

A Proposal for Equivalent Circuit Between PV Module/String and the Ground (2) - An improvement on high-frequency components and data analysis under the outdoor condition -

Kazuhiko KATO[‡]

太陽電池モジュール / スtringと大地の間の等価回路の提案 (2) - 高速減衰項に関する仮説の修正と屋外測定による各回路素子の推定 -

加藤 和彦[‡]

Abstract

In the previous paper, author has proposed an equivalent circuit between PV module/string and the ground which consists of one resistance and multiple RC-components, and it was also described that at least two of them had higher attenuation frequency than 1Hz. In this paper, some new results obtained from further experiments and discussion are shown as follows: four RC-components which had high attenuation frequency were found, i.e. $\approx 50\text{kHz}$, $\approx 10^3\text{Hz}$, $\approx 10^2\text{Hz}$, $\approx 10^1\text{Hz}$, respectively. Under rain condition, on the other hand, their attenuation frequencies and resistances decreased and their capacitance increased very much. These four RC-components affect risk of electrical shock. A preliminary-stage discussion on the electrical shock, which was based on the estimates of the RC-components obtained under both no-rain and rain conditions, pointed out that the risk of electrical shock drastically increase under rain condition.

Keywords: PV module, PV module string, Equivalent circuit against the ground, Electrical shock, Rain condition

キーワード: 太陽電池モジュール, 太陽電池モジュールstring, 対地等価回路, 感電, 降雨

1. 緒言

筆者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の基礎となる太陽電池モジュールstring(以下「string」と大地の間の等価回路を探求している。前報「太陽電池モジュール / stringと大地の間の等価回路の提案」¹⁾において、太陽電池モジュール(以下「モジュール」と略記)と大地の間は一つの対地抵抗(収束項)と五つの対地 RC 直列回路(減衰項)の並列で構成される等価回路で説明できること、二つの減衰項の時定数は10~30msec程度(減衰周波数30~100Hz)であることなどを論じた。しかし本研究のその後の進展により、さらに時定数の短い(減衰周波数の大きい)対地 RC 直列回路の存在を確認した。

そこで本稿ではこのことがらを論じるとともに、屋外で行った実験により1秒未満の短時間領域に存在する対地 RC 直列回路の各回路素子値を推定した結果を報告する。またこれらの

結果をもとにした感電リスクに関する予備的な考察を述べる。

2. 前報の再考

前報では、測定時間300秒の間の日射強度変動に起因するモジュール開放電圧の不安定を避けるため屋内暗環境を実験環境とし、モジュール開放電圧に代わる電圧源に絶縁抵抗計を用いた。そして、予備実験からこの電圧源 $E(t)$ の関数を $E(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}})$ ($E = 538.6\text{V}$, $\lambda \approx 0.12\text{sec}$)とおいた。

また、電圧印加中の大地もれ電流の測定はデータロガー(グラフテック(株)製 GL980)を用いた。前報に記載はないが、測定の際には商用周波数を主因とするノイズの除去を目的にロガー内蔵のローパスフィルタ(LPF: Low Pass Filter, カットオフ周波数=1.5Hz)を利用した。この LPF の時定数 $\tau[\text{sec}]$ は $\tau = 1/(2\pi \cdot 1.5) \approx 0.11$ と前出の λ と概ね同等である。

上記に関する再検討を行った結果、前報ではこの LPF の効

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: January 17, 2024, Accepted: February 28, 2024

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: 2024年1月17日, 受理日: 2024年2月28日)

果をステップ状の電圧印加を前提とした電圧源の関数に暗黙裡に内包する取り扱いをしていたことがわかった。このことが前報の議論・結論に及ぼす影響は以下のとおりである：

1) $t \geq 1\text{sec}$ の測定データから抽出される時定数 1sec 超の三つの減衰項および収束項

この時間領域ではカットオフ周波数 1.5Hz の LPF の効果はすでに消失していることから、前報の議論・結論に変更はない。

2) $t < 1\text{sec}$ の測定データから抽出される時定数 1sec 未満の二つの減衰項

この時間領域は LPF の作用によって原波形が減衰しており、かつ、絶縁抵抗計による電圧印加の挙動がステップ状とはみなせない。さらに前報の実験の測定間隔は 1msec であったため、 $0 \leq t < 1\text{msec}$ の挙動に関する情報が欠落していた。したがって、この時間領域については前報の議論・結論を再考する必要がある。

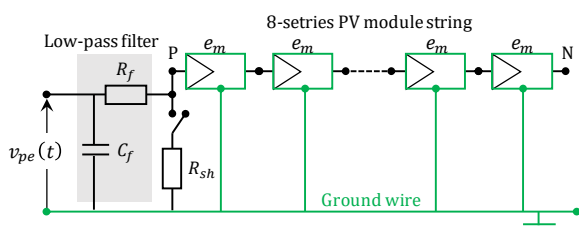
よって以降ではこの領域における減衰項を再考する。

3. 実験と分析の方法

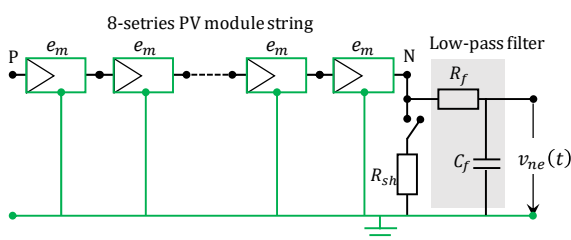
3.1 実験の方法

本稿の目的に適う実験方法の基本方針は以下の通り：

- 1)測定時間と測定間隔：短時間領域を対象とすることから測定時間は $0 \leq t \leq 0.5\text{sec}$ とし、また十分な測定点数を確保するため測定間隔は $2\mu\text{sec}$ とする。
- 2)電圧源：絶縁抵抗計による電圧印加がステップ状とみなせないため、日中の屋外を実験環境としてモジュールの開放電圧を電圧源とする。
- 3)回路の開閉：前記により絶縁抵抗計を使わないため別の回路開閉手段が必要となる。そこでステップ状の挙動を確認した断路器を用いる。



(1) Step 1 : measurement of $v_{pe}(t)$



(2) Step 2 : measurement of $v_{ne}(t)$

Fig.1 Configuration of experiment discussed in this paper.

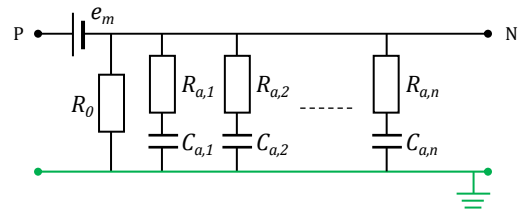


Fig.2 An equivalent circuit model between PV module and the ground

4)測定物理量：ストリングの P 端および N 端と大地の間の対地電圧 $v_{pe}(t)$, $v_{ne}(t)$ を測定する。

5)LPF：これを使わずに原波形を測定するのが直接的であるが、予備実験の結果、対地電圧原波形の変化幅がデータロガーの性能を超過することがわかった。そこで対地電圧の変化幅の抑制を目的として LPF を利用する。ただし、データロガー内蔵の LPF は詳細が不明であるためこれは使用せず、抵抗 (R_f) とコンデンサ (C_f) で製作した LPF を使用する。

如上にもとづく実験構成は Fig.1 のように具体化される。ここで e_m はモジュールの開放電圧である。ストリングはモジュール 8 枚直列とし、その P 端あるいは N 端と大地の間に断路器および測定用抵抗 R_{sh} ($\approx 500\Omega$) を接続する。そして、LPF ($R_f \approx 510\Omega$, $C_f \approx 24/227/1820\text{nF}$) を介した R_{sh} の両端電圧を前記測定時間と測定間隔にてデータロガーで記録する。

また、モジュールフレームは C 種接地された架台との直接接触により大地と接続する。

なお、このほかに外気温度 (T_a [$^{\circ}\text{C}$]) と相対湿度 (RH [%]) を測定し、それらから算出される 1 気圧を前提とした容積絶対湿度 (VH [g/m^3]) も記録する。

3.2 分析の方法

Fig.2 は本研究で前提とするモジュールの対地等価回路モデルである。このモデルは n 個の対地 RC 直列回路 ($R_{a,j}$, $C_{a,j}$ $j=1 \sim n$) (減衰項) と一個の対地抵抗 (R_0) (収束項) および開放電圧 (e_m) で構成される。

ストリングを構成する s 枚のモジュールの対地回路がすべて同質であると前提した対地電圧 $v_{pe}(t)$ および $v_{ne}(t)$ の代数解は、 $R_{sh} \ll \{R_0, R_{a,j}\}$ を仮定すると以下ようになる。

$$v_{pe}(t) = R_{sh} \left\{ \frac{s}{R_0} \cdot \frac{\sum_{k=1}^s k}{s} \cdot e_m (1 - e^{-\omega' t}) + \frac{(\sum_{k=1}^s k) e_m}{s} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{s}{R_{a,j}} \cdot \frac{\omega'}{\omega' - \omega_{a,j}} (e^{-\omega_{a,j} t} - e^{-\omega' t}) \right\} \quad (1)$$

Table 1 Effective frequency of LPF used in this experiment.

C_f [nF]	Effective frequency of LPF	
	(ω') [kHz]	
24	41.3	("fast")
227	4.37	("middle")
1820	0.547	("slow")

$$v_{ne}(t) = R_{sh} \left\{ \frac{s}{R_0} \cdot \frac{\sum_{k=1}^s (s-k)}{s} \cdot e_m (1 - e^{-\omega' t}) + \frac{(\sum_{k=1}^s (s-k)) e_m}{s} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{s}{R_{a,j}} \cdot \frac{\omega'}{\omega' - \omega_{a,j}} (e^{-\omega_{a,j} t} - e^{-\omega' t}) \right\} \quad (2)$$

ここで、

$$\text{LPF の実効減衰周波数 } \omega' = \frac{1}{(R_{sh} + R_f) C_f} \quad (3)$$

$$\text{減衰項の減衰周波数 } \omega_{a,j} = \frac{1}{R_{a,j} C_{a,j}} \quad (j=1 \sim n) \quad (4)$$

ω' は測定用抵抗 R_{sh} も加味した LPF の実効周波数であり、具体的な値は Table1 のとおりである。ここでは周波数の大きい順に "fast", "middle", "slow" と命名して区別する。

(1)式と(2)式の和をとると個々のモジュールの開放電圧 e_m がストリングの開放電圧 V_{OC} に集約され以下の(5)式となる。

$$v_{pe}(t) + v_{ne}(t) = R_{sh} \cdot V_{OC} \left\{ \frac{s}{R_0} (1 - e^{-\omega' t}) + \sum_{j=1}^n \frac{s}{R_{a,j}} \cdot \frac{\omega'}{\omega' - \omega_{a,j}} (e^{-\omega_{a,j} t} - e^{-\omega' t}) \right\} \quad (5)$$

ここで s/R_0 と $s/R_{a,j}$ はそれぞれ s 枚のモジュールの抵抗のストリング並列合成であるから、

$$R_0^* = \frac{R_0}{s} \quad R_{a,j}^* = \frac{R_{a,j}}{s} \quad C_{a,j}^* = s C_{a,j}$$

と書き換えると(5)式は以下となる。

$$v_{pe}(t) + v_{ne}(t) = R_{sh} \cdot V_{OC} \left\{ \frac{1}{R_0^*} (1 - e^{-\omega' t}) + \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{a,j}^*} \cdot \frac{\omega'}{\omega' - \omega_{a,j}} (e^{-\omega_{a,j} t} - e^{-\omega' t}) \right\} \quad (5)'$$

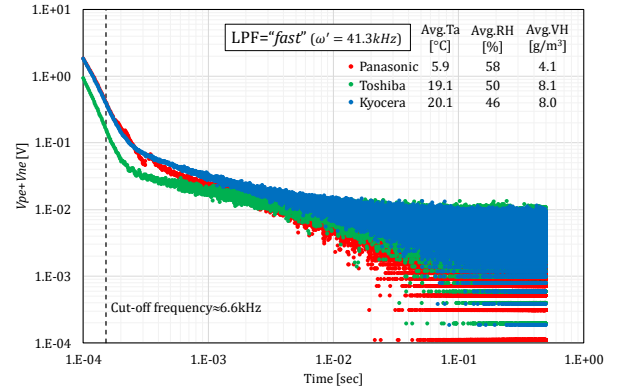
この式において R_{sh} , ω' は既知でありまた V_{OC} は実験で取得可能であるから、前報¹⁾と同様にマイクロソフト・エクセルの Solver アドインを利用して、実験で得られた " $v_{pe}(t) + v_{ne}(t)$ " を (5)' 式によってパラメータ・フィッティングを行うことにより、ストリングにおける未知の各対地等価回路素子 ($R_{a,j}^*$, $C_{a,j}^*$, R_0^*) を推定することができる。

4. 実験結果とその分析

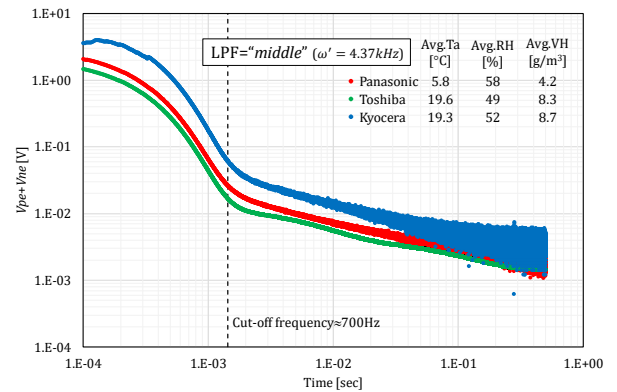
使用するモジュールは Table2 に示す 3 種類でいずれも結晶 Si 系である。このうち Panasonic 製モジュールは前報で使

Table 2 Three kinds of PV modules used for the experiment.

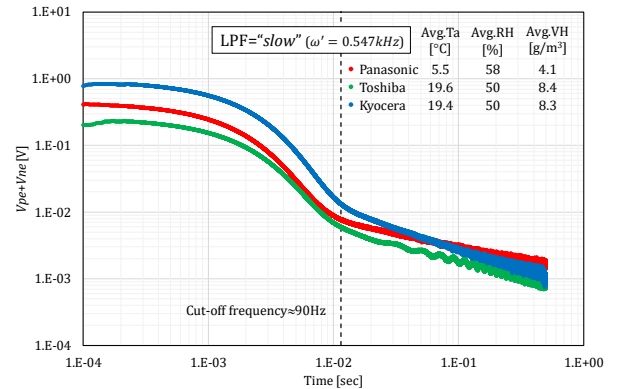
	Panasonic	Toshiba	Kyocera
Type	mc-Si(HIT)	mc-Si	pc-Si
P_{MAX} [W]	238.1	250	242
V_{PM} [V]	43.4	30.95	29.8
I_{PM} [A]	5.5	8.07	8.13
V_{OC} [V]	52.2	37.9	36.9
I_{SC} [A]	5.85	8.62	8.80



(a) LPF="fast"



(b) LPF="middle"



(c) LPF="slow"

Fig.3 Transitions of $v_{pe} + v_{ne}$ with the different LPFs.
 (Weather condition: No rain)

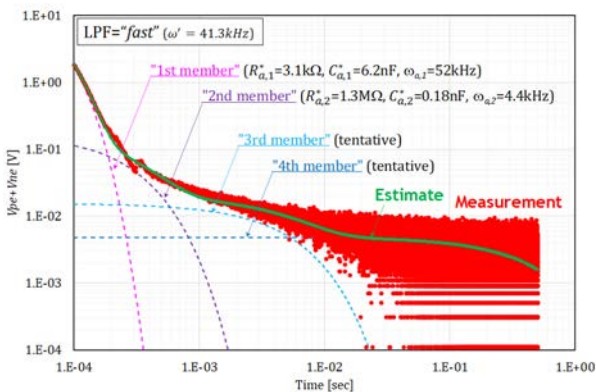
用したものと同一型式で使用履歴もほぼ同じであるが個体としては異なるものである。

対地電圧の測定は降雨のない日射強度が比較的安定した環境下で実施する。ただし Panasonic 製モジュールの場合のみ降雨下での測定も実施する。また、各測定は 2 分程度の間隔を空けて 5 回行い、その平均値を分析対象とする。

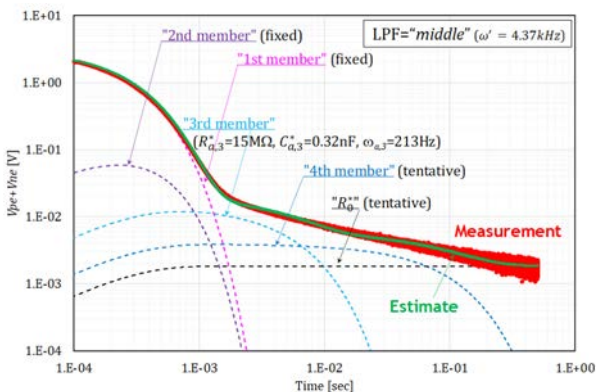
4.1 降雨のない気象条件下の場合の測定例

Table2 に示した 3 種類のモジュールを用いた 8 枚直列ストリングを対象に、異なる LPF を用いて測定した " $v_{pe}(t) + v_{ne}(t)$ " の経時変化を Fig.3 に示す。なお、図中には各 LPF のカットオフ周波数 ($\omega'/2\pi$) ラインを破線で併記している。

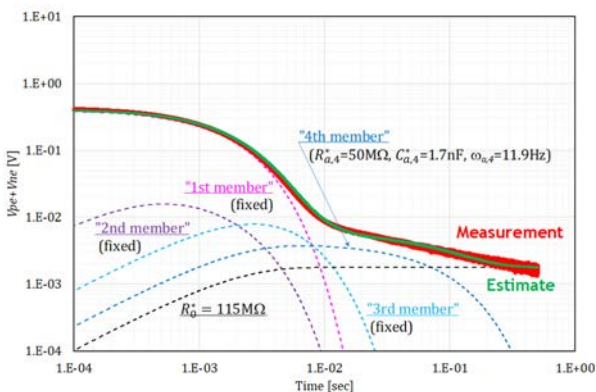
この図から、異なるLPFのどの場合についてもモジュールによらず概ね同様な挙動を示していることがわかる。また、LPF="fast"ではカットオフ周波数 6.6kHz の前後での減少が顕著に生じていることから、これよりも減衰周波数の大きい減衰項の存在が示唆される。また、変曲点がカットオフ周波数ラインよりやや右側に位置している。これはカットオフ周波数よりやや小さい減衰周波数をもった別の減衰項の存在を示唆するものである。他方で LPF が"middle"や"slow"の場合には変曲点とカットオフ周波数の位置がほぼ一致している。したがって、これら周波数より十分に小さい減衰周波数をもつ減衰項が一つ



(a) LPF="fast"



(b) LPF="middle"



(c) LPF="slow"

Fig.4 Parameter fitting results of $v_{pe} + v_{ne}$ measurements for the Panasonic PV module string. (Weather condition: No rain)

以上存在していることが示唆される。

4.1.1 対地等価回路各素子の推定 次に Fig.3 の波形に対して(5)'式によるパラメータ・フィッティングを行い、各減衰項を構成する対地等価回路素子の値の推定を行う。

まず、Panasonic 製モジュールの場合の推定過程を述べる。

(1)LPF="fast"の場合

LPF="fast"でのパラメータ・フィッティングの結果を Fig.4(a)に示す。この場合は四つの減衰項で実測値が説明された。第1減衰項($R_{a,1}^*$, $C_{a,1}^*$)および第2減衰項($R_{a,2}^*$, $C_{a,2}^*$)の減衰周波数 $\omega_{a,1}$, $\omega_{a,2}$ はそれぞれ 52kHzと 4.4kHzであった。ただし、他の第3および第4の減衰項は実測値のばらつきが大きい時間領域にあるためここでは暫定である。

(2)LPF="middle"の場合

次に(1)で得られた $R_{a,1}^*$, $C_{a,1}^*$, $R_{a,2}^*$, $C_{a,2}^*$ を定数、第3減衰項と第4減衰項の暫定値を初期値として LPF="middle"の実測値に対するパラメータ・フィッティングを行った。その結果は Fig.4(b)に示すとおりであり、新たに仮想収束項(R_0^*)が抽出された。ここでは減衰周波数が 213Hzの第3減衰項($R_{a,3}^*$, $C_{a,3}^*$)を確定値とし第4減衰項は暫定とする。

(3)LPF="slow"の場合

最後に如上の第1~3減衰項の各値を定数、第4減衰項と収束項の各値を初期値に用いて LPF="slow"の場合の実測値のパラメータ・フィッティングを行った。その結果を Fig.4(c)に示す。(2)で暫定とした第4減衰項の減衰周波数は 11.9Hzとなり、収束項は $R_0^* = 115M\Omega$ となった。

4.1.2 各モジュールの推定値の比較 他のモジュールについても同様なパラメータ・フィッティングを行い減衰項・収束項を抽出した。その結果を Panasonic 製モジュールの結果とともに一覧にして Table3 に示す。この表からわかるようにどのモジュールも概ね同様の傾向にある。すなわち短時間領域ではストリングの大地の間は四つの RC 直列回路で説明できる。このうち kHz オーダーの減衰周波数をもつ第1減衰項と第2減衰項は前報で捕捉できなかったものである。またこれらの項は他 Table 3 Estimates of RC-components of each the PV module string. (Weather condition: No rain)

	Panasonic	Toshiba	Kyocera
$R_{a,1}^*$ [kΩ]	3.1	2.3	1.5
$C_{a,1}^*$ [nF]	6.2	5.9	10
$\omega_{a,1}$ [kHz]	52	61	49
$R_{a,2}^*$ [MΩ]	1.3	4.5	1.5
$C_{a,2}^*$ [nF]	0.18	0.088	0.32
$\omega_{a,2}$ [kHz]	4.4	2.6	2.1
$R_{a,3}^*$ [MΩ]	15	18	5.1
$C_{a,3}^*$ [nF]	0.32	0.35	0.59
$\omega_{a,3}$ [Hz]	213	162	334
$R_{a,4}^*$ [MΩ]	50	51	25
$C_{a,4}^*$ [nF]	1.7	1.7	3.0
$\omega_{a,4}$ [Hz]	12	11	13
R_0^* [MΩ]	115	148	102

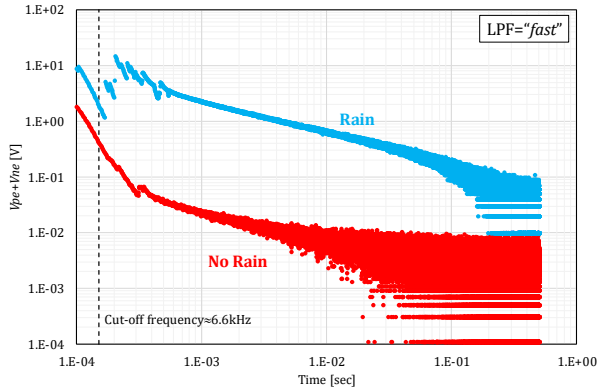


Fig.5 Transition of $v_{pe} + v_{ne}$ for the Panasonic PV module string under rain and no-rain condition.

に比して抵抗成分も小さい。とりわけ第 1 減衰項は抵抗成分が $k\Omega$ オーダーでありかつ静電容量成分が $10nF$ 程度と大きいことから、この項はほぼ静電容量項と解釈することもできる。

他方、収束項の R_0^* はおよそ $100M\Omega$ となったが、これは $0 < t < 0.5\text{sec}$ の測定時間領域における収束値であり、仮に前報と同様に 300 秒まで測定を継続したならば減衰周波数が 1Hz 未満の複数の減衰項に分解される性質のものである。そしてそれら減衰項の抵抗成分は当然に $100M\Omega$ より大きい値となる。

いずれにせよここで示した抵抗成分の小さい四つの対地 RC 直列回路は減衰周波数が大きいので、数～数十秒の測定時間で行われている屋外の対地絶縁抵抗測定には現れない隠れた対地回路である。しかし、感電のような瞬時的事象ではこれらが大きく関与すると考えられる。

4.2 降雨時の測定例

Panasonic 製モジュールについては降雨時についても複数回の実験を行った。Fig.5 は対地電圧がもっとも高位で推移した LPF="fast" での一例を示したものである。 $t < 10^{-3}$ の領域における波形の乱れは断路器投入時のチャタリングによるものである。なお、同図には Fig3(a) に示した同じ LPF での降雨のない場合の実測値を併記している。

降雨のない場合に比べて降雨時は対地電圧が 1～2 桁大きくなっていることから、降雨によって対地回路の抵抗成分が大幅に低下していることが予想される。また降雨時には LPF の

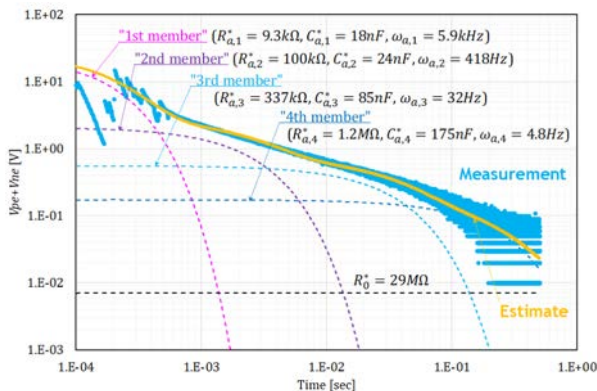


Fig.6 Parameter fitting result of $v_{pe} + v_{ne}$ measurements for the Panasonic PV module string.
 (Weather condition: Rain)

カットオフ周波数付近での変曲がみられないことから、降雨のない場合に抽出されていた減衰周波数約 50kHz の減衰項になんらかの変化が生じていると予想される。

Fig.6 は(5)'式をもちいて Fig.5 に示した降雨時の実測値のパラメータ・フィッティングを行った結果を示している。降雨のない場合と同様に四つの減衰項と収束項で実測値が説明された。上で予想したとおり、各減衰項の抵抗成分は降雨のない場合に比べてどれも小さくなっている。さらに静電容量成分が顕著に増加していることも特徴的な変化である。また、これも予想の通り減衰周波数約 50kHz の減衰項は抽出されず、減衰周波数の最大は 5.9kHz であった。これは降雨のない場合の第 2 減衰項のそれと同等である。

降雨のない場合と降雨時のこのような変化に関し、降雨のない場合の各 RC 直列回路が降雨によって変化したのか、あるいは降雨によって別の対地回路が形成されたのかは不明である。ただこのような電気回路的分析で言及できるのは、降雨によって対地電圧が上昇しかつその減衰が緩慢になるような変化を四つの対地 RC 直列回路で説明できるということである。

5. 感電リスクに関する予備的な考察

短時間領域における対地回路に対する理解が進むことによって、ヒトが誤ってストリングなどに接触して感電する場合のリスクに関する議論が可能となる。とりわけ 4 章で抽出した短時間領域に存在する四つの対地 RC 直列回路はどれも抵抗成分が小さいため、これらは感電リスクに相応の作用を及ぼすと考えられる。そこで、本章では 4 章で得た各回路素子の推定値をもちいてヒトの感電リスクに関する予備的な考察を試みる。

Fig.1(a)において R_{sh} を人体抵抗とみても、LPF がいない状況で非接地状態にあるモジュール s 枚直列のストリングの P 端と接地された金属部(モジュールフレームや架台)に接触する状況を想定する。これまでと同様に各モジュールの対地回路が同質であることと $R_{sh} \ll \{R_0, R_{a,j}\}$ を仮定すると、 R_{sh} に流れる電流 $i_h(t)$ (人体通過電流) は(5)'の変形により

$$i_h(t) = \frac{v_{pe}(t)}{R_{sh}} = \frac{\sum_{k=1}^s k}{s} e_m \left(\frac{s}{R_0} + \sum_{j=1}^4 \frac{s}{R_{a,j}} e^{-\omega_{a,j} t} \right)$$

となる。ここでモジュール直列数 $s \gg 1$ であれば、

$$\frac{\sum_{k=1}^s k}{s} = \frac{s+1}{2} \approx \frac{s}{2}$$

であるから、

$$i_h(t) = \frac{v_{pe}(t)}{R_{sh}} \approx \frac{s \cdot e_m}{2} \left(\frac{s}{R_0} + \sum_{j=1}^4 \frac{s}{R_{a,j}} e^{-\omega_{a,j} t} \right) \quad (6)$$

となる。つまり、モジュールの対地回路が同質という前提のもとでは、ヒトが P 端に接触した場合の人体通過電流はモジュール直列数 s の二乗に比例し、またモジュールの対地抵抗成分 R_0 と $R_{a,j}$ に反比例する項が存在する。さらに $R_{sh} \ll \{R_0, R_{a,j}\}$ の条件の下では R_{sh} の大小は関係しない。

Fig.7 は、panasonic 製モジュール 8 枚直列 ($s=8$) の場合に得られた「降雨のない場合」および「降雨時」の各回路素子推定値と当該モジュールの定格開放電圧 ($e_m = 52.2V$) をもちいて(6)式から試算した推定人体通過電流 $i_h(t)$ である。ただし、

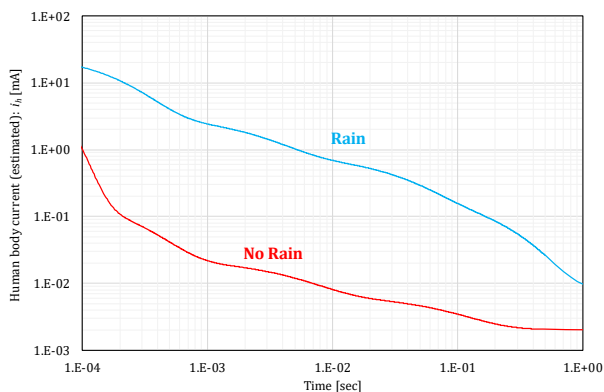


Fig.7 Estimates of human body current $i_h(t)$ for the Panasonic PV module string.

R_0 は $t=1\text{sec}$ まで減衰しないことを前提としている。どちらも時間経過とともに急速に減衰しているが、やはり降雨時の人体通過電流が大きくなることが示されている。

Fig.7は単一ストリングの結果であるが、この状態のストリングが並列数 p でアレイを構成していると想定した場合の降雨時の推定人体通過電流を、IEC60479-1²⁾をもとに作成した電撃と人体反応(直流電流)グラフの上に作図したのが Fig.8 である。図中の直線 a は人体が感覚によって感知できる最小の電流(感知電流)であり、折れ線 b は誤って充電部分に接触しても自分の意志で離すことができる最大の電流(離脱電流)である。また、DC-1 から DC-4 の領域におけるヒトの生理学的影響は以下のとおりである³⁾。

- DC-1: 電源を投入したり遮断したり、と急激に変化させたりするとわずかに刺すような感覚が起こる可能性がある。
- DC-2: 特に電源を投入したり遮断したり、と急激に変化させたりするときに不随意的筋収縮が起こる可能性があるが、通常有害な生理学上の影響なし。
- DC-3: 強い不随意的筋肉反応、および心臓内でのインパルス(電気的な信号)の形成・伝導の可逆的(回復可能な)障害が起こり、電流の大きさと時間とともに増加する可能性がある。通常、臓器への損傷は予想されない。

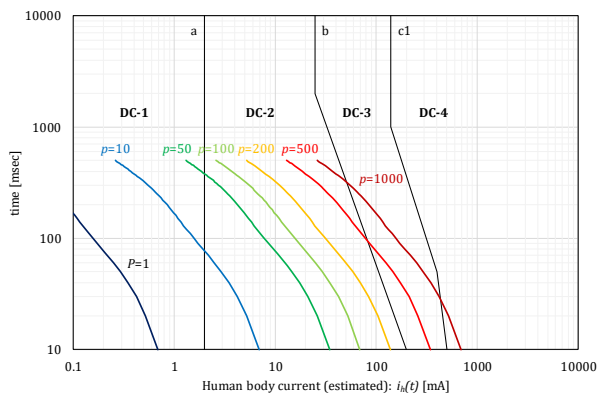


Fig.8 Estimates of human body current for the Panasonic PV array under rain condition. (p : number of parallel strings)

DC-4: 心拍停止、呼吸停止、火傷、その他の細胞障害などの病態生理学上の影響が生じることがある。心室細動の可能性は、電流の大きさと時間とともに増加する。

Fig.8 から、降雨時には少ない並列数でも容易に DC-2 の領域に至ることがわかる。また、並列数 p が 200 を超えるあたりから障害が起こる可能性がある DC-3 の領域に接近し、 $p=500$ では完全にこの領域に達している。さらに $p=1000$ のアレイ規模になると DC-4 の領域に到達してしまう。

上記は特定のストリングに関する降雨時のデータをもちいた一つの試算例であるが、太陽光発電設備の直流部における感電リスクを工学的に議論する指針とはなるであろう。

6. 結言

本稿では前報における太陽電池モジュール/ストリングの対地等価回路の再考の結果として、短時間領域での等価回路仮説の修正について述べるとともに、屋外実験による等価回路素子の各値の推定結果を報告した。また、この推定結果をもちいて感電リスクに関して予備的に行った考察を示した。

本稿での主な知見は以下のとおりである:

- (1) 実験に用いた結晶 Si 系モジュールに関し、 $t < 1\text{sec}$ の短時間領域における対地電圧の挙動は、減衰周波数の大きい(時定数の短い)四つの対地 RC 直列回路(減衰項)で説明できる。降雨のない条件下では減衰周波数はそれぞれ 50kHz 程度、 10^3Hz 、 10^2Hz 、 10^1Hz であり、前二者は前報で捕捉できなかった対地回路である。すなわち、前報での議論と総合すれば、 $0 \leq t \leq 300\text{sec}$ の時間領域において時定数のきわめて短いものから長いものまで七つの対地 RC 回路が存在しているということである。特に 50kHz 超の減衰項は静電容量項とみなせるほど抵抗成分が小さい。また、この四つの対地 RC 直列回路は減衰周波数が大きいため、屋外の対地絶縁抵抗測定時には現れないが感電のような瞬間的事象にはこれらが大きく関与すると考えられる。なお、容積絶対湿度がこれら減衰項に及ぼす影響はいまのところ不明である。
- (2) 降雨のない場合に比べて降雨時には、各減衰項の抵抗成分が大きく減少し、逆に静電容量成分が大きく増加することを確認した。ただし、降雨のない場合と降雨時それぞれの各減衰項が物理的に同じ経路のままであるのか、あるいは降雨により別の経路が形成されるのかは不明である。
- (3) 本研究で提案する対地等価回路モデルにもとづく感電時の人体通過電流の理論式を示すと同時に、降雨時の対地等価回路各素子の推定値をもちいてストリング並列数を変えた場合の人体通過電流の試算例を紹介した。この試算は絶縁不良のない健全ストリングを対象とした一例ではあるが、太陽光発電設備の直流部での感電リスクを工学的に議論する際の参考にはなるだろう。

感電リスクに関する今後の本格的な議論のためには、気温

や湿度, 降雨・降雪などの環境因子の影響, 絶縁不良の有無やシステム電圧, モジュール直列数, スtring並列数, 接続箱の違い(ヒューズ方式/ブロッキング・ダイオード方式)などを含めた網羅的な検討が必要である。また, 当然のことながら議論の対象をパワーコンディショナと接続された現実的状况に拡張していく必要もある。その際にはパワーコンディショナの回路方式の違い(たとえば変圧器の有無など)や状態の違い(スタンバイ状態/連系運転状態/自立運転状態)も考慮にいれる必要がある。

参考文献

- 1) Kazuhiko Kato, A Proposal for Equivalent Circuit Between PV Module/String and the Ground, Journal of Japan Solar Energy Society, 49(2), 55-63(2023) (DOI: https://doi.org/10.24632/jses.49.2_55)
- 2) IEC 60479-1: 2018, Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects
- 3) 中央労働災害防止協会, 低圧電気取扱者安全必携—特別教育用テキスト, 22-23 (2021), 東京