

蓄電池付き太陽光発電システムの評価方法の開発

学生員 大関 崇 (東京農工大学)
会員 大谷 謙仁 (産業技術総合研究所)

小泉 裕孝 (東京農工大学)
会員 黒川 浩助 (東京農工大学)

An Evaluation Method of Grid connected Photovoltaic with battery Systems

Takashi OOZEKI*, Hiroataka KOIZUMI*,
Kenji OTANI**, and Kosuke KUROKAWA*

*Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT)
Naka-cho, Koganei, Tokyo, 184-8588 Japan
E-mail: kurochan@cc.tuat.ac.jp,
Phone: +81-42-388-7132, Fax: +81-42-385-6729

** National Institute of Advanced Industrial Science and
Technology (AIST)
AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki
305-8568 Japan

ABSTRACT

The Authors have already developed a Sophisticated Verification Method (SV method) for PV systems, which is a simple evaluation method to identify eight kinds of system loss rates using basic information and simple four monitored data. In this paper, operation statuses of the grid connected PV with battery system can be estimated by using monitoring data, which are system output and array output.

キーワード：太陽光発電システム, 評価, SV 法,
蓄電池付き太陽光発電システム, 蓄電池
Keywords: Photovoltaic Systems, Evaluation,
the SV method, the Battery PV system, Battery

1. はじめに

21 世紀, PV はポテンシャルを考えると, まだまだ乳児期から幼児期に差し掛かったところではあるが, 導入期から普及期への遷移する段階である。今後のさらなる大量普及には, 技術開発によるシステムコストの大幅な削減と同時に, 系統連系による売買電の制度設計によるところが大きいと考えられる。しかしながら, ある地域に大規模集中的に PV システムが導入された場合, 系統連系への弊害が懸念されており, 普及への足かせになる可能性がある。特に PV システムの配電系統への集中連系による系統電圧の上昇, 高調波の冗長, 単独運転の誤動作などが懸案事項として挙げられており, 平成 14 年度から新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)では, 「集中連系型太陽光発電システムの実証研究」が開始された。この実証研究では, 数百件の PV システムを実系統に集中的に連系させ, 系統への影響を緩和する技術開発が目的とされている。その中には, 電圧上昇抑制制御による出力抑制回避技術の一つとして, 蓄電池付き PV システムが提案されている。蓄電池付き PV システムは, 逆潮流などにより, 系統電圧が上昇し, パワーコンディショナのもつ電圧上昇抑制制御による抑制電力分を蓄電池に蓄えることにより, 損失を抑えることができると考えられている。他に

も停電時のバックアップ電源への利用や, 出力変動の抑制などにも効果があるとされており, 今後蓄電池付き PV システムは, 普及する可能性を秘めている。

2. 目的

本研究では, 評価結果のフィードバックを利用して設置・施工に利用でき, また運用管理する上で最も重要な故障診断方法として活用することができる, "PV システムの損失を分離・評価"することを主目的としており, PV システムの計測データを用いた, 簡易的な損失分離可能な評価方法として, SV(sophisticated Verification)法を開発してきた。本報告では, 今後普及が見込まれる, 蓄電池付き PV システムの評価方法として, SV 法の拡充を目的とした。模擬電源を用いた蓄電池付き PV システムの実測および, シミュレーション[1]を利用して, アレイ出力電力量および, システム出力電力量を主体とした, 運転データより, システムの運転モードを分離する方法の検討を行った。

3. SV 法の概要

SV 法は, システムの基礎情報(緯度・経度・傾斜角など)をもとに, 比較的簡単に計測可能である 4 つのデータを用いて, 8 種類のシステム損失割合を抽出することのできる評価方法である。必要計測データ・損失過程は以下の通りである。また, 前処理として必要データを推定補間・計測日射量データの品質を診断することができる。

～計測データ～

傾斜面日射量	: H_A [kWh/m ²]
アレイ出力電力量	: E_A [kWh]
システム出力電力量	: E_P [kWh]
モジュール温度	: T_C []

～損失過程～

日陰による損失
入射角依存性による損失
温度の影響による損失
負荷整合による損失
直流回路による損失
汚れ・劣化・定格容量誤差などによる損失
パワーコンディショナスタンバイ損失
インバータによる損失

4. SV 法解析

SV 法では, 経験にもとづく妥当な仮定により作成したモデルを導入することにより, 損失を分離可能としている。各モデルとサイトごとの計測データを用いて, 1 ヶ月間の各損失量算出モデルを構築することが SV 法の本質である。1 ヶ月の損失算出モデルを用いて, 1 時間値データの損失量を求めていく。日陰・入射角依存性以外の損失に

関しては、1 時間値ごとに損失算出モデルがあるため、前者の損失率とあわせ損失を分離していく。

5. 蓄電池付き PV システムへの拡充

SV法の蓄電池付きPVシステムへの拡充の検討を行った。SV法では、4 点の計測項目から損失を分離することがメリットとなっているため、計測項目を増加させない状態での評価方法を検討した。特に蓄電池直後の電力量の測定がないため、蓄電池の充放電電力量(E_B)の推定方法が重要となる。

5.1 シミュレーションによる検討

本研究室では、PV 模擬電源による蓄電池付き PV システムを利用して、シミュレーション手法を開発している[1]。このシミュレーションを利用して、運転モードの判別を行った。シミュレーションの日射量データは、千葉県にて 6 秒サンプリングで実測している水平面日射量データを 1 分値積算して用いた。また、負荷データには、JQA (JET が継続)/AIST での全国住宅 100 件モニタリングデータをそれぞれランダムに 6 日間選び出した。Figure 2 に代表的な日にちのシミュレーション結果を示す。Figure 1 には、シミュレーションを行ったシステムの構成図を示す。

5.1.1 運転モードの推定

蓄電池付きPVシステムは、蓄電池の充放電を行うために、PVと系統との関係により、運転モードが多彩となる。主な運転モードをTable 1 に示す。また、それぞれの運転モードにおける、SV法での計測点のうち主に、日射量(H_{Ag})、アレイ出力電力量(E_A)とシステム出力電力量(E_P)の極性の組み合わせも同時に示した。 H_{Ag} と E_A の関係は、蓄電池無しシステムでも同様な関係であるため、従来のSV法と同様に扱うことができる。また、 E_A と E_P のみでの判断の場合、「PVのみから供給」、「PVから充電と供給」、および、「PVと蓄電池から供給」が同じ状態となる。ここで、供給とは、インバータ回路への入力を示す。 E_A と E_P が共に正となる 3 つの状態での、 E_A と E_P との比($\eta_{AP} = E_P / E_A$)に着目すると、この場合は、通常の運転状態と同様であるため、通常のインバータ効率程度の値となる。この場合は、PVが充電と供給を行うため、実質インバータに与えられるのは、PVが発電したものより少なくなる。そのため η_{AP} は、インバータ効率カーブより小さくすると予想される。同様に、PVと別途蓄電池からの供給があるため、インバータには E_A に上乗せされたバッテリー出力電力量(E_B)があるため、 η_{AP} は、通常のインバータ効率よりも大きな値を示す。この特性を用いて、 η_{AP} にしきい値を設定し、 E_A 、 E_P の特性が重複した運

転モードを推定する。他のモードに関しては、 E_A 、 E_P の極性及び関連性から把握が可能である。

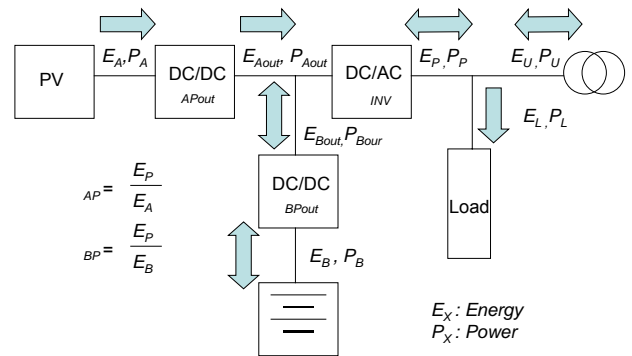


Figure 1: Schematic diagram of the system and energy flow

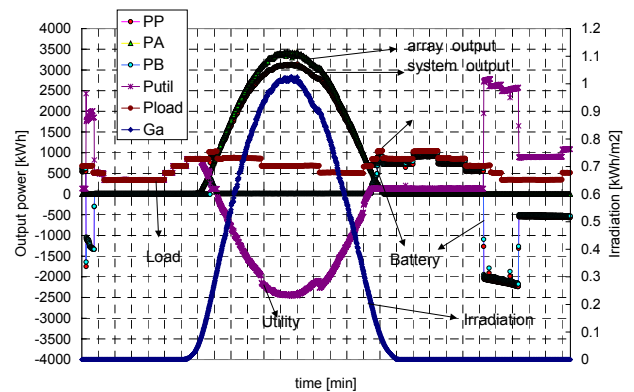


Figure 2: Example of simulation result

5.1.2 運転モードの推定条件

今回用いた蓄電池付きPVシステム仕様には、制御上、Table 1 内に示す網掛けの運転状態しかないため、4 つの運転モードに関して検討を行った。それぞれの条件は、equation 1 ~ 4 の通りである。ここで、 $\eta_{AP} = E_P / E_A$ による分離には、しきい値が必要となる。「PVのみの供給」の場合は、通常運転なので、インバータ効率カーブ以上にはならないため、効率曲線ごとに最大値とすれば、間違いはない。しかしながら、「PVと蓄電池からの供給」もその出力の関係により η_{AP} は、 η_{AP} のバンド幅が重複する。ここが、2 点の計測箇所では、識別できない不感帯となることが分かる。この条件をequation 5 ~ equation 8 に示す。それぞれの η_x は、負荷率 (出力/定格出力)で、各々決定されるため、PV、バッテリー手前のDC/DCコンバータの定格、及びインバータ定格と瞬時の出力に依存することが分かる。定格は、固定値であるが、瞬時の出力と効率曲線の関係は、その負荷率の頻度分布に大きく依存する。また、equation 7 より、前半の項は、 E_A のみがインバータに入力された時の効率を表している。後半は、蓄電池からのみの入力時の効率を表しており、 E_A に対する E_B の出力比が効率のある点を上回る条件となっている。効率曲線は、負荷率により、0% ~ 96%と振幅があり、 α を固定値した場合は、不感帯を除くことが出来ないことが分かる (Figure 3)。そのため、全サイトに共通な最適値 α を一元的に決定することは困難である。Figure 5 には、

Table 1: Operation statuses of the grid connected PV with Battery system

operation status	Irradiation	Array output	system output	Ratio between array output and system output
number	H_{Ag}	E_A	E_P	η_{AP}
Supplied by PV	+	+	+	same as normal value
Charged by PV	+	+	0	$E_P = 0$
Supplied and charged by PV	+	+	+	Low value
Supplied by PV and battery	+	+	+	high value
Supplied by battery	0	0	+	$E_A = 0$
Charged by utility	0	0	-	$E_A = 0$
Charged by PV and utility	+	+	-	E_P is minus

equation 7 より, PV側のDCDCコンバータの負荷率と, バッテリー側のDC/DCコンバータの負荷率を変更して, しきい値 $\alpha = 1.0$ における η_{AP} を計算したものである。条件より, この図内のマイナスになる領域が不感帯になることを示している。

PVのみ供給
 $E_A > 0, E_P > 0, \beta < \eta_{AP} < \alpha$ equation 1

PVと蓄電池から供給
 $E_A > 0, E_P > 0, \eta_{AP} \geq \alpha$ equation 2

PVと蓄電池から供給
 $E_A = 0, E_P > 0$ equation 3

系統から充電
 $E_A = 0, E_P < 0$ equation 4

$\frac{E_P}{E_A} = \eta_{AP} \geq \alpha$ equation 5

$E_P = (E_{Aout} + E_{Bout}) \cdot \eta_{INV}$ equation 6

$\eta_{APout} \cdot \eta_{INV} + \frac{E_B}{E_A} \cdot \eta_{BPout} \cdot \eta_{INV} \geq \alpha$ equation 7

$\frac{E_B}{E_A} \cdot \eta_{BPout} \cdot \eta_{INV} \geq (\alpha - \eta_{APout} \cdot \eta_{INV})$ equation 8

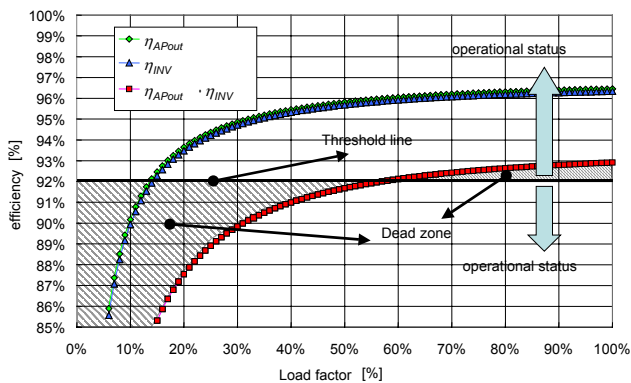


Figure 3: Schematic diagram of the relation between operation status and threshold value and efficiency curve

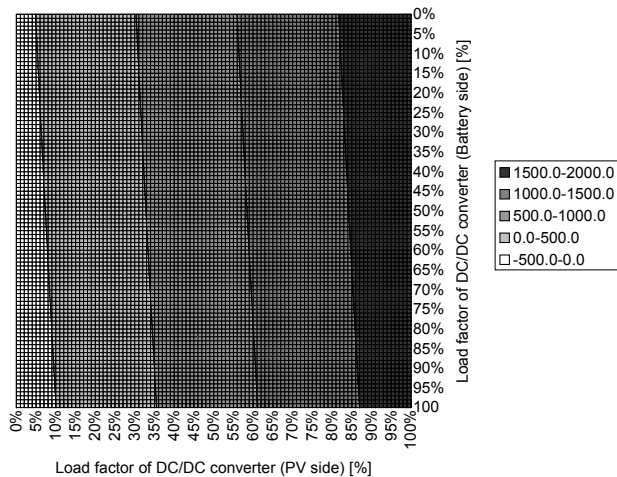


Figure 4: Relation between η_{AP} with load factor at threshold line (α) 1.0

5.1.3 シミュレーションデータによる検討

運転モードの推定手法について, シミュレーションデータを用い, しきい値を変更して検討を行った。Table 2 には, システムの主要諸元を, Figure 5 には, シミュレーションに組み込まれているそれぞれの変換機器の効率曲線を示す。Figure 6 は, しきい値を変数に推定した運転モードの回数(1分サンプリング)を理論と比較した結果である。Figure 7, それぞれの積算エネルギー量で示したものである。効率曲線がフラットになる場所が存在するため, 最適値前後で大きく変動していること分かる。最適値以上は, 蓄電池との並列運転回数に依存するが, 緩やかな変化になった。Figure 6~7 より, 今回のケースにおける固定しきい値は, 0.935 が最適値となり, 理論値との差は, 回数にして, 3 / 2073 回, 積算エネルギー量では, $E_A = 103/52107$ [Wh], $E_P = 92/48440$ [Wh], $E_B = 23/415$ [Wh]であった。

Table 2: Specification of system simulation

facility	rating	remark
PV rate	3.7kW	I-V curve simulator
Inverter rate	4.5kW	-
Battery capacity	8.96kWh	2kW max output

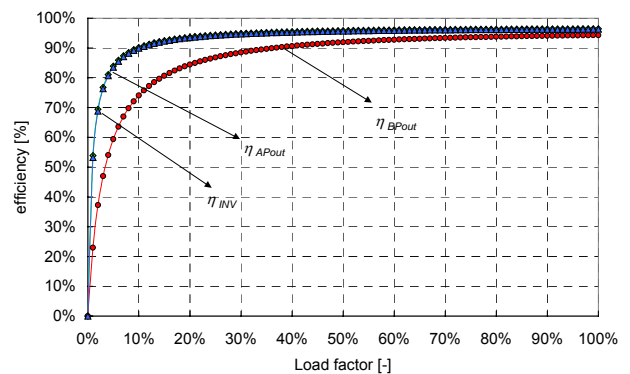


Figure 5: Efficiency curve of DC/DC converter and Inverter in the simulation

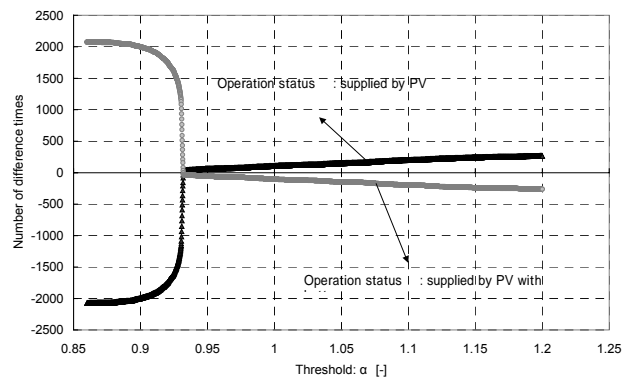


Figure 6: Number of difference times every threshold.

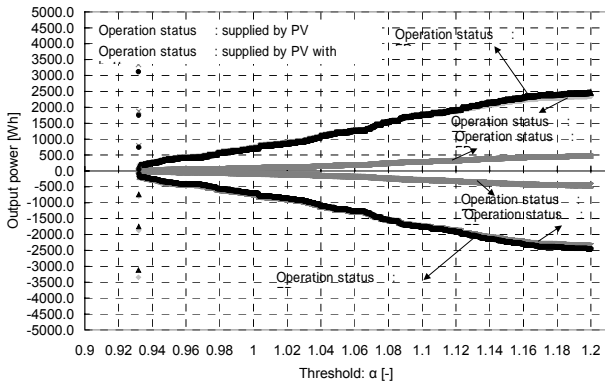


Figure 7: Difference of output power between theoretical data and estimated data

5.1.4 効率曲線を用いた運転モード推定

5.1.4.1 効率曲線の推定

しきい値は固定値のままでは、限界があり、最適値前後での高感度な精度変化があるため判定も困難となる。負荷率ごとの効率曲線にあわせてしきい値を利用することが望まれる。そこで、 E_A 、 E_P のデータを利用して、PVのみ運転時の $\eta_{AP} = E_P / E_A$ を推定する方法の検討を行った。固定しきい値で抽出したデータ群を用いて、equation 9の最小自乗法により近似を行った。しきい値には、0.93~1.0 (0.01 刻み)を用いた。負荷率 0.1~0.5 における実測と推定の効率曲線の絶対誤差の結果をFigure 8に示す。しきい値 0.930は特性が異なるが、固定しきい値での運転モード推定による誤差の関係でデータ数が他と比べて小さいことが影響している。一般性を持たせるために、固定しきい値には、1.00を用いても、効率にして、絶対誤差で0.002~0.008程度で抑えることができた。

$$\eta_{APout} \cdot \eta_{INV} = \frac{E_P (PVのみ)}{E_A} = \frac{x}{A \cdot x^2 + B \cdot x + C} \quad \text{equation 9}$$

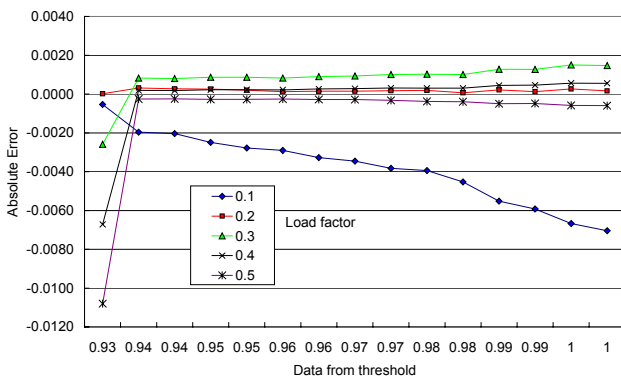


Figure 8: Absolute error for efficiency power conditioner every load factors

5.1.4.2 効率曲線の推定

推定した効率曲線をしきい値として、運転モードの推定を行った。 $\eta_{AP} = E_P / E_A$ の値が効率曲線付近のデータをPVのみ運転とみなすために、許容幅の設定必要となる。許容幅を±0.1%~20%、0.1%刻みで検討を行った。Figure 9には、各固定しきい値から推定した効率曲線と許容値1%~2.5%の条件における、推定モード(PVから供給)の理論値と回数の誤差を示す。

1%以下の場合には、感度が強く、誤差が大きくなった。また、0付近が良く推定出来ているが、効率曲線の値によって、幅の検討が必要である。約2000回のうちの数回程度の誤差に抑えることが可能となる。

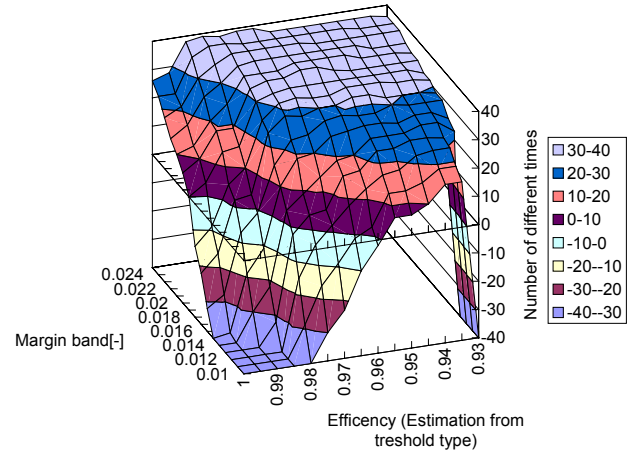


Figure 9: Number of difference times between theoretical data and estimated data by using efficiency curve

5.2 蓄電池出力の推定

SV法による損失分離を行うためには、運転モードの推定と併せて、蓄電池出力電力量(E_B)の推定が必要となる。そこで、 E_A と E_P の値から、 E_B の推定を行った。 E_A から E_P への効率曲線の推定値を利用して、equation 10, 11にデータの関係を示す。equation 11より E_B 直接ではないが、 E_P に含まれる E_B 分の分離を可能とした。蓄電池回路側の効率曲線が分かれば推定が可能となる。

$$E_P = (E_A \cdot \eta_{APout} + E_B \cdot \eta_{BPout}) \cdot \eta_{INV} \quad \text{equation 10}$$

$$E_B \cdot \eta_{BPout} \cdot \eta_{INV} = E_P - E_A \cdot \eta_{APout} \cdot \eta_{INV} \quad \text{equation 11}$$

6. まとめ

本研究室で開発してきたSV法の蓄電池付きPVシステムの評価手法の拡充として、 E_A と E_B のデータから、運転モードの推定および、 E_B の推定方法の検討を行った。運転モードの E_A 、 E_P の時系列の極性により大きな分類および、 E_P / E_A の値のしきい値設定による方法を提案した。また、効率曲線を推定する方法の組み合わせにより、1%程度で運転モードの推定を可能とした。今回は、シミュレーションによる1分瞬時値データによる検討であったが、実際は、1時間値など積算量を利用するため、積算ベースでの運転モードの混在など考慮した手法を開発し、蓄電池付きPVシステムに対応したSV法の完成を目指す。また、NEDOの委託研究における「集中連系型太陽光発電システムの実証研究」での太田市における実測データを利用して、手法の妥当性を確認し、SV法による評価を行う。

謝辞

本研究は、NEDOの委託研究「集中連系型太陽光発電システムの実証研究」の一環として実施している。関係者各位に感謝する。

参考文献

[1] 嶋田,黒川他「蓄電池あり系統連系太陽光発電システム」,平成15年度電気学会B部門大会