

対地静電容量計測を用いた太陽電池モジュール間の断線箇所検出手法の実験的検討

Experimental Studies for Disconnection Detection between PV Modules
by Using Earth Capacitance Measurement

高島 工^{*1} 山口純司^{*2} 大谷謙仁^{*1} 大関 崇^{*1} 加藤和彦^{*1} 石田政義^{*2}
Takumi TAKASHIMA Junji YAMAGUCHI Kenji OTANI Takashi OOZEKI Kazuhiko KATO Masayoshi ISHIDA

Abstract

The diagnosis and monitoring are effective to minimize the outage period and maximize the lifetime yield of PV systems. The objective of this study is to develop the diagnostic technologies for PV systems, especially for the arrays. Among the various methods for the diagnosis technologies, the electrical methods are the most promising for installing into the power conditioners and for testing equipments. In this paper, we proposed the electrical method for disconnection detection between PV modules in PV string, which is the earth capacitance measurement, and showed the results of some fundamental experiments. The earth capacitance of PV string is in proportion to the module numbers, and is not affected by irradiation. These features resulted that the earth capacitance measurement could detect the disconnection position between the modules without the effect of irradiation. Moreover, this method could be applied not only to the string consist of the crystalline Si modules but also to the one consist of the amorphous Si modules.

キーワード：太陽光発電システム，故障診断，電気的手法，断線検出，対地静電容量計測

Keywords: PV system, failure diagnosis, electrical method, disconnection detection, earth capacitance measurement

1. はじめに

太陽光発電システム(PVシステム)の性能診断技術は、システムの故障や劣化による運転停止時間を最短化し、システムの生涯出力をより大きくするために必要不可欠なものである。しかし、PVシステムの出力は日射強度やモジュール温度などの環境条件に大きく左右され不安定であるため、故障等により本来の出力が得られていない場合でも、出力の減少を環境条件の変化によるものとして見逃してしまう可能性がある。そこで、本研究はPVシステムの故障・劣化を検出する性能診断技術を開発することを目的とし、特にPVシステムの直流側であるPVアレイについて、その故障診断技術を検討している。本報では、その基礎的検討として、性能低下要因と故障診断方法について整理するとともに、特に診断技術として有望と考えられる電気的診断手法について、対地静電容量計測法を用いた太陽電池ストリング中のモジュール間の断線箇所検出実験の結果を報告する。

2. PVアレイの性能低下要因と故障診断手法

PVシステムの発電性能の低下要因として、(1)モジュールの劣化、(2)モジュールの故障(モジュール内の断線、個々のセルレベルでの異常)、(3)アレイ内の断線、(4)パワーコ

ンディショナの劣化・故障、(5)日射条件の変化(隣接地への建物建築等、外的要因による変化)、等が考えられる。ここで、PVシステムユーザ約1000軒を対象としたアンケート調査によると、機器の修理・交換を必要とした故障が1割程度あり、故障の内訳としてはパワーコンディショナ部が約6割、PVアレイの不具合は1割程度とのものである⁽¹⁾。PVアレイ部の不具合の割合は相対的には少ないが、PVシステムの普及が進むとPVアレイの不具合の絶対数もかなりの件数になると考えられるため、その対策を検討しておく必要がある。さて、PVアレイ側の性能低下原因として考えられる要因と起こりうる不具合症状を表1に構成要素別に整理した。これらの不具合症状を検出する方法として、目視等外観検査による方法、熱的方法、電気的方法などが考えられる。それぞれの検出方法を表2に示す。

Table 1. Performance degradation factors and failures

表1 PVアレイの性能低下要因と不具合症状

part	performance degradation factors	failures
cell	thermal stress	micro crack
	rust by water	increase in series resistance
	ultraviolet	degradation, discoloration
module	assembling failure	open/short circuit
	air/water bubble	degradation of cover/sealant
	cell mismatch	hot spot
array	wiring mistake	open/short circuit
	module mismatch	hot spot
	partial shade	hot spot

^{*1} (独)産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター
(〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 つくば中央第二)
e-mail: takumi.takashima@aist.go.jp

^{*2} 筑波大学
(原稿受付: 2007年5月14日)

Table 2. Failure detection methods

表2 故障検出方法

method	descriptions
visual	tarnish of cells/modules
thermal (IR)	extraordinary heating (hot spot) heating of by-pass diode
electrical	I-V measurement (dark/illuminated) transmittance line diagnosis RF measurement

3. 電気的故障診断手法

表2に示したように、PVアレイの不具合を検出する手法には、目視による外観検査や赤外線カメラによる発熱の有無の検出、また、電気的特性の計測により出力低下を検出する手法などが考えられる。これらのうち、電気的手法は実用的かつ比較的簡便であり、将来的にパワーコンディショナへの機能統合の可能性も期待できる。そこで本研究では、既存アレイ中の故障箇所を特定することを目的として、電気的故障診断手法の検討を進めている。電気的性能測定手法として、一般的にI-Vカーブ計測による各種特性値(I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF等)の評価が行われるが、これら特性値の評価ではアレイ中の不具合の存在は確認できるものの、不具合箇所の特定に必要な情報は得られないため、不具合箇所の特定が可能な故障診断手法の開発が必要である。

本報告では、PVアレイの不具合事例として断線故障を取り上げ、断線故障を検出する電気的診断手法として対地静電容量計測法を用いた実験の結果を示す。断線故障はアレイ設置時のコネクタ未接続(接続忘れ)や、接続不良コネクタへの加重(積雪およびケーブル自重等によるもの)により発生することが多い。通常、数kW規模の住宅用太陽光発電システムにおいては、複数の太陽電池ストリング(PVストリング：複数の太陽電池モジュールが直列に接続されたもの)が並列に接続されてアレイを構成しているが、本報においては、複数ストリング中のどのストリングに断線故障が発生しているかは開放電圧の測定等により既知として、当該ストリング中のどのモジュールの間に断線故障が発生しているかを特定することを研究の目的とする(図1)。

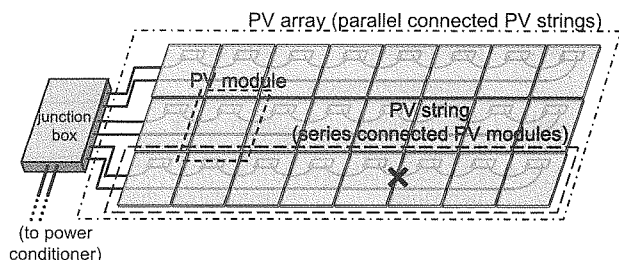


Fig. 1 Disconnection detection in PV string

図1 PVストリングの断線故障の検出概念図

3.1 対地静電容量計測法の原理

静電容量計測法とは電力ケーブルにおける断線箇所の検出に用いられる手法である⁽²⁾⁽³⁾。一般に、電力ケーブルのような伝送線路はインダクタンス $L[H]$ と静電容量 $C[F]$ により図2のように表される。この図より、伝送線路の静電容量成分は線路長に比例して増加することがわかる。

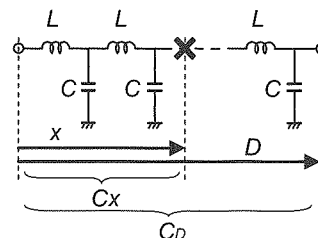


Fig. 2 Transmission line model

図2 伝送線路概念図

よって、(1)式のように健全相と故障相との静電容量の比から断線箇所までの距離 $x[m]$ を求めることができる。

$$x = \frac{C_x}{C_D} D \quad (1)$$

ここで、 $D[m]$ ：線路の全長、 $C_x[F]$ ：断線箇所までの静電容量、 $C_D[F]$ ：線路全長の静電容量である。

3.2 PVストリングにおける対地静電容量計測法

通常、PVストリングには接地工事が施されている。このストリングに対地静電容量計測法を適用する場合、ストリングの正極または負極と接地極との対地静電容量を計測する。PVモジュールは、直列抵抗 $R_s[\Omega]$ 、並列抵抗 $R_p[\Omega]$ 、太陽電池のpn接合における接合容量 $C_d[F]$ の直並列接続で表せる⁽⁴⁾。このときストリングは図3に示すような回路となる。ここで、 $L[H]$ ：インダクタンス、 $C_g[F]$ ：対地静電容量である。

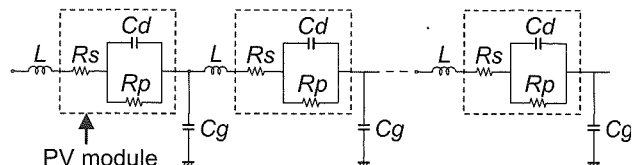


Fig. 3 Model of a string circuit

図3 ストリング等価回路

明状態ではPVモジュールは発電状態にあるため、太陽電池内のpn接合における障壁が低くなり、接合容量 C_d が無視できるようになると考えられる。このときPVストリングは抵抗のみの回路となる⁽⁴⁾。従って、PVストリングは電力ケーブルのような伝送線路とみなせる。ただし、太陽電池は光起電力効果により電力を発生することが単なる伝送線路とは大きく異なる点である。しかしながら、I-V特性計測が太陽電池の出力そのものを計測し日射強度やセル温

度等の環境条件によって出力が変動することとは異なり、対地静電容量を計測することは太陽電池ストリングの回路状態を計測することと考えられるため、太陽電池が発電状態であっても対地静電容量計測法が適応可能であるといえる。

PV ストリングが同一形式の PV モジュールの直列接続からなり、このストリングを分布定数回路とみなすと、 i 枚のモジュールから構成されるストリングが持つ対地静電容量 $C_{g,i}$ は 1 枚の PV モジュールが持つ対地静電容量 C_g に比例すると考えられる。すなわち、

$$1 : C_g = i : C_{g,i} \quad (2)$$

断線故障のない健全ストリング中の全モジュール枚数を M 、この健全相全体が持つ対地静電容量を C_{good} とする。また、ストリングの n 枚目に断線故障がある場合、この故障相の対地静電容量を $C_{trouble}$ とすると、(2)式よりこれらの関係は次式で示される。

$$n : C_{trouble} = M : C_{good} \quad (3)$$

(3)式より、断線故障までのモジュール枚数 n は次式で求められる。

$$n = \frac{C_{trouble}}{C_{good}} M \quad (4)$$

4. 屋内基礎実験

室内実験によって静電容量計測法による断線検出の有効性を検討した。図 4 に実験システムの概要を示す。本実験では、断線故障を PV モジュール間のコネクタを任意に開放することで模擬し、各断線状態 (C0-C1, C0-C2, C0-C3, C0-C4, C0-C5) の対地静電容量を LCR メータ (エヌエフ回路設計ブロック製 ZM2355) によって測定した。室内のストリングは接地が施されていないために、隣接する PV モジュールのフレームを接地線で接続し、模擬的な接地極を作製した。PV モジュールは A 社製多結晶 Si モジュール (p-Si A, Pmax=130W) と B 社製多結晶 Si モジュール (p-Si B, Pmax=80W) の 2 種類を用いた。ストリング中のモジュール枚数は 5 枚である。4 端子対測定による LCR メータの測定条件は、入力電圧 1V、測定周波数 100kHz である。これらのパラメータは予備実験における測定値の安定性から決定した。日射条件は、実内の蛍光灯と窓からの散乱光による擬似的な明状態 (50[W/m²]以下) である。

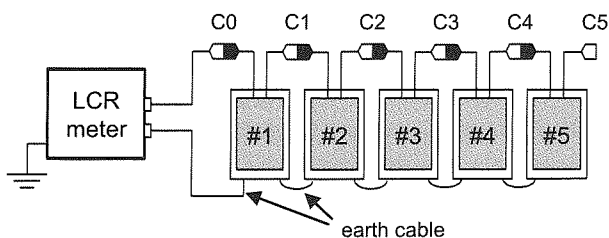


Fig. 4 Experimental apparatus

図 4 室内実験概要

図 5 に室内実験における各断線状態による対地静電容量の測定結果を示す。この図より、対地静電容量は断線箇所までの PV モジュール枚数に比例して増加していることがわかる。また、使用した PV モジュールにより対地静電容量の増加量が異なるのは、構造や大きさ・材料の違いにより静電容量が異なるためと考えられる。裏面材がアルミ箔か PET かによって対地静電容量は大きく変わる、との報告もある⁽⁴⁾。

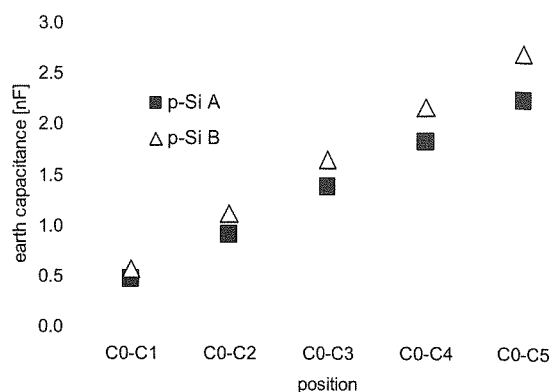


Fig. 5 Earth capacitance with disconnection positions in indoor experiments

図 5 室内実験における対地静電容量

図 6 は、図 5 の測定結果を用いて (4) 式より断線箇所までの PV モジュール枚数を算出したものである。このとき、健全相の対地静電容量として、ストリングが全て接続された状態である C0-C5 の実測値を使用した。算出した PV モジュール枚数の誤差は全て 0.1 枚以内となった。この結果から、対地静電容量の比較により断線箇所に対応した PV モジュール枚数が算出でき、本手法が断線箇所の推定に有効であるといえる。

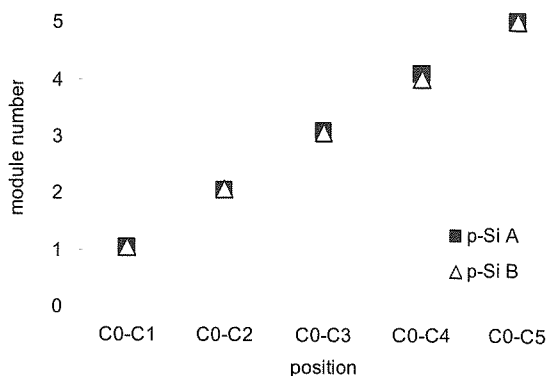


Fig. 6 Calculated disconnection positions in indoor experiments

図 6 室内実験における断線位置推定結果

5. 屋外実証実験

5.1 健全相と故障相の比較による断線位置の特定

静電容量計測法による断線検出手法が実際に稼動しているアレイでも適用可能であるか、屋外実験で検討を行った。実験に使用したアレイを図7に示す。このアレイはA社製多結晶Siモジュール($P_{max}=150W$)20枚からなり、10枚1ストリングで2ストリング(ストリングA, ストリングB)から構成される。測定においては、LCRメータの正極端子をストリングの正極に、LCRメータの負極端子を接続箱のアース端子に接続し、ストリングの負極は開放とした。なお、LCRメータの測定パラメータは室内実験と同一である。また、各モジュールのフレームは金属架台を通して接地されている。

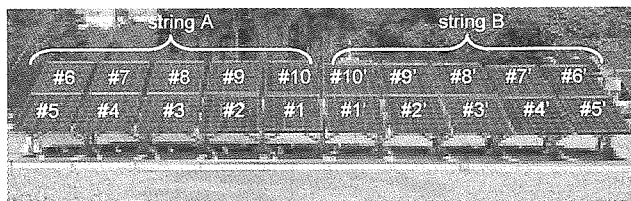


Fig. 7 PV Strings in outdoor experiments

図7 屋外実験に用いたPVストリング

図8にストリングAの配線模式図を示す。測定においては、図に示すC#(#は位置を示す番号)のコネクタを順次開放してコネクタ外れを模擬した。ここで、C0(C10)はストリング正極側末端(負極側末端)のモジュールのコネクタ位置を示し、Tp(Tn)はストリング正極側(負極側)リード線の末端位置を示す。ストリングBについても同様である。

表3に、高日射($800W/m^2$)および低日射($240W/m^2$)時に、ストリングAにおいてモジュール間のコネクタを順次開放し、コネクタ外れによる断線故障を模擬した時の対地静電容量を示す。正極側ストリング末端Tpから開放したコネクタまでの測定値をTp-C#(#は位置を示す番号、例：C2を開放したときはTp-C2)で示している。この表より、対地静電容量計測値が日射強度の影響を受けないことがわかる⁽⁵⁾。この結果は、前章に述べた通り、この測定方法が太陽電池出力を測定しているのではなく、ストリングの回路状態を

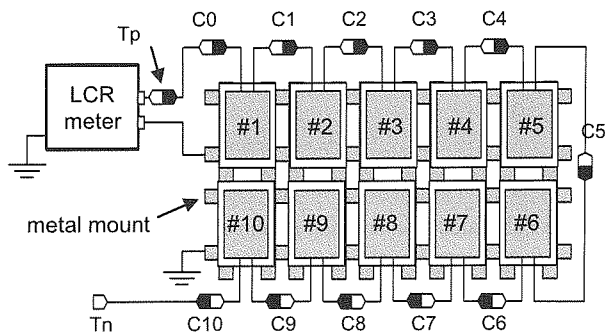


Fig. 8 PV string connection

図8 PVストリング配線模式図

Table 3 Earth capacitance at different irradiations

表3 日射強度の対地静電容量への影響

irradiation [W/m ²]	earth capacitance [nF]				
	Tp-C2	Tp-C4	Tp-C6	Tp-C8	Tp-Tn
800	1.0	1.8	2.7	3.5	4.5
240	1.0	1.8	2.7	3.5	4.5

測定していることを示すものである。なお、太陽電池モジュール温度は太陽電池出力に影響を及ぼすが、この測定方法は太陽電池出力には影響されないため、本実験においてはモジュール温度の計測は行っていない。

図9に、各ストリングについてモジュール間のコネクタを順次開放し、コネクタ外れによる断線故障を模擬した時の対地静電容量の測定結果を示す。この図より、屋外においても、室内と同様に、対地静電容量は断線箇所までのPVモジュール枚数に比例して増加する傾向を示すことがわかる。また、Tp-C10とTp-Tnの測定値が異なる値を示すのは、C10-Tn間のケーブル(10m程度)の持つ対地静電容量(100pF程度)によるものと考えられる。

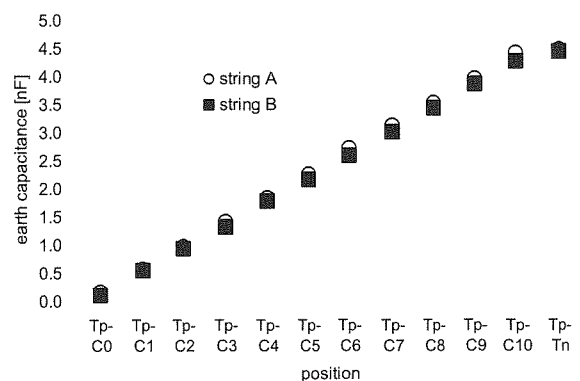


Fig. 9 Earth capacitance with disconnection positions in outdoor experiments

図9 屋外実験における対地静電容量

図10は、図9の測定結果を用いて、一方のストリングを健全相、他方を故障相として、(4)式より断線箇所までのPVモジュール枚数を推定したものである。図中、string A/string BとはストリングAを故障相、ストリングBを健全相としたものである。本測定において、コネクタ番号C#は#番目のモジュールの負極側のコネクタを指すものであるが、(4)式によるモジュール枚数換算においては、推定された枚数(自然数に四捨五入)と実際の開放位置はすべて一致した。なお、本測定結果における推定誤差は、最大でstring B/string AのTp-C9における0.41枚であった。設置現場での作業においては、モジュール単位の扱いがほとんどのため、今回得られた断線位置の推定精度は、屋外で稼動しているストリングにおいても断線箇所の検出に実

用的なレベルであるといえる。しかも、接続箱中の接地端子を利用し、使用する装置はLCRメータのみなので、簡便に測定ができる手法といえる。

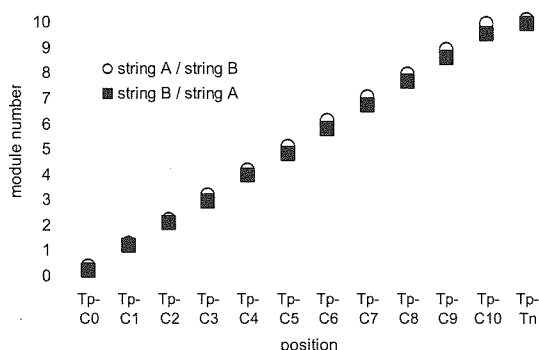


Fig. 10 Calculated disconnection positions in outdoor experiments

図10 健全相と故障相の比較による断線位置推定結果

5.2 故障相のみによる断線位置の特定

前節で述べた検出方法では、断線のない健全相の対地静電容量値と断線のある故障相の対地静電容量値の比較により断線箇所までのモジュール数を算出したが、故障ストリングのみの計測値から断線位置を算出する方法についても検討した。これは、故障相が単独で存在する場合や、並列する他のストリングにもすべて故障が存在し、健全相と故障相の比較による故障位置検出が不可能である状況を想定したものである。PVストリング中の断線箇所が一箇所の場合、(4)式の健全相の静電容量を用いる代わりに、正極と接地極との対地静電容量 C_p と負極と接地極との対地静電容量 C_n を測定することで、それらの静電容量の和をストリング全体の対地静電容量とみなすことができる。このとき(4)式は(5)式に書き換えられ、故障相の静電容量値のみで断線位置が算出できることになる。

$$n = \frac{C_p}{C_p + C_n} M \quad (5)$$

ここで、 n : 正極から断線箇所までのモジュール枚数、 C_p [F]: 正極から断線箇所までの静電容量、 C_n [F]: 負極から断線箇所までの静電容量、 M : ストリング中のモジュール枚数である。

実験には、図7に示した多結晶太陽電池アレイのストリングA、ストリングBと、同じ試験場内の別の架台に設置された同形式同容量のストリングCを使用した。ここで、ストリングCには接続箱が設置されていないため、図8におけるTpおよびTnが存在しない。そのため、ストリングCについてはC0=Tp, C10=Tnとして評価した。前節での実験と同様に、PVモジュール間のコネクタを任意に開放することで断線故障を模擬し、各断線箇所の対地静電容量を正極側からと負極側からそれぞれLCRメータによって測定した。なお、前節で述べたように、日射強度は測定値に影響

しないことがわかっている。

図11に各断線箇所における静電容量の測定結果から求めた開放位置の推定結果を示す。同図より、故障相のみの測定値を用いた場合でも、断線箇所までのPVモジュール枚数の推定が可能であるといえる。本測定結果における推定誤差は、最大でストリングBのTp-C10における0.40枚であった。

前節および本節で評価したモジュール枚数推定誤差の原因としては、モジュール端から接続箱までのケーブルの持つ対地静電容量が考えられる。ここで使用した各モジュール単体が持つ対地静電容量は0.4nF程度であったが、ストリング端ケーブルが持つ対地静電容量は0.1nF程度であり、特にストリング端に近いモジュールの位置を評価する際には3割程度の誤差を伴う可能性がある。本測定値による枚数の推定においても、ストリング端に近いC1やC9を開放した場合の推定誤差が最も大きかった。

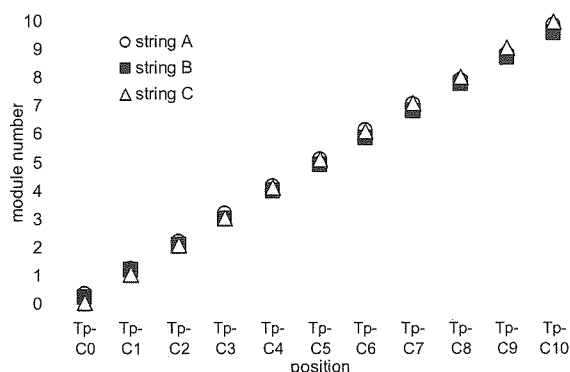


Fig. 11 Calculated disconnection positions from positive / negative measurements

図11 故障相のみによる断線位置推定結果

PVストリング中の断線箇所が二箇所の場合は、本節と前節で述べた計測手法を組み合わせることにより、正極および負極からの対地静電容量測定値と健全相の対地静電容量値を比較することで、ストリング中の断線箇所を算出可能である。同一ストリングに断線箇所が三箇所以上存在することは現実的に想定しにくい、健全相との比較が可能ならば、正極または負極に近い位置から順次断線箇所を検出し補修することで、全ての断線箇所を解消することが可能である。

5.3 アモルファス系太陽電池への適用

前節までは結晶系モジュールストリングの断線位置の推定について述べたが、本節ではアモルファス系モジュールを用いた測定の結果を述べる。結晶系モジュールが300μm程度のシリコンウエハを並べて作成するのに対し、アモルファス系のモジュールは原料を基板上に堆積させて作成することや、シリコン層の厚さが1μm程度とシリコンウエハに比べてずっと薄いことなど、アモルファス系モジ

ジュールはその構造が結晶系モジュールとは大きく異なることから⁽⁵⁾、対地静電容量計測法の適用可能性を検討するものである。

測定ではアモルファス系モジュールのひとつであるC社製薄膜シリコンハイブリッドモジュール5枚から成るストリングを3ストリング使用した。アレイは屋外に設置され、各PVモジュールのフレームは金属製架台を通じて接地されている。LCRメータの負極端子はこの金属製架台に接続し測定を行った。図12は、前節までの測定と同様にコネクタを順次開放して断線故障を模擬した時の対地静電容量値から、2ストリングの測定値の比較により断線位置を推定した結果を示したものである。この図より、アモルファス系モジュールにおいても、結晶系モジュールと同様に、対地静電容量計測法により断線位置の推定が可能であるといえる。なお、枚数推定誤差が大きいものが存在するが、これはストリングCに他のモジュールよりも静電容量値が2割程度大きいモジュールが1枚含まれていたためである。結晶系、非結晶系を問わず、モジュールが持つ静電容量値の個体差が大きい場合の枚数推定誤差をどう処理するかは今後の課題である。

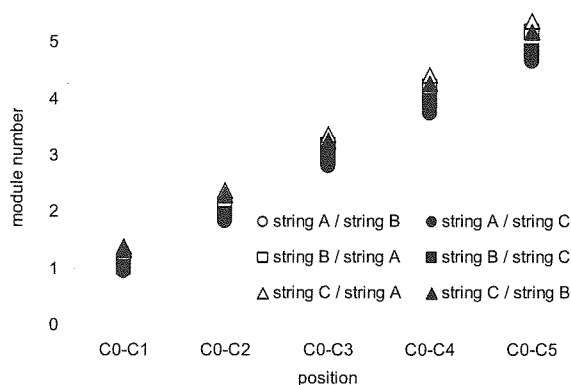


Fig. 12 Calculated disconnection positions
with thin film hybrid type modules

図12 アモルファス系モジュールの断線位置推定結果

6. まとめと今後の課題

PVシステムの直流側であるPVアレイの故障・劣化を検出する故障診断技術の基礎的検討の結果を報告した。まず、セルレベル、モジュールレベル、アレイレベルでの性能低下要因を整理し、次に故障診断方法を手法別に整理した。さらに、将来的にパワーコンディショナ内蔵、またはPV検査機器への導入を考えたときに特に診断技術として有望と考えられる電氣的診断手法について、対地静電容量計測法を用いてモジュール間断線故障を検出する実験の結果を示し、その適用可能性を確認した。主な結果は以下の通りである。

- (1)室内、屋外実験ともに、対地静電容量は断線箇所までのモジュール枚数に比例して増加した。また、対地静電

容量は日射強度の影響を受けないことを確認した。

- (2)健全相と故障相の対地静電容量の比により、断線箇所に対応したPVモジュール枚数が推定可能であることを確認した。
- (3)比較する健全相のない単ストリングにおいても、断線故障が重複していない場合、ストリングの両極から対地静電容量を測定することにより、断線箇所の推定が可能である。
- (4)結晶系モジュールだけでなくアモルファス系モジュールにおいても断線箇所の推定が可能である。

本報で報告した実験は、それぞれのストリングがすべて同一形式のモジュールで構成された状態で測定を行っている。実際のPVシステム設置現場では、屋根の形状に合わせて四角モジュールと三角モジュールを組み合わせるストリングを構成する事例も多数存在する。形状が異なることでモジュールが持つ対地静電容量も異なることが予想されるため、モジュールの個体差を含め、異形モジュールが混在するストリングについての本手法の適用可能性を検討する必要がある。また、モジュール中の一部断線については、バイパスダイオードによって電流が迂回する回路が形成され、モジュールが完全な断線とはならないため、本手法のみによる断線の検出は不可能である。これについては、モジュール内のインピーダンス変化を検出する手法を検討している。

今後は、前述の課題に加え、絶縁不良による地絡、割れや熱ストレス・応力による直列抵抗の増加などの故障について、実用的な故障診断技術を開発する予定である。また、PVアレイ全体の故障箇所の特定を行う場合にはPVストリングの直並列を識別する技術も必要である。これらの技術を性能診断システムとして統合化し、パワーコンディショナの機能の一部として提供できれば、PVシステムのメンテナンス性は大きく向上し、PVシステムの生涯発電量の増大に寄与できるものと考えている。

参考文献

- (1) (独)産業技術総合研究所、(財)電気安全環境研究所、平成16年度～平成17年度NEDO技術開発機構委託業務成果報告書「太陽光発電システム評価技術の研究開発」、2006年3月
- (2) 新版・電力ケーブル技術ハンドブック、飯塚 喜八郎、電気書院、1989年
- (3) 六訂 電線・ケーブルハンドブック、石川 悌二、日立電線株式会社編、1995年
- (4) 桜井・黒川、太陽光発電アレイ分布定数回路シミュレーション～シミュレーション手法の検討～、太陽/風力エネルギー講演論文集、2000年、p307
- (5) 山口他、静電容量計測によるPVモジュール間の断線検出に関する研究、Renewable Energy 2006 Japan Day、2006年、p277
- (6) 太陽エネルギー利用技術、日本太陽エネルギー学会編、オーム社、2006年