

令和 3 年 6 月 13 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04106

研究課題名（和文）回転機制御技術を適用するワイヤレス電力伝送システムの開発

研究課題名（英文）Development of a wireless power transmission system based on vector control of electrical machine.

研究代表者

井上 征則（Inoue, Yukinori）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：50580148

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：電磁誘導方式によるワイヤレス電力伝送システムについて、より簡易に利用できるシステムとするために本研究では、既に多くの数式モデルや制御法が報告されているモータ駆動システム制御法をワイヤレス電力伝送に適用した。インバータ方形波駆動を適用した回路について電力伝送特性を評価し、電流ベクトル制御が適用できることを確認した。パルス幅変調によるインバータ駆動についても特性比較を行った結果、制御器の安定性と電流リップル低減の観点から、インバータのスイッチング周波数適用可能範囲内でパルス幅変調を適用した方が良いことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイヤレス電力伝送ではスイッチング素子の導通パターンなどのモードを整理することが一般的であるが、本研究ではモータ駆動システムでよく用いられるベクトル制御の適用について基礎検討を行った。今後は電磁エネルギー変換という共通点を利用することにより、例えば、モータ駆動システムのように「ベクトル制御」、「パルス幅変調」、「三相インバータ」の標準構成があれば、より多くの機器にワイヤレス電力伝送を適用でき、家庭用電化機器や電気自動車などの利便性向上を期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on an electromagnetic induction method suitable for high-power power supply. A problem with the electromagnetic induction method is that the transmission power drops as the distance between the coils increases. As a solution to this problem, new estimation methods and control methods are expected. This study discusses operating characteristics of a three-phase wireless power transfer system from another approach, using vector control theory of motor drives. The current vector control in a rotating d-q reference frame is applied. Pulse width modulation (PWM) is also applied to switching signal generation. Switching signal generation using the PWM results in reduction of current ripple and improvement of control stability.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：電気機器工学 パワーエレクトロニクス 非接触給電 回転機制御

### 1. 研究開始当初の背景

電化製品への給電には電線が多く用いられるが、電気自動車への充電のように短時間で大電力の給電を必要とする用途では大きい断面積の電線が必要となり、電線の重量が増加する。これは、利用者にとっては利便性の低下をもたらす。また、降雨時など水分の多い環境では、感電の危険性がある。そのため、電線を用いずに給電するワイヤレス電力伝送に関する研究が盛んに行われている<sup>(1)-(4)</sup>。ワイヤレス電力伝送では、電磁波を用いるため物理的な接続は必要ないが、大電力化と伝送距離拡大がトレードオフの関係になっている。電磁誘導方式、磁界共振結合(磁界共鳴)方式、マイクロ波方式と様々あるが、主に伝送距離と電力から選択される。送受電コイルの磁気的な結合に基づく電磁誘導方式による電力伝送では、比較的大電力化が容易であるものの、コイル間距離の拡大や位置ずれにより伝送電力が低下しやすい。

従来のワイヤレス電力伝送に関する研究では、送受電回路を構成する各素子の電圧と電流の状態に注目して制御することが多かったため、非線形現象の振る舞いを単純化することが困難であった。多くのセンサなどを用いることによりコイル位置に応じた制御は可能ではあるが、センサの追加はコスト増加につながるため、最低限の情報(コイルの電圧と電流など)からコイル位置や距離を推定する方法や伝送電力を最大化できる制御法も必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、電磁誘導方式によるワイヤレス電力伝送システムにおいて電磁エネルギー変換という共通点を利用することにより、モータ駆動システムを参考にした制御法の構築を行う。これまでの送受電回路を構成する素子の電圧と電流の状態に注目して制御する方法、すなわちスイッチング素子の導通パターンなどのモードを整理するだけでなく、ベクトル制御の考え方も利用する方法を検討する。ワイヤレス電力伝送とモータ駆動で共通化した新しい推定や制御の手法が構築できれば、単純化した数式モデルに基づく制御器によって送受電電力最大化を実現でき、コイル位置検出なしでの適切な制御と伝送効率の向上が期待できる。

### 3. 研究の方法

電磁誘導方式によるワイヤレス電力伝送システムについて、より簡易に利用できるシステムとするために本研究では、既に多くの数式モデルや制御法が報告されているモータ駆動システムの制御法をワイヤレス電力伝送に適用した。

#### (1) モータ駆動システムとワイヤレス電力伝送の共通化

##### ①ワイヤレス電力伝送システムにおける回転座標系 $d-q$ 座標の適用

ワイヤレス電力伝送の回路構成をモータ駆動システムと類似性を持つようシステムを最も単純化した。図1に示すように送電(1次)側を三相インバータ、受電(2次)側をダイオードブリッジによる整流回路と負荷抵抗で構成した。当初は非接触給電コイルとして単相コイルの適用を想定していたが、モータ駆動システムの構成に近づくために三相コイルを用いた構成とした。

本研究ではスイッチング角周波数 $\omega_s$ を時間積分することにより、電圧・電流の $d-q$ 座標変換に用いる位相 $\theta$ を得た。インバータのスイッチング信号も位相 $\theta$ を用いて作成し、方形波駆動とした。

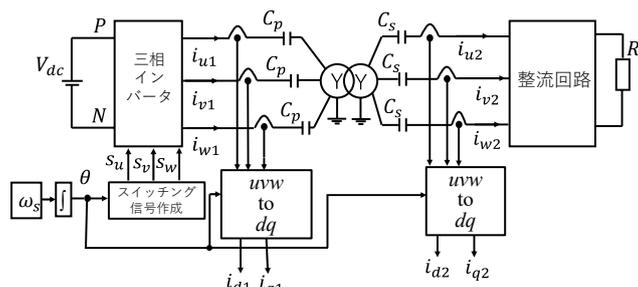


図1 三相コイルを想定したワイヤレス電力伝送システム (フィードフォワード制御による $d,q$ 軸電流の観測)

##### ②給電コイルに関する検討

磁界解析ソフトウェアを用いて給電コイルの特性を確認し、コイル仕様を決定した。電磁誘導方式によるワイヤレス電力伝送では送受電コイルの位置が伝送電力に与える影響が大きいため、文献(5)を参考に円形コイル回転方向の位置変化に対する影響が小さい二層構造の三相コイルを適用した。本研究の実験環境で検証が行えるよう巻線仕様を調整した。

#### (2) ワイヤレス電力伝送システムへのモータ駆動システム制御法の適用

##### ①インバータ方形波駆動時の制御構成

図1の構成に比例・積分(PI)制御器を追加し図2に示す回路構成とした。 $d,q$ 軸成分を用いて電流ベクトル制御を行い、得られた指令電圧を座標変換して三相の指令電圧を得た。方形波駆動

とするために相電圧指令値の符号を用いて簡潔な構成でスイッチング信号を作成する方式とした。本研究では送電（1次）側のみ電流ベクトル制御を行う。 $d, q$ 軸電流指令値  $i_d^*, i_q^*$  に対する制御特性を評価した。また、PI制御器ゲインについても検討を行った。

②パルス幅変調によるインバータ駆動時の制御構成

本研究で用いた三相インバータにはスイッチング素

子としてSiC-MOSFETを用いており、高いスイッチング周波数に対応できることから、電流リップル低減や制御の安定性向上を期待してパルス幅変調(PWM)によるスイッチング信号作成を適用した場合についても特性比較を行った。

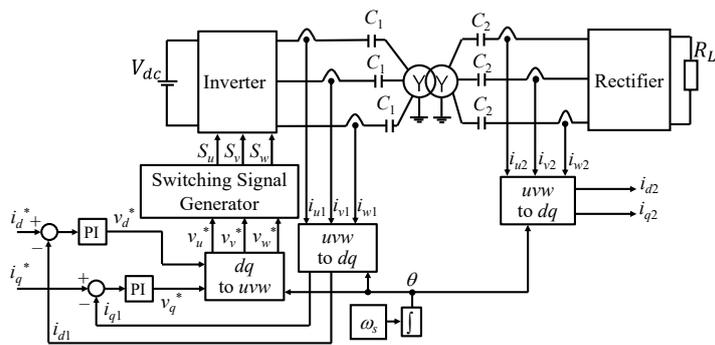


図2 三相コイルを想定したワイヤレス電力伝送システム ( $d, q$ 軸電流ベクトル制御)

4. 研究成果

(1) モータ駆動システムとワイヤレス電力伝送の共通化

①ワイヤレス電力伝送システムにおける回転座標系  $d-q$  座標の適用

表1に示す回路定数について電力伝送特性を得た。ここではDCリンク電圧を  $V_{dc} = 200V$  とした。図3に送電（1次）・受電（2次）側における電圧・電流の動作点を示す。後述するように電流リップルが生じるが、ここでは平均値を示した。図3(a)の電圧  $d, q$  軸成分の結果より、送電側電圧  $v_{d1}, v_{q1}$  は  $d-q$  座標の基準であるため一定値となる。受電側電圧  $v_{d2}, v_{q2}$  は給電コイルの結合係数  $k$  の値により変化する。結合係数が増加するほど電圧の大きさが増加し、特に  $d$  軸方向成分が増加する。図3(b)の電流  $d, q$  軸成分の結果より、電圧に対して電流が遅れ位相であることと、大きさの変化をベクトル図で確認できた。

②給電コイルに関する検討

コイル外径 200mm, 一相あたりの巻数 36 の給電コイルについて磁界解析を行い、表1の回路定数が得られることを確認した。給電コイルの電力と効率を図4に示す。コイル間距離 32.7mm において約 1.3kW の電力を伝送できることを確認した。

表1 回路定数

給電コイル巻線抵抗 $R_1, R_2$	0.01 $\Omega$
給電コイル自己インダクタンス $L_1, L_2$	40 $\mu H$
給電コイルの巻数比 (1次:2次)	1:1
共振キャパシタンス $C_1, C_2$	0.036 $\mu F$
負荷抵抗 $R_L$	100 $\Omega$
コイル電圧・電流の基本波周波数 $\omega_s$	85 kHz

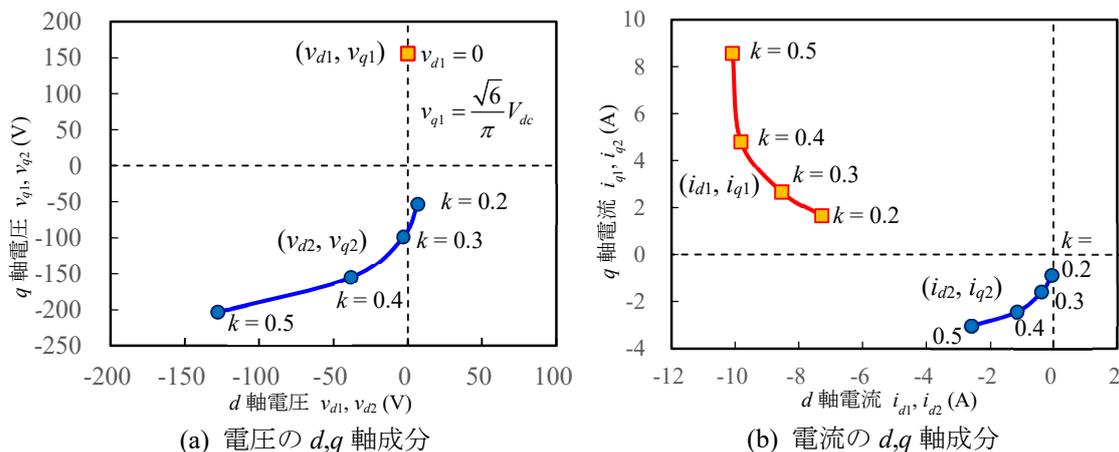


図3 フィードフォワード制御時の結合係数変化に対する電圧と電流の動作点変化

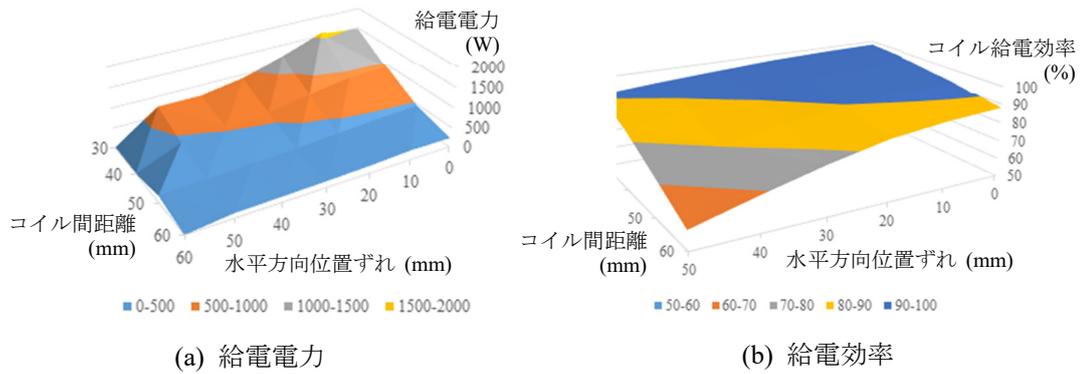


図4 電磁界解析による給電コイルの特性

(2) ワイヤレス電力伝送システムへのモータ駆動システム制御法の適用

①インバータ方形波駆動時の制御構成

指令電圧  $v_u^*, v_v^*, v_w^*$  の符号を用いて簡易的にスイッチング信号  $S_u, S_v, S_w$  を得ることにより方形波駆動時の制御特性を得た。ここでは  $V_{dc} = 400V$  とし、結合係数は  $k = 0.2$  である。図5に  $d, q$  軸電流の制御特性を示す。図5(a)が示すように送電側の  $d, q$  軸電流成分とも指令値に追従できた。図5(b)において、受電側は電流制御を行っていないため、送電側の電流指令値と負荷での  $d, q$  軸電流が決まる。

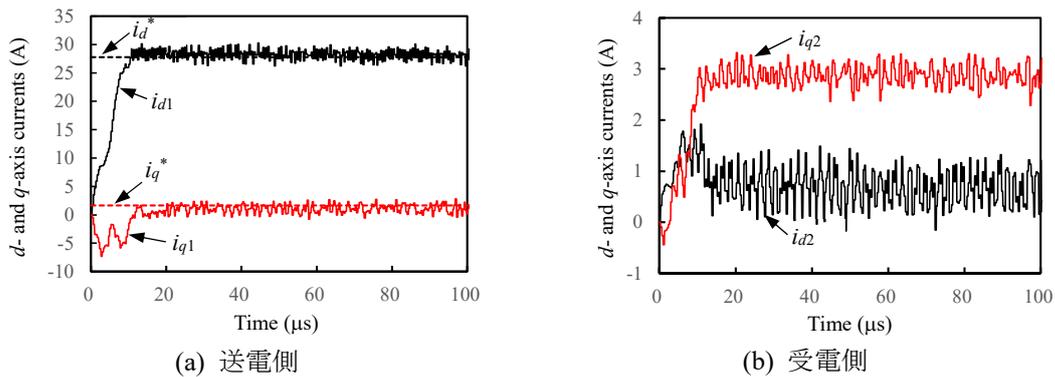


図5 電流ベクトル制御時の特性 ( $k=0.2$ )

②パルス幅変調によるインバータ駆動時の制御構成

PWM 制御を適用した三相ワイヤレス電力伝送の PWM キャリア周波数や結合係数の変化に対する電流制御特性と効率を比較した。PWM キャリア周波数について基本波周波数 85kHz の 35 倍 (2975 kHz) と 10 倍 (850 kHz) とした場合の特性を図6に示す。制御器の安定性と電流リップル低減の観点から、インバータのスイッチング周波数適用可能範囲内でパルス幅変調を適用した方が良いことが分かった。

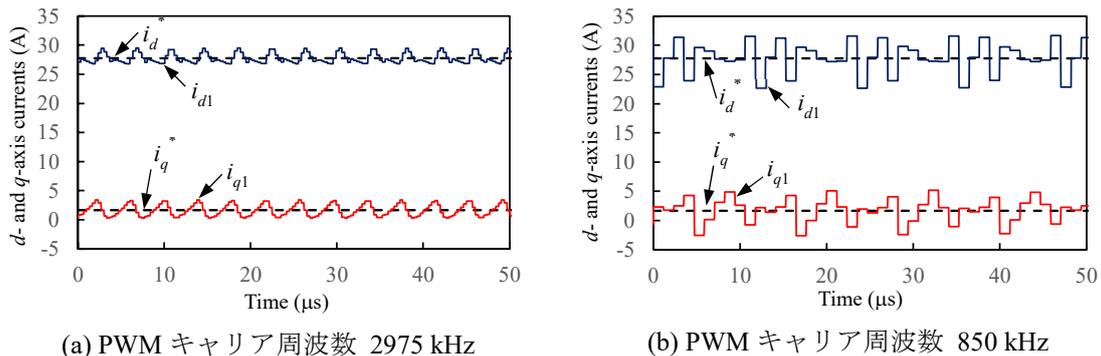


図6 PWM 適用時の特性 ( $k = 0.4$ )

図7に結合係数に対する効率の特性を示す。ここでも異なるPWMキャリア周波数で比較を行った。PWMキャリア周波数が減少すると電流リップルが増加し、効率の低下につながる事が確認できた。一方、PWMキャリア周波数の増加は一般にインバータでのスイッチング損の増加につながるため、インバータでの損失を考慮した検討は今後の課題である。また、モータと比較してワイヤレス電力伝送は基本波周波数も高いため、電流サンプリングによる位相遅れについても補償する効果が大きいことが分かった。

なお、当初計画していた伝送電力制御については、コイル間距離の変化を考慮したモデリングと制御法の構築に時間を要しており今後継続して取り組むべき課題も残った。

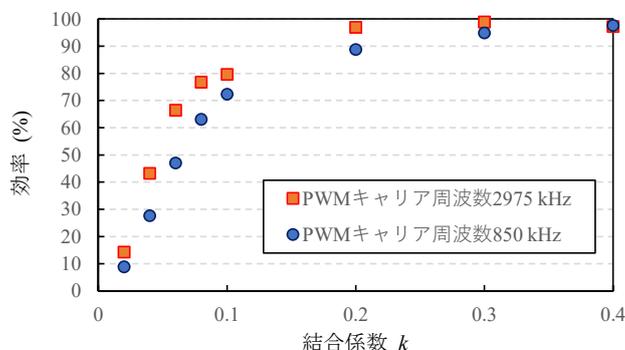


図7 PWM駆動時の結合係数に対する効率

#### <引用文献>

- (1) 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」, 電気学会論文誌D, Vol. 130, No. 6, pp. 734-741 (2010)
- (2) 甲斐敏祐, Kraisorn Throngnumchai:「電気自動車用途における非接触充電の受電回路トポロジの検討」, 電気学会論文誌D, Vol. 132, No. 11, pp. 1048-1054 (2012)
- (3) 居村岳広, 堀洋一:「電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一理論」, 電気学会論文誌D, Vol. 135, No. 6, pp. 697-710 (2015)
- (4) 日下佳祐, 伊東淳一:「伝送周波数と伝送電力に着目した電磁誘導現象を用いた非接触給電システムの開発動向」, 電気学会論文誌D, Vol. 137, No. 5, pp. 445-457 (2017)
- (5) 松本洋和, 中嶋竜冶, 根葉保彦, 麻原寛之:「二層構造三相非接触トランスの提案と検討」, 電気学会論文誌D, Vol. 135, No. 5, pp. 539-547 (2014)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kentaro Ueda, Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada
2. 発表標題 Characteristic Comparison of Three-Phase Wireless Power Transfer at 85kHz Using a Rotating Coordinate System
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田健太郎, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之
2. 発表標題 三相非接触給電システムにおける回転座標系を用いた電流制御の検討
3. 学会等名 パワーエレクトロニクス学会第236回定例研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田健太郎, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之
2. 発表標題 回転座標系を用いた三相非接触給電の特性比較
3. 学会等名 令和元年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田健太郎, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之
2. 発表標題 回転座標系を用いた85kHzでの三相非接触給電の特性比較
3. 学会等名 パワーエレクトロニクス学会 第231回定例研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------