

高効率モータを実現する 無線電力伝送と可変磁束磁石を活用したシステムの基礎検討

清水 修* (東京大学) 茶位 祐樹
武田 啓司 塩井 稔 眞保 信之 花房 一義 (TDK)

Feasibility Study on High-Efficient Motor System Using Wireless Power Transfer and Variable Flux Magnet

Osamu Shimizu* (The University of Tokyo), Yuki Chai,
Keiji Takeda, Minoru Shioi, Nobuyuki Shinbo, Kazuyoshi Hanabusa (TDK Corporation)

Variable flux motor has been proposed to improve efficiency. However, the timing of magnetizing by the stator coil depends on the rotor position. Therefore, this paper presents a novel system which transmits power to the magnetizing coil in the rotor by the wireless power transfer system to enable to magnetize anytime. The wireless power transfer system is evaluated with C-shape core which has the permanent magnet, the variable flux magnet and the magnetizing coil.

キーワード：無線電力伝送, モータ, 可変磁束磁石
(wireless power transfer, motor, variable flux magnet)

1. 研究の背景

温室効果ガス(GHG : Green House Gas)排出量削減のために電気自動車の普及が進められている。電気自動車を導入することにより車両から排出される GHG はなくなるが、火力発電等を使用する場合には発電の過程で発生する GHG 排出量は増えるという課題が残る。

更なる GHG 排出量の削減にはモータの高効率化が重要である。電気自動車の登坂力、加速力の向上のために、モータには低速で大きなトルクを出力できることが求められる。低速、大トルクを実現するために永久磁石同期モータを用いると、高速道路での走行のような高速、小トルク駆動をする際には永久磁石の高い残留磁束密度によりコア内で発生する鉄損によって、効率が低下する問題がある。

低速、大トルクの出力と高速、小トルクの効率を両立させるために、巻線界磁モータ⁽¹⁾や、モータ内で残留磁束密度を変化させるために可変磁束磁石を用いること⁽²⁾⁽³⁾が検討されている。本研究では、可変磁束磁石を用いることに注目した。可変磁束磁石の着減磁にはステータの巻線を使用することが提案されている。しかし、ステータの巻線を使用する際には大きなトルク変化が起こる。そのため本研究ではモータのロータ部に配置している磁石を可変磁束磁石とし、可変磁束磁石の周回に巻かれた磁化コイルに大電流を流すことにより、可変磁束磁石の磁力を変化させ高速回転時でも高効率なモータを実現することを目指す。

さらに本研究では磁化コイルで使用する増磁電力は磁界共振結合を用いた無線電力伝送システムを用いるシステム(WVFM : Wireless Variable Flux Motor)を提案する。送電ロータに増磁電力をステータ以外から送ることにより、ロータ位置に依らずに着減磁が行うことや、低速領域では強め界磁を行い、トルクを向上することを狙う。

無線電力伝送(WPT : Wireless Power Transfer)とモータを組み合わせたシステムはスイッチドリラクタン্সモータと組み合わせたシステム⁽⁴⁾や、断線防止のためインバータとバッテリー間を無線電力伝送するシステム⁽⁵⁾等が提案されている。

本稿ではロータ部に配置している可変磁束磁石の磁化コイルに非接触で電力を送り可変磁束磁石の磁力を変化させるシステムの基礎検討として、ロータを模擬した C 型増磁器と磁石を用いた電力伝送の検証を行う。

本稿では第 2 章で提案するシステムを紹介する。第 3 章ではロータ内に使用した可変磁束磁石について述べる。そして第 4 章で C 型コアを用いた電力伝送による着減磁評価についてまとめ、最後に第 5 章で結論を述べる。

2. 提案するシステム

本研究で提案するシステムは、磁界共振結合を利用した非接触給電にてロータ内に配置した増磁コイルに電力を送りながら駆動するモータである。増磁コイルの用途は可変

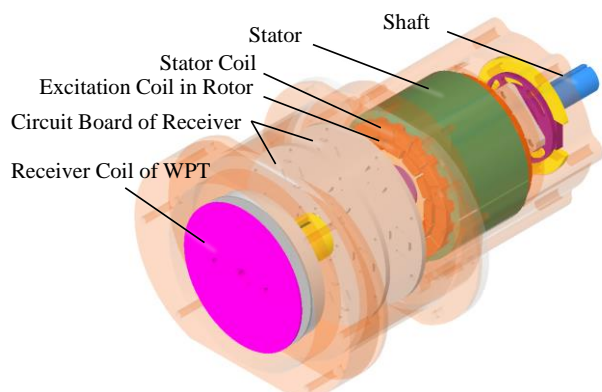


Fig.1 System overview of WVFM.

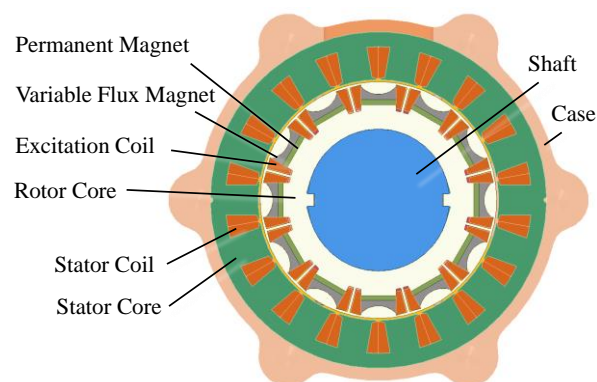


Fig.2 Cross section view of motor.

磁束磁石への瞬間的な増磁と、ある程度長時間の強め界磁や弱め界磁を行う2つを想定している。

WVFMの構成をFig.1に示し、主要部をTable 1に示す。非接触給電システムは送電側と受電側に分かれており、それぞれ、コイル、フェライト、共振コンデンサを有する。送電側の電気回路はインバータに接続され、受電側の電気回路は整流器に接続された後、磁化コイルに接続される。

モータと同軸上に非接触給電のコイルと受電回路を搭載している。非接触給電のコイルはフェライトとリッツ線で構成されている。受電側のフェライトは円形であり、コイルと同期して回転しなくても、磁気回路としての役割を果たすことができるため、送電側、受電側ともにステータのケースに固定している。また送電コイルも回転しない。

受電コイルのリッツ線はシャフトと固定されているため、モータの回転に併せて回転する。受電回路は受電コイルとロータ内の磁化コイルに電氣的に接続されているため、受電コイルと同様にシャフトに固定してモータの回転に併せて回転する構造となっている。

Fig.2にモータの断面構造を示す。ロータの永久磁石には高保磁力の永久磁石と可変磁束の2種類の永久磁石を組み

Table.1 Specifications of WVFM

item	value
outer diameter of stator	135 mm
length of stator	80 mm
poles	12
slots	18
maximum torque	32 Nm
maximum speed	12000 rpm
outer diameter of WPT coils	135 mm
air gap between WPT coils	3 mm

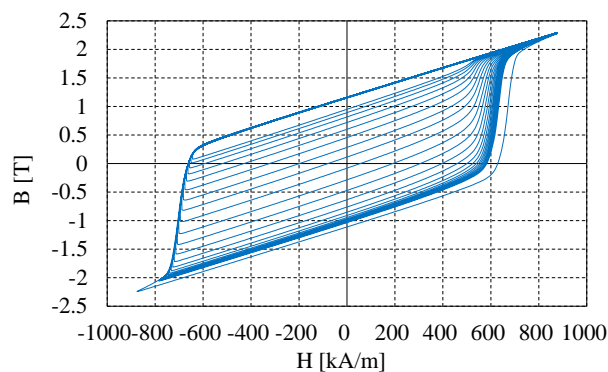


Fig.3 Magnetization characteristics of variable flux magnet.

合わせて用いている。そして永久磁石の周りに可変磁束磁石を着減磁するための磁化コイルを巻いている。ステータには通常のモータと同様に三相インバータに接続するコイルが巻かれている。

本研究で扱うWVFMは自動車に搭載することを想定しているため、非接触給電システムの基本周波数は、自動車用の非接触充電で規格化されている周波数範囲内の85kHzとしている。また、モータ構造については縦横高さの寸法すべて1/2にスケールダウンしたモデル、すなわち容量としては1/8までスケールダウンしたモータで基礎検討を進めた。

3. 可変磁束磁石

Sm-Co系の可変磁束磁石を使用した可変磁力式モータはすでに市販化されている。自動車用モータでは大トルクが必要になるため、本研究ではより残留磁束密度が高いNd-Fe-B系の可変磁束磁石を用いることとした。本研究で使用した可変磁束磁石の磁化特性をFig.3に示す。

一般的にSm-Co系磁石はピンニング型磁化機構のため、

磁化切り替え制御に適した線形なマイナー曲線が特長である。一方、一般的な Nd-Fe-B 系焼結磁石はニュークリエーション型磁化機構のため、マイナー曲線が非線形であることに加えて、最大の残留磁束密度を得るのに必要な増磁磁場が保磁力の数倍になるという増磁性の悪さのために可変磁束磁石に不適当である。本研究で使用した Nd-Fe-B 系可変磁束磁石は、マイナー曲線線形性と増磁性を大幅に改善したことで、可変磁束磁石に最適の磁石となっている。

4. C型コアを用いた着減磁評価

4.1 C型コア

本研究では、C型コアを用いた着減磁の可否を確認した。C型コアが搭載を想定するモータと同様の電流で増磁できるものとするために、C型コアでの増磁電流とモータに必要な増磁電流は電磁界解析で求めた上で、C型コアを設計した。C型コアの構成を Fig.4 に示す。モータと同様に可変磁束磁石と永久磁石を組み合わせた構造となっている。ここでは C型コアのギャップ磁束密度を増減磁の評価指標として使用する。

4.2 直流電源を用いた着減磁評価

ここでは、直流電源（有線でのワンパルス直流電源）を用いた増減磁評価について述べる。評価は磁化コイルに流れる最大電流と可変磁束磁石の磁力との関係をシミュレーションによる解析値と実測値で確認をした。直流電源を用いた増減磁評価の構成を Fig.5 に示す。ここでの可変磁束磁石の磁力は、Fig.6 に示すように C型コアの Gap 部の磁束密度を評価した。磁束密度の測定には、ホール素子を実装した磁束密度測定基板を利用した。磁化コイル電流と可変磁束磁石によるギャップ磁束密度の関係を評価した結果を

Fig.7 に示す。この結果では、増磁および減磁とも実測値と解析値はほぼ同じ値を示した。このことからシミュレーションによって可変磁束磁石による磁力を設計可能であることを確認できた。

また、磁化コイルのインダクタンス値 L_{mag} が、シミュレーションにより Fig.8 に示すように電流値により変化することが確認でき、増磁時と減磁時とで変化が異なることもわかった。また、実測値もほぼ解析値と同じ値を示した。

L_{mag} が大きいと磁化コイルの電流立ち上がりが遅くなるので、WPT システムを開発する際には、この L_{mag} 変化を考慮することが重要である。

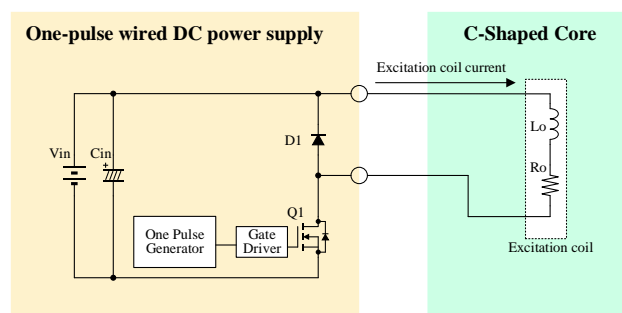


Fig.5 One-pulse wired DC power supply Evaluation System

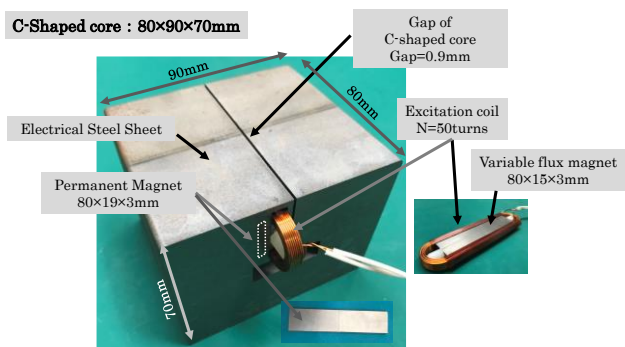


Fig.4 Overview of c-shaped core.

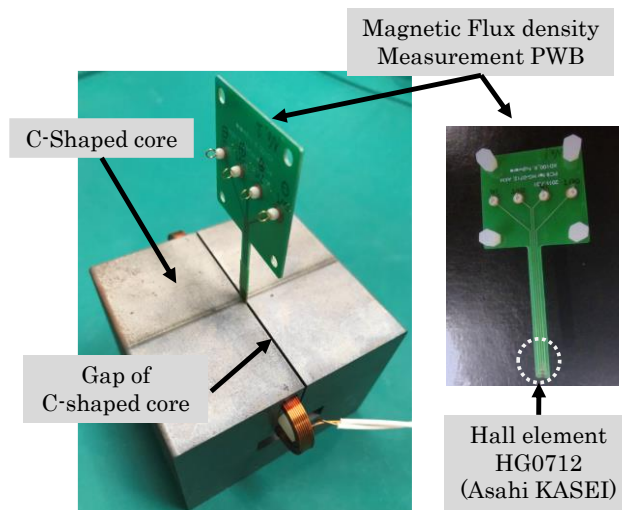
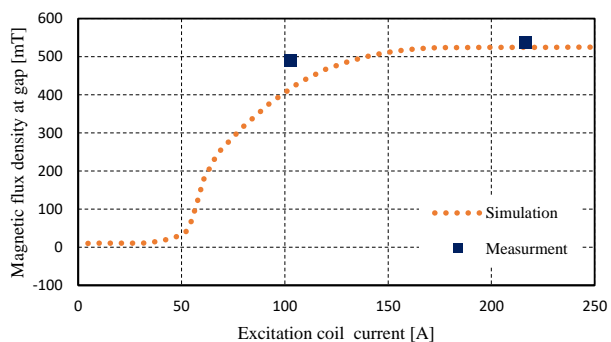
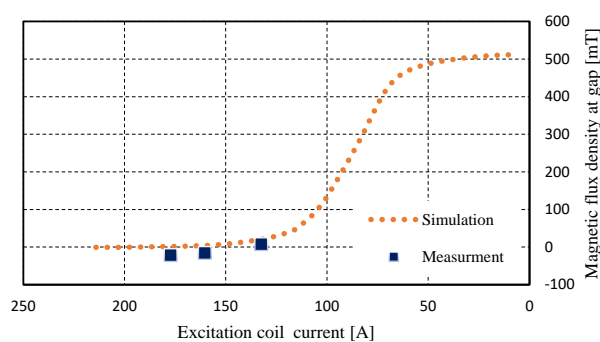


Fig.6 Magnetic flux density measurement

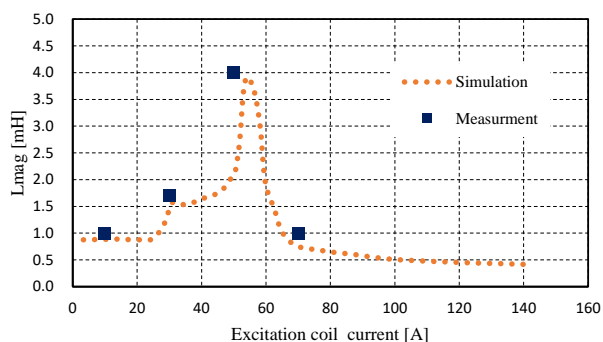


(a) Magnetization

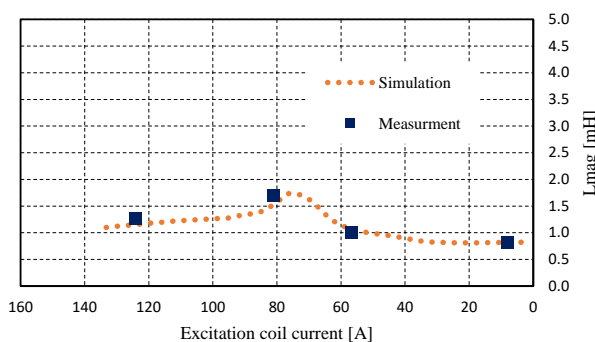


(b) Demagnetization

Fig.7 Magnetic flux density



(a) Magnetization



(b) Demagnetization

Fig.8 Inductance of Excitation coil

4.3 無線電力伝送システムの設計

ここでは、本研究において開発した無線電力伝送 (WPT: Wireless Power Transfer) システムについて述べる。本システムの要求仕様は、入力電圧 300V において負荷である磁化コイルに 120A 以上の電流を短時間で供給することである。今回開発した非接触瞬時大電力伝送 (WIHPW: Wireless Instantaneous High Power Transfer) システムの回路ブロックを Fig.9 に示す。

本システムは、送電側と受電側に分けられ、送電側は、インバータ部、パルス発生部と送電コイルで構成され、受電側は受電コイルと整流部で構成される。これらの各構成部について説明する。

送電コイルおよび受電コイルユニットは双方ともコイルと共振コンデンサを直列に接続した Series-Series 方式である。送電コイルおよび受電コイルの主要緒元は、Table.2 に示す。

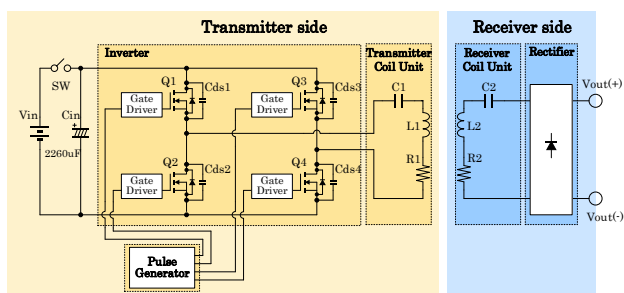


Fig.9 WIHPW System Circuit Block

Table.2 Specifications of Transmitter & Receiver coil units

	Transmitter Coil Unit	Receiver Coil Unit
Ferrite Material	PC95 (TDK)	PC95 (TDK)
Ferrite shape	100(L)×100(W)×20(H) mm	100(L)×100(W)×20(H) mm
Winding Specification	8 Ts (2 Ts × 4 layers)	8 Ts (2 Ts × 4 layers)
Aluminum Plate	100(L)×100(W)×2(H) mm	100(L)×100(W)×2(H) mm
Self Inductance Value	Ls(Lx)=8.8uH	Ls(Rx)=9.0uH
Winding coil AC resistance	Rdc(Lx)=34mΩ @85kHz	Rdc(Rx)=34mΩ @85kHz
Resonant Capacitor	Cr(Lx)=446nF (TDK)	Cr(Rx)=417nF (TDK)
Gap	Gap=3mm	
Mutual Inductance Value	Lm=4.18uH	
coupling coefficient	k=0.47	

受電側の整流部はダイオードによる全波整流回路で構成している。ここでは短い時間で磁化コイルに 120A 以上の電流を流すことが求められるので、平滑する必要はなく、平滑コンデンサは設けていない。

送電側のインバータは、送電コイルに矩形波電圧を供給するための回路であり、フルブリッジ回路で構成した。瞬時で大電力を供給するため、スイッチ素子には、大電流が流れ、大きなノイズが発生しやすい。ノイズによる誤動作を防止することが重要である。ここでは、誤動作防止対策として、各 MOSFET のドレインとソース間にコンデンサ C_{ds} を接続して、オフ時の電圧変動を小さくしている。

送電側のパルス発生部は、インバータ部のフルブリッジ部の各スイッチ素子の駆動信号を生成している。駆動信号は、周波数 85kHz で 8 パルスを出力することを基本としている。フルブリッジ回路での High-side および Low-side の MOSFET が同時にオンして貫通電流が発生することを防止するため駆動信号にはデッドタイムを設けている。それ以外に、パルスの High 出力時間をパルスごとに徐々に大きくするように工夫を加えている。(周波数を徐々に低くしている) 周波数が高いと磁化コイルに供給する電流が小さくなり、一方、周波数を低くするとソフトスイッチングができなくなり、大きな電流が流れてしまう。Fig.10 および Fig.11 に周波数を固定のときのシミュレーション結果を示す。パルスの High 出力時間をパルスごとに大きくしたときのシミュレーション結果を Fig.12 と Fig.13 に示す。この工夫に

よりソフトスイッチングを維持し、磁化コイル電流にも大きな電流が供給できている。

4.4 無線電力伝送システムを用いた増減磁評価

ここでは、無線電力伝送システムを用いた増減磁評価について述べる。今回開発した WPT システムを Fig.14 に示す。

C 型着磁器の可変磁束磁石を増磁する方向で磁化コイルに電流を WPT で供給した実測値と解析値を Fig.15 に示す。入力電圧は 290V である。負荷である磁化コイルの L_{mag} は 1mH で解析を行っている。実測では、目標値の 120A の供給に成功している。実測値は解析値と比較すると磁化コイル 50A 付近で実測値の上昇傾きが小さくなっている。これは、Fig.8 に示したように L_{mag} が 4mH 程度まで上昇するためと考えられる。

次に減磁方向に WPT で磁化コイルに供給した電流の実測値と解析値を Fig.16 に示す。ここでの入力電圧は 250V で評価した。実測値は解析値とほぼ同じ傾きで磁化コイル電流が上昇しており、目標の 120A を達成している。ただし、時間 140us 以降で、実測値と解析値が少し異なっている。要因としては、解析値は 1mH であるが、実測値は磁化コイルの L_{mag} が減磁時にも Fig.8 のように少し変化しているので、その影響が考えられる。

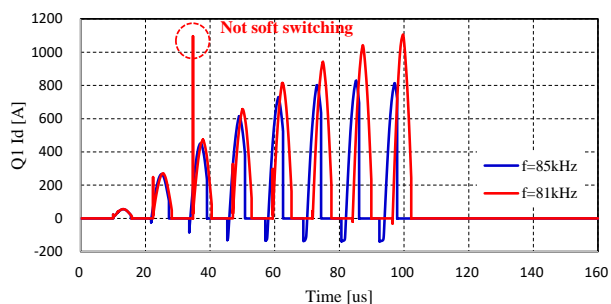


Fig.10 Id of Q1 at fixed frequency operation

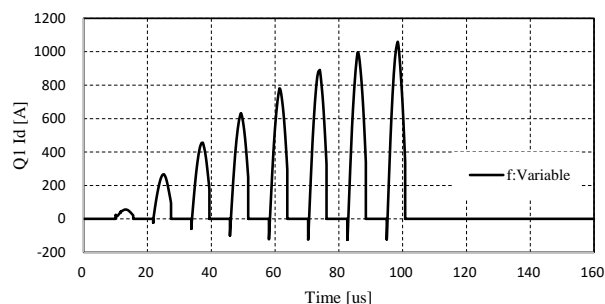


Fig.12 Id of Q1 in variable frequency operation

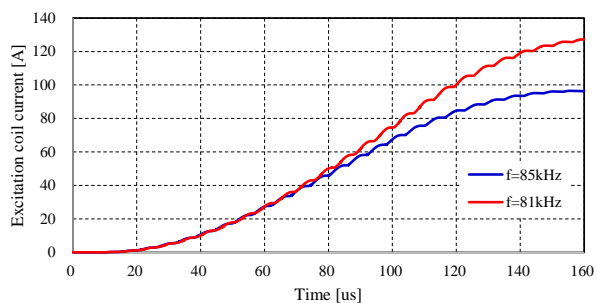


Fig.11 Excitation coil current at fixed frequency operation

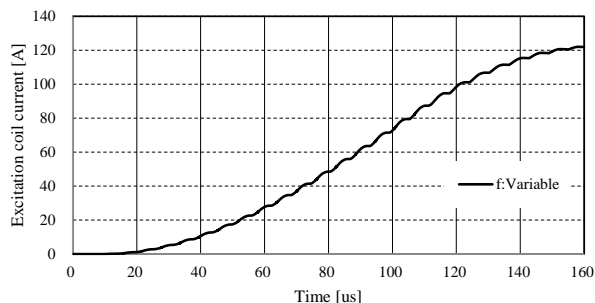


Fig.13 Excitation coil current in variable frequency operation

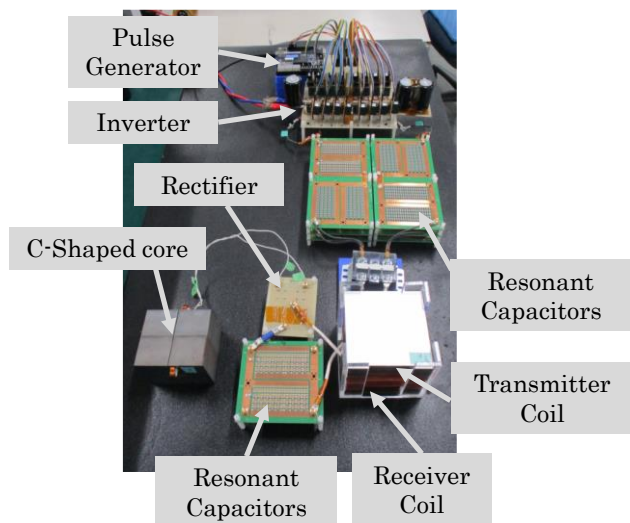


Fig.14 WPT System

5. 結論

本研究では可変磁束磁石と非接触給電を組み合わせた駆動システムを提案し、基礎的な評価としてC型コアを用いた非接触給電による磁石の増減磁を行った。得られた結論は下記の通りである。

- ① Nd-Fe-B系の可変磁束磁石を活用することで低速、大トルクの出力と高速、小トルクの効率の向上が可能
- ② 短時間大電力の電力伝送には負荷のインダクタンス値が大きな影響を与える
- ③ 磁気回路の飽和によるインダクタンスの変化による電流の遅れを考慮した電力伝送の制御が必要

今後はロータ内に複数の可変磁石モジュールを設置したモータを製作し、非接触瞬時大電力伝送システム装置により増磁電力を伝送することを目指す。さらに複数の可変磁石モジュールの磁力を変化できるかについても併せて検証を行う。

謝 辞

本研究の一部はJSPS科学研究助成事業(グラントナンバー: 1132386)の助成を受けて実施したものである。

文 献

- (1) 日高 勇気, RBF-netによる代替磁束モデルを用いた巻線界磁モータの数式モデルベース特性計算法, 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), 2022, 142 巻, 8 号, p. 609-619
- (2) R. Tsunata, M. Takemoto, S. Ogasawara and K. Orikiwa, "Variable Flux

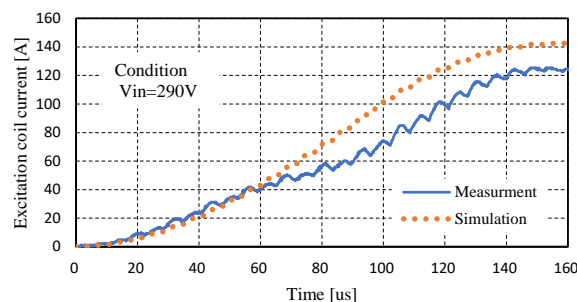


Fig.15 Magnetization Result

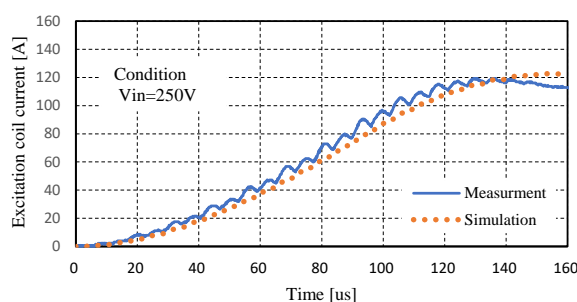


Fig.16 Demagnetization Result

- Memory Motor Employing Double-Layer Delta-Type PM Arrangement and Large Flux Barrier for Traction Applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 4, pp. 3545-3561
- (3) H. Yang et al., "Investigation of Hybrid-Magnet-Circuit Variable Flux Memory Machines With Different Hybrid Magnet Configurations," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 1, pp. 340-351
 - (4) C. Jiang, K. T. Chau, C. Liu and W. Han, "Design and Analysis of Wireless Switched Reluctance Motor Drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 1, pp. 245-254
 - (5) H. Fujimoto, O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita, D. Gunji and Y. Ohmori, "Development of Wireless In-wheel Motors for Dynamic Charging: From 2nd to 3rd generation," 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies