

—太陽光発電設備の発電効率向上のための— 逆流防止リレーの開発と評価

- To improve the efficiency of solar power systems -
Development and Evaluation of the Blocking Relay

南野 郁夫*¹
Ikuo NANNO

三角 修一*²
Shuichi MISUMI

Abstract

Many studies have been conducted to improve the efficiency of solar cells and solar power conditioners until now. However, studies of other peripheral components relating to the improvement of energy efficiency have not appeared yet. The Fukushima nuclear accident has made it all the more important to increase the energy efficiency of PV systems; traditionally, the blocking diodes have been making a great loss of power in PV systems. In this paper, we will prove that the blocking relay we have developed can reduce the power loss as we have evaluated its effectiveness on the improvement of energy efficiency. OMRON has released new blocking relays for mega-solar power plants in December 2012. We presume that the blocking relays are going to attract more attention in the industry.

キーワード：太陽光発電システム，効率，逆流防止ダイオード，逆流防止リレー

Key Words：Photovoltaic power system, Efficiency, Blocking diode, Blocking relay

1. はじめに

これまで太陽電池セル自体の効率改善の研究は多くなされ、太陽電池自体の効率改善も理論限界に近づきつつある。さらにソーラーパワーコンディショナなどの主要な制御機器で単体の効率改善が数値で示し易い研究も盛んに行われた。しかし、これら以外の部品がシステム効率に与える影響に関する研究はほとんどされてこなかった。一方で福島原発事故をきっかけに脱原発の機運が高まり、メガソーラーなどの大規模太陽光発電システムの計画が次々に発表され、システム全体の効率を少しでも改善したいという要求が強まっている。そのため、太陽電池セル

や主要な制御機器以外の部品レベルの発電効率改善の取り組みも重要になってきた。

従来、太陽光発電のほとんどのシステムに使われているにもかかわらず、意外に大きな電力の損失を生んでいるものに逆流防止ダイオードがある。

本論文では、逆流防止ダイオードの損失低減を目的とする逆流防止リレー（ソーラーリレー）の提案と、開発した製品の仕様および逆流防止リレーの有効性評価結果を報告する。なお逆流防止リレーは、平成5年度と平成6年度の日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会の合同研究発表会で口頭発表したものである⁽¹⁾⁽²⁾。その後オムロン株式会社から発売され、平成9年4月4日に本学会の優秀技術賞を受賞した。15年経過した現在、逆流防止リレーはメガソーラーのシステムメーカーからの要請をうけ、メガソーラー等の公共・産業用発電設備に特化した製品が平成24年12月に新たに発売された。

*1 宇部工業高等専門学校 教授（〒755-8555 山口県宇部市常盤台2-14-1），e-mail：nanno@ube-k.ac.jp，元オムロン株式会社

*2 オムロン株式会社

（原稿受付：2012年12月17日）

2. 従来の逆流防止ダイオードの問題点

2.1 損失電力の見積もり

逆流防止ダイオードの損失電力 P_d [W]は、発電電流 I [A]とダイオードの順方向電圧降下 V_{FM} [V]の積である。 V_{FM} は温度や電流、設計仕様により 0.5～1[V]の範囲で変化するが、太陽電池の定格電流の 3～10[A]の電流では比較的高めの電圧になるので、簡単のため図 1 に示す約 1[V]として見積もる。

$$P_d = V_{FM} \times I \tag{1}$$

ただし、 V_{FM} : 順方向電圧降下[V]

I : 発電電流[A]

損失電力 P_d の具体例を示す。定格電圧が低いシステム、たとえば市販されている 48W で 18V の太陽電池パネル 1 枚のシステムの場合、発電電流が約 3A なので損失電力は $P_d \approx 3W$ である。ダイオードと太陽電池パネルの電圧の比 1/18 と同じ約 5.6%の損失になる。この太陽電池パネルの場合 36 枚の太陽電池セルが直列接続されている。このことから、セル 1 枚当たり 0.5V の発電電圧なので、ダイオードの約 1V の電圧降下は、太陽電池セル 2 枚分の発電電量に相当する。逆流防止ダイオードは、これだけの電力を常に損失していることになる。定格 4kW で 200V の太陽光発電システムの場合は、定格通電電流 $I_m=20A$ なので $P_d \approx 20W$ となりシステム全体の 0.5%の損失になる。実際のダイオードの V_{FM} の値を使いより正確に見積もった数値例を表 1 に示す。

2.2 損失電力量の見積もり

次に約 1V の順方向電圧降下による損失電力から 1 日当たりの逆流防止ダイオードの損失電力量を見積もる。図 2 に示すように日射による発電電流 $I(t)$ は、時間 t [h]に対し実際には実線のような曲線で変化するが、簡単のため破線の直線で近似する。

逆流防止ダイオードの損失電力量 W_d [Wh]は、次のようになる。

$$\begin{aligned} W_d &= \int_{t_1}^{t_5} P_d \cdot dt \\ &= \int_{t_1}^{t_5} V_{FM} \cdot I(t) \cdot dt \\ &= 2 \int_{t_1}^{t_3} V_{FM} \cdot I(t) \cdot dt \\ &= V_{FM} \cdot I_m \cdot (t_3 - t_1) \end{aligned} \tag{2}$$

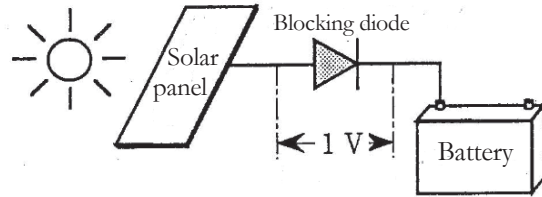


Fig.1 Conventional blocking circuit
図 1 従来の逆流防止回路

Table 1 Calculation results of power loss
表 1 損失電力の計算結果

	50W system	4kW system
Rated voltage	18V	200V
I_m	2.8A	20A
V_{FM}	0.82V	0.92V
P_d	2.3W	18W

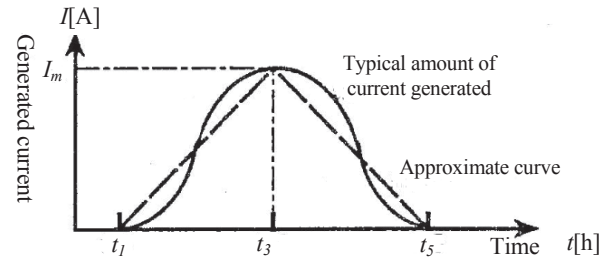


Fig.2 Generated current by solar radiation through a day
図 2 一日の日射による発電電流

Table 2 Definition of symbols
表 2 記号の定義

Symbol	Meaning	Symbol	Meaning
P_d	Power loss	t_1	Start time
V_{FM}	Forward voltage	t_2	Relay operating time
$I(t)$	Generated current	t_3	Max current generated time
R_c	Coil resistance	t_4	Relay released time
I_a	Operating current	t_5	End time
I_r	Release current	P_m	Rated power of relay
I_m	Rated current	P_{dm}	Rated power of diode

Table 3 Calculation results of energy loss
表 3 損失電力量の計算結果

	50W system	4kW system
Energy loss W_d	13.8Wh/d	110Wh/d

ただし、式中の記号の意味を表 2 に示す。昼夜が同じで定格通電電流 I_m を発電電流のピークとする日を想定し、式(2)に $(t_3 - t_1)=6$ [h]を代入し表 1 の値から 50W と 4kW のシステムの損失電力を見積もった結果を表 3 に示す。

2.3 損失電力の考察

逆流防止ダイオードの損失は、発電時にのみ発生し、発電電流に比例する特徴がある。そのため、発電電流が大きいときの損失をできるだけ低減することで大きな効果が得られると期待できる。

3. 逆流防止リレーの原理

大電流が逆流防止ダイオードに流れるときの損失電力を低減するため、発電電流を検出しある電流値以上流れると自動的に電圧降下の小さい回路に置き換える発想を、シンプルな構成で具現化したものが逆流防止リレーである。

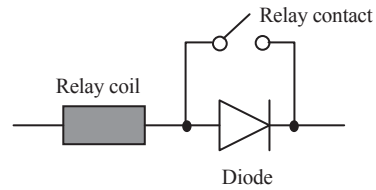


Fig.3 Schematics of the blocking relay
図3 逆流防止リレーの構成

具体的には、図3に示すように電流リレーのコイルで発電電流を検出し、ある電流以上の発電電流でリレー接点を閉じ、接点でダイオードをバイパスする仕組みである。これを逆流防止リレー（当時の商品名はソーラーリレー）と呼び、逆流防止ダイオードに置き換わる新たな太陽光発電システム用部品として提案した⁽¹⁾。

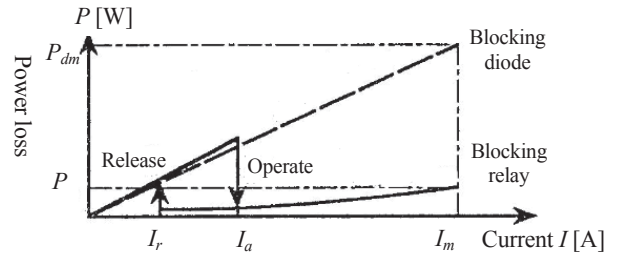


Fig.4 Power loss characteristics
図4 損失電力特性

逆流防止リレーの損失電力特性を図4に示す。図4では発電電流 I_a でリレーが動作、 I_r でリレーが復帰することを表している。発電電流が I_a 以上のときの逆流防止ダイオードの損失電力と比較し、逆流防止リレーの損失電力が非常に小さくなることが判る。図5に一日の損失電力の比較を示す。特に、日中の正午頃の損失電力低減が期待できる。

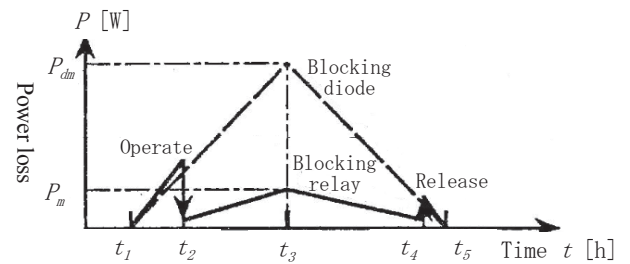


Fig.5 Power loss through a day
図5 一日の損失電力

3.1 逆流防止リレーの効果の見積もり

図5に示す一日当たりの逆流防止リレーの損失電力量 W_r [Wh] は、以下のように表せる。式中の記号の意味を表2に示す。

$$W_r = \int_{t_1}^{t_2} V_{FM} \cdot I(t) \cdot dt + \int_{t_4}^{t_5} V_{FM} \cdot I(t) \cdot dt + \int_{t_1}^{t_5} R_c \cdot I^2(t) \cdot dt \quad (3)$$

損失電力低減の効果を定量的に表す手段として、次のように損失電力改善率 η [%] を定義する。

$$\eta = \left(1 - \frac{\text{一日の逆流防止リレー 損失電力量 } W_r}{\text{一日のダイオード損失 電力量 } W_d} \right) \times 100 \quad (4)$$

図5に示す一日の損失電力改善率 η [%] は、電流が時間に比例する関係と式(2)(3)(4)から式(5)のように表せる。リレー仕様を式(5)に代入することで、改善の程度を容易に見積もることができる。

$$\eta = \left(1 - \frac{I_a^2 + I_r^2}{2I_m^2} - \frac{2R_c I_m}{3V_{FM}} \right) \times 100 \quad (5)$$

4. 逆流防止リレーの試作

一般家庭用の系統連系システムは、約 200W や約 50W の標準パネルを複数直列にしたストリング⁽³⁾⁽⁴⁾ に逆流防止ダイオードを1つ設置している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

Table 4 Specification of the blocking relay
表4 逆流防止リレー設計仕様

Item	Numerical value	
	Typ.	Max.
Rated current I_m	3A	
Rated power	0.61W	
Coil resistance R_c	0.068Ω	0.075Ω
Operating current I_a	1.2A	1.3A
Release current I_r	0.35A	0.5A
Max. voltage	200V	
Temperature	70°C	
Ambient humidity	90% (Non-condensing)	

そのため、今回は約 50W パネルの最適動作電流 3A で十分な効果が得られる逆流防止リレーを設計した。式(5)に表4の設計仕様を代入し、損失電力改善率 η を見積もると 77% となった。図6に試作した逆流防止リレーの概観写真を示す。

5. 評価実験

図 7 に示すように、逆流防止リレーと逆流防止ダイオードを同じ条件の 2 つの太陽光発電システムに設置し、太陽電池が発電している状態の電圧と電流を計測し、それらのデータから損失電力を計算し比較した。測定条件を表 5 に、特に注目した有効性評価項目を表 6 に示す。

6. 逆流防止リレーの評価結果

6.1 基本特性の評価

損失電力測定による評価結果を図 8～13 と表 7, 8 に示す。図 8 と表 7 に示すように試作した逆流防止リレーの損失電力改善率 η は晴天の条件で約 79.4% となった。この値は見積もりの値 77% に近く、見積もり方法の有用性と発電電流の直線近似の妥当性の確認になった。表 8 に試作した逆流防止リレーの仕様の数値を用い、太陽光発電システムに適用した場合の効果の見積もり結果を示す。表 8 の発電量増加量は、表 1 の改善前の P_d に η を乗算して求め、それをシステム電力で除算し発電量増幅率とした。50W システムではシステム全体の発電効率を 3.7% 向上させる効果である。一方 4kW システム (200V) では 0.36% の発電効率向上効果である。加えてダイオードの放熱対策が不要であるため、接続箱を金属から樹脂に代替できるメリットもある。その結果、接続箱の小型化・軽量化・コストダウンに貢献できる。

6.2 有効性評価結果

半年間の連続運転による計測の結果、有効性を評価するデータを得た。図 9 は左から快晴、右に行くほど雨に近づく一日の損失電力カーブである。図 10 は一日毎の損失電力量を縦軸に、半年間を横軸にしたグラフである。

(1) 接点開閉回数 図 11 に開閉回数に対する発生日数のヒストグラム、図 12 に天候の違いによる接点の開閉回数の関係を示す。半年間の接点の開閉回数は、合計で 213 回、一日あたり平均 1.18 回、最高 6 回/日だった。この平均回数からリレーの寿命の 50 万回に達するまでの期間は 1000 年以上であり、接点开閉回数で寿命に達する可能性は極めて低いことが判った。また平均 1.18 回の開閉回数および図 11 と図 12 から、雲などの天候からくる照度変化よりもリレー動作復帰のヒステリシス幅が十分に大きく、過剰にリレーが反応しない状態になっていることも確認できた。天候の種類は、熊本地方気象

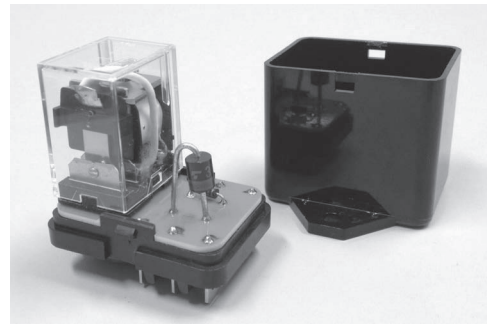


Fig.6 Overview of the blocking relay
図 6 逆流防止リレー概観

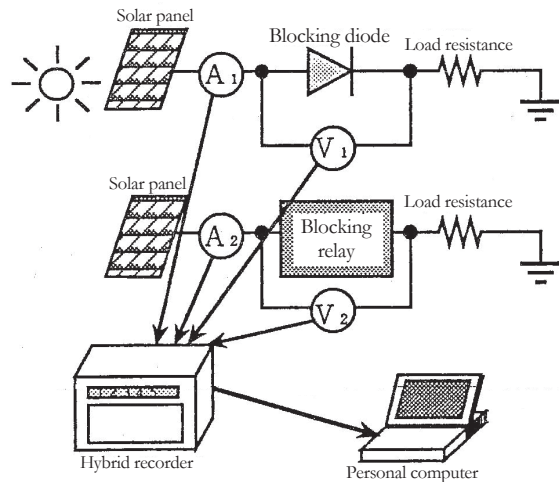


Fig.7 Schematic diagram of the experimental set-up
図 7 評価実験環境

Table 5 Experimental conditions
表 5 評価実験条件

Item	Specifications
Solar panel	48W Polycrystalline Si
Blocking diode	9A, Peak reverse voltage 1200V
Load	1Ω Resistance
Installation angle	30degrees facing south
Weather	Almost Sunny
Measurement date	October 12, 1993 (Tue)
Measurement location	Omron Corporation Kumamoto Laboratory

Table 6 Evaluation points of effectiveness
表 6 有効性評価の項目

Evaluation points	Point of view
Contact opening & closing times	Whether fluctuation of solar radiation under cloudy or rainy weather promotes frequent opening and closing of the contacts, and whether it encourages contacts to reach their lifetime during the period of use.
Improvement rate of annual power loss	Whether enough reduction of power loss can be observed including the operations under cloudy and rainy weather.

台発表「気象月報」⁽⁸⁾の気象概況(昼 6 時～18 時)を元に 6 段階に分類した。

(2) 年間損失電力改善率 図 10 の半年間のデータから求めた年間損失電力改善率 η は、74.6% だった。

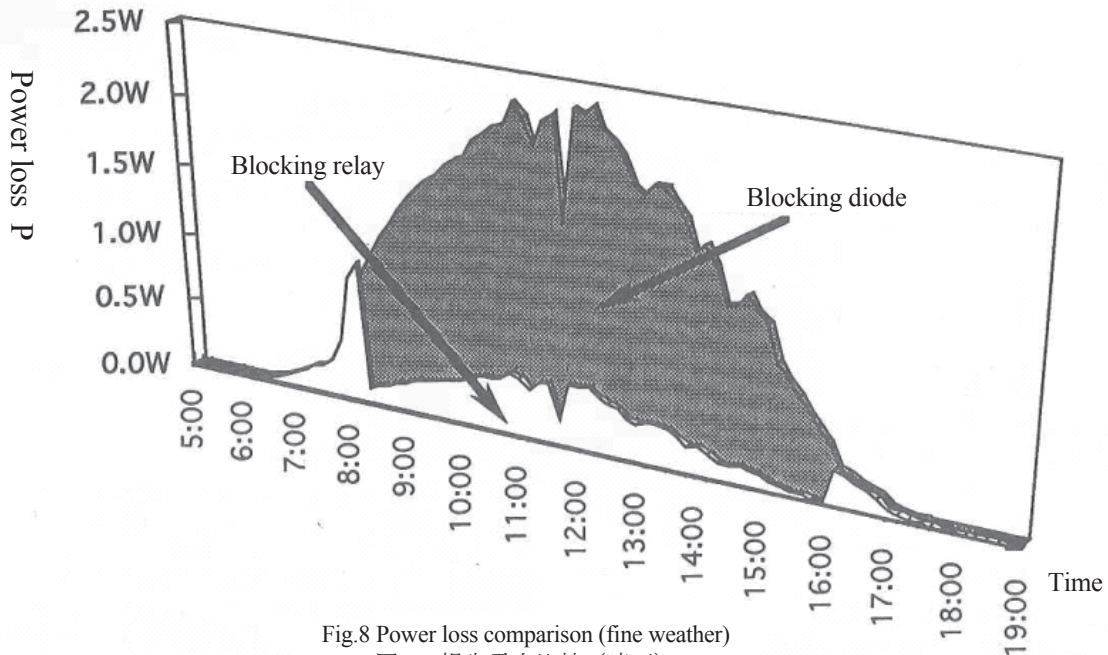


Fig.8 Power loss comparison (fine weather)
 図8 損失電力比較 (晴天)

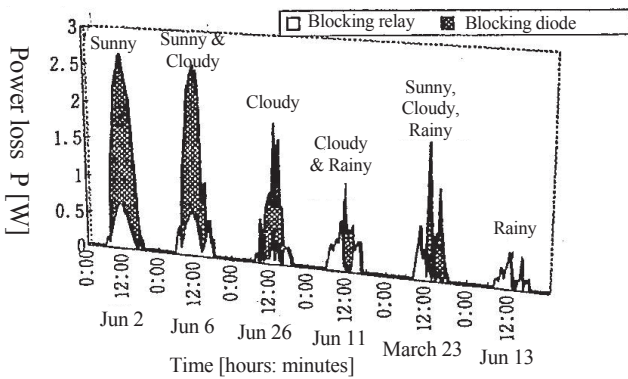


Fig.9 Power loss under each weather
 図9 天候別の損失電力カーブ

Table 7 Experimental results of energy loss through a day
 表7 一日あたりの損失電力量の実測値

Blocking diode	Blocking relay	Power loss improvement
13.6Wh/d	2.8Wh/d	79.4%

Table 8 Effect to the entire power generation system under fine weather
 表8 晴天時の発電システム全体への効果

	50W system	4kW system
Blocking diode Power loss	2.3W	18W
Increased power generation	1.83W	14.3W
Increased rate of generated power	3.7%	0.36%

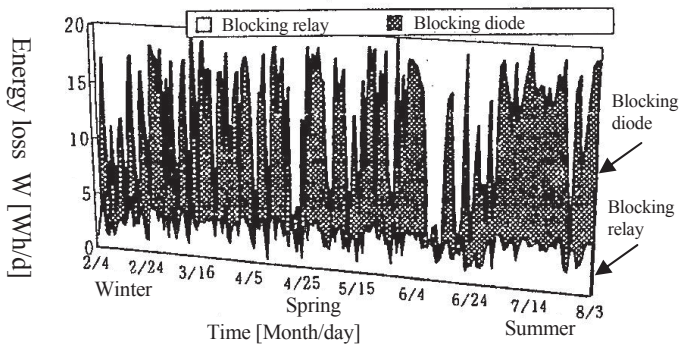


Fig.10 Comparison of power loss in half a year
 図10 半年間の損失電力比較

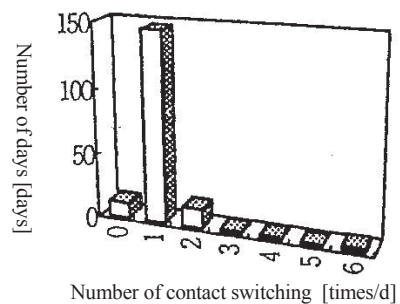


Fig.11 Distribution of the number of contact switching
 図11 接点開閉回数の分布

晴天の日の約 80%の改善と比べると少し効果が低下するが、年間を通してダイオード損失電力量と比較し約 75%改善する効果がある。図 10 の損失電力のピークは季節によらずほぼ一定である。その理由は季節などによる温度変化は太陽電池の電圧への影響に比べ電流への影響が小さく、逆流防止ダイオードが外気に触れない屋内にありダイオード電圧が安定しているためだと考える。図 13 から全天日射量と損失電力量に相関があることも見出した。この関係を利用することで、実験した年度以外の年度や、日本各地の場所による違いを考慮した接点回数と年間損失電力改善率も見積もることができる。なお表 9 に天気概況を 6 段階に分類した表を示す。

7. おわりに

逆流防止リレーの提案と開発を行った。その結果、晴天時の損失電力を従来比約 80%改善できることを確認した。さらに逆流防止リレーの有効性を評価する目的で、実際に太陽光を受けた太陽電池からの発電電流で、逆流防止リレーの約半年間の連続運転を行った。その計測データから逆流防止リレーの有効性を確認した。計測データと気象台のデータから以下のことも明らかにした。

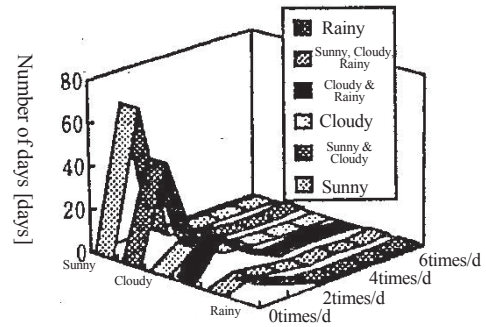
- (1) 開閉回数は、平均 1.2 回/日程度と少なく、運転期間中に接点寿命に達する可能性は極めて低い。
 - (2) 年間損失電力改善効果は、約 75%削減（ダイオード損失電力量を約 25%に低減する効果）である
 - (3) 時期や場所の違いによる開閉回数と損失電力を気象月表のデータから見積もることができる
- 逆流防止リレーは、メガソーラー等に特化した 10A タイプ(形 MM1X-PV)が 2012 年 12 月に新たに発売され、再び注目を集めている技術である。

今後の課題は、太陽光発電システムの更なる発電効率向上、あるいは太陽光発電システムを大量に電力系統に収容するための新たな手法を提案することである。

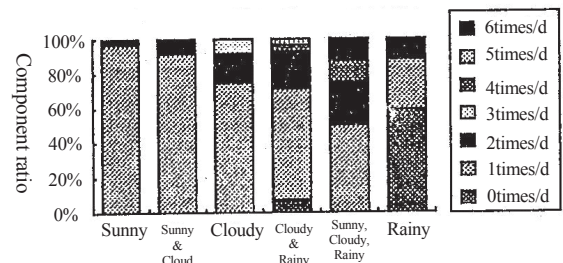
参考文献

- (1) 南野郁夫・辻秀明・林英寿・鶴川優治、一効率 UP のための - 逆流防止リレーの開発、太陽/風力講演論文集 (1993)、53-56、筑波
- (2) 南野郁夫・林英寿、逆流防止リレーの信頼性評価、太陽/風力エネルギー講演論文集(1994)、53-56、名古屋
- (3) 濱川圭弘、太陽電池、コロナ社、東京
- (4) 桑野幸徳、ここまで来た太陽光発電住宅、工業調査会、東京

- (5) 電気学会編、太陽電池ハンドブック (1985)、268-270、コロナ社、東京
- (6) 坂東 健：「東京電力における系統連携実証研究」、太陽エネルギー、Vol.19, No.2, p5(1993)
- (7) 塩見弘、信頼性工学入門、丸善、東京
- (8) 熊本地方気象台、気象月表 H6 年 2 月~H6 年 8 月(1994)、熊本



(a) Opening and closing number of times in a day



(b) Component ratio of the switching times

Fig.12 Switching times for weather conditions

図 12 天気概況と開閉回数

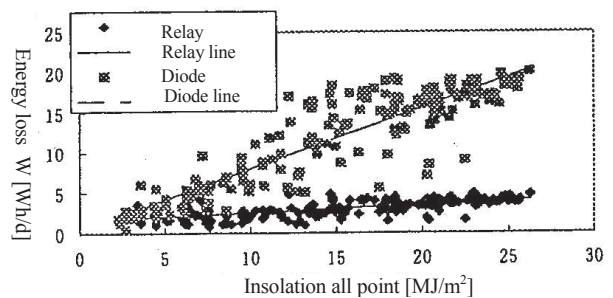


Fig.13 Relation between energy loss and global solar radiation

図 13 全天日射量と損失電力量

Table 9 Classification of weather conditions by the weather stations

表 9 気象台の天気概況の分類

Weather	Weather conditions by the weather stations (Japanese)
Sunny	晴、快晴、晴時々薄曇、晴後薄曇、晴後一時薄曇
Sunny & cloudy	晴一時曇、晴時々曇、晴後曇、晴後一時曇、晴時々曇一時霧、薄曇一時晴、曇後晴、曇時々晴、曇一時晴、曇後一時晴、曇時々晴一時霧
Cloudy	曇、薄曇
Cloudy & rainy	曇後雨、曇時々雨、曇後時々雨、曇後一時雨、雨後曇、雨時々曇、雨後曇、雨一時曇
Sunny, cloudy,rainy	晴一時雨、晴後曇時々雨、雨後晴、雨後曇時々晴、曇一時晴後大雨、曇時々晴一時雨
Rainy	雨、大雨、雨一時曇、雨後雪