

水平方向からの磁場が磁気浮上鋼板に与える影響 (張力の印加位置に関する実験的検討)

伊藤誉淳、小田吉帆、奥野健吾、成田正敬、加藤英晃
(東海大学)

Effect of a magnetic field from the horizontal direction on a magnetically levitated steel plate
(Experimental consideration on applied position of tension)

Y. Ito, Y. Oda, K. Okuno, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ.)

はじめに

薄鋼板の製造工程では、ローラとの接触による表面品質の劣化が問題であるが、その解決策として電磁力による鋼板の浮上・搬送制御が提案されている^{1,2)}。著者らはこれまでに水平方向からエッジ部に設置した電磁石が磁気浮上中の鋼板の浮上性能に与える影響について検討している。水平方向からエッジ部に設置した電磁石の位置が磁気浮上中の鋼板の浮上性能に与える影響については、未だ十分な検討が行えていない。そこで本研究では板厚 0.24 mm の薄鋼板を対象とし、水平方向からの磁場の位置が非接触浮上時に与える影響を実験的に検証する。

実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm、厚さ 0.24 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (材質 SS400) とする。鋼板をアルミフレーム製装置内に設置した 5 か所のペアの電磁石を用いて非接触支持するために、鋼板の変位を 5 個の渦電流式非接触変位センサにより検出し、非接触位置決め制御する。鋼板水平方向 (x 方向) の位置決めは Fig. 1 に示した通り、電磁石を鋼板端部の相対する二辺に対向するように 4 か所配置し、レーザ式センサを利用することによって水平方向の変位を非接触計測する。

浮上実験

磁気浮上システムの電磁石配置図を Fig. 2 に示す。水平方向電磁石コアの中心間距離を a とする。磁気浮上鋼板に対して水平方向から印加する磁場の位置の変化が浮上性能にどのような影響を与えるのか検証するため、最適制御理論より求めたフィードバックゲインを用いて浮上実験を行った。このとき、水平方向電磁石に印加する定常電流値を 0.025 A、中心間距離 a を 550 mm とした。測定した鋼板の垂直方向の変位の時刻歴波形を Fig. 3 に示す。実験結果より、張力の印加位置によって、浮上性能が向上することを示した。

参考文献

- 1) 川田他, 第2回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集, (1990), pp. 59-62.
- 2) 押野谷他, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 56 (1990), No. 531, pp. 2911-2918.
- 3) 木田他, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 1 (2017), No. 1, pp. 76-81.

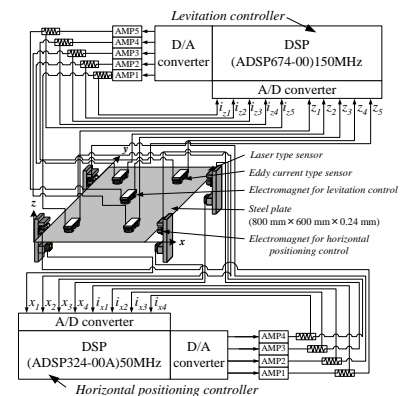


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.

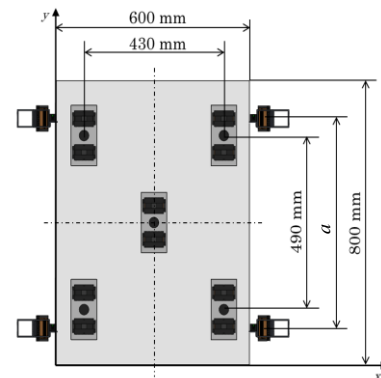


Fig. 2 Electromagnet arrangement.

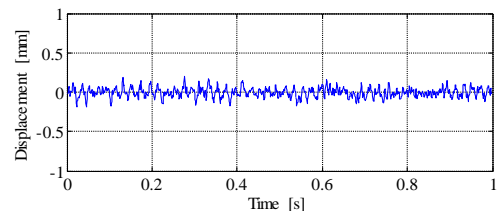


Fig. 3 Time history of the vertical displacement of the steel plate.

湾曲磁気浮上薄鋼板に発生する振動メカニズムに関する基礎的考察

多田誠、小川和輝、成田正敬、加藤英晃
(東海大学)

Fundamental consideration on vibration mechanism in thin steel plate with curvature during magnetic levitation

M. Tada, K. Ogawa, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ.)

はじめに

近年磁気浮上技術の応用による非接触搬送に関する検討が盛んに行われている¹⁾。当研究グループは、板厚が 0.30 mm 以下の鋼板を塑性変形しない範囲に曲げた状態で浮上させることを提案し、湾曲浮上によって外乱入力時でも安定した浮上状態が実現できることを確認した²⁾。本研究ではこの湾曲磁気浮上システムの浮上対象である薄鋼板の共振周波数を実験的に検討することを目的に、浮上中の鋼板に外乱を入力し、その応答について考察した。

浮上実験

Fig. 1 に装置の概略図を示す。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm、厚さ 0.18 mm の長方形亜鉛メッキ鋼板を使用する。鋼板を浮上させるために、5つの電磁石ユニットを使用している。この電磁石ユニットの取り付け角度を変更することで、鋼板を湾曲させて浮上させることができる。また、この電磁石ユニットを設置しているフレームには加振器が備え付けられており、フレームを振動させることで浮上鋼板に外乱を入力することができる。

本実験では、正弦波となるよう加振器を用いてフレームを振動させ、鋼板中央付近に設置したセンサから取得した変位時刻歴から変位標準偏差を算出した。このとき、鋼板の曲げ角度 θ は、過去の実験²⁾で最も振動が抑制された $\theta = 13^\circ$ で行った。

結果および考察

Fig. 2 にフレームの時刻歴波形とスペクトル波形を、Table 1 に周波数ごとの変位標準偏差を示す。Table 1 より、他の周波数に比べ 5 Hz の時最も変位標準偏差が高くなり、磁気浮上中に電磁石からの入力が比較的多く考えられる低周波にて鋼板が振動しやすくなることが確認できた。

参考文献

- 1) 石野他, 日本 AEM 学会誌, 26-1, (2018), 178-184
- 2) M. Tada et al., IPEC2018, (2018), 1580-1585

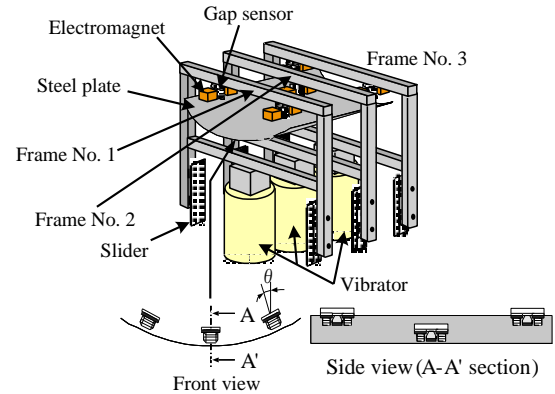


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus.

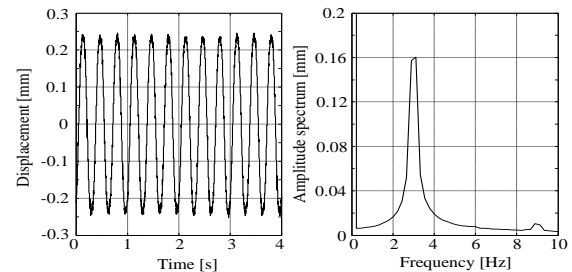


Fig. 2 Time histories of displacement and amplitude spectrums of vibrating frames by the sine disturbance (3 Hz).

Table 1 Standard deviation of displacement under sine disturbance.

Frequency of sine wave [Hz]	Standard deviation of displacement [mm]
3	0.235
5	0.538
7	0.207
9	0.154

リラクタンスネットワーク解析に基づく 巻線界磁型クローポールモータの損失算定

市川優太, 中村健二
(東北大学)

Loss Calculation of Field-Winding type Claw-Pole Motor based on Reluctance Network Analysis
Y. Ichikawa, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

近年、モータの構造を3次元化することで、鉄心と巻線の空間利用率を高め、トルクを向上させるアイデアがいくつか提案されている。その中の一つである、界磁巻線型クローポールモータは、爪状の極を上下でかみ合わせた特殊な構造の回転子鉄心の中に、トロイダル状の界磁巻線を取めるため、巻線占有率を大幅に高めることができる。しかしながら、クローポールモータの特性算定には、3次元電磁界解析が必須であること、また電機子電流に加え、界磁電流も制御パラメータとなるため、駆動回路も含めた高速・高精度な解析が必要不可欠である。

先に筆者らは、リラクタンスネットワーク解析¹⁾(RNA)に基づき、界磁巻線型クローポールモータの特性算定法について検討を行い、トルク特性を高速・高精度に算定可能であることを明らかにした²⁾。

本稿では、モータの性能評価を行う上で欠かすことのできない、損失の算定手法について、検討を行ったので報告する。

RNAによる回転子表面の渦電流損の算定

Fig. 1に、クローポールモータの基本構成を示す。本モータの回転子は、爪状の極を上下でかみ合わせた特殊な構造を有するため、バルク状の鉄を削り出して製作する。そのため、回転子表面にはギャップ高調波磁束に起因する渦電流が生じる。RNAにおいて、このような渦電流を算定するためには、Fig. 2に示すように、導体を分割要素の形状・寸法と導電率から求まる電気回路網モデルで表し、磁気回路網モデルと連成すれば良い¹⁾。

Fig. 3に、回転子表面の電気回路網モデルの一部を示す。本モデルをクローポールモータの3次元磁気回路網モデルと連成することで、様々な運転状態における回転子表面の渦電流損を算定することが可能になる。Fig. 4に、回転子表面に生じる渦電流損の算定結果を示す。また比較のため、3次元有限要素法による算定結果も示す。この図を見ると、両者は良く一致しており、本手法の有用性が了解される。

参考文献

- 1) 一ノ倉, 田島, 中村, 吉田, 「磁気回路法によるモータの解析技術」, 科学情報出版 (2016)
- 2) 市川, 中村, 鄭, 栗本, 日本磁気学会論文特集号, 2, 29 (2018)

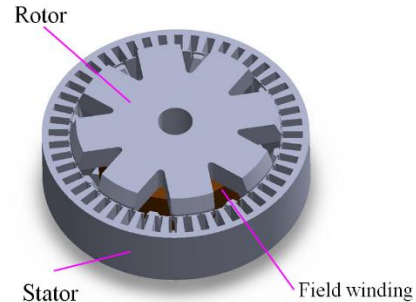


Fig. 1 Basic configuration of a claw-pole motor.

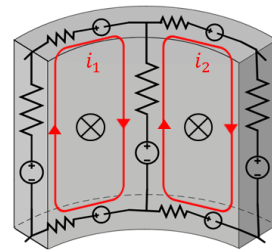


Fig. 2 Electric circuit model for calculating eddy current loss.

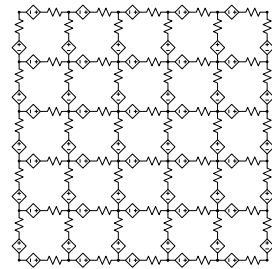


Fig. 3 Electric network model of a rotor surface of the claw-pole motor.

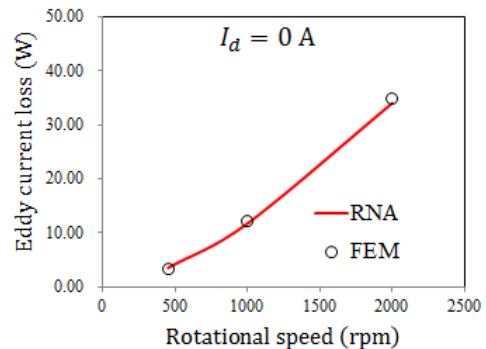


Fig. 4 Comparison of calculated eddy current losses.

移動支援機器用インホイール磁気ギヤードモータの高効率化

伊藤亘輝, 門松孝尚, 中村健二
(東北大学)

Efficiency Improvement of In-Wheel Magnetic-Geared Motor for Walking Support Machines

K. Ito, T. Kadomatsu, K. Nakamura
(Tohoku University)

1. はじめに

磁気ギヤードモータは、同一のトルク発生原理を有する永久磁石モータと磁気ギヤを、磁氣的に一体化させた構成を有するため、小型化や部品点数の削減が期待できる。先に筆者らは、試作機を用いて実現可能性と有用性を示したが、その一方で、効率についてはさらなる改善が必要であることが明らかになった¹⁾。

本稿では、3次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて、トルク向上と損失低減の両面から磁気ギヤードモータの高効率化について検討を行った。次いで、これらの検討に基づき、改良機を試作して実証実験を行うとともに、移動支援機器への適用可能性についても評価したので報告する。

2. 改良型磁気ギヤードモータの構成

Fig. 1 に、改良型磁気ギヤードモータの基本構成と諸元を示す。本ギヤードモータは、磁束変調型磁気ギヤの内側回転子の内部に、回転磁界を発生させるための電機子を収めた構造を有する。これにより、磁束変調型磁気ギヤの内側回転子が、永久磁石モータの回転子も兼ねることになり、部品点数が削減される。モータ部は3相9スロット集中巻の固定子と4極対の内側回転子からなり、磁気ギヤ部はモータ部の回転子と、27極のポールピース、そして23極対の外側回転子で構成される。したがって、ギヤ比は5.75 (=23/4) となる。

3D-FEM によるトルク向上と損失低減の検討に基づき、同図の改良型磁気ギヤードモータは、固定子をオープンスロット構造、内側回転子を埋込磁石構造とし、固定子・回転子鉄心には6.5%Si-Feを採用した。なお、ポールピースの材質は圧粉磁心、磁石材料はNd-Fe-B焼結磁石である。

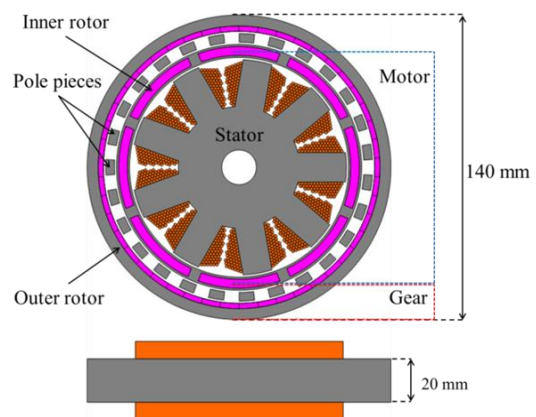
3. 実証実験および移動支援機器への適用評価

Fig. 2 に、実証実験の結果を示す。なお、この時の外側回転子の回転速度は174 rpmである。この図を見ると、最大効率は負荷トルク11 N·m時の84.7%であり、先行研究¹⁾に対して、約15%の向上を達成した。

さらに、移動支援機器への適用可能性について、改良機のトルク-速度特性や走行抵抗などを基に試算

したところ、路面が良好なアスファルトかつ低勾配時には、十分に適応可能であることが明らかになった。

なお、本研究の一部は JSPS 科研費 基盤(B) JP16H04310 の助成を受け行った。



Inner rotor speed	3162.5 rpm
Outer rotor speed	550 rpm
Number of turns/pole	59 turns
Winding space factor	46.1%
Gap length	1.0 mm × 3

Fig. 1 Specifications of the improved magnetic-geared motor.

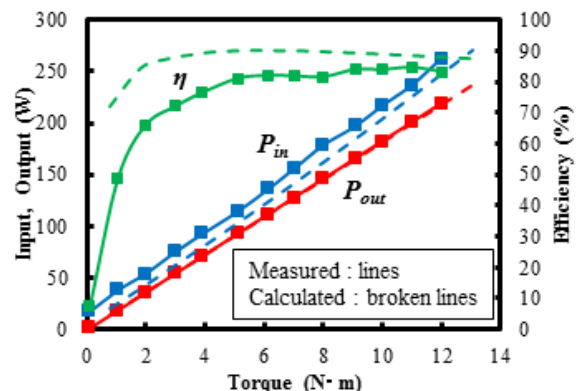


Fig. 2 Load characteristics of the trial magnetic-geared motor.

参考文献

- 1) 中村健二, 秋本一輝, 一ノ倉理, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-16-037 (2016)

LLG 方程式を利用した鉄心加工劣化予測手法に関する検討

羽根 吉紀, 中村 健二, *吉岡 卓哉, *川瀬 剛志, *石川 智一
(東北大学, *(株)デンソー)

Deterioration Prediction Method of Magnetic Properties in Magnetic Core
due to Machining Process by using LLG Equation

Y. Hane, K. Nakamura, *T. Yoshioka, *T. Kawase, *T. Ishikawa
(Tohoku University, *DENSO CORPORATION)

はじめに

モータなどの電気機器の鉄心材料に使用される電磁鋼板は、製造工程における加工の際、結晶粒に歪みが生じ、この影響で磁気特性が劣化し、機器の性能が悪化することが知られている。したがって、電気機器の高性能化のためには、加工による磁気特性の劣化まで考慮した解析手法の確立と、それに基づく、鉄心材料の最適な加工法の構築が必要不可欠である。しかしながら、任意の鉄心材料の加工後の磁気特性を実測することは、実用上、必ずしも容易ではないことから、何らかの方法による推測が必要である。

そこで本稿では、電気機器への適用を目的として、文献 1)で提案された簡略化された LLG 方程式に着目し、加工前の材料の磁気特性を基に、加工後の特性を推定する手法について検討を行ったので報告する。

LLG 方程式を利用した加工後の鉄心材料の磁気特性の計算結果

Table 1 および Fig. 1 に、それぞれ考察に用いた試料の諸元および寸法を示す。試料 1 は加工していない状態の材料である。試料 2 は、試料 1 に対して圧延を施し、厚みを変化させたものである。

Fig. 2 に、各試料の直流ヒステリシスループの実測値を示す。この図を見ると、加工することでループの形状が元の状態から大きく劣化することがわかる。

次いで、加工前の材料の磁気特性をもとに加工後の特性を予測するにあたり、ここでは加工前後の保磁力の実測値の比を補正係数として、これを上述の LLG 方程式にパラメータとして与えた。

提案手法の妥当性を確認するために、上述の手法を用いて計算したヒステリシスループを実測値と比較検証した。Fig. 3 に、ヒステリシスループの実測値と計算値の拡大図を示す。この図を見ると、提案手法によって材料の磁気特性を精度良く算定可能であることが了解される。

参考文献

1) 古屋, 藤崎, 上原, 清水, 大島, 村上, 高橋: 「高周波駆動における電磁鋼板の鉄損評価解析」, 電学研資 SA-13-6, RM-13-6 (2013)

Table 1 Specifications of test samples.

Sample No.		1	2
Rolled ratio	%	0	3
Density	kg/m ³	7600	

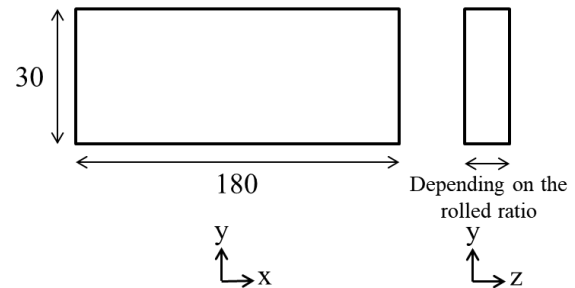


Fig. 1 Dimensions of the test samples.

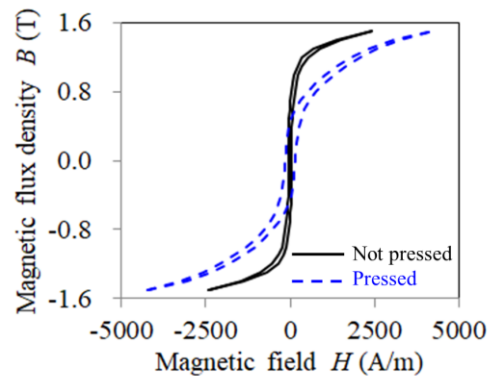


Fig. 2 Measured dc hysteresis loops.

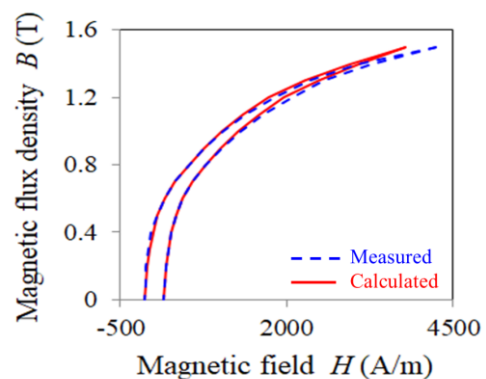


Fig. 3 Measured and calculated dc hysteresis loops.

埋込磁石型磁気ギヤのトルク向上に関する検討

水穴裕真, 中村健二, *鈴木雄真, *大石悠平, *立谷雄一, *操谷欽吾
(東北大学, *(株)プロスパイン)

Torque Improvement of Interior Permanent Magnet Magnetic Gear

Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, K. Kuritani

(Tohoku University, *Prospine Co., Ltd.)

はじめに

磁気ギヤは非接触で増減速可能であるため、機械式ギヤと比べて振動や騒音が小さく、保守性に優れる。その中でも磁束変調型磁気ギヤは、他の磁気ギヤと比べてトルク密度が高いことから¹⁾、実用化が期待されている。一方、回転子磁石には非同期の高調波磁束に由来する渦電流損が生じることが知られている。これに対し、回転子磁石をスポーク状に埋め込むことで、磁石渦電流損を低減する手法が提案されているが²⁾、有効磁束の減少に伴う、トルクの低下が懸念される。

本稿では、回転子磁石の形状に着目し、埋込磁石型 (IPM) 磁気ギヤのトルク向上に関する検討を行ったので報告する。

IPM 磁気ギヤのトルク向上に関する検討

Fig. 1 に、従来の IPM 磁気ギヤを示す。回転子磁石はスポーク状に埋め込まれており、磁気ブリッジがギャップ側に設けられている。また、バックヨークには非磁性のステンレスを用いることで、磁気回路の短絡を防いでいる。

Fig. 2 は、比較対象とした表面磁石型 (SPM) 磁気ギヤである。全磁石体積が、Fig. 1 の IPM 磁気ギヤと等しくなるように設計してある。

Fig. 3 に、本稿で提案する IPM 磁気ギヤを示す。内外回転子磁石の形状を台形にすることで、Fig. 1 および 2 の磁気ギヤと同体格のまま、磁石量を増加させた。また、磁気ブリッジをギャップ側ではなく、非磁性ヨーク側に設けることで、ブリッジ部での漏れ磁束の低減を図った。

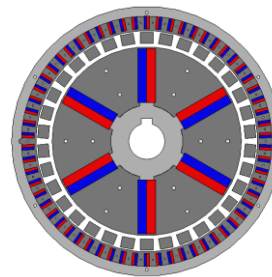
Fig. 4 に、3次元有限要素法で求めた、外側回転子の最大トルクと効率の算定結果を示す。なお、この時の高速側の回転数は 300 rpm である。同図(a)を見ると、提案する IPM 磁気ギヤ (Trapezoid) の最大トルクは 39.2 N·m であり、従来の IPM 磁気ギヤ (Conventional) の 2.5 倍以上であることがわかる。さらに、SPM 磁気ギヤに対しても、トルクは約 20% 上回っている。また、同図(b)から、効率についても提案の IPM 磁気ギヤが最も優れていることがわかる。

なお、本研究の一部は JSPS 科研費 基盤(B) JP16H04310 の助成を受け行った。

参考文献

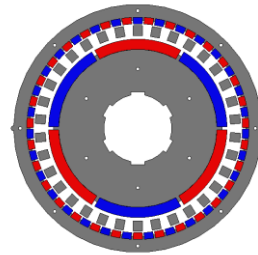
1) K. Atallah and D. Howe, *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2844 (2001).

2) T. Ikeda, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **33**, 130 (2009).



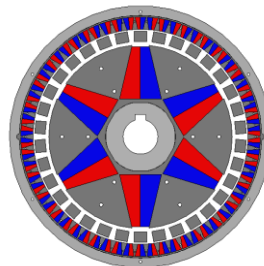
Gear ratio	10.33
Outer diameter	150 mm
Axial length	25 mm
Inner pole-pairs	3
Outer pole-pairs	31
Number of pole-pieces	34
Core material	35A250
Magnet material	Sintered Nd-Fe-B

Fig. 1 Specifications of a conventional IPM magnetic gear.



Gear ratio	10.33
Outer diameter	146 mm
Axial length	25 mm
Inner pole-pairs	3
Outer pole-pairs	31
Number of pole-pieces	34
Core material	35A250
Magnet material	Sintered Nd-Fe-B

Fig. 2 Specifications of an SPM magnetic gear.



Gear ratio	10.33
Outer diameter	150 mm
Axial length	25 mm
Inner pole-pairs	3
Outer pole-pairs	31
Number of pole-pieces	34
Core material	35A250
Magnet material	Sintered Nd-Fe-B

Fig. 3 Specifications of a proposed IPM magnetic gear.

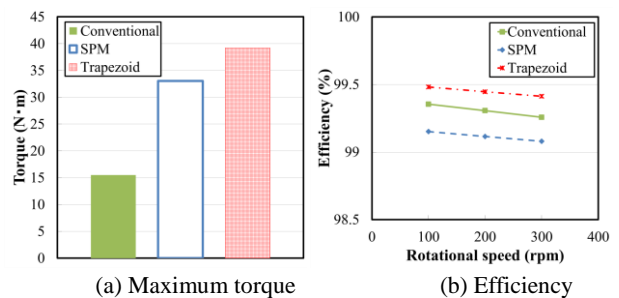


Fig. 4 Comparison of torque and efficiency of the magnetic gears.