

「ソラメンテシリーズ」の技術解説

Technical Guide of “Solamente”

池田輝雄*

1. はじめに

日本各地に多数の太陽光発電所が設置されてきた。売電価格は年々下がり、新たな太陽光発電所建設は投資や収益の面からは魅力が低下している。太陽光発電所建設を請け負うことで事業規模を拡大してきた業者は、事業規模を維持するために建設から保守へと向かい始めている。

しかし、太陽光発電所の心臓部ともいえる太陽電池モジュール（以下、モジュール）については、その保守方法が明確に確立されていないのが現状である。

その理由の一つに挙げられるのは、モジュールの発電量が日射量や気温等の外部環境に依存するため、屋外で発電性能を正確に測定することが非常に難しいことである。このことが保守および点検を著しく困難にしている。

そこでアイテスではモジュールの構成・構造に着目した検査装置を開発した。太陽電池ストリングの開放電圧値と直列抵抗値を計測することで故障モードを特定する SolamenteZ と、インターコネクタに流れる電流が作る微少な磁束密度を捉えることでクラスタ故障箇所を特定する Solamente iS である。

Solamente シリーズの 2 機種を利用することで、以下の 3 種類のクラスタ故障を検知し、かつその場所を正確に特定することが可能となる。

- ・クラスタ断線パネル
- ・クラスタの高抵抗化パネル
- ・バイパスダイオード短絡パネル

これらはいずれも、1 クラスタ分が発電力に寄与できない故障モードであり、3 クラスタ構成のモジュールであれば出力は 67% に低下する。モジュールメーカーは概ね 81% の出力を保証している。

2. SolamenteZ について

SolamenteZ は太陽電池ストリングの開放電圧と抵抗値を測定する。半導体でできたモジュールの直列抵抗値を測定する方法について以下に解説する。



図1 SolamenteZ (型式 SZ-200)

太陽電池セル（以下、セル）、モジュール、太陽電池ストリングの等価回路は一般的に図2のように表現される。太陽電池に光が当たると、直流の起電力を生じるため、直流分のみを考慮したものである。

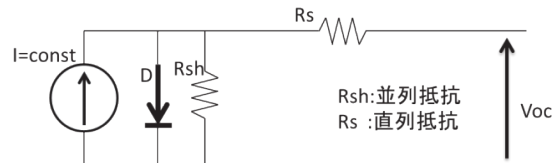


図2 直流等価回路

ここで、セルは半導体の PN 接合を利用しており、PN 接合部分は電気回路的にはコンデンサと同じ構造になっている。(図3)

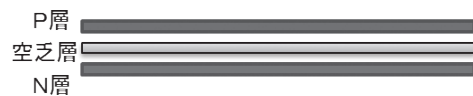


図3 セルの断面

* 株式会社アイテス

以上のことから、セル、モジュール、太陽電池ストリングに交流信号を印加することを考えた場合の等価回路は図4に示すとおり、コンデンサCを考慮するのが妥当である。また、交流を印加する場合には配線によるインダクタンスLも考慮する必要がある。

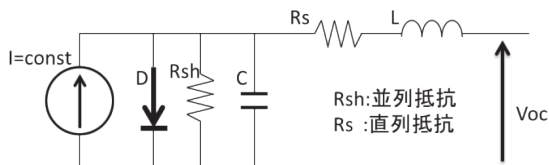


図4 交流を考慮した等価回路

周波数が十分に高い交流信号を印加する場合、並列抵抗 Rsh やダイオード D に比べてコンデンサ C はインピーダンスが低く、図5のように単純な RLC 直列回路に無理なく近似することができる。



図5 交流信号を印加した場合の近似等価回路

RLC 直列回路に対して周波数 $f[\text{Hz}]$ の正弦波を印加した場合のインピーダンスは以下のように計算される。

$$Z = R + j\omega L + 1/j\omega C$$

$$= R + j(\omega L - 1/\omega C) \quad (\text{ただし, } \omega = 2\pi f) \quad (1)$$

よって、インピーダンスの大きさは

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} \quad (2)$$

これらを複素平面で表すと図6のようになる。

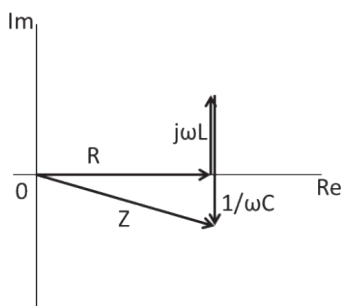


図6 Zを複素平面で表した図

また、周波数 $f[\text{Hz}]$ を横軸に、インピーダンス $|Z|[\Omega]$ を縦軸にして、式 (2) をグラフにしたものが図7である。

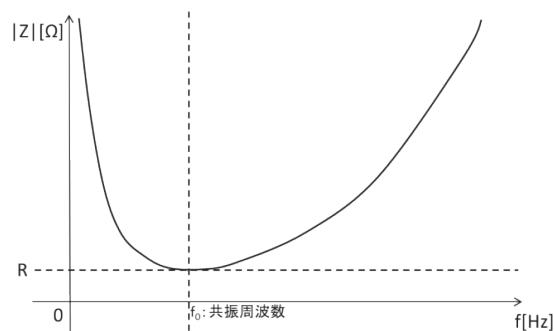


図7 RLC 直列回路のインピーダンス-周波数特性

インピーダンス $|Z|$ は共振周波数 f_0 において最小値となり、このとき $|Z|=R$ となる。なお、共振周波数 f_0 は以下のように計算される。

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC} \quad (3)$$

SolamenteZ は、太陽電池へ印加する正弦波信号の周波数を変えながら、各周波数でのインピーダンスを計測し、その最小値を見つけることで直列抵抗 R_s を探している。

電圧の測定方法についてはここでは省略する。

3. Solamente iS について

Solamente iS は高感度磁気センサを搭載しており、電流による磁束密度を検出する。アンペールの法則によれば、電流経路からの距離を $r[\text{m}]$ とすると、磁束密度 $B[\text{T}]$ は

$$B = \mu H = \mu I / (2\pi r) \quad (4)$$

となる。磁束密度 B は、電流の大きさに比例し、電路からの距離に反比例することが分かる。ここで、

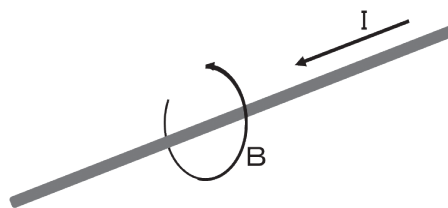


図8 電流 I が作る磁束密度 B

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}] \quad (5)$$

とすると、モジュール内のインターコネクタに流れる電流 I が $1[\text{A}]$ のとき、そこからモジュール表面（ガラス表面）までの約 $5[\text{mm}]$ 離れた場所の磁束密度は約 $4 \times 10^{-5}[\text{T}]$ ほどであり、これは日本周辺の地磁気と同程度の大きさである。

つまり、電流が流れるとその近傍は地磁気程度の

小さな磁束密度が複雑に絡み合っていることが想像できる。Solamente iS を利用すると、電流が作る磁束密度をうまく見分ける事ができるようになる。

クラスタ内のセルは直列に接続されているため、セルストリングには同じ大きさの電流が流れることになる（あるいは全く流れない）。よって、クラスタ内の全てのセルに電流が流れているかどうかを確認する必要はなく、図9のようにモジュール内のクラスタを横断するように Solamente iS の磁気センサを滑らせば、クラスタ故障の判別は可能である。

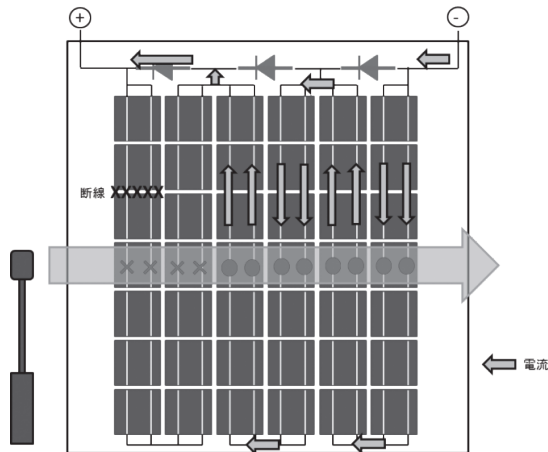


図9 磁気センサのスキャン

4. Solamente による点検

まず、一次検査として Solamente Z により各太陽電池ストリングの開放状態における電圧値と抵抗値を測定する。やはり、得られる測定値は、日照条件・気温等の外部環境に依存したものになるが、他の太陽電池ストリングとの相対比較を行うことにより良否を判定する。

図10は滋賀県にある約500kW太陽光発電所を SolamenteZ で測定した結果をグラフにしたものである。横軸をストリング(109ストリング)、縦軸(左)を開放電圧[V]、縦軸(右)をインピーダンス(抵抗)[Ω]としている。

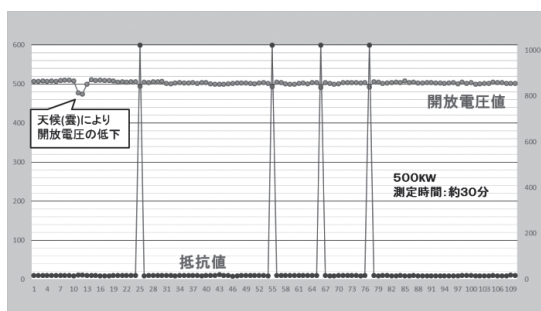


図10 500kW 発電所の測定結果

開放電圧は約500[V] でほぼ一定である。109ストリングのうち4個のストリングで抵抗値が1000[Ω]を超えているが、その他のストリングは約15[Ω]で一定であることが分かる。さらに、この4個のストリングは他のストリングと比較して約10[V]の電圧低下が確認できた。つまりこのことは完全断線しているクラスタが存在することを意味する。

図10の左のほうで、開放電圧が30[V]程度低く測定されているストリングが存在している。測定中に雲がよぎったため、後で再確認したところ他のストリングと同等の開放電圧が確認できた。

次に、二次検査としてクラスタ断線故障を検出したストリングに対して Solamente iS にて電流の有無を確認する。パワーコンディショナー（以下、PCS）に接続し、太陽電池ストリングを発電状態にする。正常である部分は各セルストリングに電流が流れることになる。クラスタ断線になっている部分は恒常的にバイパスダイオード（以下、BPD）が作動しており、セルストリングには電流が流れない。1ストリングを構成している14枚のモジュールに対して、Solamente iS を使って電流が流れていないクラスタを特定すればよい。

この発電所ではクラスタ断線モジュールが4枚発見されたが、Solamente はクラスタの高抵抗化故障、BPD 短絡故障も発見することができる。クラスタの高抵抗化故障はクラスタ断線と同様に抵抗値が大きくなる現象であるが、開放電圧が正常なので開放電圧だけを頼りに点検していると見落とすことになる。

最後に BPD 短絡故障であるが、この故障はストリングの抵抗値は大きくならないが開放電圧値が1クラスタ分だけ低下する。この場合の故障位置の特定は以下のように行う。

まず太陽電池ストリングを開放し、正常であれば電流が流れない状態にする。BPD が短絡しているクラスタは短絡状態になっているので、太陽電池ストリングを開放しても短絡電流が流れ続けることになる（図11）。

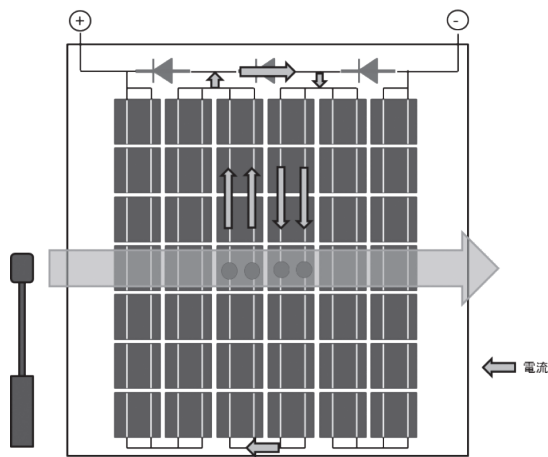


図 11 BPD 短絡故障時の電流の流れ

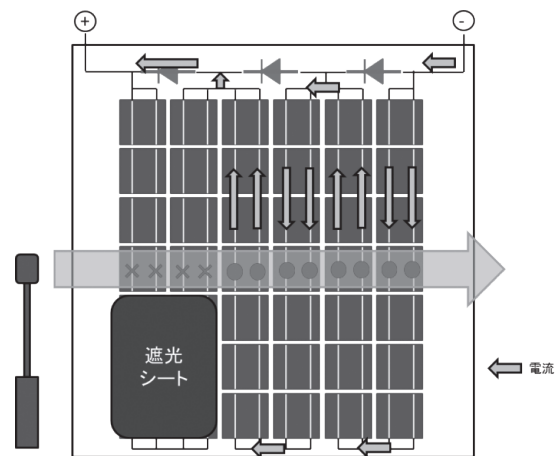


図 12 バイパス回路が正常な場合の電流

以上をまとめると、SolamenteZにより表1のように故障モードを特定することができる。

表1 故障モードの特定

故障モード	開放電圧	抵抗値
正常	正常	小
断線故障	低い	大
高抵抗化故障	正常	大
BPD短絡故障	低い	小

最後に補足事項として、バイパス回路の開放故障の見つけ方を紹介する。まず、太陽電池ストリングをPCSに接続すると、各セルストリングに電流が流れる。電流が流れていることを Solamente iS で確認し、図 12 のようにクラスタの一部を遮光する。こうすることで、意図的に電流をバイパス回路へ流し、遮光したセルストリングには電流が流れず、他のセルストリングには電流が流れていることを確認できれば、この遮光したクラスタについてはバイパス回路が正常に機能していることが確認できる。バイパス回路が開放故障していると、太陽電池ストリング全体の電流が止まるか、もしくは遮光したクラスタにも電流が流れるかのどちらかになる。(図 13) 後者のように電流が流れると発熱し非常に危険である。

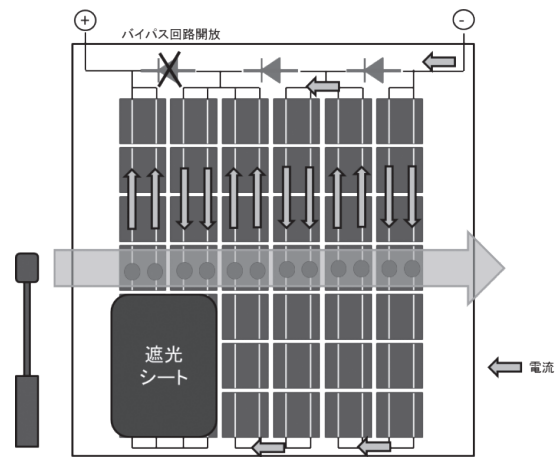


図 13 バイパス回路が開放故障している場合の電流

SolamenteZ は、太陽電池ストリングはセルを直列につなげていることを利用している。つまり故障があれば抵抗が大きくなることを利用しているので、モジュールが並列に接続されている場合は使えない。一方の Solamente iS は電極に流れる電流の有無を点検するものなので、電極にアクセスすることさえできれば、利用可能である。

4. おわりに

外部環境が時々刻々と変化する屋外において、モジュールの性能(出力)を検査することは一部の専門家を除くと非常に困難なことである。そのことをよく理解し、まずはクラスタ故障を見つけること、これが発電所の保守管理につながっていくものと思う。

クラスタ故障は発熱を伴う故障(図 14)であり、安全性の確保においても放置するべきではない。

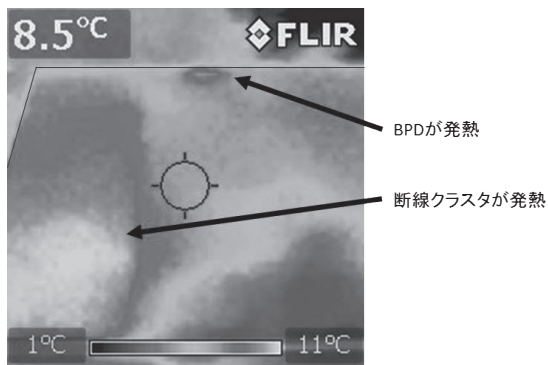


図14 クラスタ故障の発熱状態

なお、アイテスがSolamenteシリーズ2機種を製品化してから約4年、180カ所で点検デモを行ったことで発見したクラスタ故障モジュールは1000枚を超えた。このうちの約70%は設置してから2年未満のものである。

参考文献

- 1) 加藤和彦, 太陽光発電システムの不具合事例

ファイル - PVResQ!からの現地調査報告-, 日刊工業新聞社, 東京

- 2) 2014年5月30日 一般財団法人 太陽光発電協会 (JPEA), 「太陽光発電システム保守点検ガイドライン【10kW以上の一般用電気工作物】」 <http://www.jpea.gr.jp/pdf/upper10kw.pdf> 「太陽光発電システム保守点検ガイドライン【住宅用】」 <http://www.jpea.gr.jp/pdf/inspection.pdf>

著者略歴



池田輝雄 (イケダテルオ)

1991年3月岡山大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月日本IBM株式会社に入社, 2008年9月株式会社アイテスに入社し現在に至る。太陽電池モジュール検査装置開発に従事する。