

直・並列接続された出力不均衡な太陽電池と

電力変換器の損失解析

鈴木一生* 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Losses Analysis of Series/Parallel-Connected Photovoltaics and Converters with Unbalanced Outputs.

Issei Suzuki, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

Abstract

This paper presents analysis results of series/parallel-connected photovoltaics and converters with unbalanced outputs. It has widely been known that unbalanced outputs of the series/parallel connected photovoltaics cause less total output of the photovoltaics power generation system. Some past works report that photovoltaic-and-converter modules with individual MPPT function are the most effective to reduce the unbalanced output losses. However, it is indispensable to take power conversion losses into account in such photovoltaic-and-converter module systems because there is a trade off relationship between the unbalanced output losses and the power conversion losses. In this paper, four possible combinations of series/parallel connection using two photovoltaic simulations were discussed, and it has been confirmed that the series connected module system was the most efficient to minimize both losses.

キーワード：太陽電池，出力不均衡損失，電力変換損失，損失解析，最適多重化

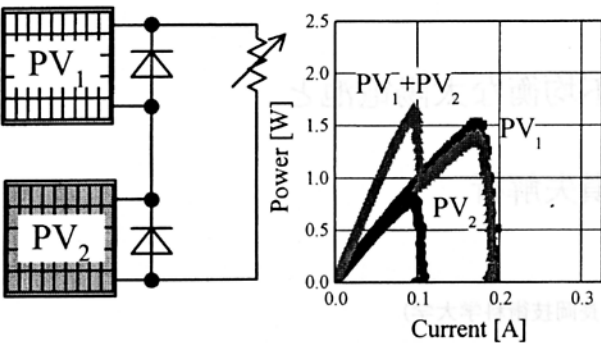
(Photovoltaic, unbalanced outputs losses, converter losses, losses analysis, optimum multiple connection)

1. はじめに

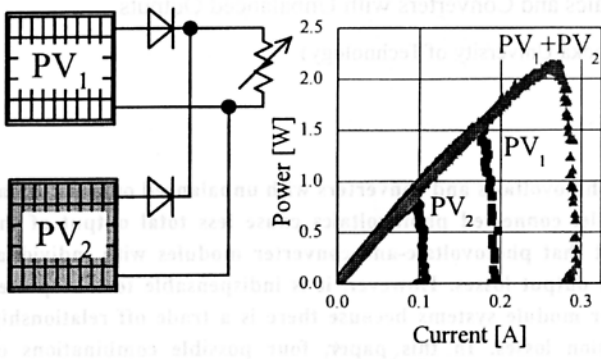
太陽電池 (Photovoltaic:PV) は住宅用PVに代表されるように、その適用範囲は年々拡大している。それに伴いPVモジュール自体の効率のもとより、太陽光発電システム全体の効率を改善することも急務となっている。従来は、電力変換器で一括してPVアレイの最大出力制御を行うため、屋根の形状によるPVの配置や設置台数の制約、部分陰の影響によって、PVアレイに出力不均衡が生じた場合、本来発電可能な各PVの最大出力が得られなかった^[1]。その解決策として、個々のPVに小型電力変換器を実装して最大電力追従制御 (Maximum Power Point Tracking:MPPT) を行い、出力不均衡損失を低減する手法が提案されている^{[2], [3]}。しかし、PVを個別に制御して出力不均衡損失を低減しても、多数の電力変換器を実装するため、電力変換損失について検討しなければ総合効率の観点から最適なシステムを構築できない。そこで、出力不均衡なPVと電力変換器の最適多重接続を検討するために、2つのPVを用いた簡単なシステム構成を想定し、出力不均衡損失と電力変換損失に着目して実験的に損失解析を行ったので報告する。

2. システム損失

〈2.1〉出力不均衡損失 出力不均衡損失 P_{PV_Loss} の発生原理をFig. 1(a), (b)に示す。Fig. 1(a)の回路では、 PV_1 , PV_2 が直列接続されている。 PV_2 に部分影が生じ、 PV_1 と PV_2 の最適動作電流 I_{OP_PV1} , I_{OP_PV2} に差異が生じた影響で電力極大点が2つ発生し、 PV_1 と PV_2 が発電可能な最大電力の総和を得ることができない。このPVの直列接続における I_{OP_PV1} , I_{OP_PV2} の差異により生じる損失を、ここでは P_{PV_Loss} と表記する。一方、Fig. 1(b)の回路では、 PV_1 , PV_2 が並列接続されている。 PV_2 に部分影が生じ、 PV_1 と PV_2 の最適動作電流に差異が生じて、それらの電流の和が負荷抵抗に出力され、 P_{PV_Loss} が生じることはない。ただし、(b)はPVの並列接続であるため、 PV_1 と PV_2 の最適動作電圧に差異が生じた場合は P_{PV_Loss} が生じる。ここで、Fig. 1(a)で用いているダイオードは、電流バイパスダイオードで、 PV_2 の短絡電流以上の電流が線路に流れたとき、 PV_2 が負荷となることを防止している。また、Fig. 1(b)で用いているダイオードは、並列接続された PV_1 と PV_2 に電流が逆流するのを防ぐために用いている。



(a) Series connected PVs.



(b) Parallel connected PVs.

図1 出力不均衡損失

Fig.1. Unbalanced output PVs losses.

<2. 2> 電力変換損失 ここでは、電力変換損失 P_{Conv_Loss} の発生原理を示す。PVはFig. 2に示すように内部抵抗 R_{PV} をもっている。この内部抵抗 R_{PV} と負荷抵抗 R_{Load} が一致するときPVは最大電力を出力することができるが、 R_{PV} は日射、温度により変動し、 R_{Load} も変動することがある。このため、電力変換器を等価的に可変抵抗 R_{Conv} として制御することにより、 R_{PV} と R_{Load} を整合させMPPTを達成する。実験では昇圧チョップを用いてMPPTを行うため、 $R_{Load} > R_{PV}$ となる負荷抵抗を選定している。Fig. 2のシステムにおいて状態平均化法を用いて、電流連続モードにつき、定常状態のリアクトル電流 I_L 、出力電圧 V_O を定式化すると(1)のようになる^[4]。ここで、 R_{Conv} は昇圧チョップの等価内部抵抗であり、(2)で表される。また(1)で V_O を V_{PV} の式に書き直し、 I_L に代入すると(3)が得られる。(3)を(4)に代入し D' について求めると(5)となる。(5)で R_{PV} と R_{Load} の差が大きくなれば、 D' は0に近づく。 D' が0に近づけば(6)より P_{Conv} が増加する。

ここで、 r_s , r_D , r_L はそれぞれスイッチング素子のオン抵

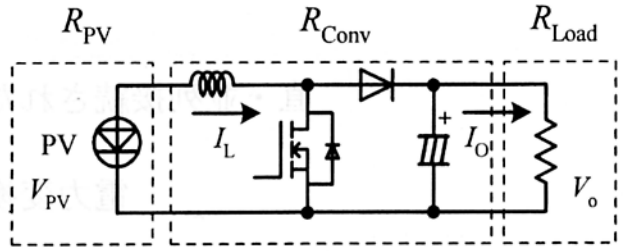


図2 昇圧チョップ

Fig. 2. Boost chopper.

$$\begin{bmatrix} I_L \\ V_O \end{bmatrix} = \frac{1}{D' 1 + R_{Conv}/R_{Load}} \begin{bmatrix} 1 \\ R_{Load} D' \\ 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

$$R_{Conv} = \frac{D'(r_D - r_s) + (r_s + r_L)}{D'^2} \dots \dots \dots (2)$$

$$I_O = I_L D' \dots \dots \dots (3)$$

$$I_L^2 R_{PV} = I_O^2 R_{Conv} + I_O^2 R_{Load} \dots \dots \dots (4)$$

$$D'^2 = \frac{R_{PV}}{R_{Conv} + R_{Load}} \dots \dots \dots (5)$$

$$P_{Conv_Loss} = I_O^2 R_{Conv}$$

$$= V_{PV}^2 \frac{D'(r_D - r_s) + (r_s + r_L)}{(R_{Load} D'^2 + D'(r_D - r_s) + (r_s + r_L))^2} \cdot (6)$$

抗、ダイオードの順方向抵抗、リアクトルの損失抵抗を表す。また、 D' はスイッチング素子のオフ期間デューティである。

<2. 3> 損失解析方法 Fig. 3に損失解析例を示す。PV₁、PV₂が個々に発電可能な最大出力電力である P_{Max_PV1} と P_{Max_PV2} の総和がPVから取り得る電力の限界である。PV₁、PV₂の直列接続時に、最適動作電流に差異があれば P_{PV_Loss} が発生する。また、MPPTを電力変換器で行う際、 R_{PV} と R_{Load} の差があるほど、電力変換器の D' は小さくなり P_{Conv_Loss} が発生する。これらの残りが最終的に負荷抵抗に取り出せる電力となる。このように、損失解析は P_{PV_Loss} と P_{Conv_Loss} の2つに焦点を当て、Fig. 3に示した3つの測定点で電力を測定して行う。 P_{PV_Loss} 、 P_{Conv_Loss} は(7)、(8)より算出する。また、(9)は全効率を表しており、右辺第1項はPV取得効率、第2項は電力変換効率に相当する。

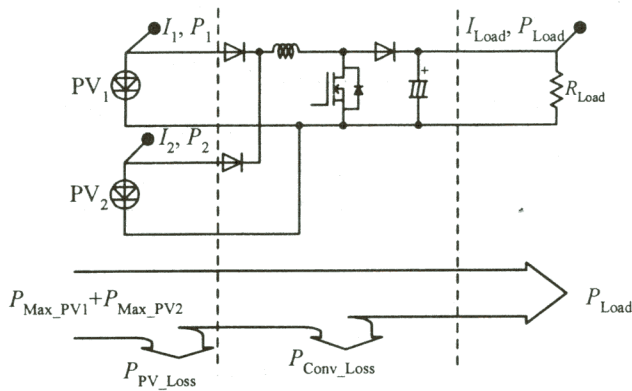


図3 損失解析例

Fig. 3. Example of losses analysis.

$$P_{PV_Loss} = (P_{Max_PV1} + P_{Max_PV2}) - (P_1 + P_2) \dots\dots\dots (7)$$

$$P_{Conv_Loss} = (P_1 + P_2) - P_{Load} \dots\dots\dots (8)$$

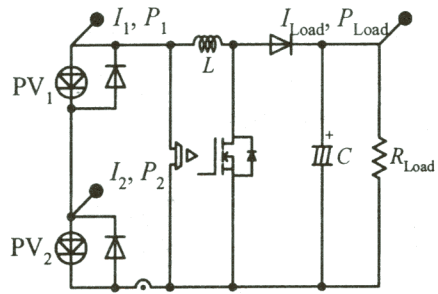
$$\frac{P_{Load}}{P_{Max_PV1} + P_{Max_PV2}} = \frac{P_1 + P_2}{P_{Max_PV1} + P_{Max_PV2}} \times \frac{P_{Load}}{P_1 + P_2} \dots\dots (9)$$

3. 実験システム概要

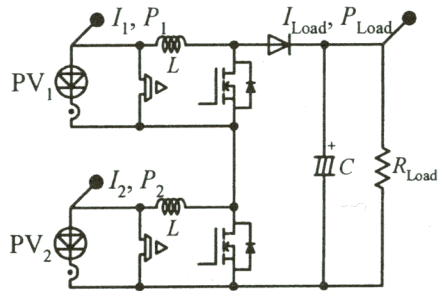
<3. 1> 主回路構成 Fig. 4 に本稿で検討する4種類の主回路構成を示す。(a)は直列多重接続されたPV₁, PV₂を1つの電力変換器で一括してMPPTを行う方式である。PV₁, PV₂それぞれの I_{OP_PV1} と I_{OP_PV2} に差異が生じた場合、 P_{PV_Loss} が発生し、PVから出力可能な最大電力を得ることができない。また、個々のPVに並列接続されたバイパスダイオードを必要とする。

(b)はPV₁, PV₂に個別にMPPTを行う電力変換器を接続し、それを直列多重接続した構成である。 I_{OP_PV1} と I_{OP_PV2} に差異が生じた場合も、電力変換器で個別にMPPTを行うため P_{PV_Loss} を低減することができる。PV₂の昇圧チョップのダイオードはPV₁のそれが兼ねているが、電力変換器が直列多重接続であるため、全体として電流通過素子数が増加し P_{Conv_Loss} が(a)に比べ大きくなると考えられる。

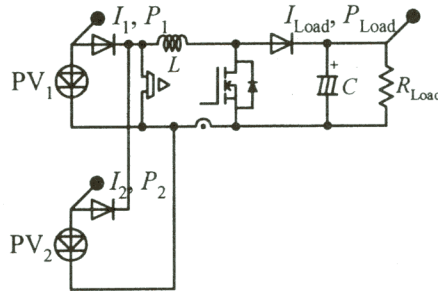
(c)は並列多重接続されたPV₁, PV₂を1つの電力変換器で一括してMPPTを行う構成である。PV₁, PV₂それぞれの最適動作電圧 V_{OP_PV1} と V_{OP_PV2} に差異が生じた場合、 P_{PV_Loss} が発生し、PVから出力可能な最大電力を得ることができない。今回の実験では、PVシミュレータを用いて実験を行っており、電流不均衡による損失のみを検討するため、意図的に V_{OP_PV1} と V_{OP_PV2} の差異を生じさせないように実験を行うため P_{PV_Loss} は生じない。同図のように各PVと直列にブロッキングダイオードが置かれる。



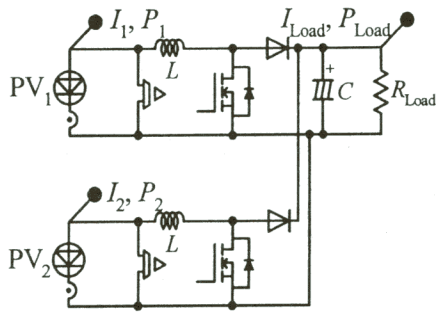
(a) Series connected PVs with single converter.



(b) Series connected PV plus converter modules.



(c) Parallel connected PVs with single converter.



(d) Parallel connected PV plus converter modules.

図4 主回路構成

Fig. 4. Main Circuit configurations.

Table 1. Circuit parameters.

平滑リアクトル L	608 (μH)
平滑コンデンサ C	680 (μF)
チョップスイッチング周波数	20 (kHz)
負荷抵抗 R_{load}	137 (Ω)

(d)はPV₁, PV₂に個別にMPPTを行う電力変換器を並列多重接続したものである。 $V_{\text{OP_PV1}}$ と $V_{\text{OP_PV2}}$ に差異が生じた場合でも、電力変換器で個別にMPPTしているので $P_{\text{PV_Loss}}$ は生じない。 $I_{\text{OP_PV1}}$, $I_{\text{OP_PV2}}$ の差異による $P_{\text{PV_Loss}}$ も並列多重接続であるので原理的に生じない。また、各昇圧チョップには出力ダイオードがあるため、ブロッキングダイオードを必要としない。

<3. 2> 実験条件 実験条件をTable.1 に示す。負荷抵抗 R_{Load} は昇圧によってMPPTが可能となるように、 R_{PV} よりも大きな値で、かつ昇圧チョップが電流連続モードで動作するように配慮した。

<3. 3> 最大出力制御方式 PVのMPPTには、一般的な山登り法を用いる。PVの電力-電流特性はFig. 5のようになり、電力の極大点を探索することから山登り法と呼ばれている。この手法は温度、日射が変化してPVの出力が変化した場合でも、逐次動作点を動かして最適動作点を探索するので高い環境適応能力をもっている。山登り法は、最適動作点の探索に長時間を要したり、出力不均衡時に複数の電力極大点が生じたときに、局所的な電力極大点でMPPTされてしまい、真の最大電力点に到達できないこともあるなどいくつかの欠点もある。今回はあらかじめ電力極大点分かっており、充分時間が経過し、最大出力点で制御された後に、損失解析のための電力を測定する。

<3. 4> PVシミュレータの指令値 PVの出力は時々刻々天候に左右され変化する。そこで、より再現性の高い実験を行うためフォワード形コンバータで作製したPVシミュレータを実験に用いた。Fig. 6はPVシミュレータの電力-電流特性(指令値)を示しており、1台で#1~#5の5通りの出力特性が得られる。Fig. 7(a)はFig. 4(a)の構成における出力特性(指令値)であり、 $I_{\text{OP_PV1}}$, $I_{\text{OP_PV2}}$ の差異によって電力極大点が2つできて $P_{\text{PV_Loss}}$ が発生する。Fig. 7(b)はFig. 4(c)の構成をとった場合の出力特性(指令値)であり、 $V_{\text{OP_PV1}}$, $V_{\text{OP_PV2}}$ の差異はもたせていないため $P_{\text{PV_Loss}}$ が発生しない。ここで、#1#2などと表記してあるが、これは2台のPVシミュレータのうち1台に#1の出力特性をもたせ、他方に#2の出力特性をもたせて多重化したことを示している。

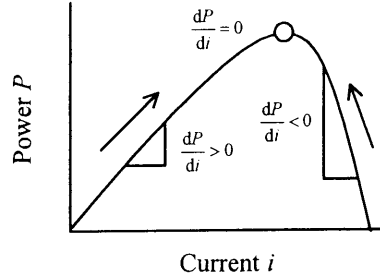


図 5 山登り法

Fig. 5. Hill climbing method.

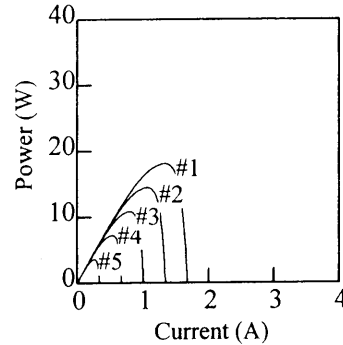
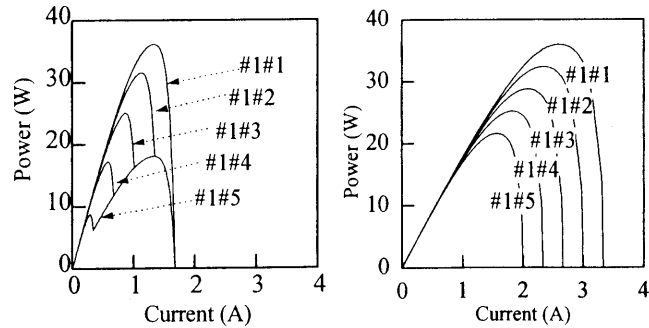


図 6 PV シミュレータ指令値

Fig. 6. PV simulator operation.



(a) Series connected PVs.

(b) Parallel connected PVs.

図 7 図 4 (a), (c) の PV シミュレータ指令値

Fig. 7. PVs simulator operation of Fig. 4(a) and (c).

4. 実験結果

<4. 1> 出力不均衡損失の特徴 主回路構成Fig. 4(a)~(d)における損失解析結果をFig. 8に示す。Fig. 8(a), (a')はFig. 4(a)における損失解析結果で、Fig. 8(a)はPV開放側から、Fig. 8(a')はPV短絡側からMPPTを行った場合を示している。Fig. 4(a)の構成では電力極大点が2つ存在するため、PV開放側からMPPTを行うか、PV短絡側からMPPTを行うかで P_{PV_Loss} が異なる。PV開放側からMPPTを行った場合は#1#2, #1#3, #1#4, #1#5において局所的な電力極大点で探索が収束するため、 P_{PV_Loss} が大きく増加する。PV短絡側からの場合は#1#3, #1#4, #1#5において P_{PV_Loss} が大きく増加する。このように最適動作電流に差異があるとき、Fig. 4(a)は大きな P_{PV_Loss} が発生する。Fig. 8(b)では、個別にMPPTを行うため、 I_{OP_PV1} , I_{OP_PV2} の差異による P_{PV_Loss} が抑えられている。またFig. 8(c), (d)の方式では並列多重接続されているので、 I_{OP_PV1} , I_{OP_PV2} の差異による P_{PV_Loss} は原理的に発生しない。

<4. 2> 電力変換損失の特徴 まずFig. 8(a)~(d)の特徴は、#1#1~#1#5となるに従い、 P_{Conv_Loss} が減少している。これはPV₂が#1~#5となるに従い最適動作電流が小さくなり R_{PV} が増加したため、PV₂に接続されている電力変換器の D' が増加し、 P_{Conv_Loss} が減少したためである。逆にFig. 8(a)では短絡側からMPPTを行うため、最適動作電流が大きな極大点でMPPTされ続け、 P_{Conv_Loss} が増加する。Fig. 8(a)と(b)を比べた場合、 R_{PV} はどちらも同じであるが、Fig. 8(b)がより電流通過素子数が多いため R_{Conv} が大きいので、 D' が減少し、 P_{Conv_Loss} が増加した結果となった。Fig. 8(c)と(d)を比べた場合、Fig. 8(c)は(d)に比べ、PV₁, PV₂が並列多重接続されており等価的に R_{PV} が小さいので、 D' が減少し、 P_{Conv_Loss} が増加した結果となった。最後にFig. 8(a), (b)と(c), (d)を比較した場合、Fig. 8(a), (b)の方が(c), (d)に比べ R_{PV} が大きいため、電力変換器の D' が増加し、 P_{Conv_Loss} が減少した結果となった。従って、 P_{Conv_Loss} の特徴としては、 R_{PV} が大きく電流通過素子数が少ないFig. 8(a)の接続が P_{Conv_Loss} が最小となった。PVは、電力変換効率の観点から考えると、最大電力出力時に R_{PV} と R_{Load} が整合し、できるだけ電力変換の D' が大きくなるように直・並列接続を決定することが望ましい。

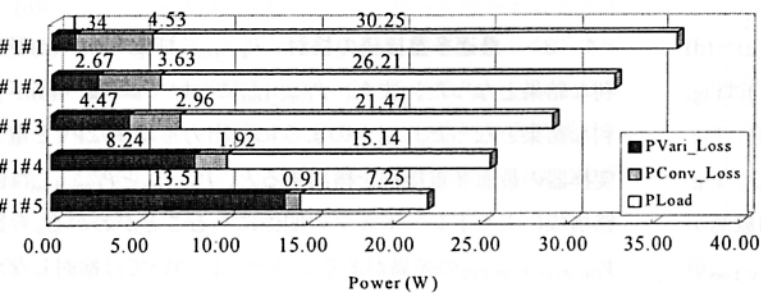
<4. 3> 最適多重接続の検討 P_{PV_Loss} はFig. 4(b)~(d)が有利な結果となった。また、 P_{Conv_Loss} についてはFig. 4(a)が有利な結果となった。以上のように、出力不均衡なPVと電力変換器の最適多重接続を検討すると、 P_{PV_Loss} と P_{Conv_Loss} は回路構成によりトレードオフの関係にあることがわかる。今回、 V_{OP_PV1} , V_{OP_PV2} の差異があるシステムについては検討しなかったが、 V_{OP_PV1} , V_{OP_PV2} の差異は直列多重接続されたFig. 4(a), (b)の P_{PV_Loss} を低下させない。Fig. 4(b)は、本論文のように、 I_{OP_PV1} , I_{OP_PV2} の差異を問題にした場合に、 P_{PV_Loss} を低減でき、 P_{Conv_Loss} もFig. (c), (d)に比べ小さい。従って、Fig. 4(b)の構成が全効率の観点から有効である。

5. まとめ

本稿では、出力不均衡なPVと電力変換器の最適多重接続を検討するために、2つのPVシミュレータを用い、直列または並列多重接続における構成について、出力不均衡損失と電力変換損失に着目して実験的に損失解析を行い、その特徴を明らかにした。その結果、本論文のように電流不均衡なPVと電力変換器の最適多重接続を考えた場合、Fig. 4(b)が全効率の観点から有効であることが確認された。

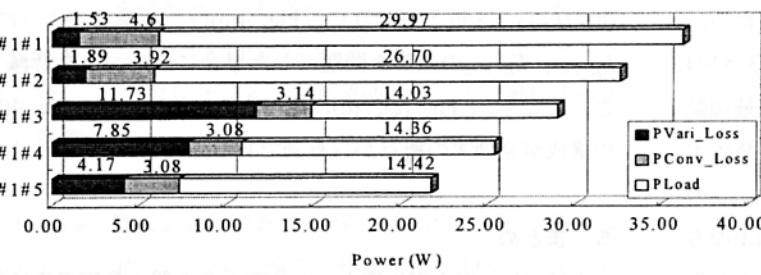
参考文献

- [1] H. Kobayashi and Y. Takeda, "Solar cell Array Connections and Shadow Problems," *Central Research Institute of Electric Power Industry Rep.*, No. 183011, pp. 12-20 (1983) (in Japanese)
小林広武・武田行弘：「太陽電池アレイの構成法（種々の影パターンを考慮した最適構成法の検討）」電力中央研究所研究報告，183011号，pp.12-20（昭58）
- [2] S. Ookoshi and T. Nakano, "MPPT Method of PV-Array series connection," *IEE-Japan Ind Appl. Soc. Annual Conf.*, Y-48 (2003) (in Japanese).
大越 悟・中野孝良：「太陽電池アレイ直列接続時の最大電力制御法」電学産応大，Y-48（平15）
- [3] T. Kitano and M. Matsui, "A Maximum Power Point Tracking Control Scheme Based on Power Equilibrium for Parallel Connected Solar Array," *National Convention Record IEE Japna*, 4-090, p. 138 (2004) (in Japanese).
北野達也・松井幹彦：「太陽電池アレイ並列接続時の電力平衡方式最大電力点追尾制御法」電気全大，4-090, p.138（平16）
- [4] K. Harada, T. Ninomiya and B. Gu, "The Fundamentals of Switched-Mode Converters," *CORONA PUBLISHING CO., LTD.*, (1992) (in Japanese)
原田耕介・二宮 保・顧 文建：「スイッチングコンバータの基礎」，コロナ社，（1992）



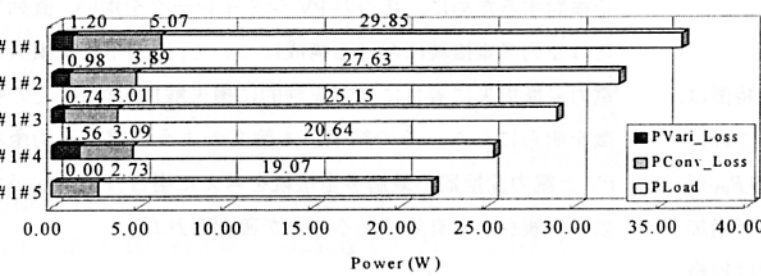
組合せ	全効率 %	PV取得効率 %	電力変換効率 %
#1#1	83.8	96.3	87.0
#1#2	80.6	91.8	87.8
#1#3	74.3	84.5	87.9
#1#4	59.9	67.4	88.8
#1#5	33.5	37.7	88.9

(a) Series connected PVs with single converter (MPPT from open-circuit state).



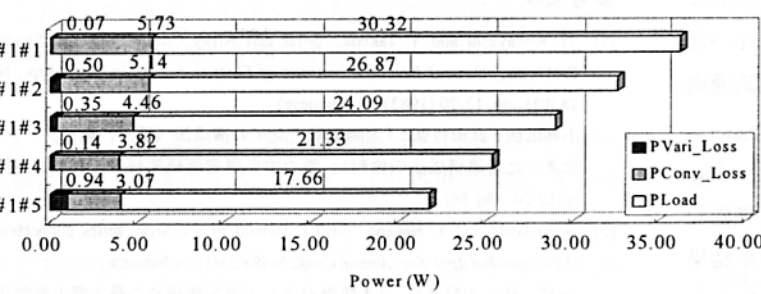
組合せ	全効率 %	PV取得効率 %	電力変換効率 %
#1#1	83.0	95.8	86.7
#1#2	82.1	94.2	87.2
#1#3	48.6	59.4	81.7
#1#4	56.8	69.0	82.3
#1#5	66.6	80.8	82.4

(a') Series connected PVs with single converter (MPPT from short-circuit state).



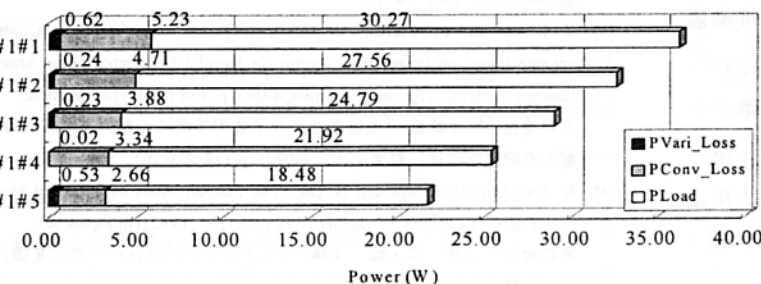
組合せ	全効率 %	PV取得効率 %	電力変換効率 %
#1#1	82.6	96.7	85.5
#1#2	85.0	97.0	87.7
#1#3	87.0	97.4	89.3
#1#4	81.6	93.8	87.0
#1#5	88.0	100.6	87.5

(b) Series connected PV plus converter modules (MPPT from open-circuit state).



組合せ	全効率 %	PV取得効率 %	電力変換効率 %
#1#1	83.9	99.8	84.1
#1#2	82.6	98.5	83.9
#1#3	83.4	98.8	84.4
#1#4	84.3	99.5	84.8
#1#5	81.5	95.7	85.2

(c) Parallel connected PVs with single converter (MPPT from open-circuit state).



組合せ	全効率 %	PV取得効率 %	電力変換効率 %
#1#1	83.8	98.3	85.3
#1#2	84.8	99.3	85.4
#1#3	85.8	99.2	86.5
#1#4	86.7	99.9	86.8
#1#5	85.3	97.6	87.4

(d) Parallel connected PV plus converter modules (MPPT from open-circuit state).

図8 損失解析結果
Fig. 8. Losses analysis results.