

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560322

研究課題名(和文)電気自動車用双方向非接触給電装置

研究課題名(英文)Bidirectional Contactless Power Transfer System for Electric Vehicles

研究代表者

阿部 茂 (ABE, Shigeru)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70375583

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：電気自動車用非接触給電装置の中で、一次側に直列コンデンサ、二次側に並列コンデンサを配置するSP方式は使いやすい定電圧特性を持つが、双方向給電ができなかった。SP方式の二次側にインダクタを追加し、双方向給電が可能なSPL方式を開発した。3kW給電でG2Vが94.4%、V2Gが94.8%の高効率を確認した。双方向方式にはSS方式もある。非接触給電では漏洩電界強度が問題となっている。対策として2法を提案し、実験で効果を確認した。またSS方式とSP方式の漏洩電界強度を比較し、差が無いことを確認した。

研究成果の概要(英文)：A contactless power transfer system (CPT) with primary series and secondary parallel capacitors (SP topology) is useful for EV charging. However, the SP topology is not suitable for bidirectional power transfer. A novel SPL topology for bidirectional CPT systems has developed. The SPL topology is obtained by adding an inductor to the secondary side of the SP topology and the transformer of the SP topology can be used as the transformer of the SPL topology. The 3-kW bidirectional test results show that the efficiency of G2V is 94.4% and the efficiency of V2G is 94.8%, which are approximately equal to the efficiency of 95.4% for the SP topology. There is another bidirectional CPT of SS topology. As CPT has the issue of high leakage levels of electric field, two methods for reducing the leakage electric field are presented and the test results are shown. The comparison of the leakage electric field between SS topology and SP topology is also described.

研究分野：電気工学

キーワード：電気機器工学 電気自動車 電磁誘導 ワイヤレス給電 非接触給電

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題や石油への依存度を軽減するため、プラグインハイブリッド自動車や電気自動車 (以下 EV と略す) の普及が期待されている。現在は電気ケーブルとコネクタで給電する方式であるが、利便性、安全性、保守容易性を考えると、将来は図1の非接触給電方式が有望で世界各国で研究開発が進められている。

しかしこれらは電力系統から EV に充電する一方向給電 G2V が中心である。震災後明らかになったように、EV のバッテリーは電力系統の負荷平準化だけでなく緊急時の電源としても重要である。これを実現するには電力系統と EV 間での双方向給電が不可欠となる。

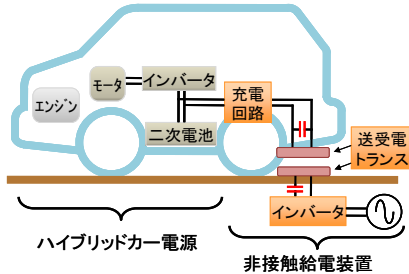


図1 EV用非接触給電方式

図1 EV用非接触給電方式

2. 研究の目的

EV 用双方向非接触給電を実現するため、高効率な主回路構成やさまざまな課題を研究し、世界標準化に貢献することにある。

3. 研究の方法

双方向非接触給電に関しては(A)Auckland 大 Madawala や(B)電力中央研究所名雪の研究がある。(A)は非接触トランスの一次側二次側共に並列コンデンサを配置する PP 方式を採用し、送電側インバータと受電側インバータの位相差と電圧差で潮流制御する方式である。(B)は一次側二次側共に直列コンデンサを配置する SS 方式で、受電側インバータはダイオードだけを動作させる方式である。しかし上記 PP 方式は送電制御が複雑であり、SS 方式は受電側が定電流特性になる課題がある。

本研究では一般の電源のように、送電側を定電圧制御すれば、受電側も定電圧特性となる方式 (理想変圧器特性) を研究する。

このため一方向給電で一般的な一次直列二次並列コンデンサ方式 SP 方式を、同じ送電トランス (図1) を利用して、双方向給電が可能な方式に拡張する。

また双方向電では送電方向 (G2V と V2G) に依らず高効率でないと実用的でない。このため双方向共に最大効率となるトランス仕様と運転条件を理論的に導く。

EV 用非接触給電では約 85kHz の高周波インバータを用いるが、世界標準化活動の中で漏洩電界強度の低減が大きな課題となっている。本研究では漏洩電界を下げるための、インバータ制御方式と主回路方式の検討も行う。

4. 研究成果

(1) SPL 双方向給電方式 理想変圧器特性を持つ方式として、当初は「LCL イミタンス変換器+SS 方式」を考えていたが、より構成が簡素でより優れた特性を持つ「SPL 方式」(図2)を考案し、特許も出願した。

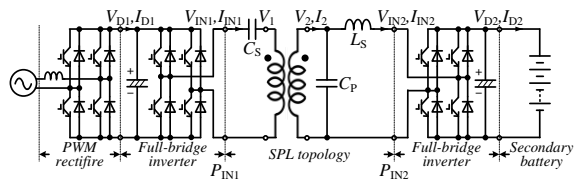


図2 SPL 双方向非接触給電方式

SPL 方式は既存の SP 方式の給電トランスをそのまま用いることができる。二次側に直列リアクトル L_s を追加し、一次側の直列コンデンサ C_s の値を少し変更し、二次側整流器をインバータに変更するだけで双方向給電が可能となるため実用性が高い。

(2) SPL 方式の最大効率運転条件 非接触給電の効率は給電電力 $P_L = V_L^2 / R_L$ (V_L : 負荷電圧)、すなわち等価な抵抗負荷の値 R_L によって大きく変化する特性がある。そこで等価回路で双方向給電 (G2V と V2G) の各給電方向での最大効率 η_{max} とその時の抵抗負荷の値 R_{Lmax} の理論式を導き、送電電圧と受電電圧と定格電力の関係を明らかにした。

表1 SP方式とSPL方式の R_{Lmax} と η_{max}

	SP(G2V)	SPL(G2V)	SPL(V2G)
R_{Lmax}	$(x'_0 + x_2) \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r'_1}{r_2} + 1}$	$\frac{(x'_0 + x_2)^2}{x'_0} \sqrt{\frac{r'_1}{r_2}}$	$a^2 x'_0 \sqrt{\frac{r'_1}{r_2}}$
η_{max}	$\frac{1}{1 + \frac{2}{x'_0} \sqrt{r'_1 r_2 + r_2^2 b^2}}$	$\frac{1}{1 + \frac{2}{x'_0} \sqrt{r'_1 r_2}}$	$\frac{1}{1 + \frac{2}{x'_0} \sqrt{r'_1 r_2}}$
R_{LmaxQ}	$\frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}$	$\frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}$	$a^2 k r'_1 \sqrt{Q_1 Q_2}$
η_{maxQ}	$\frac{1}{1 + \frac{2}{k} \sqrt{\frac{1}{Q_1 Q_2}}}$	$\frac{1}{1 + \frac{2}{k} \sqrt{\frac{1}{Q_1 Q_2}}}$	$\frac{1}{1 + \frac{2}{k} \sqrt{\frac{1}{Q_1 Q_2}}}$

また SPL 方式では G2V と V2G で最大効率となる電力は等しくなることを証明した。これは実用上極めて優れた特性である。

(3) DC-DC 間双方向給電実験 (2)の成果をもとに、インバータと車載インバータ間 (DC-DC 間) で、双方向給電の Psim による回路シミュレーションと 3kW の給電実験を行い、理論の検証を行った。

SPL 方式では、受電側インバータはダイオード動作させることで、双方向給電を行う簡単な方式である。既存の 50kHz FET フルブリッジインバータと新たに製作した 30kHz IGBT ハーフブリッジインバータで給電実験を行い、両方とも 3kW の給電実験に成功した。

実験結果は理論通りで、前者では G2V=94.4%、V2G=94.8% で従来の一方向 SP 方式の 95.4% とほぼ同じ効率を達成し、後者

では G2V=93.5%、V2G=94.4%であった。Grid 側および Vehicle 側インバータの入出力電圧は G2V と V2G でほぼ同じで、実用性の高い方式であることを検証できた。

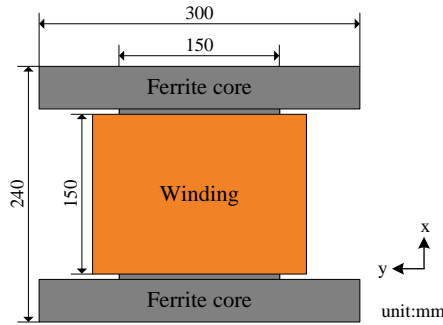


図3 実験に用いたH型トランス Gap=70mm

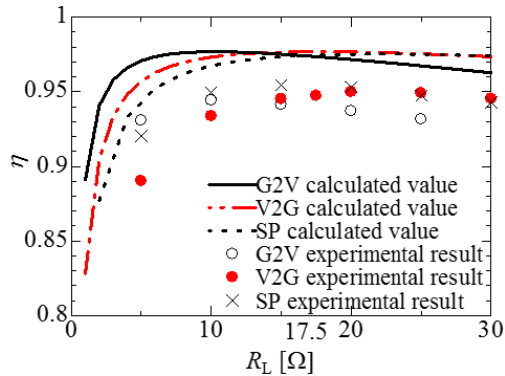


図4 SPL方式の給電電力による給電効率 η

(4) SS方式とSP方式の比較 世界標準化活動の中で双方向給電可能な単純なSS方式（一次側二次側との同じ構成のため双方向給電が容易に実現できる）の研究に注力した。世界標準化で周波数が80kHz~90kHzに決まったため、85kHzで最適なSS方式とSP方式のトランスを設計・製作し、性能を比較した。SS方式はSP方式（すなわちSPL方式）とほぼ同等の性能となることを理論と実験で確認した。

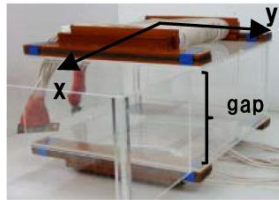


図5 トランス外形

表2 SP方式とSS方式のトランス仕様

		SP topology	SS topology
Winding	Primary	14T (4 parallel)	
	Secondary	4T (15 parallel)	14T (4 parallel)
f_0 [kHz]		85	
gap		150	
k		0.192	0.199
Q_1 / Q_2		449 / 406	460 / 480
r_1 / r_2 [mΩ]		85.8 / 7.55	81.7 / 77.4
Primary Capacitor (C_S or C_{S1}) [μF]		0.050	0.049
Secondary Capacitor (C_P or C_{S2}) [μF]		0.614	0.050
η_{max} [%]		97.4	97.9
R_{Lmax} [Ω]		15.5	7.3

表3 3kW 給電効率の比較

	SP topology	SS topology
gap [mm]	150	
P_L [W]	3000	
P_{IN} [W]	3265	3246
P_{OUT} [W]	3065	3071
V_2 [V]	236	710
I_2 [A]	75.1	19.4
η_{TR} [%]	93.9	94.6
R_L [Ω]	30	10

(5) 漏洩電界の低減法 世界標準化で漏洩電界の低減が重要な課題に浮上したため様々な低減策を検討した。発生源対策としてフルブリッジインバータのパルス幅を制御して高調波電流を抑制し漏洩電界の高調波を抑制する方法、伝搬路対策としてフェライトコアによる磁気シールドが有効であることを確認した。またSP方式とSS方式で漏洩電界に差が無いことも実験で確認した。

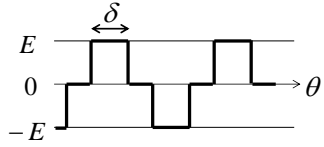


図6 パルス幅制御

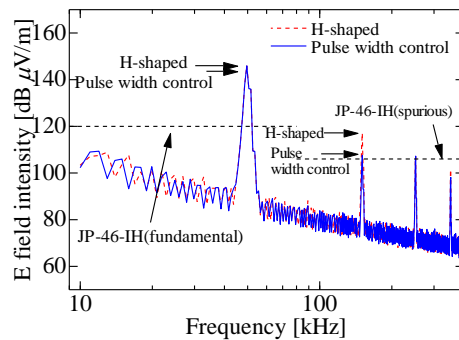


図7 パルス幅制御による漏洩電界低減

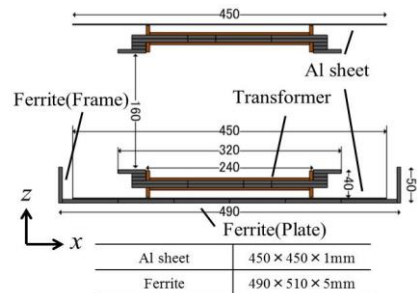


図8 フェライトコアによる磁気シールド

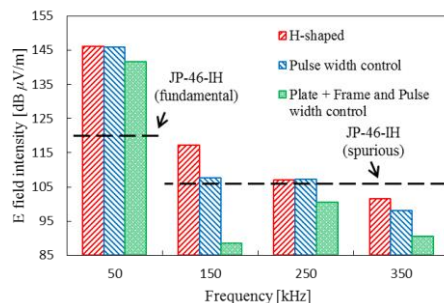


図9 漏洩電界低減策の効果

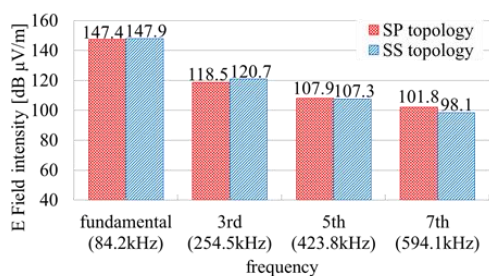


図 10 SP方式とSS方式の漏洩電界の比較

(6) EV用非接触給電の実用化に向けて 本研究でも明らかになったように双方向非接触給電は技術的には実用化可能である。しかしEV用非接触給電の実用化のためには、本質的に高い漏洩電界強度の課題を克服する必要がある。漏洩電界強度を低減する新技術開発と規制緩和が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

① Masaki Jo, Yukiya Sato, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe, Methods for reducing leakage electric field of a wireless power transfer system for electric vehicles, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2014 IEEE, 査読有, 2014, pp. 1762 – 1769, DOI: 10.1109/ECCE.2014.6953631

② Soichiro Nakadachi, Shigeru Mochizuki, Sho Sakaino, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe, Tomio Yasuda, Bidirectional Contactless Power Transfer System Expandable from Unidirectional System, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2013 IEEE, 査読有, 2013, pp. 3651 – 3657, DOI: 10.1109/ECCE.2013.6647182

③ 望月大樹、仲達崇一郎、渡辺宏、境野翔、金子裕良、阿部茂、保田富夫、一方向非接触給電から拡張容易な双方向非接触給電システム、電気学会論文誌 D、査読有、Vol.133、No.7、2013、pp.707-713
DOI : <http://doi.org/10.1541/ieejias.133.707>

④ 阿部茂、EV・PHEV用非接触給電の技術動向、電気学会誌、査読有、Vol.133、No.1、2013、pp. 25-27
DOI:<http://doi.org/10.1541/ieejjournal.133.25>

〔学会発表〕(計5件)

① 濱田尚平、徐将希、金子裕良、阿部茂、電気自動車用非接触給電トランス2台化による漏洩磁界低減法、電気学会産業応用部門大会、2014年8月26日、東京電機大学(東京都・足立区)

② 仲達崇一郎、金子裕良、阿部茂、電気自動車用非接触給電のコンデンサ接続方式における電源容量・漏洩電界の比較、電気学会自動車研究会(VT-14-008 pp37-42)、2014年2月20日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

③ 佐藤亨耶、徐将希、金子裕良、阿部茂、電気自動車用非接触給電の漏洩電界の高調波成分の低減法、電気学会半導体電力変換研究会(SPC-14-16)、2014年1月24日、神戸大学(兵庫県・神戸市)

④ 徐将希、佐藤亨耶、金子裕良、阿部茂、電気自動車用非接触充電トランスの高調波電流の削減、電気学会産業応用部門大会(No. 4-7, pp.IV103-IV106)、2013年8月30日、山口大学(山口県・山口市)

⑤ 仲達崇一郎、望月大樹、境野翔、金子裕良、阿部茂、保田富夫、一方向非接触給電から拡張容易な双方向非接触給電システム、電気学会自動車研究会(VT-13-12)、2013年2月22日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

〔図書〕(計1件)

阿部茂他(電気学会・移動体用エネルギーストレージシステム技術調査委員会編)、オーム社、電池システム技術—電気自動車・鉄道へのエネルギーストレージ応用—、2012年、pp. 272 (237-250)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称：双方向非接触給電システム
発明者：阿部茂、金子裕良、渡辺宏、保田富夫
権利者：国立大学法人埼玉大学、株式会社テクノバ
種類：特許
番号：特願 2013-557294
出願年月日：平成 24 年 2 月 9 日
国内外の別：PCT 出願

〔その他〕

ホームページ等
<http://akt.ees.saitama-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

阿部茂 (ABE Shigeru)
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：70375583

(4)研究協力者

金子裕良 (KANEKO Yasuyoshi)
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：10233892