

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289115

研究課題名(和文)非接触給電におけるパワーマネジメント技術基盤の確立

研究課題名(英文)Fundamental Technology Establishment of Power Management for Contactless Power Supply Systems

研究代表者

関屋 大雄 (Sekiya, Hiroo)

千葉大学・融合科学研究科(研究院)・教授

研究者番号：20334203

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では送電・結合・受電と3つのパートに分けることができる非接触給電を「ひとつのシステム」としてモデル化・最適化し、そのパワーマネジメント技術を確立する理論構築を行った。具体的には(1)物理学に立脚した磁界結合部のモデリング(2)3つのサブシステムを統合したDC-DC非接触給電システムの提案とモデル化(3)非接触給電におけるエネルギー散逸構造の解明(4)パワーマネジメントの確立の4テーマについて検討した。結果として、最大効率の理論限界を押さえた上で非接触給電を設計することが可能となった。具体的な非接触給電パワーマネジメントシステムを設計・実装し、理論の妥当性を確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to establish the power management architecture for contactless power supply systems. Concretely, we achieved: (1) modeling of magnetic coupling part based on physics, (2) optimization method for maximizing the power delivery efficiency of DC-DC contactless power supply, (3) theoretical clarifications of power dissipation mechanism, and (4) establishment the power manage system design theory for contactless power supply. It becomes possible from the results of this project to design the contactless power supply with theoretical limitation of power delivery efficiency. The established theory was verified from the comparisons of experimental measurements, which showed the quantitative agreements.

研究分野：非線形回路理論

キーワード：非接触給電 無線電力伝送 制御 磁性素子設計 効率最大化

1. 研究開始当初の背景

2007年、マサチューセッツ工科大学(MIT)の磁界共鳴結合の論文発表以降[A]、非接触給電(ワイヤレス給電)の開発環境は劇的に変化し、現在さまざまなアプローチのもと実用化を見据えた研究開発が進められている。現在、身の回りのほとんどがそのエネルギー源として電気を利用しており、かつその給電はケーブルを介して行われていることを考えると、非接触給電の生み出すインパクトは計り知れない。大電力から小電力なものまで、そのアプリケーションは枚挙にいとまがない。通信の無線化により社会が劇的に変化したような、もしくはそれ以上のインパクトを社会に与えることが期待される。

国内における本分野の研究は、アンテナ分野・マイクロ波分野が主導し、特に磁界共鳴方式における磁界結合部の伝送効率を向上すべく、分野の垣根を越えた検討が行われている。本研究では、伝送能力、伝送効率の面で応用範囲が広いとされている磁界結合・磁界共鳴方式についての研究である。

非接触給電の多くのアプリケーションでは、図1に示すように、送電側では直流(DC)を交流(AC)に変換し、受電側でACをDCに変換する必要がある。このとき、送電器、受電器を適切に設計しないと、磁界結合部の伝送効率改善の努力を帳消しにする電力損失が送受電器に発生し、伝送効率の大幅な劣化を招く。また、負荷側にモーターやバッテリーが接続されるATMやセンサネットワーク用センサへの給電では、負荷変動に対する制御技術の開発が欠かせない。これら、電力損失の削減、負荷変動に対する電圧制御などのパワーマネージメントはパワーエレクトロニクス分野が得意とする領域である。しかし、現状はパワーエレクトロニクス分野からの非接触給電への技術基盤が不十分なため、パワーマネージメントの重要性は誰もが認識するところでありながら、その研究開発はほぼ手つかずの状態にある。

2. 研究の目的

申請者はそれまで非接触給電を共振型DC-DCコンバータとみなして、パワーエレクトロニクスの視点から伝送効率の向上を図ってきた。しかし送電器、受電器の電力変換効率の向上を目指す、逆に磁界結合部に大

きな電力損失が発生し、非接触給電システム全体の電力伝送効率が劣化することが分かってきた。つまり、送電器、磁界結合部、受電器の各サブシステムで最適設計を手掛けても、システム全体での最適設計手法を確立しなければ、非接触給電システム全体の伝送効率の向上は望めない。したがって、物理現象としての磁界結合部と回路工学としての送電器、受電器設計を同じ土俵に上げ(具体的には磁界結合部の振舞いを回路言語で表現する)、その中でパワーマネージメント技術を構築する必要があるとの着想に至った。本研究では非接触給電を「ひとつのシステム」としてモデル化し、そのパワーマネージメント技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

以下の課題について、あらたな提案、技術開発を進め、理論解析に加え、実験、シミュレーション面からの実証的研究を進める。

(1) 物理学に立脚した磁界結合部のモデリング：高周波数磁性素子では、表皮効果、近接効果に伴う交流銅損の影響が顕著になり、この解析式が必要である。そこで、磁界結合部をマグネティクス分野の視点から、弱結合高周波トランスでモデル化することを提案する。自己インダクタンス、寄生キャパシタンス、等価直列抵抗、そして結合係数を物理法則から理論的に導出する。

(2) 3つのサブシステムを統合したDC-DC非接触給電システムの提案とモデル化：磁界結合部をトランスでモデル化することにより、送電器、磁界結合部、受電器を集中定数回路モデルで表せる。パワーエレクトロニクス分野のノウハウを用いて、システム全体の解析モデルを構築する。

(3) 非接触給電におけるエネルギー散逸構造の解明：非接触給電の直近の研究課題は、電力伝送効率の最大化である。また、システム構成が与えられたとき、そこから取り出せる最大出力電力を理論的に導出できる価値は高い。そこで、非接触給電のエネルギー散逸構造を回路理論の立場から明らかにする。

(4) パワーマネージメントの確立：最大電力伝送効率を達成するシステム設計理論を構築する。さらに、負荷変動、結合部の位置ずれなどに対し、所望の電力を達成しつつ高効率特性を達成する制御機構を構築する。

4. 研究成果

(1) 磁界結合部のモデリング

高周波数非接触給電システムではコアを用いず空芯コイルを用いることが多い。高周波数に対応するコア材が限定されること、また、ワイヤレス給電の実用面を考えたとき、所望の形状にマッチしたコアが容易に手に入らないことなどがその理由としてあげられる。空芯コイルを用いるとコア損は零となる。一方で、十分なインダクタンス値をとるためにワイヤ長を長くする必要があり、コイ

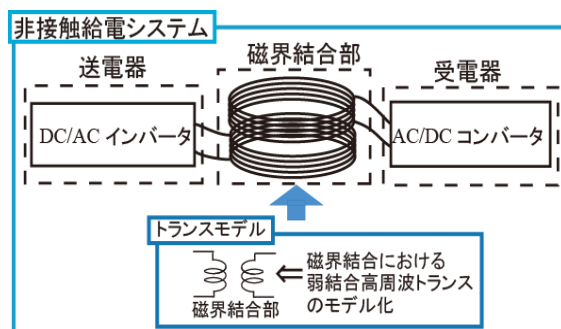


図 1: 磁界結合非接触給電システム

ルの直流抵抗が増大する。また、高周波数・大振幅正弦波は表皮効果・近接効果による交流損が発生する環境であり、非接触給電における共振電流が流れるトランスコイルはもっとも悪条件となる。以上の理由より、共振型コンバータの実装では無視することができたコイルの等価直列抵抗成分を無視できなくなる。したがって、非接触給電の疎結合のトランスのモデル化において結合係数 k のトランスだけでなくその等価直列抵抗を回路図上に明示しなければならない。円形ワイヤを用いることを仮定すると、表皮効果、近接効果に起因する交流抵抗は Dowell 方程式を変形することで近似的に

$$r_{ac} = r_{dc} A \left[\frac{\sinh(2A) + \sin(2A)}{\cosh(2A) - \cos(2A)} + \frac{2(N_l^2 - 1) \sinh(A) - \sin(A)}{3 \cosh(A) + \cos(A)} \right]$$

と表せる。ここで、

$$A = \left(\frac{\pi}{4} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{d}{\delta_w} \sqrt{\eta_p} = \left(\frac{\pi}{4} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{\pi \mu_0 f d}{\rho_w} \sqrt{\eta_p}$$

であり、 r_{dc} 、 d 、 δ_w 、 μ_0 、 ρ_w 、 f 、 η_p 、 N_l はそれぞれ、ワイヤの直列抵抗、ワイヤの直径、表皮深さ、真空の透磁率、ワイヤの抵抗率、流れる電流の周波数、導線の隣接係数、コイルのレイヤ数である。右辺第一項が表皮効果による影響、第二項が近接効果による影響を示している。これらの関係式は周波数が高くなるほど表皮効果の損失が高くなり、また、コイルのレイヤ数の二乗に比例して近接効果による損失が増大することを示している。また、有限長ソレノイドの自己インダクタンスは長岡係数を用いた理論式、相互インダクタンスはノイマンの公式によるものを用いると、図2-4のように実装と精度よい一致を見せることが明らかとなった。これにより、無線結合部のワイヤサイズ、コイル半径、コイル高等の物理パ

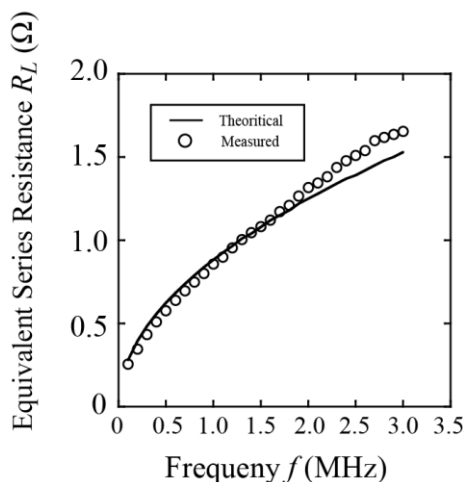


図 2: 周波数に対するコイルの等価抵抗の特性

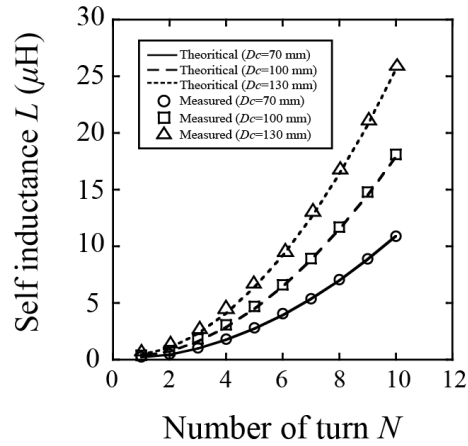


図 3: 周波数に対するコイルの等価抵抗の特性

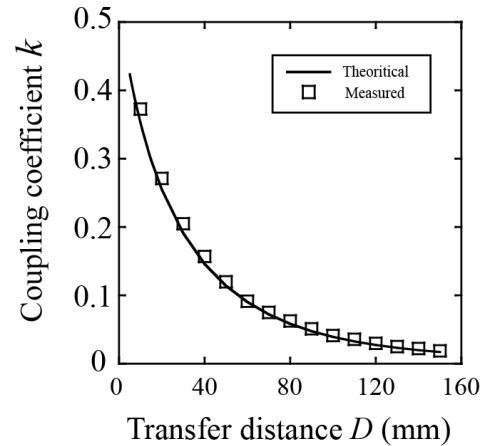


図 4: 結合距離に対する結合係数(相互インダクタンスと自己インダクタンスより導出)

ラメータと回路パラメータの関連付けを行うことが可能となった。

(2) 3つのサブシステムを統合した DC-DC 非接触給電システムの提案とモデル化

フェーズ (1) の研究成果により図 1 の DC-AC インバータ、無線結合部、AC-DC コンバータのすべてを回路パラメータで表現できるようになった。したがって、3つのサブシステムを統合したシステム最適化設計が可能となる。図 5 に本研究で設計した E² 級非接触給電の回路図を示す。このシステムは E 級インバータ、無線結合部、E 級整流器からなるシステムである。(1) で得られた物理モデルを用いると、例えばコイルサイズを指定すれば、物理的制約を満足する中で理論上最大効率を達成するワイヤ線の太さ、コイルの巻き数、レイヤ数、およびインバータ、コンバータの素子値を求めることができる。

上述の計算は最適化問題となり、本研究では Particle Swarm Optimization(PSO)を用いることで最適化を行った。図 6 に設計・実装した非接触給電システムを示す。本設計では、無線結合部のコイルが、箱のサイズに収まることを制約条件とした設計最適化を行って

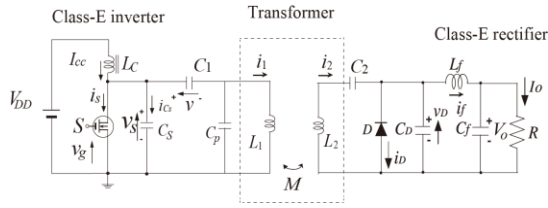


図 5: E²級非接触給電システム

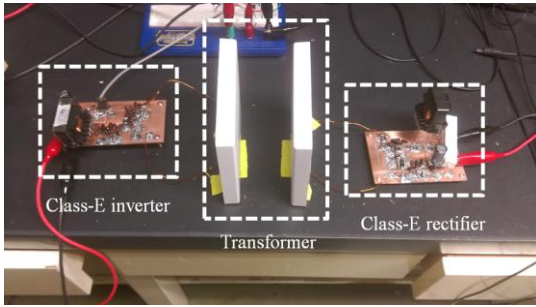


図 6: 実装システム

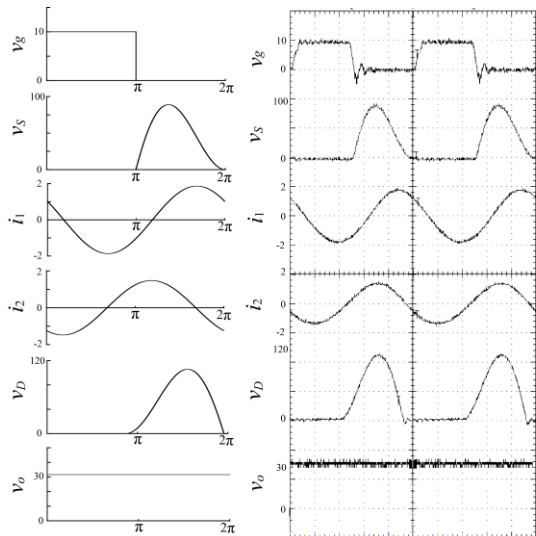


図 7: 理論波形(左)および実験波形(右)

いる。また、実験波形を図7に示す。実験波形はE級動作条件と呼ばれる高効率スイッチング条件を満足している。図6実装システムにおいて、周波数1MHz、コイル間距離6cm、コイルの最大直径119mm、コイルの最大高さ13mm、出力電力20Wのシステムにおいて、81.4%の電力伝送効率を達成した。理論による効率は82.7%であった。理論と実測地はよく一致しており、設計手法および無線結合部のモデル化の妥当性が示された。

(3) 非接触給電におけるエネルギー散逸構造の解明

非接触給電のエネルギー散逸構造についてまだ明確になっているとは言えず、ここでは、解析的に散逸構造を明らかにし、また効率特性を定量的に導出する手法を確立した。図5の非接触給電システムを例に検討を進

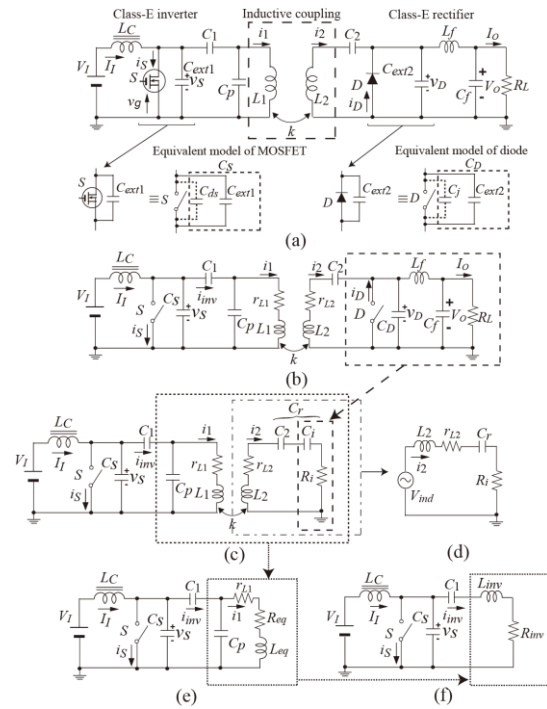


図 8: 等価モデル導出過程

めた。図8は解析における等価モデル導出過程を示している。解析はE級整流器側から定常解析を進め、E級整流器を図8(c)のように等価抵抗とリアクタンスで表現する。このとき、整流器の等価キャパシタと2次側共振キャパシタ、さらに2次側コイルとで動作周波数で共振を取ると、その等価抵抗である図8(e)のReqが最大になることが解析的に導出できる。

非接触給電の電力損失の要因としては、スイッチング損失、各素子の導通損、ダイオードの降下電圧による損失が挙げられる。解析の結果、非接触給電においては、図8(e)で示されるコイルの等価抵抗と2次側の等価抵抗との比で表現される電力損失が、システム損失の多くを占めることが明らかとなった。これは、非接触給電の特徴である、小さな結合係数により、2次側の等価抵抗が小さくなるのが非接触給電システムの効率劣化の本質である。磁界結合方式と磁界共鳴方式の違いはここにあり、磁界共鳴方式は2次側で共振をとることにより、その等価抵抗が最大化されることにより、結果として伝送距離が延びると説明できる。

導出した解析モデルは上記エネルギー散逸要因をすべて網羅しており、図9、10のように、パラメータ変動に対する電力伝送効率の変化を定量的に捉えることができおり、これによって、エネルギーの散逸構造を解析的に把握することができた。パラメータ変動におけるスイッチング状態の変動をパラメータ空間上に捕らえることが可能となり、高効率設計への大きな指針となる。

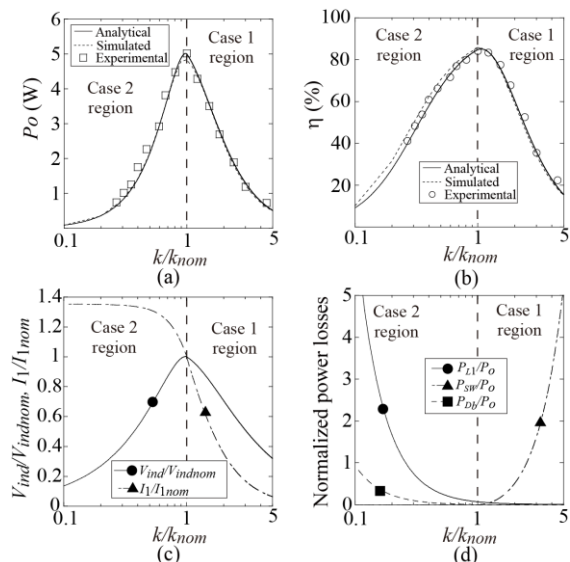


図 9: 結合係数の変動に対する E² 級非接触給電システムの特性 (a) 出力電力 (b) 電力伝送効率 (c) 2 次側へ送られる電流および電圧 (d) 主な電力損失

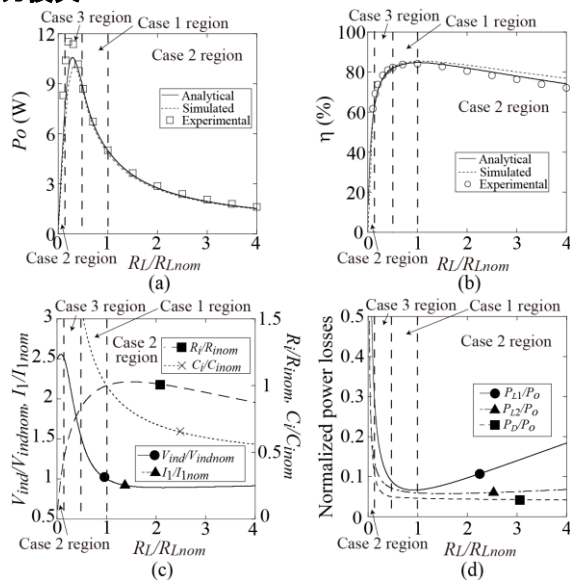


図 10: 負荷変動に対する E² 級非接触給電システムの特性 (a) 出力電力 (b) 電力伝送効率 (c) 2 次側へ送られる電流および電圧 (d) 主な電力損失

(4) パワーマネージメントの確立

(3) において、パラメータ変動に対する回路の特性を解析的に把握することができた。また、効率の散逸構造を調べることで、パラメータ変動時の電力伝送効率の劣化はスイッチング損失の増加が最大の主要因であり、また 2 次側等価抵抗の減少に伴うコイルの寄生抵抗における導通損が支配的であることが明らかとなった。つまり、非接触給電のパワーマネージメントシステムとして、DC-AC インバータのソフトスイッチングを達成しつつ、2 次側の等価抵抗を最大化する MIMO 制御を行うべきであるとの結論が導かれる。

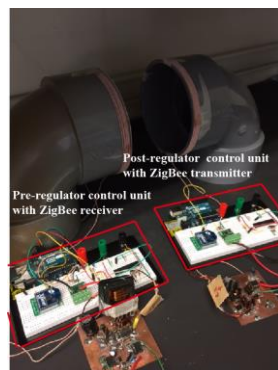
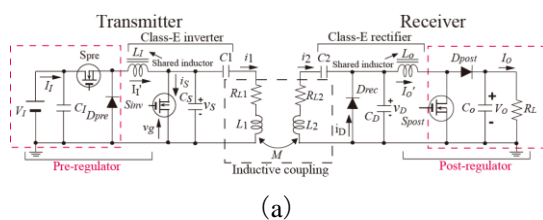


図 11: 制御機構を付加した E² 級非接触給電システム (a) 回路構成 (b) 実装例

この問題を解決する制御機構として、図 5 の非接触給電システムの前段と後段にスイッチング DC-DC コンバータを付加した図 11 に示す回路構成を提案した。このシステムにおいて、定出力電圧となるように後段のコンバータが動作し、また、入力電流が最小となるように前段のコンバータが動作すると、結果として定電圧を達成する中で、最大効率を達成する制御を実現することができる。後段の制御情報は ZigBee などの無線通信機能を用い一次側に送信することとする。

このとき、初期の設定において (2) の成果を用いて、理論上最大効率となるように定格動作を設計することを考える。(2) で確率した設計手法に従えば、定格動作において 2 次側の等価抵抗が最大化され、かつ E 級動作条件を満足する。ここで、制御機構を加えた図 11 のシステムは常に効率最大となるように動く。結果的に図 12 に示す DC-AC インバータはソフトスイッチング (この場合は E 級スイッチング) を常に達成することになる。これは、2 次側でインピーダンス変換が実現され、2 次側の等価抵抗が常に最大となるように動作することを示している。つまり、実際の回路動作は、2 次側の等価抵抗が最大となるように動作するように後段のコンバータが動作し、所望の出力電圧を達成するように、前段のコンバータで電圧調整をしている、と読み替えることができる。これは (3) の成果より導き出された設計すべき制御機構の目標を満足しており、非接触給電の制御方式として有力な手法と言える。ただし、前段と後段に付加する二つのコンバータはあらたなエネルギー損失源となるため、コンバータの動作周波数なども含めたあらたな最適設計が必要となり、今後の課題となる。

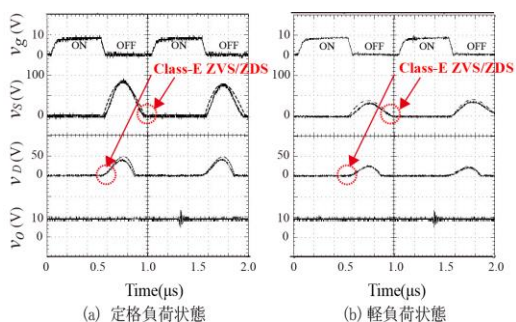


図 11: 実験波形と理論波形 (a)定格負荷状態 (1MHz、5W) (b)軽負荷状態 (1MHz、1W)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

[1] T. Nagashima, X. Wei, E. Bou, E. Alarcon, M. K. Kazimierczuk, and H. Sekiya, “Steady-state analysis of isolated class-E² converter outside nominal operation,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 3327-3238, Apr. 2017.

[2] X. Wei, H. Sekiya, T. Nagashima, M. K. Kazimierczuk, and T. Suetsugu, “Steady-state analysis and design of class-D ZVS inverter at any duty ratio,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.31, no.1, pp.394-405, 2016.

[3] T. Nagashima, X. Wei, E. Bou, E. Alarcon, M. K. Kazimierczuk, and H. Sekiya, “Analysis and design of loosely inductive coupled wireless power transfer system based on class-E² DC-DC converter for efficiency enhancement,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I: Regular Papers*, vol.62, no.11, pp.2781-2791, 2015.

[4] Y. Yamada, T. Nagashima, Y. Ibuki, Y. Fukumoto, T. Ikenari, and H. Sekiya, “Design of a DC-DC converter with phase-controlled class-D ZVS inverter,” *IEEE Journal Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 5, no. 3, pp.354-363, 2015.

[学会発表] (計 19 件)

[1] T. Noda, T. Nagashima, X. Wei, and H. Sekiya, “Design procedure for wireless power transfer system with inductive coupling-coil optimizations using PSO,” *2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2016)*, pp.646-649, May 2016.

[2] T. Nagashima, X. Wei, and H. Sekiya, “Class-E² inductive power transfer system with pre- and post-regulators,” *4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA2015)*, Nov. 2015.

[4] T. Noda, T. Nagashima, and H. Sekiya, “A design of inductively coupled wireless power transfer system with coupling coil optimization,” *The 37th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC2015)*, pp.864-869, Oct. 2015.

[5] K. Inoue, T. Nagashima, and H. Sekiya, “A loosely coupled wireless power transfer system with class-DE transmitter and multiple receivers,” *The 1st Symposium on Semiconductor Power Conversion (S2PC)*, Oct. 2014.

[図書] (計 2 件)

[1] 関屋大雄, 篠原真毅監修, 電界磁界結合型ワイヤレス給電技術-電磁誘導・共鳴送電の理論と応用 第9章「ワイヤレス給電の電源と負荷」 科学情報出版, pp. 200-231, 2014年12月

[2] H. Sekiya, Y. Nishio (ed.), *Oscillator Circuits: Frontiers in Design, Analysis and Applications, Chapter 12 -Fundamental operation and design of high-frequency tuned power oscillator*, ISBN: 978-1-78561-057-8, Institution of Engineering and Technology, pp.245-266, 2016.

[その他]

ホームページ等

<http://www.s-lab.nd.chiba-u.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

関屋 大雄 (SEKIYA, Hiroo)
千葉大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 20334203

(2)研究分担者

末次 正 (SUETSUGU Tadashi)
福岡大学・工学部・教授
研究者番号: 60279255

(3) 研究分担者

魏 秀欽 (WEI Xiuqin)
千葉工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 806232009