移動体負荷に対する非接触電力伝送法の基礎的検討

Method for Stable Energy Transmission to Moving Loads

佐藤文博・村上純一・松本英敏*・菊地新喜・原川健一**・佐藤忠邦***

東北学院大学工学部, 多賀城市中央 1-13-1 (〒985)

*東北大学大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (〒980-77)

** (株) 竹中工務店技術研究所, 千葉県印旛郡印西町大塚 1-5 (〒270-13)

*** (株) トーキン, 白石市旭町 7-1-1 (〒989-02)

F. Sato, J. Murakami, H. Matsuki,* S. Kikuchi, K. Harakawa,** and T. Satoh**

Dept. of Electrical Engineering, Tohoku Gakuin Univ., 13-1 Chuo 1-chome, Tagajo 985

*Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-77

**Takenaka Corp., Inzai-cho, Ohtsuka 1-5, Inba-gun, Chiba 270-13

*** Tokin Corp., Asahi-cho 7-1-1, Shiroishi 989-02

A new method of contactless energy transmission to moving loads such as electric vehicles (EVs) is proposed. Employing rectangular and spiral coils for the primary and secondary windings in our cordless power station (CLPS), we transmitted over 200 W of energy to an EV motor. The rectangular coil was used for stable transmission in the event of coil misalignment, and the spiral coil for efficient reception of flux from the primary coils. By placing many rectangular coils with their longer sides aligned with the EV's direction of motion, we caused that the energy transmitted was more or less stable with respect to displacement of the EV. A switched excitation system that we added to the primary coils enhanced the total transmission efficiency. A noteworthy feature of the system is that it is controlled by human intention. Only one coil is excited, to the one nearest to the load, to improve the overall efficiency.

Key words: cordless power station, electric vehicle, spiral coil, sensing coil, selective excitation system

1. はじめに

近年、環境問題に対する関心が高まる中、自動車から排出される窒素酸化物などにより、都市部での大気汚染が深刻化している。現在その解決策の一つとして排気ガスの噴出がない電気自動車 (EV) が提唱されている。現在の EV の位置づけとしては、既存の自動車の代用として、それと同等の能力を有すると期待されるものと、一方では、都市部での近距離移動用コミューターカーとして用いられることを想定した、小型、軽量のものの二つに分類される。前者については、現在一充電当たりの走行距離の少なさが問題になっており、また後者では、充電の方式、システムが数多く提案されているが、そのどれもが人手を介した充電であったり、充電の際に端子部が露出するなど危険な面が残っている。そこで、我々が検討してきた非接触電力伝送 (以下 CLPS と略記する)^{1), 2)} を用い、その応用の一つとして、EV、あるいは EV 搭載バッテリーへ、とりわけ走行中に非接触に電力を伝送することを試みた。CLPS は、相対させたコイル間の電磁誘導作用を用いて電力を伝送するものであり、コイル構成の自由度、電気的絶縁、耐水性などのさまざまな利点をもっている。また、パンタグラフによる電力供給と比較し

て、コイルを任意の方向に移動できる特長がある。これらが EV に組み合わせられることによって、画期的なシステムが構築されうると考えられる。そこで今回は、そのシステムを構築する上で必要なコイル構成について述べ、さらに、システム全体の高効率化と電磁雑音への影響を考慮した上で、励磁コイルを部分的に動作させる部分励磁の方法についても検討を行った。

2. コイル構成に関する検討

CLPS における送受電コイルを構成する場合、今回は受電コイルが連続的に移動することから、安定した電力を長距離にわたって供給できるようなコイル配置にしなければならない。今回は、Fig. 1 のような 250 mm × 80 mm の縦長のスパイラル

Fig. 1 Primary coil.

Fig. 2 Secondary coil.

Fig. 3 Structure of a CLPS.

コイルを送電側に、Fig. 2 のような直径 70 mm の通常のスパイラルコイルを受電側に配置することにした。このコイル構成のメリットは受電コイルが主に直線的に移動する方向（EV が主に進む方向）に送電コイルの縦長方向を配置することによって安定した電力供給を可能としたところである。今回はこれらのコイルを元に、Fig. 3 のように送電コイルを A, B, C, D としたものを基本配置とした。

2.1 コイル接続法に関する検討

今回のように、多数の励磁コイルを配置する CLPS を構成する場合、励磁コイル間の接続方法により受電側の誘起電圧分布が異なってくる。基本コイル A-B、または A-C の接続方法については、二通りの方法が考えられる。一つは、コイル間で磁束が強めあう逆ピッチ接続、一方は磁束が強めあわない順ピッチ接続である。CLPS は受電コイル面積によっても、誘起電圧分布が左右されることから、初めにサーチコイルを用いて、両接続法の誘起電圧の測定を行い、コイル接続のみによる差異を判別した。なお今回のようなコイル構成の場合、漏れ磁束が多く電圧がかかりにくい状態にあるため、ある一定磁束を出した上での受電側誘起電圧を比較することにし、入力電流 $i=1$ A とした。サーチコイルは直径 7 mm、巻数 150 とし、励磁コイルの中心部分を A→C に対して移動させた。その結果を Fig. 4 に示す。コイル A, C の継ぎ目部分において、逆ピッチでは、サーチコイル上で磁束が打ち消しあい、電圧が下がっているが、順ピッチではある程度の電圧が得られている。その他の部分においてはほとんど電圧の差異はない。送電側背面に磁性体を装着した場合でも結果は同じであった。さらに、受電コイルを用いた場合の誘起電圧の分布を Fig. 5 に示す。コイル継ぎ目における電圧分布の様子は Fig. 4 と変化ないが、全体にわたって、逆ピッチの方が高い電圧が得られている。これらにより、コイル継ぎ目部分での電圧は順ピッチに比べて逆ピッチの方が低いものの、全体の電圧の優位性と、EV 移動時のバッテリー併用を考慮して逆ピッチ接続が適当であるとした。また、磁束が強めあっているため、周囲への電磁雑音の影響も少ないと思われる。

2.2 縦長コイルの誘起電圧分布

Fig. 6 に、送電コイル A, B に対して受電コイルを移動させた場合の誘起電圧の分布を示した。なお、送電コイルは密接させ、受電コイルは Fig. 3 の Y 方向に対して移動させた場合である。ここで、Air: Air は送電側とも空心、Air: Sendust は受電側背面のみに磁性体であるセンダストシートを装着した場合である。この結果、受電コイルが送電コイル上に完全に含

Fig. 4 Distribution of the induced voltage (search coil).

Fig. 5 Distribution of the induced voltage (primary coil).

Fig. 6 Distribution of the induced voltage.

まれている部分はほとんど安定した電圧が得られていることが確認できる。また前述したように、逆ピッチ接続であることからコイル A と B の継ぎ目部分では、電圧が落ち込んでいる部分が見受けられるが、この部分に受電コイルが位置した場合には確実な電力伝送を保証できないわけであり、実際受電コイル移動時にどのような影響を及ぼすかさらに検討を加える必要がある。仮に EV の速度が、人間が歩く場合の標準的速さといわれる時速 5 km で低速走行しているとすると、コイル AB の Y 方向部分 500 mm を通過する速さは単純計算で約 0.36 秒しかかからないことになり、コイル長が大きくなった場合には、電圧の落ち込みはほとんど影響ないものと思われる。また、ちょうどコイル継ぎ目部分に受電コイルが静止した場合でも、前記のように、最終的には蓄電池との併用でシステムを構成するので、静止し続けるといったような状況は避けられると考えられる。

Fig. 7 Signal and energy flow.

Fig. 8 Excitation circuit.

3. 部分励磁に関する検討

前記のようなコイル構成により電力伝送を行う場合、送電側コイルをすべて励磁したのでは、システム全体での効率が悪い。そのため、システム効率の改善、また、周囲の磁場環境に配慮する必要から、受電コイルが上部に位置した送電コイルの

1. Sensing coil (secondary side) → Transmission of start signal
2. Sensing coil (primary side) → Reception of signal
3. Peak-hold
4. Start of excitation

Fig. 9 Selective excitation system (start).

Fig. 10 Selective excitation system (move and stop).

みの励磁を行う部分励磁の方法を採った。さらに送電コイル励磁の制御を受電コイル側から行えるようにした。これは実際には、運転者からの制御が行えるということになる。

3.1 受電側位置把握のためのセンサに関する検討

まず部分励磁を行うためには、受電コイルの位置を把握するためのセンサが必要になるが、今回はそのセンサに、簡便な小型のスパイラルコイルを用いた。Fig. 1の送電コイルとFig. 2受電コイル周囲に設けられたスパイラルコイルがそのセンサである。送電側センサに信号が入力されれば、送電側が励磁されることになる。受電側センサはFig. 2のように電力受電用コイルの周囲に設けられており a-a', b-b' が sw を介して短絡されている。電力伝送用磁束の一部 (信号) が a に入った場合は a' に出力され、b に入った信号は、b' に出力されることになる。また意図的に信号の送出を止めたければ、sw を解放することにより可能となる。これらのコイル群が、部分励磁システムにおいて果たす動作について次に説明する。

3.2 位置情報の流れ

まず初めに信号の流れをFig. 7に示す。電力伝送用磁束の流れは、送電コイルから受電コイルに向かっているが、制御信号は、それとは反対に受電側センサから送電側センサに向かっている。つまり受電側というのは、電力伝送では受電コイルであ

り、信号伝送では送電コイルになる。つまり正反対の役割を果たすコイルが一組になっている。また、実際の回路図を Fig. 8 に示す。上部が受電側、下部が送電側である。送電側センサには、peak-hold 回路が挿入されており、受電側が送電側上部に位置した場合には、送電側センサに信号が入力され、peak 値を保持し、送電コイルが励磁し続けることになる。

3.3 部分励磁システムの実際の動作

システムの具体的な動作をコイルの動きとともに Fig. 9, Fig. 10 に示す。送電コイル A, C とあるのは Fig. 3 であるところの送電側コイル A, C である。Fig. 9 はシステム起動時である。受電側に設けられた信号送出用コイルに挿入された発振回路により起動信号が送出される。送電側センサがこれを受信し、peak 値を保持し励磁が開始される。仮に受電側が右方向に移動するとした場合、センサコイル配置の構成上移動する一歩先の送電側コイルも励磁することになる。また、起動信号の送出を止めても、電力伝送用磁束の一部を受電側センサが拾っているわけで peak-hold により peak 値を保持しそのまま励磁が続くことになる。次に受電コイルが送電コイル A から C に移動した場合を Fig. 10 上図に示す。送電コイル C に受電側が移動した瞬間次の送電コイル E が励磁される。また、送電コイル A 上には何の信号入力もなされなくなり、先ほどまで保持していた peak 値が解除され励磁が止まることになる。さらに、任意に励磁を止める場合を Fig. 10 下図に示す。受電側センサの sw を解放することにより、受電側に設けられたセンサコイルからの信号送出はなくなり、送電側センサへの入力もなくなるわけであるから、peak 値が reset され励磁が止まることになる。このように受電側の移動に対して励磁コイルの切り替えが行われ、運転者本意の制御が可能となった。

4. 電力伝送特性

これらのコイル構成とシステムにより、実際に電力を伝送した場合の負荷特性を測定した。電源は実際用いると予想される定電圧源とし、コンデンサによる入力力率の改善が施してある。また送受電コイル間の gap は 0 mm, 1 mm, 2 mm とした。その結果を Fig. 11 に示す。すべての gap 値において 2 次電圧約 50 V、出力 200 W 以上で効率が約 80% 得られていることがわかる。なおこの場合の効率は、送電コイルへの入力から受電側整流回路までを含む値である。実際コンピューターカー用の

Fig. 11 Load characteristics.

EV に搭載されるモータは定格 200 W のものでも十分駆動が可能であるので、今回のコイルサイズでも EV の駆動が可能であることがわかった。

5. まとめ

今回は受電側が移動する場合を想定して（とりわけ EV に対して）CLPS を用いて、電力伝送を試みた。伝送電力については、送電コイルに対する受電コイルの面積比が 20% ながら、200 W を達成できた。これは EV の電力としては十分であるし、さらにコイル面積を増大させることにより、kW オーダの電力伝送も可能である。また部分励磁については、縦長のコイルを用い、直線方向には安定した電力を供給しながら、受電側移動時には励磁コイル切り替えが可能であった。また、センサに簡便な小型のスパイラルコイルを用い、運転者（受電側）からの励磁コイルの制御を可能とした。これらにより、システム全体の高効率化が図られたことになる。今後は、実際の EV を用い、各々の走行モードでの具体的な走行試験を行い、伝送電力の増大や、コイル情報のモニタリングなどに関して検討を進めていく予定である。

文 献

- 1) 村上純一、松木英敏、菊地新喜：電気学会マグネティックス研究会資料、多賀城、1992, MAG-92-212（電気学会、東京、1992）。
- 2) 村上純一、松木英敏、菊地新喜：日本応用磁気学会誌、17, 485（1993）。

1996 年 10 月 14 日受理、1997 年 1 月 16 日採録