

論文の内容の要旨

論文題目 新しい部分共振回路方式を適用した制御の簡単な高効率
ソフトスイッチングインバータに関する研究
氏 名 石川 裕記

電力変換回路の技術的な課題として、高効率化、小型軽量化、変換電力の高品質化、電磁ノイズの抑制などが挙げられる。

これらの課題を解決する手段のひとつとしてソフトスイッチング化が有望視されている。ソフトスイッチング（以下、SS）は、主として、リアクトルとコンデンサの共振現象を利用してパワー半導体デバイス（以下、SW 素子）の状態量、つまり電流または電圧、あるいは両方をゼロにし、その時点でオンまたはオフする技術である。この技術を適用した電力変換回路は、

- (1) スwitching時には、原理的に SW 素子の電流と電圧の少なくとも一方がゼロであるため、スイッチング損失の低減、冷却装置の小型化が可能である。
 - (2) スwitching周波数を高くしてもスイッチング損失が増加しないため、効率が低下することなく、高周波スイッチングによる変換電力の高品質化が可能である。
 - (3) スwitching時の SW 素子の電圧もしくは電流あるいはその両方の波形成形は、リアクトルとコンデンサの共振現象を利用するため、SW 素子の状態量に MHz オーダーの高い周波数成分を含まないように設計でき、電磁ノイズの抑制が可能である。
- という特長を持ち、世界的に多くの研究がなされている。

上記の特長がある反面、従来の多くの SS 回路は、以下の問題点がある。

- ① SW 素子の状態量がゼロとなる時点を検出して SS を実現するため、電流センサや電圧センサなどの検出回路が必要である。
- ② 共振動作をスイッチングのタイミングに合わせるための予備動作が必要である。この

動作が回路構成によっては、出力の状態量に依存していたり、その制御信号がスイッチングパターンに対し独立であったりするため、制御が複雑になる。

③ 共振回路での損失により、かえって効率が低下する場合がある。

本論文では上記①～③の問題点を解決する、新しいソフトスイッチングインバータ（以下、SS-INV）を提案する。本論文の SS-INV は SW 素子の状態量検出を必要としない。出力の PWM パターンに同期させた制御信号により共振回路の制御を行う方式を考案・適用し、制御の簡潔化を実現できた。

本論文において、電圧形・電流形のそれぞれのインバータに対し、上記特長を有する新しい部分共振回路を用いた SS-INV を提案し、SS 動作を含めた回路動作を理論解析により明らかにした。理論解析に基づいて、出力制御方式、回路素子定数の設計法を確立した。実験によりその動作を検証し、理論設計の有効性を明らかにした。効率についても、本論文で提案するいずれの SS-INV も、それぞれ対応するハードスイッチングインバータ（以下、HS-INV）より高効率であることを実験により確認した。

本論文は以下の全 6 章で構成した。

第 1 章では、従来の SS 電力変換器の問題点を明らかにし、本研究の位置付けを行った。

SS-INV の最も古い方式は、コンデンサとリアクトルによる共振パルスそのまま出力し、その密度を変調する PDM インバータである。この方式は、回路構成が簡単であるが、PWM インバータに比べ、同じスイッチング周波数では出力波形歪みが大きい、電圧形インバータでは SW 素子の電流ストレス、電流形インバータでは電圧ストレスが大きい、などの問題があった。

このため、現在ではスイッチング時のみ共振現象を利用して SS を実現し、PWM 制御が可能な部分共振形が主流である。部分共振形インバータは出力波形の波形成形制御性能が PWM インバータと同等で、PDM インバータに比べ、SW 素子の電流・電圧ストレスが抑制されたが、依然として①～③の問題が残っている。

本研究は、上記従来技術に鑑み、電圧センサ・電流センサなどの検出回路が不要、制御が簡潔、かつ効率の高い SS-INV を提案することを目標とする。

第 2 章では、本論文で提案する SS-INV に共通する基本共振回路構成について論じる。本論文で取り上げる SS-INV では、SW 素子に対して直列にリアクトルを接続し、ゼロ電流でターンオンする。リアクトル電流を断続的にすることでターンオン時の電流センサレス化を実現した。

ソフトスイッチング電圧形インバータ（以下、SS-VSI）では、共振コンデンサ電圧を直流リンク部の 3 つの分圧コンデンサのうちの一つの電圧と等しくすることにより、SW 素子の電圧をゼロにし、ターンオフさせる。共振回路は自動的に SW 素子の電圧をゼロにする構成としたため、電圧センサレス化を実現した。

ソフトスイッチング電流形インバータ（以下、SS-CSI）では、主 SW 素子に流れる電流に対して共振電流を逆向きに流し、主 SW 素子の電流をゼロにして、ターンオフする。SW

素子の逆阻止特性を利用して、電流センサレス化を実現した。

SW 素子の電圧ストレス抑制のため、高周波トランスによる過充電防止回路も提案している。

第3章では、第2章で述べた構成要素回路のうち、ゼロ電流ターンオン回路、ゼロ電圧ターンオフ回路、過充電防止回路を適用した SS-VSI を提案する。

SS-VSI は共振回路を全て受動素子のみで構成し、SW 素子の電流・電圧センサレス化を実現した。出力制御のための PWM 信号のみで SS を達成し、制御の簡潔化を実現した。さらに、デッドタイム期間においても直流リンク部に接続した分圧コンデンサ・負荷間の電流経路を確保することで、デッドタイム直前の電圧とほぼ等しい電圧を出力できるようにし、自動的にデッドタイム補償（以下、DT 補償）の機能を持たせることができた。これにより、スイッチングパターンに DT 補償のための付加的变化を施すことなく、特に低周波数出力での電流歪み抑制を可能にした。

本章では、回路動作モードの理論解析を行い、動作モードに基づいて回路定数の設計指針、自動 DT 補償の基本原則を明らかにした。実験により、SS 動作の実現、出力基本性能が HS-INV と同等であることを示した。自動 DT 補償について実機による検証を行い、低周波数出力での大幅な電流歪み抑制効果を確認した。HS-INV との効率を比較した結果、SS-VSI の方が重負荷側で 0.7 ポイント、軽負荷側で 9.2 ポイントの向上を達成した。

第4章では、第2章で示した構成要素回路のうち、ゼロ電流ターンオン回路、ゼロ電圧ターンオフ回路、過充電防止回路を適用した SS-CSI を提案する。

主 SW 素子には IGBT を適用し、ダイオードを直列に接続して逆阻止特性を持たせた。コンデンサおよびリアクトルを付加し、これらによる共振電流を、主 SW 素子の電流に対し、逆向きに流してゼロ電流ターンオフを達成する。これにより、ターンオン、ターンオフともに電流センサ無しで SS を実現した。

直流リアクトル（以下、DCL）での銅損低減、装置の小型軽量化、出力大容量化も目的として、DCL の小型化を目指した。通常の PWM パターンのままで小型化すると、DCL の電流に脈動が重畳し、出力波形が歪む。これを抑制するため、脈動が小さくなるように、PWM パターンを改良した。

共振回路の改良によっても効率向上を実現した。検討した共振回路は、ブリッジ構成の SW 素子に共振コンデンサを接続する回路構成で、2 個の共振リアクトルのうち、1 個を除去した。SW 素子数は増加するが、共振回路全体での SW 素子の導通損を減少でき、除去した共振リアクトルの銅損および鉄損の寄与がなくなるため、さらに効率を向上できる。

本章でも回路構成および動作原理の理論解析を行い、回路定数の設計指針を明らかにした。実験により、SS-CSI の SS 動作の実現、出力基本性能が HS-INV と同等であることを示した。改良した共振回路についても回路動作を確認した。本章で提案する 2 つの SS-CSI では、実験により、HS-INV に対し、改良前では 2.28 ポイント、改良後では 5.3 ポイントの効率の向上を達成した。特に、改良した共振回路を適用したインバータの方が効率向上

の効果が大きいことを実証した。出力容量は、HS-INV に対し、約 2 割の増加を実現した。

第 5 章では、第 2 章で論じた構成要素回路のうち、ゼロ電流ターンオン回路およびゼロ電流ターンオフ回路を適用し、さらに、ゼロ電流ターンオフ回路には過充電防止回路の構成を応用した SS-CSI を提案する。

本章で提案する SS-CSI の共振コンデンサ電圧は共振回路の SW 素子の制御パターンで制御できるため、負荷の状態量によって SS 動作可能領域を調整できる。DCL の電流制御により、電流形インバータの特長の一つである昇圧機能を積極的に利用できる。

本章では、回路構成および動作原理を理論的に明らかにし、回路定数の設計指針を示した。実験により、SS 動作の実現、SS-CSI の基本的な性能を示した。HS-INV との効率比較を行い、4.65 ポイントの向上を実現した。

第 6 章は、本論文のまとめである。本論文で取り上げたいずれの SS-INV においても、SS のためだけのセンサ類は不要で、複雑な制御を施すことなく SS を実現した。出力制御性能も HS-INV と同等のものが得られ、効率も向上したことが本論文における成果であると結論付けた。

今後の展望として、「ワイドギャップ半導体」を適用した次世代 SS 電力変換回路の特長、課題についての見通しを述べた。「ワイドギャップ半導体」の特長は高速スイッチング、高温動作可能、低オン損失であり、「高パワー密度化」を目指す次世代電力変換回路への適用が期待されている。SS-INV に「ワイドギャップ半導体」を適用するには、分布定数の顕在化、共振回路を含む回路素子の温度特性の向上、共振リアクトルにおける鉄心の高周波特性の改善、制御回路の高速化といった課題を克服する必要があることを指摘した。