

商用系統に連系される太陽光発電システムに関する研究

A Study of Photovoltaic System with Commercial System Interface

北野 達也 菅野 智義* 合田 通*

Tatsuya Kitano, Tomoyoshi Kanno, Toru Gouda

1. まえがき

エネルギーの大半は、地球誕生以来蓄えてきた化石燃料を消費することによって得ている。エネルギー使用量は年々増加し続け、広く世界に目を向けてもその傾向は変わらない。特に今後、開発途上国の人口増加と生活の向上、それに伴うエネルギー使用量の増加が膨大になり、我々の生活に欠かせない高度な情報化社会も、電気エネルギーを抜きにして考えることはできない。電気エネルギーは我が国ではその約 65%を石油、石炭などの化石燃料から得ている。化石燃料に限りがあることを考えればそれに代わるエネルギー源を手に入れることが急務である。そこで将来それに代わるものとして太陽光や風力、波力などの自然の力を利用する無尽蔵なエネルギーや、水素やメタノールを利用した燃料電池などが注目されている。我が国ではオイルショックを契機に、サンシャイン計画など国家プロジェクトが実施され、様々な新エネルギーの研究・開発が進められた。特に最近では、地球環境問題との観点から太陽光発電、風力発電などの自然エネルギーが、そのクリーンさから改めて見直されている。このように太陽光発電は新エネルギーとして大きな期待が寄せられているが、太陽光発電コストはまだまだ従来の発電に比べて高いのが現状であり、幅広く使われるためにはさらに価格引き下げが要求されている。太陽光発電の価格引き下げは、太陽電池の変換効率向上はもちろんのことであるが、発電した電力を我々が必要とする電力の形にし、安定して負荷に供給するシステムを構築することが必要である。また、今日ではデジタル機器の急速な発展により電力変換機器に多く利用されている。デジタル制御により、多機能で便利な機器が多数販売さ

れているが、多機能であるということはコストパフォーマンスの低下を招く場合がある。一方、太陽光発電システムの評価は、太陽電池の出力の下で行う必要があり、太陽電池の出力は天候・気温・日射量等の自然条件に依存しているために雨天時や夜間は十分な出力を得ることができず、太陽電池模擬電源を使いシステムの評価・試験を行うことが多い。本稿では、実際の太陽電池アレイの出力を直線近似した太陽電池模擬電源をインバータモジュールより試作し、アナログ回路で制御される安価でシンプルな系統連系太陽光発電システムの検証を行ったので報告する。

2. 太陽光発電システムの基本構成

太陽光発電用インバータは、汎用的に使用されている電気機器（交流 100V）をそのまま使えるようにするために、日射量、季節、地域差によって得られる電力が不安定の太陽電池の直流電力を商用周波数の交流電力に変換する必要があるため図 1 のようなシステムで構成される。

直流コンディショナは蓄電池などの直流機器、および電線路を制御・保護し、太陽電池アレイ出力電圧を使用可能な直流電圧に変換するものである。機能面からみれば直流コンディショナである

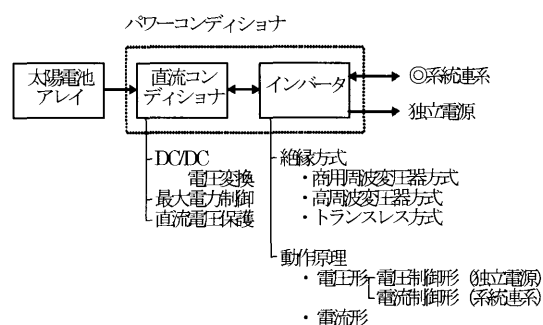


図1 一般的な太陽光発電システム構成

が、ハード面からみれば、その主体は DC/DC コンバータである。DC/DC コンバータが省略され、単に逆流防止ダイオードのみの場合も多いが、DC/DC コンバータがあれば、アレイ出力を常にその時点で発電可能な最大電力点(最適動作点)に置く最大電力点追尾 (Maximum Power Point Tracking:MPPT) 制御が行うことができ、日射量、外気温度などの影響により電力が低下することを避けることができる。最近の住宅用太陽光発電システムではほぼ具備している機能である。太陽光発電用インバータには、山小屋や孤島など配電線がない場所で使用される独立電源方式と、配電線に電力を注入しながら使用する系統連系方式がある。我が国では、配電線が全国に張りめぐらされているので、系統連系方式が 100%に近く、しかも狭い国土の面から個人住宅の屋根に太陽電池を設置し、100V や 200V の交流電源に連系する 2~5kW クラスの小容量太陽光発電用インバータが中心に普及すると考えられている。太陽電池とインバータ交流出力間を絶縁する方法には、商用周波数、高周波変圧方式がある。絶縁の目的は、直流分流出防止、電池側地絡事故の軽減、対地電圧の固定と安全性や雷サージの移行軽減などである。商用周波変圧器により系統と太陽電池側を絶縁する方式は、系統への直流分流出の心配はなく、絶縁方式の中で最も一般的な方法である。しかし、変圧器の質量が大きく、PV インバータの低コスト化の面で課題が残る。また、変圧器の鉄損分により特に低出力時効率が低下する傾向がある。高周波変圧器により絶縁する方式は、15~50kHz 程度の高周波の変圧器のため、小形軽量化と低コスト化が期待できる。トランスレス PV インバータは高効率、小形軽量、低コスト化が望める。トランスレス方式では、系統への直流分流出防止や太陽電池側の地絡事故対策などの課題が残されているので、制御の可能性やコストの将来性、系統連系技術要件ガイドライン対応などを含めて最適方式を選ぶ必要がある。

3. 模擬太陽電池

3.1 太陽電池の模擬方法

図2に模擬対象である、太陽電池モジュール(昭和シェル石油 GT1633-TF)の特性を示す。通常、

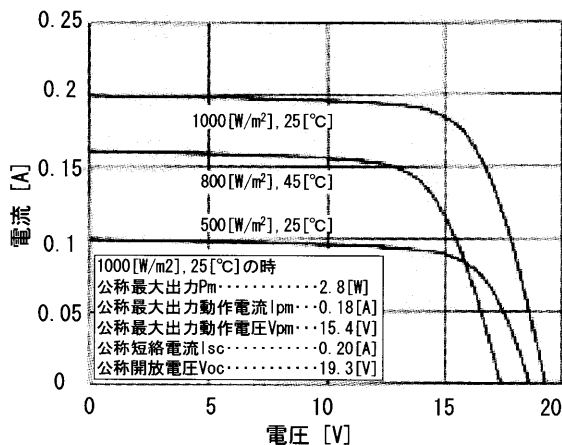


図2 GT1633-TFの出力特性

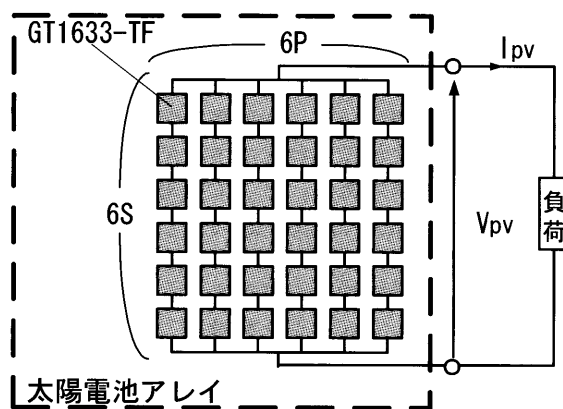


図3 模擬する太陽電池アレイの構成

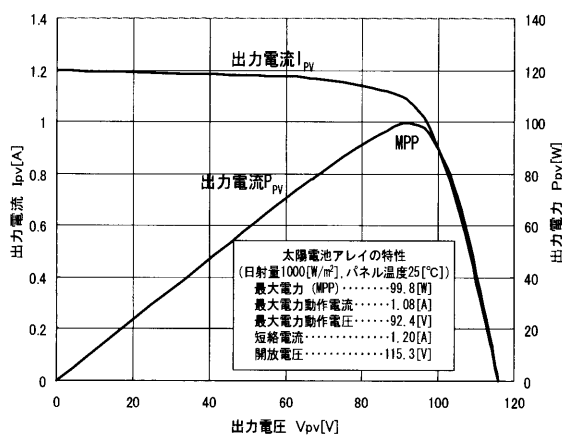


図4 模擬する太陽電池アレイの出力特性曲線

太陽電池モジュールは数十枚で直並列に接続され、図1の太陽電池アレイとして使用される。一般家庭に連系されるシステムを考えた場合、太陽電池アレイの開放電圧は100～120[V]に設定されるため、図3のようにGT1633-TFを6直列に接続し、電力容量を増加するため並列に接続される。図4のようにその出力が日射量1000[W/m²]、パネル温度25℃であった場合に最大電力が約100W程度になるよう6並列とした。図5のように、インバータモジュールの1相を昇圧チョップパとして利用し、昇圧チョップパの出力電圧 V_{pv} を電圧指令値 V_{pv}^* に制御するためにDSPを用いてフィードバック制御を行う。昇圧チョップパの出力電圧 V_{pv} はフィードバック制御により電圧指令値 V_{pv}^* に追従しているため、図6のように太陽電池アレイから出力される電流 I_{pv} に応じて電圧指令値 V_{pv}^* を

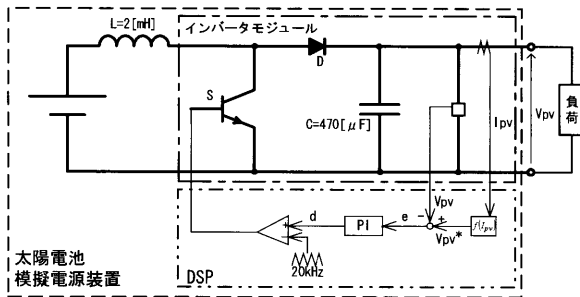


図5 太陽電池模擬電源の回路構成

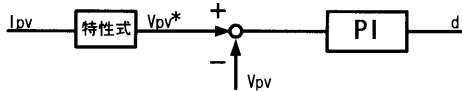
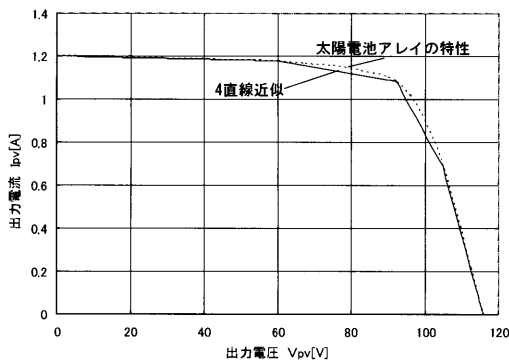
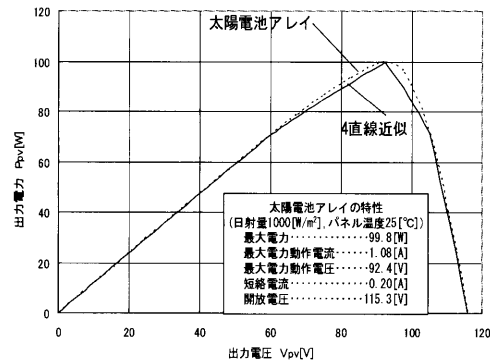


図6 太陽電池模擬電源の回路構成

図7 出力特性曲線 (V_{pv} - I_{pv}) とその近似直線

実アレイの出力と同じに設定すれば太陽電池を模擬することが可能である。ここで、日射量1000[W/m²]、パネル温度25℃であった場合の出力電圧電流特性を模擬するが、簡単のため図7のように4本の直線に置き換えてインバータモジュールにより近似し模擬太陽電池の出力を得る。その出力される電力特性を図8に示す。

図8 出力特性曲線 (V_{pv} - P_{pv}) とその近似直線

3.2 模擬太陽電池の実験結果

図9は横軸を出力電圧 V_{pv} 、縦軸を出力電流 I_{pv} とした時の模擬電源の電圧－電流特性である。模擬電源の電圧－電流特性は図7で近似した直線とほぼ同じに制御されている。また、図10は横軸を V_{pv} 、縦軸を電力 $P = V_{pv} \times I_{pv}$ [W]とした時の電圧－電力特性である。この特性も図8の特性とほぼ同じである。昇圧チョップパを使用したことにより

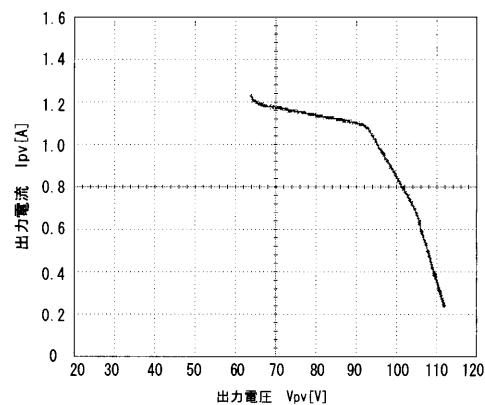


図9 太陽電池模擬電源の電圧－電流特性

出力電圧は入力電圧よりも小さくならないため、出力電圧が 65[V]以下の場合にはデータが得られないが、太陽光発電システムを評価・試験する場合、多くは最大電力点 (MPP) 付近で行われるため、本試作装置は模擬電源として利用することが可能である。また、110[V]から開放電圧までのデータがないのは負荷を 500[Ω]から徐々に小さくして測定を行ったためである。

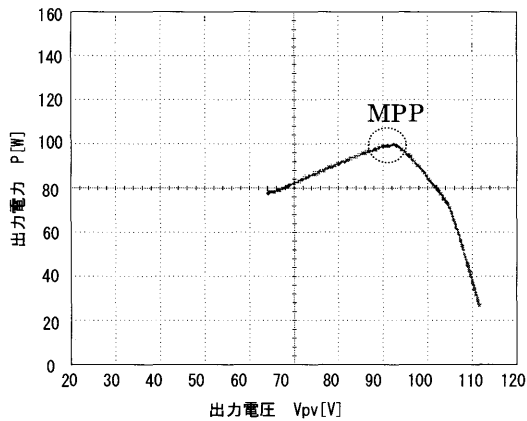


図10 太陽電池模擬電源の電圧－電力特性

4. 系統連系太陽光発電システム

4.1 アナログ制御回路による試作システム

試作回路の主回路には三相インバータ用インテリジェントパワーモジュール(PS11034)を使用し、図 12 のように三相の u 相を昇圧チョッパ (図 1 の直流コンディショナに相当)、 vw 相を単相インバータ (図 1 のインバータに相当) として使用した。昇圧チョッパは、太陽電池から出力される不安定な電圧 V_{pv} を、電圧センサ(LV25-P)で検出した直流電圧 V_{dc} を一定の電圧指令値 V_{dc}^* になるようフィードバックにより制御する。図 11 の瞬時電圧制御系をオペアンプで試作したアナログ回路を図 12 に示す。図 12 の回路動作は、指令電圧 V_{dc}^* と出力電圧 V_{dc} を減算回路で減算し、減算結果 ε を反転増幅器(P)と反転積分器(I)に入力しそれぞれの出力を反転加算回路で加算することにより比例積分制御を実現している。積分器の動作により、キャリア波の上限を超えると昇圧チョッパが開放し、下限を超えると短絡してしまうためツ

ェナードイオードでリミットして、PWM 発生回路に入力する。単相インバータは、商用系統に同期した電流 i_s に制御することで、商用系統へ太陽電池の発電電力を回生することができる。そのため、商用系統から同期信号 $\sin \omega t$ と系統へ回生する電流指令 i_s^* の振幅値 i_{peak}^* を乗算器で掛け算することで商用系統と同期した指令電流 i_s^* を算出している。電流センサ(LA50-P)で検出した電源電流 i_s をフィードバックし、P 制御から PWM 波形発生回路に入力することで電源電流 i_s は、常に商用系統に同期した力率 1 の正弦波に制御される。瞬時電流制御系は、図 12 の電圧制御系の I 制御とリミッタ回路を取り除いたアナログ回路で構成した。

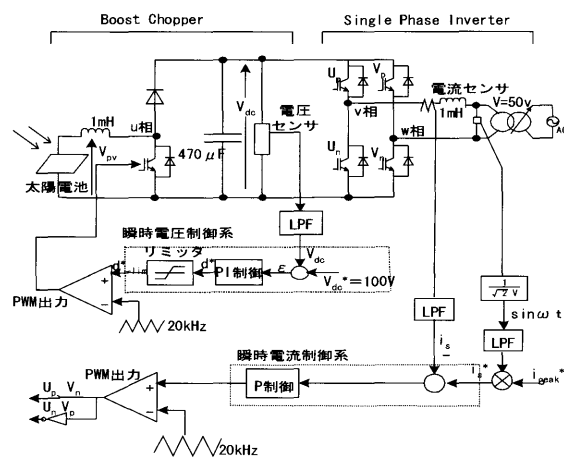


図11 試作回路

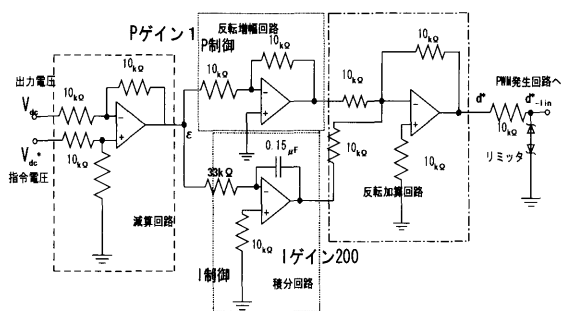


図12 瞬時電圧制御系

4.2 試作システムの実験結果

今回の試作回路では安全のため変圧器を通して商用系統の電圧を 50V と仮定して行った。昇圧チョップにより、出力電圧 V_{dc} が一定の電圧に制御されていることを確認するため、図 13 の CH1 に示すように入力直流電圧 V_{pv} を 75V から 20V まで変動させることで太陽が雲に隠れてまた出てくる様子を再現した。 V_{pv} が変動しても図の CH2 の出力電圧 V_{dc} はほぼ 100V に保たれていることがわかる。図 14 は指令電流 i_s^* に対するインバータ出力電流の追従特性で、CH1 に指令電流 i_s^* 、CH2 に出力電流 i_s を示す。出力電流 i_s は商用周波数 50Hz で制御され、出力電流 i_s は指令電流 i_s^* に追従していることがわかる。図中出力電流が太く見えるのは、スイッチングの on-off により発生するスイッチングリップルである。図 15 は、指令電流 i_s^* の振幅を徐々に大きくしたときの出力電流 i_s の追従特性を示す。指令電流 i_s^* が小さいときは、ループゲインが小さいためインバータの出力電流 i_s の追従特性が悪いが、 i_s^* を大きくしていくと追従特性が増しているのが確認できる。 i_s^* の増減により、太陽電池からの出力電力を商用系統に回生することが可能である。

5. あとがき

本研究では太陽電池の非線形出力特性を 4 本の直線によって近似し、昇圧チョップにより実現した。その出力特性は近似特性式の次数を大きくすることにより改善可能である。また、昇圧チョップにより太陽光などの不安定な入力電圧を一定電圧に制御し、インバータ回路において、商用系統に同期した出力電流を流すことで、商用系統に連系し電力を回生した。よって本試作回路において太陽光エネルギーを商用系統に回生して利用することが可能である。今後の課題として、模擬太陽電池太陽の日射量が変化した場合の特性を模擬すること、最適な回路パラメータや制御パラメータを検討し、模擬太陽電池と接続して最大電力追従制御の検討を行う予定である。本研究は、平成 15 年度重点配分経費の援助のもとに行われたものである。関係各位に謝意を表わす。

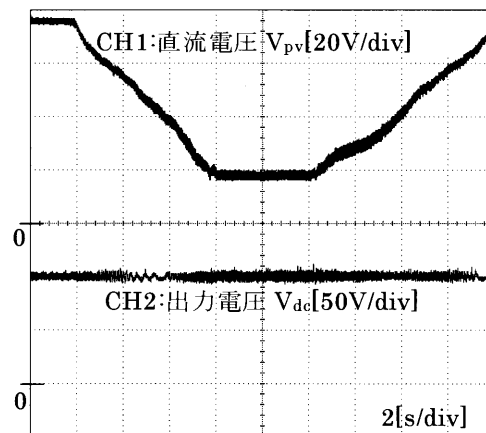


図 13 昇圧チョップの直流電源変動特性

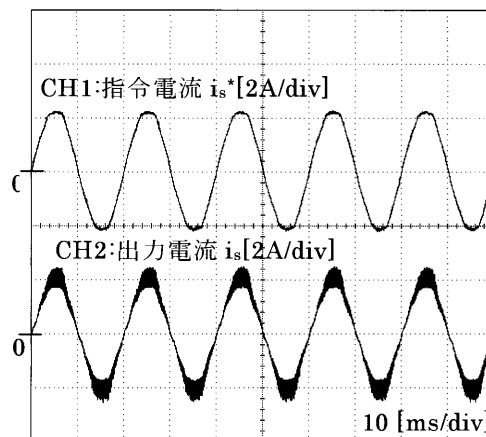


図 14 インバータ出力電流の追従特性

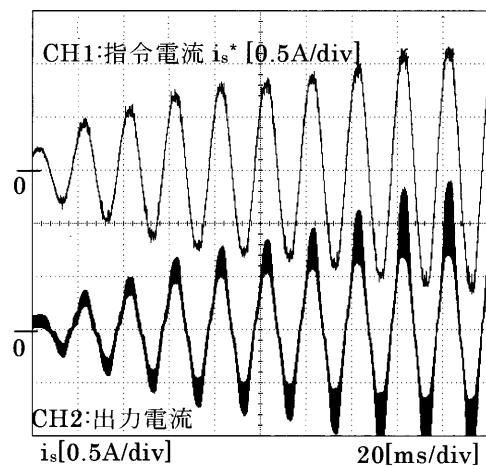


図 15 指令電流を変えた時の出力電流追従特性

参考文献

コンバータと閉ループ特性」, 電気学会論文誌 D, 116 巻, 5 号 p.546-555 (1996)

「受理年月日 2004 年9月30日」

- (1) 石原:「太陽光発電システムの現状と将来」, 電気学会論文誌 C, 115 巻, 1 号 p.1, (1998)
- (2) 黒川:「太陽光発電の現状と展望」, 計測と制御, 1 巻, 1 号, p.8-13 (2000)
- (3) 冬木:「太陽光発電システムの将来展望」, 平成 12 年電気学会全国大会 4 分冊 p.1806-1807, (2000)
- (4) 黒川:「システムとしての太陽光発電-1- 太陽光発電システムの構成」, 電気学会論文誌 C, 115 巻, 1 号 p.14-20, (1998)
- (5) 岡土:「太陽光発電システムの要素技術-2- 太陽光発電用インバータ技術」, 電気学会論文誌 C, 115 巻, 1 号 p.34-40, (1998)
- (6) 高橋:「太陽光発電システムの実用化研究」, 平成 12 年電気学会全国大会 4 分冊 p.1795-1897, (2000)
- (7) 千住・上里・大熊:「ファジー制御による太陽電池の最大電力点の探索」, 電気学会論文誌 D, 114 巻, 9 号 p.843-848, (1994)
- (8) 高原・松田:「太陽光発電システムの最大電力適応取得制御法」, 電気学会論文誌 D, 118 巻, 6 号 p.810-811, (1998)
- (9) 薫・杉本・西尾:「電力の電圧微分に基づく太陽光発電システムの最大電力制御法」, 電気学会論文誌 D, 118 巻, 12 号 p.1435-1442, (1998)
- (10) 野口・富樫・中本:「太陽電池の短絡電流パルスに着目した適応最大出力点追跡法」, 電気学会論文誌 D, 121 巻, 1 号 p.78-83, (1998)
- (11) 根葉・東:「PWM 電流形インバータによる系統連系太陽光システムの最大出力制御法」, 電気学会論文誌 D, 116 巻, 5 号 p.598-604, (1996)
- (12) 外山・竹下・松井:「単相 PWM コンバータの直流電圧脈動の一低減法」, 平成 5 年電学全大, No.66, p.273 (1993)
- (13) 清水・藤田・木村・広瀬:「直流リプル補償形単相 PWM コンバータ」, 電気学会論文誌 D, 114 巻, 1 号 p.1298-1304 (1993)
- (14) 道平・中岡・松浦:「新しい高周波トランスリンクソフトスイッチング PWM DC-DC