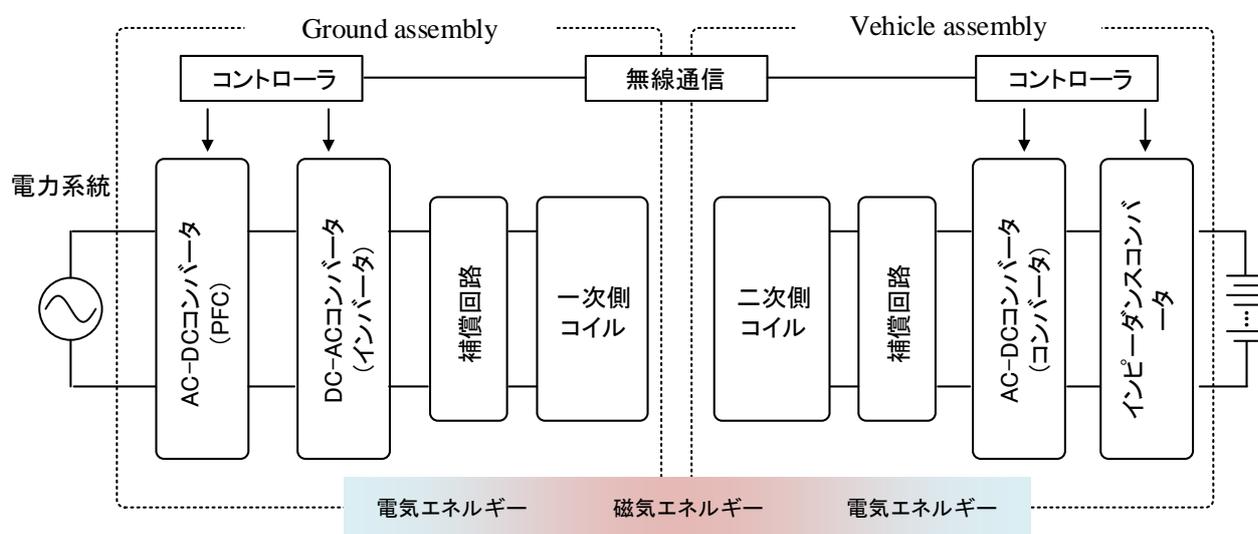


kHz 帯ワイヤレス給電システムの設計と課題

Challenge in Design of Efficient Wireless Power Transfer System
Operating in kHz- band日下 佳祐[†]Keisuke KUSAKA[†][†]長岡技術科学大学 電気電子情報系

概要

電気自動車の利便性を改善するため、ワイヤレス給電システムの研究開発が進められている。現在、電気自動車向けワイヤレス給電システムは標準化が進められており、85kHz 帯を用いた伝送が予定されている。そこで本稿では kHz 帯ワイヤレス給電システムを対象に、高効率な伝送システムの設計手法並びに課題を解説する。kHz 帯ワイヤレス給電システムの高効率化に向けては、伝送コイルと電源回路の両面からのアプローチが重要である。例えば、高周波電源となる DC-AC コンバータ（インバータ回路）においては、スイッチング周波数に比例してスイッチング損失が発生する。本スイッチング損失を低減するため、ゼロ電圧スイッチングとなるようシステムを設計することが重要である。一方伝送コイルに着目すると、交流抵抗による銅損増大が高効率化にあたっての課題となる。これらの課題と解決方法の手法を解説する。



kHz 帯ワイヤレス給電システムの構成例

Abstract

Wireless power transfer systems for EV chargers have been actively studied to enhance the usability of EV users. In the standardization of the wireless power transfer system, a frequency band of 85 kHz is selected as the transmission frequency. In this paper, the challenge to develop the efficient wireless power transfer system focusing on the power converters and transmission coils is explained.

1. はじめに

近年、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、走行中に地球温暖化ガスを排出しない電気自動車の普及拡大が進められている^[1]。しかしながら、電気自動車のバッテリーが有するエネルギー密度は100~200Wh/kgにとどまっており、ガソリン等の化石燃料が有するエネルギー密度12,000Wh/kgに対して極めて低いのが現状である^[2]。このエネルギー密度の低さに起因して、電気自動車のユーザには頻繁な充電操作が必要とされることが普及拡大を妨げる一因となっている。

上記の問題を解決するため、ワイヤレス給電システムの実用化に向けた研究開発が進められている。ワイヤレス給電は電気エネルギーを一時的に磁気エネルギーに変換することで空間を介してエネルギーを伝送する技術である。本技術の採用により、ユーザは電気自動車を駐車するだけでバッテリーの充電が可能となる。また、将来的には走行中の自動車に対して電力を供給することも可能となる。

電気自動車向けワイヤレス給電は、現在国際的な標準化作業が進められており、伝送周波数には数十kHz帯(85kHz帯等)が用いられることがほぼ決定している。そこで本稿では、高効率なワイヤレス給電システムの実現に向けて、伝送システムの設計手法や伝送コイルの高効率化技術、電力変換回路の高効率化技術の基礎技術を紹介する。

2. kHz帯ワイヤレス給電システム

(a) ワイヤレス給電システムの構成

図1に電気自動車向けワイヤレス給電システムのシステム構成例を示す。ワイヤレス給電システムは、大きく分けて地上側システム、及び車両側システムに分けて考えることができる。なお、SAE(Society of Automotive Engineers)による標準化の中で地上側システムをGA(Ground assembly)、車両側システムをVA(Vehicle assembly)と呼称しているため、本稿でもこれらの名称を用いる。

GAは、商用電源から受電し整流した後、数十kHzの高周波交流へ電力変換を行う役割を担う。一般的には高周波から直流への返還を担うPFCコンバータと、直流から交流への変換を担う単相インバータ、補償回路、地上側(一次側)コイルから構成される。補償回路は共振によりワイヤレス給電用コイルで生じる漏れインダクタンス起因の力率低下を防ぐことで高効率化に寄与する回路であり、図中では地上側コイル及び車両側コイルにそれぞれ直列にコンデンサを追加するS/S補償方式を示している^[3]。

なお、伝送周波数は任意であるが、共振現象を用

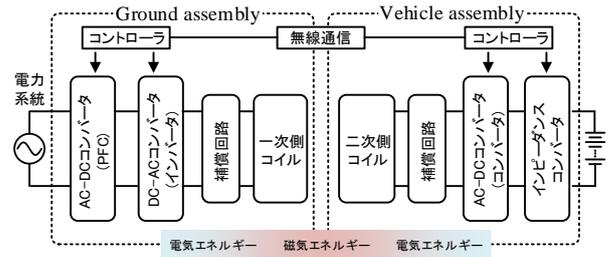


図1 kHz帯ワイヤレス給電システムの構成例

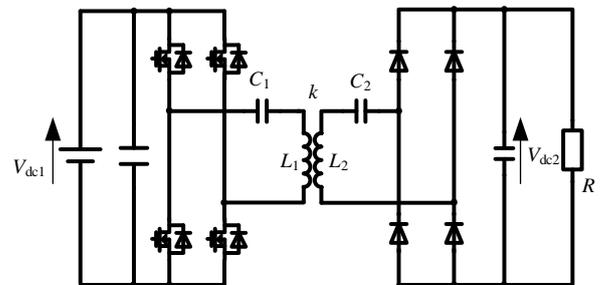
いて電力伝送を行うため、損失を許容できる範囲内で高周波化したほうが伝送コイルの軽量化が可能である。

一方、VAは自動車側に搭載されるユニットである。受電コイルから交流電力を受電し、直流に整流した後バッテリーに供給する役割を担う。システムによっては最終段にインピーダンスコンバータと呼ばれる回路を追加する事があるが本稿では割愛する。

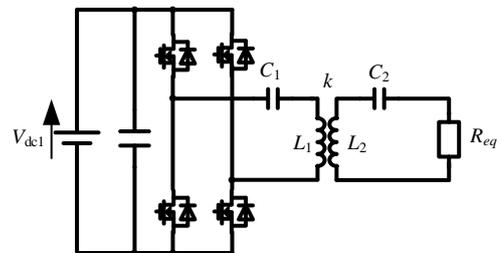
(b) kHz帯ワイヤレス給電システムの簡易設計

本節では、ワイヤレス給電システムに使用する伝送コイル等のパラメータ設計法について説明を行う。なお、補償回路の方式として最も基本的なS/S補償方式^[3]を例にあげて説明を行う。

図2にkHz帯ワイヤレス給電システムの簡易等価回路を示す。ここでは、電力システム側回路を省略し、系統電圧により一意に定まる直流電圧源 V_{dc1} から、



(a) 簡易等価回路



(b) 整流器の交流抵抗モデル化

図2 kHz帯ワイヤレス給電システムの基礎設計

所望の電力 P を負荷 R に供給するよう設計を行う。kHz 帯ワイヤレス給電システムの設計においては、この直流電圧源 V_{dc1} から、想定した負荷 R （一般的にはバッテリー）を接続した際に、所望の電力が高効率に伝送されることが設計上の最優先事項である。

まず初めに、車両側の整流回路のモデル化を行う。すなわち、図 2(a)の回路から、図 2(b)の回路に等価変換する。整流器出力に接続された負荷抵抗 R には、整流後の直流電圧 V_{dc2} が印加され、直流電流が流れる。一方、整流器入力からみると、車両側コイルには正弦波電流が通流しているためこの電流方向に応じて整流器入力電圧は振幅 V_{dc2} をもつ方形波電圧となる。振幅 V_{dc2} の方形波電圧がもつ基本波成分の電圧実効値は $\frac{4}{\sqrt{2\pi}}V_{dc2}$ となる。したがって、整流器の損失が十分小さいとして無視すると入出力の電力 P は等しくなるため、整流器入力からみた等価交流抵抗 R_{eq} は(1)式で表される。

$$R_{eq} = \frac{\left(\frac{4}{\sqrt{2\pi}}V_{dc2}\right)^2}{P} = \frac{8}{\pi^2}R \quad (1)$$

次に、伝送コイル間の結合係数 k （のノミナル値）を用いて、所望の出力電力が得られるよう伝送コイル及び補償コンデンサの設計を行う。なお、結合係数 k は伝送コイルの位置ずれによって変化するため、ノミナル値とする。まず初めに、ノミナル状態での結合係数 k を導出する。結合係数の導出にあたっては、伝送コイルが空芯構造の場合、数値的に導出することが可能であるが、実際には磁性材料や伝送コイルの近辺に設置される金属の影響などによって困難である場合が多い。したがって、多くの場合電磁界解析によって結合係数を解析することが多い。

図 2(b)の回路において、インピーダンス整合条件により、最大効率となる負荷条件は(2)式となる。したがって、(2)式を満足するよう車両側伝送コイルを設計することで、高効率な電力伝送が可能となる。

$$L_2 = \frac{R_{eq}}{k\omega} \quad (2)$$

次に、地上側伝送コイルの設計を行う。地上側伝送コイルは入出力の電圧比に基づいて決定する。S/S方式を適用したワイヤレス給電システムにおいて、地上側直流電圧 V_{DC1} と車両側直流電圧 V_{DC2} からなる電圧比 G_V は(3)式で表される。

$$G_V = \frac{V_{DC2}}{V_{DC1}} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (3)$$

(3)式より、地上側コイルの自己インダクタンス L_1 は(4)式を満足するよう設計すればよい。

$$L_1 = L_2 \left(\frac{V_{DC1}}{V_{DC2}}\right)^2 \quad (4)$$

なお、補償回路のコンデンサは、地上側コイルと車両側コイルの自己インダクタンスに対してそれぞれ共振するよう設計すればよいので、(5)(6)式を満足すればよい。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (5)$$

以上の設計により、所望の負荷電力をインピーダンス整合条件下で伝送可能なワイヤレス給電システムが構築できる。

3. インバータの低損失化技術

本章では GA で用いられる DC-AC コンバータ（インバータ）の低損失化技術を説明する。kHz 帯におけるワイヤレス給電では、1 次側電力変換回路としてフルブリッジインバータが一般的に用いられる^[4]。フルブリッジインバータは、4 個のスイッチングデバイス（主に MOSFET）で構成されており、これらのスイッチング動作により高周波（数十 kHz）方形波状電圧もしくは 3 レベル状の電圧波形を出力する。

インバータでは、スイッチングデバイスのオン/オフ状態の切り替わりの瞬間に、デバイス両端電圧と通流電流によるスイッチング損失が生じる。スイッチング損失は駆動周波数に比例して増加するため、高周波のワイヤレス給電システムではインバータの効率を低下させる大きな要因の一つである。このスイッチング損失の低減手法として、ゼロ電圧スイッチングが多く採用されている。

図 4 に負荷電流を用いて、スイッチングデバイスをソフトスイッチングさせるゼロ電圧スイッチングの原理図を示す。本インバータでは、 S_1 と S_2 が相補的に動作している。ただし、両者が同時 ON とならないよう、デッドタイム期間 T_d を設けている。本インバータ回路においてゼロ電圧スイッチングを用いる場合、負荷の共振周波数、すなわちワイヤレス給電の伝送周波数よりもスイッチング周波数をやや高く設定する。

S_1 がオンであり、正極性電圧を出力している期間、MOSFET S_1 には正方向に電流が流れている。 S_1 をオフすると、デッドタイム期間が開始される。デッド

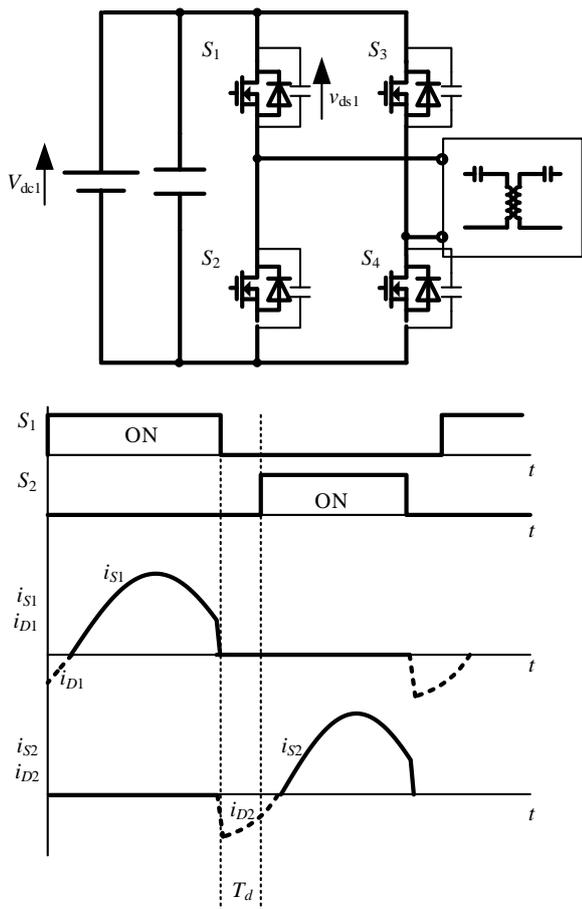


図4 ゼロ電圧スイッチングの原理

タイムに入った瞬間、これまで S_1 を通流していた電流は遮断される。しかし、負荷側の磁気エネルギーにより、負荷側電流は引き続き流れ続ける。この電流は、上側スイッチ S_1 のゲートソース容量の電荷の充電と、下側スイッチ S_2 のゲートソース容量の電荷を引き抜く方向となる。ゲートソース容量の電荷が引き抜かれゲートソース電圧がゼロになった時点から、この電流は S_2 の還流ダイオードに転流する。これにより、スイッチ S_2 の両端電圧はゼロ電圧に維持される。この状態で S_2 をターンオンさせたとしても、スイッチ S_2 の両端電圧がゼロとなっているため、スイッチング損失は発生しない。 S_1 のターンオンについても同様である。このようなゼロ電圧スイッチング動作を行うには、伝送周波数（共振周波数）よりも駆動周波数をやや高く設定する必要がある。

なお、各スイッチのターンオフ時には、デバイスに電流が流れた状態でスイッチをターンオフするため、スイッチング損失が発生するが、共振周波数とスイッチング周波数が十分近い場合には、電流がゼロ付近となるため発生する損失は小さい（図中ではわかりやすさを優先するため誇張して記載している）。

4. 伝送コイルの設計

kHz 帯のワイヤレス給電システムの高効率化において最も重要な要素が伝送コイルである。伝送コイルにて生じる損失として、巻線で生じる銅損のほか、磁性材料で生じる鉄損（渦電流損失、ヒステリシス損失）がある。

銅損は直流抵抗に起因する損失と、交流抵抗に起因する損失に分けることができる。直流抵抗は導体の抵抗率、断面積、長さにより一意に決まる抵抗である。一方、交流抵抗は表皮効果と近接効果により増加する抵抗分を示しており、通流させる電流の周波数及び、外部磁界の影響により変化する。

表皮効果は導体材料と通流する電流の周波数に依存する。高周波を導体中に通流させると、導体断面に時間変化する磁界が発生する。ファラデー・ノイマンの法則により、この磁界の発生を妨げる方向で電流が導体内部に発生し、結果として導体表面を電流が通流するようになる。

近接効果は導体に対して外部から磁界が与えられた場合に生じる現象である。電流が通じている導体に外部から磁界が与えられると、導体内部にはその磁界を打ち消す方向に電流が生じる。これにより、導体断面の片側にのみ電流が集中する現象が発生する。

kHz 帯ワイヤレス給電システムでは、伝送コイルで生じる交流抵抗が大幅に増大することが知られており、交流抵抗の抑制手法がシステムの高効率化にあたって重要である。具体的には、リッツ線の採用により表皮効果を抑制する手法が検討されているが、コストや加工性の観点からは課題が残されている。

文 献

- [1] 環境省 国・地方脱炭素実現会議, 「地域脱炭素ロードマップ」 (2021)
- [2] 栄部比夏里, 「高エネルギー密度蓄電池の構築を目指して」, 産総研 TODAY, Vol. 9, No. 8, pp. 8-9 (2009)
- [3] W. Zhang, C. C. Mi, "Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 6, pp. 4768-4778 (2016)
- [4] 日下佳祐, 伊東淳一, 「伝送周波数と伝送電力に着目した電磁誘導現象を用いた非接触給電システムの開発動向」, Vol. 137, No. 5, pp. 445-457 (201)

著者紹介

日下 佳祐 長岡技術科学大学 電気電子情報系
産学融合特任講師, kusaka@vos.nagaokaut.ac.jp