

太陽光発電システム動作状態における 10kWパワーコンディショナの入出力特性

Input and Output Characterization of 10kW PV Power Conditioner on Dynamic Condition

平田 陽一^{*1}
Youichi HIRATA

平島 将寿^{*2}
Yukikazu HIRASHIMA

谷 辰夫^{*3}
Tatsuo TANI

Abstract

Photovoltaic(PV) array cost occupies about 50% in whole solar system cost for industrial purpose. MPPT and DC to AC inverter, installed inside power conditioner performs important role to maintain power generation capacity high and invert power. On the other hand, power conditioner cost occupies less than 20% in system cost. This paper analyzes and grasp how the power conditioner tracks the optimum point of $I-V$ curve on dynamic condition and invert DC to AC power of PV power system. Hysteresis was observed to track maximum power point of $I-V$ curve in the irradiance of 1.0kW/m^2 . To control the hysteresis less, the method to make the MPPT interval less or to increase the input side capacitance step with the increase of irradiance, were presumed. Accordingly, these method contribute to improve the system efficiency.

キーワード : $I-V$ 特性, 最大出力点, パワーコンディショナ, MPPT, インバータ, 太陽光発電システム
Keyword : $I-V$ characteristic, Maximum Power Point, Power conditioner, Maximum Power Point Tracking, Inverter, PV power system

1. 緒言

太陽光発電システムは太陽電池アレイ、パワーコンディショナなどの要素より構成される。そのシステム価格全体に占める太陽電池の比率は大きく、産業用では5割程¹⁾を占め、その発電能力を高く維持し直交変換するパワーコンディショナ内部のMPPT及びインバータ機能は重要である。他方、パワーコンディショナがシステム価格に占める比率は2割程度と低い。そのため、パワーコンディショナがより高機能化しても、システム価格の増加は比率として小さく抑えられ、システムとしての発電量を増加させることが期待される。

本研究では太陽光発電システムが動作している状態において、パワーコンディショナが太陽電池アレイの最大出力点をどのように追尾し、直交変換するかを分析、把握する。また、直流入力と交流出力の関係も分析する。それによりシステムの動作特性を詳細に評価することができる。

2. 実験システム

2.1 システム構成

本発電システムは太陽電池アレイの出力をパワーコンディショナにおいて最大出力点追尾を行い、その出力を直流-交流変換し、三相交流出力で系統と連系する標準的な構成となっている。

図1にシステムの構成図を示す。本研究では動作状態におけるアレイ出力電流-電圧特性、パワーコンディショナの出力電流、電圧を取得している。日射強度、裏面温度、アレイの電流、電圧測定にデータアキュイジションユニット、MW100、横河電機(株)

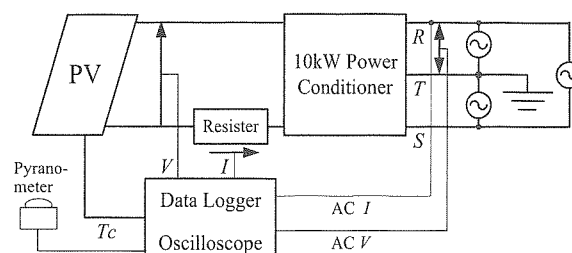


Fig.1 Photovoltaic power system on dynamic condition.

を使用した。アレイの電流・電圧の測定に際しては、発電システムに計測器が影響を与えないよう、超高速アイソレータ、FSUS、(株)第一エレクトロニクスを介している。また、アレイの出力及び交流出力波形の詳細なデータを観測するために、スコープコーダ、DL750、横河電機(株)を使用した。

また、アレイの出力及び交流出力波形の詳細なデータを観測するために、スコープコーダ、DL750、横河電機(株)を使用した。

2.2 構成機器の仕様

日射強度は、精密全天日射計、MS-601、EKO(株)を使用している。太陽電池アレイの温度の測定には熱電対を、アレイ裏面の中央の数箇所に設置した。

太陽電池アレイは、表1に示すモジュール、PV-MG120AF、M(株)、90枚を16直5並列接続したもので、図2に示すように本学屋上に方位南東35°、傾斜角30°に設置されている。

表2にモジュールの定格値より推算したアレイの定格を示す。この発電用アレイは表3に示すNのパワーコンディショナに接続されている。太陽電池アレイの最大出力動作電圧は、パワーコンディショナの最大出力運転電圧範囲であるDC220~350Vに収まっている。パワーコンディショナのMPPT制御は山登り法を採用しており、回路構造は高周波絶縁トランス方式、出力は

^{*1} 諏訪東京理科大学 システム工学部 准教授
(〒391-0292 長野県茅野市豊平5000-1)
E-mail: youichi@rs.suwa.tus.ac.jp

^{*2} 同学部 学生 (現 (株)マスダ)

^{*3} 同学部 教授
(原稿受付: 2009年3月9日)

Table 1 Rating of PV module; PV-MG120AF.

Type	Polycrystalline silicon		
Maximum output power	P_{max}	120	W
Open circuit current	V_{oc}	23.9	V
Short circuit current	I_{sc}	6.89	A
Maximum operating voltage	V_{pm}	19.0	V
Maximum operating current	I_{pm}	6.30	A

(Irradiance 1 kW/m², Cell temperature 25°C, AM 1.5)

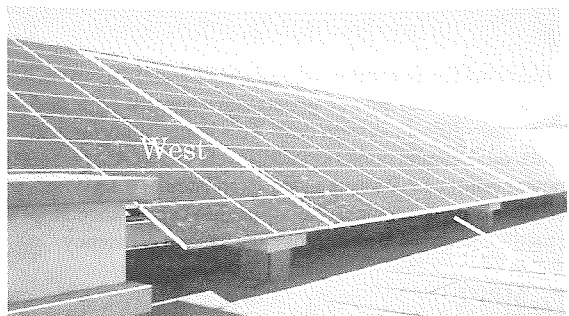


Fig.2 10kW photovoltaic array on the roof in campus.

Table 2. Rating of PV array.

Type	Polycrystalline silicon		
Open circuit voltage	382.4	V	
Short circuit current	34.5	A	
Maximum power voltage	304.0	V	
Maximum power current	31.5	A	
Maximum power	9.6	kW	

(Irradiance 1 kW/m², Cell temperature 25°C, AM 1.5)

Table 3. Specification of power conditioner. (SP-310)

Rating	
Rated power	10kW
Operating range of input voltage	DC220~350V
Output voltage	3phase, 3 line, AC202V±20V
Output Frequency	50/60Hz
Control type	
Inverter type	Voltage stiff self commutation type
Insuration type	High Frequency link type
Power control	Maximum power point tracker
	Perturb and observe
Output control type	Current control type

3 相 3 線式である。高周波絶縁トランス方式は低周波トランス方式に比べトランスが小型化できる反面、高周波スイッチングでノイズが生じ、出力波形に高周波の影響を及ぼす恐れがある。

2.3 測定方法

アクイジションユニットでは、60Hz の電源周波数ノイズが抑えられるとされる A/D 変換積分時間 16.67ms で、それに対応する 0.5sec の間隔でパワーコンディショナ入力側アレイ出力の測定を行った。また、スコープコーダでは、入力側と出力側の測定を行った。出力側は三相(R, S, T)出力のため、R 出力のみの線電流をクランプオンプローブ、横河電機(株)で、RS 間の Δ 電圧とともに測定した。

3. 動作領域^{3) 4)}

3.1 動作領域における出力の変化

$I-V$ 特性において、最大出力点を追尾する動作領域について、図3を用いて述べる。最大出力点の左側を A 領域、右側を B 領域とする。A 領域で動作点を変化させたとき、電力は電圧と同相で増減し、電流と逆相になる。B 領域では、電力は電流と同相で増減し、電圧と逆相になる。この様子を図4に示す。もし、A,B 両領域にまたがれば、電圧の 2 倍周期で電力は変動する。この関係を表4に示す。つまり、電力の増減に対し電流、電圧の増減を分析することで、動作領域を推定することができると考えた。また、動作特性を分析するにあたっては、できる限り $I-V$ 特性の変化が少ない状態が望まれるため、環境条件が安定しているデータを選んで分析を行うこととした。

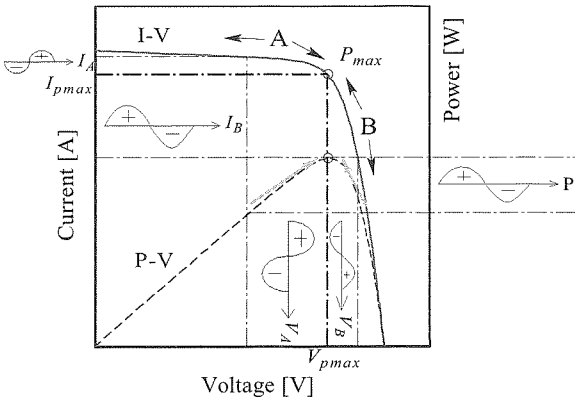


Fig.3 Maximum power point on dynamic conditions in $I-V$ curve and $P-V$ curve.

Table 4 Phase of power, voltage and current.

Area	Power	voltage	current
A	+/-	+/-	-/+
B	+/-	-/+	+/-
A+B	+/-/+	+/-/-	-/-/+

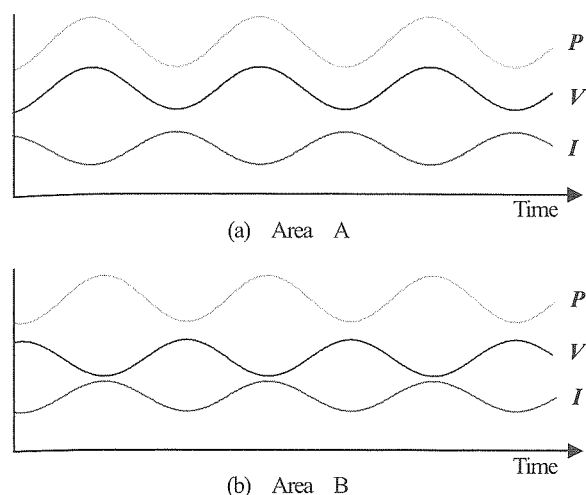


Fig.4 Phase of power, voltage and current.

3.2 動作点追尾の特性

動作点追尾における $I-V$ 特性の測定を、データロガーを用いて快晴日の平成20年8月13日に行った。平均外気温度は 23.5°C ($4:00 \sim 20:00$) であった。この様子を図5に示す。日射強度が $1.01, 0.60, 0.20 \text{ kW/m}^2$ 付近のデータより、20secの間で $1.01, 0.60 \text{ kW/m}^2$ は一定、 0.20 kW/m^2 は 19.5 sec で一定のものを選んだ。その期間の電力、電圧、電流のデータを図6に示した。ここで動作点追尾における電力変動の1周期を ΔT 、変動幅を ΔP 、電圧・電流の変動幅を ΔV 、 ΔI とする。図6(a)に示すデータを分析した結果、 ΔT の平均値は 2 sec で ΔP は 25.3 W である。

この分析を他の日射強度について行った結果、 ΔT は同様に 2 sec であった。また、各日射強度におけるセル温度と ΔT 、 ΔV 、 ΔP 、変動率を表5に示す。変動率は日射強度における太陽電池アレイ出力に対する変動を求めたものである。

これより、 1.01 kW/m^2 で 0.35% の変動を生じており、日射強度が減少するにつれてその割合が減少していることが分かる。これだけの出力が追尾動作により低減する。

この図より動作点追尾の分析を行った。図6(a)については図3、表4に示す $I-V$ 特性における動作領域の関係が当てはまらない結果となった。つまり、 I が増加するにつれ P が増加するが、その後 I は減少し始め、 V が増加する。そして V が減少するにつれて P も減少する。しかし、この時刻変化の特性では電流、電圧の積が最大になるように追尾している。つまり、 $I-V$ 特性およびパワーコンディショナ入力部の影響を受けた特性を追尾していると思われる。 0.20 kW/m^2 付近については、電力は変動が少ないが電圧と同相で変化していることがわかる。また、電圧の変化に対し電流は殆ど変動がないが、ほぼ定電流であるA領域の特徴なども考慮すると図3の示すA領域で動作していると推測された。図6(b)については、(a)と(c)の中間的な特性を示している。これらの傾向は他の晴天日でも同様に観測された。

3.3 動作点の $I-V$ 特性

図6のデータについて動作点がどのような $I-V$ 特性を描いているか調べた。その様子を図7に示す。動作点は始点をa、終点

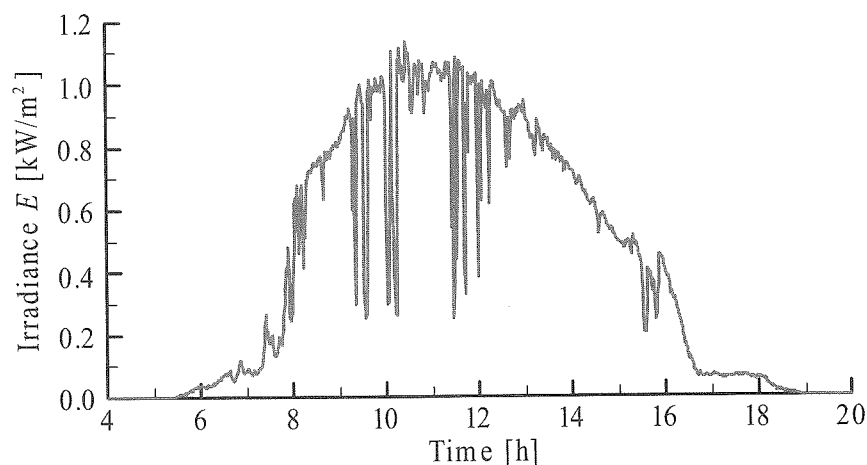
をjとする。 1.01 kW/m^2 付近では時計回りに動くヒステリシスを描き、 0.60 kW/m^2 付近でも同様の特性が見られた。 0.20 kW/m^2 付近ではヒステリシスは見られず $I-V$ 特性の一部と思われる特性が現れた。太陽電池アレイは日射強度が増加するにつれて動作電流がほぼ正比例で増加するため、それによりパワーコンディショナ入力側の容量成分に対する過渡現象の変化が現れていると推測される。このヒステリシスを抑えることができれば、より正確に最大出力点を追尾でき、システム性能が向上すると期待される。

3.4 直流入力・交流出力の特性

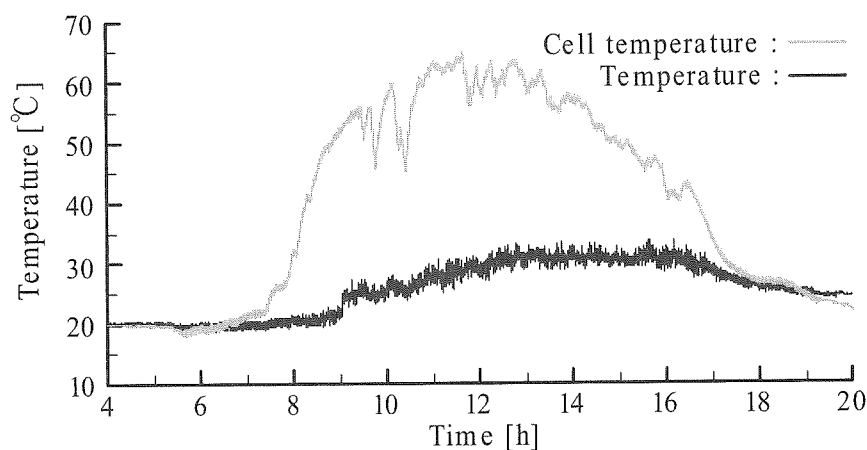
パワーコンディショナの出力は交流であるため、その働きにより直流側の動作点が影響を受ければ、それが最大出力点を追尾する上でずれを生じさせる可能性がある。そこで、オシロスコープを用いて動作状態における直流入力、交流出力の電流、電圧波形を観測した。測定データは、動作点追尾の分析と同日のデータを使用した。

日射強度 $1.01, 0.60, 0.20 \text{ kW/m}^2$ 付近について、直流入力と交流出力を比較し、生じる直流の脈動に焦点を当てている。日射強度 1.01 kW/m^2 の交流6周期分 (100 ms) について観測した結果を図8に示す。これは各周期による変動と、6周期毎の変動が観測されたことによる。他の日射強度についても同様に分析を行った。直流入力電流、電圧はスイッチング動作によるノイズが多く現れるため 400 Hz の帯域制限を設定した。入力側の直流成分にこのような現象が見られる理由として、高周波絶縁トランス方式の回路入力側のコンデンサから高周波インバータによりパルス変調されてから次のコンデンサに繋がるため、スイッチングノイズが発生し直流成分に影響を与えていると推測される。

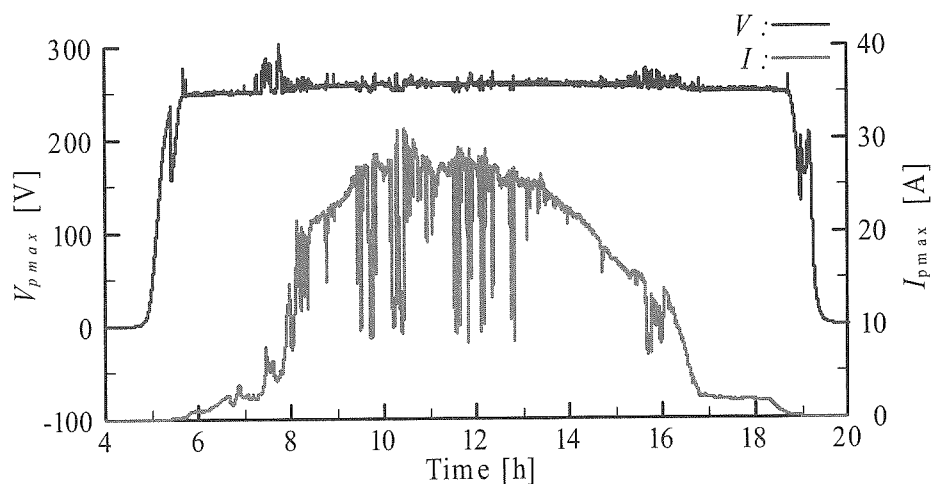
この結果、日射強度 1.01 kW/m^2 で直流電圧が交流出力波形と同様の周期変動を示した。各6周期分の電圧の各変動について平均値を計算したところ 0.37% であった。電圧に変動が見られるが電流には殆ど変動が見られない。同時期に測定した帯域制限の無いデータで電圧のスイッチングノイズ幅が 11% 、電流で 0.7% 程度あることから、応答速度が入力コンデンサの時定数より速いため、高周波での電圧変動が大きいと推測される。また、主にA領域で動作していることも一つの要因と推測される。一方 $0.60, 0.20 \text{ kW/m}^2$ では $0.30, 0.26\%$ と 1.01 kW/m^2 に比べ変動は徐々に減少している。これらはMPPT動作点の特性により見られた変動の傾向と同様で、電圧の脈動により出力に同様の変動が生じている。



(a) Irradiance with time.



(b) Cell temperature and ambient temperature.



(c) Voltage and Current.

Fig.5 Variation of irradiance, temperature, voltage and current with time.

4. 考察

日射強度の強いとき、特に 1.01 kW/m^2 で動作点追尾 I - V 特性の際に現れたヒステリシスについて考察する。日射強度の強いときは、動作電流が増加する。それに対して、パワーコンディショナ入力部にあるコンデンサの容量成分の影響が現れたと推測さ

れる。つまり、コンデンサの後部には、変圧回路、インバータ回路などが続いているが、太陽電池の I - V 特性だけでなく、コンデンサの特性で電圧より電流の位相が進むという現象が観測されたと思われる。日射強度 1.01 kW/m^2 で、動作点追尾のため 2 sec 周期で 0.35% の出力変動、交流出力の変動と同期して、入力側

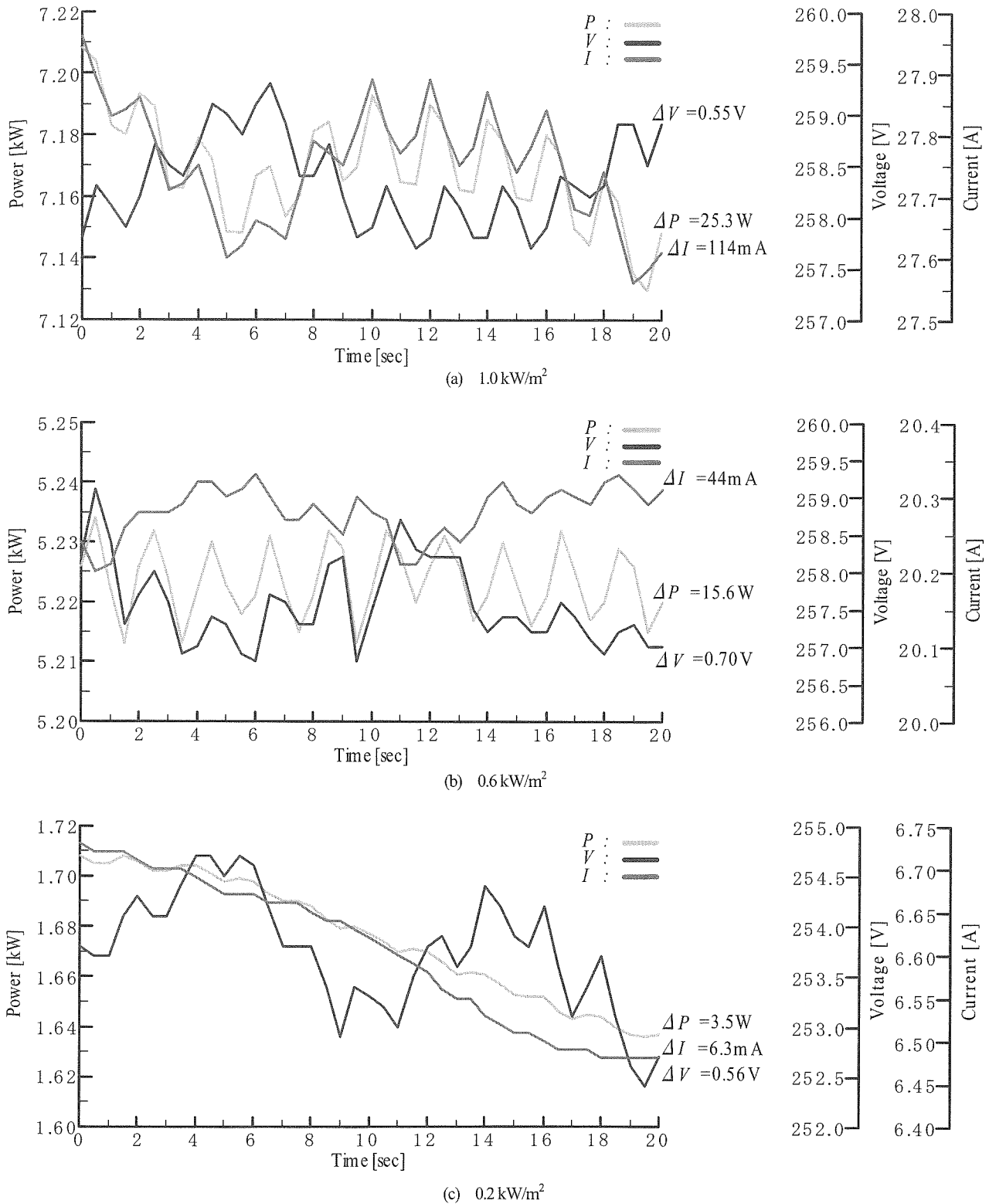


Fig.6 Power, voltage and current with time.

Table 5 Tracking characterization of power conditioner.

Irradiance [kW/m ²]	Cell temperature [°C]	Tracking period range ΔT [sec]	Tracking voltage range ΔV [V]	Peak power [kW]	Tracking power range ΔP [W]	Variation rate [%]
1.01	59.4	2	0.55	7.21	25.3	0.35
0.60	51.7	2	0.73	5.23	15.6	0.30
0.19	44.1	2	0.23	1.92	3.5	0.20

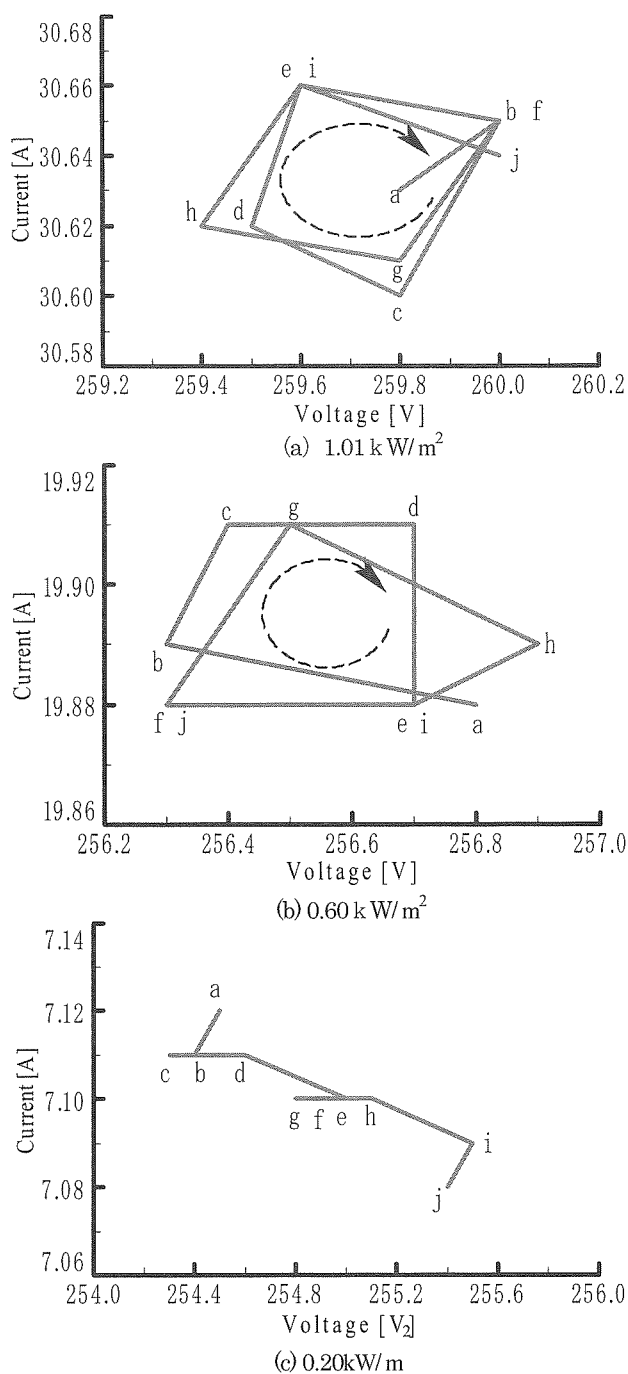


Fig.7 Variation of power, voltage and current with time.
(2cycle begin from a to j.)

直流電圧が 1/60sec 周期で 0.37% 変動している。これらの変動が同時に生じており、合わせると最大で 0.72% にもなる。日射強度の変動が大きい時は追従が遅れることで更に大きくなることが推測される。

これらの変動を抑えるには、パワーコンディショナの制御アルゴリズムを考慮して、日射強度の増加に対して、MPPT の周期を早くし、コンデンサの過渡現象が現れにくくしたり、入力部のコンデンサ容量を日射強度の高いときに応じ、段階的に増加させる構造にする方法が考えられる。それにより、システム効

率向上に寄与することができる。

5. 結論

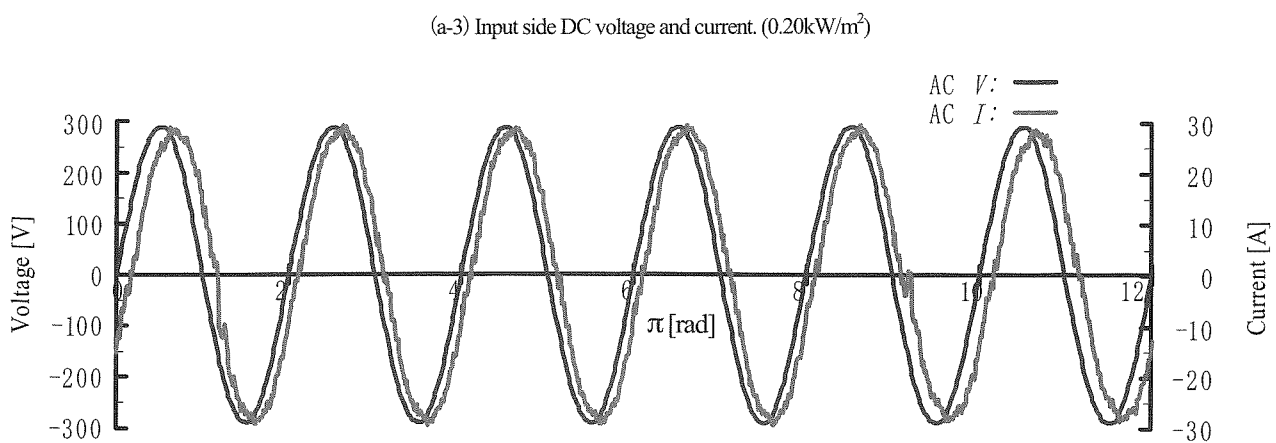
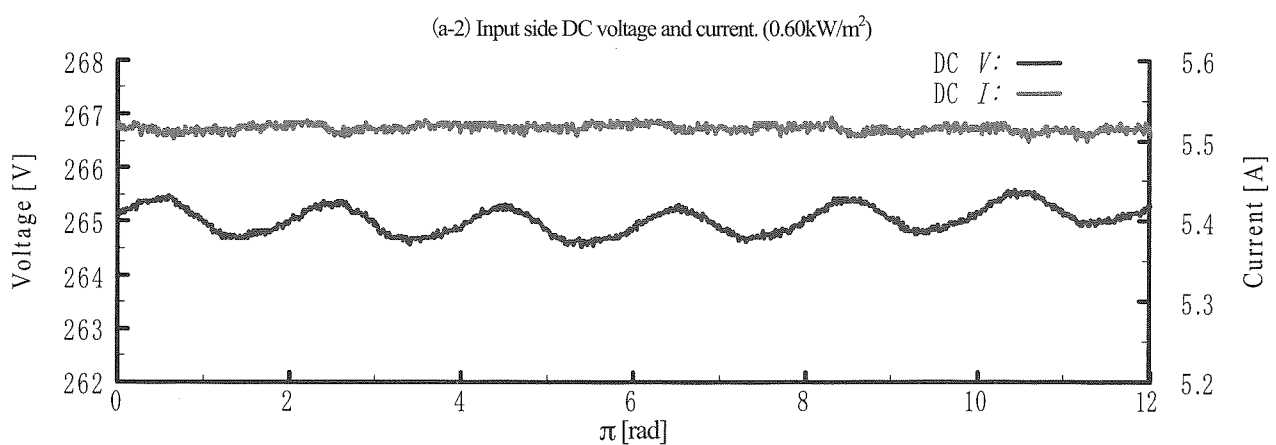
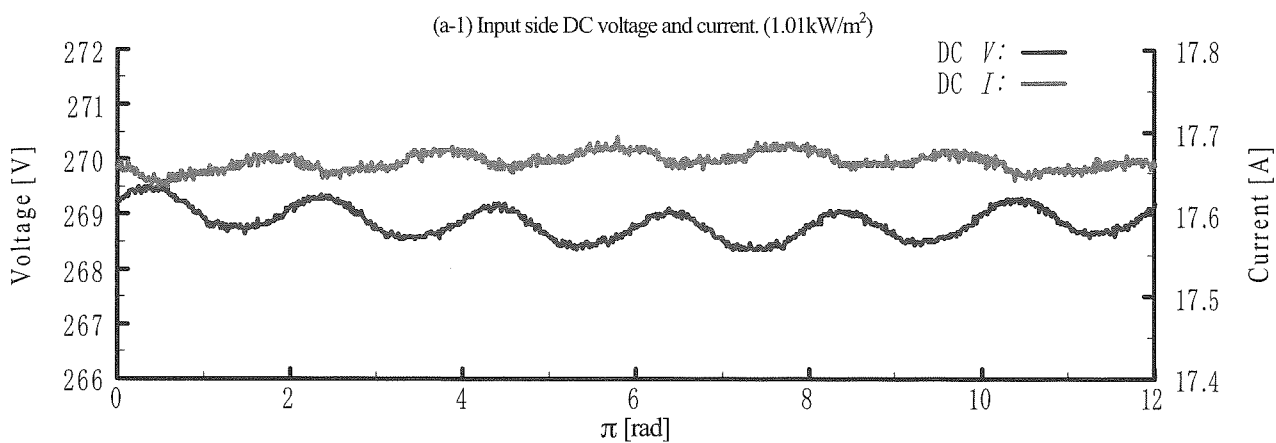
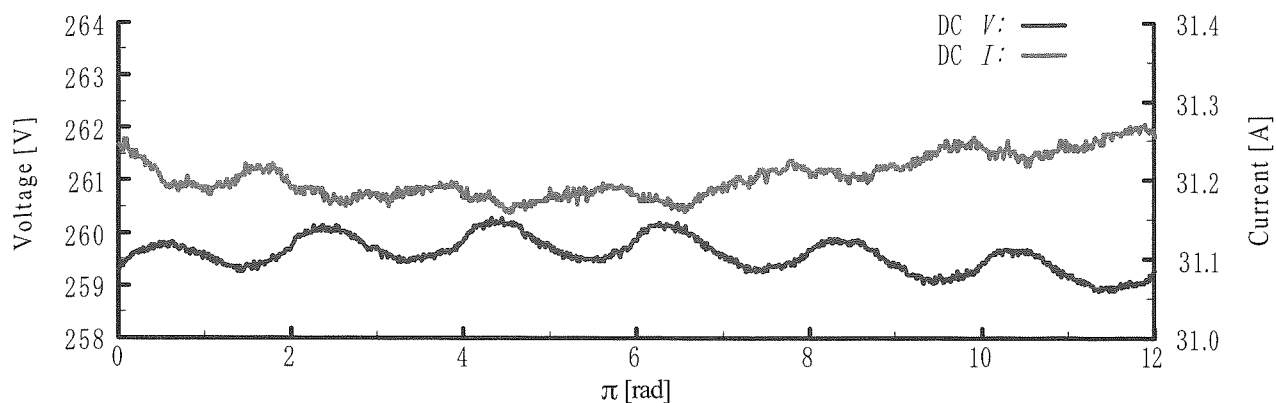
太陽電池アレイを、パワーコンディショナを介し系統連系運転する動作状態において、ある高周波絶縁トランス方式 10kW パワーコンディショナが、どのように $I-V$ 特性において最大出力点を追尾し、その後直交変換する様子を分析した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 日射強度 0.20 kW/m² のとき $I-V$ 特性の最大出力点より左側（定電流）領域を追尾に使用している。追尾動作により日射強度 0.60 kW/m² で 0.30% のずれを生じ、日射強度が増加するにつれて徐々に大きくなった。
- 2) 日射強度 1.01 kW/m²、0.60 kW/m² における動作点を $I-V$ 特性上で確認したところ時計回りのヒステリシスが確認された。これは太陽電池アレイの動作電流の増加とパワーコンディショナ入力部の容量成分の関係が影響していると推測される。
- 3) オシロスコープによりパワーコンディショナにおける入出力特性の電流、電圧波形を観測した。その結果、日射強度 1.01, 0.60, 0.20 kW/m² のとき、入力側直流電圧で 0.37, 0.30, 0.26% の交流波形にほぼ同期した脈動が観測された。これらは、MPPT 動作点の特性により見られた変動の傾向と同様である。
- 4) 日射強度 1.01 kW/m² で、動作点追尾のため 2sec 周期で 0.35% の出力変動、交流出力の変動と同期して、入力側直流電圧が 1/60sec 周期で 0.37% 変動している。これらの変動が同時に生じており、合わせると最大で 0.72% にもなる。日射強度の変動が大きい時は追従が遅れることで更に大きくなることが推測される。
- 5) 日射強度の増加に対して、MPPT の周期を早くしたり、入力部のコンデンサ容量を日射強度の強いときに応じ、段階的に増加させる構造にすることで、これら $I-V$ 特性のヒステリシスや、直流、交流変換する際の変動を抑えられると期待できる。それにより、システム効率向上に寄与することができる。

謝辞 本研究を行うにあたり、御協力いただいた日新電機株式の関係各位に深く感謝する。

参考文献

- (1) <http://www.nedo.go.jp/>
- (2) 平田, 太田, 竹内, 松沢, 柳澤, 谷 : 平成 19 年電気学会全国大会 ‘講演論文集, 7_045 (2007)
- (3) S-J. Park et al. “New Parallel driving strategy based on modified converters and peak current mode control for photovoltaic power generation systems” Solar Energy Vol.80, No.5, 2006, pp.524-534
- (4) Y.Hirata, T.Tani: ” Dynamic Characteristics of Photovoltaic Power Conditioner with Solar Output Simulator”, pp321-324, Area2 P-Pv-22, Renewable Energy 2006 Proceedings (2006)
- (5) 平田, 池上, 小田巻, 谷 : 平成 20 年 太陽/風力エネルギー講演論文集, pp. 385-388, No. 91 (2007)
- (6) 平島, 平田, 谷 : 平成 21 年太陽/風力エネルギー講演論文集, pp. 45-48, No. 3 (2008)



(b) Output side AC voltage and current. (1.01kW/m^2)
Fig.8 Waveforms of DC or AC voltage and current variation with time.