

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04027

研究課題名（和文）回転機制御技術を活用した電磁エネルギー変換に関する研究

研究課題名（英文）A Study of Electromagnetic Energy Conversion Based on Electrical Machine Drive Technique

研究代表者

井上 征則（Inoue, Yukinori）

大阪公立大学・大学院工学研究科 ・准教授

研究者番号：50580148

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：電磁エネルギー変換の観点で回転機と共通点がある非接触給電について、コイルの状態（位置、距離）を考慮し、印加電圧に同期した回転座標系上における数式モデルを導出した。位置と距離はインダクタンスに考慮しモデル化を行った。導出した数式モデルによって、三相ではなく、直交回転座標上かつ直流量で特性を評価できるようになった。シミュレーションモデルにおいても、三相変圧器による回路モデルではなく、回転・直交座標上での状態方程式による表現で実現できるようになった。さらに、非接触給電コイルの実機を用いて測定した回路定数を導出した数式モデルに適用し、妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、モータ駆動システムと同様の構成として回転座標上での電流制御器と三相インバータの組み合わせを実現でき、制御法の構築に必要な数式モデルを得ることができた。非接触給電では単相コイルを1対1で使用することが多く、三相交流で直交成分を用いるベクトル制御の考え方は積極的に利用されていなかった。三相巻線による給電コイル構成を用いることでベクトル表現が容易であることに注目したが、導出した数式モデルはまだ制御に容易に利用できるまで整理・簡略化できておらず引き続き検討が必要な課題も残った。

研究成果の概要（英文）：This study has derived a mathematical model of power transmission coils on a rotating reference frame synchronized with the applied voltage in wireless power transfer system, which utilizes electromagnetic energy conversion similar to that used in motor drives. The derived mathematical model makes it possible to evaluate operating characteristics as a DC quantity in orthogonal rotating frame.

In simulation, state equations on rotating and orthogonal frame is available, rather than a circuit model using a three-phase transformer. Furthermore, the circuit parameters were measured using a prototype wireless power transfer coil, and the parameters were applied to the derived mathematical model to confirm its validity.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：電磁エネルギー変換 非接触給電 回転機制御 パワーエレクトロニクス

### 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、数十 W の電力では非接触給電も多く用いられる。非接触給電では、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。

従来の非接触給電に関する研究では、電源回路の一種として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。一方で、非接触給電と同様の電磁エネルギー変換を用いるモータ駆動システムにおいては、電圧・電流の大きさや位相に基づくベクトル制御が適用され、電流フィードバック制御と座標変換により平均的に電圧・電流が制御されている。ベクトル制御では、制御対象の機器定数から適する電圧・電流の指令値が算出され制御に用いられる。したがって、非接触給電においてもコイルのモデル・機器定数を明らかにできれば、モータでのベクトル制御法を参考にした、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給電電力を最大化できる制御法も実現できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、電磁エネルギー変換として共通点を持つ電磁誘導方式による非接触給電システムとモータ駆動システムについて、コスト増加や信頼性低下を招くセンサ類を多く設置するのではなく、最低限の情報（巻線の電圧と電流など）を用いた伝送電力最大化や高効率運転の制御法を目指す。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数式モデルと制御法を拡張し、非接触給電に適用する。モータ駆動システムでは主流の「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、非接触給電システムの制御も可能となるよう数式モデルや制御法を明らかにする。

### 3. 研究の方法

モータ駆動システムと非接触給電の共通点に注目し、数式モデルや制御法を構築するために三相の回路構成に対して、電圧・電流制御には直交・回転座標系を用いる。本研究では送受電コイルの回路定数の実測、数式モデルの構築について下記の方法で研究を進めた。

#### (1) 試作した送受電コイルの回路定数測定

モータ駆動システムの制御手法適用を容易にするため、三相の送受電コイルを用いる。回転方向の位置ずれによる電力伝送特性の変化を最小限にするため文献[1]で報告されている二層構造のコイルを参考にした。

図1にコイルの構造を示す。二層構造コイルは上層コイル  $U_1, V_1, W_1$  と上層コイルと同じ形状でコイルの巻き方が逆になった下層コイル  $\bar{U}_1, \bar{V}_1, \bar{W}_1$  から成っており下層コイルは上層コイルに対して中心軸から角度  $\pi$  だけずらして配置されている。コイルの結線としては上層コイルと下層コイルは相ごとに直列接続される。表1にコイルの諸元を示す。使用予定の SiC 素子を用いた三相インバータの定格電流(15A)からコイルの定格電流を 10A とした。電流密度が  $5A/mm^2$  程度になるよう磁界解析を用いて巻数を決定した。三相電圧の振幅 100V とし、直列共振回路を構成する。受電コイルには負荷抵抗 100Ω を接続した場合の特性から、送電コイルの電流が定格値の約 10A となる巻数 36 を選択した。

モータ駆動システムにおいては、主に電流によって電磁鋼板の磁気飽和が生じるため機器定数が変化する。一方、本研究で用いる送受電コイルは空芯であるため、磁気飽和の影響は無視できるとして、LCR メータを用いた無負荷に近い状態における定数測定を行った。

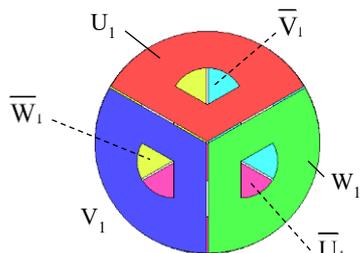


図1 三相送受電コイル（二層構造）

表1 三相送受電コイルの諸元

|         |                  |
|---------|------------------|
| 外径      | 200 mm           |
| 一相あたり巻数 | 36               |
| 定格電流    | 10 A<br>(最大 20A) |
| 定格電力    | 1.5 kW           |
| 駆動周波数   | 85 kHz           |

(2) 数式モデルの導出

送受電コイルは三相であるが、電圧・電流の制御を行う場合には三相よりも直交座標系の成分で行った方が取扱いやすい。さらに、駆動周波数に同期した回転座標系を用いることにより、三相交流を回転座標上では直流として取り扱うことができ、定常状態において定数として電圧・電流を評価できることが特徴である。

本研究では、三相の回路方程式に座標変換を適用し、回転座標系の方程式を導出した。

(3) シミュレーションモデルの構築と制御特性評価

導出した数式モデルの妥当性を確認するためにシミュレーションモデルを作成し、制御特性の評価を行った。実機実験では図2の回路構成であるが、シミュレーションでは回転座標上の特性を得ることができれば十分であるため、インバータと整流器は省略した。送受電コイルのみの電圧・電流特性を確認した後、共振キャパシタを直列接続した非接触給電システムについて電力特性を確認した。

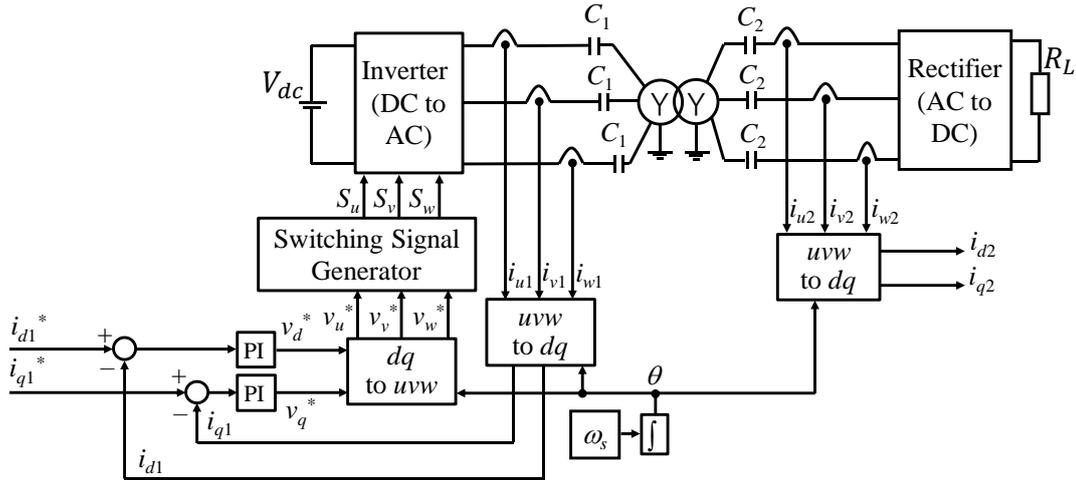


図2 非接触給電システムの回路構成

4. 研究成果

(1) 送受電コイルの回路定数

送受電コイル中心を基準とした水平方向の距離  $x$  とコイル間距離  $y$  を変化させて、送電コイル（一次側）の自己インダクタンス  $L_1$ 、受電コイル（二次側）を短絡した短絡インダクタンス  $L_{s1}$  を測定した。送受電コイルの結合係数  $k$  は(1)式で与えられる。

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{s1}}{L_1}} \tag{1}$$

$L_{s1}$  と  $k$  の測定結果を図3に示す。 $x = 80 \text{ mm}$  より短い距離では結合係数は減少しているが、 $x = 80 \sim 110 \text{ mm}$  の範囲で図1に示したコイル構造に起因して結合係数が増加していることがわか

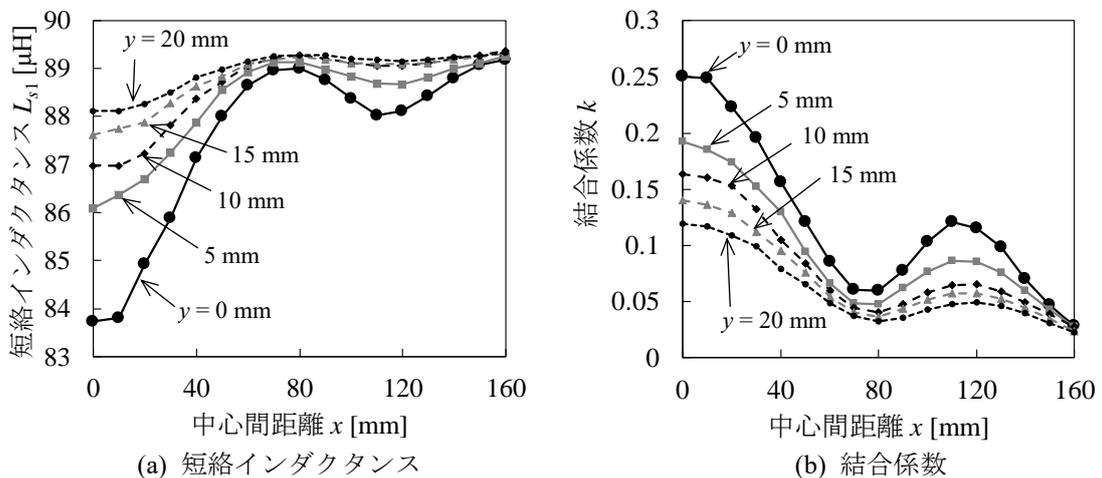


図3 送受電コイル定数の測定結果

る。また、コイル間距離  $y$  が長くなるにつれて結合係数が減少することがわかる。

### (2) 送受電コイルの数式モデル

本研究で導出した送受電コイルの電圧方程式を次式に示す。

$$\begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \\ v_{d2} \\ v_{q2} \end{bmatrix} = \left( \mathbf{R} + \omega_s \mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_2 \frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、 $v_{d1}, v_{q1}$  は送電コイルの  $d, q$  軸電圧、 $v_{d2}, v_{q2}$  は受電コイルの  $d, q$  軸電圧、 $i_{d1}, i_{q1}$  は送電コイルの  $d, q$  軸電流、 $i_{d2}, i_{q2}$  は受電コイルの  $d, q$  軸電流、 $\omega_s$  は電気角周波数であり、抵抗とインダクタンス行列は次式で与えられる。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -(3M + 2L_{11}) & -3M \sin \theta_p & -3M \cos \theta_p \\ 3M + 2L_{11} & 0 & 3M \cos \theta_p & -3M \sin \theta_p \\ 3M \sin \theta_p & -3M \cos \theta_p & 0 & -(3M + 2L_{12}) \\ 3M \cos \theta_p & 3M \sin \theta_p & 3M + 2L_{12} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 3M + 2L_{11} & 0 & 3M \cos \theta_p & -3M \sin \theta_p \\ 0 & 3M + 2L_{11} & 3M \sin \theta_p & 3M \cos \theta_p \\ 3M \cos \theta_p & 3M \sin \theta_p & 3M + 2L_{12} & 0 \\ -3M \sin \theta_p & 3M \cos \theta_p & 0 & 3M + 2L_{12} \end{bmatrix}$$

ただし、 $R_1, R_2$  はそれぞれ送電コイルと受電コイルの巻線抵抗、 $M$  は相互インダクタンス、 $L_{11}, L_{12}$  はそれぞれ送電コイルと受電コイルの漏れインダクタンス、 $\theta_p$  は送受電コイルの回転方向の角度差である。

なお、 $L_1, L_{s1}$  に加えて受電コイル（二次側）の自己インダクタンス  $L_2$  を測定することにより  $M, L_{11}, L_{12}$  は次式で算出でき、(2)式の数式モデルに適用できる。

$$M = \sqrt{\left(1 - \frac{L_{s1}}{L_1}\right)(L_1 L_2)}, \quad L_{11} = L_1 - M, \quad L_{12} = L_2 - M \quad (3)$$

### (3) 数式モデルの妥当性と制御特性

送受電コイルの定数として  $R_1 = R_2 = 0.2 \Omega$ ,  $L_1 = L_2 = 90 \mu\text{H}$ ,  $M = 17 \mu\text{H}$  ( $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 5 \text{ mm}$ ,  $\theta_p = 0$  に対応)、共振キャパシタ  $C_1 = C_2 = 0.039 \mu\text{F}$ 、負荷抵抗  $R_L = 100 \Omega$  の場合における制御特性を図 4 に示す。電流制御により定格電力である約 1.5 kW が受電側で得られることを確認できた。なお、本研究では電流制御器のゲインを試行錯誤的に決定しており、電力特性は電流制御特性の影響を受けるため、無負荷状態から定格出力に変化させる特性にオーバーシュートが生じた。今後は、導出した数式モデルを用いて制御器ゲインの設計法についても検討が必要である。

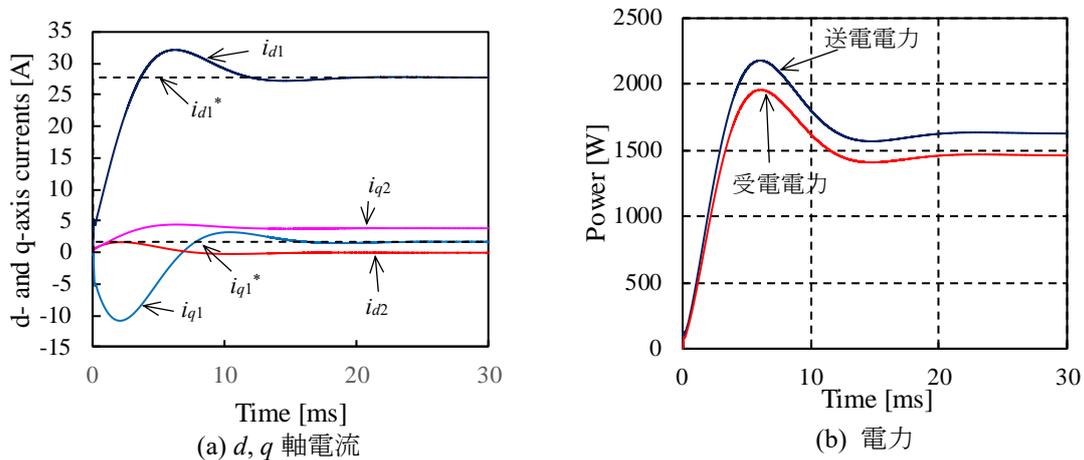


図 4  $d, q$  軸電流制御による制御特性

<引用文献>

- [1] 松本, 中畠, 根葉, 麻原:「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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>井上征則, 森本茂雄, 真田雅之         |
| 2. 発表標題<br>非接触給電への回転機制御技術適用の基礎検討    |
| 3. 学会等名<br>パワーエレクトロニクス学会 第248回定例研究会 |
| 4. 発表年<br>2023年                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada  |
| 2. 発表標題<br>Operating Characteristics of Three-Phase Wireless Power Transfer System Using a Rotating Reference Frame and Pulse Width Modulation |
| 3. 学会等名<br>The 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2021) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|