

太陽光発電システム直流回路の損失

DC Loss of Photovoltaic Power Systems

横内 博之*¹
Hiroyuki YOKOUCHI嶺 久一*²
Hisaichi MINE大城 壽光*²
Toshimitsu OHSHIRO湯川 元信*²
Motonobu YUKAWA黒川 浩助*³
Kosuke KUROKAWA

Abstract

The loss occurring in the DC circuit of the photovoltaic power system was analyzed in terms of wiring loss and diode loss based on measurement data from test equipments.

These losses were then compared to losses under rated conditions, and a simple coefficient suitable for use in design calculations was computed. The array output fluctuates according to the intensity of irradiance, and the loss fluctuates with the array output. However, since the wiring loss is roughly proportional to the square of the current, which is to say the square of the irradiance, an attempt was made to assess the wiring loss based on the irradiance data. The average wiring loss during actual operation was approximately 55%, and the average diode loss was roughly the same as that under rated conditions.

Key words : Photovoltaic Power System, DC Loss, Array Circuit Loss

1. まえがき

太陽光発電システムの実用化に向けた普及促進のための開発が精力的に推進されている。更なる進展のためには、システム全体のコスト低下がキーポイントであり、大量生産に期待する面もあるが、研究開発に基づく設計段階の合理化や、システムの建設技術が重要である。光発電システムのサイジング設計においては、従来から簡便な方法としてパラメータ法⁽¹⁾が使用されているが、計算途上に現れるパラメータについて、測定データに基づいたより詳細な数値が必要となっている。

これらパラメータの一つである直流回路の損失に関してはすでに報告⁽²⁾しているが、直流回路の配線における損失を見積もり、また、電線サイズを決定する際に重要なファクターとなっている。配線損失は $R \cdot I^2$ で計算されるが、アレイ電流はほぼ日射強度に比例しているので、損失はほぼ日射強度の2乗に比例して変動する。一方、アレイの出力は日射強度にほぼ比例しているので、両者の比は日射強度とともに変動し、適切な評価をするためには平均的な取り扱いが要求さ

れる。また、逆流防止ダイオードの損失については、日射強度に比例する要因が強く、やはり平均的な取り扱いが必要である。定格時の損失をベースにして、これに損失係数を掛けることによって平均的な損失が評価できれば、初期の設計に反映させることができ、適切な電線サイズの選定と損失の見積もりができるようになる。

本稿は太陽光発電システムの直流回路に発生する損失を、配線損失と逆流防止ダイオード損失について、試験設備の測定データに基づいて解析するとともに、定格状態との損失と関係づけて、設計計算に利用でき

原稿受付、平成7年4月28日

*1 会員 財団法人 日本品質保証機構

(〒433 浜松市初生町 1084-2)

Member, Japan Quality Assurance Organization

*2 団体会員 財団法人 日本品質保証機構

Collective Member, Japan Quality Assurance Organization

*3 会員 電子技術総合研究所

Member, Electrotechnical Laboratory

るような、簡単な係数を算出するものである。アレイの出力は日射強度によって変動し、それにとまって損失も変動するが、配線損失が電流の2乗、すなわち、日射強度の2乗にほぼ比例することから、日射データから配線損失を評価することを試みた。実運転状態の平均的な損失は、定格状態をベースとして、配線損失が約55%、ダイオード損失は約1.05倍となった。

2. 直流回路の損失

2.1 直流回路の構成

太陽光発電システムの回路構成を、蓄電池を持つシステムを図1(a)に、蓄電池を持たないシステムを図1(b)に示す。アレイ回路損失としては、蓄電池を持つシステムでは、アレイから制御盤、制御盤からインバータ及び制御盤から蓄電池までの直流線路損失および逆流防止ダイオード損失を対象として考え、蓄電池を持たないシステムでは、一般的に制御盤を持たずアレイから直接インバータに接続される場合が多いので、アレイ回路損失と逆流防止ダイオード損失を考える。

アレイ回路は日射強度にほぼ比例した電流が流れ、その値も大きく、また、配線長も長いので損失も大きい。損失は $R_A \cdot I_A^2$ で計算でき、ほぼ日射強度の2乗に比例して変動する。

インバータ回路は、蓄電池を持つシステムにおいては、通常独立システムであり、インバータは負荷の要求する電力を供給するため、DC入力側には負荷電力を効率で除した値に相当する電流が流れる。詳細な損失の計算のためには負荷パターンから電流値を算出して検討する必要がある。独立システムの特徴として、この電流はアレイ回路の電流と比較してかなり小さい値であり、また、インバータが制御盤や蓄電池の近くに設置される場合が多いので、インバータの入力側に接続された配線に発生する損失はかなり小さい値となる。一方、蓄電池を有さないシステムにおいては、この部分はアレイ回路として取り扱う。

蓄電池回路については、アレイの電流に比べてインバータ入力電流が小さいので、アレイが発電中はほぼアレイ電流に近い値の充電電流が流れ、アレイが発電していない間はインバータ入力電流に等しい放電電流が流れる。一般的にこの間の線路は短く、線路抵抗も小さいので損失は小さいが、充電電流による損失が支配的となる。

逆流防止ダイオードは順方向電圧ドロップが電流に対しほぼ一定であるので、アレイ電流にほぼ比例した損失を発生する。

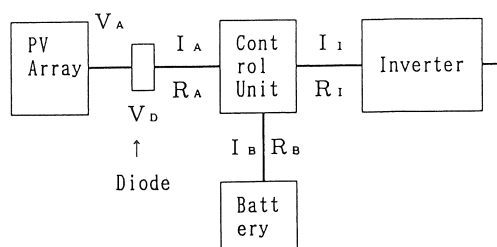


図1(a) 蓄電池が有る場合

Fig.1(a) System Diagram with Battery

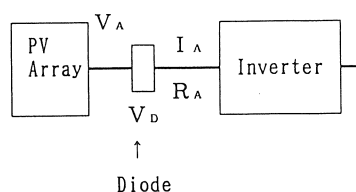


図1(b) 蓄電池が無い場合

Fig.1(b) System Diagram without Battery

R_A : アレイ回路の抵抗 (アレイ内配線を含む, アレイ～制御盤 (蓄電池有り), アレイ～インバータ (蓄電池無し)) (Ω)

R_1 : インバータ回路の抵抗 (制御盤～インバータ) (Ω)

R_B : 蓄電池回路の抵抗 (制御盤～蓄電池) (Ω)

I_A : アレイ回路の電流 (A)

I_1 : インバータ回路の電流 (A)

I_B : 蓄電池回路の電流 (A)

V_A : 直流回路の電圧 (V)

V_D : 逆流防止ダイオードの順方向電圧ドロップ (V)

図1 太陽光発電システム直流回路ブロック図

Fig.1 Block Diagrams of PV Power Systems

2.2 損失率の計算方法

直流回路の損失率は、光発電アレイ内のモジュール配線からダイオードを通り制御盤さらにはインバータ、蓄電池に到る直流回路の線路に発生する損失電力量、およびダイオードに発生する損失電力量を発電電力量で除して計算する。

試験設備においては、各回路の電線の太さ及び線路

長から直流回路の線路抵抗を算出することができ、1分毎に計測している各回路の電流値から $R \cdot I^2$ で線路に発生する損失を計算し、また、ダイオードの電圧電流特性を近似式で表わして、逆流防止ダイオードによる順方向電圧ドロップの損失を加えて、これらを1分毎、1年間積算し、年間損失電力量を計算する。これと、アレイの電流電圧からアレイ発電電力量の年間積算値を求め、これらの比として運転状態の各直流回路の損失率を計算する。さらに、求めた損失率を基準化するため、システムの定格状態における電流および電圧から、各直流回路毎に発生する損失電力を定格(設計)時の発電電力で除して、定格時の損失率を求め、これを分母として、上記運転状態の損失率から除して損失係数“ α ”を算出する。

$$W = \sum V_A \cdot I_A \quad (1)$$

$$L_A = \sum R_A \cdot I_A^2 \quad E_A = L_A / W \quad (2)$$

$$L_I = \sum R_I \cdot I_I^2 \quad E_I = L_I / W \quad (3)$$

$$L_B = \sum R_B \cdot I_B^2 \quad E_B = L_B / W \quad (4)$$

$$L_D = n \cdot \sum V_D \cdot I_D \quad E_D = L_D / W \quad (5)$$

$$P_O = V_{OA} \cdot I_{OA} \quad (6)$$

$$P_{OA} = R_A \cdot I_{OA}^2 \quad E_{OA} = P_{OA} / P_O \quad (7)$$

$$P_{OI} = R_I \cdot I_{OI}^2 \quad E_{OI} = P_{OI} / P_O \quad (8)$$

$$P_{OB} = R_B \cdot I_{OB}^2 \quad E_{OB} = P_{OB} / P_O \quad (9)$$

$$P_{OD} = n \cdot V_{OD} \cdot I_{OD} \quad E_{OD} = P_{OD} / P_O \quad (10)$$

$$\alpha_A = E_A / E_{OA} \quad (11)$$

$$\alpha_I = E_I / E_{OI} \quad (12)$$

$$\alpha_B = E_B / E_{OB} \quad (13)$$

$$\alpha_D = E_D / E_{OD} \quad (14)$$

W: 運転状態のアレイ発電電力量(Wh)

L: 運転状態の損失電力量(Wh)

E: 損失率

P: 定格状態(基準状態)のアレイ出力および損失電力(W)

α : 損失係数

Σ は定められた期間積算することを意味し、添字の意味は以下のとおりである。

A: アレイ回路

I: インバータ回路

B: 蓄電池回路

D: 逆流防止ダイオード

O: 定格状態

なお、逆流防止ダイオードの損失を計算するため、ダイオードの順方向電圧ドロップを電流の一次式として次のように近似した。

$$V_D = 0.05 \cdot I_D + 0.85 \text{ (V)} \quad (15)$$

$$I_D = I_A / n \quad (16)$$

V_D : 逆流防止ダイオードの順方向電圧ドロップ(V)

I_D : 一つの並列回路のダイオード電流(A)

n : アレイ内配線の並列回路数

2.3 計測データ

計測システムはパソコンにより構成され、日射強度などの気象データや電圧、電流、電力などのシステムデータを10秒サンプリングで計測し、1分平均値をストアしている。日射強度については、複数の日射計により計測した値から、影の影響を取り除いて平均したデータを作成して計算に利用している。また、アレイ電流、インバータ入力電流、蓄電池電流はそれぞれ独立したセンサにより計測している。解析にはこの1分データを使用し、1分毎の数値から積算し、1ヶ月、1年積算値を算出する。

3. 計算結果および考察

3.1 試験設備のシステム構成および直流回路損失

試験設備⁽³⁾は15のシステムで構成されており、独立電源システムとしては、蓄電池を有して負荷に安定した電力または日射強度に応じて追従した電力を供給できるシステム、蓄電池を有さない水ポンプシステム、および、系統連系システムから成りたっている。試験設備のシステム構成および定格時の直流回路損失を表1に示す。なお、表1の各部の損失を定格容量で割り算すると、定格時の損失率が計算できる。

3.2 実測データを用いて計算した直流回路損失率

各回路の配線抵抗、および、ダイオードの順方向電圧ドロップの計算式を用い、電流および電圧の計測データから、1分データをもとに各回路部の損失電力およびアレイ発電電力を計算し、これを1ヵ月単位で積算し、これを2年間繰返すことにより行った。平成5年(1993)4月から7年(1995)3月の2年間にわたる計算結果を図2に示す。縦軸に、各部の損失電力量をアレイの発電電力量で除した損失率を、各月の平均値で示し、横軸に、システム番号をとっている。シス

システム番号は表1に記入したとおりであり、各部の損失率を積み重ねて示している。

表1 試験設備の定格時直流損失
Table.1 DC Loss of Test Equipments
at Rating Condition

System	Loss at Rating (W)		System Use				
	Array P _{OA}	INV P _{oi}	BAT P _{OB}	Diode P _{OD}	Cap. P _o	Fig.1	Use
3	135.1	6.5	30.1	27.8	10.4	a	S-House
4	232.0	10.0	37.2	35.4	11.2	a	S-House
5	253.1	9.3	40.4	34.1	11.8	a	S-Contrl
8	40.5	5.0	22.7	44.7	3.5	a	S-House
9	69.3	3.1	10.2	41.1	3.1	a	S-House
6	293.5			35.0	12.5	b	W-Pump
7	303.0			33.9	11.8	b	W-Pump
1	119.7			29.9	10.0	b	3φ-Grid
2	180.4			33.1	11.1	b	3φ-Grid
10	23.7			11.1	2.5	b	1φ-Grid
11	20.9			11.5	2.9	b	1φ-Grid
12	28.6			11.3	2.6	b	1φ-Grid
13	58.9			14.3	3.5	b	1φ-Grid
14	69.4			15.1	3.7	b	1φ-Grid
15	73.8			15.1	3.7	b	1φ-Grid

Loss(W) is calculated, using optimum operating current at standard test condition(STC:25°C). Cap.(kW) means array capacity indicated at STC. Symbol a, b corresponds to Fig.1(a),(b).
S-House:Stand-alone, House Pattern Power Supply
S-Contrl:Stand-alone, Controlling Power Supply
W-Pump:Stand-alone, Water Pumping
Grid:Utility-grid Connected System

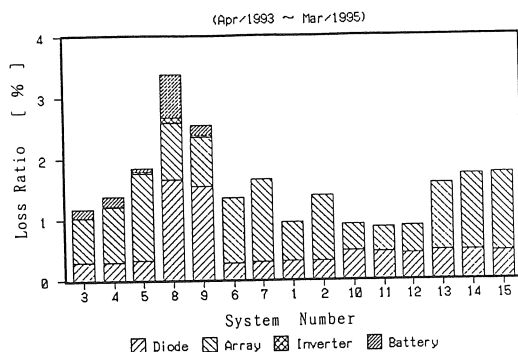


図2 直流回路の損失率

Fig.2 Loss Ratio of DC Circuit to Array Output Energy

(1) アレイ回路損失率

日射変動に対しアレイ電圧はあまり変化せずほぼ一定であるが、アレイ電流はほぼ日射強度に比例して変動する。したがって、日射強度に対しアレイ出力はほぼ比例するが、配線損失はアレイ電流の2乗、すなわち、日射強度のほぼ2乗に比例する。その結果、配線路に生じる損失は定格時における損失率より小さくなる。一般的に、アレイから制御盤またはインバータ間の配線は、長くて電流も大きいので、この部分の損失が支配的である。

(2) インバータ回路損失率

一般的にこの間の配線は短かいので、線路抵抗は小さく、また、独立電源型の負荷は小さくアレイ電流に比べて電流が小さいので損失も少ない。したがって、損失率は0.01%~0.09%程度となっている。この回路の損失は、詳細な検討においては、負荷電力のパターンから推定することができるが、配線を特に細くしない限り無視できる程度に小さい。損失が小さいことを見込んで、設計時に配線を細くすることもできる。

(3) 蓄電池回路損失率

独立型太陽光発電システムでは、通常、日照により短時間に充電を行い、夜間や天気の良い日に長時間にわたって放電を行う。その結果、充電は短時間大電流、放電は長時間小電流となり、損失は充電時が支配的で、アレイ回路の損失と類似している。

(4) ダイオード損失率

システム番号1~7は10kWシステムで、直流回路の定格電圧は300Vである。逆流防止ダイオードの損失率は0.27%~0.31%で、ほぼ定格電圧の逆数になっている。これは(15)式に、平均的なダイオード電流を代入すると、順方向電圧ドロップがほぼ1Vとなること、および、アレイの電圧がほぼ定格電圧で一定であることを考えると理解できる。システム番号8,9は3kWシステムであるが、直流回路の定格電圧が58Vであるので、損失率は1.6%程度とやや大きな値となっている。システム番号10~15は2~3kWシステムで、直流回路の定格電圧が200Vであるので、損失率は0.42~0.47%である。直流回路の定格電圧が低いシステムにおいては、ダイオード損失率が大きくなるので注意が必要である。

3.3 各回路の損失係数

直流回路の損失は配線抵抗によって決まるので、どの程度の損失を見込むかは、システムを設計する際の重要なファクターである。過去に実施されたNEDOプロジェクトでは、定格時において、発電電力の3%

程度の損失となるように、電線サイズを選定した例を多く見かける。したがって、実運転時の損失率を、定格時の損失率で基準化するのが合理的である。

第2章に示した(11)式から(14)式は、このような考えのもとに定義した損失係数である。試験設備の15システムについて、損失係数を計算した結果を図3に示す。

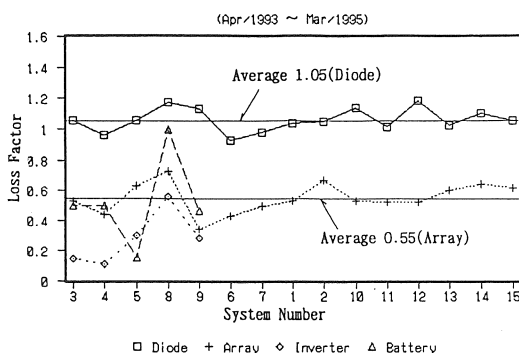


図3 損失係数

Fig.3 Loss Factor

(1) アレイ回路損失係数

アレイの電流が日射強度にほぼ比例して変動するので、運転状態の損失率が定格時の損失率より小さくなり、その結果、損失係数は1.0より小さくなる。システム毎に若干の違いはあるが、ほぼ0.55程度となっている。この値は日射パターンによって変化するものと考えられ、システム設置場所によって異なると思われるが、次章にその考え方を述べるにとどめ、詳細については次の機会に論じたい。定格時の損失率は設計に際して見積もることが可能であるので、アレイ回路損失係数がわかれば、運転状態の損失率は両者の積として計算することができ、これから、運転状態の実際の損失を見積もることができる。システムによっては、配線のサイズを若干細くして損失を増加させても、経済性が勝る場合が考えられる。

(2) インバータ回路損失係数

インバータ回路の損失は負荷によって決定されるので、システムによって様々である。蓄電池を有する試験設備の負荷パターンは、住宅用負荷に合わせたもの(NO.3,4)、日射強度にしたがって負荷の大きさをコントロールするもの(NO.5)、変化の大きな負荷パターン(NO.8)、変化の小さな負荷パターン(NO.9)と様々である。システム3,4は小さな電流を長時間供給する負荷パターンとなっているので、損失係数は小さくなっ

ている。これに対し、システム5,8,9は比較的大きな電流を短時間に供給する負荷パターンになっているので、損失係数はやや大きくなっている。

(3) 蓄電池回路損失係数

蓄電池回路の損失は充電時が支配的であるが、詳細にみると充電時は、アレイ電流から負荷電流を減じた電流が流れるので、アレイ回路の損失率より若干小さくなる。一方放電時は、負荷パターンに従った比較的小さな電流が流れ、そのにともなう損失は小さいが、結果的には、両者の損失が加算されるので、アレイ回路の損失係数に近い値となっている。すなわち、概略計算においては、蓄電池回路の配線をアレイ回路に含めて取り扱っても差し支えない。なお、システム5が極端に小さくなっているのは、日射強度に応じて負荷容量をコントロールしているので、アレイで発電した大部分の電流が直接負荷に供給され、蓄電池回路を通る割合が小さいためであり、システム8が極端に大きな値となっているのは、短時間に大きな負荷を供給するように設定されているからである。

(4) 逆流防止ダイオードの損失係数

アレイの直流電圧は日射強度にかかわらずほぼ一定であり、ダイオードの順方向電圧ドロップも電流にかかわらずほぼ一定であるので、逆流防止ダイオードの損失とアレイ発電電力の比である損失率は、日射の強弱に関係なくほぼ一定となる。したがって、運転状態の損失率と定格状態の損失率との比である損失係数は、アレイ電圧の変動とダイオードの順方向電圧ドロップの変動程度の誤差を含むものの、1に近く、詳細を見ると1.05程度の値となっている。

3.4 損失係数の月別変化

アレイ回路の損失係数については、日射強度と密接な関係があることを述べたが、月別変化がどのようになっているかを、システム2を例にとって調べた。図4に3年間にわたる損失係数を示す。梅雨時期など天候の悪い時に、係数が小さくなる傾向が見られ、日射に影響されていることがわかるが、概して年間について平均的な扱いをしても良さそうである。

4. 日射強度データとの比較

アレイの電圧はセルの温度に影響され、また、日射強度によっても変動するが、いずれもその影響は小さく10数%程度である。これに対し、アレイ電流は日射強度にほぼ比例して変動するので、アレイの出力はほぼ日射強度に比例している。一方、配線損失は電流の

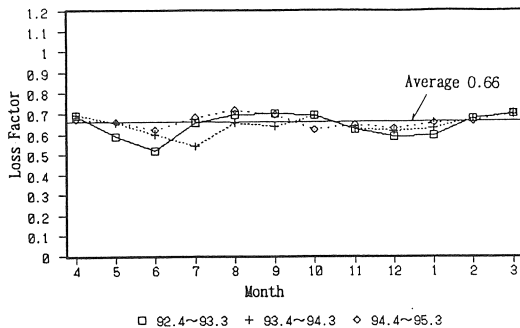


図4 損失係数の月別変化 (システム2, アレイ)
Fig.4 Loss Factor of Array Circuit of System 2

2乗に比例するので、日射強度のほぼ2乗に比例すると考えられる。

配線損失率は、配線損失電力量をアレイ発電電力量で除して計算できるが、日射強度に置き換えて考えれば、概略の値として、日射強度の2乗の積算値を日射強度の積算値で除して計算できる。

測定データについて、(1),(2)式から、 k をアレイ電流と日射強度を関係づける係数として導入し、 V_A を常数とすると、

$$I_A = k * (G_A / G_s) \quad (17)$$

$$W = \sum V_A * I_A \\ = k * V_A * \sum (G_A / G_s) \quad (18)$$

$$L_A = \sum R_A * I_A^2 \\ = k^2 * R_A * \sum (G_A / G_s)^2 \quad (19)$$

$$E_A = \frac{L_A}{W} = \frac{k^2 * R_A * \sum (G_A / G_s)^2}{V_A * \sum (G_A / G_s)} \quad (20)$$

G_A : 傾斜面日射強度 (kW/m^2)

G_s : 基準日射強度 ($1.0 \text{kW}/\text{m}^2$)

基準状態では、 $G_A = G_s$ であるので、

$$P_o = V_{oA} * I_{oA} = k * V_{oA} \quad (21)$$

$$P_{oA} = R_A * I_{oA}^2 = k^2 * R_A \quad (22)$$

$$E_{oA} = P_{oA} / P_o = k * (R_A / V_{oA}) \quad (23)$$

したがって、損失係数 α は、

$$\alpha = E_A / E_{oA} \\ = (V_{oA} / V_A) * \frac{\sum (G_A / G_s)^2}{\sum (G_A / G_s)} \quad (24)$$

V_A はエネルギー的に平均すべきであるが、簡便のため動作状態における平均的な温度における最適動作電圧をとると、年平均気温を 16°C 、平均的な温度上昇を 15°C とすると、 V_A / V_{oA} の比は約 0.97 程度であるので、この項は一応無視して考える。

4.1 日射強度の2乗の積算

1992年4月から95年3月にわたる3年間の日射強度データを用いて、日射強度とその2乗を積算して集計した。横軸に月をとってグラフにしたものを図5に示す。当然のことであるが、梅雨の時期は比率が小さくなり、比較的天候の良い冬期は比率が大きくなっており、3年間の平均は 0.65 である。この傾向は図4と比較するとよく一致しており、運転状態のアレイ平均電圧と基準状態の最適動作電圧との相違を補正する必要はあるものの、日射強度データを用いてアレイ回路の配線損失を評価できると考えられる。すなわち、配線損失はアレイ回路が支配的であり、損失率の計算は、日射強度の2乗の積算値を日射強度の積算値で割ることにより、計算できると考えられ、これから、太陽光発電システムの設置位置の違いによる損失係数の相違を、日射強度データを用いて評価することができるようになる。

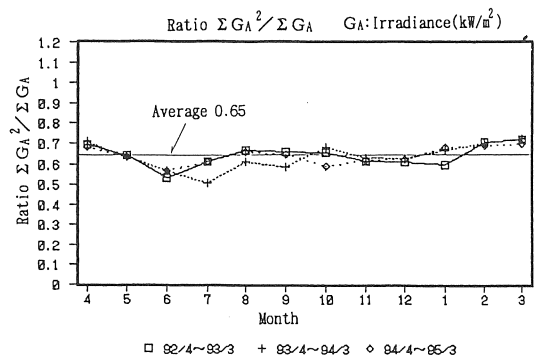


図5 日射強度の2乗の積算値と日射強度の積算値の比

Fig.5 Ratio of $\sum$ (Square of Irradiance) to $\sum$ (Irradiance)

5. むすび

太陽光発電システムの直流回路に発生する損失を、試験設備の測定データをもとに評価した。運転時に発生する損失電力量をアレイの発電電力量で除して、損失率を算出し、この損失率を、定格時の損失率との比

で表して、損失係数を導き出した。この損失係数は、平均的な扱いにおいて運転状態の損失を評価するもので、これによって、従来、見積もりが困難だった運転状態の損失を、初期のシステム設計段階において計算することができるようになる。

①アレイ回路の損失は電流の2乗、すなわち、日射強度の2乗にほぼ比例して変動するため、損失係数は1より小さくなり、15システム3年間の平均で0.55となった。

②インバータ回路の損失は、負荷の容量やパターンによって決定されるので、詳細な検討においては負荷の調査が必要であるが、一般的にみて、この回路の電流は小さく配線長も短いので、無視しても差し支えない。

③蓄電池回路の損失は、アレイ発電時が支配的であるので、概略計算においては、アレイ回路に含めて取り扱ってもよい。

④逆流防止ダイオードの損失は、直流回路の定格電圧の逆数程度であり、損失係数は平均的に1.05となった。

⑤アレイ回路の損失係数は日射強度に依存し、弱いながら季節変動が観測される。

⑥日射強度の2乗の積算値を、日射強度の積算値で除いたものは、アレイ回路損失係数と密接な関係にあり、季節変動も含めてよく一致している。このことから、概略的にアレイ回路の損失を、日射強度のデータから計算することができる。

⑦アレイ回路の損失係数は、地域的な差があるものと考えられるが、日射強度のデータを用いて地域差を評価することができる。

本稿は、ニューサンシャイン計画に基づいて、財団法人日本品質保証機構が、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から委託を受けて実施している『太陽光発電システム評価技術の研究開発』の成果の一部である。

本研究開発の推進に当たり、NEDOおよびシステム技術評価検討委員会の諸氏を始め、多大のご支援を頂いた関係各位に深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) 黒川浩助：「システム設計パラメータの階層構造による統合化」，電子技術総合研究所研究報告，第974号，1993年3月
- (2) 嶺久一，湯川元信，黒川浩助：「太陽光発電システムのアレイ回路損失補正係数」，平成6年電気学会全国大会，平成6年3月
- (3) 湯川元信：「太陽光発電システム評価技術の研究開発」，太陽エネルギー Vol.19 No.2 1993年