルとして、起動と停止の電力レベルにヒステリシスを設けた。これらにより、ハンチングの無い確実な自動起動・停止が可能となった。

6.5 保護機能

PVインバータには、通常のインバータに設けられてい

る自己保護機能は勿論のこと、さらに商用系統の異常もすみやかに検出し、それに対処してシステム全体の安全を図る保護機能が要求される。

本機に設けられている、特有な保護検出リレー機能とそれらの整定レベルを次にあげる。

- ・系統過電圧 111V 0.5～1秒
- ・系統不足電圧 91V 0.5～1秒
- ・系統周波数異常 60Hz±0.3Hz 0.5秒
- ・瞬時系統過電圧 125V 瞬時
- ・瞬時系統不足電圧 75V 瞬時

本機では、これらの検出保護制御は主にマイコンによる演算処理で実現し、特に重要な要素についてはハードウェアでバックアップしている。時限要素(積分要素)を含む検出項目については当社独自に開発した積分アルゴリズムを用いて、検出精度、確実性の向上を図っている。

並列連系システムでは、商用電源の上位系統が切り離された時に、発電装置が発電を持続してしまい、下位系統が停電にならずに逆に充電されてしまう恐れがある。このことが、安全性の面から問題にされている。

この問題について、本機は、電流制御型のPVインバータの特性から、発電量と負荷量が一致していなければ、過電圧もしくは不足電圧状態を引き起こし、確実に逆充電検出保護を行なう。また、発電量と負荷量が一致して平衡していた場合でも、PVインバータ内部には基準周波数を発生する機能がないので、出力周波数変動を引き起こし検出保護が可能となる。

しかし、負荷量と発電量が平衡し、かつ負荷率が1で、さらに負荷に誘導機などのように基準周波数発生機能を持った誘導起電力負荷があるような特殊な条件下では、PVインバータは自立運転を継続し、停電検出が不能となる可能性がある。この様な特殊な条件が持続することは、日射量変動、負荷変動を考慮すれば、非常に稀な場合といえる。しかし、可能性としては否定ができないので、この防止策は現在、各方面で研究中の重要な課題になっている。

PVインバータの試験には、太陽電池が必要であるが、当社では太陽電池の特性を模擬した直流電源(太陽電池シミュレータ)を特別に製作して試験を実施している。本太陽電池シミュレータにより太陽電池特性の変化や、日射量変化が自由にシミュレートできるので、特性試験、 P_{max} 制御試験等が正確に実施できるようになった。

7 試験結果

(1) 特性試験

本機の特性試験結果を図13に示す。

変換効率は、最大93%、定格の1/8出力時にも83%以上と、低出力から定格出力まで高効率を維持している。こ

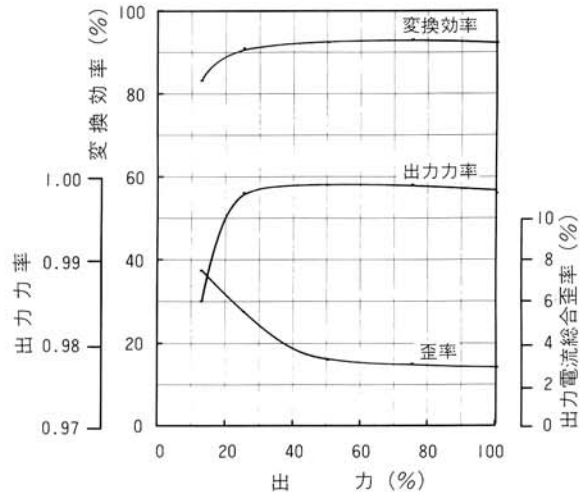


図13/総合特性

Fig.13/Characteristics of the PVI

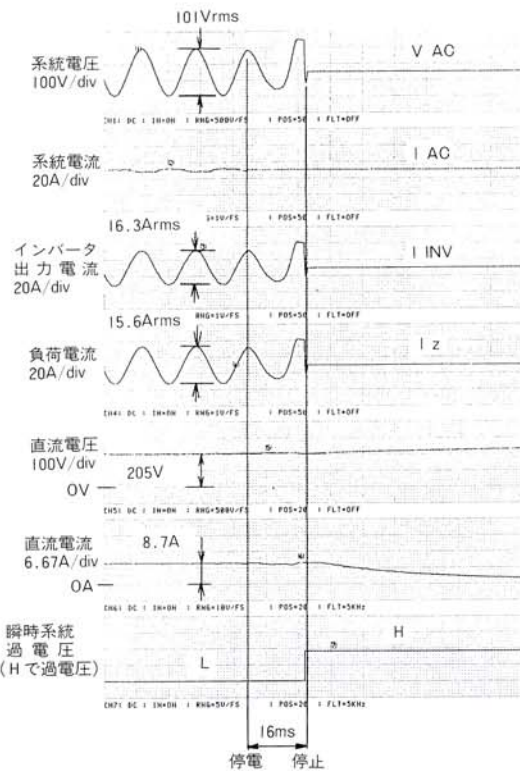


図14/系統停電時の波形

Fig.14/Waveforms at power line interruption test

のため、朝夕の発電量の少ない時にも効率の良い発電ができることになる。

出力の力率特性や電流歪率特性も、仕様を充分満足する結果が得られている。また、 P_{max} 制御、瞬時電流制御等についても、所期の目標性能を満足する特性が得られている。

(2) 系統停電保護動作試験

前述の逆充電を防止する保護動作機能について確認試験を行なった。試験は太陽電池シミュレータと商用系統および抵抗負荷を組み合わせた実動作試験であり、商用系統側を停止させて、PVインバータが停止するかどうかを確認した。

太陽電池の発電電力と負荷電力との比率や絶対値を変えて色々なケースで試験したが、いずれの場合も、PVインバータは0.1秒以内に停止した。

図14に、逆充電が発生し易い平衡条件での試験のオシログラムを示す。この場合、PVインバータは正弦波状の電圧を1サイクル出力するがその後、高い電圧が出力され、瞬時系統過電圧リレー機能により停電後16msという短時間で、PVインバータは停止している。

このように、誘導起電力負荷が無い場合には、ほぼ確実に系統停電保護は可能である。誘導起電力負荷の場合にも周波数リレーで検出は可能と考えられるが、他に電圧制御型のPVインバータと連系する場合には検出がかなり困難となることが予想され、新しい検出方式が期待されている。

(3) 長期フィールドテスト

本機は、中部電力㈱・電力技術研究所殿に納入され、順調に稼働している。同研究所では、各種の太陽電池、PVインバータの長期に亘る運転試験を実施して、太陽光発電システムについての重要な研究を行なっている。

また社内でも、本機を用いた1.5kW太陽光発電システムを設置し、長期性能検証とデータ収集を行なっている。太陽電池は屋外に地上設置され、本社ビルのショールーム内に設置したPVインバータにより、ショールーム照明用の電灯に太陽光発電電力を供給している。図15にその1.5kW太陽電池の設置状況を示す。



図15 / 1.5kW太陽電池の外観

Fig.15/Appearance of 1.5kW solar array

8 あとがき

常時並列連系型の太陽光発電システムについては、通産省、各電力会社による、普及PRがここ数年活発に行なわれている。また、一般家庭への普及に向けてのガイドラインの整備なども検討されている。このような動向の中で、インバータに対しては、低コスト・小形化が強く要求されている。

当社では、数々の新技術を用いてこの要求に応えたPVインバータの開発を目指し、今後は更に技術開発を推進し、大容量製品および更に小形化・低コスト化を図った製品の開発を推進する所存である。

最後に、本機の開発にあたっては、中部電力㈱・電力技術研究所殿より貴重な助言ならびに適切な御指導をいただき、ここに厚く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1)佐藤,他:「ロバスト電流制御を用いたPVインバータ」
H5 電気学会全国大会 No.534 (1993)