

A Proposal for Equivalent Circuit Between PV Module/String and the Ground

Kazuhiko KATO[‡]

太陽電池モジュール／ストリングと大地の間の等価回路の提案

加藤 和彦[‡]

Abstract

In this paper, an equivalent circuit between PV module/string and the ground is proposed. This equivalent circuit consists of one insulation resistance and five RC -components, which has one resistance and one capacitance in series, in parallel. This proposal has been justified by in-depth integrated discussion of experimental and theoretical approaches with 8-series PV module string. It is obvious that the equivalent circuit of PV module string can be obtained by parallel combination of circuit components of each PV module. The five RC -components, which PV module intrinsically belongs to, have different time constants, from 10^{-2} to 10^2 sec. The insulation resistance and some RC -components with longer time constant are strongly affected by absolute humidity: resistance drops but capacitance rises in accordance with increase in the absolute humidity. But the other RC -components are insensitive to the absolute humidity. The result described in this paper may be helpful for engineering discussion on various electrical safety issue on photovoltaic power generation plants such as ground fault and electrical shock.

Keywords: PV module, PV module string, Equivalent circuit against the ground, Insulation resistance, Ground fault, Electrical shock, Leak current

キーワード: 太陽電池モジュール, 太陽電池モジュールストリング, 対地等価回路, 対地絶縁抵抗, 地絡, 感電, 漏れ電流

1. 緒言

電気設備と大地の間の絶縁の維持は、感電や火災といった事故の防止に重要なことがらであり、わが国では電気事業法関連法令でさまざまな規定されている。電気設備である太陽光発電設備の太陽電池モジュールストリング（以下、ストリング）も同様であるが、光によって電圧が生じるという特殊性からなお一層の注意が必要である。

ストリングの対地絶縁抵抗の測定方法は 1990 年代から検討が開始され、その結果は日本電機工業会の JEM-TR228 (2003 年)、そして日本電機工業会/太陽光発電協会の「太陽光発電システム保守点検ガイドライン (2019 年)」などに反映され、これが実際の場面で実施されている。

しかし、その一方で対地絶縁抵抗の自然科学的理解は取り残され、ストリングと大地の間の等価回路（以下、対地等価回路）に関する議論もおろそかなままである。このような状況では、太陽光発電設備の直流電気安全リスクに関

する工学的議論もおぼつかない。

そこで筆者は、実験と理論の両面からこのことに取り組み、ストリングの対地等価回路表現に関する仮説を得た。本稿はその仮説を提案し説明を試みるものである。

2. 実験の機器構成と方法

対地等価回路を考察するための実験は、ストリングの対地絶縁抵抗を測定する方法を模して行う。

図 1 に実験の機器構成を示す。実験は屋内の暗環境下で実施する。使用するモジュールはパナソニック製結晶 Si 系モジュール VBHN238SJ23A ($P_{max}=238.1\text{W}$, $V_{pm}=43.4\text{V}$, $I_{pm}=5.50\text{A}$, $V_{oc}=52.2\text{V}$, $I_{sc}=5.85\text{A}$) である。モジュール表面にはガラスを、同裏面には樹脂製バックシートを有した構造であり、正極および負極にはそれぞれ 1m 長のケーブルが付属している。このモジュール 8 枚をガラス面を下にして床に伏せ直列に接続し全体を短絡する。また金属製の

Senior Researcher, Photovoltaic System and Application Team, Renewable Energy Research Center, Fukushima Renewable Energy Institute, AIST

2-2-9 Machiikedai, Koriyama, Fukushima, 963-0298, Japan

‡e-mail: kazuhiko.kato@aist.co.jp

Received: November 28, 2022, Accepted: January 25, 2023

国立研究開発法人産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究センター 太陽光システムチーム 主任研究員
(〒963-0298 福島県郡山市待池台 2-2-9)

‡e-mail: kazuhiko.kato@aist.go.jp

(原稿受付: 2022 年 11 月 28 日, 受理日: 2023 年 1 月 25 日)

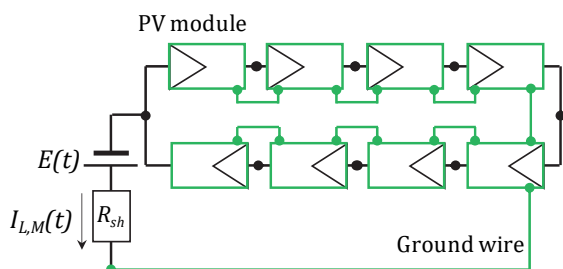


Fig.1 Configuration of experiment discussed in this paper
(8-series PV module string)

図1 実験の機器構成(モジュール直列数が8枚の場合)

モジュールフレームはアース線で相互に接続する。

この短絡ストリングとアース線の間に直流電圧源 $E(t)[V]$ とシャント抵抗 R_{sh} を接続し、その抵抗値(約 $1k\Omega$) と抵抗両端の電圧測定値とから電圧印加中の大地漏れ電流 $I_{L,M}(t)[\mu A]$ (添え字の M は "Measured" を意味する) を取得する。1回の測定継続時間は300秒とし1/1000秒間隔で抵抗両端の電圧値を記録する。また、上記に加えて測定実施中の室温 ($T_a [^{\circ}C]$) と相対湿度 (RH : Relative Humidity [%]) も1秒間隔で記録する。

なお、直流電圧源には日置電機製絶縁抵抗計 IR4055 の「500V」モードを用いる。事前の予備実験からこのモードでの $E(t)$ の経時変化は次式となることを確認している。

$$E(t) = E \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}} \right) \quad (1)$$

$$E = 538.6[V] \quad \lambda = 0.1211[sec.]$$

3. ストリングと大地の間の等価回路表現の仮説の提示

3.1 参考としたこれまでの研究事例

ストリングの対地等価回路を対象とした研究は国内外ともにあまり例がなく、ケーブルと同様な「対地絶縁抵抗と対地静電容量の並列回路」と認識されているのが実情である。このような認識の例は、国内では対地静電容量が地絡保護に及ぼす影響を検討した酒井らの例^{1,2)}などがあり、また対地絶縁抵抗と環境因子の関係を論じた山口らの例³⁾がある。他方、海外では長期信頼性の観点から対地静電容量の相対湿度や気温による影響を検討した Philipp らの例⁴⁾がある。しかし、どれもモジュール単体の対地絶縁抵抗あるいは対地静電容量を個別に扱っており、対地等価回路の総体を対象とした研究ではない。

他方、十数年前には、当時世界的な話題となったモジュールの電圧誘起劣化現象 (PID: Potential Induced Degradation) に関し、セルとアルミフレームに介在する複数の漏れ電流経路の検討が盛んに行われはじめた⁵⁻⁶⁾。ただし、これらはあくまで PID の原因となる漏れ電流の経路に関する電気化学的議論が中心であり、対地等価回路に関する電気工学的議論とは別である。

筆者と同様な視点でストリングの対地等価回路を電気工学的に直接論じた数少ない例としては、太陽光発電設備の直流感電リスクを議論した Hernandez らのグループの

研究がある⁷⁻⁸⁾。彼らの説は対地等価回路を一つの対地絶縁抵抗と一つの RC 回路 (抵抗と静電容量の直列回路) の並列で表現するものである。また、雷サージの挙動解明を目的とした桜井らの研究⁹⁾もこれと同様な対地等価回路を採用している。

さらに絶縁材料の物性に関する高橋の教科書的文献¹⁰⁾は、材料の絶縁性能は多数の RC 回路の並列模型で説明できるとしている。

3.2 ストリングの対地等価回路の仮説の提案

本稿では材料物性に関する高橋の説¹⁰⁾と Hernandez らの研究例⁷⁻⁸⁾を参考に、図2に示すような対地等価回路を想定する。すなわち、一つの対地絶縁抵抗 (R_0) と複数 (N) 個の RC 回路の並列で構成されるものである。

これを仮定して前章の実験を行う場合、暗条件下であるからストリングの開放電圧 V_{oc} はゼロである。また、 R_{sh} が R_0 や $R_{a,j}$ ($1 \leq j \leq N$) に比べて十分に小さいと前提すると、 R_{sh} に流れる漏れ電流の代数解 $I_{L,T}(t)$ (添え字に付した T は "Theoretical" を意味する) は以下となる。

$$I_{L,T}(t) = I_0(t) + \sum_{j=1}^N I_j(t) \quad (2)$$

ただし、

$$I_0(t) = \frac{E}{R_0} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}} \right) \quad (3)$$

$$I_j(t) = \frac{E}{R_{a,j}} \cdot \frac{\omega_{a,j}}{\omega_{a,j} - \lambda} \left(e^{-\frac{t}{\omega_{a,j}}} - e^{-\frac{t}{\lambda}} \right) \quad (4)$$

$$\omega_{a,j} = R_{a,j} C_{a,j} \quad (5)$$

($N+1$)個の電流項のうち $I_0(t)$ は回路由来の時定数をもたず $t \rightarrow \infty$ で E/R_0 に達する「収束電流項」であり、 $I_j(t)$ ($1 \leq j \leq N$) は $t \rightarrow \infty$ で消滅する「減衰電流項」である。また、 $\omega_{a,j}$ は各減衰電流項の時定数である。

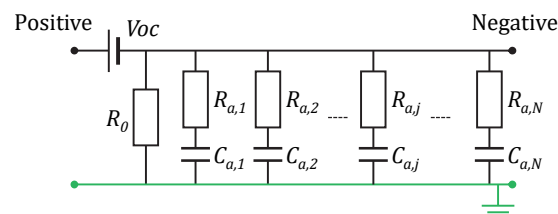


Fig.2 An equivalent circuit between PV module string
and the ground proposed in this paper

図2 本稿で提案するストリングの対地等価回路

3.3 対地等価回路仮説をもちいた測定値の近似方法

次章では前章の方法で取得した各測定機会の $I_{L,M}(t)$ を前述の $I_{L,T}(t)$ で近似し、両者の比較により提案する対地等価回路仮説が妥当か否かを論じるとともに、近似解から得られた各回路素子 (R_0 , $R_{a,j}$, $C_{a,j}$) の推定値を考察する。

その近似方法は以下の(6)式に示すように、 $I_{L,M}(t)$ と(2)式で導出される $I_{L,T}(t)$ との間の二乗誤差を最小化することによる。なお、 $I_{L,T}(t)$ の求解にはマイクロソフト・エクセルの Solver アドインを用いる。

$$\text{objective function} = \min \sum_{t=0}^{300} \{I_{L,M}(t) - I_{L,T}(t)\}^2 \quad (6)$$

4. 仮説の検証のための実験と議論

実験は 2022 年 7~10 月の多様な Ta や RH のもとで実施した。

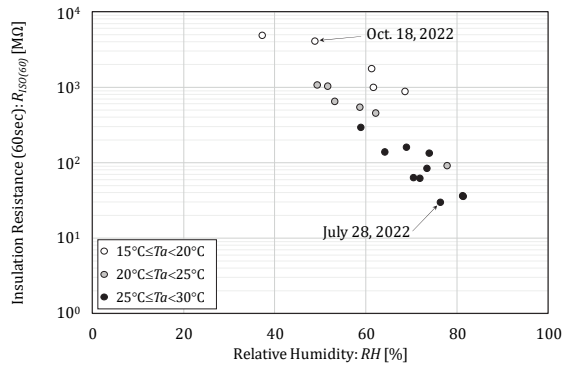
4.1 予備考察：対地絶縁抵抗と二つの湿度との関係

まず、漏れ電流の 1 分経過値 $I_{L,M}(60)$ および E から計算される対地絶縁抵抗の 1 分経過値 $R_{ISO(60)}$ と、 RH および 1 気圧を前提とした体積絶対湿度 AH (Absolute Humidity [g/m^3]) の関係を考察する。

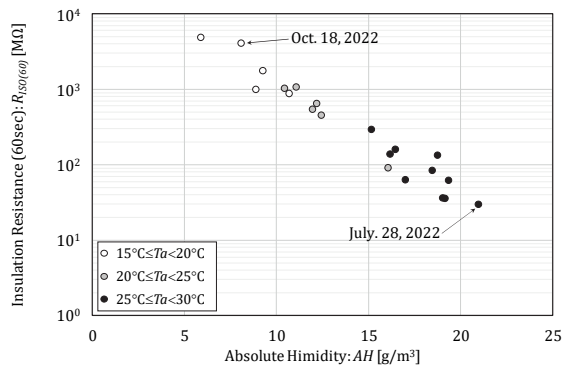
図 3(a)および(b)はそれぞれ RH と AH を説明変数として $R_{ISO(60)}$ を図示したものである。なお、同図には各測定機会での Ta の領域も示している。

両者とも湿度の上昇に応じて $R_{ISO(60)}$ が低下している。しかし、 RH を説明変数とした(a)図では $15 \leq Ta < 20$ の領域で他の測定点群の対数線形性からの逸脱が認められる。他方、 AH を説明変数とした(b)図では Ta によらず概ね測定点群の対数線形性が保たれている。

以上のことは、対地絶縁抵抗測定値 $R_{ISO(t)}$ が RH よりもむしろ AH に応答していることを示唆しており、さらにこれは対地等価回路の各回路素子に対しても同様と推測で



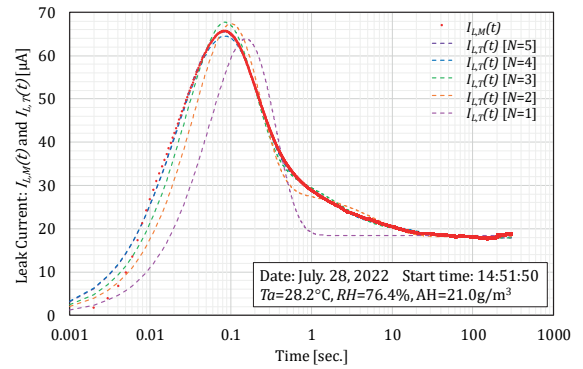
(a) Variable: relative humidity (RH)



(b) Variable: absolute humidity (AH)

Fig.3 Measured insulation resistance at $t=60$ ($R_{ISO(60)}$) as function of RH or AH (8-series PV module string)

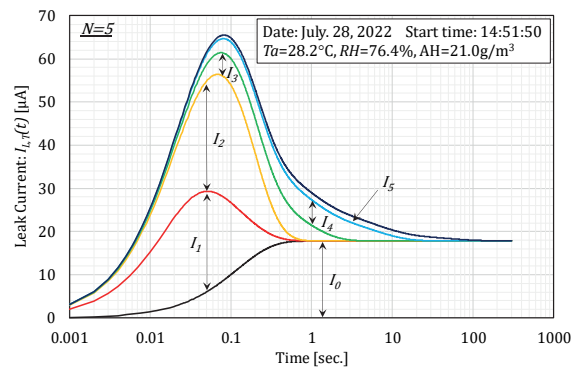
図 3 対地絶縁抵抗測定値 (60 秒値) ($R_{ISO(60)}$) と相対湿度あるいは体積絶対湿度との関係 (8 枚直列)



(a) Leak current $I_{L,M}(t)$ and $I_{L,T}(t)$ vs. Time

N		5	4	3	2	1
I_0	R_0 [MΩ]	30.2	30.0	30.0	29.8	29.3
I_1	$R_{a,1}$ [MΩ]	2.31	2.18			
	$C_{a,1}$ [nF]	7.40	7.44			
	$\omega_{a,1}$ [msec.]	17.1	16.2			
I_2	$R_{a,2}$ [MΩ]	4.57	4.86	2.04	2.57	4.35
	$C_{a,2}$ [nF]	12.2	12.9	20.5	23.4	35.3
	$\omega_{a,2}$ [msec.]	55.5	62.9	41.9	60.1	153
I_3	$R_{a,3}$ [MΩ]	45.7	42.5	42.2		
	$C_{a,3}$ [nF]	16.0	33.6	50.0		
	$\omega_{a,3}$ [sec.]	0.733	1.43	2.11		
I_4	$R_{a,4}$ [MΩ]	78.2	119	170	50.9	
	$C_{a,4}$ [nF]	72.2	147	144	128	
	$\omega_{a,4}$ [sec.]	5.65	17.5	24.4	6.49	
I_5	$R_{a,5}$ [MΩ]	322				
	$C_{a,5}$ [nF]	141				
	$\omega_{a,5}$ [sec.]	45.4				
MSE ($\times 10^{-3}$)		7.65	27.9	32.5	146	1,574

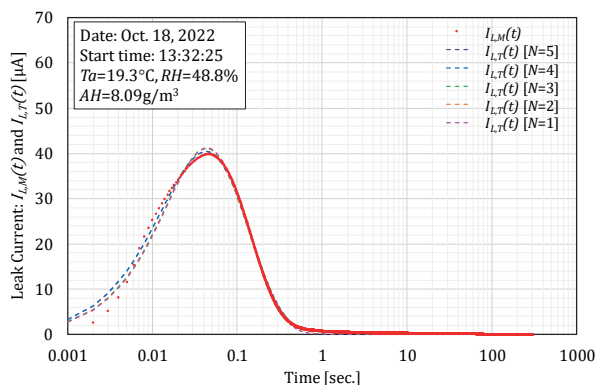
(b) Estimates of each RC-component, time-constant and Mean Square Error (MSE)



(c) Approximated components ($I_0 \sim I_5$) ($N=5$)

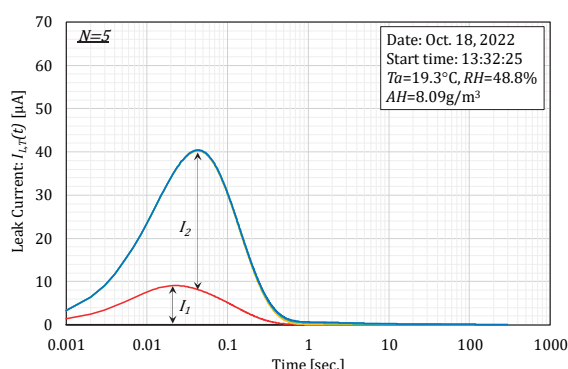
Fig.4 Comparison of leak current between measurement ($I_{L,M}(t)$) and its approximations ($I_{L,T}(t)$) under high AH condition ($AH=21.0\text{g}/\text{m}^3$)

図 4 AH が高い環境下での漏れ電流の実測値 ($I_{L,M}(t)$) と代数解 ($I_{L,T}(t)$) との比較 ($AH=21.0\text{g}/\text{m}^3$)

(a) Leak current $I_{L,M}(t)$ and $I_{L,T}(t)$ vs. Time

N		5	4	3	2	1
I_0	R_0 [MΩ]	9020	6763	6953	5767	4684
I_1	$R_{a,1}$ [MΩ]	3.13	3.02			
	$C_{a,1}$ [nF]	2.46	2.85			
	$\omega_{a,1}$ [msec.]	7.70	8.60			
I_2	$R_{a,2}$ [MΩ]	2.18	2.30	1.52	1.53	1.55
	$C_{a,2}$ [nF]	10.7	10.4	13.1	13.2	13.3
	$\omega_{a,2}$ [msec.]	23.4	23.8	19.9	20.2	20.7
I_3	$R_{a,3}$ [MΩ]	1149	1173	1051		
	$C_{a,3}$ [nF]	3.08	3.25	3.29		
	$\omega_{a,3}$ [sec.]	3.54	3.81	3.46		
I_4	$R_{a,4}$ [MΩ]	3572	3079	3139	1236	
	$C_{a,4}$ [nF]	9.16	16.8	17.9	11.8	
	$\omega_{a,4}$ [sec.]	32.7	51.7	56.0	14.6	
I_5	$R_{a,5}$ [MΩ]	8959				
	$C_{a,5}$ [nF]	24.6				
	$\omega_{a,5}$ [sec.]	223				
MSE ($\times 10^{-3}$)		0.698	0.714	0.853	1.36	5.37

(b) Estimates of each RC-component, time-constant and Mean Square Error (MSE)

(c) Approximated components ($I_0(t) \sim I_5(t)$) ($N=5$)Fig.5 Comparison of leak current between measurement ($I_{L,M}(t)$) and its approximations ($I_{L,T}(t)$) under low AH condition ($AH=8.09\text{g/m}^3$)図5 AHが低い環境下での漏れ電流の実測値($I_{L,M}(t)$)と代数解($I_{L,T}(t)$)との比較($AH=8.09\text{g/m}^3$)

きる。したがって、これ以降は必要に応じてAHを説明変数として議論を進める。

4.2 大地漏れ電流測定値の挙動と対地等価回路仮説の検証

$I_{L,M}(t)$ と $I_{L,T}(t)$ とを比較することにより、提案する対地等価回路仮説の妥当性を検証する。なお、本稿では想定するRC回路数 N は1~5とする。

(1)AHが高い測定機会の例(2022年7月28日)

図4はAHが高い条件下で取得した $I_{L,M}(t)$ ならびに $I_{L,T}(t)$ の時間変化((a)), 代数近似解から導出された各回路素子の推定値および代数近似解の平均二乗誤差(MSE: Mean Square Error)((b)), $N=5$ の場合の $I_{L,T}(t)$ の各電流項($I_0 \sim I_5$)の時間変化((c))を示したものである。

同図(a)から $I_{L,M}(t)$ は測定開始直後に急激に増加して80msec付近で最大値となり、その後は緩慢に減少していることがわかる。他方 $I_{L,T}(t)$ は、 $N=1$ では最大に達する時刻が一致しておらずかつ緩慢な減少も表現できていない。しかし N が大きくなるにつれて徐々に $I_{L,M}(t)$ に近づく。 $N=4$ と $N=5$ は同図中では区別ができないが、同図(b)のMSEから $N=5$ が $N=4$ より誤差が小さい。

また、同図(b)の各回路素子の推定値から、各項の特徴がわかる。すなわち、 I_1 および I_2 は抵抗値が小さくかつ時定数が短い。これに対し、 I_3 から I_5 は順次に抵抗値が大きかつ時定数が長くなる。そして、 N が小さく(表現可能なRC回路数が少なくなる)につれて順に I_5 , I_4 , I_3 , I_2 の表現が欠落しMSEが増大している。

同図(c)は $N=5$ での $I_{L,T}(t)$ を各電流項に分解して示したものである。抵抗値が小さく時定数の短い I_1 と I_2 が測定開始直後の急激な増加を説明しており、これらより抵抗値が大きく時定数が長い I_3 以降が各々の時定数に応じて緩慢な減少を説明している。そして、最終的には収束項のみとなる。

つまり、AHが高い環境条件でスリングの対地絶縁抵抗を測定すると、時間の経過につれて I_3 , I_4 そして I_5 が順次に消滅していくため長い時間にわたって測定値がゆっくりと増加を続ける様子が観察されることになる。

(2)AHが低い測定機会の例(2022年10月18日)

上記に対し、AHが低い条件下で取得した $I_{L,M}(t)$ ならびに $I_{L,T}(t)$ の時間変化((a)), 代数近似解から導出された各回路素子の推定値および代数近似解のMSE((b)), $N=5$ の場合の $I_{L,T}(t)$ の各電流項($I_0 \sim I_5$)の時間変化((c))を示したのが図5である。

同図(a)と図4(a)の $I_{L,M}(t)$ を比べてわかるように、測定開始直後に急激に増加する傾向は両者とも同じだが、こちらの最大値はやや小さい。また、その後の緩慢な減少はなく即座に小さい値に収束している。さらに五つの $I_{L,M}(t)$ は N による違いがわからない程度に類似しており、このことは図5(b)のMSEの小ささにも現れている。

この差異は図5(b)の各回路素子の値の違いにある。つまり、測定開始直後の挙動を表現する時定数の短い I_1 と I_2 の回路素子の推定値は大きくは変わっていないが、図4(c)でその後

の緩慢な減少を表現していた第3～5減衰項および収束項の抵抗値が顕著に大きいため、これらを分母にもつ $I_3 \sim I_5$ および I_0 が無視できるほど小さくなる。同図(c)は $N=5$ での代数近似解を各項に分解して示したものであるが、顕在しているのはやはり I_1 と I_2 のみであり、他の電流項はみえないほど小さい。つまり、この場合は $N=2$ で漏れ電流の挙動が十分に説明可能である。

(3) AH と $I_{L,T}(t)$ の平均二乗誤差(MSE)の関係

以上からRC回路の必要数は AH と密接な関係があると考えられる。

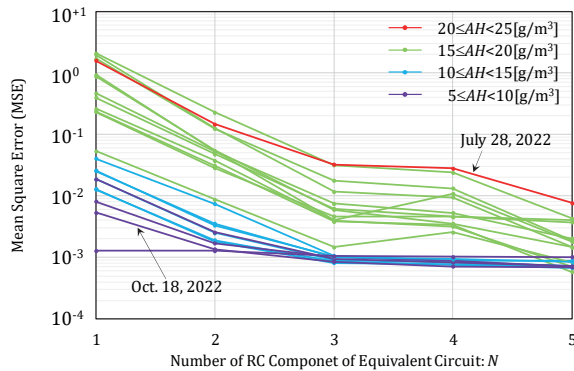


Fig.6 Mean square error (MSE) between measurement ($I_{L,M}(t)$) and approximations ($I_{L,T}(t)$) of leak current

図6 各測定機会における $I_{L,M}(t)$ と $I_{L,T}(t)$ との間のMSE

図6は、RC回路数 N を説明変数として $I_{L,M}(t)$ と $I_{L,T}(t)$ との間のMSEを図示したものである。 $AH \leq 10 \text{ g/m}^3$ の領域では $N \geq 3$ でMSEは十分に小さいが、それより AH が高くなると $N=3$ や $N=4$ よりもさらに $N=5$ のMSEが小さい。このことから AH の高低によることなく $I_{L,M}(t)$ の挙動をうまく説明できる対地等価回路はRC回路数を五つ($N=5$)とした構成である。

4.3 対地等価回路の各回路素子に関する考察

これまでの結果から $N=5$ とした場合の各回路素子には AH の影響を受けるものがあると考えられる。そこで AH と各回路素子推定値の関係を考察する。

図7は、 AH を説明変数として AH の異なる測定機会における各回路素子の推定値($R_0, R_{aj} \cdot C_{aj} \cdot \omega_{aj} : 1 \leq j \leq 5$)を図示したものである。

まず対地絶縁抵抗 R_0 は AH の上昇に対して急激に減少しており、その減少の幅は $10^3 \Omega$ に及ぶ。

次に五つの減衰項のうち I_1 と I_2 の抵抗($R_{a,1} \cdot R_{a,2}$)および静電容量($C_{a,1} \cdot C_{a,2}$)は、他の減衰項と比べて AH の影響が小さい。その結果、両者の積である時定数 $\omega_{a,1}$ および $\omega_{a,2}$ は、 AH が高い領域で幾分増加傾向を示すものの、大局的にはそれぞれ10msec程度、30msec程度と安定して短い。したがって、これらは AH に応答しにくい「超高速減衰項」「高速減衰項」といえる。

他方、残り三つの減衰項の抵抗は R_0 と同様に AH の上昇

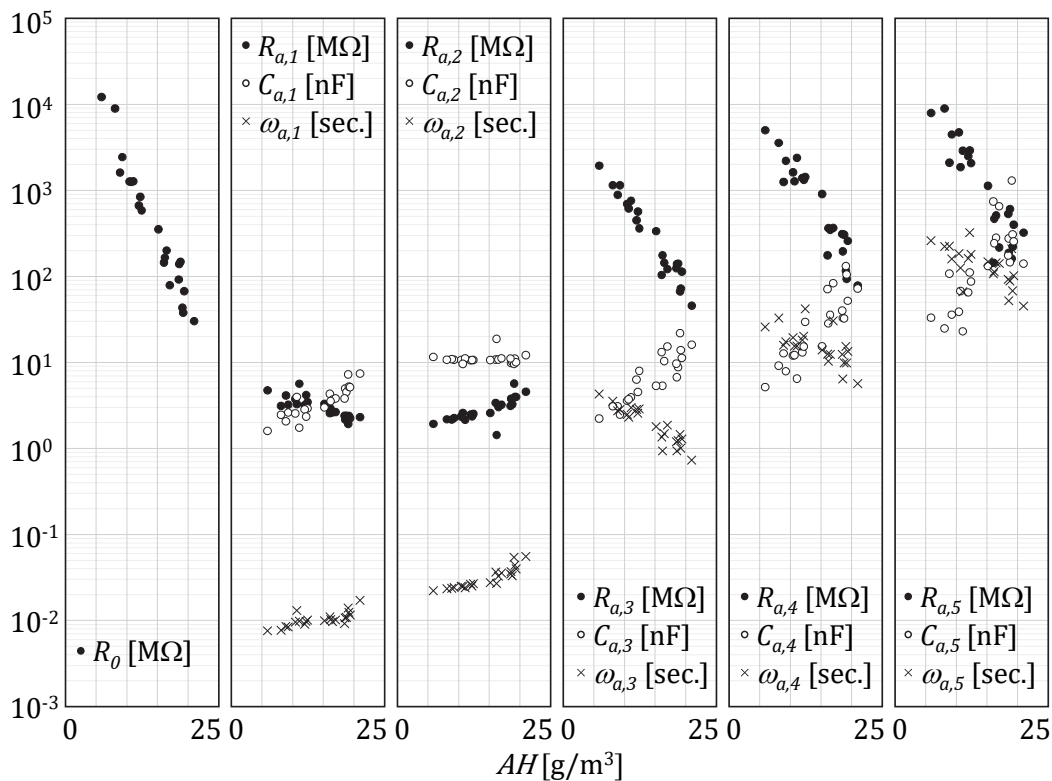


Fig.7 Variation of circuit elements for the proposed “five RC-component” equivalent circuit under different AH conditions (8-series PV module string)

図7 AH を説明変数とした場合の対地等価回路の各回路素子推定値($R_0, R_{aj} \cdot C_{aj} \cdot \omega_{aj} : 1 \leq j \leq 5$)の変化(8枚直列)

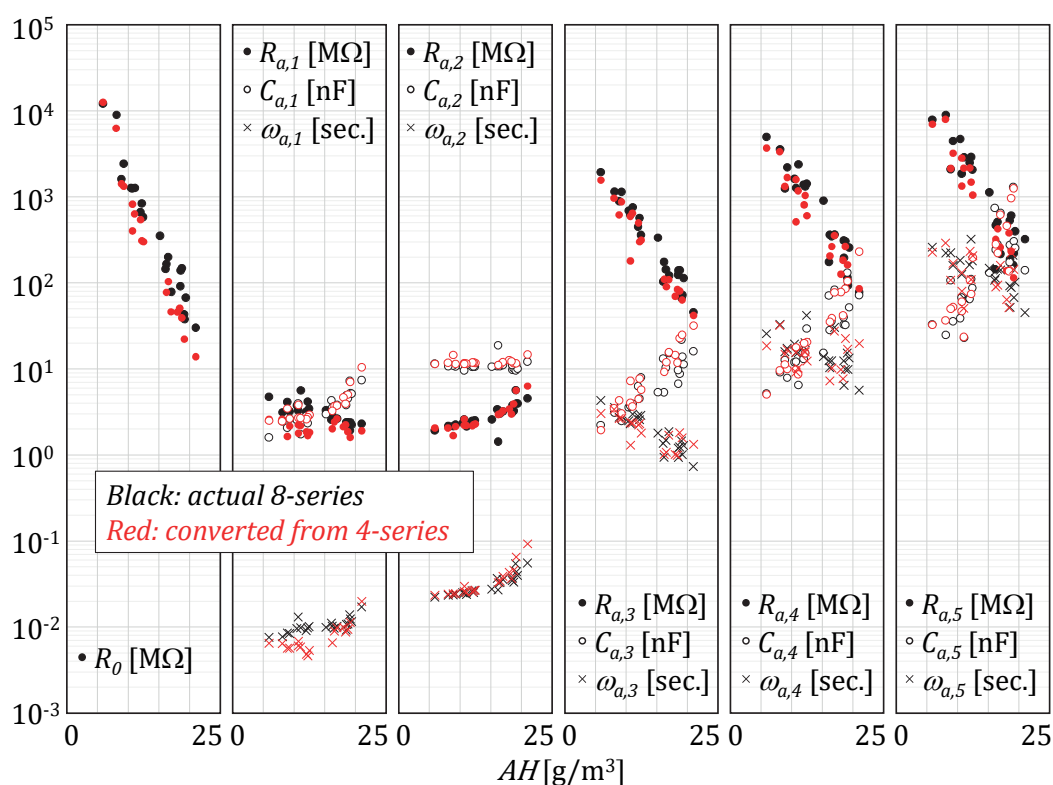


Fig.8 Variation of circuit elements for the proposed “five RC-component” equivalent circuit under different AH conditions

— comparison between actual 8-series estimation and converted 8-series from 4-series estimation

図 8 AH を説明変数とした場合の対地等価回路の各回路素子推定値 (R_0 , R_{aj} , C_{aj} , ω_{aj} ; $1 \leq j \leq 5$) の変化

— 8 枚直列の推定値と 4 枚直列の推定値を 8 枚直列に換算した値の比較—

につれて大きく減少しており、その幅は $10^2 \Omega$ 程度である。したがって、 AH が高いほど $I_{L,T}(t)$ にこれらの電流項が大きく重畳する。ただし、抵抗の減少とは逆に静電容量は増加するため、総じて時定数 ω_{aj} は AH の変化に鈍感であり、おおまかにはそれぞれ $\omega_{a,3} \approx 10^0 \text{sec}$, $\omega_{a,4} \approx 10^1 \text{sec}$, $\omega_{a,5} \approx 10^2 \text{sec}$ 程度である。したがって、 I_3 , I_4 および I_5 はそれぞれ「中速減衰項」、「低速減衰項」、「超低速減項」といえる。

4.4 モジュール直列枚数と各回路素子の関係

これまでの議論と考察はモジュール 8 枚直列に対してであるが、本節ではモジュール直列枚数との関係について論じる。

実験はモジュール直列枚数を 4 枚とするほかは第 2 章で述べたのと同様にして実施する。

そして、ここで一つの小仮説を立てる。すなわち、

- 8 枚直列のストリングを対象に考察してきた対地等価回路 (一つの収束項と五つの減衰項) はモジュール個々が有する、かつ
 - モジュール個々の各回路素子の特性は概ね同等である (個体差は大きくない)、
- であるとすれば
- ストリングの抵抗成分および静電容量成分は各モジュールのそれらの並列合成となる。

この小仮説を検証するため、測定値の近似によって得られ

た 4 枚直列の対地等価回路における各回路素子の推定値を、抵抗成分に対しては $1/2$ 倍、静電容量成分に対しては 2 倍することで 8 枚直列相当値に換算する。そして、その換算値を図 7 に重ねて図示したものが図 8 である。この図から 4 枚直列から 8 枚直列に換算した各回路素子の推定値は 8 枚直列のそれと概ね同様な分布となっていることがわかる。

したがって、如上の小仮説は妥当と考える。すなわち、これまでの議論で妥当と判断した対地等価回路はモジュール個々がもつものであり、ストリングの対地等価回路は、それを構成する各モジュールの対地絶縁抵抗 (R_0)、抵抗成分 (R_{aj}) と静電容量成分 (C_{aj}) の並列合成で表現できる。

4.5 モジュールのガラス面およびバックシート面に水を噴霧した場合の大地漏れ電流と各回路素子の挙動

本章の最後に、ガラス面とバックシート面のそれぞれに水を噴霧した場合の漏れ電流の挙動と対地等価回路の各回路素子推定値の変化を議論する。実験方法は第 2 章と同様であるが、モジュール直列枚数は 2 枚とし、その両方が乾いている場合 (dry condition) と濡れている場合 (wet condition) とを比較する。使用した水は水道水で噴霧器を用いて噴霧した。実験の目的から噴霧量は計量していないが噴霧の状況は図 9 に示すとおりである。なお、それぞれの場合で異なるモジュール個体を用いている。



(a) Grass surface (front side)



(b) Back sheet surface (rear side)

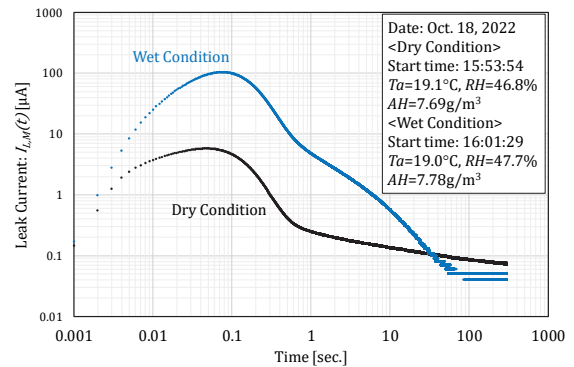
Fig.9 Visual images of wet PV module surface

図 9 ガラス面あるいはバックシート面が濡れている様子

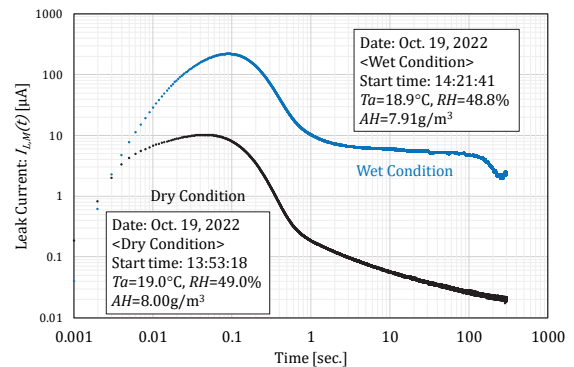
図 10 は、ガラス面とバックシート面のそれぞれについて、乾いている場合と濡れている場合の $I_{L,M}(t)$ の挙動を両対数で図示したものである。濡れている場合の電圧印加直後の急激な電流増加は、両者とも乾いている場合のそれよりも大きい。しかし、それ以降はガラス面とバックシート面でやや異なる挙動を示す。ガラス面を濡らした場合には、その後急激に減少し $t=20\text{sec}$ 頃には乾いている場合と同様な挙動に復している。その一方でバックシート面を濡らした場合は、急激に減少するものの $t=1\text{sec}$ 以降はしばらく安定となり、 $t=200\text{sec}$ 付近から再び減少傾向に転じている。

表 1 は図 9 の各測定値に対する $I_{L,M}(t)$ から導出される各回路素子の推定値と、乾いている場合と濡れている場合のそれらの比 (W/D: Wet/Dry) を示したものである。この表から各電流項について以下のことがわかる。

- 1) 収束項 I_0 を規定する R_0 は、ガラス面とバックシート面の変化に応答していない。つまり、この項はガラス面およびバックシート面を介しない経路に存在している可能性がある。
- 2) ガラス面とバックシート面のどちらを濡らしても超高速減



(a) Grass surface (front side)



(b) Back sheet surface (rear side)

Fig.10 Leak current $I_{L,M}(t)$ of 2-series PV module string under dry or wet surface condition

図 10 ガラス面/バックシート面が乾いている場合と濡れている場合の $I_{L,M}(t)$ の挙動 (2 枚直列)

衰項 I_1 は消失する。したがって、この項はガラス面とバックシート面の双方を介した経路に存在している可能性がある。

- 3) ガラス面とバックシート面のどちらを濡らしても I_2 および I_3 の抵抗成分が激減し、他方で静電容量成分が激増する (両者の積である時定数には大きな変化はみられない)。したがって、これらの項はガラス面とバックシート面の双方を介した経路に存在している可能性がある。
- 4) 低速減衰項 I_4 を規定する回路素子の値は、ガラス面を濡らした場合にのみ大きく変化する。したがって、この項はガラス面を介した経路に存在している可能性がある。
- 5) 超低速減衰項 I_5 は、モジュール界面が濡れていない条件下での実験結果を論じた 4.2 節では $N=5$ の場合のみ表現されるものの MSE を大きく改善するものではなかったが、バックシート面を濡らした場合にこの項の回路素子の値が大きく変化している。したがって、この項はバックシート面を介した経路に存在している可能性があり、特にこの面が濡れた場合に顕在化する。

5. 結言

本稿では、モジュールおよびストリングと大地の間の

Table 1 Estimates of circuit elements for the proposed “five RC-component” equivalent circuit under dry or wet surface condition (2-series PV module string)

表 1 ガラス面/バックシート面が乾いている場合あるいは濡れている場合の各回路素子推定値とその比(W/D) (2 枚直列)

	Glass Surface			Back Sheet Surface		
	Dry	Wet	W/D	Dry	Wet	W/D
R_0 [GΩ]	7.38	14.0	1.90	22.3	16.8	0.75
$R_{a,1}$ [MΩ]	11.6	-	-	6.83	-	-
$C_{a,1}$ [nF]	0.390	-	-	0.722	-	-
$\omega_{a,1}$ [sec]	0.005	-	-	0.005	-	-
$R_{a,2}$ [MΩ]	16.2	1.17	0.07	9.12	0.659	0.07
$C_{a,2}$ [nF]	1.54	40.5	26.3	2.75	99.3	36.1
$\omega_{a,2}$ [sec]	0.025	0.047	1.96	0.025	0.065	2.60
$R_{a,3}$ [MΩ]	7323	89.7	0.01	3425	69.2	0.02
$C_{a,3}$ [nF]	0.252	13.3	52.8	0.738	15.7	21.3
$\omega_{a,3}$ [sec]	1.85	1.19	0.64	2.53	1.09	0.43
$R_{a,4}$ [MΩ]	11872	284	0.02	9817	9818	1.00
$C_{a,4}$ [nF]	0.461	25.9	56.2	1.97	1.96	1.00
$\omega_{a,4}$ [sec]	5.47	7.36	1.35	19.3	19.3	1.00
$R_{a,5}$ [MΩ]	8705	8705	1.00	16583	94.1	0.01
$C_{a,5}$ [nF]	7.67	7.67	1.00	10.1	2769	274
$\omega_{a,5}$ [sec]	71.2	71.2	1.00	168	261	1.55

等価回路表現に関する仮説を提案しその妥当性の検証と説明を試みた。

300 秒間の測定データを対象とする議論と考察の範囲内という前提のもとで、筆者が妥当と考えるのは以下の六つの事項である。

- (1)モジュールおよびストリングと大地の間に生じる漏れ電流は、相対湿度よりもむしろ体積絶対湿度との関係でうまく説明することができる。
- (2)モジュールと大地の間の等価回路は、一つの対地絶縁抵抗と五つの RC 回路の並列構成で説明することができる。
- (3)対地絶縁抵抗、各 RC 回路の抵抗および静電容量はモジュール個々に存在しており、ストリングの対地等価回路はこれらの並列合成で表現することができる。
- (4)対地絶縁抵抗は体積絶対密度の影響を強く受け、体積絶対湿度が高くなるほど対地絶縁抵抗は低下する。
- (5)五つの RC 回路はそれぞれ長さの異なる時定数を有している。時定数は体積絶対湿度の変化に鈍感であるが、時定数の構成要素である抵抗と静電容量には、体積絶対湿度に敏感なものや鈍感なものがある。前者は主として時定数の短い超高速減衰項と高速減衰項である。後者はそれらに対して時定数の長い中速減衰項、低速減衰項および超低速減衰項であり、抵抗と静電容量は負の相関関係にある。
- (6)対地絶縁抵抗はガラス面およびバックシート面を介した経路ではない可能性がある。他方、超高速減衰項、高

速減衰項および中速減衰項は、ガラス面とバックシート面の両方を介した経路に存在し、低速減衰項と超低速減衰項はそれぞれガラス面とバックシート面を介した経路に存在する可能性がある。ただし、各項の存在経路の具体化にはさらに電気化学的な取り組みが必要である。

以上はあくまで筆者が提案する仮説であり、当然に他者によって検証されねばならない。ただし、この仮説が通用するのであれば、太陽光発電設備の直流電気安全リスクのうち地絡リスクは、本稿でいう収束項と時定数の長い中速減衰項、低速減衰項および超低速減衰項が深く関係することになる。理論上の対地絶縁抵抗値は収束項の係数であるが、この値を測定で得るには他の減衰項が消滅するまでの相応の時間が必要であり現実的ではない。したがって、対地絶縁抵抗測定値の決定に必要な十分な計測時間については工学的議論が必要である。

これに対し、極めて短時間に発生する事象である感電リスクは、現在一般に測定されている対地絶縁抵抗を根拠とする議論は通用せず、本稿における超高速減衰項ならびに高速減衰項の抵抗成分および静電容量成分に注目する必要がある。ただし、モジュール界面が濡れている場合に高速減衰項の抵抗成分が減少した実験結果から、この時点で指摘すべきは、モジュール界面が濡れている状況での感電リスク増大に対する注意喚起である。

なおこの仮説は、実験に用いた結晶 Si 系モジュールにもとづくものである。したがって、これに一般性を具備させるには異なる太陽電池材料やモジュール構造を対象とした実験と考察による検証が必要である。

本稿が太陽光発電設備の直流電気安全に関する今後の議論の土台となれば幸いである。

謝辞

本稿の研究を進める途上では、太陽光システムチームの同僚との議論が大きな助けとなった。末筆ながらこの紙面を借りて彼らに心よりの謝意を表する。

参考文献

- 1) 酒井重嘉, 千葉薫, 三木一郎, 太陽電池アレイの対地静電容量が地絡保護協調に及ぼす影響, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2010) (Nov. 2010), 273-274, Koriyama, Japan
- 2) Kazuyoshi Sakai, Ichiro Miki, Earth Capacitance of PV Module, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2011) (Sep. 2011), 49-50, Wakkanai, Japan
- 3) 山口富三雄, 中村國臣, 太陽電池モジュールの屋外暴露試験における絶縁抵抗変化と環境因子の関係, 日本信頼性学会, 24(4), 333-334, 2002
- 4) Daniel Philipp, Heinrich Berg and Min Hsian Saw, In-situ capacitance measurement of modules' encapsulation, 6th SOPHIA

PV Reliability Workshop (April 29, 2016), Vienna, Austria

- 5) J.A.del Cueto and T.J.McMahon, Analysis of Leakage Currents in Photovoltaic Modules under High-Voltage Bias in the Field, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, **10**, 15-28, 2002 (DOI: 10.1002/pip.401)
- 6) W. Chen, X. Yang, W. Zhang, and X. Song, Leakage current calculation for PV inverter system based on a parasitic capacitor model, IEEE Trans. Power Electron., **31**(12), 8205–8217, 2016
- 7) J.C.Hernandez, P.G.Vidal and A.Medina, Characterization of the insulation and leakage current of PV generators: Relevance of human safety, Renewable Energy, **35**, 593-601, 2010 (DOI: 10.1016/j.renene.2009.08.006)
- 8) J.C.Hernandez and P.G.Vidal, Guidelines for Protection Against Electric Shock in PV Generators, IEEE Transactions on Energy Conversion, **24**(1), 274-282, 2009
- 9) Yasuhiro Sakurai and Kosuke Kurokawa, PV Array Distributed Circuit Simulation, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2000), 307-310, Kanazawa, Japan
- 10) 高橋茂, 誘電体損と絶縁抵抗の測定, 12-13 (1955), オーム社, 東京