太陽光発電システムの雷サージ特性と耐雷対策

正員 高橋 昌英 (四国電力)
 正員 川崎 憲介 (四国総研)
 正員 松延多喜之助 (四電技術コンサルタント)

1. まえがき

太陽光発電システムは、一般に太陽電池を多数直並列に接続して、所要の電圧、電流（電力）を得るように設計される。

また、太陽光発電所は広い面積が必要であり、太陽電池は屋外に設置されるので、雷サージによる過電圧が印加される危険性が高い。しかし、太陽電池素子や太陽光発電システムの雷サージ特性は、これまでほとんど解明されていない。そこで、西条太陽光試験発電所が建設されたのを機会に、種々の実験・検討を行うこととした。

西条太陽光試験発電所に設置されている太陽電池モジュールの耐雷強度は、4,500 V (1.2/50 μ s) と低いため、直撃雷・誘導雷それぞれについて太陽電池に誘導する電圧を検討し、可能な範囲で雷対策を施すことにした。

雷撃電流は平均値でも 25 kA 程度⁽¹⁾あり、太陽電池への直撃雷はもちろんのこと太陽電池架台への直撃雷に対しても、架台サージインピーダンスや接地抵抗（サージ電流に対し約 2 Ω ）を考慮すると雷撃時の電圧は 50 kV にもなることから、対策は非常に困難と考えられた。このため、西条太陽光試験発電所の太陽電池アレイ架台には直撃雷に対する対策は施さないこととした。

一方、誘導雷に対する誘導電流は、直撃雷に比べ 1 けた以上も小さくなることから、誘導雷に対する対策

を行うことにした。

実フィールドにおいて約 5 年間対策の効果の検証を行っていたが、この間襲来がなかった。

従って、誘導雷の模擬試験を実施し、雷対策の効果を確認すると共に、直撃雷に対するアレイの耐雷強度の確認試験を実施し、耐雷対策の妥当性の確認を行った結果、雷サージに対する特性および対策について一応の目安を得たので、その概要を報告する。

2. 西条太陽光試験発電所の概要

西条太陽光試験発電所（1,000 kW 級集中配置形光発電システム）は愛媛県西条市に昭和 56 年 9 月から建設を開始し、昭和 61 年 2 月に完成した。この光発電システムは新エネルギー・産業技術総合開発機構から「集中配置形太陽光発電システムの研究開発」の研究テーマで、四国総合研究所、四国電力および電力中央研究所が受託しているものである。

主要設備は、太陽電池 1,200 kW、インバータ 1,000 kW、バッテリー 1,800 kWh であり、システム構成は図 1 のとおりである。

図 1 1,000 kW 級発電システム構成
 Fig. 1. Configuration of 1,000 kW class photovoltaic power generation system.

Lightning Surge Characteristics and Protection Methods of Photovoltaic Power Generation System. By Masahide Takahashi, Member (Shikoku Electric Power Co.), Kensuke Kawasaki, Member (Shikoku Research Institute Inc.) & Takinosuke Matsunobu, Member (Yonden Consultants Co., Inc.).

高橋昌英：正員，四国電力（株）

川崎憲介：正員，四国総合研究所

松延多喜之助：正員，四電技術コンサルタント

3. 太陽電池素子、モジュールおよびアレイの雷サージ特性

〈3・1〉 限界電流 太陽電池は屋外に設置され、雷の脅威を受けるので、サージの限界通電電流を知ることは雷対策上から重要なことである。

素子単体に雷インパルス電流（波形7〜8/22 μ s）を順方向および逆方向別に流して試験した結果を表1に示す。なお、モジュールの限界通電電流は素子の並列数倍した。

結晶形では順方向の限界はリード線溶断電流とし、逆方向はゼナー電圧に約5%程度、変化をきたす電流とした。アモルファス形では、順・逆方向とも限界は貫通破壊電流とした。

表1から、アモルファス形の限界通電電流は結晶形

表1 雷インパルス限界通電電流

Table 1. Maximum limit lightning impulse current.

通電方向	素子種別・サイズ メーカー 素子・モジュールの別	結晶形4in ϕ	アモルファス形 約100mm $\times$ 100mm			
		D 社	A 社	J 社	K 社	
順方向 ⚡↓	素子	10,000	85	240	110	
	モジュール (素子の直列、並列数)	10,000 (素子46S,1P)	170(推定) (素子22S,2P)	2,880(推定) (素子4S,12P)	1,100(推定) (素子3S,10P)	
逆方向 ⚡↑	素子	300	※ (57)	160	1.4	
	モジュール	300 (2,000) (素子46S,1P)	—	—	—	

- 注) 1. ※ : バイパスダイオード付きのため測定不能
 2. () 内はバイパスダイオードの順方向限界通電電流
 3. 電流波形: 7〜8/22 μ s

に比べて非常に小さいことがわかる。

直撃雷電流はほとんど10 kA 以上⁽¹⁾であるので、直撃雷電流がそのまま素子に流れるような場合には、素子は破損または溶断する。しかし、一般には、接地された金属架台やモジュールの金属フレームに落雷するものと考えられるので、様子が異なる（これについては後述）。

モジュールに流れる誘導雷電流は一般架空配電線における誘導雷電流を参考にすれば、1,000 A 以下⁽²⁾であろう。なお、後述の表5からも誘導雷電流はほぼ1,000 A 以下であることがうかがえる。従って、モジュールに流れる誘導雷電流を最大1,000 A とすれば、単結晶形については通電容量は問題ないが、アモルファス形のモジュールについては1,000 A の通電容量のないものがある。なお、逆方向はバイパスダイオードの通電容量が1,000 A 以上あれば、誘導雷については問題ない。

〈3・2〉 モジュールの耐電圧など 太陽電池モジュールの絶縁抵抗、静電容量、耐電圧、破壊電圧などを表2に示す。

供試モジュール（不良品を除く）の絶縁抵抗は、1,000 V メガーで、2,000 M Ω 以上、静電容量は290〜1,100 pF、インパルス破壊電圧は5.5〜6.5 kV（電圧波形1.3/52 μ s）である（表2では3〜4 kV の不良品もあった）。

背面金属はくを有するモジュールの構造を図2に、その等価回路を図3に示す。一般に、 C_{PE} の耐圧が C_{PM} より低いので、サージ電圧が印加されると C_{PE} が先に絶縁破壊し、ここがピンホールとなり、これか

表2 モジュールの端電圧など
Table 2. Withstand voltage, etc. of modules.

項目	素子種別 メーカー・形式	結 晶			アモルファス							
		A 社 CZ-43WP	B 社 RSA 60147 -481	D 社 CZ-45WP	A 社		C 社 KBA 40G		J 社 ELQ 503-248		K 社 AMP -30F2	
					No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
絶縁抵抗 (M Ω) (1,000 V メガー)		以上 2,000	以上 2,000	以上 2,000	以上 2,000	以上 2,000	フラフラして 一定せず	以上 2,000	以上 2,000	以上 2,000	以上 2,000	以上 2,000
静電容量 (pF)		710	470	115	1,090	1,100	465	290	640	680	620	610
耐電圧	AC 2 kV 1 分間	—	—	—	良	良	0.6 kV で ストップ	良	良	良	良	良
	インパルス + 4.5 kV (1.3/52 μ s)	—	—	—	不良	良	不良	良	良	良	良	不良
破壊電圧	AC (kV)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.25	—
	インパルス (kV)	—	—	—	4.5	5.5	3	5.5	5.5	6.5	5.5	4.0

図 2 モジュール構造図 (簡略図)
Fig. 2. Structure of module.

図 3 等価回路
Fig. 3. Equivalent circuit of module.

図 4 C_{PE} 絶縁破壊時の波形例
Fig. 4. Wave form of breakdown of C_{PE} .

ら吸湿劣化することが懸念される。従って、このようなピンホールを作らないようにするためには、背面金属はくは金属フレームに接続しておくことが望ましい。また、背面金属はくを金属フレームに接続して C_{PE} をショートしておくこと、 $C_{PM} \gg C_{PE}$ (表 2 の静電容量は C_{PE} である) であることから、対地静電容量が非常に大きくなり、誘導雷電圧が低く抑えられ、誘導雷対策上からも極めて有利である ($C_{PM} \div 15,000 \text{ pF}$, $C_{PE} \div 300 \sim 1,000 \text{ pF}$)。

C_{PE} の絶縁破壊時の波形例を図 4 に示す。図 4 の A_1 点で C_{PE} が破壊し、 A_2 点付近で C_{PE} が自復し、その後 A_3 点直前まで C_{PE} は逆電圧に充電され、 A_3 点で、その逆電圧に耐えることができず再度破壊したことを示す。

〈3・3〉 アレイのサージ特性など 西条太陽光試験発電所の 500 V ユニットアレイはモジュールが 20~30 枚直列に接続され、その内部素子の長さは、結晶形で約 150 m あり、サージに対しては集中定数回路として取扱いにくい。そこで、ユニットアレイの対地静電容量、サージインピーダンス、サージ伝搬速度などを測定した。その測定結果を表 3 に示す。なお、サージインピーダンスおよびサージ伝搬速度測定

図 5 サージインピーダンスおよびサージ伝搬速度測定回路
Fig. 5. Measurement circuit for surge impedance and surge propagation speed.

F 社、末端ショート
図 6 サージインピーダンスおよびサージ伝搬速度測定時のオシログラム例
Fig. 6. Measured wave form for surge impedance and surge propagation speed.

回路を図 5 に、オシログラムの例を図 6 に示す。

サージインピーダンス Z は次式から求めた (図 5 参照)。

$$Z = \frac{(R_7 + R_8)K}{R_7 + R_8 - K} \dots \dots \dots (1)$$

$$K = \frac{R_6 E_2}{E_1 - E_2} \dots \dots \dots (2)$$

F 社の例 (図 6) では $R_6 = 113 \Omega$, $E_1 = 1,265 \text{ V}$, $E_2 = 438 \text{ V}$, $R_7 = 3,000 \Omega$, $R_8 = 100 \Omega$ であるので、 $Z = 61 \Omega$ が得られる。

伝搬速度 v はアレイ内の総延長にリード線の長さを加えて 2 倍した長さ、すなわちサージの往復伝搬距離を、その間に要する伝搬時間で割って、アレイ内のサージ伝搬速度 v を求めた。

F 社の例では

往復伝搬距離 = 147.8 m $\times$ 2

往復伝搬時間 = 1.4 μs (図 6 参照)

であるから、 $v = 211 \text{ m}/\mu\text{s}$ となる。

表 3 の値はメーカによって大幅に異なっている。その主な理由は、背面金属はくの有無およびその背面金属はくが金属フレームに接続されているかどうかにある。このため、雷サージ保護用の避雷器取付数もまた異なる (後述)。

対地静電容量は静電容量計とパルス法により測定し

表 3 ユニットアレイのサージ特性
Table 3. Surge characteristics of unit array.

素子種別 メーカー・形式	結 晶 形							アモルファス形		
	A 社 CZ- 43WP	B 社 RSA- 60147	PSA- 100H	C 社	D 社 CZ- 48WP	E 社 ASI-16	F 社	A 社	J 社 ELQ- 503	K 社 AMP- 30F3
項 目										
対 地 静 電 容 量 (pF)	20,700	14,900	5,850	9,000	3,500	589,000	27,000	24,600	18,000	14,000
サージインピーダンス (Ω)	48	91	123	158	154	18	61	147	81	90
サージ伝搬速度 (m/μs)	187	148	284	195	297	23	211	200	72	69
ユニットアレイの 直列モジュール数	26	29	30	17	27	36	27	18	22	22
背面金属はくの有無	有	有	有	無	有	有	有	有	有	有
背面金属はくとフレーム との接続の有無	無	無	無	—	無	有	無	無	無	無

たが、両者はほぼ一致した。表 3 には、パルス法による値を記載した。

4. 西条太陽光試験発電所の雷対策

当システムにおける雷サージ対策は表 4 のとおりである。このうち、太陽電池アレイに対する雷対策について述べる。

以下のように、静電誘導法で避雷器 1 個あたりのモジュール数を推定した。ここで、 C_F を次のように仮定して求める (図 8)。最終段リーダヘッドを半径 R (m) の球と仮定し、地上 h (m) にあるものとする、球の対地静電容量 $C_e^{(4)}$ は、

$$C_e = \frac{8\pi\epsilon_0 h R}{2h - R} \dots\dots\dots (3)$$

である。ここで文献 (2) から推定して、 $R=15$ m, $h=65$ m とすれば、

$$C_e = 1,885 \text{ pF} \quad \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

となる。実際の地表面にはアレイ架台があり、凹凸が激しいので静電容量の算出は単純ではないが、 C_e の半分がリーダヘッド直下の地面 πR^2 の範囲に様に分布しているものと仮定すれば、直下地表面では C_F は、

$$C_F = \frac{1,885}{2\pi R^2} = 1.334 \text{ pF/m}^2 \dots\dots\dots (4)$$

となる。またモジュールは 33.9° 傾けてあるので C_F を

$$1.334 \times \cos 33.9^\circ = 1.11 \text{ pF/m}^2 \dots\dots\dots (5)$$

とする。

アレイの誘導電圧がアレイの耐電圧 4.5 kV を超過する場合は、何らかの雷保護対策が必要である。この

表 4 西条太陽光試験発電所の雷対策
Table 4. Countermeasures against lightning at Saijo Photovoltaic Test Plant.

	雷 対 策
太陽電池アレイ	① ブロック単位に両端およびモジュール 4 枚に 1 個の割合でアレスタ ② 直流集電バスにアレスタ ③ 架台の連接接地
インバータ	① 独立避雷針 ② インタフェース配線にアレスタ
6.6 kV フィーダ	① アレスタ

図 7 静電誘導等価回路

Fig. 7. Equivalent circuit for electrostatic induction.

図 8 最終段リーダヘッド

Fig. 8. Final stage of stepped leader head.

表 5 避雷器 1 個あたりのモジュール数など
Table 5. Number of modules protected by one arrester.

素子種別	項目	ユニットアレイの面積 (m^2)	C_0 (μF)	ユニットアレイの対地 静電容量 C (μF)	誘導電圧 $C_0 V_0 / C$ ($V_0 = 40 \text{ kV}$) (kV)	サージ インピー ダンス (Ω)	誘導 電流 (A)	モジュール 内の長 さ (m)	伝搬 速度 ($\text{m}/\mu\text{s}$)	避雷器 1 個 あたりのモ ジュール数 (枚)
結晶形	A 社	13.3	14.8	20,700	29	48	600	4.9	187	14
	B RSA 形	15.9	17.6	14,900	47	91	520	4.8	148	7
	PSA 形	16.4	18.2	5,850	124	123	1,010	4.8	284	5
	C 社	9.7	10.8	9,000	48	158	300	7.3	195	6
	D 社	13.5	15.0	3,500	171	154	1,110	4.9	297	4
	E 社	13.6	15.1	589,000	1.0	18	60	4.7	23	不要
アモルファス形	F 社	13.7	15.2	27,000	23	61	380	5.3	211	17
	A 社	9.4	10.4	24,600	17	147	120	3.59	200	35
	J 社	10.9	12.1	18,000	27	81	330	1.23	72	23
	K 社	10.9	12.1	14,400	34	90	380	1.23	69	18

(注) 電圧波頭長 $1.2 \mu\text{s}$

ためには、適当な避雷器の取付けが効果的であるので、その取付数を求めて表 5 に示す。

避雷器 1 個あたりのモジュール数は (6) 式から求める。ただし、(6) 式は避雷器の制限電圧は無視すると共に、両側に避雷器を取付けることとして保護可能な電圧以上に上昇させない条件式を設定したものである。

$$N = 2E_{vt} / VL \dots\dots\dots (6)$$

N : 避雷器 1 個あたりのモジュール数 (枚),
 E : 太陽電池と架台間の耐電圧 (kV) (本論文では 4.5 kV), v : アレイ内のサージ伝搬速度 ($\text{m}/\mu\text{s}$), t : 電圧波頭長 (μs), V : 誘導電圧 (kV), L : モジュール内の長さ (m /モジュール)

避雷器 1 個あたりのモジュール数は、メーカーにより大幅に異なる。これはアレイのサージ特性、特に大地静電容量に大きく左右されるためである。E 社は背面金属はくが接地されているため、極めて対地静電容量が大きく、誘導電圧は 1.0 kV で耐電圧 4.5 kV より低く避雷器は不要である。

西条太陽光試験発電所では、多数のメーカーの製品が使用されているので、メーカーごとに避雷器取付間隔を変えることは煩雑であること、また逆に避雷器の価格が安価であることなどのため、各メーカーとも一律に最も厳しい D 社をベースにしてモジュール 4 枚ごとに避雷器を取付けている。

なお、ブロッキングダイオードにも並列に避雷器を取付けて逆方向の過電圧保護を行っている。

5. 太陽電池アレイ耐雷設計検証試験結果

〈5・1〉 誘導雷対策検証試験

(1) 試験回路 誘導雷は雷雲間または対地間の放電により雷雲内の電荷が急変した場合、静電誘導により太陽電池に電圧が誘導される現象である。誘導雷電圧が最も大きくなるのは、太陽電池上空にステップドリードが降りてくる場合である。このステップドリードの最終段の静電誘導を模擬するため、太陽電池上約 2.35 m にメッシュ状の金網を張り、インパルス電圧を印加した。測定点を図 9 に示す。図 9 において、測定点はユニットアレイのマイナス端子点、プラス端子点、マイナス端子から最初の避雷器点、マイナス端子と最初の避雷器との中間点および中性点の 5 箇所である。これら 5 箇所における各測定点と架台間の誘導

図 9 誘起電圧測定点

Fig. 9. Measurement points of induced voltages.

電圧を測定した。

実際のステップドリーダ最終段は地上高 50 m、電圧 40 MV 程度であるといわれている。試験と実際の状況を対比すると、太陽電池アレイに対する静電容量から、雷雲底電圧の約 8.8% のインパルス電網に印加すると等価になる。これを図 10 に示す。

(2) 試験結果 試験は、約 1.2 kV のインパルス電圧を印加し、各測定点に誘起される電圧を測定した。金属網に印加したインパルス電圧の波高値および波形を表 6 の左欄に示す。

F 社アレイについて、避雷器がない場合の各測定点に誘起される電圧の測定結果を表 6 に、実測波形例を図 11 に示す（この波形から誘起電圧を読取る）。

実測結果から、太陽電池モジュールに誘起される電圧が、太陽電池の耐電圧 4.5 kV になる雷雲底電圧と波頭長の関係を求めると図 12 のようになる。

前述のように、雷雲底の電圧は 40 MV 程度⁽³⁾といわれていることから、避雷器などの耐雷対策を施さない場合は、太陽電池の耐電圧を超える電圧が誘起されることになり、誘導雷対策の必要性が確認された。

一方、避雷器が設置されている場合の試験は、避雷器が動作した状況を模擬するため、あらかじめ避雷器を短絡して行い、誘起電圧は測定結果に避雷器の制限電圧を加えて求めることにした。避雷器と避雷器の中間点に誘起された電圧を表 7 に示す。

図 10 誘導雷の等価回路

Fig. 10. Equivalent circuit of induced lightning.

表 6 誘導電圧実測結果

Table 6. Measured induced-voltages.

(単位: V)

測定点 印加電圧 kV (μs/μs)	一極	中間点	避雷器	中性点	+極
1.20(1.3/67)	1.0	1.1	1.1	1.6	1.7
1.27(0.7/60)	1.6	1.7	1.8	2.1	2.1
1.19(0.6/58)	1.4	1.5	1.5	2.2	2.2
1.19(0.6/58) *	1.3	1.4	1.5	2.1	2.1

* : 架台接続地

避雷器なしの場合の誘起電圧、ただし*は避雷器あり
印加電圧: 1.2 kV 0.6/58 μs

図 11 誘導雷模擬試験実測波形例

Fig. 11. Examples of measured induced-voltage wave forms.

図 12 太陽電池モジュールが許容できる雷インパルス電圧波頭長と雷雲底電圧

Fig. 12. Wave front time and cloud voltage under which induced voltage between solar cell and its supporter is 4.5 kV.

表 7 避雷器設置時の試験結果(中間点電圧)

Table 7. Measured induced-voltages at middle point.

(単位: V)

印加電圧 kV (μs/μs)	避雷器あり*2 (モジュール 4 枚ごと)	避雷器なし
1.20(1.3/67)	0.2	1.1
1.27(0.7/60)	0.4	1.7
1.19(0.6/58)	0.4	1.5
1.19(0.6/58) *1	0.4	1.4

* 1 : 架台連接接地をした場合の数値を示す

* 2 : 避雷器の制限電圧 0 kV

図 13 雷電圧40MVのときのインパルス電圧波頭長と中間点誘起電圧

Fig. 13. Wave front time and induced voltage at middle point in case that cloud voltage is 40 MV.

また、雷雲底電圧が 40 MV のときに中間点に誘起される電圧と波頭長の関係を図 13 に示す。雷雲底の電圧 40 MV 程度から考えると、十分保護可能なことが確認できた。

また、中間点に誘起される電圧の測定結果から、雷雲底電圧 40 MV のときの避雷器 1 個あたり保護可能な太陽電池モジュール枚数は、波頭長 1.2 μs の標準波に対して次のようになる。

表 7 から波頭長 1.3 μs における誘起電圧は 0.2 V である。図 13 を参考にして 1.2 μs では 0.22 V とする。40 MV 印加時の中間点電圧は、モジュール 4 枚ごとに避雷器取付けで、

$$0.22 \text{ V} \times \frac{3.520 \text{ kV}}{1.2 \text{ kV}} = 0.645 \text{ kV} \quad (\text{図 10 参照})$$

ただし、避雷器の制限電圧 = 0 kV

となる。実際の避雷器の制限電圧を 1.5 kV とすると、避雷器 1 個あたりのモジュール枚数は、

$$\frac{4.5 \text{ kV} - 1.5 \text{ kV}}{0.645 \text{ kV}} \times 4 \text{ 枚} = 19 \text{ 枚}$$

でよいことになる。

これは設計時 17 枚 (表 5 の F 社) に対して、ほぼ同じであり、事前検討の方法が妥当であったことが確認できた。

<5・2> 太陽電池架台直撃雷検証試験

(1) 試験回路 太陽電池アレイへの直撃雷は、最も上部に位置する太陽電池架台に落ちるものと考えられることから、試験は、架台頂部へインパルスを印加して行った。印加したインパルス電流は次のとおりである。

波高値: 5~6 A, 波頭長: 0.3~5.4 μs, 波尾長: 18~25 μs

なお供試太陽電池アレイおよび測定点は誘導電圧検証試験と同じく図 9 に示すとおりである。

(2) 測定結果 試験は、供試アレイの端にインパルス電流を印加し、各所に誘起される電圧を測定した。印加インパルス電流の波高値および波形を表 8 の左欄に示す。

避雷器がない場合に各所に誘起される電圧の測定結果を表 8 に示す。

試験結果から、太陽電池モジュールに印加される電圧が太陽電池の耐電圧 4.5 kV になる雷撃電流と波頭長の関係を求めると、図 14 の避雷器なしの曲線となる。

図 14 から、波頭長 0.3 μs の雷撃電流に対する許容値は約 20 kA である。これ以上の雷撃電流の発生確率は約 60%⁽¹⁾ となるので、大部分の雷撃で太陽電池の耐電圧を超える電圧が誘起されることになる。一方、避雷器が設置されている場合の試験は誘導雷の模擬試験と同様に、避雷器が動作した状況を模擬するため、あらかじめ避雷器を短絡して行った。避雷器と避雷器の中間点に誘起された電圧を表 9 に示す。また、

表 8 直撃雷模擬測定結果(避雷器なし)

Table 8. Measured induced voltages (without areaster).

(単位: V)

印加電流 A (μs/μs)	一 極	中間点	避雷器	中性点	+ 極
5.0 (5.4/25)	0.23	0.23	0.23	0.16	0.16
5.4 (1.7/20)	0.44	0.4	0.36	0.24	0.24
5.5 (0.8/19)	0.68	0.7	0.6	0.34	0.38
5.9 (0.3/18)	1.3	1.3	1.3	0.62	0.48
5.9 (0.3/18)*	0.9	0.9	0.8	0.48	0.34

*: 架台連接接地

図 14 太陽電池に許容できる雷撃電流波頭長と波高値

Fig. 14. Wave front time and lightning current at which induced voltage between solar cell and its supporter is 4.5 kV.

表 9 避雷器設置時の直撃雷模擬試験結果
(中間点電圧)

Table 9. Measured induced-voltages at middle point.
(単位: V)

印加電流 A ($\mu\text{s}/\mu\text{s}$)	避雷器あり (モジュール 4 枚ごと)	避雷器なし
5.0(5.4/25)	0.06	0.23
5.4(1.7/20)	0.12	0.44
5.5(0.8/19)	0.19	0.68
5.9(0.3/18)	0.4	1.3
5.9(0.3/18)*	0.25	0.9

*: 架台連接接地

図 15 連接接地の効果

Fig. 15. Effect of interconnecting earth.

誘起電圧が太陽電池モジュールの耐電圧 (4.5 kV) になる雷インパルス電流の波頭長と波高値の関係を図 14 に示す。

インパルス電流波頭長 0.3 μs の場合を見ると、インパルス電流が 44 kA 以上流れると、耐電圧を超える電圧が誘起される。44 kA 以上の電流の発生確率は、約 30%⁽¹⁾あり、この場合は避雷器をモジュール 4 枚ごとに取付けていても架台に直撃雷を受けると保護できないことになる。

(3) 太陽電池アレイ架台の連接接地の効果

一般に、設備の接地抵抗が低いほど耐雷対策の効果が高い。雷撃に対する接地抵抗は、雷撃電流の立上りが非常に早いため、局所的な接地抵抗の影響を強く受ける。

この局所的接地抵抗を低減するには、雷撃点に近いところで雷撃電流を分流するのが効果的である。雷撃電流の分流を多くするため、隣接した太陽電池架台を連接しその効果を確認した。

直撃雷における効果を図 15 に示す。誘導雷に対しては効果がない (表 6) が、直撃雷に対しては雷撃電流の分流効果が効いて誘起電圧がほぼ 70% に低減できることがわかった。このことから、耐雷対策には隣

接の太陽電池架台を極力連接接地すればよいことが確認できた。

6. ま と め

主要結果は次のとおりである。

(1) 太陽電池アレイの保護 避雷器の取付間隔は、誘導雷に対しては (6) 式でよいことを確認した。また、太陽電池架台の連接接地は、直撃雷に対しては誘起電圧がほぼ 70% に低減できることを明らかにした。

(2) 素子、モジュールのインパルス通電限界電流 単結晶は素子、モジュールとも 10,000 A である。アモルファスは素子 90~240 A、モジュール 170~2,800 A である (電流波形 7~8/22 μs)。

(3) モジュールのインパルス破壊電圧 単結晶およびアモルファスモジュールについての試験結果は 5.5~6.5 kV である (電圧波形 1.3/52 μs)。

(4) ユニットアレイのサージ特性 サージ特性はメーカーによって大幅に異なる。その範囲は次のとおりである。

対地静電容量: 3,500~589,000 pF

サージインピーダンス: 18~158 Ω

サージの伝搬速度: 23~297 m/ μs

(5) 太陽光発電所のアレイの雷対策 アレイには避雷器を取付ける。1 アレイ内の避雷器取付数は最も厳しい D 社を基準にしてモジュール 4 枚ごとに取付けている。

なお、問題点として、雷撃時のアレイの誘導電圧・電流の大きさ、波形、継続時間などの実際の値が、現在不明である点が挙げられる。

本研究にあたっては、新エネルギー・産業技術総合開発機構の杉本 健理事をはじめ、関係各位により、計画の推進にあたって種々御指導、御配慮を賜った。また、四国総合研究所 三木昭二常務には太陽光発電技術全般につき、指導、援助をいただいた。ここに、誌上を借り、深く感謝の意を表します。

(昭和 63 年 11 月 25 日 受付, 平成元年 4 月 17 日 再受付)

文 献

- (1) 耐雷設計基準委員会送電線分科会: 「送電線耐雷設計ガイドブック」, 電中研研究報, No. 175031, 263 (昭 51)
- (2) 耐雷設計基準委員会配電線分科会: 「配電線耐雷設計ガイドブック」, 同上, No. 175030, 237 (昭 51)
- (3) 耐雷設計基準委員会配電線分科会: 「配電線耐雷設計基準要綱」, 電中研技報, 13, No. 4, 130 (昭 38)
- (4) 通信工学ハンドブック, p. 155 (昭 32) 電気通信学会