

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～

学生員 桜井 康弘（東京農工大学） 会員 黒川浩助（東京農工大学）

PV Array Distributed Circuit Simulation

Yasuhiro Sakurai*, and Kosuke Kurokawa*

*Tokyo University of Agriculture & Technology
2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588
Japan
TEL +81-42-388-7445, FAX +81-42-385-6729
E-mail: sueda@cc.tuat.ac.jp

ABSTRACT

PV (Photovoltaic) array installed outside have the possibility to impress overvoltage due to lightning. However surge characteristic on PV array is not fully analyzed, therefore it remains not evident if the PV array should be ground connected or not.

In this paper we propose a model of PV array considering cell's barrier capacitance and ground capacitance for surge analysis.

1. はじめに

太陽光発電アレイは屋外に設置されるため雷サージなど過電圧が印加される危険性がある。しかしアレイのサージ特性の解明が不十分なために、アレイを接地したほうがいいのか、または接地しなくてもいいのかわかっていない。そのため、アレイを接地する国と、接地しない国があるのが現状である。そこで安全性や機器の保護のためにアレイのサージ特性をサージ解析により定量的に評価し、アレイの接地について検討する必要がある。

本研究ではサージ解析を行うために太陽電池セルの接合容量や対地容量などモジュールに分布する静電容量を実験や計算により明らかにすることによりアレイのモデルを提案し、EMTP を用いた解析手法を検討したので報告する。

2. アレイのモデル化手法

2.1. 太陽電池モジュール

一般的な太陽電池モジュールの構造を図 1 に示す。

モジュールはガラス、EVA、セル、裏面シート、金属フレームなどから構成されている。この金属フレームは接地されるため、モジュールの出力端子とフレーム間に対地容量が存在する。サージ解析を行うためにこのようにモジュールに分布するインピーダンスを実験などにより求めモデル化していく。

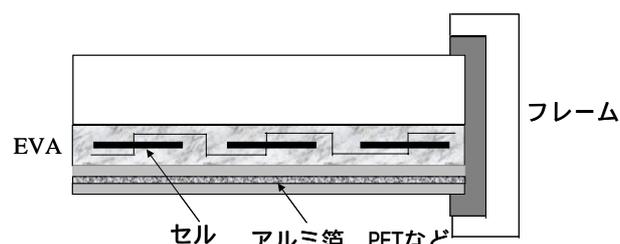


図1 太陽電池モジュール

2.2. 太陽電池セルのモデル

太陽電池セルはシリコンなど半導体の pn 接合でできている。よってセルをモデル化するにあたりこの pn 接合における接合容量を考慮する必要がある。

本研究ではネットワークアナライザを用いセル出力端子間のインピーダンスの周波数特性を測定し、その結果よりセルのモデルを推定した。セルは現在太陽電池モジュールに一般的に用いられている単結晶シリコンセルを用いた。また測定は、セルに光を照射しない場合（暗状態）と光を照射した場合（明状態）の2つの条件で行い比較をした。

2.3. 太陽電池モジュール出力端子間のモデル

太陽電池モジュールは必要な電力を得るために太陽電池セルを数～数十枚直並列に接続する。このモジュール出力端子間のモデルをセル出力端子間のモデルと同様にインピーダンスの周波数特性から推定した。

2.4. 太陽電池モジュールの対地モデル

太陽電池セルは EVA(Ethylene Vinyl Acetate)などの充填材により周囲から絶縁されている。そのためセル出力端子間の主電気回路は大地から絶縁されておりアレイをモデル化するにあたり対地容量を求める必要がある。

本研究ではまずモジュール出力端子と金属フレーム間の抵抗の大きさや対地容量の分布状態を知るた

めに以下のような実験を行った。

- (1) 太陽電池モジュールの出力端子と金属フレーム間に直流電圧を印加して、そこに流れる電流の時間変化を測定する。
- (2) 印加した電圧と測定した電流の時間変化から抵抗値の時間変化を求める。
- (3) 求めた抵抗値の時間変化からモジュール出力端子と金属フレーム間のモデルの形態を推定して、そのモデルの抵抗値の時定数を用いた理論式を求める。
- (4) 理論式を用いて(2)で測定した抵抗値を最小2乗法により近似して、モデルの回路素子の値を求める。

対地容量はモジュールの裏面材の材質によって大きく異なると考えられるので、裏面材に導体であるアルミ箔が用いられているものと、誘電体であるPET(Polyethylene Terephthalate)が用いられているものの2種類で行った。

今回実験に用いた太陽電池モジュールの仕様を表1に示す。

表1 実験に用いたモジュールの仕様

出力	53W
サイズ	985 × 445 × 30 縦mm × 横mm × 厚さmm
フレーム	アルミフレーム
セル	単結晶シリコン(36枚直列)
バックシート	・モジュール1 (テドラー / アルミ箔 / テドラー)
	・モジュール2 (テドラー / PET / テドラー)

3. 実験結果

3.1. 太陽電池セルのモデル

ネットワークアナライザを用いて太陽電池セル出力端子間のインピーダンスの周波数特性を測定した。その結果を図2に示す。実験は太陽電池セルの出力端子間に正弦波を印加して、その周波数を10Hzから10MHzまで掃引し、各周波数におけるインピーダンスを測定した。

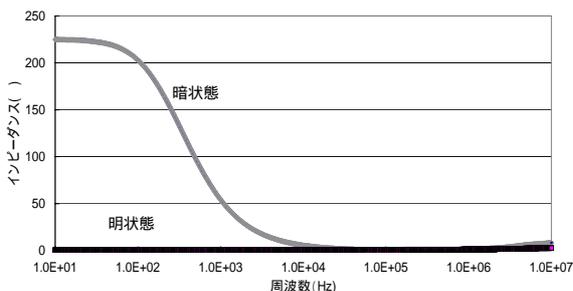


図2 セル出力端子間インピーダンス

また暗状態と明状態の2つの条件で測定を行った。まず、暗状態の場合、測定周波数が高くなるにつれてインピーダンスが減少する傾向を示した。また明状態の場合測定周波数によらずインピーダンスはほぼ一定の値であった。

この結果よりまず暗状態の場合、セル出力端子間のモデルが図3のように抵抗とキャパシタンスで表せるのではないかと考えた。図3のキャパシタンス C_d がセルのpn接合における接合容量を表す。

次に明状態ではセルが発電状態であるためpn接合における障壁が低くなり、その障壁による接合容量が無視できるようになると考えられる。よって図3のモデルの C_d を短絡、つまり抵抗分だけの回路でモデルを表すことができることになる。

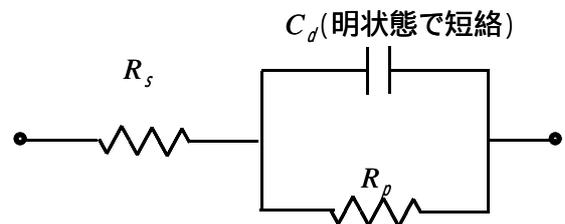


図3 推定した太陽電池セルのモデル

次にこのモデルの回路素子の値を決め、モデルの妥当性を示すため、汎用過渡現象解析プログラムであるEMTP (Electromagnetic Transient Program) を用いた解析を行った。暗状態におけるモデルのパラメータを変化させ、インピーダンスの周波数特性を解析した。その解析結果から得られた回路パラメータの値を表2に示す。またこのパラメータで解析したモデルのインピーダンスの周波数特性と実験結果の比較を図4に示す。ただし、モデルの周波数特性の解析は EMTP の Frequency Scan というツールを用いている。

表2 EMTP で用いたパラメータ(セル出力端子間)

$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$C_d(\text{nF})$
0.1	230	60

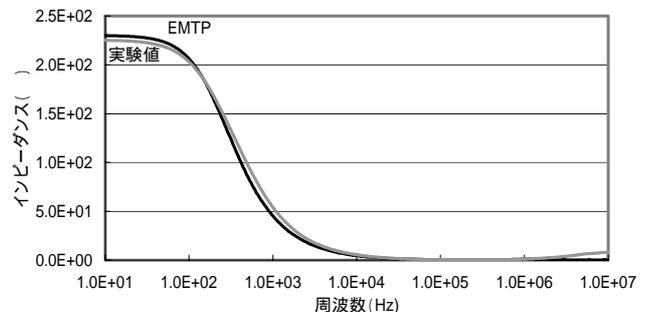


図4 EMTP の計算結果と実験値の比較

図4に示すように実験値を図3の回路の解析結果でほぼ表すことが出来ていることがわかる。よって図3のモデルの妥当性を示すことが出来た。

また、この実験を数枚のセルで行ったが、図5に示すように、測定周波数10Hzにおいて40から250とセルごとにインピーダンスが大きく異なることがわかった。低周波数領域で大きくインピーダンスが異なることから図3のモデルの並列抵抗 R_p がセルにより大きく異なるのではないかと考えられる。

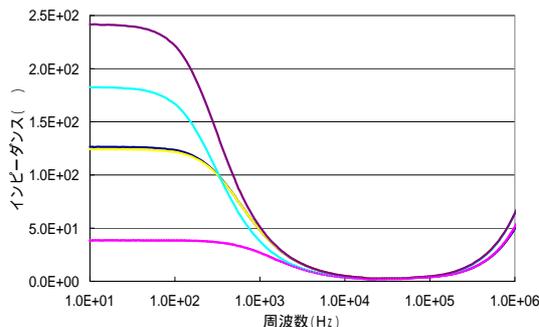


図5 セル出力端子間インピーダンス

高周波領域でインピーダンスが増加する結果が得られたがこれは後で示すモジュール出力端子間のインピーダンスの測定結果に示すように高周波領域でインピーダンスの増加がほとんど見られないため、セル出力端子間インピーダンス測定時に施さなければならない配線によるものでありインダクタンスはセル出力端子間モデルでは無視できる大きさであると考えた。図3のようにセル出力端子間のモデルにはインダクタンスを考慮していない。

3.2. 太陽電池モジュール出力端子間のモデル

セル出力端子間モデルと同様の方法でモジュール出力端子間のモデルを求めた。ネットワークアナライザによる暗状態におけるモジュール出力端子間のインピーダンスの周波数特性を図6に示す。

このモジュールはセルが36枚直列に接続されているものであることから、セル出力端子間モデルを36枚直列に接続したモデルでモジュール出力端子間を表すことができると考えられるが、サージ解析においてブランチ数の増加により計算量が膨大になると思われる。また図6の測定結果よりモジュール出力端子測定結果もセル出力端子間インピーダンスと同じような周波数特性を示しているのでモジュールの出力端子間も図3に示す回路構成でモデル化できると考えた。そこで図3の回路素子の値を変化させ、セルの場合と同様にモデルのインピーダンスをEMTPにより解析した。その結果を図6に示す。また解析結果より得られた回路パラメータを表3に示す。図6からわかるように解析結果を実験値にほぼ一致させること

が出来た。よって図3のモデルの妥当性を示すことが出来た。

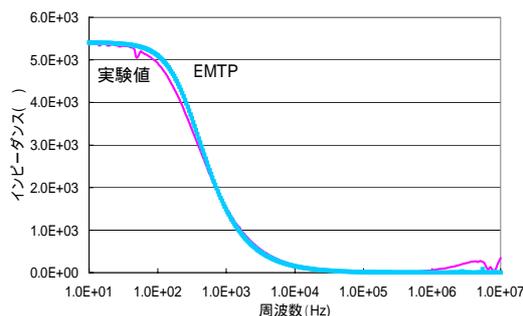


図6 モジュール出力端子間インピーダンス

表3 EMTPで用いたパラメータ
(モジュール出力端子間)

$R_s(\Omega)$	$R_p(k\Omega)$	$C_d(nF)$
3.6	5.5	2.0

セル出力端子間インピーダンス測定で示したようにセルごとに出力端子間インピーダンスの大きさに違いがあるため、やはりモジュール出力端子間のインピーダンスにもそれぞれのモジュールで大きな違いが出た。

3.3. 太陽電池モジュールの対地モデル

太陽電池モジュールの出力端子と金属フレーム間の抵抗値の時間変化を図7に示す。

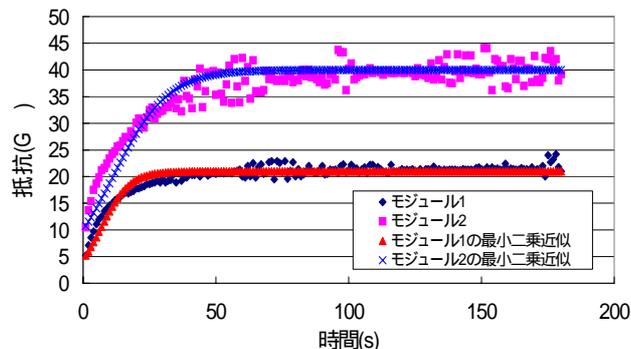


図7 モジュールの出力端子とフレーム間の抵抗

この結果より図8のような回路でモジュールの対地モデルが表せるのではないかと考えた。

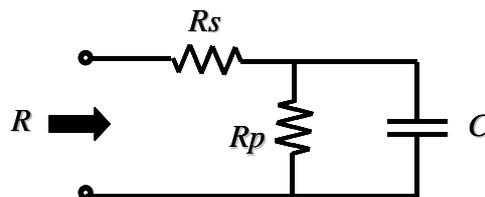


図8 推定した出力端子とフレーム間のモデル

$$R = \frac{R_s(R_s + R_p)}{R_s + R_p \exp(-t/\tau)} \quad (\text{式1})$$

$$\text{ただし } \tau = R_s R_p C / (R_s + R_p)$$

時定数 τ を用いて図8の回路の抵抗値を表すと式1のようになる。モデルの回路素子の値を求めるために式1を用いて実験値を最小2乗法で近似した。その結果も図6に示す。また最小2乗法により得られた回路素子の値を表3に示す。

表4 モジュール対地モデルのパラメータ

裏面材	R_s (G Ω)	R_p (G Ω)	C_d (pF)
アルミ箔	4.3	17.3	520
PET	8.6	32.6	130

この実験は裏面材にアルミ箔が用いられているもの(モジュール1)とPETが用いられているもの(モジュール2)の2種類のモジュールで行ったがやはり絶縁抵抗および対地容量に大きな違いが見られる。

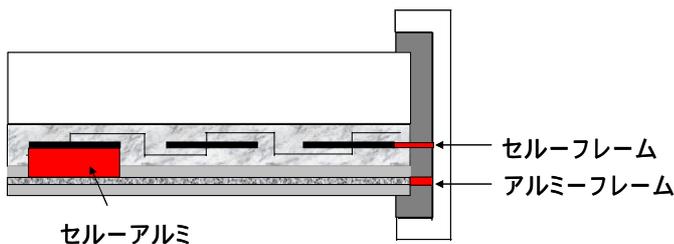


図9 モジュールの対地容量

また裏面材がアルミ箔の場合は図9のように裏面材が導体として働いているのでさらに細かくモジュール出力端子とアルミ箔間、アルミ箔と金属フレーム間についても同様な実験を行った。その結果出力端子とフレーム間の結果とアルミ箔とフレーム間の結果がほぼ同じ値になった。これより裏面材がアルミ箔である場合モジュールの対地モデルはアルミ箔とフレーム間のモデルで表すことができることがわかった。また裏面材のアルミ箔とフレーム間を短絡することによりモジュールに大きな対地容量を持たせることができることがわかる。

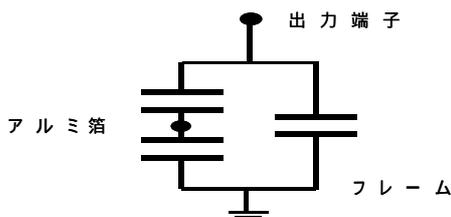


図10 対地容量の分布（裏面材がアルミ箔の場合）

4. 太陽電池モジュールのモデル

今までの実験の結果をまとめて図10のようにサージ解析を行うための太陽電池モジュールのモデルを提案する。このような回路を直並列に組み合わせることでアレイを模擬できるのではないかと考えている。また、モデルにはセルの受光面における無限遠に対しての静電容量も考慮した。これは雷雲など電荷をもつものの影響により太陽電池に電圧が誘導される場合などに雷雲とアレイ間の静電容量を考慮しなければならないと考えたからである。

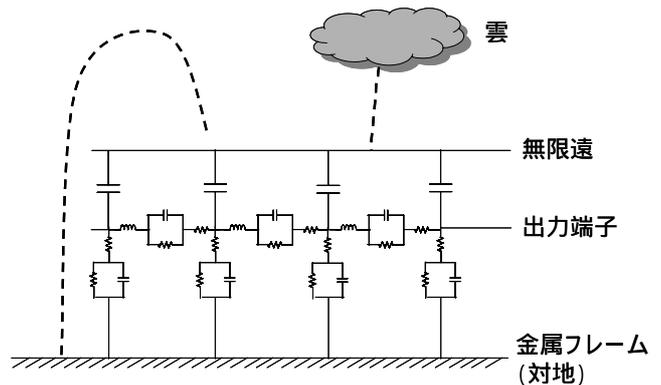


図11 太陽電池アレイモデル

5. シミュレーション

今後、図11のモデルを用いてサージ解析を行っていく。この解析では主に誘導雷を対象に行う。現在、シミュレーションツールとしては過渡現象解析プログラムとして広く利用されているEMTPを考えている。

6. まとめ

本研究ではサージ解析を行うための障壁容量と対地容量などを考慮した太陽電池アレイのモデルを提案した。今後は提案したアレイモデルの妥当性をパルス応答の実験結果と比較するなどしてモデルの妥当性を評価し、解析手法を確立していく。さらにサージ解析を行うことによりアレイのサージ特性を明らかにし、アレイの接地について定量的に評価、検討していく。

参考文献

- [1] M. Pellegrino, A. Parretta & A.Sarno: "A survey on the electrical insulation behaviour of the PV module encapsulant materials"
- [2] 岡部・向當・寺西・竹多・才田:「油入変圧器の高周波モデルと雷サージ解析」平成11年電気学会論文集B部門論文集119巻8/9号
- [3] 雷サージ評価高度化のためのモデリング調査専門委員会「雷サージ評価高度化のためのモデリング」(1998)電気学会技術報告第704号