

大容量非接触給電システムの検討

山本 浩平[†] 北澤 智志[†] 丸山 貴嗣[†] 近藤 圭一郎[†]

[†] 千葉大学 大学院 工学研究科 〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町 1-33

E-mail: [†] {kyamamoto, skitazawa, tmaruyama}@chiba-u.jp, kkondo@faculty.chiba-u.jp

あらまし 非接触給電は機械的な接触なしに移動体などに電力が供給できるという点で近年注目されている技術である。本研究では非接触給電の鉄道への応用を考え、大容量システムについての検討を行う。大容量化の際には無効電力の増大が問題になると考えられ、本論文では無効電力を考慮したトランス設計の必要性および設計法を示す。また、二次側の変換回路として PWM 整流回路を用いる。その制御法として瞬時電流制御法を適用し、実験によりその制御性の有効性を示す。

キーワード 非接触給電, 大容量化, 無効電力, PWM 整流回路, 瞬時電流制御法

A Study on a High-Power Contactless Power Transfer Systems

Kohei Yamamoto[†] Satoshi Kitazawa[†] Takashi Maruyama[†] and Keiichiro Kondo[†]

[†] Graduate School of Engineering, Chiba University 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

E-mail: [†] {kyamamoto, skitazawa, tmaruyama}@chiba-u.jp, kkondo@faculty.chiba-u.jp

Abstract Recently, the contactless power transfer systems have attracted much attention, as it is possible to supply electrical energy to vehicle without cables. In this study, we study about the application of high-power contactless power transmission systems in the railway. Problems in these systems arise due to increase in reactive power. In this paper, contactless power transfer system is designed with reactive power characteristics taken into consideration. And we adopt the PWM rectifier using an instantaneous current control method at the secondary side. The effectiveness of the proposed systems including the control method is verified by experiments.

Keyword contactless power transfer systems, high power system, reactive power, PWM rectifier, instantaneous current control method

1. まえがき

非接触給電は機械的な接触なしに、移動体や機器に電力が供給できるため、接触不良や漏電、ショートなどの問題が発生する心配がなく保守が容易といったメリットがある。電動歯ブラシや電気シェーバーなどの小電力のものにはすでに実用化がされており、電気自動車への応用に関する研究等も行われている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。このように本技術は数 kW~数十 kW 級が実用化レベルに達してきている。そこで本研究ではさらなる大容量化の例として電気鉄道への電力供給を目指した数百 kW 級の大容量非接触給電システムについて検討を行う。

本研究では大電力伝送を対象としているため、他方式に比べて周波数の低い電磁誘導方式を採用している。電磁誘導方式の非接触給電では一次側コイルと二次側コイルが空間を隔てているため、磁気的な結合が低下し、電源力率の悪化すなわち無効電力の増加が起こる。

一次側からみた力率を改善するために、一次側および二次側に共振コンデンサを挿入する方法が提案されているが、その場合、無効電力の増加は共振コンデンサの電圧値や電流値の増大につながる。大容量化すると漏れリアクタンスによる無効電力が増加するため、共振コンデンサの電圧が過大となることが懸念される⁽⁴⁾。あるいは変換回路の制御により共振コンデンサを省略できる場合でも、変換回路の容量が大きくなると考えられる。このように大容量非接触給電トランスの設計は無効電力を考慮して行う必要がある。

また、鉄道車両は電圧形インバータを用いて駆動している。そのため、二次側の変換回路として PWM 整流回路を用いて、伝送電力の制御を行うことを考える。非接触給電は一次側と二次側が物理的に離れているため、電源側の情報を必要としない制御が好ましい。そこで二次側の電流情報のみでリアクタンス降下を補償できる瞬時電流制御法⁽⁵⁾を非接触給電に適用する⁽⁶⁾。

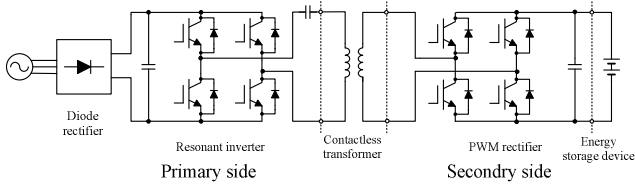


Fig. 1. A battery charging system by power transformer.

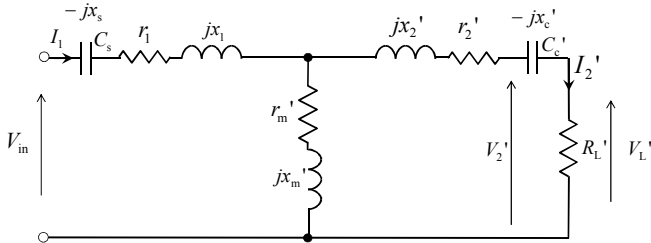


Fig. 2. An equivalent circuit of transformer with series capacitors.

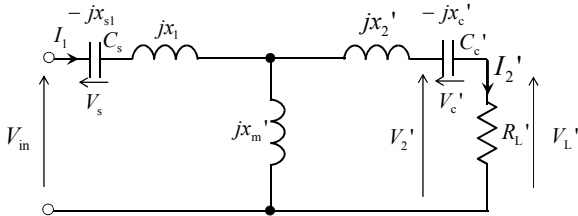


Fig. 3. A simplified equivalent circuit.

本論文ではまず、無効電力補償用共振コンデンサを用いたトランスの等価回路をもとに、無効電力の特性を解析し、大容量化のための無効電力を考慮したトランス設計の必要性および設計法を示す。次に、二次側をPWM整流回路に置き換え、その制御方式として瞬時電流制御法を適用し、実験によりその制御法の有効性を示す。これらの結果は大容量非接触給電システムの実現に寄与するものと考えられる。

2. 非接触給電システム

2.1. システム構成

Fig. 1 に非接触給電システムの構成を示す。一次側は直列に共振コンデンサを挿入することで、共振形インバータとして動作させる。二次側は移動体への給電を想定しているため蓄電デバイスへ充電を行う回路構成となっている。二次側変換回路は誘導性リアクタンスを含むインピーダンスに対して有効電力と無効電力の制御が可能である電圧形PWM整流回路を用いた構成とする。

PWM整流回路により瞬時電流制御を行った際の非接触給電システムの等価回路をFig. 2に示す。このように交流部分は一次側、二次側に直列コンデンサを挿入する方式として扱うことができる。本章ではFig. 2の等価回路を用いて無効電力に関する解析を行う。な

お、ダッシュをつけた値は一次側に換算した値であることを示す。

2.2. 一次側二次側に直列共振コンデンサを用いた等価回路

Fig. 2の回路で巻線の抵抗 r_1, r_2 および鉄損を表す r_m は電源周波数においてトランスのリアクタンス x_m, x_1, x_2 に比べて十分小さいため無視するとFig. 3のような簡易等価回路を得る。

Fig. 3の回路において、共振コンデンサの値を(1), (2)式のように決めると一次側の力率を1にすることができる⁽⁷⁾。

$$\frac{1}{\omega C_c'} = x_c' = x_m' + x_2' \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{1}{\omega C_s} = x_s = x_m' + x_1 \dots\dots\dots(2)$$

(1), (2)式の共振コンデンサの値を用いて一次電圧 V_{in} と二次電流 I_2' の関係を求めると(3)式を得る。定電圧源で駆動すれば二次側は定電流特性となる。

$$I_2' = j \frac{V_{in}}{x_m'} \dots\dots\dots(3)$$

2.3. 大容量化時の一次側コンデンサの耐圧問題

Fig. 3の回路において一次側コンデンサは主に漏れリアクタンスによる電圧降下を補償し、二次側コンデンサは主に励磁リアクタンスによる遅れ電流を補償している。一次側コンデンサ電圧 V_s は V_{in} 、負荷抵抗 R_L 、各部リアクタンスで(4)式のように表され、二次側コンデンサ電流は(3)式で表される I_2' である。

$$V_s = -jx_s \frac{R_L'}{x_m'^2} V_{in} \dots\dots\dots(4)$$

(4)式より一次側コンデンサの電圧は、負荷抵抗の値に比例し、二次側定電流特性であることから伝送電力に比例することがわかる。一方、(3)式より二次電流は負荷抵抗の値に依存しないので伝送電力に対して一定となる。

電源電圧 V_{in} に制約がある場合、大容量化するには負荷電流を大きくする必要があり、これにより負荷電流に起因する漏れリアクタンス降下が大きくなるため一次側コンデンサで、より大きな電圧補償が必要となる。非接触給電は二次側が移動体であることが多く、大容量化した際に、地上に置く一次側の無効電力のみが増加するという特性は二次側の省スペース化に有用だが、容量によっては二次側に比べて一次側の無効電力が大きくなり過ぎ、一次側コンデンサ電圧が過大な値となってしまう。

一次側にも許容できる無効電力に限界があるので、一次側と二次側の無効電力の配分を容量ごとに調整するようなトラ

ンス設計が必要である。

2.4. 無効電力を考慮したトランスの設計方法

非接触給電システムで無効電力を抑えるためには漏れリアクタンスを小さくし、励磁リアクタンスを大きくすればよい。そのための一つの方法として結合の改善が挙げられるが、ギャップや寸法の制約により結合の改善には限界がある。そこで本節ではコイルの自己インダクタンス、周波数に対する無効電力の特性を解析し、大容量化における無効電力の配分方法を考える。なお、一次側に換算した一次二次の漏れインダクタンス l_1, l_2' 、励磁インダクタンス L_m' およびこれらのリアクタンスは、一次二次コイルの自己インダクタンス L_1, L_2' 、結合係数 k および周波数 f との間に(5)、(6)式に示す関係を持つ。

$$L_m' = k\sqrt{L_1 L_2'}, l_1 = L_1 - L_m', l_2' = L_2' - L_m' \quad (5)$$

$$x_m' = 2\pi f L_m', x_1 = 2\pi f l_1, x_2' = 2\pi f l_2' \dots\dots\dots (6)$$

自己インダクタンスと周波数に対する無効電力の特性を解析するが、(3)、(4)式からわかるように無効電力に関係するのはリアクタンス値であるため、コイルリアクタンスを $X_1=2\pi f L_1, X_2=2\pi f L_2$ と定義し、コイルリアクタンスに対する無効電力特性を解析することにする。

V_s, I_2 および二次側コンデンサ電圧 V_c は X_1, X_2, k および伝送電力 P を用いて(7)、(8)式で表される。ただし、これらの値は一次側に換算した値ではなく実際値であることに注意されたい。

$$V_s = -jX_1 \frac{P}{V_{in}} \dots\dots\dots (7)$$

$$I_2 = j \frac{V_{in}}{k\sqrt{X_1 X_2}} \dots\dots\dots (8)$$

$$V_c = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{X_2}{X_1}} V_{in} \dots\dots\dots (9)$$

X_1 と X_2 の比を a^2 とし、 $X_2 = a^2 X_1$ とすれば(8)、(9)式は(10)、(11)式のように書き表され、一方のコイルリアクタンスのみで表すことができる。

$$I_2 = j \frac{V_{in}}{kaX_1} \dots\dots\dots (10)$$

$$V_c = \frac{a}{k} V_{in} \dots\dots\dots (11)$$

V_s, I_2 の X_1 に対する関係を示すため、ここでは数値例として $k = 0.70, a = 1, V_{in} = 600 \text{ Vrms}, P = 50 \text{ kW}$ と

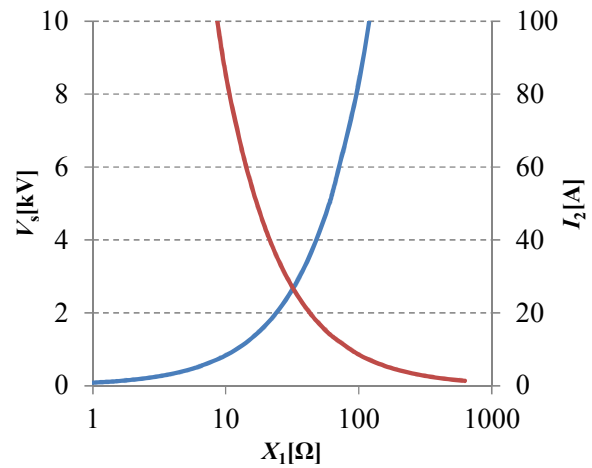


Fig. 4. Characteristics of the coil reactance versus voltage of primary compensating capacitor and current of secondary compensating capacitor.

した場合、(7)、(10)式をもとにその特性をプロットすると Fig. 4 が得られる。ただし、コイルリアクタンスの値に応じて R_L の値を変化させ、伝送電力は一定にしている。また、共振コンデンサの容量は電源力率を 1 に保つようにトランス定数の変化に応じて変えた。

同図からわかるように一次側コンデンサ電圧 V_s はコイルリアクタンスに比例し、二次電流 I_2 はコイルリアクタンスに反比例する。コイルリアクタンスが大きくなれば、漏れリアクタンス、励磁リアクタンスともに大きくなるため V_s が高くなり、 I_2 が小さくなる。一方、コイルリアクタンスが小さくなると、各リアクタンスは小さくなるため V_s は低くなり、 I_2 は大きくなる。

すなわちコイルリアクタンスは一次側と二次側で補償する無効電力の配分を決める値であることがわかる。ゆえに大容量化に伴って上昇する一次側コンデンサ電圧はコイルの自己インダクタンスと周波数の値を調整し、無効電力を二次側へ分配することによって低くすることが可能となる。

2.5. 有効電力と無効電力の関係

二次電流 I_2 は負荷電流でもあるため、一次側と二次側の無効電力配分を変えることで二次側の有効電力の様子に変化を生じる。 I_2 が変化した際、有効電力を一定に保つためには負荷抵抗 R_L の値を変え、その両端の電圧 V_L を変化させる必要がある。そのため、無効電力配分を変えることで、二次側の有効電力の電圧電流比が変化する。(11)式より二次側コンデンサ電圧は X_1 によらず一定であるため、二次コイル電圧 V_2 が無効電力配分に応じて変化する。そのため無効電力配分を変化させる際は、二次コイル電圧と電流の比に注意する必要がある。その際考慮する値として(10)、(11)式より一次側と二次側のインダクタンス比を表す a が挙げられ

る。無効電力配分の変化と同時に a の値を適切に決めることで、二次側の電圧電流比を正常に保つ設計が可能となる。

以上より非接触給電の大容量化では、無効電力の存在を十分意識する必要がある、一次側と二次側の無効電力配分を適正にするトランス設計が重要であるといえる。なおトランスを実際に設計する際は、 X の変化はコイルの巻数や大きさ、周波数の変化によって実現でき、 a の変化は一次側コイルと二次側コイルの巻数等を変えることによって実現できる。

3. 瞬時電流制御方式 PWM 整流回路の応用

〈2・5〉節で述べたように Fig. 3 の等価回路では二次電流 I_2 が二次側の無効電力と有効電力の両方に関与している。そのため、 I_2 の情報のみを用いて有効電力と無効電力の制御を行う瞬時電流制御法が適用できると考えられる。

本章では、瞬時電流制御法の非接触給電への応用方法を示し、実験によりその制御法の有効性を示す。

3.1. 瞬時電流制御法の非接触給電への応用

Fig. 3 の等価回路で C_c を PWM 整流回路等価容量、 R_c を PWM 整流回路等価抵抗と呼びかえる。PWM 整流回路は(12)式に基づいて瞬時電圧 v_2 を出力する。

$$v_2 = \left(R_c - j \frac{1}{\omega C_c} \right) i_2 \dots \dots \dots (12)$$

ここで C_c と R_c の演算方法について述べる。 C_c は(1)式、 R_c は(13)式のように計算する。ただし、 i_{2rms} は i_2 の実効値であり、 P^* は有効電力指令値である。

$$R_c = \frac{P^*}{i_{2rms}^2} \dots \dots \dots (13)$$

実際はコイルの位置ずれなどにより x_m 、 x_2 、 x_1 および I_2 の値は、想定した値から変化することが考えられるが、その場合であっても (13)式に基づいて R_c の値を変化させることで有効電力の制御が行える。また今回の制御では C_c の値は位置ずれなし時のコイル定数から一意に決めた値を用いるため、位置ずれ等によるパラメータ変動に対して、一次側力率の制御は行わない。

3.2. 実験条件

今回実験に用いるトランスの外観を Fig. 5 に示す。なお、一次側と二次側のコイルには同じ仕様のものを用いている。このトランスを用いて Fig. 6 の実験システム構成で実験を行う。各定数は Table. 1 に示すとおりである。トランス定数の測定には LCR メータを用い、一次側から二次側開放時と短絡時、および二次側から一次側開放時と短絡時の L と R を測定し、計算により求めた。なお、測定は今回の実験での伝送周波数であ

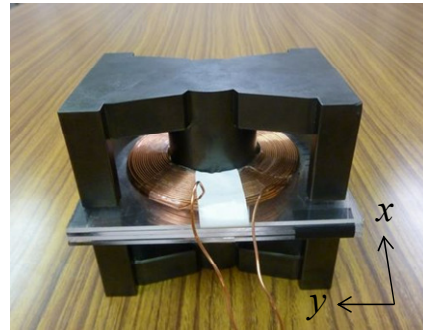


Fig. 5. Appearance of the experimental coil.

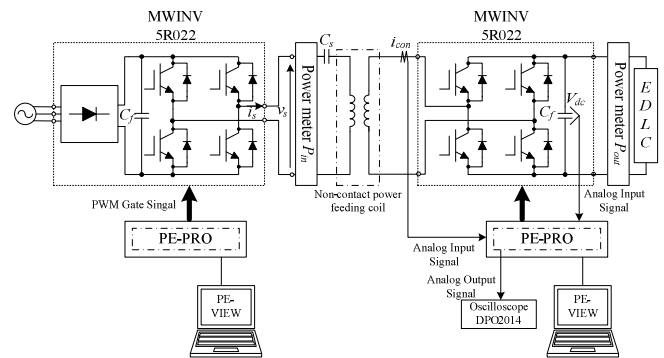


Fig. 6. Experimental system setup.

Table 1. Parameters of the experimental system.

Supply RMS voltage V_{in} [V]	30
Frequency f [Hz]	1546
Initial EDLC voltage V_d [V]	100
Series resonant capacitor C_s [μ F]	6.6
Winding resistance $r_1 = r_2$ [m Ω]	454.6
Self-inductance $L_1 = L_2$ [mH]	1.59
Factor of coupling k	0.754
Smoothing capacitor C_f [mF]	13.2
Control operation cycle zh [ms]	0.0404
Carrier frequency f_c [Hz]	24736
Power reference value P^* [W]	70

る 1546 Hz で行った。また、算出した一次側共振コンデンサの容量も同表に示す。一次側の電源は電圧形インバータを用いた矩形波電圧出力とする。

3.3. 実験条件

電気二重層キャパシタ (Electric double layer capacitor : EDLC) により負荷側の電圧が確立された状態で実験を行い、PWM 整流回路の制御により EDLC への給電を行う。入力電力 P_{in} は一次側インバータ出力を、直流側出力電力 P_{out} は PWM 整流回路の負荷側出力をパワーメータで測定する。電源は矩形波電圧であるため高調波成分を多く含んでいる。そのため、

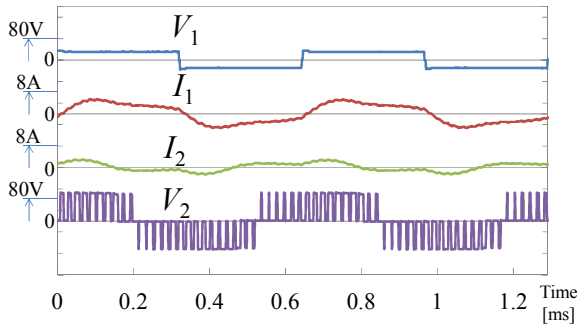


Fig. 7. Experimental waveforms by the proposed control method without the misalignment of coils.

非接触給電回路の入力力率は電圧・電流をフーリエ級数展開し、基本波力率の評価を行う。

3.4. 実験結果

Fig. 7 に各部波形を示す。それぞれ非接触給電コイルへの入力電圧 V_{in} 、電流 I_1 、PWM 整流回路出力電圧 V_2 、二次電流 I_2 を示す。 I_2 をフーリエ級数展開すると、電圧と電流の位相差は 4.19° であり、 $\cos 4.19^\circ \approx 0.997$ であることから、ほぼ力率 1 を達成できている。負荷側出力は 70 W と測定された。

また、Fig. 5 の x 方向に受電コイルをずらしたとき電源力率は 1 ではなくなったが、出力の測定値は 70 W であったため、位置ずれが起きた場合でも電力制御が適切に行われていることが確認できた。

4. まとめ

本論文では、大容量化における直列コンデンサ電圧上昇の問題から、無効電力に留意したトランス設計の必要性を述べた。そして、自己インダクタンスと周波数から決まるコイルリアクタンス X の値を伝送電力によって調整することで大容量においても直列コンデンサ電圧を現実的な値にできることを示した。さらに、無効電力の配分を変える際、二次側有効電力の電圧電流比への配慮から一次側と二次側コイルのインダクタンス比を表す a の値を適切に選択することも重要であることを述べた。

また、PWM 整流回路を二次側に適用し、二次電流のみの情報で、位置ずれの際にも負荷へと一定に電力を送ることができる制御法を提案し、実験によりその制御法の有効性を示した。

今後は、トランスの質量や効率、変換器の容量などを統合したシステム設計について検討を行う必要がある。

本研究は、鉄道総合技術研究所の支援を受け実施したものであり、関係者各位に深く感謝致します。

文 献

- [1] 松木英敏, 高橋俊輔 “ワイヤレス給電技術がわかる本” オーム社, 2011 年
- [2] Y. Kaneko, N. Ehara, T. Iwata, S. Abe, T. Yasuda, K. Ida: “Comparison of Transformer Winding Methods for Contactless Power Transfer Systems of Electric Vehicle”, *IEEJ Trans. IA*, Vol.130, No.6, pp.734-741(2010)(in Japanese)
金子裕良, 江原夏樹, 岩田卓也, 阿部茂, 保田富夫, 井田和彦 “電気自動車用非接触給電装置のトランス巻線方式による特性比較” 電気学会論文 D 130 巻 6 号 pp.734-741, 2010 年
- [3] M. Chigira, Y. Nagatsuka, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, A. Suzuki: “Novel Core Structure and Iron-loss Modeling for Contactless Power Transfer System of Electric Vehicle”, *IEEJ Trans. IA*, Vol.132, No.1, pp.9-16(2012)(in Japanese)
千明将人, 長塚祐一, 金子裕良, 阿部茂, 保田富夫, 鈴木明 “電気自動車用非接触給電トランスの新コア構造と鉄損のモデル化” 電気学会論文 D 132 巻 1 号 pp. 9-16, 2012 年
- [4] K.yamamoto, T.maruyama, K. kondo, T.kashiwagi: “A Method to Design of High Power Contactless Power Transformer Considering Reactive Power”, Proc. of 2012 Japan Industry Applications Society Conference IEE Japan, No. 5-24, pp.V-231-236 (2012)(in Japanese)
山本浩平・丸山貴嗣・近藤圭一郎・柏木隆行: 「大容量非接触給電トランスの無効電力を考慮した設計法」, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, No.5-24, pp. V-231-236 (2012)
- [5] T.Watanabe, H.Ueno, N.Takeuchi, S.Nagabuchi, H.Hayashi, Y.Saitou: ”PWM Converter Using Instantaneous Current Detection for Generator of Maglev Vehicle”, *IEEJ Trans. IA*, Vol.115, No.3, pp348-353 (1995) (in Japanese)
渡邊朝紀・上野裕久・竹内典子・長淵澄夫・林秀喜・斉藤克忠: 「瞬時電流検出による浮上式鉄道車両誘導集電用 PWM コンバータ」, 電気学会論文誌 D , Vol.115, No.3 pp348-353 (1995)
- [6] S.kitazawa, K.kondo, T.kashiwagi: “An Evaluation of Power Flow of the Power Conversion Circuit for a Contactless Power Transformer Systems at the Coil Misalignment”, Proc. of 2012 Japan Industry Applications Society Conference IEE Japan, No. 5-25, pp.V-237-242 (2012)(in Japanese)
北澤智志・近藤圭一郎・柏木隆行: 「非接触給電システムの電力変換回路におけるコイル位置ずれ時のパワーフローへの影響評価」, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, No.5-25, pp. V-237-242 (2012)
- [7] K.yamamoto, T.maruyama, K.kondo, T.kashiwagi: “A Study on the Circuit Configuration with Capacitors to Compensate the Power Factor for High Power Contactless Power Transfer”, Proc. of 2012 Japan Industry Applications Society Conference IEE Japan, No.5-088, pp147-148 (2012) (in Japanese)
山本浩平・丸山貴嗣・近藤圭一郎・柏木隆行: 「非接触給電コイル大容量化のための力率補償コンデンサ接続法の検討」, 平成 24 年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, No.5-088, pp147-148 (2012)