

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 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：24560323

研究課題名(和文)非接触給電式スリップリングを持つ永久磁石レス同期電動機の開発

研究課題名(英文)Development of excitation system by contactless power transfer system for synchronous motors

研究代表者

金子 裕良 (KANEKO, Yasuyoshi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10233892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：レアアースのネオジムなどを用いる永久磁石モータに代わる高効率モータとして非接触式スリップリング同期電動機を研究開発した。すなわち、非接触式スリップリングには電磁誘導式の非接触給電システムを適用し、回転子側の励磁コイルに電力を高効率で供給するためのスリップリングの形状や構造を検討した。また、回転時の非接触給電回路の論理的解析を行い、漏れリアクタンス補償用コンデンサの配置とその値の決定法を示すとともに、出力の異なる同期電動機が容易に設計できるように非接触式スリップリング形状の設計指針を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For power transfer to the rotor circuit of excitation-type synchronous motors, we propose several contactless power transfer systems with different shape of pads and some resonant circuits to obtain the high efficiency of the power. We examine the characteristics of some contactless power transfer systems with different resonant capacitor topology to compensate for the leakage reactance and compared them. The rotating shaft of the rotor is covered with an aluminum sheet to reduce the loss due to the leakage flux. Power transfer tests were performed. A high efficiency of 91.8% was achieved when power was transferred to the rotor circuit of the synchronous motor.

研究分野：電気電子工学

キーワード：電気機器 非接触給電 同期電動機 非接触式スリップリング

1. 研究開始当初の背景

(1) 自動車、家電製品、産業用機器からロボットに至るまで、動力部分には必ず様々なモータが使用されている。これまでは、高効率で軽量、メンテナンスフリーなモータとして、永久磁石モータが多く使用されてきたが、国際状況の変化によるレアアースの供給量および価格の不安定化により、従来使用されてきたネオジム系の永久磁石モータに代わるモータの開発が急務となっている。本研究では、永久磁石モータと同じ回転原理で、出力特性やドライブ方式などが類似しており、かつ起磁力も大きい同期電動機を高性能化する方法について検討する。

(2) 同期電動機の大きな問題の一つは回転子側の励磁回路にどのように電力を供給するかである。一般に電力供給はスリップリングを使って行うが、従来のスリップリングは接触式で、接触部は摩耗しメンテナンスが必要となる。また、接触部が存在することにより小型形状スリップリングでの高速回転が困難であり、電気自動車などの高速回転の永久磁石モータの代替はできなかった。本研究では、非接触で電力を給電できる小型軽量スリップリングを開発する。

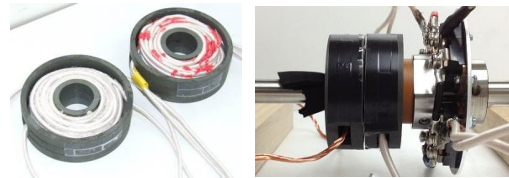
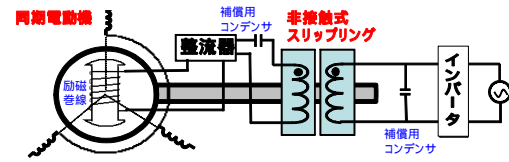
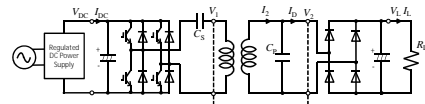
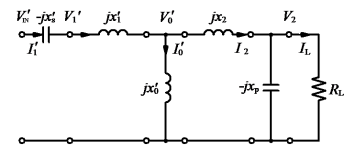


図1 非接触式スリップリング



(a) 非接触給電回路



$$\frac{1}{\omega_0 C_p} = x_p = x'_0 + x_2, \quad \frac{1}{\omega_0 C_s} = x'_s = \frac{x'_0 x_2}{x'_0 + x_2} + x'$$

$$V'_{IN} = bV_L, \quad I'_{IN} = I_L / b, \quad b = \frac{x'_0}{x'_0 + x_2}$$

$$\eta_{SP} = \frac{R_L I_L^2}{R_L I_L^2 + r_1^2 I_1^2 + r_2 I_2^2}$$

$$\eta_{SP \max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k} \sqrt{\frac{1}{Q_1 Q_2} + \frac{k^2}{Q_1^2}}} \quad R_{L,SP \max} = r_2 Q_2 \sqrt{\frac{1}{k^2} \frac{Q_2}{Q_1} + 1}$$

$$\left(k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad Q_1 = \frac{\omega L_1}{r_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega L_2}{r_2} \right)$$

(b) 等価回路と関係式

図2 非接触給電回路と特性(SP方式)

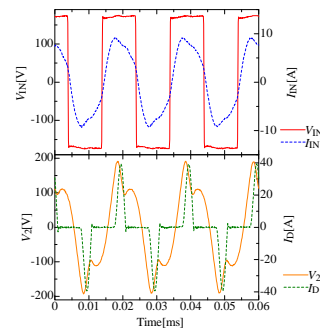


図3 入出力電流電圧波形(SP方式)

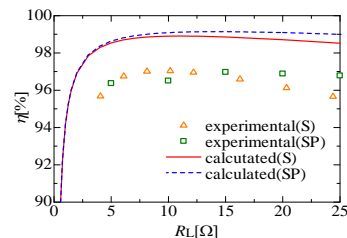


図4 負荷変動特性

2. 研究の目的

本研究では、同期電動機用の非接触式スリップリングの設計と理論的特性解析を行い、永久磁石モータと同等性能を持つ非接触式スリップリング同期電動機を開発する。特に、永久磁石モータと同様に高速回転を可能にするための非接触スリップリングの形状や構造や、同期電動機の励磁回路(コイル)と直流整流回路を受電側(二次側)負荷とする場合の補償用コンデンサの配置やその値の決定法について論理的解析を行って検討する。製作した非接触式スリップリング同期電動機の負荷変動時の界磁調整など給電電力変化に対する対応についても検討する。また、非接触式スリップリングを同期機に組み込む際の磁気干渉等の解析やその対策について検討する。

3. 研究の方法

- (1) 非接触式スリップリングの形状と構造について検討し、回路解析と給電実験により最適形状を決定する。
- (2) 漏れリアクタンス補償用コンデンサの配置による特性比較を行うとともにその値の決定方法について検討する。また、回転時のギャップ変動による結合係数などの変化に対する特性についても検討する。
- (3) 非接触式スリップリング形状の小型化などの検討を行い、同期電動機に搭載可能なものを試作する。特性測定と給電実験を行って性能評価し、最終設計の確認を行う。この結果に基づいて非接触式スリップリング方式による同期電動機を設計し製作する。
- (4) 製作した非接触式スリップリング同期電動機の性能評価を行う。また、負荷変動時の界磁調整など給電電力変化に対する対応も

動機の性能評価を行う。また、負荷変動時の界磁調整など給電電力変化に対する対応も

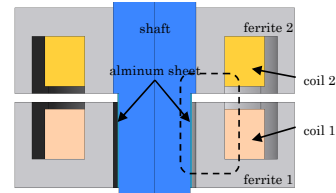
検討する。

4. 研究成果

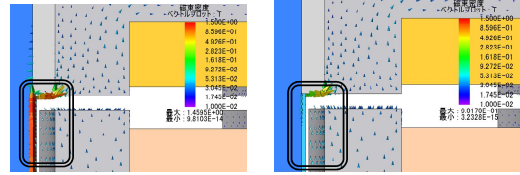
(1) 非接触式スリップリングの形状と構造について検討し、数種類スリップリングを試作した(図 1)。試作した非接触式スリップリング(直径100mm)の諸係数をLCRメータで測定し、電気自動車用非接触充電などに用いられる一次直列二次並列コンデンサ方式(SP方式)の等価回路(図 2)から導いた諸式と回路解析ソフトや磁界解析ソフトを用いて論理的解析を行った(雑誌論文、学会発表)。非接触給電式スリップリングは基本的にはギャップ付きトランスで、ギャップによる結合係数の低下と漏れインダクタンスの増大に対応するため、電源周波数を10kHz以上にして二次誘起電圧を上げ、一次と二次の漏れインダクタンスの補償のためにコンデンサを用いている。SP方式では、各コンデンサ C_S , C_P の値を図中諸式の値に調整すると、共振周波数においてコンデンサを含めたトランスの等価回路がほぼ理想変圧器と等価となり、二次側が整流回路を含む抵抗負荷の場合、力率 pf はほぼ1となりソフトスイッチング可能で高い効率 η も得られる。この理論を同期電動機用の非接触式スリップリングにも適用することにより、論理的解析が可能となり、出力の異なる同期電動機設計への適用も容易となる。60kW相当の同期電動機の励磁回路への電力供給を想定した1kWの給電実験(図 3、図 4)を行い、解析結果と比較検討し、非接触式スリップリングを設計する際有用となる基礎データを計測した(学会発表)。

(2) 高速回転時に耐えうる強度を持ち同期電動機の回転軸や外鉄への漏れ磁束損失による効率低下を防ぐため、フェライトコアを低損失の電磁遮蔽効果のあるアルミ板でカバーする構造を検討した(図 5)。非接触給電ではトランス間に高い周波数の磁界を発生させて給電を行う。その際、漏れ磁束が軸など周囲の磁性体に鉄損を発生させ、トランス効率が低下する。今回は、回転軸の部材としてよく使われる炭素鋼(S45C)を用いる。回転軸は、直径25mmの円柱で、トランスの中心部に配置する。一次側のトランスは回転軸との間に半径2.5mmのギャップがあり、二次側のトランスは回転軸に固定されている。磁界解析ソフトを用いて、ギャップ長2mm、 $R_L=10\Omega$ 、 $f_0=50\text{kHz}$ 、1kW給電時の解析を行った。回転軸の周囲に0.5mm厚のアルミ板を巻き付ける。効率向上にアルミ板が有効であることを給電実験により示す(表 1)とともに、ギャップ変動やアルミとフェライト寸法など設計に必要なデータを取得した(学会発表)。

(3) 回転子側の電子部品を少なくしメンテナンスフリーを進めるため、二次側コンデンサをなくした一次直列方式の給電システム(図 6)を提案して、一次直列二次並列のものと性能比較し、給電実験結果から同等の効率



(a) 非接触式スリップリング軸方向断面図



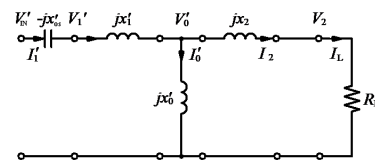
(b) 磁束密度(アルミ無) (c) 磁束密度(アルミ有)

図 5 炭素鋼回転軸のアルミ遮蔽の効果

表 1 ギャップ変動時およびアルミ有無の特性

	軸+アルミ			軸なし	
	1	2	3	2	
$f_0[\text{kHz}]$	50				
gap[mm]	1	2	3	2	
k	0.70	0.67	0.64	0.79	
SP	$C_S[\mu\text{F}]$	0.106	0.103	0.099	0.114
	$C_P[\mu\text{F}]$	0.338	0.363	0.384	0.246
	$R_{LSmax}[\Omega]$	30.1	14.26	12.2	19.53
	$\eta_{SPmax}[\%]$	99.54	99.14	98.99	99.54
	$\eta[\%]^*$	97.16 (99.42)	96.95 (99.14)	97.2 (98.97)	-
	pf_1^*	0.88	0.91	0.93	-
pf_2^*	0.63	0.62	0.62	-	
S	$C_{os}[\mu\text{F}]$	0.071	0.072	0.071	0.071
	$R_{LSmax}[\Omega]$	9.91	11.13	11.28	17.3
	$\eta_{Smax}[\%]$	98.60	98.91	98.91	99.48
	$\eta[\%]^*$	97.67 (98.60)	96.96 (98.90)	96.35 (98.90)	-
	pf_1^*	0.82	0.80	0.77	-
	pf_2^*	0.87	0.86	0.86	-

() Calculated value of efficiency η . pf : power factor.
* experimental value.



$$\frac{1}{\omega_0 C'_{os}} = x'_{os} = \frac{x'_0 [R'_L + x_2 (x'_0 + x_2)]}{R'_L + (x'_0 + x_2)^2} + x'$$

$$R_L = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left(R + \frac{2V_F}{I_L} \right) \quad V_F: \text{整流回路のダイオード 閾値電圧}$$

$$I'_{IN} = \left(-j \frac{1}{x'_0} R_L + \frac{x'_0 + x_2}{x'_0} \right) I_L$$

$$\eta_{Smax} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k} \sqrt{\frac{1}{Q_1 Q_2} + \frac{1}{k^2 Q_1^2}}} \quad R_{LSmax} = r_2 \sqrt{k^2 Q_1 Q_2 + Q_2^2}$$

図 6 非接触給電回路と特性(S方式)

が得られることを示した(図 4、図 7、表 1)。また、整流器の平滑化コンデンサを巻線コイルのリアクトル成分に代替させた場合の特性や、ギャップ変動による結合係数などの変化に対する特性についても給電実験を行い検討した(学会発表)。

(4) これらの検討結果に基づき、定格 8kW、2,000rpm の非接触スリップリング式同期電

動機(図 8)を製作した。スリップリング回転試験装置を用いて制時のみならず 500 ~ 2,000rpm 程度の回転中の給電実験を実施して行い、効率や電流・電圧波形など制時と変化しないことを確認した(図 9)。(学会発表、雑誌論文)。

(5) 回転子側の電子部品を少なくしメンテナンスフリーを進めるため、二次側コンデンサをなくした一次直列方式の給電システムについて理論的な解析を進め、界磁巻線の電氣的パラメータと入出力特性の関係を明らかにした(図 10)。二次側整流回路の平滑コンデンサがある場合と、平滑コンデンサを用いず回転子の励磁巻線コイルのインダクタンスを用いて平滑化を行う場合の整流器を含む見かけ上の負荷の抵抗値を導出し(図 6、図 11)、その場合の電流・電圧波形の比較や界磁制御について検討した。弱め界磁制御を考慮した負荷変動時の励磁回路への電力給電効率を計測し、90%以上の高い効率で給電できることも確認した(学会発表)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

M.Jo, Y.Kaneko, and S.Abe, Methods for Reducing Leakage Electric Field of a Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles, Proc. of 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE2014, 査読有, No.1, 2014, 1762-1769

R.Nozawa, R.Kobayashi, H.Tanifuji, Y.Kaneko, and S.Abe, Excitation System by Contactless Power Transfer System with the Primary Series Capacitor Method, Proc. of International Power Electronics Conference, IPEC-Hiroshima 2014, 査読有, No.1, 2014, 1115-1121

I.Fujita, T.Yamanaka, Y.Kaneko, S.Abe, and T.Yasuda, A 10kW Transformer with A Novel Cooling Structure of A Contactless Power Transfer System, Proc. of 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE2013, 査読有, No.1, 2013, 3643-3650

Y.Kaneko and S.Abe, Technology Trends of Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicle and Plug-in Hybrid Electric Vehicle, Proc. of The 10th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems 2013, PEDS2013, 査読有, No.1, 2013, 1009-1014
H.Takanashi, Y.Sato, Y.Kaneko, S.Abe, and T.Yasuda, A Large Air Gap 3 kW Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles, Proc. of 2012 IEEE

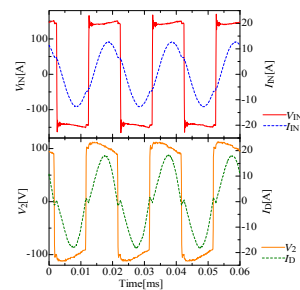


図 7 入出力電流電圧波形(S 方式)

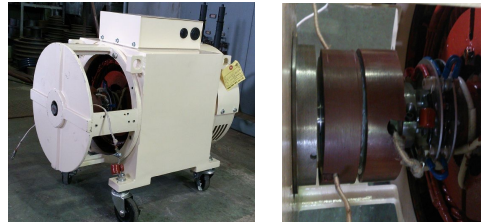


図 8 非接触式スリップリング同期電動機

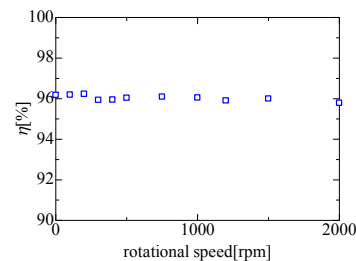


図 9 1kW 給電効率の回転速度特性

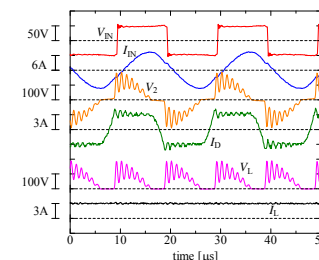
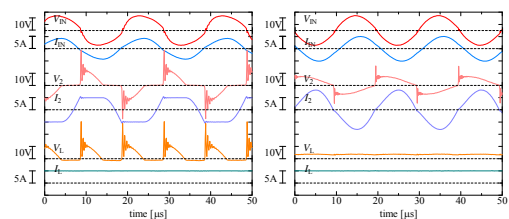


図 10 励磁回路への入出力電流電圧波形



(a) 平滑コンデンサなし (b) 平滑コンデンサあり

図 11 平滑コンデンサ有無の電流電圧波形

Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE2012, 査読有, No.1, 2012, 269-274

[学会発表](計 5 件)

小林涼太(金子裕良)、一次直列コンデンサ方式を用いた非接触給電における負荷

抵抗値、電気学会産業応用部門大会、2014年08月28日、東京電機大学(東京都・足立区)

Y.Kaneko(Y.Kaneko)、Characteristic Comparison between H-shaped Core and Circular Core in Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicles、2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(招待講演)、2013年09月17日、コロラド・コンベンションセンター(米国・デンバー)

野沢亨介(金子裕良)、非接触給電によるワイヤレス同期電動機の開発、電気学会全国大会、2013年03月20日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

谷藤光(金子裕良)、一次直列補償コンデンサを用いた回転励磁回路への非接触給電、電気学会半導体電力変換研究会、2013年01月25日、同志社大学(京都府・京田辺市)

谷藤光(金子裕良)、回転型非接触給電トランスの特性と効率改善、電気学会産業応用部門大会、2012年08月23日、千葉工業大学(千葉県・習志野市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ:

<http://akt.ees.saitama-u.ac.jp/link.php>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金子 裕良 (KANeko Yasuyoshi)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 10233892

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし