

2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	筑波大学 数理物質系
職位または役職	助教
氏名	万年 智介

1. 研究題目

機電一体型モータの小型化を可能とするインバータ損失を活用した制御法の電圧サージ低減

2. 研究目的

本研究の目的は、モータ駆動用インバータ内部の電力損失を利用した、機電一体型モータ駆動システムの小型化・低コスト化技術の開発である。近年、高温動作が可能な SiC パワーデバイスの普及に伴い、インバータをモータに組み込む機電一体型モータの研究が進められている。機電一体型モータにおいて、インバータはモータの直近に配置されるため、小型かつ高温動作が要求される。このため、インバータの平滑コンデンサは、高温動作が可能なフィルムコンデンサを適用し、かつ小容量として小型化した構成をとる。

インバータを交流電源に接続すると、平滑コンデンサを 0 から充電するため、突入電流が生じる。一般のインバータでは、突入電流によるパワーデバイスの損傷を防ぐために、コンデンサの初期充電を行うスタートアップ回路が必要となる。この一方で、機電一体型インバータのような小容量のコンデンサを適用したシステムでは、突入電流が小さくなるため、パワーデバイスの過電流損傷は防止できる。しかし、電源側のフィルタインダクタとの共振によって、電源電圧の 2 倍までコンデンサが充電される。これによって、必要以上に高耐圧なコンデンサを適用する必要がある。いずれの場合も、交流電源投入時の過渡現象による損傷防止のために、体積増加を招く。さらに、インバータ効率の向上等によって、主回路や冷却器が小型化できても、体積増加分はインバータの電力容量によって決まるため、小型化・低コスト化へ

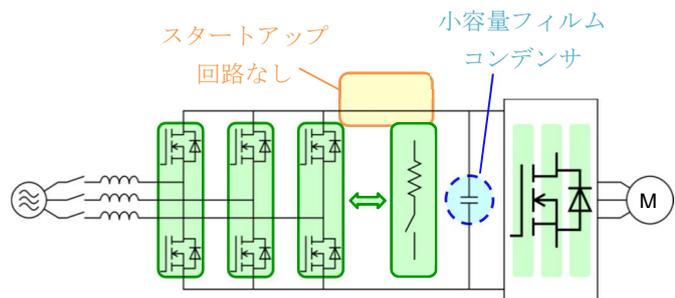


Fig. 1 本研究のモータ駆動用スタートアップ回路レスインバータ

のボトルネックとなる。

本研究では、機電一体型モータを想定したインバータに対して、交流電源投入時の平滑コンデンサ過電圧のみを抑制し、コンデンサの耐圧を増やすことなく、インバータのスタートアップ回路を不要とできる制御手法を開発する。これまでに、インバータのパワーデバイスを用いて平滑コンデンサを数 μs の間短絡・放電することにより過電圧を抑制する制御法を提案し、その有用性を確認した。しかし、この手法は短絡時のデバイス電流が定格の4倍以上となるため、回路の寄生インダクタンス等に起因した電圧サージが顕著となる。

これに対して本研究では、平滑コンデンサ過電圧抑制法において電圧サージをほぼ0とできる制御法を提案し、実機検証を行う。提案法は、過電圧抑制時の電磁ノイズ抑制と素子耐圧マージン低減を可能とする。その結果、機電一体型モータのさらなる小型化・低コスト化を実現することを目的とする。

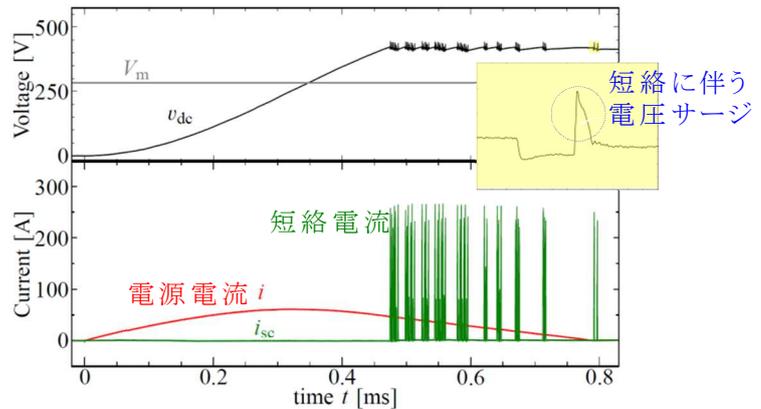


Fig. 2 過電圧信号絶縁方式の電圧検出を用いた過電圧抑制の実験波形

3. 研究内容及び成果

提案法は、コンデンサ電圧が設定値を超えたとき、電源から供給される電力のすべてを過不足なくインバータ内部で消費する。これにより、コンデンサに流れ込む電流は零で一定となるため、過充電とサージ電圧の抑制が両立可能となる。

提案法の開発に向けて、以下の2項目に分けて検討した。

(a) インバータのゲート電圧制限による短絡電流制御法

パワーデバイスの短絡電流はゲート印加電圧によって変化する。ゲート電圧を低下させることによって、短絡電流も減少することを確認した。また、Fig. 3のように、適切なゲート電圧を与えることによって、短絡電流を制御できることも確認した。しかし、短絡電流と電源電流が一致するように直接制御するためには、短絡電流を検出するための高速電流センサが追加が必要となる。また、センサを用いた電流フィードバック制御を適用すると、電流が0に収束せず、充電が完了しない問題を生じた。

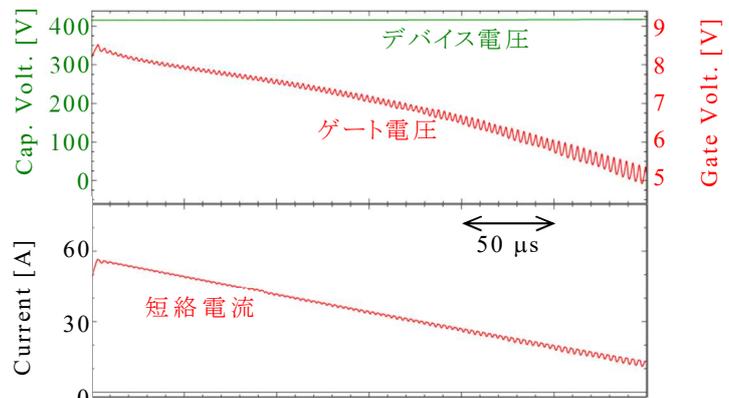


Fig. 3 ゲート電圧と短絡電流の関係

(b) 平滑コンデンサ電圧一定制御法

このため、本研究では、直流コンデンサ電圧が一定となるようにゲート電圧を調整し、短絡電流を制御する。このとき、コンデンサ電流が0となるため、電源電流すべてがパワーデバイスに流れこむ。ここでは、1つのパワーデバイスに印加される電圧が直流コンデンサ電圧の設定値以下となるよう制御することにより、直流コンデンサ電圧一定を実現する。

Fig. 4に1レグのみ短絡動作させる場合、Fig. 5に2レグを同時に短絡させる場合のシミュレーション波形を示す。1レグのみの場合、コンデンサ電圧が設定値の420Vに達すると短絡電流と電源電流が一致し、過電圧を抑制できた。一方、2レグ同時短絡の場合、過電圧は抑制できているが、短絡電流およびコンデンサ電圧にオーバーシュートが発生した。

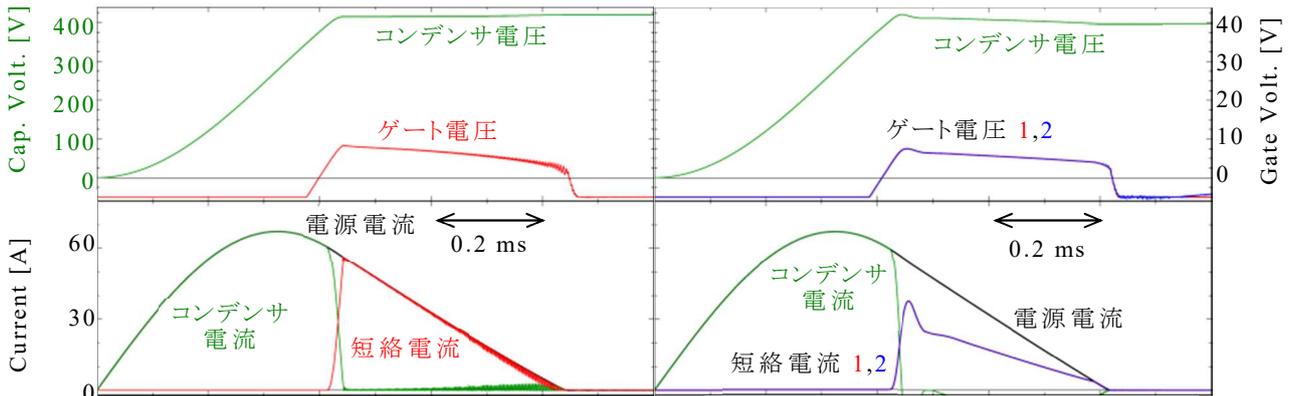


Fig. 4 1レグ短絡による電圧制御

Fig. 5 2レグ同時短絡による電圧制御

Fig. 6 に 1レグごとに短絡動作させる場合のシミュレーション波形を示す。短絡電流波形の立ち上がりには、ある時間を要する。これに対して、レグ切り替えのタイミングを調整し、2レグが同時に短絡動作をするオーバーラップ時間を挿入することにより、オーバーシュートすることなく過電圧の抑制が可能であることを明らかにした

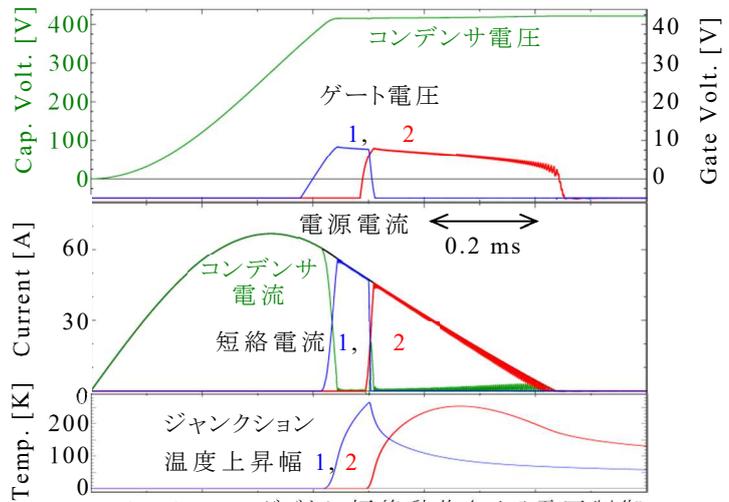


Fig. 6 1レグごとに短絡動作させる電圧制御

4. 今後の研究の見通し

1つのパワーデバイスに印加される電圧を一定にフィードバック制御する場合、原理的に2つのパワーデバイスのみで短絡動作をすることになる。このため、コンデンサ電圧一定としない従来の手法と比べて、デバイス1つ当たりの温度上昇が大きくなるという課題が残る。今後は、各デバイスの温度上昇を抑制する手法の検討が必要である。また、本提案の実験検証も併せて実施する必要がある。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読付)

IEEE Transactions へ投稿準備中