

氏名（本籍）	LUO WEISEN	（中国）
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	甲第 265 号	
学位授与の日付	令和 6 年 3 月 22 日	
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当	
学位論文題目	Analytical and Numerical Designs of Zero-Voltage-Switching High-Frequency Power Converters	
論文審査委員	（主査）教授	陶 良
	（副査）教授	相知 政司
	教授	魏 秀欽
	教授	佐藤 宣夫
	教授	山崎 克巳

## 学位論文の要旨

### Analytical and Numerical Designs of Zero-Voltage-Switching High-Frequency Power Converters

パワーコンバータは入力電力を使い勝手のよい出力電力に変換する装置であり、その入出力が直流か交流かによって主にインバータ、整流器、および DC-DC コンバータに分類される。パワーコンバータは電子機器の重要な部分であり、これまでパワーコンバータのサイズは電子機器の全体において相当な割合を占めている。しかし、近年、GaN などの次世代半導体デバイスの登場により、従来の制約が打破され、パワーコンバータの高周波化が磁性素子の小型化を通じ回路サイズの小型化が可能となる。高周波化に向けて顕著化する問題の一つとしてスイッチング損失と呼ばれる電力損失が挙げられる。この損失は半導体デバイスの寄生容量に蓄えられるエネルギーが、スイッチがオンになるタイミングで一気に放出されることによって生じる。スイッチング損失は低周波数において無視できるが、周波数の上昇とともに増加し、効率低下を招く。ゼロ電圧スイッチング (Zero-Voltage-Switching: ZVS) 技術として知られるソフトスイッチング技術は、スイッチがオンに切り替わる際にスイッチ電圧がゼロになるため、スイッチング損失を極めて低く抑えることができる。この ZVS 技術を適用することで、パワーコンバータは高周波においても高効率動作が可能となる。

これまで、ZVS 技術を適用した高周波パワーコンバータの研究が多く行われてきた。定格状態の最適化設計理論が整備される中、パワーコンバータの課題はパワーマネージメントの構築へと

移っている。パワーコンバータにおいては、負荷の変動に対応する必要があり、実際の電子機器では、出力電圧を一定に維持することが求められる。負荷変動による電力変換特性の低下への対策として、負荷変動情報を検知し、スイッチにその情報をフィードバックすることでデューティ比などを調整する制御システムを構築していくアプローチが一般的である。高周波化には ZVS が必須となるため、一定出力と ZVS の二つの制御目標を同時に補償しなければならないとの新たな問題を生じ、制御システムの複雑化を招く。ところで、特別な制御をかけることなく、負荷変動に対して常に出力電圧を一定とし、かつスイッチング時に ZVS を達成する負荷非依存 E 級インバータが提案されている。負荷非依存 E 級インバータは定電圧と ZVS を同時に満たす必要があるため、回路の設計が困難である。そのため、負荷非依存 E 級インバータを設計するための手法が提案されてきた。しかし、これらの設計手法はすべてスイッチ素子の寄生容量の影響がないことを仮定したものである。周波数が低い場合、スイッチ素子の寄生容量の影響を無視しても問題はない。しかし、小型軽量化のための高周波化を目指すとき、スイッチ素子の寄生容量の影響が顕著となる。したがって、スイッチ素子の寄生容量の影響を考慮した負荷非依存 E 級インバータの設計手法を確立することが重要である。

近年、ZVS 技術を適用した様々なパワーコンバータのもとで、無線電力伝送(Wireless Power Transfer: WPT)システムの研究開発が進んでいる。そのような背景の中、ZVS 技術を用いた  $\Phi_2^2$  級 WPT システムが注目されている。 $\Phi_2^2$  級 WPT システムにおけるインバータと整流器は、スイッチ素子と並列に挿入される高調波共振回路とシャントキャパシタ、および入出力インダクタに多共振回路構造を持たせる。これにより、ZVS を維持しながらスイッチ電圧ストレスの大幅な低減に成功した。その結果低電力損失を確保したうえで、スイッチング周波数を高く引き上げることが可能となる。しかしながら、多共振回路構造を導入するため、様々な周波数成分が WPT システム内に共存することによってシステム設計の複雑さと困難さが増加してしまう。これまでに、 $\Phi_2^2$  級 WPT システムに対していくつかの設計手法が提案されている。しかしながら、これらの提案された設計手法から導出した素子値より得られるスイッチ電圧波形は ZVS を達成しない。ZVS を達成するために、シミュレーションまたは回路実装で試行錯誤的なパラメータチューニングを行わなければならない。これは、製品開発や実用化へのボトルネックとなる。したがって、 $\Phi_2^2$  級 WPT システムのパラメータチューニングが不要となる高精度な設計手法を確立することは非常に重要である。

本論文では、前述の抱えている設計課題に対し、以下のように解析的および数値的アプローチに基づいてその解決策を提案していく。

まず、負荷非依存 E 級インバータに対し、MOSFET のゲート-ドレイン間およびドレイン-ソース間の寄生容量を考慮した数値計算法に基づく設計手法を提案する。次に、 $\Phi_2^2$  級 WPT システムに対し、送電部、結合部、受電部 3 つのサブシステムを 1 つのシステムとしてモデル化し、解析に基づく設計手法を提案する。スイッチのオン抵抗、ダイオードの順方向電圧降下、およびインダクタの等価直列抵抗(ESR)の影響も解析モデルに組み込んでいる。提案した設計手法を適用することにより、パラメータチューニングを必要とせず、ZVS 条件を達成する  $\Phi_2^2$  級 WPT システムの設計

値を導出することができる。いずれの研究についても、広範囲のパラメータ領域における設計曲線を導出し、LTspice シミュレーションと回路実験から提案した設計手法と設計曲線の妥当性を確認する。さらに負荷非依存 E 級インバータでは、負荷抵抗のみ設計値と設計値から離れた値の両者を用いてシミュレーションと回路実験を行う。これらのシミュレーションと回路実験において、負荷抵抗が所望の値から変動しても出力電圧は一定であり、スイッチ電圧波形もすべて ZVS 条件を満たしていることが示される。

## 審査結果の要旨

パワーコンバータは入力電力を使い勝手のよい出力電力に変換する装置であり、その入出力が直流か交流かによって主にインバータ、整流器、および DC-DC コンバータに分類される。パワーコンバータは電子機器の重要な部分であり、これまでパワーコンバータのサイズは電子機器の全体において相当な割合を占めている。しかし、近年、GaN などの次世代半導体デバイスの登場により、従来の制約が打破され、パワーコンバータの高周波化が磁性素子の小型化を通じ回路サイズの小型化が可能となる。高周波化に向けて顕著化する問題の一つとしてスイッチング損失と呼ばれる電力損失が挙げられる。この損失は半導体デバイスの寄生容量に蓄えられるエネルギーが、スイッチがオンになるタイミングで一気に放出されることによって生じる。スイッチング損失は低周波数において無視できるが、周波数の上昇とともに増加し、効率低下を招く。ゼロ電圧スイッチング(Zero-Voltage-Switching: ZVS)技術として知られるソフトスイッチング技術は、スイッチがオンに切り替わる際にスイッチ電圧がゼロになるため、スイッチング損失を極めて低く抑えることができる。この ZVS 技術を適用することで、パワーコンバータは高周波においても高効率動作が可能となる。

これまで、ZVS 技術を適用した高周波パワーコンバータの研究が多く行われてきた。定格状態の最適化設計理論が整備される中、パワーコンバータの課題はパワーマネジメントの構築へと移っている。パワーコンバータにおいては、負荷の変動に対応する必要があるため、実際の電子機器では、出力電圧を一定に維持することが求められる。負荷変動による電力変換特性の低下への対策として、負荷変動情報を検知し、スイッチにその情報をフィードバックすることでデューティ比などを調整する制御システムを構築していくアプローチが一般的である。高周波化には ZVS が必須となるため、一定出力と ZVS の二つの制御目標を同時に補償しなければならないとの新たな問題を生じ、制御システムの複雑化を招く。ところで、特別な制御をかけることなく、負荷変動に対して常に出力電圧を一定とし、かつスイッチング時に ZVS を達成する負荷非依存 E 級インバータが提案されている。負荷非依存 E 級インバータは定電圧と ZVS を同時に満たす必要があるため、回路の設計が困難である。そのため、負荷非依存 E 級インバータを設計するための手法が提案されてきた。しかし、これらの設計手法はすべてスイッチ素子の寄生容量の影響がないことを仮定したものである。周波数が低い場合、スイッチ素子の寄生容量の影響を無視しても問題はない。しかし、小型軽量化のための高周波化を目指すとき、スイッチ素子の寄生容量の影響

が顕著となる。従って、スイッチ素子の寄生容量の影響を考慮した負荷非依存 E 級インバータの設計手法を確立することが重要である。

近年、ZVS 技術を適用した様々なパワーコンバータのもとで、無線電力伝送(Wireless Power Transfer: WPT)システムの研究開発が進んでいる。そのような背景の中、ZVS 技術を用いた  $\Phi_2^2$  級 WPT システムが注目されている。 $\Phi_2^2$  級 WPT システムにおけるインバータと整流器は、スイッチ素子と並列に挿入される高調波共振回路とシャントキャパシタ、および入出力インダクタに多共振回路構造を持たせる。これにより、ZVS を維持しながらスイッチ電圧ストレスの大幅な低減に成功した。その結果低電力損失を確保したうえで、スイッチング周波数を高く引き上げることが可能となる。しかしながら、多共振回路構造を導入するため、様々な周波数成分が WPT システム内に共存することによってシステムの設計の複雑さと困難さが増加してしまう。これまでに  $\Phi_2^2$  級 WPT システムに対していくつかの設計手法が提案されている。しかしながら、これらの提案された設計手法から導出した素子値より得られるスイッチ電圧波形は ZVS を達成しない。ZVS を達成するために、シミュレーションまたは回路実装で試行錯誤的なパラメータチューニングを行わなければならない。これは、製品開発や実用化へのボトルネックとなる。したがって、 $\Phi_2^2$  級 WPT システムのパラメータチューニングが不要となる高精度な設計手法を確立することは重要である。

本論文では、前述の抱えている設計課題に対し、以下のように解析的および数値的アプローチに基づきその解決策を提案した。

まず、負荷非依存 E 級インバータに対し、MOSFET のゲート-ドレイン間およびドレイン-ソース間の寄生容量の影響を考慮し、その設計において、最適化を数値的に処理する方法を提案した。これにより、負荷非依存 E 級インバータは高周波動作においても、ZVS を達成することができる。次に、 $\Phi_2^2$  級 WPT システムに対し、送電部、結合部、受電部の 3 つのサブシステムを 1 つのシステムとしてモデル化し、解析に基づく設計手法を提案した。スイッチのオン抵抗、ダイオードの順方向電圧降下、およびインダクタの等価直列抵抗(Equivalent Series Resistance: ESR)の影響も解析モデルに組み込んでいる。提案した設計手法を適用することでパラメータチューニングを必要とせず、ZVS を達成する  $\Phi_2^2$  級 WPT システムの設計を行うことができる。いずれの研究についても、広範囲のパラメータ領域における設計曲線を導出し、LTspice シミュレーションと回路実験から提案手法と設計曲線の妥当性を確認した。さらに負荷非依存 E 級インバータでは、負荷抵抗のみ設計値と設計値から離れた値の両者を用いてシミュレーションと回路実験を行った。これらのシミュレーションと回路実験において、負荷抵抗が所望の値から変動しても出力電圧は一定であり、スイッチ電圧波形もすべて ZVS が達成していることを示された。

本論文は ZVS を適用した高周波パワーコンバータの設計について研究したものであり、解析技術および数値設計技術を応用展開することにより、従来研究と比較して高精度な設計を実現し、高周波パワーコンバータの高周波動作における電力変換効率の向上について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

従って、学位申請者の羅煒森は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。