

氏名	マツバラ カズキ 松原 尨樹
所属	システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	シス博 第154号
学位授与の日付	令和3年9月30日
課程・論文の別	学位規則第4条第1項該当
学位論文題名	空芯コイルによる85kHz帯を対象とした磁界発生装置の設計手法に関する研究
論文審査委員	主査 教授 和田 圭二 委員 教授 鈴木 敬久 委員 准教授 五箇 繁善 委員 教授 近藤 圭一郎 (早稲田大学)

### 【論文の内容の要旨】

近年、既存のパワー半導体デバイスである Si デバイスと比較して低 ON 抵抗、高速スイッチングなど優れた特性を持つ次世代パワー半導体デバイス、SiC(Silicon Carbide)、GaN(Gallium Nitride)デバイスの普及が進み、高周波・大容量の領域において高効率で小型・軽量の電力変換回路の実現が可能となった。次世代パワー半導体デバイスを用いたアプリケーションとしてワイヤレス電力伝送(Wireless Power Transfer, WPT)システムが特に着目されている。2007年にマサチューセッツ工科大学により磁界共振方式による WPT 技術が発表され、数 kW レベルの大電力を数十 cm の距離で電力伝送が可能であることが示され、今後、電気自動車(Electrical Vehicle, EV)を対象とした数 kW レベルや、スマートフォン等小型電子機器を対象とした 100 W 程度 WPT システムの普及が期待されている。2016年3月には総務省令により EV 向け WPT システムの利用周波数帯は 79 kHz~90 kHz(85 kHz 帯)、小型電子機器向け WPT システムの利用周波数帯は 6.765 MHz~6.795 MHz(6.78 MHz 帯)とされ実用化に向けた制度化も進んでいる。

このような用途での WPT システムの電力伝送時には磁界が空間中に漏洩するため、漏洩磁界による生体影響の懸念が高まっている。2007年に発刊された WHO(World Health Organization)の Environment Health Criteria 238 では、300 Hz~100 kHz の電磁界に関する更なる研究が必要であるとされた。このように、今後期待される WPT システムの利用周波数 85 kHz 帯や 6.78 MHz 帯の磁界による生体影響の関心が増加しており、生体影響評価のための磁界発生装置、すなわち、電源装置と磁界発生用コイルの開発が急務となっている。

現在多く報告されている磁界発生装置の開発例は商用周波数帯や 20 kHz 帯を対象としており、今後普及が予測される WPT システムで扱われる 85 kHz 帯や 6.78 MHz 帯を対象とすると高周波化が必要となる。磁界発生装置の開発では、高磁束密度を発生させるためにコイルのインダクタンスの確保と大電流化が要求される。しかしながら、磁界発生装置の高周波化により電力変換回路の制約が顕著となり、その開発においては電力変換回路の制約と要求される磁束密度・磁束密度領域の両者を同時に満たす必要がある。とりわけ、インダクタンス・電流に比例する共振電圧や、共振電圧の増大に伴うコイル内巻線間電圧の増大が懸念される。また、パワー半導体デバイスの定格電流によって出力電流に制約が生じる。

前述の背景を踏まえて、本研究では、空芯コイルによる 85kHz 帯の磁界発生装置の設計手法について論じる。はじめに、電力変換回路の制約条件下において磁束密度が最大となるコイル巻線構造を決定可能な設計指針を確立する。また、2つのソレノイドコイルから構成されるギャップ付きコイルに基づく磁界発生装置を提案し磁束密度の高出力化・磁束密度領域の広範囲化を達成する。また、磁束密度の高出力化のための要素技術として磁界発生装置の電源設計に位置づけられるパワーデバイス並列接続時の電流バランス手法を提案する。

本論文は、6章によって構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、高周波磁界発生装置の開発では、電力変換回路の制約と要求される磁束密度と磁束密度領域の両者を考慮した設計指針の確立、また、高出力化のための電力変換回路の要素技術の確立が不可欠であることを述べ、具体的な課題と本研究の目的を示す。

第2章では、磁界発生装置における各種回路方式と磁界発生用コイル形状についてまとめ、高周波磁界発生装置に適した回路方式・コイル形状の選定を示す。さらに、高周波磁界発生装置における電力変換回路の課題となるパラメータを示し、本研究内容との関連性を明らかにする。

第3章では、85 kHz 帯磁界発生装置における電力変換回路の制約を考慮した磁界発生用コイルの設計指針について論じる。提案する設計指針により、電力変換回路の制約を満たした回路条件内において中心磁束密度が最大となるコイル巻線構造の決定を可能とした。また、巻線間最大電圧の低減を目的としたコイル構造に設計指針を応用し、設計目標である中心磁束密度 20mT を達成したことを示す。

第4章では、磁束密度の高出力化と磁束密度領域の広範囲化の両立を目的としたギャップ付きソレノイドコイルに基づく磁界発生装置について論じる。2並列ギャップ付きソレノイドコイルを用いた回路方式では、回路パラメータのばらつきがインバータの動作周波数に制約を及ぼすことをインピーダンス解析により明らかとする。さらに、第3章で示すコイル設計指針を応用したコイル設計により、2並列ギャップ付きソレノイドコイルを用いた磁界発生装置では単一インバータと1つのコイルで構成される磁界発生装置と比較して高出力化、または、広範囲化を達成可能であることを示す。さらに、2台のインバータを用

いた磁界発生装置を応用し対照実験用のばく露環境が生成できることを示す。

第 5 章では、磁束密度の高出力化の達成に必要な出力電流の大電流化技術として、パワー半導体デバイス並列接続時の電流バランス手法を論じる。具体的には、磁界発生装置の動作条件では、パワーデバイスのスイッチング時には回路中に最大電流が流れていることに着目し、回路中の寄生インピーダンスによる電流アンバランス現象について示す。解析結果に基づき受動素子による電流バランス手法を提案し、入力電圧 320V、出力電流 60 A の実験により提案手法の有用性を示す。

第 6 章では、本論文で得られた成果についてまとめるとともに、今後の展望を示す。