

可飽和インダクタを用いた高電圧大電流用機械的スイッチシステムの構築と特性評価

○松田 樹也

熊本大学 研究開発戦略本部 技術部門

1. はじめに

現在、高電圧パルスパワーの応用研究が盛んに実施されており、その応用先は、環境・生物・医療・食品・加工・デバイス分野など多岐にわたっている。パルスパワー発生装置に使用される機械的スイッチは、スイッチング時、激しいスパークを伴うアーク放電の発生により様々な問題が生じている。本研究では、機械的スイッチのアーク放電を抑制するために、可飽和インダクタを付加したスイッチシステムを提案し、その有効性を示すことを目的としている。本稿では、その提案システムの構築ならびに得られた実験結果による特性評価について報告する。

2. 研究の背景と目的

機械的スイッチは、他のスイッチ方式に比べて、非常に高い耐電圧、膨大な許容電流、簡素なドライブ方法で駆動可能、構築される電気回路においてハイサイド・ローサイドに関係なく使用可能、比較的安価などの多くのメリットがあり、高電圧大電流用スイッチとして非常に有能なデバイスである。しかしながら、機械的スイッチは、高電圧大電流のスイッチング時において、激しいスパークを伴うアーク放電が発生してしまう（図1）。このアーク放電により、非常に膨大な衝撃音が発生する。また、激しい放電発光を目視することによる眼へのダメージも大きい。また、アーク放電による超高温および衝撃波の発生による電極の消耗が短寿命の原因ともなっている。さらにアーク放電エネルギーは、損失となり、加えてスパークの発生による周囲への膨大な電磁ノイズの放出も大きな問題となっている。



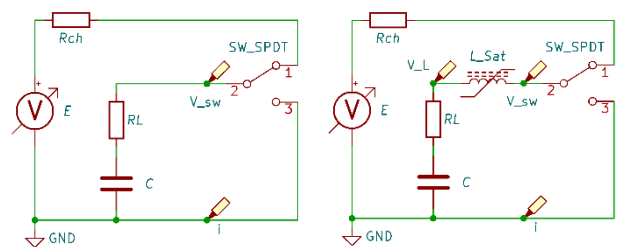
(a) スイッチング前 (b) スイッチング時

図1 スイッチング時のアーク放電。

本研究では、機械的スイッチのスイッチング時に発生するアーク放電を抑制するために、可飽和インダクタを付加したスイッチシステムを提案する。本システムは、インダクタを付与することにより、急峻な電流の立ち上がりを抑制し、電極が接触完了した後の低インピーダンス時に大電流が流れることから、アーク放電空間領域の縮小化またはアーク放電そのものの抑止が見込まれる。アーク放電の抑制により、低衝撃音、スパーク時の減光、電極消耗の低減化による長寿命化、低スイッチング損失、電磁ノイズの低減が期待される。

3. 実験方法

本研究遂行のための検証用回路方式は、キャパシタバンク放電回路を用いた（図2）。高電圧直流電源（ E ）により充電抵抗（ R_{ch} ）および検証用の機械的スイッチ（SW-SPDT）を介し、キャパシタに充電（ C ）する。充電完了後、スイッチをキャパシタの放電側に切り返し、キャパシタのエネルギーを急峻に負荷に転送することによりパルスパワーを出力する。この時の負荷は臨界制動条件を満たす抵抗負荷（ R_L ）とする。付与する可飽和インダクタ（ L_{Sat} ）は、抵抗負荷と直列に接続する。各回路の素子の条件は、表1に示す。



(a) 従来回路

(b) 提案回路

図2 検証回路の回路図

従来回路方式（可飽和インダクタのない回路）と提案回路方式における、スイッチング時の衝撃音響強度を測定し比較検証を実施した。また、スイッチング時のスイッチの印加電圧ならびに流れる電流の特性を取得することで、従来の機械的スイッチ単体のスイッチング損失と提案回路の可飽和インダクタ

も含めたスイッチング損失を算出し比較検証する。

表 1 各回路素子条件

項目	記号	値・条件
直流電源	E	0 – 40 kV
充電抵抗	R_{ch}	2.0 M Ω
負荷抵抗	R_L	3.9 Ω
キャパシタ	C	1.6 μ F / 40 kV
インダクタ	L_{Sat}	ファインメット、巻数 5

4. 衝撃音響強度

充電電圧に対する衝撃音の音圧レベルの特性を、可飽和インダクタの有無について比較した実験結果を図 3 に示す。充電電圧が高くなるほど、音圧レベルが大きくなっている。スイッチング時のスパークのエネルギーも大きくなるため、音圧レベルも上昇する。また、可飽和インダクタを付与したスイッチが、付与していないスイッチの音圧レベルより低い値になったことが分かる。これにより、スイッチング時のアーク放電のエネルギーを低下することが可能となったと言える。

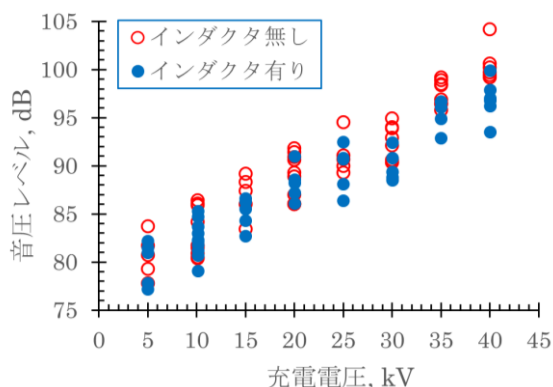
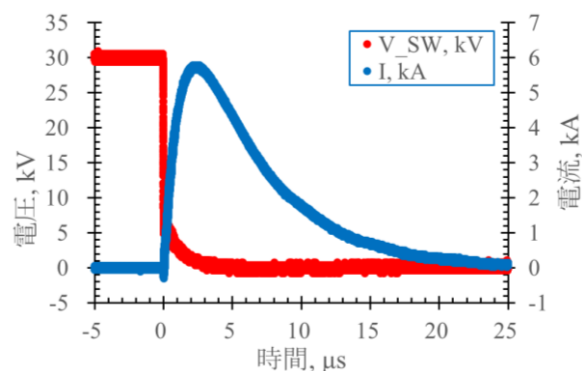


図 3 可飽和インダクタの有無における充電電圧に対する音圧レベル特性

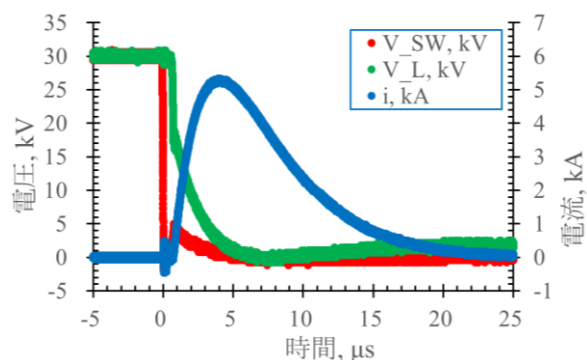
5. 電圧電流波形およびスイッチング損失

可飽和インダクタの有無におけるスイッチの電圧 (V_{SW}) およびインダクタを含むスイッチシステムの電圧 (V_L) ならびに電流 (i) の波形を図 4 に示す。これらの波形より、可飽和インダクタを付加したことにより機械的スイッチの電流において、スイッチの電圧がゼロに達し、約 1 μ s 遅れた後に電流が流れていることが確認できる。このゼロ電圧ソフトスイッチングにより、スイッチング時の音圧レベルの低下が、可能となったと考える。この時のスイッチング損失を算出すると、インダクタ無しでは 28.2 J であったのに対し、インダクタ有りでは 98.0 J となった。このことからスイッチング損失では、イン

ダクタによるエネルギー損失の方が、影響が大きい結果となった。



(a) インダクタ無し



(b) インダクタ有り

図 4 機械的スイッチの電圧電流波形

6. スwitching時のスパーク画像比較

スイッチング時のスパーク画像をカメラで撮影し、輝度値の発光領域内での総和を算出した。充電電圧に対する総和輝度値を図 5 に示す。このグラフより、充電電圧 25 kV までは、可飽和インダクタにより、輝度が抑制されていることが分かる。しかし、30 kV 以上の電圧では、輝度の抑制が低減している結果となった。これは、電圧が上昇することにより、電流遅延時間が短縮され、機械的スイッチのターンオン時間に十分間に合うことができず、電極間の距離が長

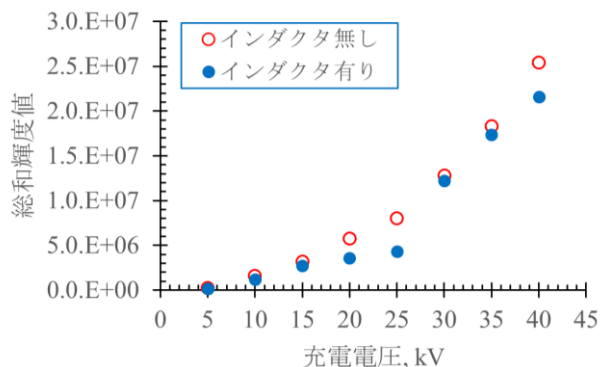


図 5 充電電圧に対する総和輝度値

い状態でアーク放電が形成されるため、スパーク時の発光の抑制が困難であったと考察する。

7. まとめ

本研究では、機械的スイッチのアーク放電を抑制するために、可飽和インダクタを付加したスイッチシステムを提案し、その提案システムの構築ならびに得られた実験結果による特性評価を実施した。スパーク時の衝撃音の音圧レベルは、可飽和インダクタの付加により抑制することを可能とした。しかし、スイッチング損失は、インダクタのエネルギー損失が大きいことから、改善には至らなかった。さらにスイッチング時のスパークによる発光強度は、インダクタによる減光が実証できた。しかし減光には、十分な電流の遅延時間が必要となり、電圧が高くなるとその時間が短縮され、減光効果が低減していくことが分かった。

8. 謝辞

本研究の遂行にあたり、熊本大学産業ナノマテリアルの浪平准教授および王准教授には、高電圧電源などの実験回路装置および高電圧大電流計測機器などの利用、ならびに研究遂行のための助言等を賜り、心より感謝の意をここに表明する。また、本研究は、令和7年度科学研究費助成事業(科学研究費補助金)奨励研究「研究課題名：可飽和インダクタを用いた高電圧大電流用機械的スイッチシステムの構築と特性評価、課題番号：25H00193」の採択における助成により、遂行した。