

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

学生員 輿石 浩吉 (東京農工大学)

会員 黒川 浩助 (東京農工大学)

Evaluation of Maximum Power Point Tracking
Operation of PV Systems

Koukichi Koshiishi*, Kosuke Kurokawa*

*Tokyo University of Agriculture & Technology
2-24-16, Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588, JAPAN
FAX: +81-42-385-6729 E-mail: koshi@cc.tuat.ac.jp

ABSTRACT

Recently, the spread of grid-connected PV systems have been increasing. The system inverters include Maximum Power Point Tracking (MPPT) function. The authors have been analyzing performance data observed at a number of PV systems, which were constructed by REPP. Contrary to expectations, MPPT mismatch losses were very high. In this paper, we estimated by simulation that irradiation change causes MPPT mismatch losses.

1. はじめに

現在,住宅用太陽光発電(PV)システムが普及しつつある。さらなる普及を促進させるために,各システムの経年変化やシステム性能の分析を行い,システム効率の向上を図る必要がある。筆者らは, NEDO フィールドテスト (FT)・システムや自然エネルギー推進市民フォーラム (REPP)から得られたデータを基にして PV システムの分析を行った。その結果, NEDOFT 事業においてシステム出力係数は約 72%となった⁽¹⁾⁽²⁾。失われた損失の主なものは,陰の影響による損失,モジュール温度上昇による損失,インバータ損失,入射角依存性等による損失であり,また,最大電力追従制御(MPPT)による損失が意外に大きいという事実が明らかになった。この FT 事業システム 153 サイトで MPPT ミスマッチ損失を積算すると,この損失はシステム定格出力の約 5%になる結果が得られた。そのため,太陽電池の性能を最大限利用しているとはいえず,本来期待できる発電量が得られていない可能性がある。

MPPT 制御ミスマッチ損失が生ずる原因の一つとして,

日射変動が考えられる。日射が急変したときの電流 - 電圧特性の変化を図 1 に示す。Pmax 点で動作していたときの負荷直線を示している。日射の変動後,太陽電池の動作点は負荷直線上の P'点に移動し,その後日射が安定した場合,新たな Pmax 点に収束する。一方,日射変動が激しい場合には Pmax 点に収束することができず,MPPT ミスマッチ損失を発生させる可能性がある。

本論文では,実測日射データ(1秒値)より日射変動度を定量的に求め,日射変動と MPPT 制御ミスマッチ損失との関係についてシミュレーション評価を行った。その結果を報告する。

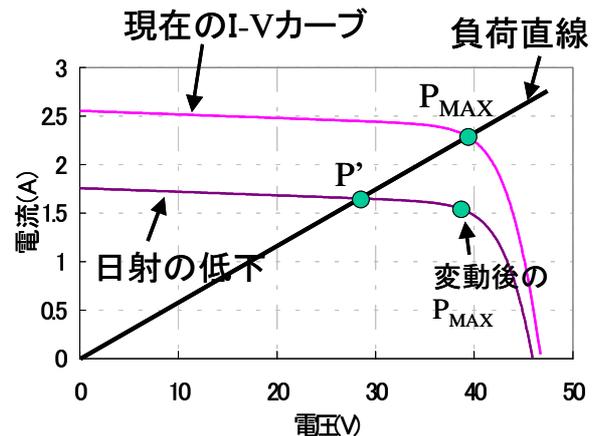


図 1. I-V カーブと負荷直線

2. シミュレーション方法

システム構成として 100W の PV モジュール, DC/DC コンバータ,そして抵抗負荷を用いた。MPPT 制御アルゴリズムは山登り法を使用した。太陽電池モジュールは,等価回路から求まる理論式⁽³⁾を使用した。

MPPT 制御ミスマッチ損失を次式のように定義する。

$$K_{PM} = \frac{\sum \text{アレイ発電電力}}{\sum P_{MAX} \text{電力}} \times 100 \quad [\%] \quad \dots (1)$$

2.1 DC/DC コンバータの模擬

DC/DC コンバータは,抵抗負荷が接続されている場合,そのデューティ比によって入力インピーダンスが一定となる⁽⁴⁾。そこで図 2 に示すように,入力電圧・電流を V_I ・ I_I , 出力電圧・電流を V_O ・ I_O とすると,次の 4 式が成り立

つ。ここで、コンバータに使用している素子は理想素子とし、コンバータによる損失はないものとする。

$$V_o = R \times I_o \quad \dots(2) \quad V_o = \beta \times V_i \quad \dots(3)$$

$$V_i = R' \times I_i \quad \dots(4) \quad I_o = \frac{I_i}{\beta} \quad \dots(5)$$

ただし R' は DCDC コンバータの入力インピーダンス、はコンバータのゲインを表している。これら 4 式から、

$$R' = \frac{R}{\beta^2} \quad \dots(6)$$

と単純にコンバータの入力インピーダンスが、ゲインと抵抗負荷 R のみによって決まる。この式にデューティ比 D を用いて表すと、

$$R' = R \times \frac{(1-D)^2}{D^2} \quad \dots(7)$$

$$\text{ただし} \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} = \beta \quad \dots(8)$$

このデューティ比を変化させることで、PV モジュールの出力に接続した負荷状態を変化させ MPPT 制御のシミュレーションを行う。デューティ比を変化させたときの入力インピーダンスの変化を図 2 に示す。ただし抵抗負荷は 40 Ω とした。また、デューティ比 0~1 を 1430 分割にして制御を行った。



図 2. コンバータの模擬

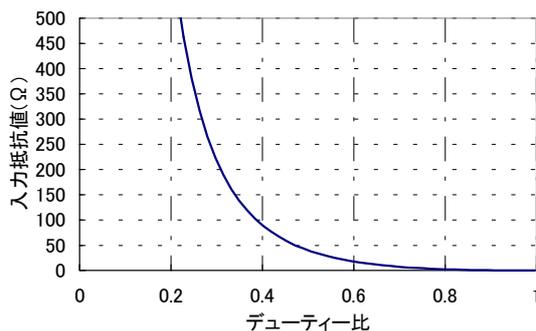


図 3. デューティ比による入力抵抗値変化

2. 2 MPPT 制御

山登り法では、2 点の電力点を検出し、これらと比較することで P_{max} 点に動作点をずらしていく。この制御フローチャートを図 4 に示す。MPPT 制御は開放状態からスタートし、現在の動作点における電力 P_1 を検出する。次にデューティ比を $d/1430$ ずらし、電力 P_2 を検出

する。これら 2 点の電力点を比較し、 $P_1 > P_2$ のときデューティ比を $dm/1430$ だけ小さくし、 $P_1 < P_2$ のときデューティ比を $dp/1430$ 大きくする。これらの動作を繰り返すことで動作点を P_{max} に近づけていく。

次に、 d 、 dm 、 dp の値の選定方法について述べる。これらの値が適切でないと、大きな MPPT ミスマッチ損失を生じさせることになる。日射変動が激しいデータを用い、 $d=5$ における dp 、 dm を変化させたときの K_{PM} の変化を図 5 に示す。 $dm=13$ のとき、 dp を 2~14 の間で変化させると、 K_{PM} 値は 81.6%~91.5% の間で変化する。そこで、今回のシミュレーションでは、日射変動がほとんど無い日(晴天)と、日射変動が激しい日の 2 日のデータから、 d 、 dp 、 dm の値を選定した。それぞれの値は晴天時の K_{PM} が 99.5% 以下にならないようにし、またそのとき日射変動が激しい日での K_{PM} が最高値を示す値とした。このようにして、 $d=5$ 、 $dp=7$ 、 $dm=17$ とし、シミュレーションを行う。

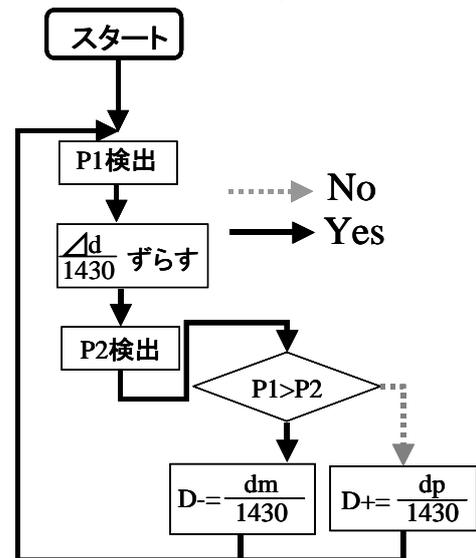


図 4. 2 点電力検出法

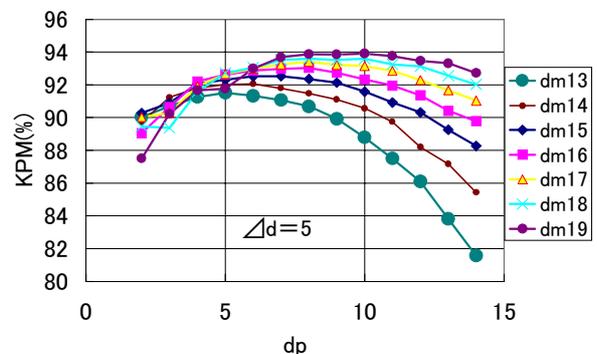


図 5. 各パラメータによる K_{PM} 変化

2. 3 日射変動の定量化

日射変動による K_{PM} 変化を評価するため、日射変動成

分だけを対象とし、以下の式を用いて日射強度の絶対量から区間幅 $m = 13$ の移動平均の差分で処理し、日射変動成分を抽出した⁵⁾。

$$F_i = G_i - \frac{1}{2m+1} \sum_{i=-m}^m G_i \quad \dots(9)$$

そして、以下の式で標準偏差を求め、それを日射変動度として定量化した。

$$\sigma(F_i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}_i)^2} \quad \dots(10)$$

日射変動抽出例を図6に示す。

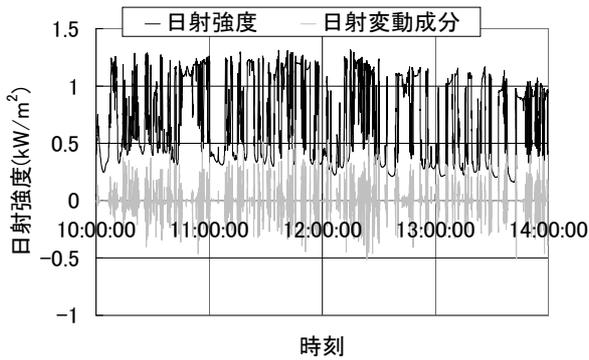


図6. 日射変動成分抽出例

3. シミュレーション結果

シミュレーションに使用した日射データは、電子技術総合研究所にて測定した87年3月~90年4月の期間を使用した。その間日射データに不備がある日は除いた。これらのデータを基に計算した日射変動度と K_{PM} 値は全て、太陽光発電システムのkW値が問題となる時間帯に着目し、各10時~14時の期間を用いた。

MPPT制御の電力検出サンプリング周期は1(s)をメインに評価を行った。その理由として、住宅用に普及されているインバータでのMPPT制御動作周期が1sのものがあるためである(ただし、制御法は各メーカー独自の方法と思われる)。また、サンプリング周期1(s)以下でもシミュレーションを行った。

3.1 サンプリング周期1(s)

サンプリング周期1(s)でシミュレーションを行った。日射変動度 - K_{PM} 関係を図7に示す。日射変動が大きくなるにつれ、 K_{PM} が減少しているのが分かる。全てのデータの中で、 K_{PM} 最大値は99.67%、 K_{PM} 最小値は91.48%であり、日射変動によってMPPTミスマッチ損失が生じているのが分かる。次に、日射強度 - アレイ発電電力特性を図8に示す。日射変動が激しい日(日射変動度

0.10kW/m²)と、そうでない日(日射変動度0.16kW/m²)を示している。日射変動の小さい日では日射強度 - アレイ電力特性が比例分布しており、アレイ出力は P_{max} を出力している。一方日射変動が大きい日では不規則な分布を示し、この P_{max} からのずれがMPPTミスマッチ損失となっているのが分かる。また、図7では、日射変動度が小さいとき(例えば日射変動度0.1)でも K_{PM} 値が92.6%と低い値を示す日もあった。低い値を示した日は天候が悪く、一日中日射強度が低い(0.2kW/m²以下)ためと考えられる。この日の日射強度変化を図9に示す。これらのことを考慮に入れると、日射変動によってMPPTミスマッチ損失が生じているといえる。

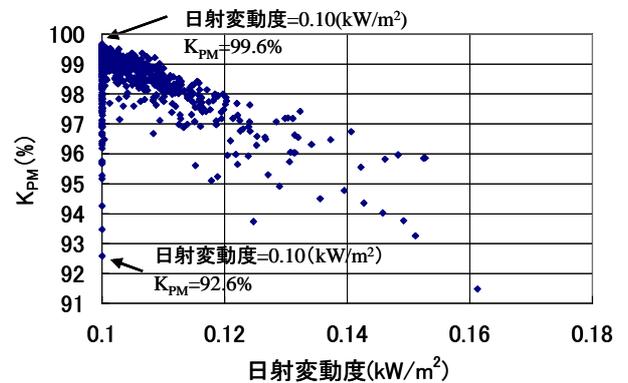


図7. 日射変動と K_{PM} の関係

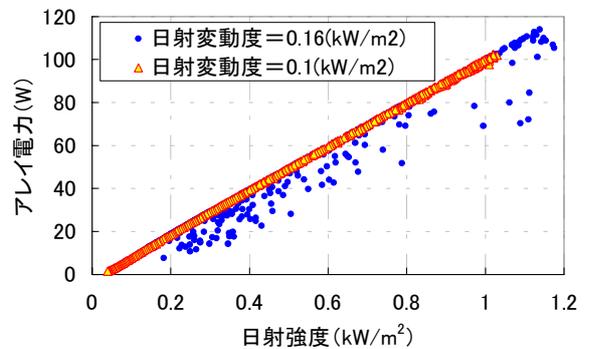


図8. 日射強度 - アレイ発電電力特性

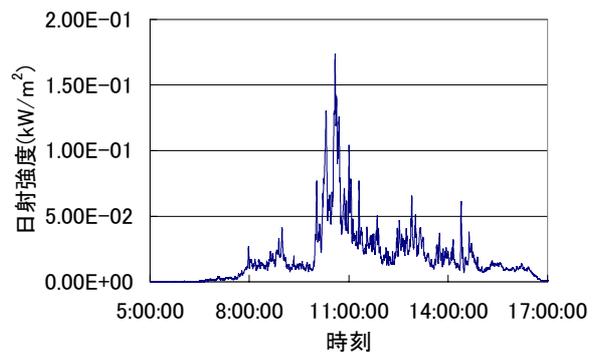


図9. 日射変化の様子

3.2 サンプルング周期 1(s)の月別変化

次に、 K_{PM} 値を月別にまとめる。88年と89年のデータで、月別にまとめた K_{PM} 平均値の変化と、月別にまとめた日射変動度平均を図 10 に示す。これより、88年、89年とも8月、9月の K_{PM} 値が他の月と比べ減少している結果が得られた。これは、日射変動平均も月によって大きく異なり、88年、89年ともに8月の日射変動平均値がもっとも高く、次に9月が高かったため、各年とも8月、9月の K_{PM} 値が悪かったと考えられる。

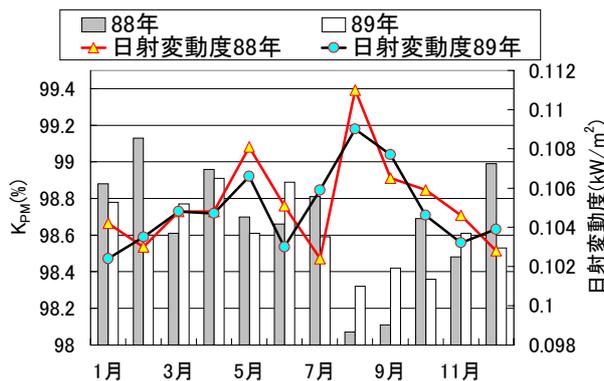


図 10. 月別 K_{PM} 平均値

3.3 サンプルング周期 1(s)以下

サンプルング周期 1s では、日射変動が MPPT ミスマッチ損失に影響を与えた。次に、サンプルング周期を 1(s) 以下でシミュレーションを行った。各サンプルング周期は、0.2(s)、0.1(s)、0.05(s)である。その結果を図 11 に示す。ただし、日射変動が小さい場合には K_{PM} の低下はほとんど無いため、日射変動度最大から順に 120 日分のデータを使用し、その結果を示している。サンプルング周期を下げると、MPPT 制御ミスマッチ損失が減少していくのが分かる。各周期における 120 日分の K_{PM} 平均値を表 1 に示す。1(s)での平均値は約 97%であったが、0.05(s)では平均約 99.5%となった。サンプルング周期を下げることで、MPPT ミスマッチ損失を減少できるといえる。

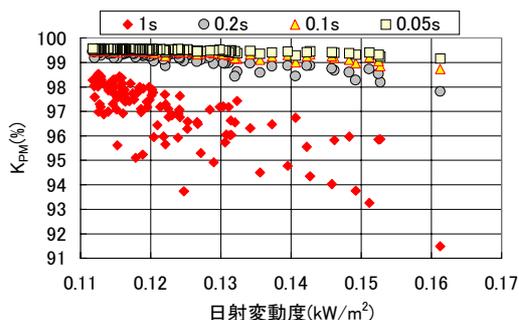


図 11. 各サンプルング周期での日射変動度と K_{PM} の関係

表 1. 各サンプルング周期における K_{PM} 平均値

周期(s)	1	0.2	0.1	0.05
K_{PM} 平均(%)	97.0	99.2	99.4	99.5

4. まとめ

日射変動における MPPT 制御ミスマッチ損失について日射変動を定量的に表し、シミュレーションにより評価を行った。MPPT 制御ミスマッチ損失は、サンプルング周期 1(s)で動作しているとき日射変動に大きく依存することが分かった。また、サンプルング周期を下げていくと、MPPT ミスマッチ損失は減少していった。サンプルング周期 0.05(s)で、平均 99.5%以上の MPPT 効率を得ることができる。

今回のシミュレーションでは、コンバータの出力に抵抗負荷を接続させた場合で行ったが、抵抗負荷ではなく、系統連系や負荷変動させると MPPT ミスマッチ損失はさらに変わると思われる。今後、負荷を変動させるなどし、さらなる MPPT 制御ミスマッチ損失の原因・実態を探る。

参考文献

- 1) Kurokawa et al., "Realistic PV performance values obtained by a number of grid-connected systems in Japan", North Sun '99, the 8th International Conference on Solar Energy in High Latitudes, 1999
- 2) 大谷、他「住宅用太陽光発電システムの運転特性評価」、電気学会 新エネルギー・環境研究会「再生エネルギー」、2000
- 3) 黒川、若松、共著、「太陽光発電システム設計ガイドブック」、オーム社
- 4) 大西、他「太陽電池の最大出力制御方式の比較と昇降圧チョッパ回路を用いた制御特性」、T.IEE Japan, Vol.112-D, No.3, '92
- 5) 箕輪、他「地域内における集合日射の変動抑制効果」、平成 9 年日本太陽エネルギー学界・日本風力エネルギー協会合同研究発表会、1997