

岩路寛康* 高橋慶多*
 近藤亮太*
 高原貴昭*

小型・高効率変換回路技術

Conversion Circuit Technology for High Efficiency and Downsizing

Hiroyasu Iwabuki, Ryota Kondo, Takaaki Takahara, Keita Takahashi

要旨

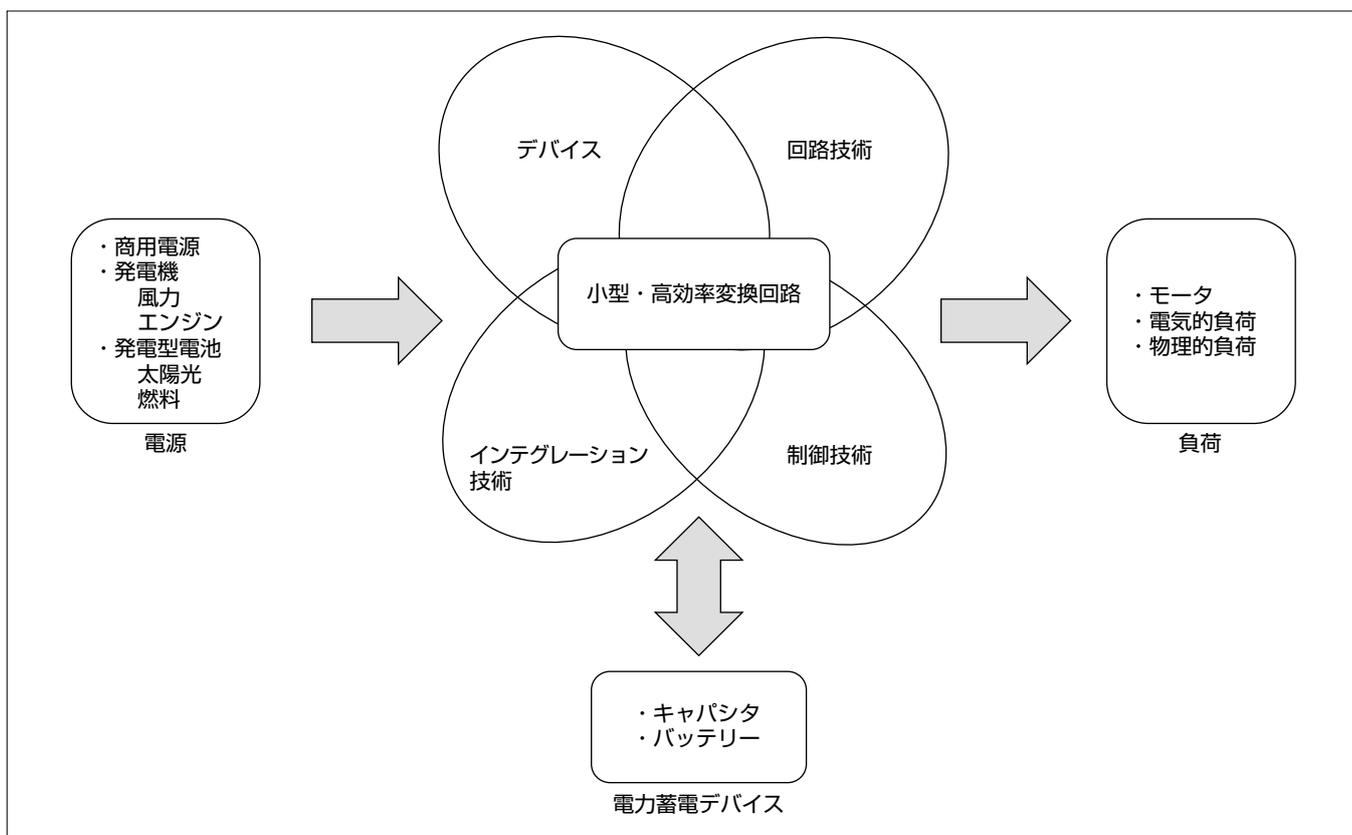
近年、地球温暖化対策としてCO₂の削減が重要視されている。一方、生活水準向上による電気機器利用の拡大や、コンピュータと通信などの高度情報化社会の進展によって電力需要が急増している。そこで、環境問題やエネルギー問題解決のために小型・高効率な変換回路が注目され、部品や材料技術の進歩、アプリケーションのニーズに呼応して、デバイス、回路技術、制御技術、及びインテグレーション技術が発展してきた。電化製品の高性能化要求、自動車の電動化進展、及び蓄電デバイスの進歩などによって、これらコア技術を結集した小型・高効率変換回路への期待が今後ますます大きくなる。

このため三菱電機では、新回路トポロジー、新デバイス、

及び新制御方式等を適用した小型・高効率変換回路技術の開発を行っている。

独自の階調制御方式を応用したAC/DCコンバータと、SiC(シリコンカーバイド)デバイスやソフトスイッチング技術を適用したDC/DCコンバータの高効率変換回路技術を開発した。また変換回路の小型・高効率性能と低ノイズ性能を両立させるため、有限要素法の電磁界解析モデルを用いた低ノイズ設計技術を開発した。さらにシステム視点で、複数の変換器システムでの電力フローの高効率化を目指した回路統合化によるマルチポート回路技術を開発した。

今後、これらの開発成果を更に進展させ、より一層の小型・高効率変換回路の実現を目指していく。



小型・高効率変換回路の役割とコア技術

小型・高効率変換回路は、デバイス、回路技術、制御技術、及びインテグレーション技術の4つのコア技術の組合せで実現される。電源となる商用電源、発電機、及び発電型電池等の出力から、負荷であるモータや電気・物理的負荷に、最適な電力を高効率に供給するよう設計される。電源、負荷、電力蓄電デバイス間の自由な電力のやり取りを可能にするもので、機器の進歩に合わせて適用分野の拡大や性能向上が進展している。

1. ま え が き

産業・民生・自動車用機器では、一層の省エネルギー要求と設置スペースの制限から、変換回路の小型・高効率化が求められている。

本稿では、小型・高効率進化を支える高効率変換回路技術と低ノイズ設計技術、システム視点で複数電源の電力フローを最適化したマルチポート回路技術について述べる。

2. 高効率変換回路技術

2.1 AC/DCコンバータ高効率変換回路技術

これまで当社独自の階調制御方式AC/DCコンバータを提案し、電気自動車バッテリー充電器に適用して高効率な充電動作を実証した⁽¹⁾。階調制御はスイッチング電圧・周波数を低減し、かつ高性能な低耐圧素子を活用することで、高効率化を実現する。

2.1.1 高昇圧比動作での高効率変換回路技術⁽²⁾

交流入力電圧のワールドワイド対応(85~260V)化が要求されるが、従来方式⁽¹⁾では高昇圧比動作条件である交流入力電圧100Vでの高効率化が課題であった。そこで、**図1**に示す倍電圧整流動作を適用した階調制御方式AC/DCコンバータを提案した。従来回路に新たに倍電圧スイッチを追加し、交流入力電圧100V時に倍電圧整流動作を行う。この倍電圧整流動作によって、サブコンバータ(単相インバータ)の直流電圧とPFC(Power Factor Correction)リアクトルへの印加電圧を50%低減し、また短絡スイッチの通流期間を短縮できる。従来方式と比べて、倍電圧スイッチの損失が新たに14W発生するが、短絡スイッチの導通損失9W、サブコンバータのスイッチング損失4W、及び電流制御用リアクトルの鉄損5Wを低減し、合計損失が4W低減される。**図2**に効率実測結果を示す。倍電圧整流動作によって、100V(1.5kW)時の効率は0.4ポイント向上し、倍電圧整流動作を適用した交流入力電圧85~120Vの範囲で高効率化を実現した。

2.1.2 簡素階調制御方式AC/DCコンバータ

階調制御の高効率性を保ちながら、更なる回路の簡素・小型化を実現するため、簡素階調制御方式AC/DCコンバータを提案した⁽³⁾。**図3**に回路構成を示す。サブコンバータと短絡スイッチの統合回路構成によって、従来方式⁽¹⁾と比較して能動半導体を55%低減した。また、実機検証(交流入力電圧200V、電力3.0kW)で最高効率96.5%を達成した。

2.2 DC/DCコンバータ高効率変換回路技術

システム全体の省エネルギーと搭載性向上のため、異なる直流バス間の電圧を変換するDC/DCコンバータには、より一層の小型・高効率化が要求される。

2.2.1 SiCを活用した小型・高効率技術⁽⁴⁾

図4に、車両走行用蓄電池の直流電圧をモータ駆動用イ

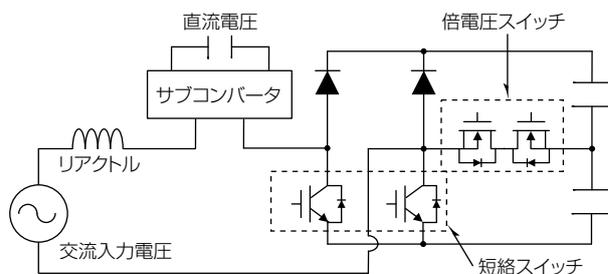


図1. 倍電圧階調制御方式AC/DCコンバータ

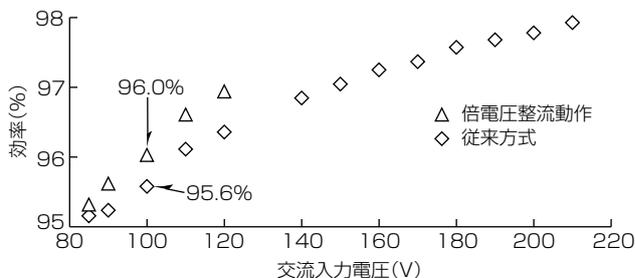


図2. 倍電圧階調制御方式効率の改善効果

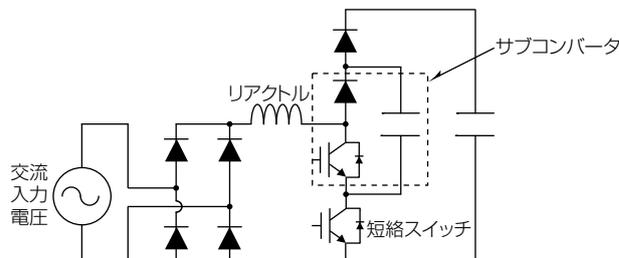


図3. 簡素階調制御方式AC/DCコンバータ

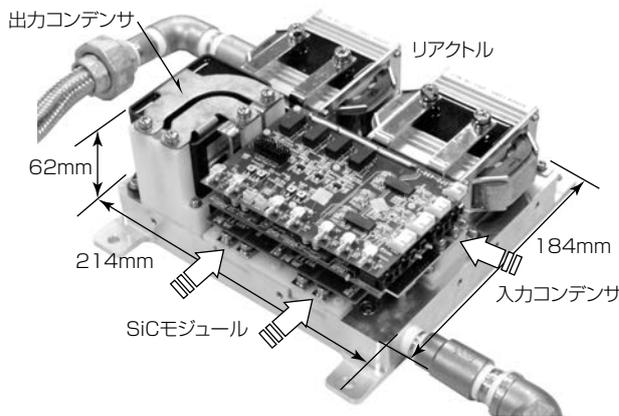


図4. SiC搭載昇圧DC/DCコンバータ

ンバータの直流母線電圧まで昇圧するSiC搭載昇圧DC/DCコンバータを示す。SiC-MOSFETモジュールを採用し、Si(シリコン)を用いた従来比の3倍となる50kHzで駆動させた。さらに**図5**に示す2相インターリーブDC/DC回路を採用することで、体積占有率の高いリアクトルと入出力コンデンサの必要容量を低減し、パワー密度22.1kW/L(体積2.44Lかつ水温60℃での連続定格電力54kWの条件)を達成した。

図6に損失低減効果を示す。従来のSi-IGBT(Insulated-Gate Bipolar Transistor)を用いた場合の損失を100で規格化している。SiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor

Field-Effect Transistor)の採用によって、スイッチング損失51%低減、導通損失58%低減、ダイオード導通損失94%減となった。磁性部品の損失は、低容量化と小型化による鉄損低減効果で38%低減した。その結果、総合損失は53.6%の低減効果を得た。

2.2.2 ソフトスイッチング技術⁽⁵⁾

直流48V/12V間の降圧電源向けに、降圧チョッパに共振用のリアクトルとコンデンサとダイオードを追加したソフトスイッチング技術を開発した。

図7に回路方式を示す。L₂による共振動作を活用してC₁とC₂間で電荷を移行し、S₁とS₂のソフトスイッチングを実現している。S₁のターンオン時には、L₂によってC₁の積電荷をC₂に移行する。この際に、S₁ターンオン電流とS₂のターンオフ電流は0Aから共振電流の傾きに従って緩やかに増減し、S₁のターンオン電圧とS₂のターンオフ電圧はC₁とC₂

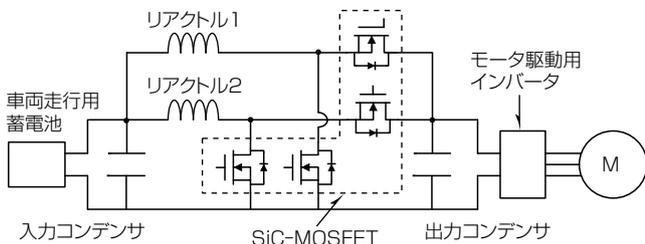


図5. 2相インターリーブDC/DC回路

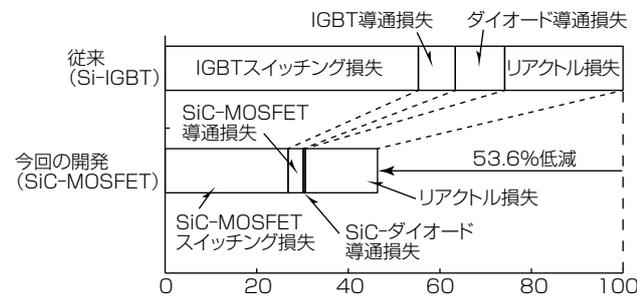


図6. 損失低減効果

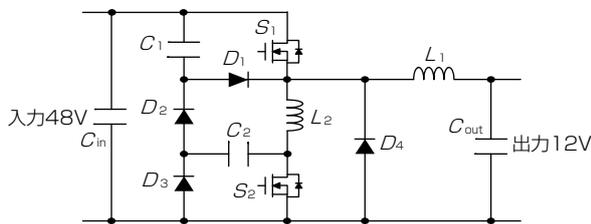


図7. ソフトスイッチング非絶縁降圧DC/DCコンバータ

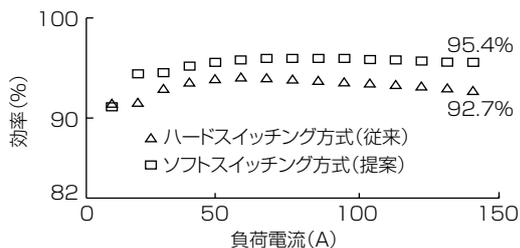


図8. 効率実測結果

の共振電圧の傾きに従って緩やかに増減するため、ソフトスイッチングが成立する。S₁のターンオフ時には、L₂によってC₂の蓄積電荷をC₁に移行する。C₁のターンオフ電圧は、共振電圧の傾きに従って0Vから緩やかに立ち上がることでソフトスイッチングが成立する。S₂はC₂の電荷が全て放電してS₂の寄生ダイオードが導通した後にS₂がターンオンすることでソフトスイッチングが成立する。

図8に実機検証による効率実測結果を示す。定格12V, 150A出力時で、従来のハードスイッチング方式の効率92.7%に対し、ソフトスイッチング方式では効率95.4%となり、2.7ポイントの効率向上効果を実証した。

3. 低ノイズ設計技術

小型・高効率変換回路を実現するため、SiCやGaNなどの新デバイスを用いて高速スイッチングを行うと電磁ノイズ発生量が増大することが知られており、製品の低ノイズ性能を大きく左右するノイズフィルタ設計の重要性が増している。しかし、変換回路を小型化するためにはこれまでよりも高密度な実装が不可欠になるため、部品間の空間をノイズが伝搬する電磁結合現象によってノイズフィルタの性能が低下してしまう問題がある。

そこで小型・高効率性能と低ノイズ性能を両立させるため、有限要素法の電磁界解析モデルを用いることで電磁結合のメカニズムを明らかにし、電磁結合を抑制するシールドの最適化を実施した⁽⁶⁾。図9にノイズフィルタの電磁界解析モデルを示す。ノイズフィルタはコイル、コンデンサ部品で構成されており、部品同士を電氣的に接続するバスバー等の構造部材を含め全てモデル化した。

プリント基板状の電磁界印加コイルを用いてノイズフィルタに電磁界を印加した際に、ノイズフィルタに伝搬する電磁結合量を解析によって求め、実測値と比較したところ図10に示す結果が得られた。ノイズフィルタのシールドなし、アルミ板金でノイズフィルタ出力端子側を半分シールド、全シールドの3通りで比較したところ、シールドの適用によって20dB以上電磁結合を低減できることが分かった。さらに、全てシールドした場合と半分シールドし

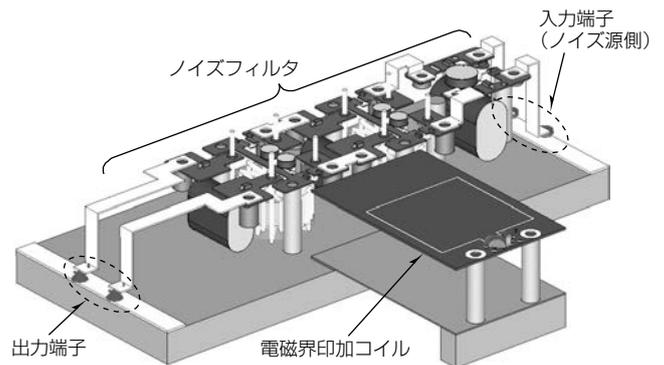


図9. ノイズフィルタの電磁界解析モデル

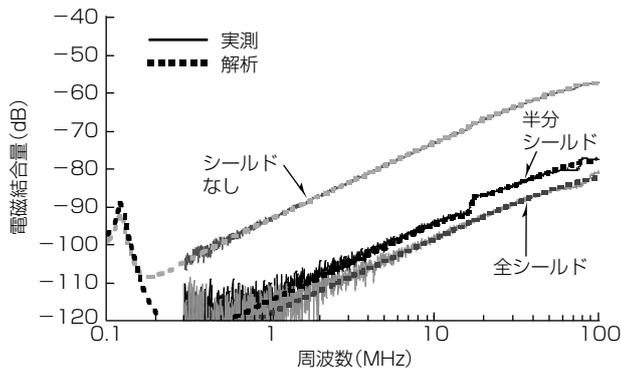


図10. ノイズフィルタの電磁結合量解析結果

た場合の差は5 dB程度と小さく、電磁結合はノイズフィルタ出力端子側で起きていることが分かった。解析値は実測値とよく一致しており、この電磁界解析の適用によって試作前のシールド設計最適化が可能となった。

4. マルチポート回路技術

変換回路単体の小型・高効率化に加え、複数の電源で構成されるシステムで、電力フローの効率化を実現するマルチポート回路技術を開発した⁽⁷⁾。

図11(a)に系統、バッテリー、低電圧負荷、及び高電圧負荷が接続された従来の複数電源系システムのブロック図を示す。従来のシステムでは、系統とバッテリーの間にAC/DCコンバータと絶縁型DC/DCコンバータが接続され、バッテリーと高電圧負荷及び低電圧負荷との間にもそれぞれ絶縁型DC/DCコンバータが接続される。

図11(b)に提案するマルチポートコンバータを用いて構成した場合のブロック図を示す。AC/DCコンバータの出力とバッテリー、低電圧負荷、及び高電圧負荷が絶縁トランスを持つマルチポートコンバータに接続される。マルチポートコンバータの1つの絶縁トランスで各ポート間を絶縁することによって、図11(a)のような一般的な多入力多出力システムと比較して、システムを構成するコンバータと絶縁トランスを削減できる。その結果、複数電源システムの電力フローの効率化が可能となる。

図12に開発した絶縁型マルチポートコンバータの回路構成を示す。5つの巻線と1つのコアで構成される多巻線トランスを持ち、各巻線は系統、バッテリー、低電圧負荷及び高電圧負荷に接続された変換器に接続される。多巻線トランスの系統側とバッテリー側に接続したフルブリッジインバータの電圧出力位相と時比率を制御することで、従来のシステムと同様に、系統とバッテリーから低電圧負荷と高電圧負荷に同時に電力を供給する電力フローを実現した。

5. むすび

変換回路の小型・高効率技術と低ノイズ設計技術、システム視点で複数電源の電力フローを最適化したマルチポ

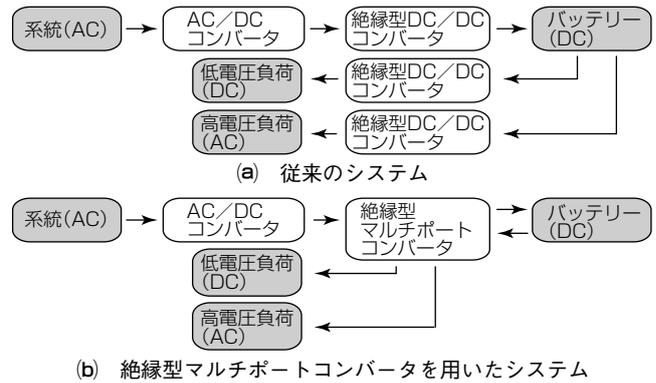


図11. 複数電源系システムのブロック図

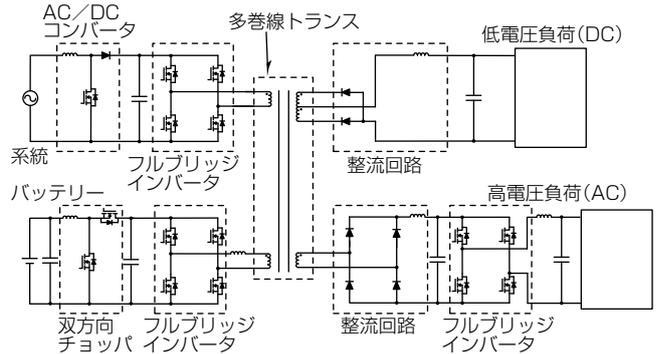


図12. 絶縁型マルチポートコンバータの回路構成

ト回路技術について述べた。小型・高効率変換回路技術は、21世紀の循環型社会を支える省エネルギー化の中心に位置する。今後も、部品・材料技術の進歩やアプリケーションのニーズに呼応しながら、より一層の進化に貢献していく。

参考文献

- (1) 金山隆志, ほか: 階調制御方式による車載充電器向け高効率絶縁AC/DCコンバータ, 三菱電機技報, **87**, No.8, 447~451 (2013)
- (2) 近藤亮太, ほか: 倍電圧整流動作を適用した階調制御方式高力率AC/DCコンバータの開発, 平成25年電気学会全国大会論文集, 4-081, 140~141 (2013)
- (3) 車載充電器向け大電力AC/DC変換器, 三菱電機技報, **89**, No.1, 41 (2015)
- (4) 北村達也, ほか: SiCを用いた高パワー密度インターリーブ型DC/DCコンバータの開発, 電気学会論文誌D, **134**, No.11, 956~961 (2014)
- (5) 植中麻衣, ほか: 高周波非絶縁ソフトスイッチングDC/DCコンバータの開発, 平成27年電気学会産業応用部門大会, 1-83 (2015)
- (6) 高橋慶多, ほか: 電磁界解析によるパワエレ機器向けEMIフィルタのシールド最適設計の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, **116**, No.327, 25~29 (2016)
- (7) 高原貴昭, ほか: 直流/交流ポートを有する絶縁型マルチポートコンバータの開発, 電気学会論文誌D, **136**, No.6, 410~417 (2016)