

機械接点とパワー半導体を併用したハイブリッドスイッチの温度上昇抑制

日大生産工(院) ○成川 忠 日大生産工 加藤 修平
シグマエナジー 川口 卓志 塩島 大輔

1. まえがき

近年の再生可能エネルギーや持続可能な社会への取り組みに向けて、太陽光発電システムや電気自動車の普及が急速に進んでいる。一例として太陽光発電システムは、直列に接続されたソーラーパネルは高い電圧での発電が可能だが、そのうちの一つのパネルの発電量が低下すると回路全体の発電量も大きく低下するため、最も効率よく発電するためには日陰となっているソーラーパネルの遮断を行い、太陽光が十分当たっているパネルのみで発電を行う必要がある。そのためには素早く直流回路を遮断する必要があるが、これまでの直流電流遮断には様々な問題点が存在した。

機械接点のみを用いた場合での電流遮断では、直流電流は交流電流とは異なり周期的な電流ゼロ点が存在しない。そのため機械接点の単純な開極のみでは開極直後に機械接点の電極間に生じるアークと呼ばれる電流が発生し電流遮断を行うことが難しかった。一方でパワー半導体のスイッチング動作を用いて電流遮断を行う手段も存在するが、機械接点による遮断に比べて導通時の損失が10倍以上大きく、導通時の熱を処理するために冷却装置が必要であり遮断器の大型化が問題となる。

それらの課題を解決するために著者らはパワー半導体素子と機械接点を並列に接続したハイブリッドスイッチと呼ばれるスイッチの研究を行ってきた。

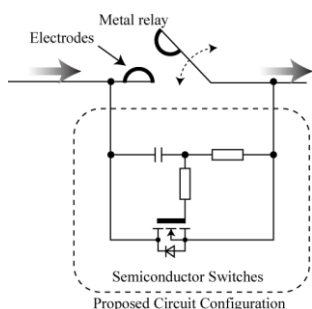


Fig.1 Hybrid switch circuit configuration

2. 提案手法

Fig.1に示すような機械接点と並列にパワー半導体素子(例えばMOS-FETなど)を接続したハイブリッドスイッチは、通常時は抵抗成分の小さな機械接点側に電流が流れている。導通時の損失が大きいパワー半導体素子用の冷却装置を用いないため回路の小型化が可能である。

また、電流遮断はパワー半導体素子を用いて行うため金属接点間にアークが発生せず接点消耗はごくわずかとなる。そのため金属接点の長寿命化、パワー半導体素子による高速遮断などが期待できる。

このようなハイブリッドスイッチの電流遮断の際の動作としては、機械接点が開極するとパワー半導体素子であるMOSFETは約5 V程度のスレッシュホールド電圧 V_{th} でオン状態を維持し、機械接点間にアークは発生せずに電流はパワー半導体素子に転流する。その後機械接点間の空隙が十分確保されたのちにゲートがオフとなり回路に流れる電流は遮断される。パワー半導体の端子間 (= 金属接点端子間) に加わる再起電圧 V_r は式(1)で求められ、電流値に関わらず常に直線的な増加となる。

$$V_r = V_{th} + \frac{V_{th}}{RC * time} \quad (1)$$

V_{th} :スレッシュホールド電圧

V_r :再起電圧

R:ミラー積分回路抵抗

C:ミラー積分回路コンデンサ

time:経過時間

Table.1 Hybrid switch circuit constants

R_1	1000 Ω
R_2	500 Ω
C_1	0.1 μF

Suppression of temperature rise in hybrid switches using both mechanical contacts and power semiconductors

Tadashi NARUKAWA, Shuhei KATO, Takayuki KAWAGUCHI
and Daisuke SHIOJIMA

このようなハイブリッドスイッチ回路が無アークでの直流電流遮断が行えているかを確認するため、ハイブリッドスイッチ回路を結線し、回路に電圧を印加しその際の直流電流遮断時の再起電圧波形および回路電流波形の観測を行った。その際の回路図および回路定数をFig.2、Table.1に示す。また、その際の回路に流れる電流および再起電圧の観測結果をFig.3に示す。

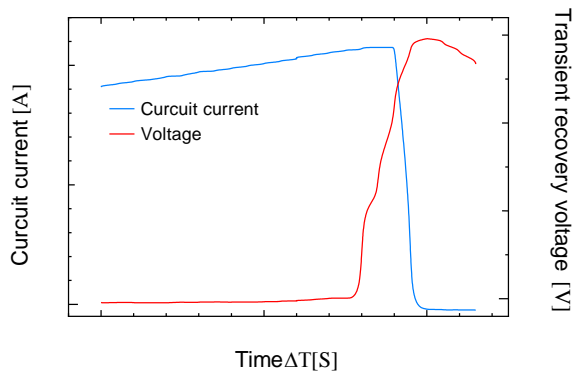


Fig.3 Circuit voltage and current waveforms

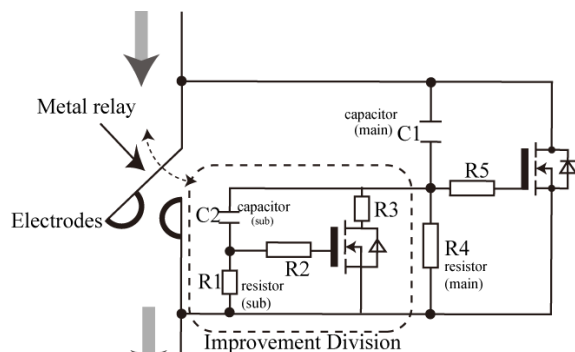


Fig.4 Two-stage hybrid switch circuit

3. ハイブリッドスイッチの改良

今後のハイブリッドスイッチ回路の適用範囲拡大に向けて機械接点の大型化が考えられる。機械接点の大型化すると機械接点の開極時間が増加し、現状の回路よりもさらにMOS-FETに加わる熱に注目する必要があるが、Fig.4のような二段階ハイブリッドスイッチ回路による直流電流遮断であれば、サブ回路のCとRの値を調節すれば簡単に再起電圧の制御が行えるため、リレーの大型化による機械接点の動作時間の増加にも対応が可能である。

このハイブリッドスイッチ回路の改良により、回路素子の総数は増加するが電流遮断の際のパワー半導体素子に加わる再起電圧の傾き

が二段階となり、機械接点开極直後の電圧上昇は改良前のハイブリッドスイッチ回路よりも抑制される。そのため、機械接点の開極直後の接点間に生じるアーク電流は発生せずに電流はパワー半導体素子に転流される。

その後、機械接点間の空隙が十分確保されたのちに再起電圧を急速に上昇させる。これにより、改良前の再起電圧の傾きが小さな回路で長時間かけて電流を遮断するよりもMOS-FET損失を低減することが可能である。

実験では二段階ハイブリッドスイッチによる直流電流遮断が実現できているかどうかを確認するため、直流二段階ハイブリッドスイッチ実験回路に300 V30 Aを印加した際の実験回路の直流電流遮断時の回路に流れる電流および再起電圧の観測を行い、二段階ハイブリッドスイッチ回路の動作の検証を行った。その際の回路に流れる電流および再起電圧をFig.5に示す。Fig.5より300 V30 Aでの無アークでの電流遮断が行えていることがわかる。

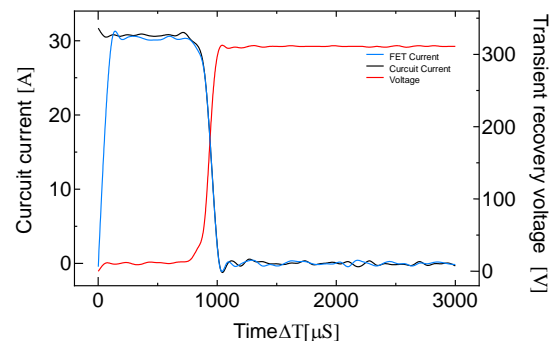


Fig.5 Two-stage hybrid switch circuit waveform

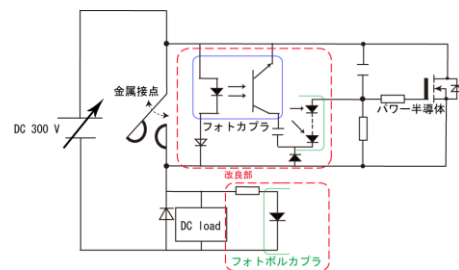


Fig.6 Hybrid switch circuit diagram with photocoupler

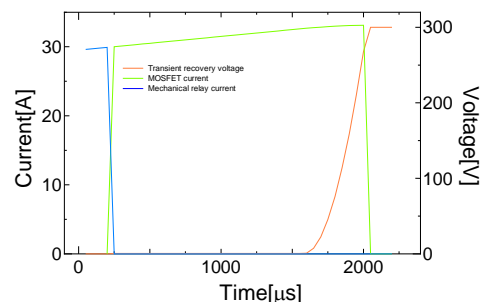


Fig.7 Current and recurrent voltage waveforms flowing in the circuit

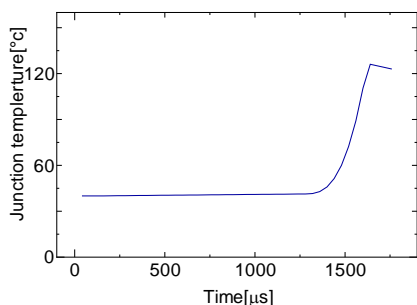


Fig.8 Temperature change of power semiconductor devices during current interruption

4. フォトボルとフォトカプラを用いたハイブリッドスイッチ回路シミュレーション

さらに、この二段階ハイブリッドスイッチ回路を改良し、今までのサブ回路部分をフォトボル及びフォトカプラによる回路に改良することで今までの二段階ハイブリッドスイッチ回路に比べ、さらに、電流遮断時の損失の低減が期待できるため、フォトボル及びフォトカプラを用いたハイブリッドスイッチによる直流電流遮断の際の回路波形をシミュレーションソフトPSIMにより、メインのMOS-FETで発生する熱がハイブリッドスイッチ回路の改良により低減されているか検討を行った。その際の回路図をFig.6に示す。回路に流れる電流および再起電圧をFig.7に示す。また、その際のMOS-FETのジャンクション温度をFig.8に示す。

5. まとめ

今後は金属リレーを油中(絶縁破壊電圧:45kV、JIS C-2101)に沈めることで金属リレーの耐電圧を向上させることが可能であるため、空気中では12V耐圧300Aの金属リレーを利用し油中1000V、300A程度までの帯域に対応させたハイブリッドスイッチの実現を目指す。

また、今回のハイブリッドスイッチ回路の改良により、ハイブリッドスイッチの遮断時間の制御を行うことができた。これにより、広い範囲へのハイブリッドスイッチ回路の応用が可能となる。

今までの金属接点による直流遮断器では開極時の接点間に生じるアークによる油の品質劣化が著しく実用化は難しかったが、ハイブリッドスイッチによる無アーク遮断により油の劣化のない長寿命を実現させた直流遮断器を目指す。

参考文献

- (1) Ryuichi Shimada: “Hybrid DC Switches using the AC-SW”, 電気学会全国大会講演論文集
嶋田隆一: 「交流遮断機を活用したハイブリッド直流遮断器」, パワーエレクトロニクス学会誌, Vol.42, p.53~57 (2017,3)
- (2) Ryuichi Shimada : “Smart switch made by Semiconductor Devices(Hybrid Contactor, Connector)”,
嶋田隆一: 「半導体デバイスによるスマート・スイッチ」, パワーエレクトロニクス学会, 第213回定例研究会, (2016年6月13日)