

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 8 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18029

研究課題名(和文)非接触給電装置の自動設計技術の開発

研究課題名(英文)Development about Automatic Design Technologies for Inductive Power Transfer Systems

研究代表者

米津 大吾 (Yonetsu, Daigo)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：20368202

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電磁誘導方式の非接触給電技術の最適設計計算手法の開発を目指した。この技術は小電力の家電製品から電気自動車に至るまで幅広い用途が考えられ、周波数の範囲も広い。検討は周波数帯域を数十kHz帯、数百kHz帯、数MHz帯に分けて行った。いずれの周波数帯においても、送・受電装置のメインとなるコイルのインダクタンスと抵抗の計算には有限要素法、FDTD法や理論計算を用い、回路計算はルンゲ・クッタ法を用いた。

本研究の成果として、いずれの周波数帯においても実験結果とよく一致する計算結果が得られ、目的である送・受電コイル間距離を100mmとした場合に電力伝送効率が90%以上となる設計に成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the optimal design method for inductive power transfer systems. This technique is increasingly being used in household appliances and electric vehicles. Also, the range of frequency applied are wide. The frequency range that examined by the researcher divided into tens or hundreds of kilohertz and several megahertz. The coil constants which play important roles in inductive power transfer systems were calculated by finite element method, finite difference time domain method. The equivalent circuits for inductive power transfer systems were calculated by Runge-Kutta method.

As a result, the calculation results such as current waveforms, output power, power factor and power transfer efficiency were good agreement with experimental results in any frequency. Moreover, optimal designs which is important for this study were performed; the power transfer efficiency was over 90% even if interval between sending and receiving devices was 100mm.

研究分野：数値電磁界解析

キーワード：非接触給電 有限要素法 FDTD法 ルンゲ・クッタ法 電力伝送効率 力率 インダクタンス 交流抵抗

1. 研究開始当初の背景

(1)小電力の家電製品、例えば電動シェーバや電動歯ブラシ、携帯電話の充電器には電磁誘導方式の非接触給電装置は使用されており、電気自動車への適用が検討され始めていた。  
 (2)前述(1)のように、電磁誘導方式の非接触給電装置は適用される電力や周波数の範囲が広く、用途により適した装置(メインは送・受電コイル)の構造・寸法や周波数の組み合わせがあると考えられた。  
 (3)用途ごとに最適なコイル構造・寸法や周波数の組み合わせを求めるためには装置の製作と実験が繰り返されることになり、これに代わって特性を予測する計算手法と自動的に設計する手法の開発が望まれた。

2. 研究の目的

(1)上記の 1.研究開始当初の背景で示したように製作する前に特性を予測するための計算手法を開発することが最初の目的である。なお、実際に適用が検討されている周波数帯域を 3 つ(数十 kHz 帯、数百 kHz 帯、数 MHz 帯)に分け、それぞれの周波数帯における計算結果と実験結果の整合性を図る。  
 (2)上記(1)の計算手法により得られた結果が実験結果と一致することを確認した後は最適なコイル構造と寸法、周波数の組み合わせを設計する手法を開発することである。また、電磁誘導方式の非接触給電装置は送・受電コイルがメインであるため、コンデンサを挿入しなければ力率が著しく低くなると考えられる。そこで、挿入するコンデンサのキャパシタンスについても設計する方法を提案する。  
 (3)上記(2)のように設計した結果から、周波数ごとの電磁誘導方式の非接触給電装置の特徴や設計方針についてまとめる。

3. 研究の方法

(1)いずれの周波数帯においても、まずはコイルを製作し、送・受電コイルの電流、電圧、電力、電力伝送効率を測定する。  
 (2)上記(1)の実験結果と同様な計算結果を得るためにはまずはコイルの自己・相互インダクタンス、抵抗を求める。数十 kHz 帯、数百 kHz 帯のこれらのコイル定数は自作した有限要素法プログラム、数 MHz 帯のコイルのインダクタンスは自作した FDTD 法プログラム、コイル抵抗は理論計算により求める。  
 (3)電磁誘導方式の非接触給電装置の等価回路に上記(2)で求めたコイル定数を代入して回路を計算する。なお、負荷が抵抗器の場合には交流理論を適用して計算する。負荷が充電電池とダイオードブリッジで構成された整流回路の場合にはダイオードが電流値に依存する内部抵抗を持つために交流理論の様な解析的な手法が使えないため、ルンゲ・クッタ法により計算した。入力電力は確実に定常状態に達したと考えられる 100 周期目の入力電圧と送電コイル電流の平均値、損失は

送・受電コイルの各抵抗と電流の 2 乗値の平均値、出力電力は入力電力から損失を引いた値、電力伝送効率は出力電力/入力電力とした。  
 (3)上記(2)のように計算した結果と実験結果を比較し、整合性を図る。いずれの周波数帯の場合においても当初は計算結果と実験結果の差異が大きかったが、その原因は送・受電コイルの相互インダクタンスの計算と実験における差異によるものであった(送・受電コイルの自己インダクタンスや抵抗の計算結果は測定結果とよく一致していた)。相互インダクタンスの差異については実験装置と計算モデルにおいて設定していた送・受電コイル間の距離にわずかな差があったためであった。この状況は、送・受電コイル間の距離が大きくなった際に実験と計算における相互インダクタンスの差異が小さくなることから確認することができた。  
 (4)いずれの周波数帯の場合においても実用的な数値として送・受電コイル間距離を 100mm、電力伝送効率が 90%以上となるコイル構造・寸法と周波数の組み合わせを反復計算により求めることを試みた。当初は遺伝的アルゴリズム等の最適化手法と組み合わせることを考えていたが 1 条件あたりの計算は短時間で終わり、また複数の条件を同一に扱えるために計算結果を確認しながら最適化を図った。また、力率・電力伝送効率を向上させるために送・受電コイル側にコンデンサを直列、あるいは並列に挿入することは効果的であるが、本研究において送・受電コイルともに直列に挿入することが最も効果的であることが確認できた。この方法は最適なコンデンサのキャパシタンス計算が容易であり、送・受電コイル間距離が大きくなった場合に特に効果的であった。

4. 研究成果

(1)本研究で開発した計算プログラムにより求めた非接触給電装置の回路定数や波形等の特性は以下のように実際に装置を製作して行った実験結果とよく一致した。  
 ①数十 kHz 帯、数百 kHz 帯の非接触給電装置において、送・受電コイル間距離を 100mm とした場合に電力伝送効率が 90%以上とな

表 1 数十 kHz 帯のコイル構造

線材	ビニル絶縁電線
線径	2mm(素線径 0.3mm の絶縁されていない素線 45 本から構成)
巻数	送電コイル：26、受電コイル：24
内径	送電コイル、受電コイルともに 91mm
外径	送電コイル：293mm、受電コイル：277mm

表 2 数百 kHz 帯のコイル構造

線材	エナメル銅線
線径	1mm
巻数	送電コイル、受電コイルともに 8
内径	送電コイル、受電コイルともに 200mm
外径	送電コイル、受電コイルともに 221.6mm

表3 数 MHz 帯のコイル構造

線材	エナメル銅線
線径	0.8mm
巻数	送電コイル、受電コイルともに5
寸法	送電コイル、受電コイルともに1辺100mm (正方形コイル)

る条件は次の通りであった。なお、数 MHz 帯の非接触給電については、送・受電コイル間距離が 30mm で電力伝送効率は 80%程度であったが、表3のようなコイル構造が得られた。

②以下のように数十 kHz 帯、数百 kHz 帯において自作した有限要素法による計算プログラムから求めた送・受電コイルの自己・相互インダクタンスは製作したコイルにおいて測定した結果とよく一致することが確認できた。

数 MHz 帯については、自作の FDTD 法プログラムにより自己インダクタンスは精度良く計算できたが、相互インダクタンスはうまく計算できていない。なお、1巻コイルの送・受電コイルの自己インダクタンスの計算結果が 396nH に対して、送電コイルの自己インダクタンスの測定結果は 396nH、受電コイルの自己インダクタンスの測定結果は 413nH であった。複数巻になった場合の自己インダクタンスは巻数の2乗を1巻の数値にかけて算出することができる(相互インダクタンスは測定値を代用した)。

表4 数十 kHz 用のインダクタンスの比較 (送・受電コイル距離を 12mm とし測定)

	測定値	計算値
自己インダクタンス (送電コイル) $L_1$	126 $\mu$ H	125 $\mu$ H
自己インダクタンス (受電コイル) $L_2$	104 $\mu$ H	104 $\mu$ H
相互インダクタンス $M$	84.8 $\mu$ H	84.8 $\mu$ H

表5 数百 kHz 用のインダクタンスの比較 (送・受電コイル距離を 100mm とし測定)

	測定値	計算値
自己インダクタンス (送電コイル) $L_1$	31.5 $\mu$ H	31.8 $\mu$ H
自己インダクタンス (受電コイル) $L_2$	32.0 $\mu$ H	31.8 $\mu$ H
相互インダクタンス $M$	3.48 $\mu$ H	3.48 $\mu$ H

③送・受電コイルの抵抗の計算結果は送・受電コイルを配置した状態で測定できないことで測定結果と比較できないが、送電コイルのみを配置した場合の抵抗の計算結果と測定結果の比較を以下に示す。いずれの周波数帯においてもコイル抵抗の計算結果は測定結果とよく一致していることが確認できた。なお、コイルを単一銅線とみなした場合とリッツ線(各素線が絶縁された状態)とみなした

場合を計算し、これらの違いも評価した。

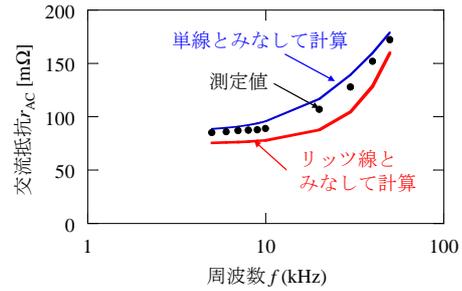


図1 数十 kHz 帯の送電コイルの交流抵抗 (有限要素法プログラムにより計算)

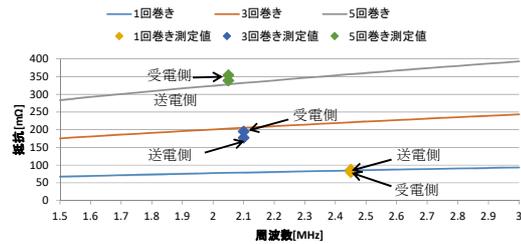


図2 数 MHz 帯の送電コイルの交流抵抗 (理論計算により計算)

④非接触給電装置の負荷としては充電回路(充電電池と整流回路の組み合わせ)が多く、計算において整流回路を構成するダイオードの特性を精度よく考慮する必要がある。ダイオードの特性は抵抗器とダイオードの直列回路に直流電圧源を接続し、印加する電圧を変えながら各部の電圧を測定することで以下のような内部抵抗の電流特性を求めた(近似曲線式を計算で用いた)。なお、非接触給電装置は高周波回路となるが、この直流特性を用いても精度良く計算できることは以下の結果から確認できる。

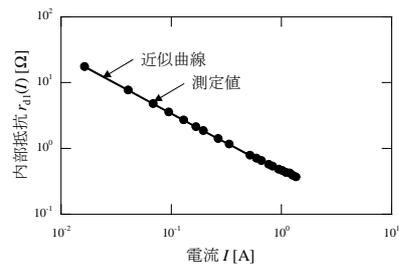


図3 ダイオードの内部抵抗

⑤力率を改善するためのコンデンサは送・受電側ともに直列に挿入する場合、最適なキャパシタンスは次式で容易に計算できた。

$$C_i = 1/(2\pi f)^2 L_i \quad (i=1, 2)$$

ここで、 $i=1$  は送電コイル側、 $2$  は受電コイル側を意味し、 $f$  は電源の周波数、 $L_i$  はコイルの自己インダクタンスである。一例として、数十 kHz 帯において得られたキャパシタンスは  $C_1=507\text{nF}$ 、 $C_2=609\text{nF}$  であった。

⑥いずれの周波数帯の非接触給電装置においても、上記(2)~(5)で求めた回路定数を代入した等価回路計算をルンゲ・クッタ法により計算することで測定結果とよく一致する電流波形の計算結果が得られた(図6中のsim●●は●●の計算結果を示す)。

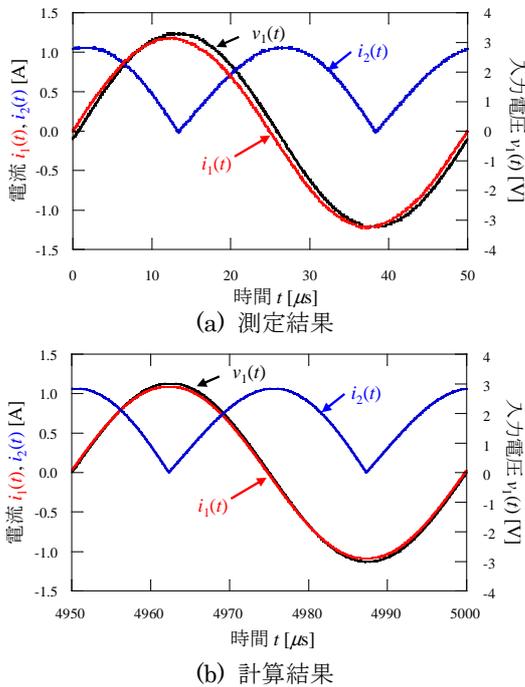


図4 数十 kHz 帯の非接触給電装置の電流波形  
(周波数:20kHz, 送受電コイル間距離:100mm)

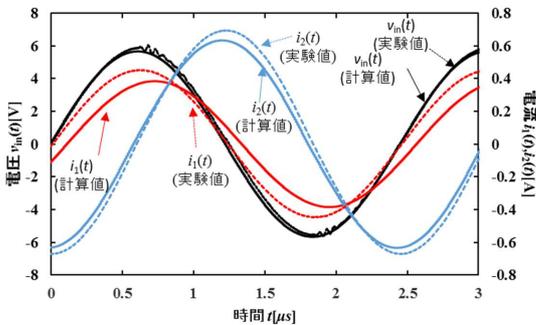


図5 数百 kHz 帯の非接触給電装置の電流波形  
(周波数:407.8kHz, 送受電コイル間距離:100mm)

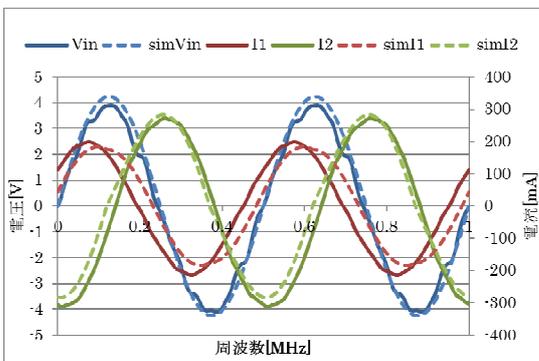


図6 数 MHz 帯の非接触給電装置の電流波形  
(周波数:2MHz, 送受電コイル間距離:6mm)

(2)上記(1)の後に各周波数帯で電力伝送効率の最適化を試みた結果について示す。

①コイル線材を単線にすべきかリッツ線にすべきかを数十 kHz 帯において検討した結果を実験結果と合わせて示す(最適化計算においては、コイルの線材を単線とした場合とリッツ線とした場合の抵抗の両方を求めている。なお、インダクタンスは線材に関係なくほぼ変わらない)。実験結果はビニル絶縁電線(各素線が絶縁されていない銅線)で作ったものであり、単線とリッツ線の間接的なものと捉えることができ、実際に測定値はこれらの中間値として値が得られている。図7、8の結果より、数十 kHz 帯においてはリッツ線の使用により若干電力伝送効率は大きくなるが、周波数が大きくなると単線の方が電力伝送効率が大きい結果となった。この結果より、数百 kHz 帯以上では単線コイルでよいと判断した(この判断は、リッツ線の素線径が 0.3mm 程度を想定した場合であり、現在素線径が 0.1mm 以下の更に細いものが登場しているが、本研究では検討が間に合わなかった)。

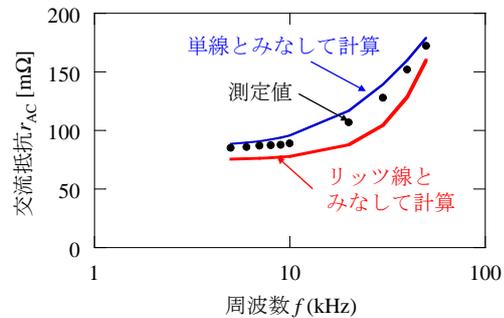


図7 コイルの交流抵抗の周波数特性

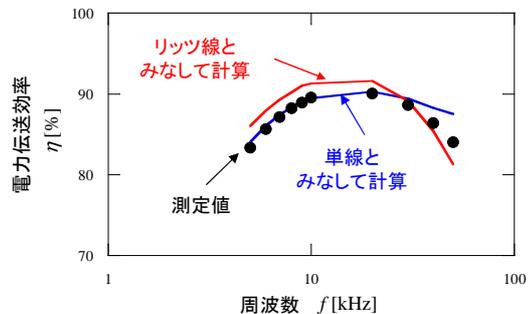


図8 数十 kHz 帯の電力伝送効率の周波数特性  
(コンデンサを挿入せずに検討した場合)

②数十 kHz 帯の最適化においては、上記①中の図8の計算結果から送・受電コイル間距離を 12mm として電力伝送効率が 90%以上確保できる周波数は 20kHz であると判断した。周波数を 20kHz に固定し、上記(1)⑤で示したコンデンサを直列に挿入して送・受電コイル間の距離を大きくした場合の結果を以下に示す。

図9より、図8と同じ送・受電コイル間距離が 12mm の場合においても電力伝送効率が増加しており、送・受電コイル間距離が

100mm の場合でも電力伝送効率は 90%以上となった。なお、図には示していないが、送受電コイル間距離を 100mm とした場合の電力伝送効率の実験結果が 91.0%(電池容量の 32%の電流を流して充電した場合)に対し、計算結果は 92.1%とよく一致している。また、出力電力の測定結果が 1.62W に対し、計算結果は 1.52W となり、両者はよく一致した。

図 10 より、送・受電コイル間距離が大きくなるほど力率が 1 に近づくことが確認された。つまり、送・受電コイル間距離が大きい方が力率・電力伝送効率を改善するキャパシタンスを高精度に設計できることが明らかとなっている。

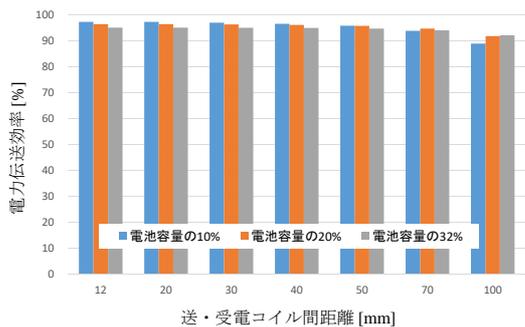


図 9 電力伝送効率と送・受電コイル間距離の関係

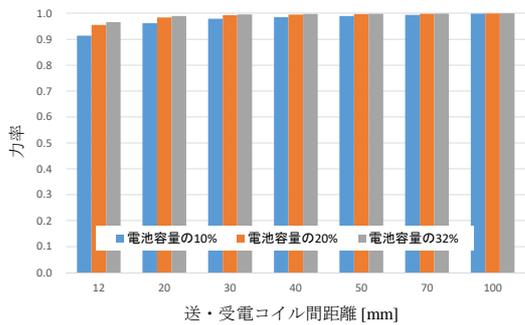


図 10 力率と送・受電コイル間距離の関係

③数百 kHz 帯の非接触給電装置については、上記①の結果を踏まえ、単線でコイルの最適化を図り、電力伝送効率の周波数特性を求めた結果を以下に示す。なお、周波数ごとに送・受電コイルに直列に接続するコンデンサ

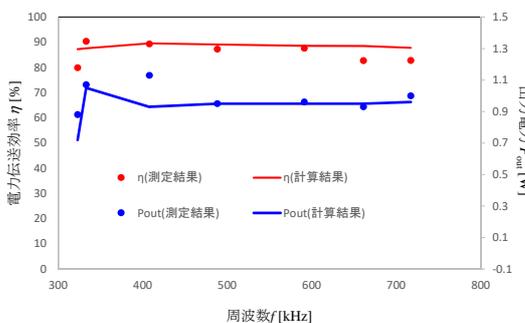


図 11 数百 kHz 帯の電力伝送効率の周波数特性 (コンデンサを直列に挿入した場合)

のキャパシタンスは上記(1)⑤の方法により変更している。

図 11 より、電力伝送効率、出力電力ともにいずれの周波数においても測定結果と計算結果はよく一致していた。更に、いずれの周波数においても送・受電コイル間距離を 100mm としたが、電力伝送効率はほぼ 90%となる良好な結果であった。

④数 MHz 帯の非接触給電装置については、送・受電コイル間距離を 100mm 離して高電力伝送効率を得ることはできなかったが、以下のような特性が実験結果、計算結果ともに得られた。

・電力伝送効率の周波数特性(図 12)と力率の周波数特性(図 13)の形はよく似ている。

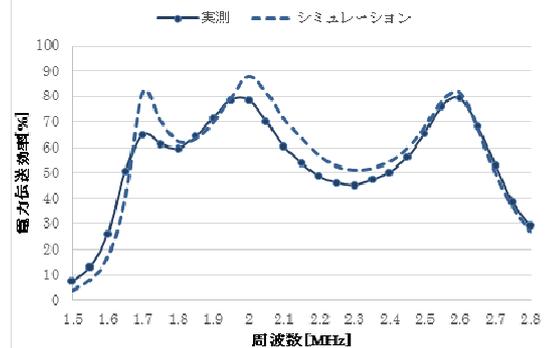


図 12 数 MHz 帯の電力伝送効率の周波数特性 (送・受電コイル間距離:6mm)

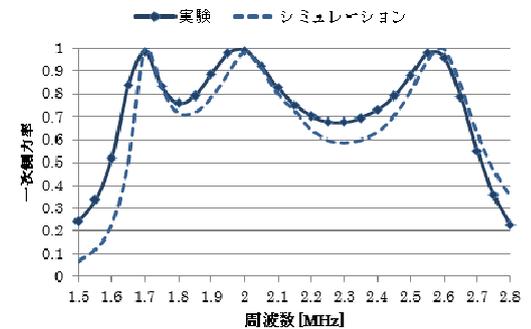


図 13 数 MHz 帯の力率の周波数特性 (送・受電コイル間距離:6mm)

・電力伝送効率が極大となる周波数が 1 つとは限らず最大 3 つあることが確認できた。

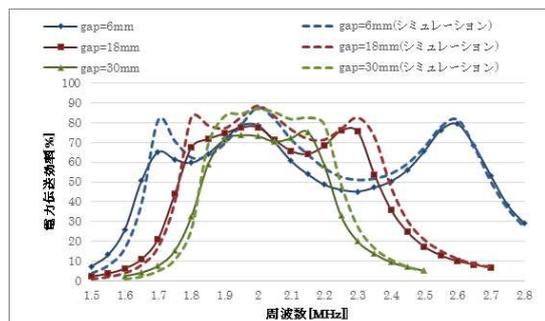


図 14 送・受電コイル間距離をパラメータとした電力伝送効率の周波数特性

また、コイルの巻数が適切な結果として、送・受電コイル間距離が変化しても電力伝送効率の最大値の変化は小さいことが明らかとなった(例えば、巻数が3の場合には送・受電コイル間の距離が大きくなると電力伝送効率は全体的に小さくなった)。

・充電池に流れる電流が大きい、つまり出力電力が大きいほど全体的に電力伝送効率が小さくなるのみでなく、極大値となる周波数以外の周波数帯で著しく電力伝送効率が小さくなるのが明らかとなった。上記②中の図9においても、送・受電コイル間距離が50mm以下の充電池に流れる電流が大きいほど電力伝送効率が小さくなるケースが多いが、図15の結果と合わせて原因は送・受電コイルを流れる電流の増加によるコイル銅損の増加のためと考えられる。なお、図9より、数十kHz帯の非接触給電装置において送・受電コイル間距離が大きくなると大電力を伝送した方が電力伝送効率が大きくなる可能性があることも確認できた。

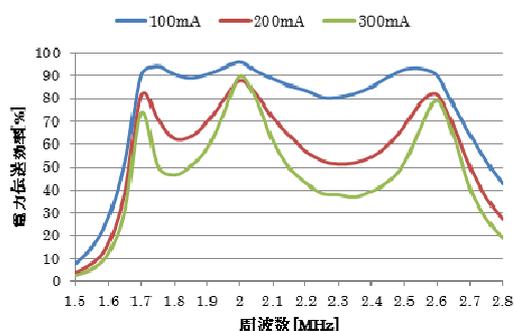


図15 充電池に流れる電流をパラメータとした電力伝送効率の周波数特性

(3)上記(2)に示した各周波数帯の非接触給電装置に関する最適化の検討結果を以下にまとめる。

①電気自動車の充電等に見られる送・受電コイル間距離を100mmとした場合については数十kHz帯、数百kHz帯ごとに電力伝送効率が90%以上となる最適なコイルを設計することができた。これらの結果からコイルサイズはいずれの場合も200~300mm程度の大きさとし、数十kHz帯(20kHzが最適)においては自己インダクタンスが数百μH、数百kHz帯(407.8kHzが最適)においては数十μHが最適である(周波数が大きくなると巻数が少なくてもよい)ことが確認できた。

②コイルに用いる線材としてリッツ線が効果的であるとされているが、素線径が0.3mmの場合には数十kHz帯において若干電力伝送効率が大きくなるものの、数百kHz帯では電力伝送効率が低下する可能性があることを示す計算結果が得られた。

③いずれの周波数帯においても送・受電側コイルに直列にコンデンサを挿入することで送・受電コイル間距離が大きくなっても高電力伝送効率を維持できることが明らかとな

った。また、これらのキャパシタンスは単純な計算式で最適値を算出できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[学会発表] (計 9 件)

① D.Yonetsu and Y.Yamamoto, Examination of the Current Dependence of Power Factor and Power Transfer Efficiency for a Non-contact Charger, The 34th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, 2015/10/13, Toyama (Japan)

② D.Yonetsu, Investigation of Relationship Between Coupling Coefficient and Power Factor for Non-Contact Chargers, IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (2016WoW), 2016/10/4, Tennessee (USA)

③ D.Yonetsu, Investigation of Current Dependence of Power Factor and Power Transfer Efficiency for Non-Contact Charger (2), The 35th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, 2016/10/27, Kyoto (Japan)

④ D.Yonetsu, Investigation about Validity of Calculation Results for Non-contact Chargers with Rectangular Voltage Source, IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (2017WoW), 2017/5/21 (Announcement date), Chong qing (China)

[図書] (計 1 件)

米津 大吾 他、電気学会技術報告 先進電磁界解析による設計高度化技術、第1391号、2016、pp.93-95

[その他] (計 3 件)

講演

① 米津 大吾、IH 調り器・非接触給電装置の高効率利用について、電気設備学会関西支部フォーラム関西第30回委員会、2015/12/9、大林組大阪本社(大阪市)

② 米津 大吾、非接触給電装置の特性予測のための解析、電力・エネルギーフォーラム第25回電磁界数値解析に関するセミナー、2015/12/15、同志社大学東京オフィス(東京都)

記事

① 米津 大吾、有限要素法による非接触充電装置やIH 調り器に用いられるコイル抵抗の簡易計算法、JECTEC NEWS、Vol. 77、2016、pp. 3-6

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

米津 大吾 (YONETSU, Daigo)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：20368202