

論文の内容の要旨

専攻名 システム創成工学専攻

氏名 森 雄生

(2,000字程度とし、1行43文字で記入)

鉄道車両用補助電源装置 (Auxiliary Power Supply (APS) または Static Inverter (SIV)) には、架線からの直流電力を三相交流電力に変換するインバータと直流側・交流側のLCフィルタ、絶縁用の変圧器による直接変換・商用周波絶縁方式と呼ばれる構成が現在主に用いられている。直接変換方式は回路構成がシンプルであるが、スイッチング素子に直流フィルタを通して架線電圧が直接印加されることから、架線電圧変動の最大値を考慮した高耐圧素子の使用が必須である。高耐圧素子は一般的に低耐圧素子と比べて損失が大きい傾向にあるため、冷却器の大型化につながるほか、スイッチング周波数も高く取れないという欠点がある。

そこで、架線電圧をスイッチング素子に印加させないことが求められる。従来は、インバータと直流フィルタの間に各種チョッパを挿入し、架線電圧変動を負担することにより、インバータに印加される電圧を一定とする手法が用いられてきた。しかし、インバータの素子に架線電圧が印加されなくなるものの、チョッパの素子に架線電圧が印加される欠点は残る。

また、現行のAPSではインバータの後段に変圧器を設ける構成となっており、商用周波数が変圧器に印加されることから、体積・質量が増大するといった課題がある。一般に、変圧器は使用周波数が高いほど小型・軽量化できるため、高周波インバータと整流器と組み合わせた高周波絶縁形DC-DCコンバータを用いる手法が従来から検討されてきた。特に近年では、DC-DCコンバータの素子に印加される電圧を低減した上で低耐圧素子を適用している。低耐圧素子の高周波動作を生かすことにより、変圧器の小型化を図ると同時に、SiCデバイスを適用することで低損失化も実現している。

申請者は、上記の問題点を解決するために新しいAPS (以下、提案APSとする。) を提案した。まず、第一点の素子耐圧の問題に対し、素子耐圧を架線電圧ではなく変換器の出力電圧に依存させ、架線に直接接続されている変換器においても低耐圧素子を適用可能な直並列連続切替チョッパ (以下、直並列チョッパとする。) を提案した。さらに、商用周波数変圧器の使用による体積・質量の増加に対する解決法として、インバータを提案チョッパの後段に接続して高周波絶縁とすること構成を提案している。また、高い架線電圧への適用を考慮したフライングキャパシタによるマルチレベル化の検討を行った。本論文は6章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、APSで従来から使用されている構成と、近年研究・開発が進められている各種構成についてまとめ、従来用いられてきた直接変換・商用周波絶縁方式に比べ、入力チョッパ・高

周波絶縁方式の優位性について述べる。

第3章では本論文で提案する直並列連続切替チョップパについての基礎検討を行った。まず、直並列チョップパの回路構成を説明し、動作モードの解析およびシミュレーションを行い、回路の基本特性を明らかにした。次に、出力電圧制御系の検討を行い、入力電圧変動に対して出力電圧を一定とする手法として、入力電圧フィードフォワードによる制御系を提案した。それらの基本特性および出力電圧制御系をミニモデルによる実機試験により確認し、提案制御系が有効であることを示した。さらに、APSで想定される定電力負荷に対し、入力電圧・出力負荷容量の過渡応答について検討を行い、入力電圧フィードフォワードのみでは振動が抑制できないことを確認した。その対策として、インダクタ電流の高調波成分をフィードバックする振動抑制制御を適用することで、過渡変動時においても出力電圧・インダクタ電流が発散しないこと、指令値通りの出力電圧が得られることを検証した。最後に、2つの出力において不平衡となる条件のうち、出力電圧指令と負荷容量が不平衡となる場合について検討し、出力電圧指令については通流率指令を算出する式を変更することで、負荷容量不平衡については特段の考慮なく動作できることをシミュレーションにより確認した。

第4章では、直並列チョップパを適用した高周波絶縁APSの実規模実験検証を行った。まず、提案APSの実規模回路構成について説明し、低床型路面電車を想定した100kVAの実機を製作して定常状態において基礎検討通りの動作となっていることを確認した。さらに、回路損失と効率を測定し最高で96.6%の効率を得て、かつ入力電圧変動に対しても効率の変動は0.5%以内となることを確認した。

第5章では、より高電圧の架線への適用を考慮した、フライングキャパシタ方式を用いたマルチレベル化について検討した。まず、フライングキャパシタ方式を適用した場合の回路構成を示し、動作モードと入力電流・リアクトル電流のリプル振幅について理論式による検討を行った。次に、ミニモデルによる実機試験を行い、入力電圧フィードフォワード制御を適用することにより、2レベルの直並列チョップパと同様に出力電圧が制御できることと、各入力電圧に対してもフライングキャパシタ電圧を一定に保つことができること、インダクタ電流の平均値と電流リプル振幅が理論・シミュレーション通りであることを確認した。さらに、各レグの搬送波に位相差を設けることで、2レベルで搬送波が同相である場合と比べて、インダクタ電流リプル振幅の最大値は1/4、入力電流は1/16となることを理論式とシミュレーションにより確認した。

第6章の結論で、本研究をまとめている。