

PVSの接地抵抗測定における留意点

池田 一昭, 大関 崇

産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

はじめに

太陽電池モジュールとその支持物(架台および基礎)で構成されるPVS(太陽光発電設備)の非充電の露出導電性部分は、接地電極との接続および設備内での等電位ボンディングにより、大規模かつ複雑な接地体(接地抵抗を測定する対象物)となっている。接地電極の構造が単純あるいは小規模な場合は、接地電極を設備側から分離して接地抵抗を測定することで、電極と接続する設備の接地抵抗の最大値を確認することができる。しかし、接地電極自体が大規模あるいは複雑な場合、また設備側との分離が困難な場合や太陽電池モジュールや支持物に対する接触電圧を確認する場合などで、電極と設備を接続した状態での測定が必要な場合は、接地体の設備規模(対角距離など)の数倍程度離れた位置に測定用の補助電極を設置する必要があるとされており、大規模な測定装置の導入や遠方での補助電極の設置場所の確保および測定装置との電気的な接続などに著しい困難や多大な労力を要する。本報では、小型・携帯型の接地抵抗計を使用して太陽光発電システムの接地抵抗を測定するにあたり、測定方法の本質に立ち返って補助電極の設置位置に関する検討および調査を行い、その結果を測定時の留意点として報告する。また、簡潔に接地抵抗値を推定する手法の実証実験について紹介する。

実験と結果

接地抵抗測定には日置電機(株)製の接地抵抗計FT6031および補助接地極L9840、RSコンポーネンツ製50mテストリードリールを使用した。接地抵抗を測定する方法は、電位降下法(Fall-of-potential method:FOP法)が最も一般的である¹⁾。また、測定対象の接地抵抗値は、FOP法により測定された抵抗値の空間分布においてFlat slope法を適用して決定することが広く行われている²⁻⁷⁾。Flat slope法が適用できる(抵抗値の空間分布における変化量が小さい)領域は地表面上で2次元的に広がっており、電圧補助極(S極)は必ずしも接地極(E極)と電流補助極(H極)を結ぶ直線上に設置する必要はない³⁻⁵⁾(Fig.1)。これについて、産総研・福島再生可能エネルギー研究所(FREA、福島県郡山市)の敷地内で実証実験を行った。接地極として日置電機L9840を使用し、S極の配置を3通り:(1) H-E極を結ぶ線分を内分する配置[標準式]、(2) H-E極を結ぶ線分を外分する配置(E極は中央)、(3) H-E極を結ぶ直線上以外に配置、に変化させた場合にS極においてE極の接地抵抗を測定し、配置の違いによる顕著な差が生じないことを確認した(Fig.2)。なお、S極の設置位置について「 $\angle HES$ が 30° 以下であれば誤差の少ない測定が可能」との誤解がある。これは、半球状電極を用いた場合の計算において、真値と同じ抵抗値を示す場所がH極を囲む閉曲線に現れ、その閉曲線の広がり直線EHに対して最大で 28.95° になることに由来していると考えられる^{3,7)}(Fig.3)。

H極として下端が半球状の円柱形(電極の円柱部の長さL[m]、円柱および下端半球の直径d[m];Fig.4)を上端が地表面と同じ高さになるように埋設するとき、接地抵抗値 R_H [Ω]を有するH極によってこの電極から十分遠方の距離b[m] ($b \gg L$)に重畳する抵抗量 $\Delta(b)$ [Ω]の空間分布(いわゆる抵抗区域)は式(1)により見積もれる^{8,9)}。式(1)は $L=23.5\text{cm}$ 、 $d=6\text{mm}$ (日置電機製の補助接地極L9840)として導出した。FREA内で実施した測定における $R_H=190\Omega$ および 140Ω の場合の $\Delta(b)$ について、電極からの距離依存性の結果をFig.5に示した。E極の測定値に重畳した量はS-H間の距離bに概ね反比例していたが、H極から10mの距離付近における重畳量はいずれも0.5程度であった。電極と大地との接触状態の善し悪しを反映する格好で電極の有効長が半分程度であったためと考えられる。なお、重畳分も含めた絶対値について測定の目的に照らして不都合がなければ、電極間距離をむやみに確保しようと労を費やすことは不毛である。

$$\Delta(b) = \frac{1}{18.6} \frac{R_H}{b} \quad (1)$$

PVSでは集中極を施設するのが一般的であるが、集中極を経由する以外の経路でも接地の機能が発現し、集中極と架台等による並列極が形成される場合も多い。並列極同士が近接している領域では、各電極の近傍である効果と複数電極が並列接続している効果の相乗により、システム領域内で測定される接地抵抗値は、システムから十分遠方で測定される接地抵抗値と比較して著しく小さい値となる。FREA内のB区画250kW-PVS(架台脚の接地領域:東西43m×南北112m、コンクリート打設の架台脚:Fig.6(2)×396本、すべてのPVモジュールおよび架台等は等電位ボンディングで連結、設備西側の建屋内に集中極を施設)において、PVS敷地の内外にH極を設置して接地抵抗測定を実施した。設備の南西の角から12m北側の架台脚にE極を接続した。E極に対して、西へ81m、南へ33m、東へ8m(PVS敷地内)、東へ30m(PVS敷地内)の位置にそれぞれH極を設置した場合、E極に対して西側に設置したS極(E極から3m、10m、50m)により接地抵抗を測定した(Fig.6)。H極が南33m(PVS端からは21m)では、S極がPVSから西へ離れるにしたがって、E極の接地抵抗測定値が 0.2Ω 程度で収束する傾向を示した(Fig.7)。西81mではPVS近傍において南33mと同傾向であったが、S極が50mの位置ではH極の抵抗値が 0.05Ω 程度重畳した。東30mでは、収束値が 0.1Ω 程度を示した。これは、H極が並列極と見なされる架台脚により囲まれることでPVS敷地外への通電量が減少し、S極付近での電位差が減少したと考えられる。また、東8mではH極の抵抗値が重畳することで、PVSから遠ざかるほど抵抗値が減少して見えた。今例のように架台脚による接地の並列性が高い場合、H極を架台脚の近傍(特にPVS敷地内)に設置すると、H極と近接する一部の接地極との間に偏った電流が流れるため、H極からの電流や接地システムへ電流が等方的に流入するという電流経路が成立せず、FOP法の原理が成立しない。接地システムの敷地外、可能であれば抵抗区域外にH極を設置するのが理想であるが、実現不可能な場合や測定精度が労力に見合わない場合もあるため、要求する測定精度を把握した上での作業が必要である。

棒状電極の抵抗値は電極から十分離れた位置では半球状電極と同様に電極からの距離に反比例して収束値に漸近すると見なせる。また、これまでの経験では、どの規模の接地体でも同様の傾向は見られる。これは並列極を構成する各々の極が距離に反比例して収束する傾向を有することに起因すると考えられる。そこで、接地体の接地抵抗値の空間分布 $R(b)$ [Ω]は、接地体から十分離れた位置において、式(2)のとおり距離b[m]に反比例する形で近似できると仮定する。ここで、 α [Ω]は無次元における接地抵抗の収束値、 λ [m]は変化の割合を示し抵抗区域の広さの目安になる変数で、 δ [m]は調査域からみた見かけの接地極の原点で、接地極の近傍での双曲線近似からのズレを吸収する役割も担っている。変数を3つ使用するため、仮の原点を基点とする任意の直線にそって抵抗値の位置依存性を (b_1, R_1) 、 (b_2, R_2) 、 (b_3, R_3) のように3組測定して式(3)へ代入すると、収束値 α を計算できる。この手法では、抵抗値の変化を利用して収束値を推定するため、抵抗区域内すなわちPVSの近傍で測定を実施できる利点がある。FREA内のD区画250kW-PVS(架台脚の接地領域:東西67m×南北50m、根入れコンクリート基礎上に金属鋼材をボルト止め:Fig.7×42個、すべてのPVモジュールおよび架台等は等電位ボンディングで連結、設備北側の敷地内に接地棒6本を並列施設:Fig.8)において、PVS端から約25m以内での接地抵抗測定値の距離依存性3点により、PVSの接地抵抗値を 0.78Ω と推定した(Fig.9)。設備の南東の角から約10m北側の架台の金属鋼材にE極を接続し、E極に対して東側に設置した10数点のS極のうち比較的直線状に並んだ3点の測定値で双曲線関数を構築し、無限遠における収束値を計算した。

$$R(b) = \alpha \left(1 - \frac{\lambda}{b - \delta} \right) \quad (\alpha, \lambda > 0) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{(b_3 R_3 - b_2 R_2)(R_2 - R_1) - (R_3 - R_2)(b_2 R_2 - b_1 R_1)}{(b_3 - b_2)(R_2 - R_1) - (R_3 - R_2)(b_2 - b_1)} \quad (3)$$

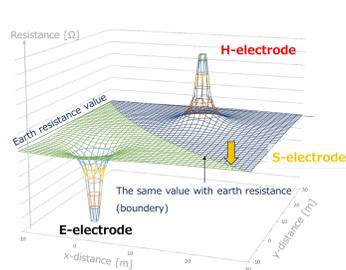


Fig.1 接地極および電流補助極周辺の接地抵抗測定値の平面分布(概要図)

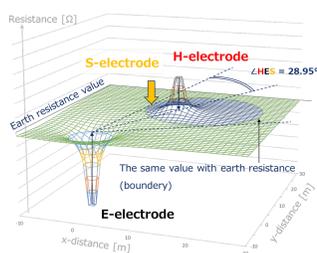


Fig.3 「30度以下で誤差の少ない測定」の誤解の発端に関する正しい解釈(概要図)

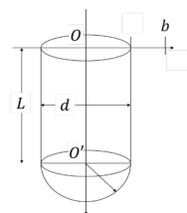


Fig.4 電流補助極の形状

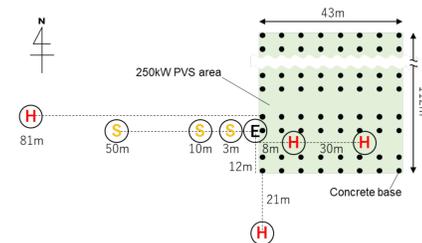


Fig.6 FREA-B区画 250kW-PVSにおける接地抵抗測定時の接地極および補助接地極の配置図

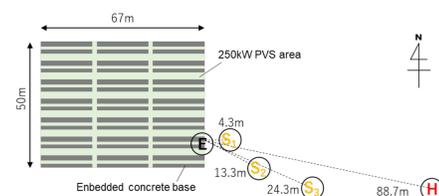


Fig.8 FREA-D区画 250kW-PVSにおける接地抵抗測定時の接地極および補助接地極の配置図

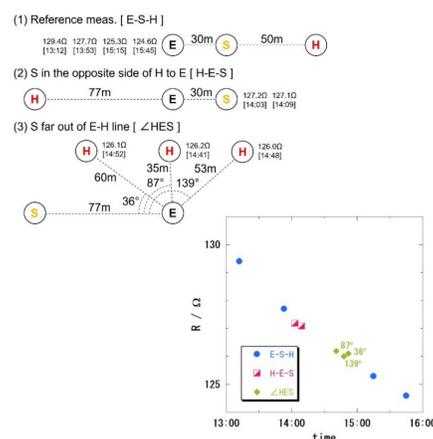


Fig.2 補助電極の配置図および配置を変化させた場合のE極の接地抵抗測定値(経時変化を含む)

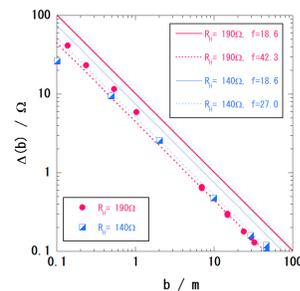


Fig.5 電流補助極による接地抵抗測定値への重畳量に関する電流極からの距離依存性

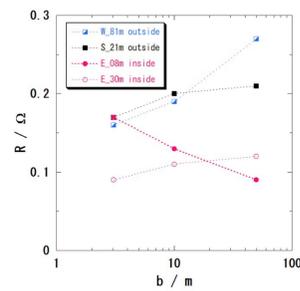


Fig.7 電流極の設置位置が異なる場合の接地抵抗測定値の距離依存性

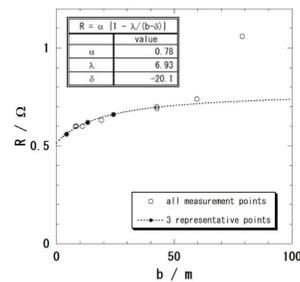


Fig.9 接地抵抗測定値の距離依存性と双曲線近似による収束値の計算

まとめ

市販の小型・携帯型接地抵抗計を用いて太陽光発電システムの接地抵抗測定を実施する際の留意点を列記した。測定対象が集中極型であるか並列極型であるかは測定により明らかになる結果ではあるが、架台の構造等から予め見当をつけて測定を実施することが重要である。E極に対してS極とH極を一直線上に設置する必要性は必ずしもないため、E、S、Hの3極を三角形に配置にすることで、測定に必要な空間は任意で選択できる。ただし、H極の接地抵抗がE極の接地抵抗の測定値(すなわちS極)へ重畳する量(測定誤差)は、H極の接地抵抗値に比例し、H-S極間の距離に反比例する。ここで、H極の形状因子を算出することで重畳量の絶対値を概算できることから、E極の接地抵抗の測定値(S極で測定)とH極からの重畳量の比を吟味して、必要な測定精度を確保できるH極の設置場所とH-S極間の距離を決定することが重要である。また、広がったE極(並列極型)に対してH極で流入する電流の等方性を確保するためには、E極の領域の外側にH極を設置する必要がある。E極の領域端からH極までの距離として、H-S極間に必要な距離と同程度を確保して測定を行い、E極の接地抵抗の測定値を吟味してH極の位置の是非を確認する必要がある。

S極の設置に必要な空間を縮小する方法として、抵抗区域内で測定した接地抵抗の位置に関する依存性を双曲線により外挿し、無限遠での接地抵抗値を推定する方法について実証実験を行った。この手法の実施を含め、接地抵抗の測定時には50m程度のテストリード線を複数本準備しておくことは有益である。なお、小型・携帯型接地抵抗計においては $1\Omega/50\text{m}$ 程度以下のテストリード線が有用である。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP20015)の結果得られたものである。

参考文献

1. P. D. Morgan and H. G. Taylor, Measurement of the resistance of earth electrodes, World Power, 21, 22-27, 76-81, 131-135 (1934).
2. E. B. Curdts, Some of the fundamental aspects of ground resistance measurements, AIEE Transactions, 77 Part I, 760-767 (1958).
3. G. F. Tagg, Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering a large area, Proc. IEE, 111, 2118-2130 (1964).
4. IEEE Power and Energy Society, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, IEEE Std 81-2012 (2012).
5. Megger, Getting Down to Earth - A practical guide to earth resistance testing, <https://megger.com/>
6. 川瀬太郎著, 新電気シリーズ 地絡保護と接地技術, (1977), オーム社, 東京.
7. 高橋健彦著, 川瀬太郎監修, 図解 接地技術入門, (1986), オーム社, 東京.
8. A. C. Liew and M. Darveniza, Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths, Proc. IEE, 121 (2), 123-135 (1974).
9. 池田一昭, 大関崇, 太陽光発電システムの接地抵抗測定における留意点, 日本太陽エネルギー学会講演論文集2022, 151-154.