

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14211

研究課題名(和文) 走行中電気自動車への非接触給電に向けたパルス電力技術を利用した高効率パルス給電法

研究課題名(英文) Contactless Pulsed Power Transfer System using Pulsed Power Technology for Running Electric Vehicle

研究代表者

伊藤 弘昭 (ITO, Hiroaki)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：70302445

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、電気自動車の問題点である航続距離の短さ、充電時間などを解決するため、電気自動車への新たな給電法として、低結合トランスによる電磁誘導を利用した走行中電気自動車へのパルス給電法を提案し、実験を通して検証を行った。空心トランスやケイ素鋼板コアを用いたトランスで給電システムを試作し、実験を行った結果、提案した給電法はエネルギー伝送が可能であることが実証でき、転送効率のトランス結合係数や回路素子の依存性を測定し、各結合係数に対して最大になる回路素子の組み合わせがあることがわかった。また、コイルの位置ずれに対する転送効率の評価やケイ素鋼板トランスの磁気応答性や動作パラメータの評価も行った。

研究成果の概要(英文)：We developed a new type of the contactless power transfer system via the electromagnetic induction to charge electric vehicles (EVs). In the system, the primary coil is installed on the road and the secondary coil is mounted on EV, and has an air gap between the coils. The characteristics of the proposed capacitive charge transfer circuit was evaluated by the numerical simulation and experiment. Experimental and simulation results showed that the charging energy in the capacitor of primary circuit was efficiently transferred to the capacitor in the secondary circuit through the transformer with low coupling coefficient. We could get the important results that the power transfer efficiency reaches the maximum at  $C1L1/C2L2 = 1.25$ . We also evaluated the characteristics of transformer with ferromagnetic core, and an air core transformer to develop the transformer with large air gap. Dependence of the coupling coefficients on the air gap length was investigated for both of transformers.

研究分野：電力応用工学

キーワード：非接触給電 走行中電気自動車 容量移行 パルス電力技術

### 1. 研究開始当初の背景

産業革命以降、世界のエネルギー消費および、地球温暖化の原因であるCO<sub>2</sub>排出量は増加しつづけており、人類の生活環境や生態系への深刻な影響が懸念されている。CO<sub>2</sub>排出の20%は、運輸部門が占めており、自動車産業にとってCO<sub>2</sub>削減は非常に大きな課題である。

排ガスを全く排出せず、エネルギー効率が高い電気自動車(EV)が、環境・省エネルギーの観点から次世代自動車として期待されている。しかし、電気自動車には「航続距離の短さ」、「充電時間が長い」、「給電ステーションの設置」という問題がある。現在、これらの問題を解決するために蓄電池の性能向上に向けた研究や給電ステーションの設置が行われている。現在、充電時間は給電ステーションの急速充電器においては約30分であり、家庭用電源では8~9時間かかる。また、給電方法は充電ケーブルを利用する有線方式であるため利便性が悪い。このため、利便性、プラグの抜忘れ、急速充電による大電力化の考慮などの多くの点で、非接触の給電方式が有望されており、プラグレス(非接触)給電システムの開発が国内外で積極的に研究・開発が行われている。

非接触給電方法としては、レーザー方式、マイクロ波方式、エバネッセント波方式、磁界共鳴方式、電界共鳴方式、電磁誘導方式があり、伝送距離と伝送電力の関係から、停車時の電気自動車への非接触給電においては電磁誘導法での実現を目指しているが、給電コイルと受電コイルの位置ずれによる電力伝送の低下の問題があり、自動運転による停車位置制御での対応を目指している。一方、走行中の電気自動車においては電磁界共鳴方式や電磁波方式があるが、前者は大電力を伝送できない、後者は電力から電磁波の変換効率が悪いなどの問題点があり、実用化には至っていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

走行中電気自動車に大電力を伝送できる可能性がある方法としては、1次側と2次側の間に空隙を設けたトランスで電力を供給する電磁誘導方式に限られる。しかし、この電磁誘導方式は1次-2次間の空隙の増加や位置ずれによって、1次-2次間の結合係数が減少して高効率で電力を転送することができない。このため移動する電気自動車と道路に設置されたトランスの間の位置関係は時間的に変化するため、従来の電磁誘導方式によるエネルギー転送システムでは給電は困難と考えられてきた。そのため走行中の非接触給電でのエネルギー伝送は取り組まれた事例はない。

本課題では、大電力を高効率で走行中電気自動車へ転送する非接触給電システムの実現を目指し、これまで不向きと考えられてきた電磁誘導方式を用いた電力供給装置の開発に取り組み、実験を通してその可能性の実証を目指す。提案する非接触給電装置は、重共振

法による低結合係数トランスに容量移行を組み合わせたパルス給電であるので、電磁誘導方式の欠点を克服し、空隙を有する低結合トランスでも高効率で電力を転送できる。

本課題では、走行している電気自動車への給電装置開発に向けて、電磁誘導方式が抱えている給電用トランスの位置ずれによる結合係数低下の問題を解決するために、位置ずれが問題とならないような短い時間で供給すればよいとの着想のもとに容量移行によるパルス給電を取り入れた。また、1つの給電装置で電気自動車を充電するのではなく、50m程度の給電専用レーンを設けて給電装置を多数配置することで走行中電気自動車を充電するシステムを考えている。例えば、高速道路に給電レーンを設け、10cm程度の空隙を介して中央分離帯などの壁(車道に埋め込んで良い)に設置された給電トランスの1次側巻線から車載の2次側巻線に1ms程度の時間内に1kJ程度のエネルギーをパルス的に転送し、電気自動車を20~30kWに充電する給電システムを想定している。

### 3. 研究の方法

提案した非接触パルス給電法の検証実験に向けて5-10cm程度の空隙を有する低結合の空芯トランスと鉄心付きトランスを用いて下記の5項目について実験を行った。

#### (1) エネルギー転送システムの試作と評価

重共振条件を満たす空芯トランスを作製し、給電システムの模擬回路を試作し、コイル静止状態でのエネルギー転送実験を行い、その動作を確認するとともに、空芯トランスのパラメータやコンデンサの回路定数に対するエネルギー転送効率の特性を評価した。また、回路シミュレーションソフトを用いて理論的にも解析を行った。

#### (2) 鉄心の磁気応答性の評価

1ms程度の時間内に静電エネルギーを転送するため、トランスのコア材料には1~2kHz程度の高周波に対する周波数応答性が求められる。鉄心用ケイ素鋼板を用いて鉄心を試作し、その磁気特性の周波数依存性を評価した。

#### (3) 空隙のあるケイ素鋼板トランスの動作パラメータの評価

磁気ギャップを有する結合係数0.6のトランスを試作し、目標である周波数1~2kHz程度における動作確認を行うとともに、特性を評価した。

#### (4) ケイ素鋼板トランスを用いたエネルギー転送システムの評価

項目(1)で使用した試作回路に項目(3)で開発したケイ素鋼板トランスを組み込んで、コンデンサの充電エネルギーの転送実験を行い、提案するシステムの動作を確認するとともにコンデンサの充電エネルギーの転送効率を評価した。

#### (5) トランスの位置ズレに対する回路パラメータの検討

重共振時の結合係数条件  $k=0.6$  からのずれに対するエネルギー転送への影響を調べるため、水平方向、および垂直方向の位置ずれに対する回路動作を検証した。

#### 4. 研究成果

重共振法による高効率エネルギー転送の実証実験を行うための回路を製作し、その等価回路を図1に示す。これは、道路側(一次側)と車載(二次側)とその隙間を再現できるような回路である。ここで、 $L_1$  は給電側コイル、 $L_2$  は受電側コイルである。 $C_1$  は給電側コンデンサ、 $C_2$  は受電側コンデンサである。トランスとしてパンケーキ型空芯コイルを用いた。回路パラメータは  $C_1=C_2=23.5$  nF、 $L_1=L_2=6.8$   $\mu$ Hとし、結合係数が  $k=0.6$  になるようにコイルの空隙距離を調整した。

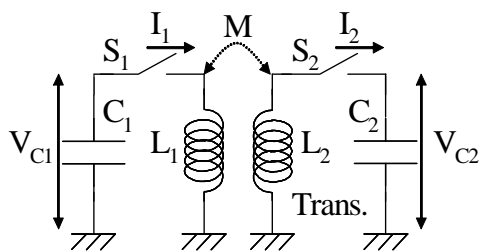


図1 提案システムの等価回路図

重共振波形において、二次側コンデンサ電圧  $V_{C2}$  の最大電圧値は第二波目に現れ、電圧伝送効率は92%であった。しかし、理論的には一次側から二次側への電圧伝送効率は100%であるが、実験では回路中に存在する抵抗成分によって効率が低下する。そのため、スイッチとして用いる半導体スイッチのオン抵抗やコイル巻線の抵抗をできる限り小さくする必要があり、空芯コイルは表皮効果を低減するためリッツ線を用いてコイルを再作製した。この実験条件において、静的状態での水平方向の位置ずれによるエネルギー転送効率の評価を行った結果、空芯コイル直径の約8%の位置ずれまでは効率はほぼ変化はなかったが、それ以上の大きさになると効率は低下した。本システムはパルス給電なので、転送タイミングが重要となり、位置ずれの許容範囲でパルス給電が行われるように、コイル設計や時間制御を行う必要がある。例えば、高速道路の設置を考えた場合、時速100kmの走行では、エネルギー転送時間1msにおいて約3cmの位置ずれが発生することになるので、この点を考慮する必要がある。

次に、0.1mm厚の鉄心用ケイ素鋼板を用いてU型鉄心を試作し、その磁気特性の周波数依存性を評価した結果、数kHzの周波数に対し、十分な磁気特性があることが分かった。次に、結合係数0.6のケイ素鋼板鉄心コイルを用いてエネルギー転送の実験を行った結果、重共振が発生してエネルギー転送を確認するこ

とができた。しかし、空芯コイルと比較すると、効率は減少してしまった。この原因は鉄心によるヒステリシス損などの影響であると考えられる。また、巻線での漏れ磁束によって結合係数を大きくすることができず、そのため空隙距離が数cmと短くなってしまった。実際のシステムでは空隙距離は10cm程度は必要と考えられるので、漏れ磁束改善対策として、トランスの巻線を導線巻線から銅板巻線に変えたり、鉄心の形状を工夫することで漏れ磁束を減少させることができた。その結果、結合係数が大きくなり、空隙を大きくすることができた。今後、さらに漏れ磁束の少ない巻線の巻き方や鉄心の形状を工夫する必要がある。

これまでは重共振条件を満たす結合係数  $k=0.6$  に着目して実験を行ってきたが、路面の凹凸などにより、車とトランスのギャップ長や水平方向のコイルの相対位置が変化するので、結合係数  $k=0.6$  以外でのエネルギー転送効率の評価が必要である。例えば、トランスに直径41cmのパンケーキ型空芯コイルを用い、空隙距離を90mmにとると、結合係数は  $k=0.3$  となる。このとき、回路素子であるコンデンサとコイルの値に対するエネルギー転送効率を測定した実験結果とシミュレーション結果を図2に示す。

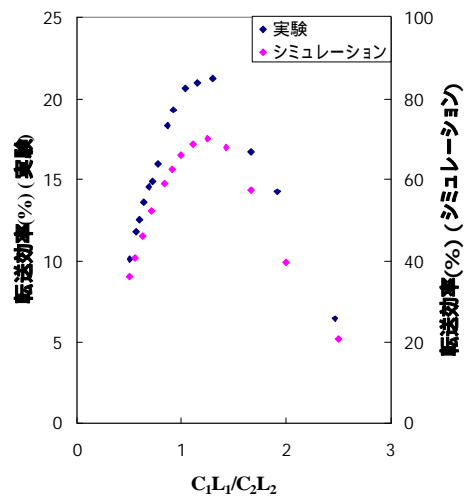


図2 エネルギー転送効率の

この結果から、エネルギー転送効率に対してLCの最適値があり、結合係数  $k=0.3$  の時は  $C_1L_1/C_2L_2=1.25$  が最適となり、エネルギー転送効率はシミュレーションでは70%になるが、実験では24%であった。この差は回路内の抵抗によるものであり、リッツ線を用いて表皮効果によるコイルの巻線抵抗を減少させると、効率は50%まで改善できた。図3にこのときの典型的な動作波形を示す。ここで、回路素子はそれぞれ  $C_1=5$   $\mu$ F、 $C_2=2.34$   $\mu$ F、 $L_1=670$   $\mu$ H、 $L_2=1120$   $\mu$ Hである。回路動作は以下のとおりである。 $C_1$  のエネルギーをスイッチ  $S_1$  を閉じることにより、トランスを通して転送する。このとき発生する受電側コイ

ルの誘起電圧を検出してスイッチ  $S_2$  を閉じる。その結果、図 3 のように電流  $I_1$  は 0.18 ms で反転し、0.36 ms で電流が零となる。このとき、 $S_1$  を開くと  $C_1$  の電圧は 50 V で保持される。また、2 次側コンデンサ  $C_2$  も  $I_2$  が零になったとき  $S_2$  を開くことで 2 次側電圧  $V_{C2}$  の電圧は 103 V に保持される。この動作を繰り返すことで、走行中電気自動車へのパルス給電を行うことができる。

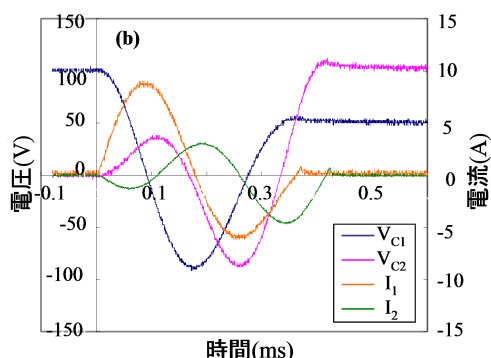


図 3 提案システムの等価回路図

また、シミュレーション結果（回路抵抗を無視）から、各結合係数に対して LC の最適値があり、 $k=0.1 \sim 0.47$  では  $C_1L_1/C_2L_2=1.25$ 、 $k=0.4$  以上では  $C_1L_1/C_2L_2=1$  で転送効率ほぼ 100 % となることがわかった。

以上の結果より、走行中電気自動車への非接触給電法として電磁誘導を使用し、パルス給電を行えることわかった。また、重共振法を使用することにより高効率でエネルギー転送でき、重共振モードからずれた結合係数においても一次側と二次側の回路を切り離すことによってエネルギー損失を減らし、二次側でエネルギーを取り出すことができた。また、半導体スイッチのオン抵抗や、コイルの巻線抵抗などの低減、コンデンサまたはコイルのパラメータを変えることによって、転送効率の向上が期待できる。

今後は、転送エネルギーの増加に向けて充電電圧の高電圧化、コンデンサの大容量化を行う必要があり、さらに、現実に近い動的な実験システムで実証実験を行うことが重要である。

## 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）

〔学会発表〕(計 2 件)

後藤大智, 伊藤弘昭, 走行時 EV 車両を想定した電磁誘導式非接触電力電送装置の製作と電装電力評価, 平成 29 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2017 年 9 月 11 日, 富山大学

D. Goto, S. Poonyaban, I. Kitamura, H. Ito, Power Transmission Efficiency Evaluation of Electromagnetic Induction Type Contactless Power Supply System for

Running Electric Vehicle under Relative Motion, 24th International Conference on Electrical Engineering (ICEE2018), 2018 年 6 月 25 日, Seoul, Korea.

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 弘昭 (ITO HIROAKI)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号 : 70302445

## 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）

〔学会発表〕(計 2 件)

後藤大智, 伊藤弘昭, 走行時 EV 車両を想定した電磁誘導式非接触電力電送装置の製作と電装電力評価, 平成 29 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2017 年 9 月 11 日, 富山大学

D. Goto, S. Poonyaban, I. Kitamura, H. Ito, Power Transmission Efficiency Evaluation of Electromagnetic Induction Type Contactless Power Supply System for Running Electric Vehicle under Relative Motion, 24th International Conference on Electrical Engineering (ICEE2018), 2018 年 6 月 25 日, Seoul, Korea.

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 弘昭 (ITO HIROAKI)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号 : 70302445