

単相系統連系電圧形インバータ太陽光発電システムの 直流 2 倍周波数変動を利用した MPPT 制御法*

根 葉 保 彦 **
橋 本 知 尚 ***
安 波 浩 一 ***

MPPT Strategy with Observation of DC Double-frequency Variation in Single-phase Voltage Source Inverter-PV System

Yasuhiko NEBA, Tomohisa HASHIMOTO and Kouichi YASUNAMI

This paper presents a strategy of the maximum power point tracking in the single-phase utility interactive photovoltaic generation system with a voltage source inverter. The instantaneous voltage and current of the photovoltaic arrays, which vary with double frequency of the supply, are observed to search the maximum power point of the photovoltaic arrays. The presented method uses the power variation of the arrays that be obtained at the steady-state operation of the inverter and can easily get the maximum power point. The inverter is operated by employing the current control with the hysteresis comparator for the purpose of the achievement of the sinusoidal utility current. The system configuration is shown and the control block diagram is described. The output voltages and currents with different power of the arrays are measured to explain the system operation. The transient characteristics at the start-up are given and the steady state waveforms are shown. The experimental results prove that the average power of the photovoltaic arrays can be maintained at the maximum and the system has the stable operation with the sinusoidal current of the utility.

Key Words: Maximum Power Point Tracking, Voltage Source Inverter, Photovoltaic Array, Single-Phase Utility, Hysteresis Comparator

1. まえがき

太陽光発電システムの太陽電池は、出力が光量や温度などの気象条件により変化するだけでなく、太陽電池に接続される負荷状態にも依存する。太陽電池が発生する直流電力をインバータで交流へ変換して系統へ逆潮流す

る系統連系システムでは、時々刻々変化する発電条件に対応して常に太陽電池から最大の電力を取り出すため、最大電力点追従 (MPPT: Maximum Power Point Tracking) 制御を行う。

太陽電池のMPPT制御を実現する最も一般的な方法として山登り法⁽¹⁾がある。これは太陽電池の異なる2点の定常発電動作時の平均電力を測定して比較し、より大きい発電動作点へ移行させることにより最大点の探索および追従を行うものである。この方法によるインバータ系統連系システムでは、電力比較の必要性から、太陽電

* 平成17年11月30日受付

** 電気工学科

*** 電気工学専攻博士課程前期

池の最大出力状態においても、インバータを異なる2点で定常動作して電力変動を生じさせるので、システムは常時、振動して動作する。このため、太陽電池の最大点でシステムが不安定となる場合がある。

筆者らは、単相系統連系太陽光発電システムにおいて、交流瞬時電力の2倍周波数変動によって直流部に生じる同一周波数の変動が、太陽電池の出力特性に依存することに着目し、瞬時電力を監視することによって太陽電池の最大電力点を探索する方法⁽²⁾を提案し、電流形インバータシステムへの適用を検討した。この方法では、インバータの1点定常動作で太陽電池の出力電力変動を監視できるため、山登り法のようなインバータの2点動作を必要とせず、非常に簡単な制御で最大電力点に移行して発電動作を維持できることを実験で確認した⁽³⁾。また、この制御法は、電流形インバータの直流インダクタンスを低減するために降圧チョッパを接続したシステムに対しても適用できることを報告した⁽⁴⁾。

本論文は、直流2倍周波数変動を利用する太陽電池MPPT制御について、電圧形インバータシステムへの適用⁽⁵⁾を検討したものである。インバータ部のスイッチングには、ヒステリシスコンパレータによる電流追従制御を行い、系統電流の正弦波化を図っている⁽⁶⁾。本文では、システム構成と制御ブロックを示し、コンピュータによるデジタル演算での最大点探索の実測結果からシステム動作を説明する。また、システム起動時の実測波形および太陽電池の出力軌跡から、本方法が電圧形インバータシステムに対しても適用可能であり、系統電流の正弦波形を維持して最大電力点動作が実現できることを検証する。

2. システム構成と制御法

図1は電圧形インバータによる太陽光発電システムの構成と制御ブロックを示す。太陽電池(PV)は電圧平滑コンデンサCと並列に直流部に接続する。逆並列ダイオードを有する4個のIGBTで構成したブリッジ回路は連系リアクトルLを介して単相系統と連系する。電圧形インバータの動作原理上、PVは系統電圧最大値より高い最大電力点の最適電圧を有するものを接続する。

電流追従を行うインバータスイッチングパルスはハードウェアで作成している。系統電流の追従制御における基準信号 i^* は、電源電圧 e と同期した振幅1の正弦波信号 $\sin\omega t$ とMPPT制御演算からの振幅指令 I_m^* を乗算して得る。検出した系統電流 i はヒステリシスコンパレータによって基準信号と比較し、各IGBTのスイッチング信号を作成する。なお、インバータは S_1 と S_4 あるいは S_2 と S_3 を同時にオンする2レベルスイッチングとしている。一方、PVのMPPT制御はコンピュータ

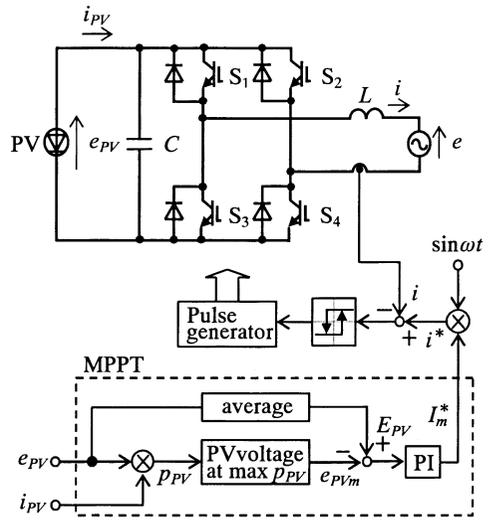


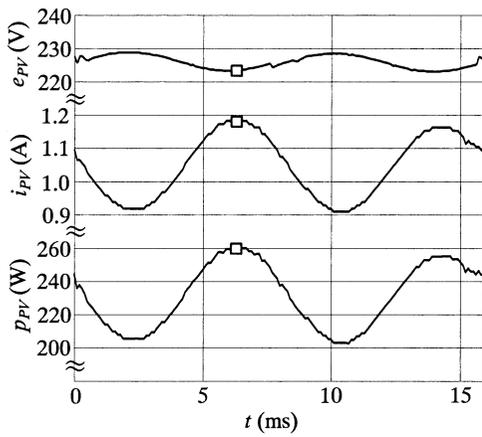
図1 電圧形インバータ PV システムと制御ブロック
Fig.1 Voltage source inverter-PV system and control block

によるソフトウェアで実行している。PV出力、すなわち電圧と電流は、その出力特性に依存して電源の2倍周波数で変動するので、プログラムで設定したサンプリング周波数で検出するPV電圧 e_{PV} とPV電流 i_{PV} からPVの出力電力瞬時値 p_{PV} を計算する。電源半周期において p_{PV} が最大となる点の瞬時PV電圧 e_{PVm} を求める。次章で示すように、PV最大点以外の動作点では、瞬時値 e_{PVm} と平均PV電圧 E_{PV} に差を生じるので、これが零となるように比例積分演算を行い、系統電流指令の振幅を操作することにより、システムはPVの平均出力電力が最大となる動作点へ移行して定常動作となる。この時、電流指令 I_m^* の増加はPV出力電圧の低下となるが、PV出力最大点を境にして、すなわちPVの定電流領域と定電圧領域では、PV電圧と出力電力の増減関係が反転し、その結果、電圧 e_{PVm} と E_{PV} の大小関係が反転するので、システム動作はPV出力最大点で維持される。

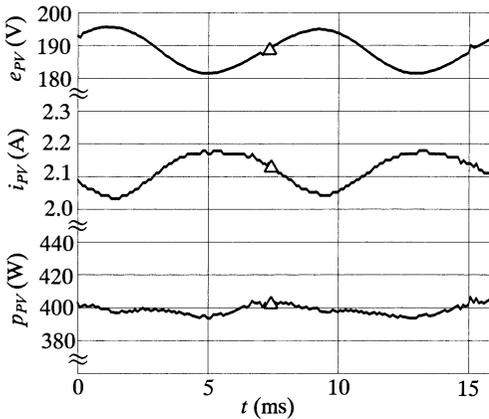
3. 動作特性

実験条件は、 $E=100V$ ($f=60Hz$)、 $L=25mH$ 、 $C=500\mu F$ で、サンプリング周波数を9.6kHzに設定した。また、PVは出力仕様が開放電圧21.2V、短絡電流3.25A、最適電圧16.9V、最適電流3.02Aのモジュールを12枚直列接続した。

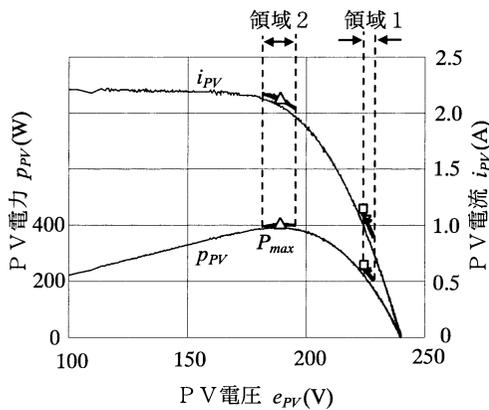
図2はソフトウェアによるデータ処理を確認するため、またPVの瞬時電圧、電流と電力の関係および出力軌跡を確認するために、オープンループで電流指令を与え、PVの異なる出力でシステム動作した時の実測波形を示



(a) 動作領域1 ($P_{PV} < P_{max}$, E_{PV} 最適電圧)



(b) 動作領域2 (最大出力点)



(c) PV出力軌跡

図2 PVの異なる動作点における出力特性

Fig.2 Output characteristics with different power of PV.

す、瞬時波形は、電圧と電流が検出データ、電力が電圧データと電流データの積を演算したデータをプロットしたものである。また、電圧と電流検出はLEMモジュールを使用し、A/Dコンバータでコンピュータへ取り込んでいる。データ1ピットの分解能は、電圧が0.1953V、電流が0.0098Aである。波形内の印は、検出データから得た電力の最大点を示す。図2(a)はPV最大出力電力の約1/2出力となる電流指令で動作した場合である。この動作領域では、PV瞬時電力 p_{PV} の最大はPV瞬時電圧の最小値で生じ、 e_{PVm} は223.0V、 E_{PV} は227.3Vであった。図2(c)から、この動作領域での電圧 e_{PVm} の値は、PV電力変動範囲の最大点であることがわかる。電流指令を増加して平均PV電圧 E_{PV} を e_{PVm} へ近づけることにより、PVはさらに大きな出力電力の動作領域へ移行する。図2(b)はPVのほぼ最大出力点で動作した場合である。この領域では、同図および図2(c)でわかるように、PV電圧とPV電流は電力最大点をほぼ中心として変動する。この時、 p_{PV} 最大時の電圧 $e_{PVm} = 188.3V$ は平均PV電圧 E_{PV} と等しくなる。これらの結果から、PV電圧、電流は出力特性曲線に従って2倍周波数で変動することが確認でき、電源半周期における瞬時電力の監視によって最大電力点を探索できることがわかる。

図3は系統電流指令 I_m^* を零とし、PVを開放電圧の零出力状態からシステムを起動した場合の各部実測波形である。なお、PVが開放電圧付近の低出力範囲では、PV瞬時電圧の変動幅が小さいので、検出データ分解能の制約から制御が困難である。このため、本システムでは、PVがある程度の電力を出力する電圧(最適電圧より高い200Vに設定)まで I_m^* を自動的に増加して、その

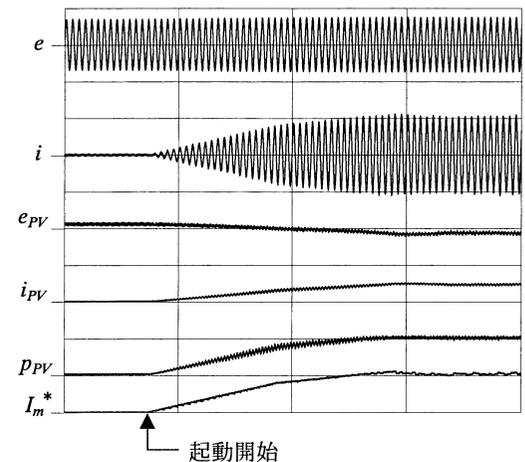


図3 起動時の動作波形

(200V/div, 5A/div, 400W/div, 300ms/div)

Fig.3 Experimental waveform at start-up.

後MPP T制御となるようにした。電流指令 I_m^* が増加するにしたがってPV電圧 e_{PV} は低下、PV電流 i_{PV} は増加する。この時、PV電力 p_{PV} は順次増加して定常状態に達していることがわかる。

図4は図3に示した起動期間におけるPV出力軌跡を示す。PV電圧の変化に伴ってPV電流は出力特性曲線に従って変化し、システムはPVの最大電力点で定常動作となることを確認した。

図5はPV最大電力動作点における定常波形を示す。PV電圧とPV電流はシステムの2倍周波数で変動しているが、系統電流 i は追従制御によって正弦波形となっている。また、力率がほぼ1でPV発電電力を系統へ逆潮流していることがわかる。

本制御法に限らず山登り法でも、インバータによるMPP T制御は太陽電池の電圧制御に帰着する。電圧形システムの直流平滑コンデンサは、本来、整流器-インバータ駆動誘導機システムなどにおいて、変動のない一定直流電圧を得るためにかなり大きな容量を設定する。しかしながら、PVシステムでは、大容量コンデンサの使用は電圧制御応答の低下を招くため、その容量を低減する必要があると考えられる。単相システムにおける直流部2倍周波数変動はコンデンサ容量の減少とともに大きくなる。したがって、最大出力動作時のPV瞬時電力変動幅も大きくなるため、平均PV出力電力の低下が懸念され、2倍周波数変動を利用する本制御法において問題となる可能性がある。

図6は異なる直流平滑コンデンサ C に対して、PV最大出力点の最適電圧で動作した場合の平均PV出力電力を示す。測定条件は、 $E_{PV}=183.3V$ 、 $I_{PV}=2.03A$ である。PV瞬時電圧の変動幅は $C=2000\mu F$ 時が約3.0V、 $C=500\mu F$ 時が約12.9Vであった。直流負荷時のPV出力372Wに対して、 $C=500\mu F$ 時で約368W、約1.1%減少であり、極端に小容量のコンデンサを設定しない限り、電圧変動によるPV出力の大きな低下は生じないと思われる。系統電流は追従制御によって常に正弦波形となるので、平滑コンデンサ容量の選定は、システムの発電容量や電圧・電流検出の分解能を考慮して行う。

直流2倍周波数変動を利用する本制御法では、光量が減少した場合でもPV瞬時電圧変動が小さくなり、MPP T制御に不都合を生じる場合がある。これに対応するには、PV最大出力時の最適電圧が光量に対してほとんど変化しない⁽⁷⁾ことから、小光量範囲では最適電圧一定制御に切り替えてシステム動作を行うなどの策が必要である。

4. むすび

単相系統連系太陽光発電システムの最大出力点追従制

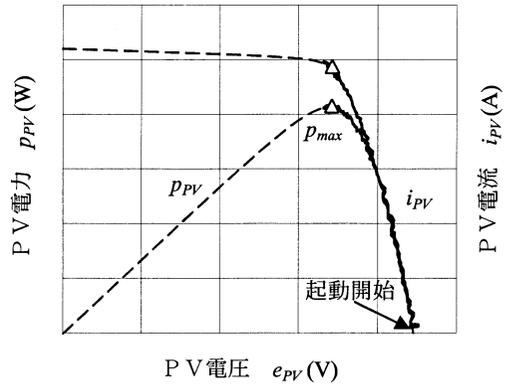


図4 起動時のPV出力軌跡 (50V/div, 0.5A/div, 100W/div)

Fig.4 PV output tracking at start-up.

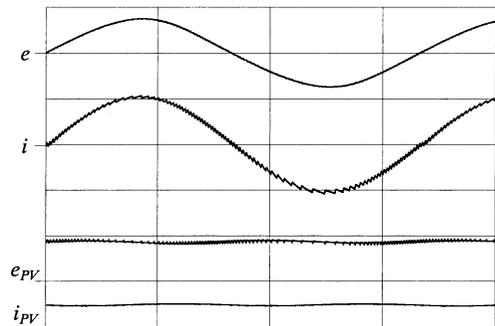


図5 最大出力点での定常波形 (200V/div, 5A/div, 5ms/div)

Fig.5 Waveforms at steady-state operation with maximum PV power.

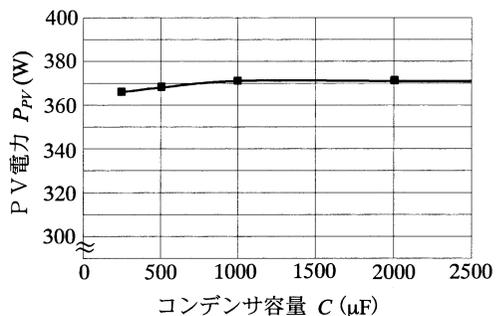


図6 平滑コンデンサ容量に対するPV出力電力

Fig.6 PV output power for changing dc capacitor.

御において、直流部の2倍周波数変動を利用した制御法を電圧形インバータシステムに適用した場合の動作特性を検討した。太陽電池の異なる出力点における実測波形を示し、太陽電池出力電圧と電流が、その出力特性に依存して変動することを確認し、本方法の制御原理を明確にした。インバータの1点定常動作における太陽電池出力電力の瞬時変動を調べることによって最大点を探索する本制御法は、電圧形システムに対しても適用でき、容易に最大電力点への移行が可能なことを明らかにした。また、インバータによる電流追従制御の適用により、ほぼ力率1の正弦波電流で系統へ電力逆潮流できることを示した。今後、平滑コンデンサ容量の選定および低出力領域での制御法について検討を行う予定である。

参 考 文 献

- (1) 石原・他：「太陽光発電システムの現状と将来」, 電学論C, 115巻, 1号, 1 (平7-1)
- (2) 根葉：「PWM電流形インバータによる単相系統連系太陽光発電システム最大電力制御の一方」, 電学論D, 124巻, 5号, 517 (平16-5)
- (3) 松分・根葉：「単相PWM電流形インバータ太陽光発電システムの最大電力点探索法」, 平成16年電気学会全大, No.4-094 (2004-3)
- (4) 松分・橋本・根葉：「直流変動によるMPPT制御のPWM降圧チョッパ電流形インバータ太陽光発電システムへの適用」, 平成16年電気関係学会九州支部連大, No.03-2A-10 (2004-9)
- (5) 橋本・松分・根葉：「単相系統連系太陽光発電PWM電圧形インバータにおける直流変動を利用したMPPT制御の適用」, 平成17年電気学会全大, No.4-114 (2005-3)
- (6) 橋本・安波・根葉：「電流追従制御電圧形インバータによる単相系統連系太陽光発電システムの直流変動を利用したMPPT制御」, 平成17年電気関係学会九州支部連大, No.01-2A-13 (2005-9)
- (7) 野中・山崎・袈裟丸：「単相PWM電流形インバータによる太陽光発電連系システム」, 電学論B, 112巻, 5号, 439 (平4-5)

