Research Paper

Effect of high-voltage conductor on the PV module surface on power generation characteristics

研究論

Masaya IKUKAWA^{*1} Ryo NISHIMURA^{*2‡}

高電圧導体が受光面近傍に存在する PV モジュールの発電性能変化

生川 真也 "1

西村 亮*2*

Abstract

PV power plants installed in arid lands can generate large amounts of power because of fine weather. However, sand accumulation on PV modules decreases the generated power in such area. It is not desirable using water to remove the sand in arid land. Electric field curtain (EFC) is one of a promising method to remove the sand without using water. If EFC is adopted to PV modules, high-voltage conductor is placed very near the PV cells. In this paper we report on the effects of high voltage conductors placed on the PV module surface on the power generation characteristics. It is shown that high voltage stress at high temperature may degrade the power generation performance.

Keywords: PV power generation, arid land, sand removal, electric field curtain, PID

キーワード:太陽光発電,乾燥地,砂じん除去,電界カーテン,PID

1. はじめに

近年,化石燃料を用いず,発電時に温室効果ガスを排出 しない太陽光発電が注目されている.しかし,太陽光発電 は様々な環境要因によって発電量が左右される.その中で 天候による影響が発電量を大きく左右してしまう.そこで 雨の少ない乾燥地で PV モジュールを設置することで安定 して発電が可能と考えられる.しかし,乾燥地における PV モジュールの設置にも問題点があり,砂じんが舞いや すい環境下であるため, PV モジュール受光面にこれらが 堆積してしまうことである.これにより発電変換効率が低 下し,発電量低下を引き起こす.

太陽電池受光面の洗浄方法として,水を使った手動によ る洗浄が一般的である.しかし,この方法では大量の水を 必要とし,人件費などのコストが掛かってしまう欠点があ る.この改善策として,水を使用せず,低コストである電 界カーテン (Electric Field Curtain, EFC) による砂の除去方 法がある.

電界カーテンとは、誘電体内部に多相の線状電極を埋設 し、これに相順に多相交流高電圧を印加すると進行波不平 等電界が発生し、帯電した微粒子や繊維などを電気力学的 に浮上させ、浮上状態で進行波方向に移動できる装置⁽¹⁻³⁾ のことである.透明電極で作成した電界カーテンを PV モ ジュールの受光面ガラス内に設置することによって発電性 能を低下させる受光面上への砂じんの堆積を防止できるこ とが期待できる.

著者らはこれまでに砂じんは帯電している事を確認し⁽⁴⁾, 実際に電界カーテンを作成してその進行波電界で砂じんが 移動する事を確認し,電界カーテンの形状や傾斜角になど 対する砂じんの移動状況(砂じん除去特性)の調査を行っ た⁽⁵⁾.本稿では電界カーテンの実用に向け, PV モジュー ル受光面に高電圧電極を長時間接触させた場合, PV モ

^{*1} Tottori Univerity Graduate School

^{*2} Associate Professor, Faculty of Engineering, Tottori University, 4-101 Koyama-minami, Tottori 680-8552, Japan ‡e-mail: ryo@tottori-u.ac.jp

Received: 5th March, 2020, Accepted: 21st August 2020

^{*1} 鳥取大学大学院

^{*2} 鳥取大学工学部 准教授 (〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)

[‡]e-mail: ryo@tottori-u.ac.jp (原稿受付:2020年3月5日,受理日:2020年8月21日)

ジュールの発電性能が高電圧導体によりどのような影響を 受けるのかを調査する.

2. 電界カーテンを用いる場合の問題点

電界カーテンを用いて砂じんを除去する上で,電界カー テンに用いる太陽電池セル近傍の高電圧導体が, PV モ ジュールの発電性能や発電システムに及ぼす影響が重要と なる.

PV モジュールの劣化原因の一つに, PID (Potential Induced Degradation)劣化現象がある. 主に産業用等の大 規模な設備では、システムがより高電圧化する. そうした システムに組み込まれた PV モジュールは、フレームとモ ジュール内部の回路間の電位差が大きくなりがちだと言わ れている. この状況で、特に高温多湿のような環境にさら された場合には回路に電流漏れを生じ、劣化および出力低 下が起こるとされている. これが PID 劣化現象である⁽⁶⁾.

著者らは発電時の PV モジュールの受光面の一部に高電 圧導体を乗せた状態で、電子負荷装置を用いて *I-V* 特性の 測定を行うことを試みたが、高電圧導体に kV 単位の電圧 が印加されている状態では電子負荷装置が誤作動し、計測 不可能であることを確認した.このことからモジュール表 面近傍の高電圧導体は外部回路の動作に悪影響を及ぼすと 推察できる.

この電界カーテンを用いる上で考えられる改善策として 2 点挙げる.1 点目は、定期的に PV モジュールと外部回 路を切り離してから電界カーテンを動作させるというもの. 2 点目は、電界カーテンと太陽電池セルの間に透明接地電 極を設けてセルをシールドするというものが考えられる. 本稿では前者に着目し、この場合の PV モジュールの発電 性能の変化を調べる.

3. 実験

乾燥地に太陽光発電を導入すると日中の受光面温度は 100℃程度まで上昇する.したがって電界カーテンの導入 による PV モジュールの発電性能変化について,以下を調 査する.

(1) PV モジュールの温度上昇のみによる発電性能変化

(2) 電界カーテン電極の電圧のみによる発電性能変化

(3) PV モジュールの温度上昇と電界カーテン電極電圧の両 方の存在による発電性能変化

3.1 使用 PV モジュール

使用する PV モジュールの規格を Table 1 に示す. この PV モジュールを 3 枚用いる. このモジュールに対し,次 のような実験を行い, 発電性能の変化を実験前後の *I-V*, *P-V*特性および受光面の EL 発光状態より評価する. (1) モジュール A:モジュールのみを 80℃の温度下に 730 時 間放置する.

(2) モジュール B:モジュール受光面表面に電界カーテン電

Table 1 Specifications of PV module in standard condition

Rated maximum output	15 W
Rated open circuit voltage	21.2 V
Rated short-circuit current	0.96 A
Output voltage at maximum	17.4 V
power operating point	
Output current at maximum	0.87 A
power operating point	
Rated mass	2.0 kg

極を配置し, この電極に室温下で電圧を 730 時間印加する.

(3) モジュール C:モジュール受光面表面に電界カーテン 電極を配置し、この電極に 80℃の温度下で電圧を 730 時 間印加する.

3.2 電界カーテンの存在を想定した高電圧印加実験

PV モジュール受光面に置く高電圧導体に用いる電極を Fig. 1 に示す. 電極はプリント基板上に作成した並行電極 になっており,この電極の電極幅は 0.3 mm,電極間隔は 4 mm とした. Fig. 2 は電極模式図を示している.電界カー テンには波高値 HV の三相交流を印加することを想定し, +HV,0(接地),-HVをその交流の代表的な値と考えた. 本研究では波高値を 2 kVを想定し,直流の+2 kVを①, ④,⑦,…に、-2 kVを③,⑥,⑨,…に印加し,②,⑤, ⑧,…を接地した.これは各相の電圧が+2 kV,-2 kV,0 kV となった瞬間を想定し,疑似的に三相交流が印加され ている状態を模擬した.これを PV モジュール上にこのプ リント基板の電極がモジュール受光面に接するように置き, 固定する.これを実際に PV モジュール上に電界カーテン が存在する状態だと想定する.



Fig.1 EFC electrodes on PCB for high-voltage stress test experiments



Fig.2 Voltage application sequence of EFC electrodes



(a) Appearance of high-voltage stress test at room temperature



(b) Schematic of high voltage-tress test at room temperature

Fig.3 Experimental apparatus for high-voltage stress test under room temperature

室温下の場合の実験装置を Fig. 3, 高温下の場合の実験 装置を Fig. 4 に示す. PV モジュールはそれぞれ開放状態 を維持し、 絶縁体である発泡スチロール上に設置する. 室温は 25℃であった. 高温下では, 発泡スチロールの箱 を用いて断熱し、乾燥地の昼間時を考慮するためヒーター をサーモスタットで制御し,毎日8時~20時で内部温度 を 80°C に維持するようにした. 内部温度については株式 会社タニタのデジタル温度計(型式:TT-508N)で測定し 確認を行う. また, Shenzhen Meihang Electronics Co. Ltd の サーモスタット(型式:MH1210W)と昭和精機工業株式 会社のパネルヒーター(型式:SP-150)で内部温度制御を 行い、リーベックス株式会社製の簡単デジタルタイマー (型式: PT70DG) で稼働時間の制御を行う.この時,断 熱箱内部の温度が均一になるように、株式会社大創産業 USB ワイヤー扇風機を常時断熱箱内部で稼働させること で対流を作る. Fig. 5 に断熱箱内部の温度変化について示 す. ヒーターの電源が入ってから約 25 分で 80℃に到達し, その後内部温度を一定に維持していることを確認した.

PV モジュール受光面上に置いた電極への高電圧印加は, 2019 年 8 月 23 日 14 時より室温下と高温下のものを同時 にスタートさせた.高温下の加温はこの時点からスタート し,以降の稼働状況は上記で示した時間中に稼働させた. しかし高温条件下でのみ電圧印加開始数時間後で電極間が 埃によって放電し,トラッキング(放電痕)を発生して短 絡した.これは,放電電圧は電極温度が高くなることで低 下する⁽⁷⁾ことに起因すると考えられる.放電は主に+2 kV および-2 kV の電極間で発生した.電極の先端付近でこの 短絡現象が多発したことから,この部分の絶縁性を上げる



(a) Thermostatic box mode of styrofoam



(b) PV module and EFC electrode installed in the thermostatic box



(c) Schematic of high-voltage stress test under high temperature condition

Fig.4 Experimental apparatus for high-voltage stress test under high temperature condition

必要があると考え,高温条件下の電極にのみ電極先端部を サンハヤト株式会社の絶縁コーティング剤(AY-302)で 被膜した.ところがこの場合においても放電を防ぐことが 不可能であったため,実験中に放電した際,高電圧印加を 室温下と高温下のものを同時に中断し,短絡部分(トラッ キングした部分)を Fig.7のように削除し,電極の短絡が 全て解消したことを確認後,室温条件下と高温条件下で同 時に高電圧印加を再開するというサイクルを繰り返した. 高温条件下で異常放電が発生しやすいということは高温条 件下で電界カーテンを動作させる場合,放電を生じにくく



Fig.5 Temperature change inside the insulation box



Fig.6 Tracking of discharge between electrodes on PCB



Fig.7 Electrode after removing the short-circuited part

する工夫が必要であることを意味している.

3.3 電界カーテンを稼働後の発電性能変化

電界カーテンを想定した高電圧印加実験後,これに使用 した PV モジュールの発電性能について計測を行った.測 定は,IEC 認証規格である IEC61215-2 に基づいて行った. 高電圧を累計 730 時間(約 31 日間)印加した後の PV モ ジュールの I-V特性を Fig. 8 に, P-V特性を Fig. 9 に示す. また,この時の PV モジュールの EL 画像を Fig. 10 に示す. Control は室温での初期状態としている.この結果から, I-V特性, P-V特性で PV モジュールの最大出力部分に着目 すると,共に高温のみにした場合は僅かな変化に留まり, 電界カーテンを想定した高電圧印加を行った方では,出力 が低下している結果を得ることができた.よって,高温時 に置いた場合の劣化より高電圧印加による劣化(縦方向の 縞状のムラ)が大きいということが言える.EL 画像にお いては,高温下電圧無印加では減光が見られないが,高電 圧印加では印加時間が増加するにつれ減光が確認でき



Fig.8 *I-V* characteristics of modules after 730 hour high-voltage stress test



Fig.9 *P-V* characteristics of modules after 730 hour high-voltage stress testing

るため、高電圧印加が長期に渡るにつれ蓄積で劣化すると 考えられる.730時間の高電圧印加前後で比較すると、最 大出力は室温下高電圧印加後で 1.68%減少、高温下高電圧 印加後で 3.65%減少、高温下無印加では 0.17%減少した. また、最大出力である最適動作点の出力を、開放電圧と 短絡電流の積で割った値である曲線因子(FF値)は、室 温下高電圧印加後で 0.29%減少、高温下高電圧印加後で 1.13%減少、高温下無印加ではほとんど変化しなかった. 本実験においては、累計時間の高電圧印加で上記の減少で あったが、乾燥地での電界カーテンを用いての砂じん除去 は、長期で使用していくと劣化が蓄積し、PV モジュール そのものの出力が低下しやすくなると考えられる.このた め、乾燥地での電界カーテンを用いての砂じん除去は、長 期で使用していくと劣化が蓄積し、PV モジュールそのものの出力が低下しやすくなると考えられる.

4. 考察

単結晶シリコン太陽電池の発電性能は、5 年後で 96.4%、 10 年後で 92.2%、20 年後で 84.2%となり⁽⁸⁾、経過年数に 応じて劣化する.この値および本実験で得た発電性能の劣



(a) Control



(b) High voltage stress test at room temperature for 500 hours



(c) High voltage stress test at high temperature (80° C) for 500 hours



(d) High voltage stress test at room temperature for 730 hours



(e) High voltage stress test at high temperature (80°C) for 730 hours



(f) No voltage stress test at high temperature (80°C) for 730 hours

Fig. 10 EL image of PV module



Fig.11 Degradation of power generation performance of single crystal silicon PV

(Source of Normal data is quoted from Ref. 8)

化状況,そしてこれを元に推察される予測値を Fig. 11 に 示す.発電性能がほぼ直線的に減少することから電界カー テン使用時も同様な減少になるとし,予測値は式(1)を用い て算出した.ここでは,730時間の高電圧印加前後で,最 大出力が高温高電界条件下で3.65%減少したことを元にし ている.また,730時間を1/12年,xを経過年数とする. 今回の実験条件での電界カーテンの稼働時の発電性能 *R*_D[%]は

$$R_{\rm D}\,[\%] = 100 - 3.65 \times (12x) \tag{1}$$

となる.この結果から,高温条件下で電界カーテンを動作 させ続けると,約4ヶ月半で通常の20年経過での劣化と 同等になると考えられる.

著者らは、今回の実験で用いた電界カーテンと同様 の, 電極幅 0.3 mm, 電極間隔 4 mm の電界カーテン を作成し、その電極面に放電を防止するための誘電体 (透明接着剤)を塗布して厚さ 0.4 mm のガラス板を 接着し、それを 10°に傾斜させてからそのガラス表面 (PV モジュール表面を模擬) に砂じんを散在させ電 界カーテンを作動させた(5).その場合、今回の実験で 採用した 2 kV では砂じんはほとんど除去されず, 80%程度の砂じん除去率を得るために必要な電圧は 6 kV であった. この電圧は今回用いた電圧の 3 倍大き く,この電圧を用い、何らかの方法で電極間放電を抑 制して、本報で述べた劣化試験を行った場合、太陽電 池の劣化速度はさらに大きくなることが考えられる. したがって、単に日中の高温下で PV モジュールと外 部回路を切り離して電界カーテンを作動させることは望ま しくなく、電界カーテンは夜間に作動させる、もしくは高 電圧導体の影響(高電界)が太陽電池セルに到達しな いよう、電界カーテンとセルの間に透明接地電極を設け てセルをシールドする方法などを検討する必要がある.

著者らの実験⁽⁵⁾では定格発電電力 100 W の太陽電池の砂 じん除去に要する電力は約 1.2 ~ 2 W であると見積もられ

た. また、本報および文献 5 の電界カーテンは幅 0.3 mm の不透明な導導体が間隔を4 mm で並んでいる構造であり, 電界カーテンに遮られて太陽電池セルに到達する日射は通 常の4/(4+0.3)×100 = 93.0%となる.したがって、発 電電力がセル到達日射に比例するとした場合、定格発 電電力 100 W の太陽電池に本報と同様の電界カーテンを組 み込むと定格時の発電電力は電界カーテン駆動電力を考慮 して 100 × 0.93 - 2 = 91 W となり,通常よりも 9%減少す る.一方,インドのタール砂漠において 45 度傾斜さ せた PV モジュールを7月から9月の約2か月間洗浄 せず放置した結果, モジュール表面上の汚れによって 約 17%の光の透過損失が生じたとの報告がある⁽⁹⁾.砂 じんはモジュールの傾斜角が小さいほど重力での落下 が生じにくくなるため堆積しやすくなり、結果として 透過損失は更に大きくなると考えられる. 電界カーテ ンの電極による透過損失は透明導電体を採用して電極 幅を更に狭く、電極間隔を更に大きく取ることで低減 できる.砂じんにかかる電界を十分強くするために電 極間隔を大きく取ると電界カーテンへの印加電圧も高 くしなければならないが、それでも乾燥地が多い低緯 度地帯でモジュールを低い傾斜角で設置する場合,電 界カーテンによる砂じん除去の有効性が期待できる.

電界カーテンが外部に露出することは強度や安全性 の確保が困難であるため, Fig. 12 のように 2 枚のカ バーガラスで電界カーテンをはさむ構造が望ましいと 考えられる.この構造の場合,電界カーテンが密閉さ れるため,外部湿度の影響を受けにくく,電界カーテ ン電極間の表面抵抗を高く保ち,沿面放電を抑制する ことが比較的容易であると思われる.また,外気への コロナ放電も抑制でき,電界カーテンの消費電力削減 につながると思われる.



Fig. 12 PV module with double-layer cover glass and EFC electrodes

5. まとめ

今回の実験では、電界カーテンを想定する高電圧印加に おいて、PV モジュール、電界カーテンに用いる電極の双 方に、悪影響が少なからずあることが確認できた.また、 中でも高温下高電圧印加で一番出力が低下する結果を得た. この結果より、電界カーテンに用いる電極は気温が高い状 態では PV モジュールの劣化を早めると考えられる.今回 の実験は最長累計が 730 時間であったが、実際に乾燥地で 長期間電界カーテンを用いて砂じん除去を行うと発電出力 が短期間に大幅に低下すると考えられる.

今後の展開として、電界カーテンとセルの間に透明接地 電極を設けてセルをシールドした状態で、種々の電界カー テン電極間隔に対し、電界カーテン電極間の放電および電 界カーテンと透明接地電極間の放電が起きない範囲の高電 圧を用いた実験を行い、砂じん除去効果と日射減少および 消費電力のトレードオフを定量的に調査する研究を今後実 施する予定である.その際、高電圧化にともなう太陽電 池外枠や架台への漏電など、沿面放電による不都合が 予想される部位に対する対策、PV モジュールから電 気的に切り離せないバイパスダイオード等の素子への 影響および対策を検討する.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K12428 および鳥取大学国際 乾燥地研究教育機構「砂丘地保全・活用プロジェクト」か らの助成を受けて行われた. 本報は 2019 (令和元)年 度の日本太陽エネルギー学会研究発表会で発表したものに 加筆したものである.

参考文献

 Arash Sayyah, David R. Crowell, Atri Raychowdhury, Mark N. Horenstein and Malay K. Mazumder, An experimental study on the characterization of electric charge in electrostatic dust removal, Journal of Electrostatics, 87, 173–179 (2017).

- 2) Hiroyuki Kawamoto and Takuya Shibata, Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels, Journal of Electrostatics, **73**, 65-70 (2015)
- G. Liu and J.S. Marshall, Particle transport by standing waves on an electric curtain, Journal of Electrostatics, 68, 289-298 (2010)
- 4) N. Odawara and R. Nishimura, Prevention of sand accumulation on the Surface of PV modules installed in aridland by using Electric field, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2017) (Oct. 2017), 229-232, Niigata, Japan.
- 5) Hiroki Takegata and Ryo Nishimura, Simulation of sand removing by using electric field curtain for PV modules installed in arid land, Journal of Japan Solar Energy Society, 46 (5), 57-62 (2020)
- 6) 太陽光発電総合情報,太陽電池の PID 劣化現象 (accessed Feb. 6, 2020), http://standard-project.net/solar/words/pid.html
- デンソースパークプラグ、放電電圧に影響する条件 (accessed Feb. 3, 2020),

https://www.denso.com/jp/ja/products-andservices/automotive-service-parts-andaccessories/plug/basic/spark/condition.html

- 8) ヒラソル,ソーラーパネルの寿命(accessed Feb. 7, 2020), https://www.girasol-solar.jp/magazine/lifespan/
- K. Mazumder, Arash Sayyah, Mark N. Horenstein, Malay, Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels, Solar Energy 107, 576-604 (2014)