いずれかを選択してください

若手研究者助成金　実績報告書

令和　5年　4月　11日

日 本 大 学 学 長　　殿

氏　　名：加藤修平
所属・資格：生産工学部・准教授
実施研究所：生産工学部・生産工学研究所

下記のとおり報告いたします。

1　研究課題

和文表記（40 字以内） 太陽光発電量増加のためのパネル接続切り替え用直流スイッチとその応用
英文表記 DC switch for switching panel connection to increase solar power generation and its application

2　研究期間

令和 4 年度

※令和 4 年度　～　令和 5 年度（※特例措置により上記期間を変更している場合記入すること）

3　研究目的

太陽光発電はカーボンニュートラルに向けた必須の発電技術とされている。しかし，狭い住宅街では晴天でも電柱等のわずかな影による発電量の低下が運用上の大きな課題の一つになっている(図 1)。これに対し本研究課題は影のない太陽電池の発電能力を最大限に発揮すべく，影の太陽電池を電気的に分離する直流スイッチの実現を目指している。現在，影対策として光子エネルギーを有効に活用できるペロブスカイト太陽電池などが試みられているが，実用化に十年単位の期間が必要と予想されている。そこで本研究課題は電気スイッチとして機械接点とパワー半導体を併用し長寿命かつ小型の直流スイッチによる影対策を目指している。具体的には機械接点は抵抗成分が小さく発熱しない反面アークが発生する。一方，パワー半導体はアークが発生しない反面，抵抗成分が大きく巨大な放熱器を必要とする。つまり両方の欠点を補い機械寿命の 20 万回まで可能な直流スイッチの実現が本研究の目的である。



図 1　影での太陽光発電電力低下
(左)影なし(右)約 5%影で 70%低下

4　研究概要

直流電流は交流電流と異なり電流ゼロ点が存在しないため、機械接点で強制的に遮断すると図 2 のようにアーク放電現象により接点電極が摩耗し、寿命は数 100 回程度である。それだけでなく、条件によってはアークが途切れず継続し火災に至る場合もある。これに対しこれまで提案されている直流スイッチ技術の先行研究を図 3(a)(b)に示す。図 3(a)は機械接点内部に永久磁石等で磁場を生成し、アーク放電の電子と磁場によるローレンツ力によりアーク経路を引き伸ばして確実に遮断する方法である。図 3(b)は事前に充電した電荷を用いて遮断時に通電方向と逆向きのカウンター電流を強制的に生成する方法である。図 3(a)は確実な電流遮断を実現できるものの接点電極が摩耗するため効果は限定的である。図 3(b)は接点電極の摩耗は抑制されるものの、遮断電流の大小に応じて充電回路の調整が必要であり回路が複雑になっている。

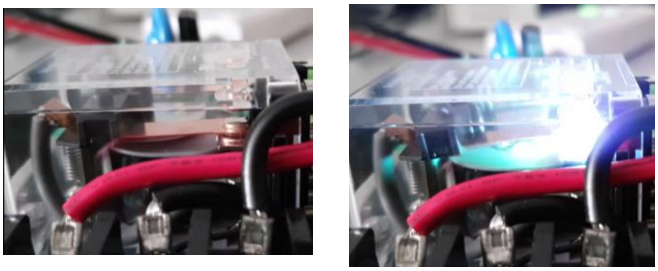


図 2　機械接点による直流遮断(150 V/30 A 遮断時)のアーク放電(左)遮断前の通電時(右)電流遮断時

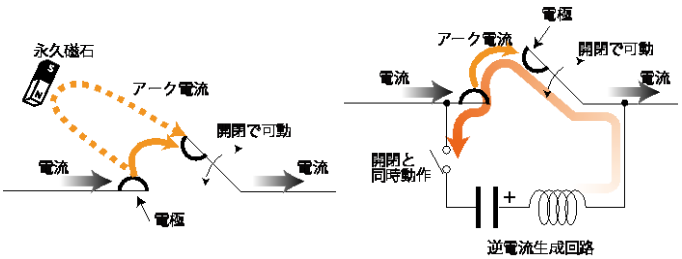


図 3　直流スイッチの先行研究
(左 a)ローレンツ力利用(右 b)逆電流生成法

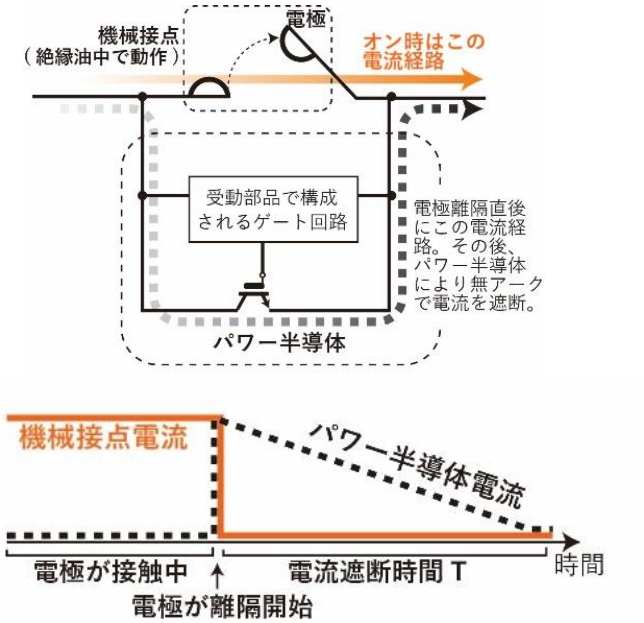


図 4　金属接点とパワー半導体を併用した
提案回路による直流スイッチ

先行研究に対し提案法は電流を遮断する代表的な 2 つのオン・オフ機構（機械接点とパワー半導体）を併用する仕組みである。具体的にはパワー半導体は元来、電流遮断時にアーク放電現象が発生しないメリットがあるものの、抵抗成分が大きく常時使用において巨大な放熱器が必要となるデメリットがある。そこで、提案法は図 4 に示すように機械接点を常時使用し、電流遮断時の過渡的な瞬間のみパワー半導体を活用する。本研究では以下の内容を明らかにする。

① 提案回路の有無における機械接点のアーク放電減少の定量評価

② パワー半導体での直流電流遮断速度と発熱限界の関係性

5　研究結果

本研究で明らかにする前述の①の実験結果について述べる。提案回路を用いることでアーク放電現象は発生しないが、これらを定量的に確認する実験を行った。図 5 に試験回路を示す。電源電圧は直流 30 V としてハーフブリッジ回路の機械接点で約 20 A のインダクタンス負荷の直流電流を遮断し、発光強度信号をオシロスコープにて観測した。フォトディテクタ（波長域：320~1100 nm、THORLAB 社製、型番：PDA100A2)を用いて提案回路の有無で発光強度を比較した。の発光強度をオシロスコープにて観測した。

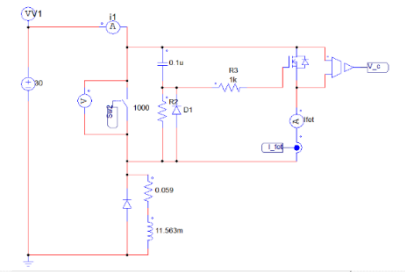


図 5　アーク放電現象の定量評価実験回路



図 6　アーク放電発光強度の定量評価実験装置の外観

発光強度比較の実験結果を図 7、図 8 に示す。同図より提案回路の有無でどちらも約 20 A の直流電流を遮断していることがわかる。提案回路が無く機械接点のみの場合（図 7)、直流電流の遮断の約 50 μs 前から発光強度が徐々に増加し始めている。これは約 20 A の直流電流を遮断する際、電極間距離が離隔し始めると同時にアーク放電現象が起きているためである。そして、次第に電極間距離が離れていき、アーク放電距離が長くなるにつれて発光強度も強くなっている。そしてアーク放電が継続できない距離に達した時点で発光強度信号が垂直にゼロまで降下していることがわかる。これにより提案回路が無く機械接点のみではアーク放電により電極材料が消耗していることがわかる。

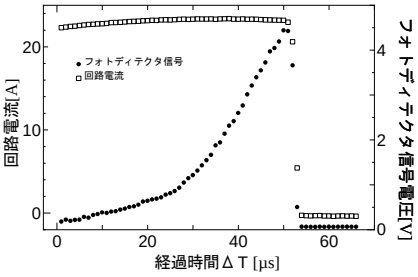


図 7　提案回路が無い場合の直流電流遮断と発光強度

一方、提案回路を接続することで前述と同じ条件の直流電流 20 A を遮断した際の発光強度は図 8 に示すように検出できないほど低レベルの信号であった。これは提案回路を接続することで直流電流を機械接点にて遮断した瞬間に、その電流が行き場を失わず全てパワー半導体へ流れ込んでいるためである。これにより直流電流は機械接点の電極間でアーク放電を形成する電流経路を作る必要性がなくなり、アーク放電現象が発生することは無い。そして、パワー半導体へ流れ込んだ直流電流はゲート電圧を絞ることにより無アークで徐々に減少し、最終的に直流電流を遮断できている。

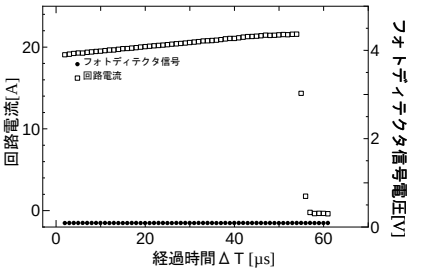


図 8　提案回路の付加による直流電流遮断と発光強度

今後は放電現象を分光計測することにより、提案回路が無い場合、電極材料のどのような成分がどれだけ消耗しているかについて、光学フィルタ等を利用して定量化する。これらにより提案回路付加における機械接点の寿命評価を行う予定である。

〔5　研究結果（つづき）〕

本研究で明らかにする前述の②のパワー半導体での直流電流遮断速度と半導体発熱限界について、新たな回路を提案しシミュレーションにより効果を確認した。

具体的には提案回路はパワー半導体を瞬間とはいえ能動領域で使用するため、発熱がメガソーラー等への大容量化に向けた大きな課題の１つとなっていた。というのは、パワー半導体での電流遮断速度が速すぎる場合、能動領域での動作時間は短く発熱や温度上昇は問題とならないが、電極間距離が十分離隔していないため、電極間にアーク放電経路が発生してしまう恐れがある。一方、電流遮断速度が遅すぎると電極間距離が十分離隔しているものの、パワー半導体が能動領域で動作する時間が長くなるため、パワー半導体が過度な温度上昇で破壊されてしまう。これらはミリ秒以下の現象のため、熱時定数の関係で放熱器などでは解決できない。

そこで、図９に示す回路により電極間距離が十分離隔するまでは半導体が殆ど発熱しない飽和領域で動作させるべくゲート部に追加のトランジスタを用いる。そして電極間距離が十分離隔した後に高速な電流遮断速度で直流電流を遮断する。ここで追加のトランジスタはゲート電圧の制御に用いるため電圧電流ともに数 V、数 mA 程度の極めて定格の低い論理素子でよい。図 10 に電源電圧 300 V で直流電流 80 A を遮断した際の新回路の有無によるパワー半導体の PN 接合部温度上昇の推定シミュレーション結果を示す。同図より提案回路の従来はパワー半導体が熱破壊される PN 接合部温度が 150℃を大幅に超過する 250℃近くまで上昇している。一方、新回路ではそれが 80℃程度まで抑制されており劇的な改善が確認できる。この回路を応用すれば電極間離隔速度の遅い大容量機械接点に対しても発熱の殆どない飽和領域の時間を長く設定することで過度な温度上昇を引き起こさず直流電流の遮断が可能となる。

これらの新回路を実証すべく図 11 に示す基板を設計・製作中である。同図の 3D ビュアーでもわかるように、追加のトランジスタの物理的サイズは極めて小さいことがわかる。今後これらの実証実験やさらなる高電圧・大電流化に向けて実験を行う予定である。

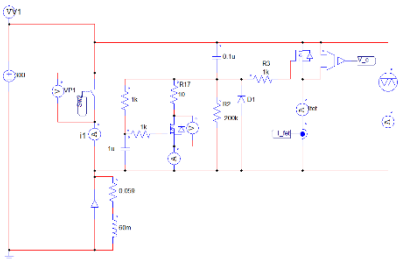


図 9　パワー半導体の発熱限界改善回路

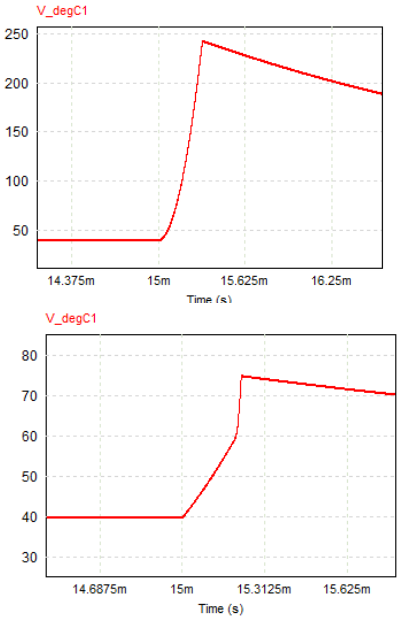


図 10　新回路によるパワー半導体の温度上昇の劇的な改善(上段)従来回路(下段)新回路

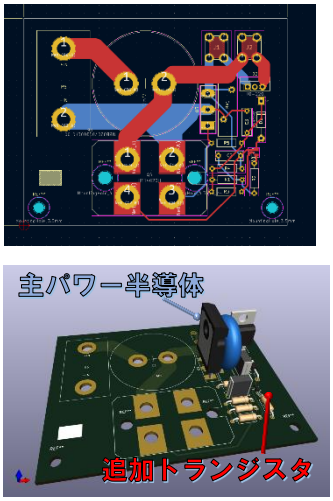


図 11　新回路の設計・製作

6　将来獲得を目指す学内外の競争的資金の種類　（※研究計画書に記載したものを記入すること）

科学研究費助成事業　基盤研究(B)

7　本研究をもとに申請した外部研究資金及びその獲得状況

氏　　名	申請年度	研 究 種 目	研　究　課　題	採・否
川口　卓志、加藤修平	令和 4 年度	NEDO 新エネルギー技術研究開発事業フェーズ B	災害時に安全で高効率な太陽光安全スイッチの開発	否

8　学会発表等

要旨集の抜き刷り，発表原稿のコピー等及び発表したことがわかるものを添付してください。

発表者名	学会，発表会名等	発表テーマ	発表年月
成川、加藤	令和 4 年度電気学会産業応用部門	金属接点とパワー半導体による直流電流スイッチの双方向化	2022.8
石本、加藤	令和 4 年度電気学会産業応用部門	太陽光発電の最大電力点探索のためのキャパシタ短絡・開放回路に関する研究	2022.8
成川、加藤	令和 4 年度生産工学部学術講演会	金属接点とパワー半導体の併用による直流遮断器の寿命評価	2022.12
石本、加藤	令和 4 年度生産工学部学術講演会	太陽光発電システムの最大電力点追従運転の高速化に関する研究	2022.12

9　著書・雑誌論文

著書，雑誌，抜き刷り等を添付してください。コピーの場合は掲載されたことが客観的にわかるものを添付してください。

著者・執筆者	著書名・雑誌名／論文名	巻・号	年月	出版社・発行所

１０　本研究課題に関するその他の発表（新聞，一般雑誌掲載等）

１１　他の研究への発展

本研究の成果は太陽光発電の影対策のみならず広く直流回路の開閉に関わる技術として応用可能なため

・水素製造の電気分解大電流直流回路の開閉
・東日本と西日本の長距離直流送電の高電圧開閉器
・洋上風力発電における本土への直流送電開閉器

などへ非常に大きな波及効果が期待できる。

１２　その他の成果

１３　本研究課題による発明届の提出及び知的財産権の出願・取得状況

名　　称	知的財産の種類	発　明　者 （考案者・創作者）	権　利　者	出願・登録番号	出願年月日	取得年月日

※ホームページ等での公開（☑可・□否）いずれかをチェックしてください。
否の場合は，理由書を別途添付のこと。