自動車へのワイヤレス電力伝送技術の動向と安全性へのシステム設計

高橋 俊輔*

The Trend of the Wireless Power Transfer Technology for EV and Systems Architecture to Safety

Shunsuke TAKAHASHI*

* 早稲田大学電動車両研究所 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 55 号館 S 棟 704)

* WASEDA University Research Institute of Electric-driven Vehicles (S-55-704, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555)

1. 自動車用ワイヤレス電力伝送技術

1.1 ワイヤレス給電方式

ワイヤレス給電システムには各種方式があり、図1にその伝送電力と伝送距離の関係を示すが、出力3kW~200kW、ギャップ5cm~40cmが必要な電気自動車(EV)および電動バス(e-Bus)に使用可能なものとして、

- ・電磁誘導式
- ・磁界共振式

の2種類が挙げられる。電波式やレーザー式も電力伝送可能だが、人体防護の観点から現法規の下では使用できない。

1.1.1 電磁誘導式

1831年にイギリスのMichael Faradayが見出した、静止している導線の閉じた回路を通過する磁束が変化すると、その変化を妨げる方向に電流を流そうとする電圧が生じると言うファラデーの電磁誘導法則に基づき、対向させたコイルと磁束収束用の磁性体を用い、1次/2次コイル間に共通に鎖交する磁束を利用する電磁誘導式は、図2に示すようにギャップのある変圧器である。

1次コイルに交流電流を流すとコイル周囲に磁界が発生、1次/2次コイルを共通に鎖交する磁束により2次コイルに誘導起電力が発生する。理想的な変圧器では1次コイルの磁束は全て2次側に伝えられ、両コイルの磁束伝達度合い ϕ_2/ϕ_1 を示す結合係数 k は1である。しかし、ギャップがある場合には漏れ磁束が発生、 k は1よりも小さくなる。この漏れ磁束が1次/2次側の自己インダクタンスにそれぞれ直列に接続された漏れインダクタンスとして、チョークコイルと等価な働きをする。

つまり、ワイヤレス給電は変圧器に比べ励磁インダクタンスが小さく、漏れインダクタンスによる電圧降下が大きいシステムとなるため、大ギャップでも電力を効率よく伝達するために、1次側の印加周波数を高周波にして2次誘起電圧を上げたり、コイルのインダクタンスにコンデンサを並列もしくは直列に接続した共振回路を設けている。ただ電磁誘導式は結合係数に大きく依存しているため、 k が

図1. 各方式の伝送電力と伝送距離

図2. 電磁誘導式の基本原理

0.01以下になるような、極端な大ギャップでは電力伝送ができない。

1.1.2 磁界共振式

磁界共振式は、2007年にアメリカMassachusetts Institute of Technology (MIT)の研究チームが、2m離れた距離で60Wの電力伝送に成功したことで注目を浴びた。図3にMITが発表したシステムの概要を示すが、まず変圧器とインピーダンス変換器の役目をする1次側の1ターンループコイルから密な電磁結合により送電側のヘリカルコイルに電力伝送する。1次/2次側のヘリカルコイルの性能係数 Q を高い値にして、同じ周波数でLC共振させ、空間に蓄積される磁気エネルギーを利用する磁気共鳴の技術で電力伝送

図3. MIT が発表したシステムの概要

している。2次側は1次側と同じコイル構成となっている。

当初のコイルは図のように送受電とも2コイル構造で、周波数も数 MHz だったが、現在使われているシステムではコイルは電磁誘導式と同じ1コイル構造であり、電源もインバータを使って周波数も数十 kHz となっている。1次コイルから放射される磁束を直接2次コイルに鎖交させれば前述の電磁誘導式となるが、1次/2次側の磁束が殆ど鎖交していない k が 0.01 以下となるよう両コイルを十分に離れた状態で、磁界共振式は電磁誘導式と殆ど同じシステムを使いながら両コイルサイズと波長、磁界分布をうまく制御してエネルギーを伝送している。そのためコイルサイズ、波長、伝送距離に一定の制約が生まれ、その制約条件が崩れると共鳴が起こらず電力伝送ができなくなる。そこで、今では磁界共振式は電磁誘導式の1種であると考えられている。

1.2 ワイヤレス給電の動向

1.2.1 EV 用ワイヤレス給電

国内では2014年頃まで日産自動車やトヨタ自動車、三菱自動車、本田技研工業が出力 2 kW ~ 3.3 kW、周波数 85 kHz の磁界共振式のを自社の EV やプラグインハイブリッド車 (PHV) に搭載して発表、各地で実証試験を盛んに行っていたが、最近では殆ど発表が見られない。

海外では2016年のパリモーターショーでDaimlerがコンセプトカー Generation EQ に Qualcomm/Brusa 製の 3.6 kW、85 kHz のコイルを搭載したり、Mercedes-Benz の PHV S550e に搭載して発売予定と言う発表をし、Volkswagen も EV 向け新プラットフォームの前軸のすぐ後ろに受電コイルを搭載するコンセプトを発表している。自動車メーカに直接部品を供給する1次請けの Bosch も2017年に図4のようにBMWのi3の前軸の直ぐ後ろの丸印の所に標準化ステージで取り上げられている形状に似た7 kW コイルを搭載して発表し、2018年にはMercedes-Benzに搭載して市販する予定である¹⁾。このように欧州では今も活発に発表が続いている。

日本と海外との対応の違いはワイヤレス給電システムの標準化にある。グローバルなEVへのワイヤレス給電システムでは仕様の標準化・規格化が必要で、上記のような動きを受けてIEC/ISOを中心に日米欧で標準化が進められていて、コイル形状はCircular型、周波数は85 kHz帯に絞ら

図4. Bosch 社が搭載したワイヤレス給電用受電コイル

図5. ワイヤレス給電地上コイルと2階建て電動バス

れ、その他の規格も2019年末までにまとまる可能性がある。自動車会社での開発は大方終了し、日本の会社は標準化が済んだ仕様のものを搭載して、顧客対応しようとしており、海外では制定中の規格に自らの仕様を押し込もうという考えがあるからと思われる。

1.2.2 e-Bus 用ワイヤレス給電

国内では2011年以来、早稲田大学が7 m 長のバスを電動化したWEBシリーズに30 kW、22 kHzと44 kW、85 kHzのコイルを搭載して長野市や川崎市で長期にわたる実証運行を行った^{2),3)}。また、国土交通省や東京都も2008年以降、12 m 長のPHV路線バスに50 kW、22 kHzのコイルを搭載して羽田空港、東京ビッグサイトや東京駅で実証運行を行った⁴⁾。これらの実証試験の結果、50 kW以下ではターミナルでの充電に時間が掛かり過ぎダイヤを確保できないため、ディーゼルバスをe-Busで置き換えるには、少なくとも90 kW以上の送電電力が必要と言う結論を得るに至り、実証試験のみで終わっている。

海外では殆どの事例が100 kW以上の大電力システムを採用している。2014年からイギリスMilton Keynes市は8台の9 m 長のe-BusにIPT Technology (IPTを開発したWampflerの関連会社) の120 kW、20 kHzのIPTを搭載して、24 km 路線のディーゼルバスを全てe-Busに置き換えて運用を続けている。また、図5に示すようにLondon市は2016年から100 kWのIPTを用いて郊外の11 km 路線で12 m 長の2階建てe-Busに給電して運用を行っている。Bombardierは200 kW、20 kHzのシステムを12 m 長のe-Busと18 m 長の接続e-Busに搭載して、2013年以降ドイツの

Braunschweig 市, Berlin 市やベルギーの Bruges 市などで実運用を続けている。中国でも通信機器大手の ZTE が 2015 年から大ギャップの 120 kW, 85 kHz システムを 9 m から 12 m の e-Bus に搭載し, 道路上などで充電し, 1 充電で鄭州市では 44 km, 襄陽市では 23 km の長距離運用を行っている。以上のように海外の 100 kW 以上のシステムは全て実運用されている⁵⁾。

2. 安全性へのシステム設計

ワイヤレス給電システムの要求仕様を満たす設計, 製作, 試験, 完成までの流れを IT 製品開発の手法の一種である V モデル風に示すと図 6 のようになる。製作までの設計・検証のステージと完成までの試験・妥当性検討ステージに分けられ, それぞれのステージでの安全性へのシステム設計について以下に示す。

2.1 設計・検証ステージ

ワイヤレス給電の黎明期には膨大な量の物理計算式を解いて求めた設計に基いて製作, 試験をして, 問題が生じたら再度時間を掛けて設計, 製作をする方法を取っていた。しかし, コンピュータとシミュレーション技術が発達した昨今では, それぞれの設計ステージで最適なシミュレーションによりモデルベースを検証して最適設計をするシステムを採用することで, 設計から製作までの時間およびコストの低減を図っている。

シミュレータとしてオームの法則やキルヒホッフの法則のような集中定数系のものと, 特性インピーダンスと言った伝送経路理論を元にする分布定数系のもの, およびマクスウェル方程式に基づく 2 次元や 3 次元回路系のものがある。なお, 分布定数系のものは高周波回路シミュレータで解析できるが, 本章で扱う EV 用システムの周波数帯での適用は無いと思われるため, 解説は省略する。

2.1.1 回路シミュレータ

集中定数系の電子回路のアナログ動作シミュレーションツールとしては, 1973 年に California 大学 Berkeley 校で開発された Spice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) が使われることが多い。図 2 における共振コンデンサの配置には 1 次/2 次コイルそれぞれに直列あるいは並列にした方式がある。これらは一概にどれが良いと言えるものではなく, 使用する周波数やコイル, ギャップ, 負荷などの条件によって決まる。また共振コンデンサを直並列に配置することもあるため, 図 7 のように Spice などの回路シミュレーションを駆使することによって周波数特性だけでなく過渡特性を含め最適な方式を設計することが可能だが, パラメータが多くなると最適解を求めるにはかなりの時間が必要な場合もある。電源回路や充電回路も含めてワイヤレス給電の電気回路全てのシミュレーションが可能である。

図 6. ワイヤレス給電システムの設計検証と妥当性検討の開発フロー

図 7. Spice による回路シミュレーション例

2.1.2 電磁界シミュレータ

マクスウェル方程式に基づく 2 次元や 3 次元回路系の電磁界解析は有限要素法や時間領域差分 (Finite-difference time-domain: FDTD) 法などの電磁界シミュレータを使うことで解くことができ, 結果を 2 次元や 3 次元の画像として得られる。

コイルサイズや波長, 伝送距離に一定の制約がある磁界共振式では, 使用周波数によりコイル形状や回路を最適なものに設計する必要がある。コイル間の空間にどのように磁界が発生して電力を送電するのか, 両コイルの位置関係を変えると効率がどのように変化するかを計測で視覚化することは困難なため, 磁界解析により送電状態での磁束密度分布を図 8 のように再現して, 最適なコイル設計ができる。

また, 実測困難な電流分布を有限要素法で解析し, 電流により形成される磁界からインダクタンスを求めることができ, コイルを実際に巻かなくても図面からインダクタンスを推定できる。

2 次コイルには, すぐれた磁気シールドも求められる。

図 8. 電磁界シミュレーションによるコイル間の磁束密度状況

図 9. 電磁界解析によるフェライトの磁気飽和検討例

EV や e-Bus における 2 次コイルの設置場所は床下となる。この場合、1 次コイルから送られてくる高周波磁束が 2 次コイルを通り越して車体の金属部分に渦電流を発生させる恐れがあり、図 4 のように 2 次コイルの直ぐ横に電池が設置されていると、電池の金属面が渦電流により異常発熱を起こして電池が発火する恐れもある。この問題の解決には、図 8 のようにアルミニウム板で磁気シールドを行うことで、1 次/2 次コイルの上下方向への漏洩磁束が少なくなることが左下のシミュレーション結果で見て取れる。

また、コイル部のコア材質には高周波のためフェライトを使用するが、図 9 のような電磁界解析を行って、最適なコア配置や磁気飽和および異常な発熱を生じない設計をする必要がある。

高周波においては導線の表面を電流が流れようとする表皮効果があり、コイルの抵抗やインダクタンスが影響を受けるため、細い導線を多数束ねたリッツ線を使用することで表面積を増して抵抗を下げている。有限要素法を用いた磁界解析により図 10 のようにリッツ線内の電流分布の偏りやジュール損失を正確に求めることができ、リッツ線の撚り方を検討したり逆位相電流の流れ易い中心線を非導体にすることなどで、コイル性能を上げる設計が可能になる。

コンバータやインバータ、整流部の電力供給ラインでは配線の断面積確保のためバスバーが使われる。バスバーを流れる高周波電流でもリッツ線同様に、表皮効果による影響が無視できず、抵抗や損失の増加が問題となる。温度や電流分布を考慮した設計が重要になるが、バスバーの形状は複雑なため、電流通電時にどの場所に電流が偏って流れ、発熱源として効くのかを事前に予測するのは難しい。電磁界解析の結果から図 11 のように角部を作らず電流が流れやすい形状にすると電流の偏りによる局所加熱が少なく

図 10. 電磁界解析によるリッツ線の電流分布

図 11. バスバーの構造

なことが分かる。また、表皮効果、近接効果の影響を低減するには、バスバーを重ねて実装すると大きな効果があることもわかる。

このようにワイヤレス給電システムの設計においては、電磁界解析は非常に重要なツールになる。

2.2 試験・妥当性検討ステージ

単体およびシステムへの試験・妥当性検討は要求仕様との適合を検証し、設計モデルベースへのフィードバックのためにも重要なものである。その中で安全性に関するものを示す。

2.2.1 電磁界強度測定

ワイヤレス給電はエネルギー伝送に必要なワイヤの制約から解放されるメリットの反面、空間に放出されるエネルギーによる電磁環境が他のシステムに影響を及ぼす可能性が存在するため、電磁両立性 (Electro Magnetic Compatibility: EMC) の確立が課題であり、使用に当たっては各国の電波法などの規制を受ける。わが国では高周波利用設備として電波法第 100 条 2 項と電波法施行規則第 45 条 3 項により 10 kHz 以上の高周波電流を利用して出力が 50 W を超えるものは、各地の総合通信局に設置許可申請を提出して個別に許可を受ける必要がある。しかしながら、1 台ごとに設置申請/許可をしていたのでは普及の足かせになってしまう。そこで、ワイヤレス給電を対象にした明確な規制やカテゴリーを決めるため、2013 年 6 月から総務省の電波利用環境委員会にて利用可能な周波数と発生する電磁波の許容値などに対する制度化が検討され、2016 年 3 月に高周波利用設備の型式指定の一部を改正する省令が出された。この省令の中で、家電機器用のものとともに世界に先駆け EV 用ワイヤレス給電システムにも型式指定の道が開かれたこ

とは画期的なことである。型式の指定が行われる条件として、電力伝送方式は磁界結合方式（電磁誘導式、磁界共振式）、伝送電力は3 kW 程度（最大7.7 kW）、コイル間距離は0~30 cm 程度で、周波数は79 kHz~90 kHz である。

EMC は狭義には無線通信や電子機器への干渉の問題であるが、広義には人体への影響の問題も含まれ、人体曝露に関する防護指針を満たすように世界各国で法制化されている。わが国では総務省の電波防護指針に示されているが、一般的にはWHO が推奨する国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP) のガイドラインに従い、使用周波数ごとのガイドライン数値以下にする必要がある。EV 用ワイヤレス給電システムに使われる周波数100 kHz 以下の漏洩磁界許容値は1998 年版のICNIRP では $6.25 \mu\text{T}$ であったが、2010 年版では $27 \mu\text{T}$ 以下と緩和されている。

測定例を示すと、電磁放射が大きいと言われるソレノイド型の周波数85 kHz、44 kW 出力コイルを7 m 長e-Bus に搭載し、ギャップ10.5 cm における充電時のバス車内での磁束密度は、コイルの磁束方向にある座席での数値が高かったが、それでも最大値は約 $1.1 \mu\text{T}$ と十分に小さいものであった⁶⁾。

2.2.2 コイル間の異物検知システム

ワイヤレス給電システムは、1 次コイルから空間に放出される電磁波を抑えるため、2 次コイルが無い状態では1 次コイルに通電しないようなインターフェイスを設けている。しかしながら、2 次コイルが1 次コイル上にあつて電力伝送をしている状態で、コイル間に渦電流を生じやすい形状の金属を入れると、図12 の例のように、10 kW 出力において金属タワシが1 分後に 200°C 、8 分後に 375°C まで上昇してしまう。そこで何らかの有効な異物検知(Foreign Object Detection: FOD) システムの搭載が必要となる⁷⁾。

IEC/ISO 主導で進められているEV 用ワイヤレス給電システム標準化ステージで、FOD は必須機能として論議されている。2013 International CES でQualcomm Halo がFOD 機能の付いたシステムを発表している。1 次コイル表面にルー

ブ状にメッシュを切ったアレイ板を貼り、そのループに微弱な電流を流しておき、金属がコイル上にある場合での電流の変化を検知して送電動作を停止するようにしている。これを使うことで貨幣のような小さな金属も検知、ドライバーのスマホに知らせることができる⁸⁾。

3. おわりに

自動車へのワイヤレス給電システムはe-Bus では既に実用に供されていて、EV でも国際標準規格が制定されればいつでも世に出る状況になっている。これらのシステムの設計にあたっては各種解析ソフトを駆使することで、運用中の過熱や発火対策に向けて十分な検討がなされている。また、各種試験でもその安全性は確認されている。

(2018.5.8- 受理)

文 献

- 1) http://response.jp/article/2017/07/06/297072.html?gp=1_email_20170706
- 2) 紙屋雄史，高橋俊輔，大聖泰弘：“短距離走行・高頻度充電型電動バスの性能評価（第1 報）—開発車両の長期営業運行中に得られた非接触給電装置に係る各種データの詳細分析—”，自動車技術会論文集，Vol. **46**, No. 2, 20154213, pp. 367–372, 2015
- 3) 三輪希己，呉哲棟，楊イ翔，紙屋雄史，大聖泰弘，井原雄人，尾林秀一，武 俊介：“短距離走行・高頻度充電コンセプトを採用したワイヤレス給電型電気バスの設計・試作ならびに公道走行実証試験に基づく性能評価”，自動車技術会2016 年度学術研究講演会前刷集，P, No. 6, pp. 1–4, 2017
- 4) 国土交通省都市局・自動車局：“電気バス導入ガイドライン”，2012
- 5) 高橋俊輔：“大型車両へのワイヤレス給電の動向と課題”，電子情報通信学会2018 年総合大会講演論文集，BI-9-4, pp. SS53–SS64, 2018
- 6) 平成28 年度環境省委託事業：“EV バス早期普及にむけた充電設備を乗用車と共有するワイヤレス充電バスの実証研究成果報告書”，東芝，2017
- 7) 高橋俊輔：“自動車の無線電力伝送技術とEMC”，科学情報出版，EMC，Vol. **27**, No. 10, pp. 51–65, 2015
- 8) http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1103R_R10C13A1000000

著者紹介

高橋俊輔（たかはし しゅんすけ）

1972 年早稲田大学大学院理工学研究科卒。三井造船勤務時代よりワイヤレス給電を手掛け、2003 年から昭和飛行機工業にてe-Bus およびそのワイヤレス給電システムの開発プロジェクトに参画。2013 年以降、早稲田大学でワイヤレス給電システムの研究を続ける。

図 12. 異物による誘導加熱実験結果