

アレイ電圧の変動を利用したMPPTミスマッチ評価方法

The evaluation method of MPPT mismatch by using array voltage fluctuation

山中三四郎*¹ 井浪達也*² 河村 一*³ 河村英昭*⁴ 大野英之*⁴
 Sanshiro YAMANAKA Tatsuya INAMI Hajime KAWAMURA Hideaki KAWAMURA Hideyuki OHNO

Abstract

Many of Photovoltaic systems incorporate inverter with a Maximum Power Point Tracking (MPPT) control system to obtain maximum power output, but a loss to be caused by MPPT mismatch is included. The loss due to the MPPT mismatch is caused by the rapid change of irradiance. Although various MPPT control methods are proposed for the improvement of the efficiency, there are few reports on the accurate evaluation method.

The authors study the evaluation method of MPPT mismatch loss. In this paper, the relation between a fluctuation of the array voltage and MPPT mismatch loss are investigated. And an evaluation method of MPPT mismatch by using array voltage fluctuation are proposed.

The loss rate caused by MPPT mismatch increases with standard deviation of an array voltage for temperature. The standard deviation of an array voltage is about constant when the sampling interval is equal to or less than five minutes. From these results, it became clear that MPPT mismatch is evaluated easily by standard deviation of the array voltage.

キーワード：アレイ電圧, MPPT ミスマッチ, 損失評価方法, インバータ, 標準偏差

Key Words : Array Voltage, MPPT mismatch, loss evaluation method, Inverter, Standard deviation

1. はじめに

地球環境問題やエネルギー資源枯渇問題などの解決方法のひとつとして、自然エネルギーの利用に関心が集まっている。日本政府は自然エネルギー利用の一環として太陽光発電を2010年までに482万kW導入することを目標としている⁽¹⁾。しかし、現在の導入量は2006年末の時点で170万kWと目標達成には程遠く、今後導入を促進する政策が期待される。一方、太陽光発電の普及を進めるために太陽電池の効率改善に関する研究が熱心に取り組まれている⁽²⁾。また、太陽電池自体の発電効率の改善だけでなく、システムとしての効率改善も有効である。多くの太陽光発電（以降PV）システムは、パワーコンディショナに最大出力追従（Maximum Power Point Tracking : MPPT）制御を有している。このMPPT制御を行なうことで、PVアレイの発電効率を高めることができる。しかし、急激な日射変動

により、MPPT制御の制御遅れが発生し、MPPTミスマッチ損失が発生する。また、MPPTの代表的な制御法である山登り法等では、動作点を常に変動させているので、これによる損失も無視できない。近年、MPPTミスマッチを低減する方法が検討され、様々なMPPTの制御方法が提案されてきた^{(3),(4),(5)}。しかし、評価方法に関しては、全体の発電効率から優劣を判断したものや⁽⁶⁾、最適な値との比較により判断する方法⁽⁷⁾が主なものであり、複雑な計算を必要とする。また、制御方法そのものの優劣を決めるための方法が確立されていない。MPPTの性能向上のためにも、評価方法の確立が重要である。

筆者らはMPPTミスマッチの評価方法について研究している。本報告では、最初にMPPT制御により動作電圧が影響を受け、MPPTミスマッチにより電圧変動が生じることを示す。次に、これらの結果を用いてMPPTミスマッチの評価方法として、アレイ電圧-温度特性の回帰直線上のばらつきによって評価する方法を提案する。また、この方法を用いてMPPTミスマッチ損失を評価した時に、データのサンプリング間隔が評価に与える影響についても言及している。

*1 会員 名城大学理工学部電気電子工学科 教授
 (〒468-850 愛知県名古屋市天白区塩釜口一丁目501 番地)
 e-mail : yamanaka@ccmf.s.meijo-u.ac.jp

*2 学生員 名城大学大学院理工学研究科 院生

*3 会員 名城大学理工学部電気電子工学科 准教授

*4 会員 名城大学理工学部電気電子工学科 教授

*5 非会員 名城大学理工学部電気電子工学科 教授
 (原稿受付：2007年12月25日)

2. PV アレイ装置と計測方法

本研究では、名城大学2号館屋上に多結晶シリコン太陽電池モジュールを12直列2並列(定格1.5kw)に接続し、方位南、傾斜角30°で設置したPVアレイを使用している。図1にシステムの概形を示す。このPVシステムのMPPT制御による影響を検討するため、電力系統と接続したPVアレイのインバータ入力側のアレイ電力、アレイ電圧、アレイ電流を1秒間隔で計測している。同時にアレイ温度は、PVアレイの裏面中央付近に取りつけた熱電対によって計測し、日射強度は、アレイと同条件で設置している小型PVモジュールの短絡電流から算出している。更に、MPPT制御による損失量を含まない最大出力を計測するために本システムのすぐ隣に、同条件で設置している別のアレイのI-Vカーブを5分間隔で計測している。このI-Vカーブから最大出力を求め、MPPT制御による損失量を評価するための基準とする。

また、本研究室ではインバータA、インバータBの二種類のインバータを使用している。図2(a)、(b)にそれぞれのインバータの短時間の電圧の変化を示す。インバータAの電圧は不規則に変化している。一方、インバータBの電圧は規則的に変化している。これらのインバータは市販品であるため、制御方法の詳細についてはわからないが、二種類のインバータは制御アルゴリズムが異なっていると考えられる。本報告では、言及がない限りインバータBを使用して検討を行っている。

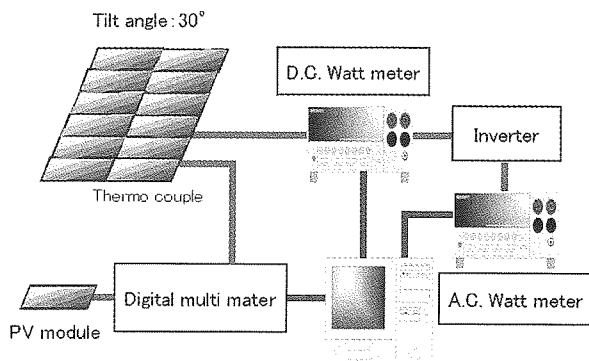


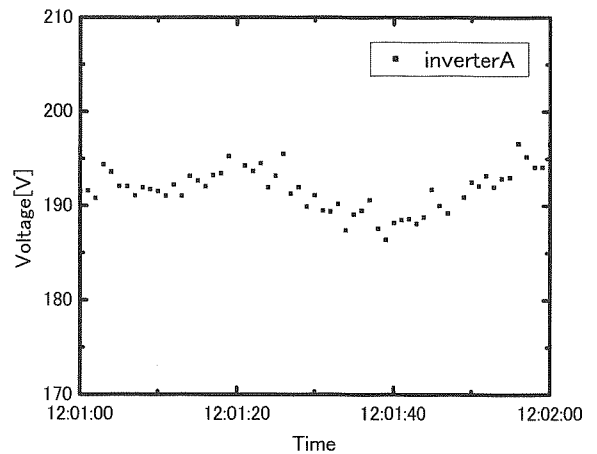
Fig.1 The schematic diagram of measuring system

図1 計測システムの概略

3. 実験結果および検討

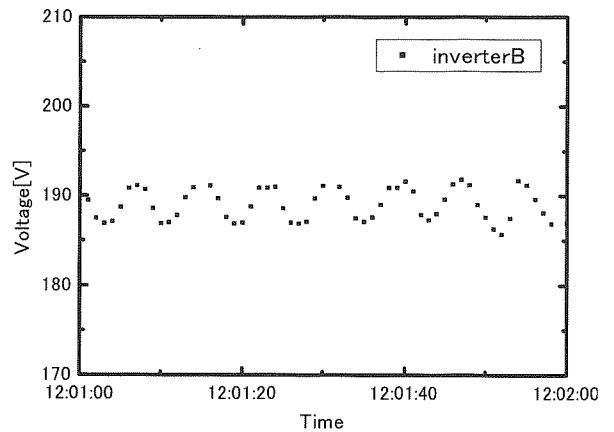
3.1.1 日射強度-アレイ出力特性

図3に変動の大きいある一日の日射強度の時間変化を示す。また、図4、5はI-Vチェッカーで計測した同日の最大出力動作電圧と最大出力動作電流、最大出力の時間変化を示す。図5は最大出力動作電圧とともに(1)式で温度補正を行った電圧の時間変化も示している。



(a) Array voltage of inverter A

(a) インバータAのアレイ電圧



(b) Array voltage of inverter B

(b) インバータBのアレイ電圧

Fig.2 Characteristic of inverter

図2 インバータの特性

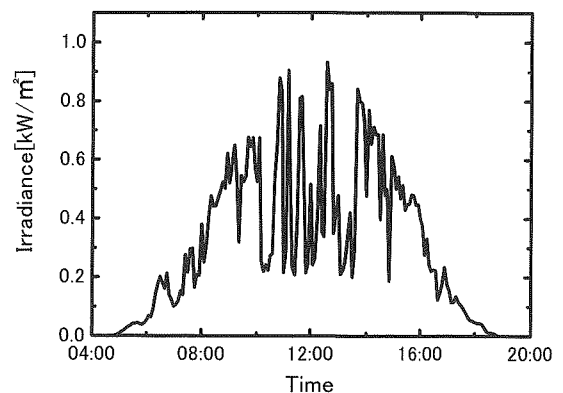


Fig.3 Time change of irradiance

図3 日射強度の時間変化

$$P_{25} = P / [1 + \alpha (25 - T)] \quad (1)$$

ここで、 P_{25} : 温度補正を行った電力、 P : 実測電力、 T : セルの裏面温度、 α : 温度係数 $(-0.5 \pm 0.05) \% / ^\circ\text{C}$ である。

図4より、最大出力、最大出力動作電流は日射変動とほぼ同じように変化していて、これらの値は日射強度に対して大きく依存していることがわかる。一方、最大出力、最大出力動作電流に比べて図5の最大出力動作電圧は変化が少ない。さらに、温度補正を行うことで電圧の変動がなくなり、低日射領域を除き、ほぼ一定となる。このことから、最大出力動作電圧は日射強度に依存しないが、温度の影響を受けていることがわかる。図6は最大出力動作電圧と実際にMPPT制御が行なわれている

システムのインバータ入力側の電圧であるアレイ電圧との関係を、電圧-日射強度特性として示す。図6(a),(b)はそれぞれ日射変動の緩やかな日と、日射変動の激しい日の結果である。最大出力動作電圧、アレイ電圧ともに温度補正が行われている。最大出力動作電圧は日射変動の緩急に関わらず、日射強度 $0.4[\text{kW}/\text{m}^2]$ 以上で一定となっている。しかし、アレイ電圧は日射強度に対して幅を持った値をとることがわかる。さらに、アレイ電圧の幅は、日射変動の緩急によって変わり、日射変動の激しい日は幅が大きくなっていることが見て取れる。 $0.4[\text{kW}/\text{m}^2]$ 以上の領域では最大出力動作電圧はほぼ一定であるのに対し、 $0.4[\text{kW}/\text{m}^2]$ 以下の低日射領域では日射強度の低下と共に急激に低下している。

本論文はMPPT制御の評価方法の提案を目的としているので、日射強度に対する変動がほとんどなく、正確な評価が期待できる $0.4[\text{kW}/\text{m}^2]$ 以上のデータのみ使用し

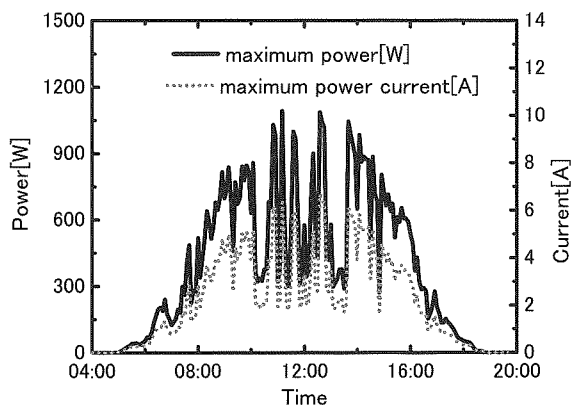


Fig. 4 Time change of maximum power and maximum power current

図4 最大出力と最大出力動作電流の時間変化

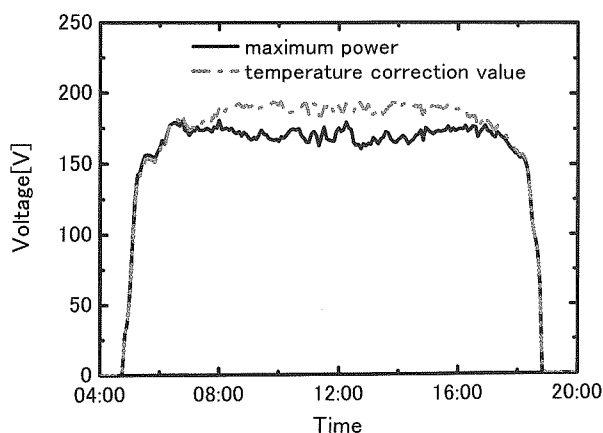
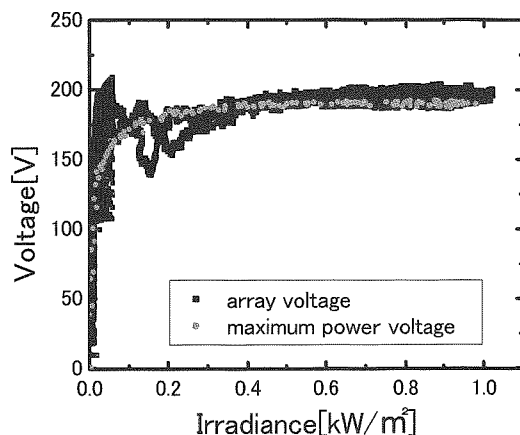


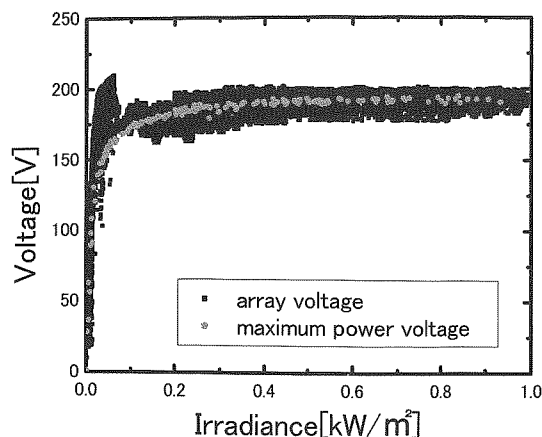
Fig.5 Time change of voltage

図5 電圧の時間特性



(a) Irradiance change : gentle

(a) 日射変動の緩やかな日



(b) Irradiance change : sudden

(b) 日射変動の激しい日

Fig.6 Voltage-irradiance characteristic

図6 アレイ電圧-日射強度特性

て検討を進める。一般に電圧の変動の原因として、温度による影響⁽⁸⁾、部分的な影⁽⁹⁾、MPPT ミスマッチによる影響が考えられる。前述のデータでは、温度補正をしてあるため、温度による影響は取り除かれていること、PV アレイは影のかからない場所に設置されていることから、これらの影響はないと考えられる。従って、この電圧変動の原因は MPPT ミスマッチによるものと考えられる。

今、図7に示すように実線の I-V カーブが日射変動によって点線に示す I-V カーブに変化した時を考える。変化前は P1 の動作点で動作していた時に日射変動が起こった場合、何も制御しなければ、動作点は P1' に移動することになる。しかし、点線の I-V カーブ上での最大出力点は P2 であるため、点線の I-V カーブの状態、P1' の動作点では発電可能な最大の電力が取り出すことができない。そのため、MPPT 制御法では、最大の電力を取り出すために、動作点を P1 から P2 へと移動させる制御を行っている。また、一般的に多く用いられている山登り法では、日射変動のない場合であっても、常に僅かに電圧を変化させて、取りだせる電力が最大になるように制御している。常に電圧が変化するために、この変動によっても MPPT ミスマッチ損失が発生する。

以上のことから、MPPT 制御をすることで電圧にばらつきが発生することが理解できる。したがって、この電圧のばらつきの程度を数値化することで MPPT ミスマッチの評価が出来ると思われる。以下に MPPT ミスマッチの評価方法について述べる。

3.1.2 アレイ電圧変動を用いた MPPT ミスマッチの評価方法

前述した通り、本研究で使用している PV アレイのアレイ電圧は、温度と MPPT ミスマッチの影響を受けている。そのため、アレイ電圧の変動で MPPT ミスマッチを評価するためには、温度の影響を補正し、MPPT ミスマ

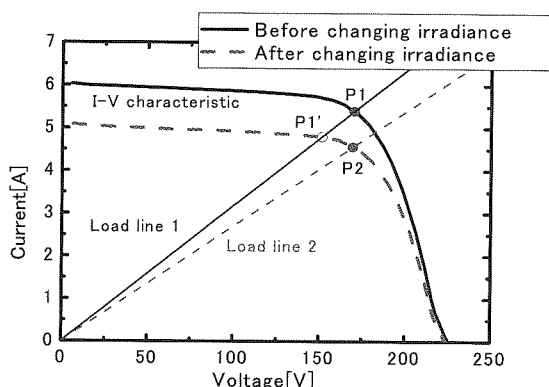
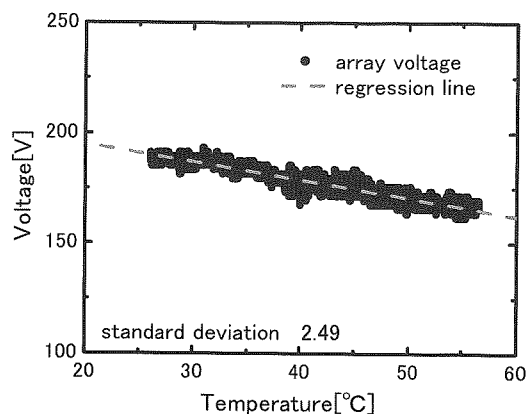


Fig. 7 Change in I-V characteristic according to irradiation change

図7 日射変動に伴う I-V 特性の変化

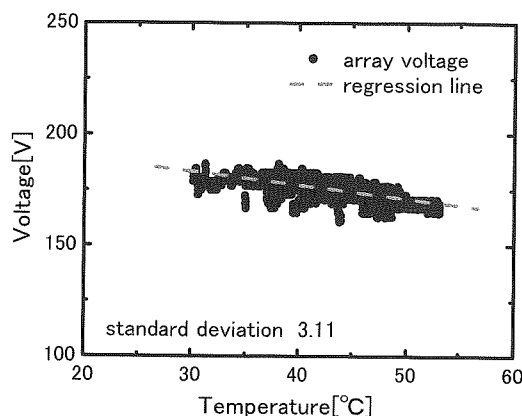
ッチによる電圧の変動のみに行うことが必要となる。温度補正をすることで温度の影響を取り除くことができる。しかし、なるべく評価のための行程は簡単であった方が都合がよい。そこで、温度補正をする行程を省いて評価することができる方法としてアレイ電圧-温度特性を用いた評価方法を提案する⁽¹⁰⁾。この評価方法はまず、図8のようにアレイ電圧-温度特性から回帰直線を求める。この回帰直線を最大出力動作電圧であると仮定している。図8(a), (b)は快晴日と日射変動の大きい日のアレイ電圧-温度特性である。この図より、日射変動が激しいほど、電圧の回帰直線からのばらつきが大きくなる。その回帰直線に対するアレイ電圧の標準偏差を求めることで、温度補正をすることなく、アレイ電圧のばらつきを評価することができる。

回帰直線の傾きが温度による電圧低下に相当すると考



(a) Irradiance change : gentle

(a) 日射変動が緩やかな日



(b) Irradiance change : sudden

(b) 日射変動が激しい日

Fig.8 Relation between array voltage and temperature characteristic

図8 アレイ電圧と温度の関係

えられ、この回帰直線からの標準偏差を MPPT ミスマッチの評価の基準とする。

実験方法で示した二種類のインバータについて調べた。図 9 に損失率とアレイ電圧の標準偏差との関係を示す。ここで、損失率は推定した最大の発電電力と実際の発電電力の差から求めている。最大電力の推定は五次近似曲線を用いた方法⁽¹¹⁾で求めている。この図より、インバータの種類に関わらず、アレイ電圧の標準偏差が大きくなるにつれて損失率も大きくなっており、アレイ電圧の標準偏差と MPPT ミスマッチ損失率の間に相関性があることがわかる。

図 9 から、アレイ電圧の標準偏差と MPPT ミスマッチの損失率の間に、よい相関があることはわかるが、この図では、インバータごとの MPPT 制御の能力を判断することはできない。

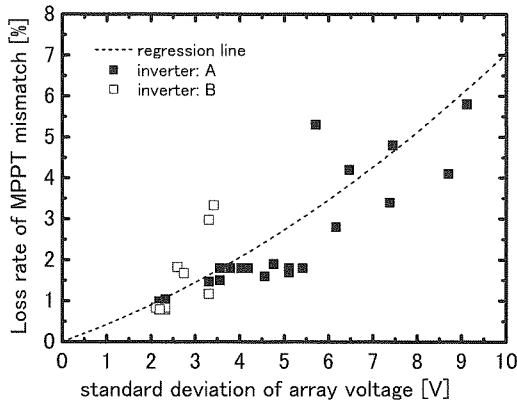


Fig. 9 Relation between loss rate of MPPT mismatch and standard deviation of array voltage

図 9 MPPT ミスマッチ損失率とアレイ電圧の標準偏差との関係

図 10 はアレイ電圧の標準偏差と日射変動度の関係を示す。日射変動度は一日の日射変動分を (2) 式の移動平均を用いて求め、日射強度との差を標準偏差として求めて数値化したものである。

$$A_i = \frac{1}{2m+1} \sum_{k=-m}^{i+m} Irr_k \dots\dots\dots (2)$$

A_i = 移動平均, Irr = 日射強度, $2m+1$: 移動平均のデータ区間 [s] ($m=30$)

二種類のインバータ共に日射変動度が大きくなるにつれてアレイ電圧の標準偏差が大きくなっていること、インバータによって日射変動に対するアレイ電圧の標準偏差に違いがあることがわかる。また、回帰直線の切片もインバータによって異なっている。すなわち、2つのインバータは MPPT 制御のために常に電圧を変動させているので、日射変動がないときでも標準偏差が 0 になら

ない。従って、日射変動度が 0 の時の標準偏差は MPPT 制御法固有の特性に依るものと考えることが出来る。

さらに、傾きの違いから、日射変動度が大きくなって、インバータ B のほうが MPPT ミスマッチによる損失が少ないということが示唆された。

以上の結果より、アレイ電圧の標準偏差は MPPT ミスマッチと密接な関係を持っており、アレイ電圧の標準偏差により、MPPT ミスマッチ損失の評価を行うことが可能であることが示唆される。

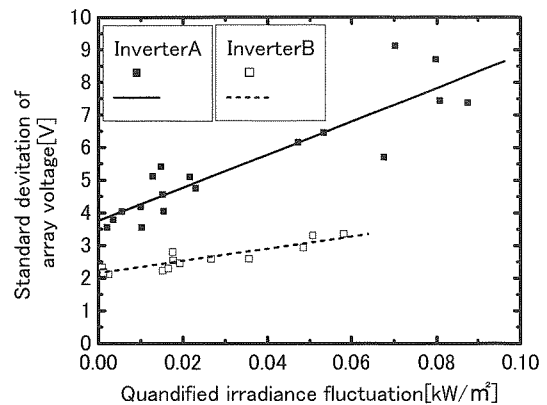


Fig. 10 Relation between standard deviation of array voltage and quantified irradiance fluctuation

図 10 アレイ電圧の標準偏差と日射変動率の関係

3.2 測定データの処理方法による影響

これまででは、1 秒間隔で計測したデータを用いて MPPT ミスマッチの評価を行った。しかし、MPPT ミスマッチの評価を行う場合、サンプリング間隔が異なる場合も考えられる。さらに一般的にサンプリング間隔を長くした方が計測が容易になる。

図 11 はサンプリング間隔を変えた場合のアレイ電圧の標準偏差の変化を示したものである。一日の測定したデータから、サンプリング間隔ごとにデータを抽出して評価を行っている。サンプリング間隔が 5 分までの短時間領域において、アレイ電圧の標準偏差はほぼ一定であることがわかる。前節で標準偏差と MPPT ミスマッチに起因する損失率の間には密接な関係があることがわかっていることから、アレイ電圧の標準偏差を用いた MPPT ミスマッチの評価方法は、サンプリング間隔が 5 分以内であれば、一秒間隔でサンプリングした場合と変わらない結果を得ることができる。

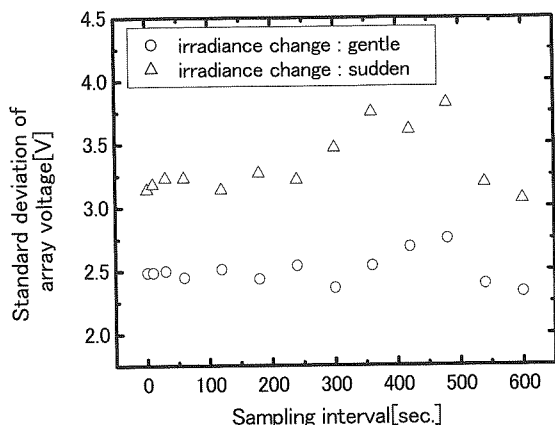


Fig. 11 Relation between n standard deviation of array voltage and sampling interval

図 11 アレイ電圧の標準偏差とサンプリング間隔の関係

4. まとめ

本論文では、PV システムの損失の一つである MPPT ミスマッチに起因する損失について、アレイ電圧の変動と MPPT ミスマッチの関係を検討し、アレイ電圧の標準偏差を用いて評価する方法を提案した。以下に、その結果を要約する。

- (1) 温度補正をすることで、日射強度 $0.4 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ 以上で最大出力動作電圧は一定となるが、インバータに接続したシステムではばらつきが見られる。
- (2) 温度-電圧特性から求めた回帰直線からのばらつきを求めた標準偏差と、MPPT に起因する損失率は密接な関係を持ち、アレイ電圧の標準偏差によって MPPT ミスマッチの評価が可能である。
- (3) 移動平均によって日射変動分を分離することでインバータの MPPT 制御の能力を判断することができる。
- (4) サンプリング間隔が 5 分まではアレイ電圧の標準偏差に変化がみられず、5 分以内までのサンプリング間隔であれば、一秒間隔で計測したものと同等な評価をすることが可能である。

以上のことから、このアレイ電圧の変動を利用した MPPT ミスマッチの評価方法は、アレイ電圧の標準偏差を評価指標として、インバータのアルゴリズムに関わらず温度と電圧のみで MPPT ミスマッチ損失の評価をすることが出来、さらに 5 分以内のサンプリング間隔であれば、インバータの制御方法が異なっても一秒間隔の計測と変わらない評価結果を得ることができると判明した。

5. 参考文献

- (1) 総合資源エネルギー調査会需給部会「2030 年のエネルギー需給展望」(H17 年 3 月)
- (2) 坂田 功:「新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO) における太陽電池戦略」, 太陽エネルギー学会学会誌, Vol. 32, No. 4, pp. 7-10
- (3) 近藤 他:「太陽電池のファジィモデルを用いた最大出力制御」太陽/風力エネルギー講演論文集, 97, pp. 395-398 (2002)
- (4) 皆藤 他:「太陽光発電用インバータ向けデジタル MPPT 法の開発」平成 15 年電気学会全国大会, 7-131, pp. 201-202 (2003)
- (5) 奥石 他:「太陽光発電システムにおける最大電力点追従制御の評価」太陽/風力エネルギー講演論文集, 25, pp. 97-100
- (6) 大野 他:「様々な日射変動に高速に対応できる最大出力 (MPPT) 制御」平成 17 年電気学会全国大会, 7-010, pp. 12-13 (2005)
- (7) 伊賀 他:「太陽光発電システムの発電量の評価方法とその低下要因に関する研究」, 電学論 B, Vol. 124, No. 10, pp. 1247-1254 (2004)
- (8) 伊賀 淳「太陽電池温度変化による年間発電量への影響」平成五年電気学会全国大会講演論文集, (12), 1974, pp.199-200(1993)
- (9) 米倉 他:「時間的に変化する影が太陽電池の発電特性に及ぼす影響」太陽/風力エネルギー講演論文集, 24, pp. 89-92(2001)
- (10) 阿比留 他:「アレイ電圧-温度特性を利用した MPPT ミスマッチの評価法」太陽/風力エネルギー講演論文集, 38, pp. 181-184 (2003)
- (11) 孟 他:「太陽光発電システムにおける MPPT ミスマッチの損失量評価」太陽/風力エネルギー講演論文集, 96, pp. 391-394 (2002)