

水平方向からの磁場を用いた柔軟鋼板の磁気浮上装置 (浮上支持力に関する実験的検討)

小田吉帆、木田将寛、鈴木稔樹、成田正敬、加藤英晃
(東海大学)

Electromagnetic levitation system for flexible steel plate
using magnetic field from horizontal direction
(Experimental consideration on suspension force for levitation)

Y. Oda, M. Kida, T. Suzuki, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ.)

緒言

薄鋼板は工業製品に広く用いられるが、搬送工程ではローラの接触によるメッキ不良や表面品質の劣化が生じる。この問題の解決方法として磁気浮上を用いた非接触支持技術が検討されている¹⁾。著者らは支持方向だけでなく水平方向に電磁石を設置し、位置決め制御を行うことで安定した非接触搬送を行う手法を提案している²⁾。このとき水平方向からの磁場のみによって鋼板が浮上する支持力を得られることを電磁界解析により確認している³⁾。しかし解析的に確認している鋼板に発生する支持力について実験的な検証は未だ行っていない。そこで本報告は板厚 0.19 mm の薄鋼板に対して有限要素法を用いた電磁界解析と実験から鋼板に加わる浮上支持力を求め、水平方向からの磁場を用いた柔軟鋼板の磁気浮上装置に関する基礎的な検討を行った。

水平方向から磁場を加えた際の吸引力

鋼板に発生する鉛直方向の吸引力 f_z について解析と実験から求める。Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。幅 100 mm、長さ 200 mm、板厚 0.19 mm の薄鋼板 (SS400) の長さ方向の一端を固定し、その自由端のエッジ部にフェライトコア表面が 5 mm となるように電磁石を設置した。鋼板に発生する鉛直方向の支持力 f_z は、非接触変位センサより得られた鋼板のたわみ量から算出した。電磁石に流す定常電流 I_x は 0.3 A から 2.0 A まで 0.1 A 刻みで変化させた。このとき鋼板のたわみを非接触変位センサを用いて測定した。また電磁界解析ソフト JMAG を用いて同様のモデルを作成し、 f_z を算出した。

解析と実験から得られた定常電流 I_x と鉛直方向の支持力 f_z の関係を Fig. 2 に示す。解析値と実験値は非常に一致を示し $I_x=0.7$ A 以下では I_x の変化に対し f_z は大きく変化することが分かった。

結言

水平方向から磁場を加えた際に鋼板に発生する支持力について解析と実験から比較検討を行った。今後は得られた実験結果を基に装置を作製し浮上実験を行う予定である。

参考文献

- 1) F. Kubota et. al., Proceedings of IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, (2013), 3439-3444.
- 2) 押野谷他, 日本機械学会論文集 C 編, 68-69, (2002), 1428-1434.
- 3) 成田他, 第 23 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, (2014), 123-128.

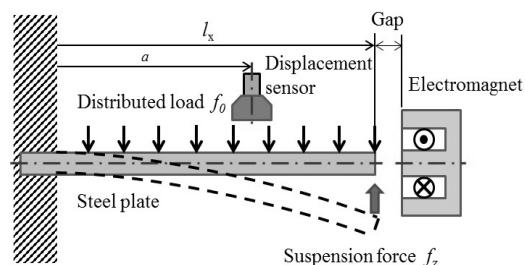


Fig. 1 Experimental apparatus for electromagnetic suspension.

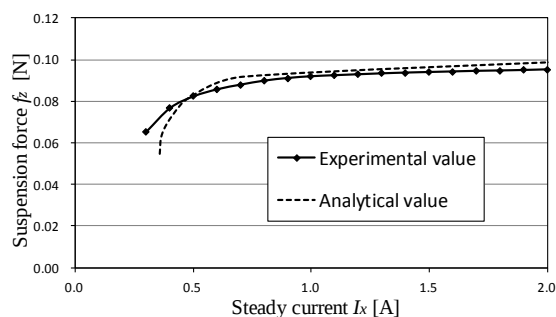


Fig. 2 Relation between steady current and suspension force.

柔軟鋼板の湾曲浮上制御 (湾曲鋼板の弾性振動に関する基礎的検討)

多田誠、米澤暉、丸森宏樹、成田正敬、加藤英晃
(東海大学)

Bending levitation control for flexible steel plate
(Fundamental consideration on elastic vibration of bending steel plate)

M. Tada, H. Yonezawa, H. Marumori, 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^{1,2)}。当研究グループは、これまでに板厚 0.30 mm 鋼板を用いた磁気浮上に関する検討を行い、その実現性を確認している³⁾。また、さらに薄い鋼板を対象とする場合には鋼板を塑性変形しない範囲で曲げた状態で浮上させることを提案し、安定した浮上状態の実現を確認している⁴⁾。本研究では更なる浮上性能の向上を目指す新システム構築の前段階として、鋼板に生じる振動のメカニズムに関して部分的に剛性を高めた鋼板を用いて実験的に検証した。

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 の長方形亜鉛めっき鋼板とする。鋼板を 5 箇所の電磁石により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する。浮上中の鋼板に生じる振動メカニズムを特定するために厚さ 0.20 mm のポリ塩化製シールを鋼板に貼付し剛性を部分的に高め、制振性能の比較検討を行った。シールは Fig. 2 に示すように(a)鋼板短手方向端部および(b)短手方向中央部に貼付して電磁石曲げ角度 15° で浮上を行った。

結果および考察

Fig. 3 に振動の抑制効果として浮上鋼板と電磁石表面との平衡浮上位置からの変位の時刻歴およびスペクトルを示す。スペクトルに着目すると(b)では 50~100 Hz 付近高周波の振動が抑制されていることがわかる。

参考文献

- 1) 松島他, 日本 AEM 学会誌, 21-2, (2013), 296-301.
- 2) 広瀬他, 電気学会論文誌 D, 133-5, (2013), 536-542.
- 3) 押野谷他, 日本機械学会論文集 C 編, 62-95, (1996), 127-133.
- 4) 丸森他, 日本機械学会論文集, 81-823, (2015), 14-00471.

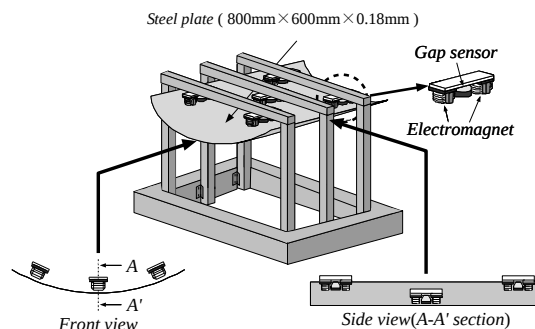


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus.

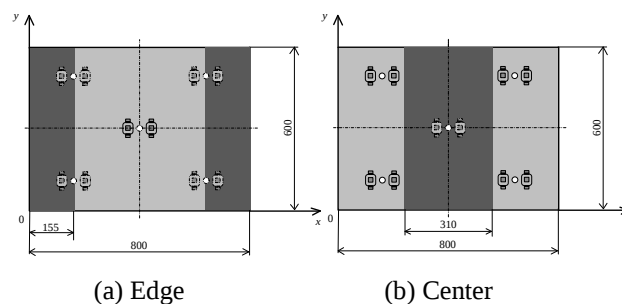


Fig. 2 Patterns of pasting seal on the steel plate.

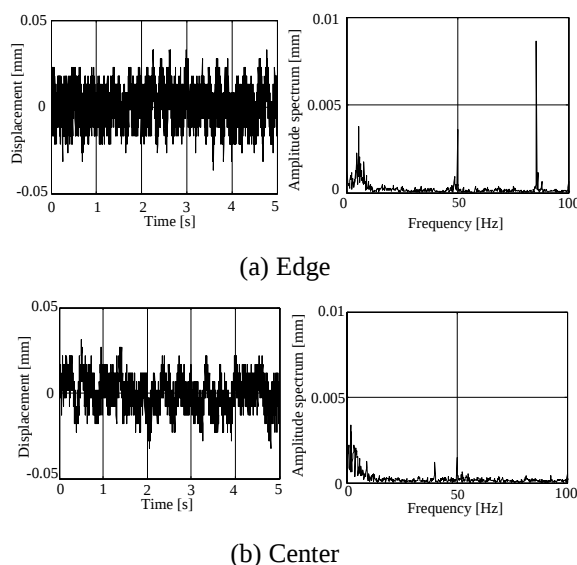


Fig. 3 Bending levitation result with seal patterns.

水平方向からの磁場が磁気浮上搬送鋼板に与える影響 (浮上特性に関する基礎的研究)

木田将寛、成田正敬、加藤英晃、森山裕幸
(東海大学)

Effect of a magnetic field from the horizontal direction on a magnetically levitated transport steel plate
(Fundamental study on the levitation characteristics)

M. Kida, T. Narita, H. Kato, H. Moriyama
(Tokai Univ.)

はじめに

薄鋼板の製造工程では、ローラー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浮上中の鋼板形状を差分法により求め、エッジに印加した磁場による鋼板のたわみ抑制効果について検討している³⁾。しかし、水平方向からエッジ部に設置した電磁石が磁気浮上搬送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 0.18 mm の薄鋼板を対象とし、水平方向からの磁場が非接触搬送時に与える影響を実験的に検証する。

実験装置

磁気浮上システムの概略を Fig. 1 に示す。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。

搬送実験

搬送される磁気浮上鋼板に対して水平方向から印加する磁場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浮上用ゲインを用いて搬送実験を行った。搬送装置が静止している状態から加速度 0.49 m/s^2 にて搬送を開始し、速度 0.6 m/s に達した時点で等速にて搬送、その後減速、停止という条件で行った。制御点にて測定した鋼板の水平方向の変位の時刻歴波形を Fig. 2 に示す。このとき、水平方向電磁石に印加する定常電流値を (a) 0.025 A と (b) 0.4 A とした。同図より、定常電流値 0.025 A に対し、定常電流値 0.4 A にて鋼板の水平方向の最大振幅値が抑制されることが確認できた。このことより、水平方向からの磁場が薄鋼板の安定した搬送に効果があることが確認できた。

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, (1990), 59-62.
- 2) 押野谷他, 日本機械学会論文集 C 編, 56-531(1990), 2911-2918.
- 3) 成田他, 第 22 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, (2013), 71-72.

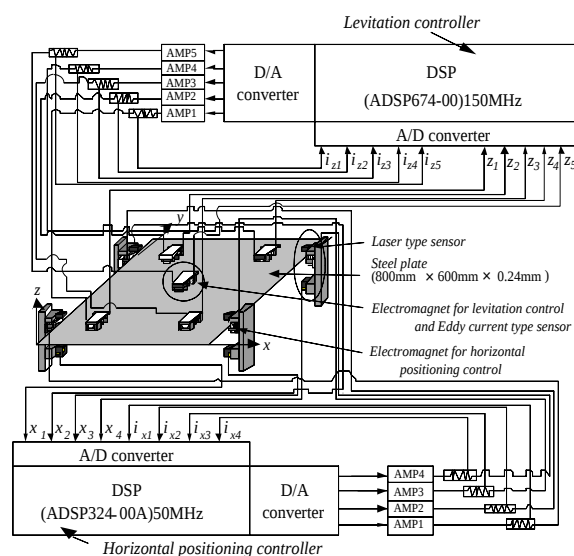


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.

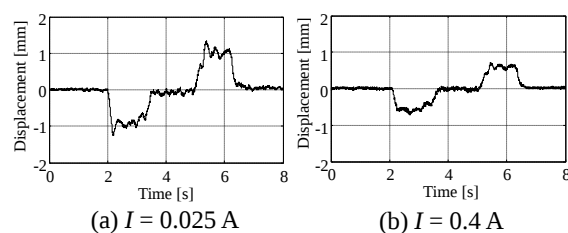


Fig. 2 Time histories of displacement of the steel plate in horizontal direction.

電磁石による走行磁性体の非接触案内 (FEM を用いた電磁石配置に関する基礎的検討)

川崎謙太、成田正敬、加藤英晃、森山裕幸
(東海大学)

Noncontact guide for traveling elastic steel plate using electromagnets
(Fundamental consideration on electromagnets placement using FEM)

K. Kawasaki, T. Narita, H. Kato, H. Moriyama
(Tokai Univ.)

はじめに

製鉄所における連続鋼板製造ラインは長さ数 km にも及び、その間連続鋼板はロールにより接触支持搬送されている。この様なロールによる連続鋼板の搬送ラインにおいて、鋼板とロールの接触による表面品質劣化などの問題が多数存在する。この問題を解決するため、当研究グループでは走行する連続鋼板のエッジ近傍に電磁力を印加することにより、鋼板の振動を抑制する非接触エッジ制御を検討している¹⁾。また、連続鋼板が進行方向を変更しながら走行する部分に対する非接触案内を実施し、その有効性を確認している²⁾。しかし、電磁石配置位置など最適な案内路の設計手法は確立されていない。本報告では、走行中の鋼板の応力静的構造に着目し、解析結果からループ部分の最適な非接触案内路を設計するための基礎的検討を行った。

走行中の鋼板の応力解析

本研究では、吊り下がっている鋼板の解析モデルに張力³⁾を与えて静的構造解析を行った。解析は静的構造解析ソフトである ANSYS Workbench Mechanical を用いた。解析により得られたミーゼス応力の分布を Fig. 1 に示す。走行時の鋼板はループ形状部の下部に張力の影響を受けて応力が高くなる位置が得られた。

走行実験の結果および考察

解析より得られた応力の高い箇所に電磁石を集中的に設置した走行実験を行い、鋼板の面外方向の変位を測定標準偏差から振動抑制効果の評価を行った。本報告ではループ形状部分の入り口と中間と出口 (0° 90° 180°) に電磁石を配置した案内路 (A) と連続鋼板のループ形状部の下部に集中的 (20° 90° 160°) に電磁石を配置した案内路 (B) を用意し、鋼板の走行速度を 1000 m/min とした。各案内路を用いた走行鋼板の変位標準偏差を Fig. 2 に示す。それぞれの結果を比較すると、電磁石をループ形状部分下部に集中的に配置した案内路 (B) の方が (A) と比較して変位標準偏差が減少していることが確認できた。

以上の結果から解析により得られた応力の高い箇所に電磁石を集中的に設置することで走行中の安定性が高い案内路が得られることがわかった。

参考文献

- 1) 柏原他, 日本 AEM 学会誌, 11-4, (2003), 235-241.
- 2) 川崎他, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, (2015), 52-53.
- 3) ベルト伝動技術懇話会, 新版 ベルト伝動・精密搬送実用設計, 養賢堂, (2006), 21-25.

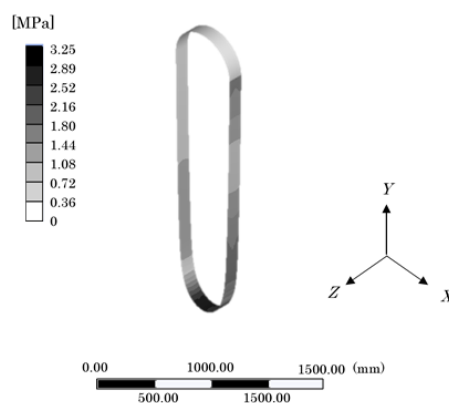


Fig. 1 Analysis result.

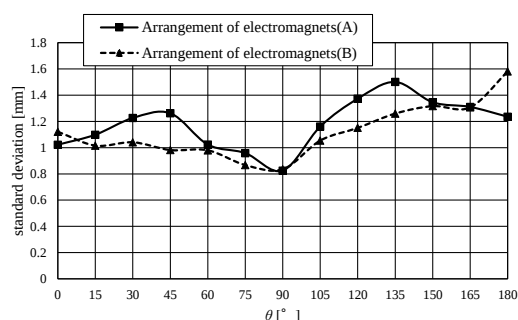


Fig. 2 Standard deviation of displacement.

永久磁石を用いた薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システムにおける最適配置 (水平方向の磁場に関する基礎的検討)

鈴木稔樹、成田正敬、加藤英晃、森山裕幸
(東海大学)

Optimal placement of permanent magnet in hybrid magnetic levitation system for thin steel plate
(Fundamental considerations on effect of magnetic field from horizontal direction)

T. Suzuki, T. Narita, H. Kato, H. Moriyama
(Tokai Univ.)

はじめに

薄鋼板は搬送工程において通常ローラによる接触搬送が行われ、ローラの接触による傷やめつき不良など表面品質の劣化が問題となっている。この問題を解決するため磁気浮上による非接触支持に関する検討が盛んに行われている¹⁾。当研究グループでは、電磁石を設置していない部分に永久磁石を設置し、これらの磁力を浮上安定化のために有効利用したハイブリッド磁気浮上搬送システムを提案している²⁾。一方、浮上方向のみを制御する従来のシステムを用いて鋼板の非接触搬送を行った場合、加減速時に生じる慣性力によって浮上中の鋼板が横滑りし、落下する可能性が考えられる。そのため、これまでに著者らは浮上方向に加え水平方向に電磁石を設置し、位置決め制御を行うことで磁気浮上搬送に成功している³⁾。本報告はハイブリッド磁気浮上システムに水平方向の位置決め制御を加え、水平方向から磁場を変化させた場合における板厚 0.24 mm の鋼板のたわみを抑制する永久磁石の最適配置探索に関する検討を行った。

ハイブリッド磁気浮上システム

浮上対象である長さ 800 mm、幅 600 mm、板厚 0.24 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (材質 SS400) 上方の 5 ヶ所に電磁石ユニット、電磁石ユニットの周囲に複数のフェライト磁石、水平方向位置決め制御を加えた鋼板水平方向の位置決めは、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、水平方向の変位、速度、電磁石コイル電流をフィードバックし、定常電流 I_x を加えて鋼板の端部が各電磁石表面から 5 mm の距離を保つように制御を行う。

遺伝的アルゴリズムによる探索結果

$I_x = 0.1$ A および 0.5 A の条件で遺伝的アルゴリズムを用いた永久磁石の最適配置探索を行った。探索によって得られた各定常電流値における永久磁石配置を Fig. 1(a), (b) に示す。今後は本報告で得られた配置を用いて浮上実験を行い、たわみ抑制効果、浮上安定性について検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) T. Mizuno et. al., Mechanical Engineering Journal, 3-2, (2016), 15-00687.
- 2) 小村他, 第 28 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, (2016), 232-233.
- 3) 押野谷他, 日本機械学会 C 編, 67-661, (2001), 2855-2862.
- 4) 栗原他, 第 27 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集 (2015), 53-54.

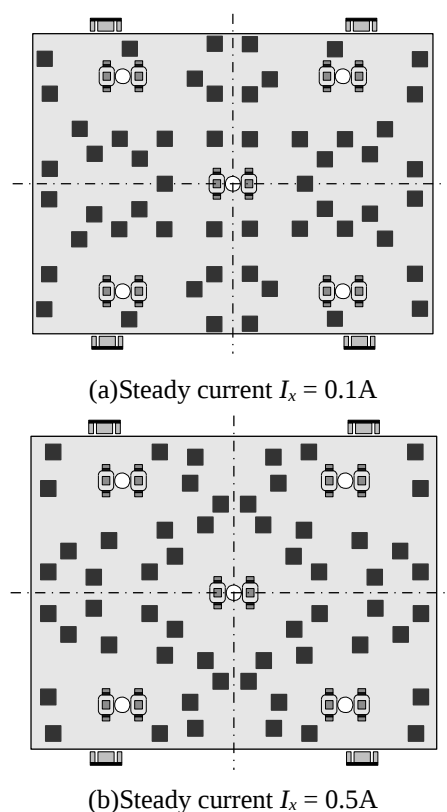


Fig. 1 Placement of permanent magnets.

アルミニウムリング引上げのための交流アンペール力の生成

大路貴久, 須田一輝, 飴井賢治, 作井正昭
(富山大学)

Generation of Ac Ampere force for pulling up an aluminum ring

T. Ohji, K. Suda, K. Amei, M. Sakui
(Univ. of Toyama)

はじめに

磁気浮上の一方式である交流誘導式では、アルミニウム (Al) 等の非磁性金属 (浮上対象物) と交流電磁石との間に準定常な反発力が生じる。このとき交流電磁石の上方に浮上対象物を配置し、自重に逆らうように反発力を発生させることで非接触浮上状態が得られる。筆者らの提案する交流アンペール式磁気浮上では、従来の交流誘導式で生じる誘導反発力に加え、金属内の誘導電流に対し外部磁束を印加することで交流アンペール力が生成される⁽¹⁾。交流電磁石を上方に配置し、浮上対象物をその下方に配置した場合、下向きの誘導反発力と浮上対象物の自重の和よりも大きな上向きの交流アンペール力を生成できれば、浮上対象物の引上げ動作が可能となる。本稿では、Al リングを浮上対象物とし、Al リングに誘導電流および交流アンペール力を生成するための装置を試作し、Al リングの引上げ動作試験を行った。

実験装置と引上げ試験

Fig. 1 は実験装置の写真である。中央上部には誘導電流発生用の交流電磁石 (EM1) が設置されており、パンケーキコイルと継鉄で構成されている。また、周囲には 6 個の交流電磁石 (EM2) が設置されている。EM1 と EM2 に囲まれた空間内で Al リング ($\phi 120 \text{ mm} \times \phi 110 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 24g) の引上げ試験を行う。EM1 に対する EM2 の励磁電流位相差を任意に設定できるように 2 台の交流電源で別回線による回路を構築する。Fig. 2 は各部の相対位置を示しており、Al リング上面とパンケーキコイル表面とのギャップを d [mm] とする。

Fig. 3 は $d = 10 \text{ mm}$ を初期位置としたときの Al リングの引上げ動作結果を示す。各電磁石の励磁電流、周波数は $3 A_{\text{max}}$, 120 Hz とし、EM1 の励磁完了後に EM2 をステップ状、ランプ状 (3 種) に励磁した。図より全ての場合でスペーサに接触 ($d = 5.5 \text{ mm}$) しており、過渡的な跳ね上がりによるものではなく連続的な引上げ力による浮上であることが確認できる。なお、 $d = 8.0 \text{ mm}$ 付近の段差は、リングのある一カ所から順次引上げられたためである。

まとめ

Al リングに対し準定常的な交流アンペール力を生成するための装置を製作し、非磁性金属の安定的な引上げ動作が可能であることを示した。今後は対象物の形状や質量の制約を減らすとともに引上げ機構の最適化を図る。

本研究は科研費 (25289014) 助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) T. Ohji, et al., J. Mater. Process. Tech., 181, pp. 40-43 (2007)

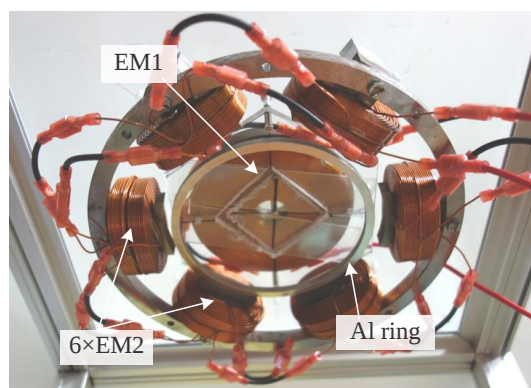


Fig. 1 Arrangement of EMs and an Al ring.

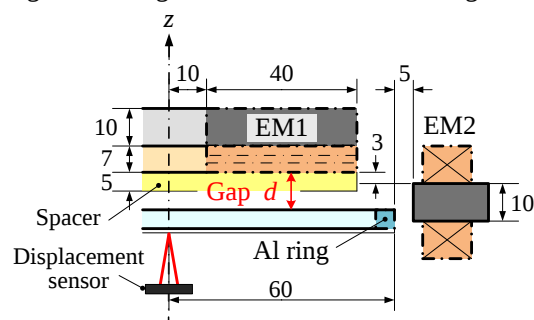


Fig. 2 Relative positions of EMs and an Al ring.

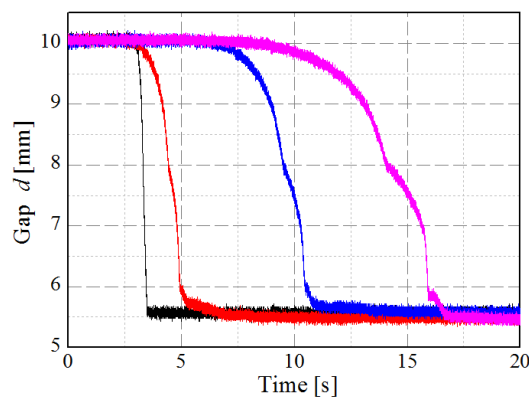


Fig. 3 Experimental results of magnetic pulling-up of Al ring.

電動工具用 SR モータの高速回転化に関する検討

熊坂悠也, 中村健二, 一ノ倉 理
(東北大学)

Consideration of Higher-Speed of SR Motor for Electric Power Tools

Y. Kumasaka, K. Nakamura, O. Ichinokura
(Tohoku University)

はじめに

先に筆者らは、スイッチトリラクタンس (SR) モータの電動工具への応用を目的として、現状の電動工具に使用されている永久磁石 (PM) モータと同体格の SR モータを設計・試作し、ほぼ同等の性能が得られることを明らかにした¹⁾。本稿では、SR モータの特長を生かし、現状の PM モータよりもさらに高速回転化した SR モータの特性について、有限要素法 (FEM) を用いて検討を行ったので報告する。

高速回転 SR モータの諸元と解析結果

Fig. 1 に、検討に用いた SR モータの諸元を示す。この SR モータは、実際の電動工具に用いられている PM モータと同体格、同ギャップ長である。以下の検討では、SR モータの回転速度を PM モータの約 2.1 倍とした。したがって、現状の PM モータに用いられている機械式の減速ギヤのギヤ比が 9 であるのに対して、SR モータのギヤ比は 20 とした。また、SR モータの回転数が 2 倍以上になり、鉄損の増大が想定されるため、鉄心材料は 6.5%SiFe とした。

Fig. 2 に、ギヤ比で換算したトルク対速度特性を示す。この図を見るとほぼ同等の特性が得られていることがわかる。Fig. 3 は、巻線電流密度に対する換算トルクの比較である。同体格、同ギャップ長の SR モータであっても、高速回転化することで、減速後のトルクは PM モータを上回ることがわかる。Fig. 4 に、銅損と鉄損の計算値を示す。高速回転化したことで鉄損の増加が懸念されたが、低損失材料である 6.5%SiFe を採用したことで、PM モータよりも鉄損が低く抑えられたことがわかる。

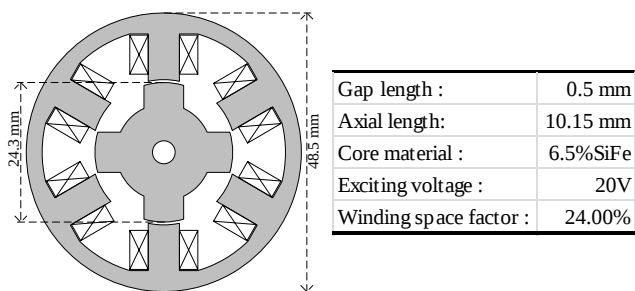


Fig. 1 Specifications of a high speed SR motor.

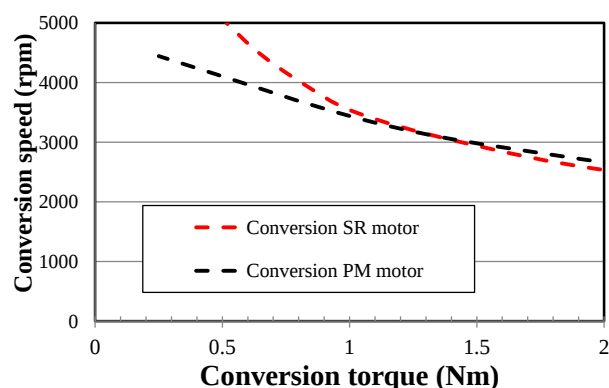


Fig. 2 Comparison of torque versus speed characteristic.

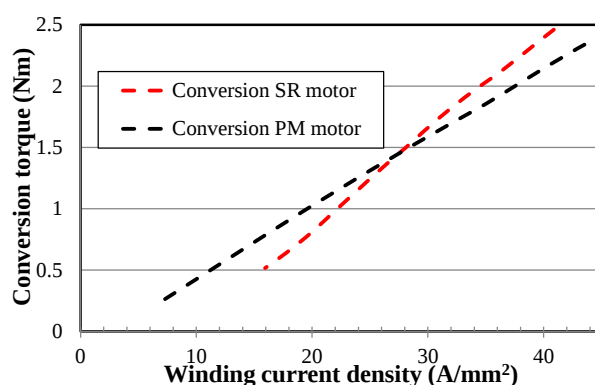


Fig. 3 Comparison of winding current density versus torque characteristic.

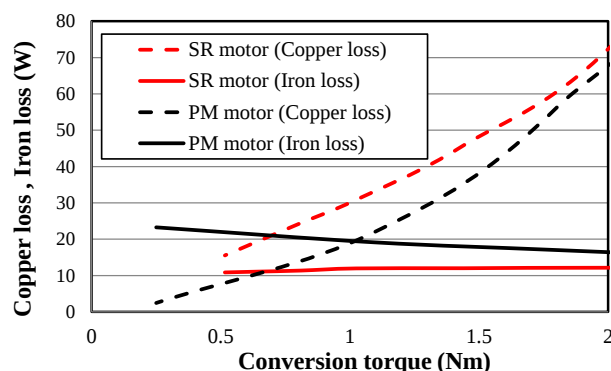


Fig. 4 Comparison of torque versus copper loss, iron loss characteristics.

参考文献

- 1) K. Nakamura, Y. Kumasaka, K. Isobe, O. Ichinokura, The papers of Technical Meeting on Rotating Machinery, IEEJ, RM-15-146 (2015).

波力発電用リニア発電機の制御に関する検討

紙屋 大輝, 後藤 博樹, 一ノ倉 理
(東北大学)

A Study of Control of Linear Generator for Wave Power Generation

D. Kamiya, H. Goto, O. Ichinokura
(Tohoku University)

はじめに

近年, 再生可能エネルギーへの注目が高まる中, 周囲を海で囲まれている日本においては, 波力発電は次世代エネルギーとして特に重要といえる。しかし, 波力発電設備は海中に設置されることから高い保守性が必要であることや他の発電方式に比べ設備が大型化し, 発電コストが高いことから, いまだ商用化には至っていない。波力発電にはいくつかの方式があるが, 筆者らはリニア発電機を用いたポイント・アブソーバ式波力発電装置に着目した。本方式は機械的な変換機が不要であることから, 機械損失を減少でき, 保守性にも優れるが, 実用化にはさらなる高出力密度化が求められる。本稿では, 制御手法に注目し, 実際に制御装置を試作して模擬実験を行うことで検討を行った。

検討した発電制御方式

本方式における概要図を Fig. 1 に示す。発電機制御の手法として, 波と発電機の運動を共振させることで機械的振動を大きくする共振制御が提案されてきたが, 機械共振による大きな運動や, 大電流が流れることによる発電機損失の増加などの欠点が明らかになった。そこで, これらの欠点を解決するため, 電気工学におけるインピーダンスマッチングの発想に基づく ACL 制御 (Approximate Complex-conjugate control considering generator copper Losses) が提案された¹⁾。この制御法は, 共振制御では考慮していなかった発電機損失を考慮し, 電気出力を最大化する意図に基づいて系を共振状態から遠ざける。

これら 2 つの制御方式について Fig. 2 に示す実験装置を用いて, 模擬実験を行った。Fig. 3(a) に入力波周期 0.57s 時の変位波形を示す。共振制御時の変位振幅が ACL 制御時よりも大きくなっていることがわかる。これは, 共振制御時は波と発電機が機械共振状態となっているためと考えられる。Fig. 3(b) に発電電力波形を示す。それぞれの平均出力は共振制御が -1.2W, ACL 制御が 8.9W となった。振幅自体は共振制御が大きいものの, 負の方向への振幅が大きく,

その平均値は負となっていることがわかる。これは, 浮体と入力波を共振させるために必要な発電機推力が大きく, 銅損が過大となったためと考えられる。ACL 制御時の発電電力波形は若干負の値になるタイミングがあるものの, その大きさは共振制御ほど大きくなく, 平均発電電力は共振制御時より大きくなっていることが了解される。

なお, 本成果は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものである。

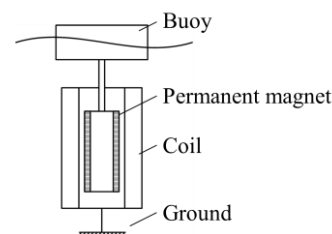


Fig. 1 Overview figure of wave generation

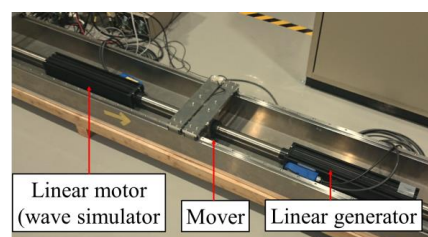


Fig. 2 Appearance of the experimental equipment

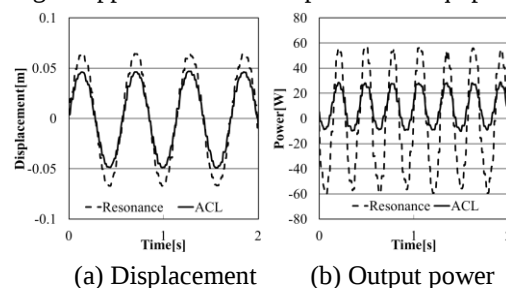


Fig. 3 Waveforms taken in the experiments

参考文献

- 1) Villa Jaén, Antonio, Agustín García-Santana, and Dan El Montoya-Andrade: International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol.24, No.6, pp.875-890 (2014)

磁性鉄粉まで考慮した圧粉磁心の電磁界解析に関する検討

増井 出, 中村 健二, 一ノ倉 理
(東北大学)

Electromagnetic Field Analysis for Soft Magnetic Composite considering Magnetic Particles

Izuru Masui, Kenji Nakamura, Osamu Ichinokura

(Tohoku University)

1. はじめに

圧粉磁心は磁性鉄粉に絶縁被膜を施し、圧縮成型した磁性体であり、コア形状の自由度が高く、高周波鉄損が小さいなどの特長を有する。圧粉磁心の高性能化には、飽和磁束密度を高めながら、鉄損を低減することが必須であり、そのためには、磁性鉄粉の粒子径を小さく、かつ絶縁被膜の厚さを極力薄くするとともに、高い圧力で圧縮成型することで、鉄粉の充填率を上げることが必要不可欠である。しかしながら、極端に絶縁被膜を薄くすると、被膜不良によって磁性鉄粉同士が直接接触する、あるいは被膜に導電性の不純物が入り込む等によって、磁性鉄粉間に渦電流が流れるなどの問題が生じる。

そこで本稿では、磁性鉄粉のサイズや絶縁被膜の厚さ、抵抗率などを勘案した圧粉磁心の最適設計法の確立を目的として、圧粉磁心内の磁性鉄粉まで考慮した電磁界解析について検討を行ったので報告する。

2. 磁性鉄粉を考慮した電磁界解析

有限要素法 (FEM) を用いて、圧粉磁心内の磁性鉄粉に流れる渦電流を解析するためには、非常に微細な磁性鉄粉を要素分割する必要がある。本稿では、Fig. 1 に示すように、磁性鉄粉 1 つの大きさを一辺 $140\ \mu\text{m}$ の立方体と仮定し、これを縦 6 個、横 6 個に等間隔に並べたモデルについて、渦電流の解析を行った。Fig. 2 に 3 次元 FEM モデルを示す。電磁界分布の対称性から 1/4 モデルを用いて、渦電流損失の解析を行った。なお、磁性鉄粉間の絶縁被膜の厚さは $0.7\ \mu\text{m}$ とし、被膜の抵抗率は Fig. 3 のリングコア試料を四端子法で測定した抵抗値から $23.2\ \text{m}\Omega\cdot\text{m}$ と試算した。

Fig. 4 に、単位体積当たりの渦電流損失の計算値と実測値を示す。この図を見ると、被膜の実効的な抵抗率を考慮することによって、精度の高い損失算定ができることが了解される。

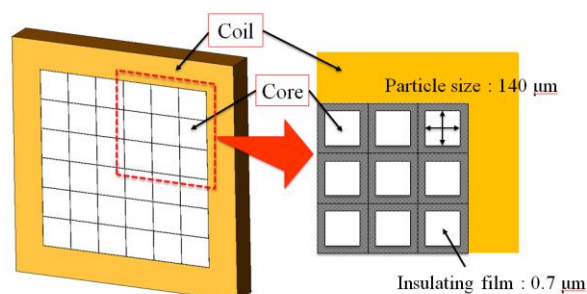


Fig. 1 Analysis model of SMC including magnetic particle.

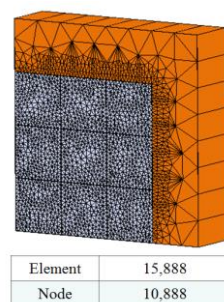


Fig. 2 3-D FEM model.



Outer diameter	55 mm
Inner diameter	45 mm
Height	5 mm

Fig. 3 Specifications of a ring core of SMC.

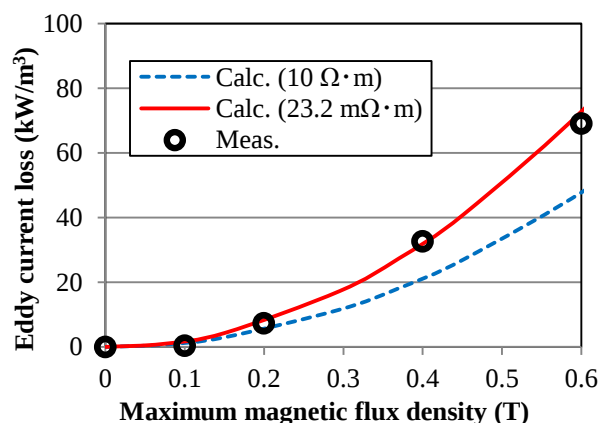


Fig. 4 Eddy current loss.

RNA による 100 kVA 級重ね巻型 3 相一体可変インダクタの設計試作

中村健二, 山田雄太, 大日向 敬*, 有松健司*,
山田 真**, 瀧口雅也**, 小島武彦**, 一ノ倉 理
(東北大学, *東北電力, **富士電機)

Design and Prototyping of 100 kVA Concentric-Winding type Three-Phase Variable Inductor
based on Reluctance Network Analysis

K. Nakamura, Y. Yamada, T. Ohinata*, K. Arimatsu*,
M. Yamada**, M. Takiguchi**, T. Kojima**, O. Ichinokura
(Tohoku University, *Tohoku Electric Power Co., Inc., **Fuji Electric Co., Inc.)

はじめに

先に筆者らは、直流制御巻線と交流主巻線を重ねて磁脚に施した重ね巻型 3 相一体可変インダクタを提案し、良好な特性を有することを明らかにした¹⁾。本稿では、リラクタンスネットワーク解析 (RNA) に基づき、6.6 kV - 100 kVA 級の実証器の解析設計と試作試験を行ったので報告する。

RNA による 100kVA 器の解析設計・試作試験

Fig. 1 に、重ね巻型 3 相一体可変インダクタの基本構成を示す。RNA モデルの導出に際しては、まず解析対象である磁心を、Fig. 2 に示すように複数の要素に分割し、各分割要素を 3 次元の単位磁気回路で表す。ここで、図中の磁気抵抗は分割要素の寸法と材料の $B-H$ 曲線から求めることができる。

Fig. 3 に、RNA を用いて設計した 100 kVA 級の実証器の諸元を示す。Fig. 4 に無効電力制御特性の比較を示す。この図を見ると、実証器は線形かつ連続的に無効電力を制御可能であり、設計通りの制御量が得られていることがわかる。Fig. 5 は、定格換算した出力電流の歪み率である。なお、実証実験では電源電圧の歪み等に由来する第 3 調波成分が含まれていたことから、これを除いた結果についても併せて同図中に示す。この図を見ると、実証器の歪み率は全制御範囲で 5% 以下の目標を達成できたことがわかる。また、このような高圧大容量器についても、RNA により十分な精度で設計可能であることが明らかになった。なお、本研究は JST 研究成果展開事業 A-STEP の支援を受け行った。

参考文献

1) K. Nakamura, et al., *IEEE Trans. Magn.*, **51** 8402104 (2015)

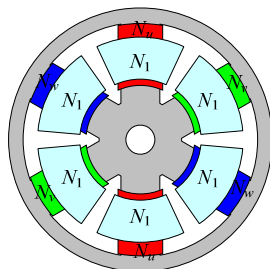


Fig. 1 Basic configuration of a concentric-winding type three-phase variable inductor.

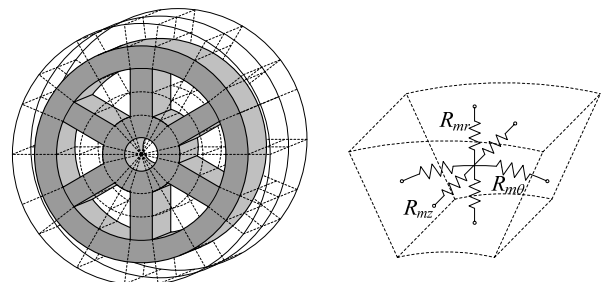


Fig. 2 RNA model of the concentric-winding type three-phase variable inductor.

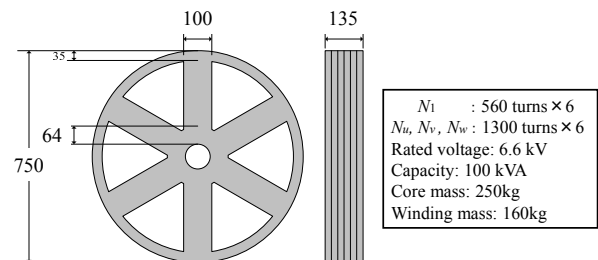


Fig. 3 Specifications of 6.6 kV - 100 kVA concentric-winding type three-phase variable inductor.

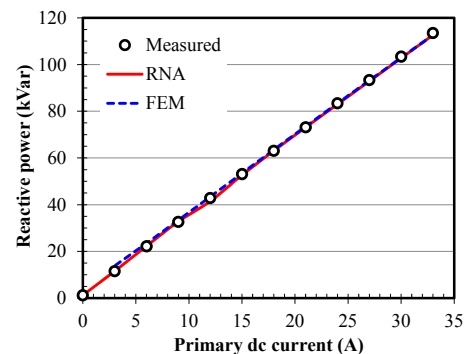


Fig. 4 Comparison of the reactive power characteristics.

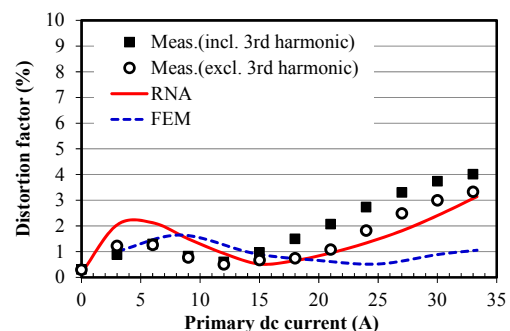


Fig. 5 Comparison of the distortion factor.

RNA によるフェライト磁石モータの減磁解析に関する考察

吉田 征弘, 門間 大樹, 田島 克文
(秋田大学)

A Consideration of Demagnetizing Analysis of Ferrite Magnet Motor Based on RNA
Y.Yoshida, D.Momma, K.Tajima
(Akita Univ.)

はじめに

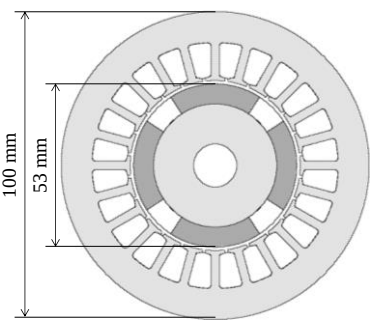
フェライト磁石は外部磁界によって減磁しやすいため、フェライト磁石モータの設計には減磁を考慮した解析が必要になる。筆者らは、リラクタンسネットワーク解析 (RNA) を用いた永久磁石モータの損失算定について検討を進めているが¹⁾, 外部磁界による減磁を考慮したモータの解析手法は未だ確立されていない。そこで本稿では、RNA 用いた表面磁石形 (SPM) フェライト磁石モータの減磁解析手法を示し、有限要素解析 (FEA) による算定結果と比較を行うことで、その妥当性について検討を行ったので報告する。

RNA によるフェライト磁石モータの減磁解析

Fig.1 に検討に用いた SPM モータの形状と諸元を示す。永久磁石にはフェライト磁石を用い、巻線は分布巻で、磁極ピッチが 6、コイルピッチが 5 の短節巻であり、1 スロットあたり 100 ターン施されている。

Fig.2 に SPM モータの RNA モデルの一部を示す。エアギャップから回転子にかけては磁束分布が複雑になるため、周方向に 1 度ずつ等間隔で分割する。また、磁石の減磁には分布が生じるため、磁石は径方向に 3 分割している。外部磁界によって磁石の磁束密度がクニック点を下回ると、RNA モデルにおける磁石の起磁力を減磁率に応じて低下させることで減磁したときのモータ特性を計算する。

導出した RNA モデルを用いて、定格電流である 4.0A に対して 9.5 A の電流を流して磁石を減磁させたとき、減磁していない状態で定格電流を流したときのトルクを計算し、FEA のトルク波形計算結果と比較した。Fig.3 (a) に減磁前のトルク波形を、同図 (b) に減磁後のトルク波形を示す。これらの図をみると、RNA で計算した減磁前後のトルク波形は FEA の計算結果と概ね一致しているのがわかる。平均トルクは減磁前が 1.30 N・m で、減磁すると 1.22 N・m に低下しており、FEA の計算結果との差は 2 % 以内であった。



Number of slots	24
Number of poles	4
Number of winding turns/slot	100
Stack length	30 mm
Core materials	Relative permeability $\mu_s = 3000$
Permanent magnet materials	Ferrite (SSR-420)

Fig.1 Shape and specification of the SPM motor.

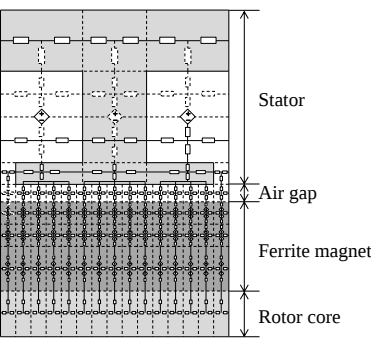


Fig.2 A part of the RNA model.

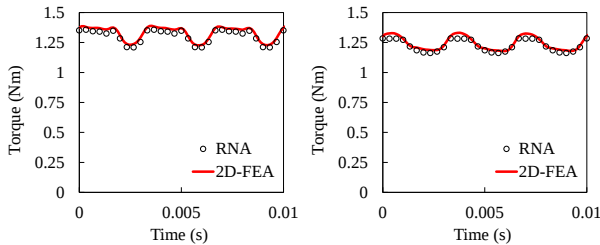


Fig.3 Comparison of torque waveform between before and after demagnetization.

参考文献

1) Y. Yoshida, K. Nakamura, O. Ichinokura, Katsubumi Tajima, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 3, No. 6, pp.422-427 (2014)

RNA に基づく DC-DC コンバータ用トランス巻線の 渦電流損推定に関する考察

樋渡拓也, 田島克文, 吉田征弘

(秋田大学)

Consideration of estimation for eddy current loss of transformer windings
in the DC-DC converter based on RNA

T.Hiwatashi, K.Tajima, Y.Yoshida

(Akita Univ.)

はじめに

筆者らは, DC-DC コンバータにおけるトランス巻線の漏れ磁束によって生じる渦電流損の推定について検討を進めている¹⁾。本稿では, RNA (Reluctance Network Analysis) を用いた角柱銅線に生じる渦電流損の推定手法を示し, 三次元有限要素解析 (3D-FEA) による解析結果と比較を行うことで, その有用性について検討を行ったので報告する。

提案する RNA モデル

Fig.1(a)に解析対象の形状と寸法を示す。断面が $30\text{mm} \times 20\text{mm}$ の C 型のフェライトコアに, 巻線に見立てた $2.0\text{mm} \times 2.0\text{mm} \times 20\text{mm}$ の角柱銅線が合計 6 本挟まれており, コアには各 10 ターンのコイルが施されている。同図(b)には同図(a)の赤枠線で示すコアギャップ間の RNA における要素分割を示す。角柱銅線は高周波時の表皮効果を考慮するため, x 方向に 10 分割, y 方向に 8 分割している。

Fig.2 に提案モデルの概略図を示す。図中の R_{mcore} , R_{mgap} , $R_{mcopper}$ はそれぞれコア, ギャップ, 角柱銅線の磁気抵抗を表しており, R_{mLcoil} , R_{mLgap} はそれぞれ励磁コイル, ギャップの漏れ磁気抵抗を表している。角柱銅線で生じる渦電流は鎖交磁束を考慮して赤線で示す電気回路で計算し, 磁気回路中において逆方向の起磁力として与えた。

正弦波電流 4 A_{rms} で励磁した時の角柱銅線における周波数-渦電流損特性の解析結果を Fig.3 に示す。RNA および 3D-FEA それぞれにおいて 3 周期計算を行った。同図から分かるように両者は良好に一致しており, 表皮効果が現れる周波数帯域においても RNA では巻線の渦電流損がおおよそ推定できる可能性があることが示された。

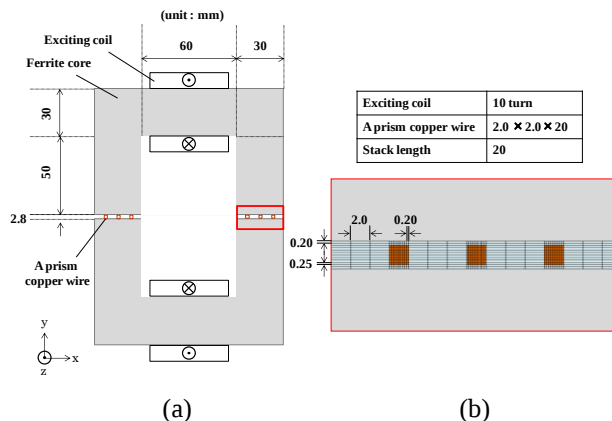


Fig.1 Shape and division of analytical model.

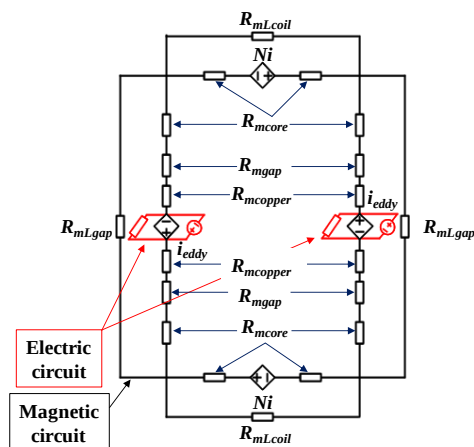


Fig.2 Schematics of proposed model.

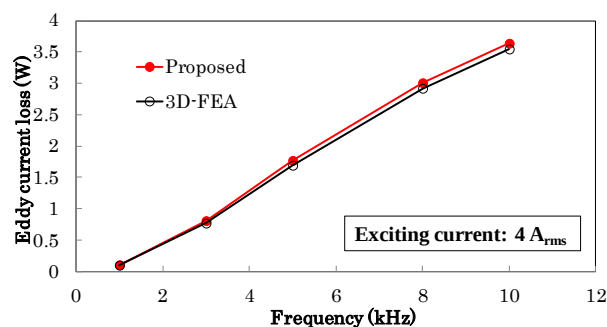


Fig.3 Frequency - Eddy current loss characteristics.

参考文献

- 1) 樋渡, 田島, 吉田, 電学研資 MAG-16-035(2016)

表面酸化鉄系メタルコンポジット磁心トランスの試作と フライバックコンバータへの応用

佐藤紘介***, 杉村佳奈子**, 佐藤敏郎**, 曾根原誠**

(*長野県工業技術総合センター, **信州大)

Fabrication of surface-oxidized Fe-based metal composite transformer
and its application to the flyback-type dc-dc converter

K. Sato***, K. Sugimura**, T. Sato**, M. Sonehara**

(*Nagano Prefecture General Industrial Technology Center, **Shinshu univ.)

はじめに

近年, SiC/GaN パワーデバイスの開発が盛んに行われており, 低損失かつ MHz 高周波スイッチング動作が可能であるという特長から, DC-DC コンバータのさらなる小型化・高効率化が期待されている. 筆者らは, MHz 動作 DC-DC コンバータへ適用するため, 表面酸化処理を施した $1.6\mu\text{m}$ 径のカルボニル鉄粉とエポキシ樹脂からなる複合材料(以下, 表面酸化 CIP/Epoxy)を用いてインダクタを試作し, GaN-HEMT モジュールを用いた 18V 入力, 5V・2A 出力を電源定格とした 1MHz 動作 Buck コンバータへ適用することで, 最大約 95% の電力変換効率が得られることを報告した¹⁾.

本稿では, 表面酸化 CIP/Epoxy 磁心トランスを試作し, AC アダプタ等に多用されている方式であるフライバックコンバータへ適用した結果について報告する.

実験方法

トランスの巻線には, $70\mu\text{m}$ 厚, 5mm 幅の銅張ポリイミドフィルムを用い, 1 次巻線と 2 次巻線の配置の異なる 2 種類を試作した. 比透磁率の低い表面酸化 CIP/Epoxy 磁心でも励磁インダクタンスを高めるため, Fig.1 に示すように巻線をコア中に埋め込む構造とした. Fig.2 に評価に用いたフライバックコンバータの回路図を示す. 48V 入力, 12V・5A 出力を電源定格とし, スwitching 周波数は 400kHz とした. 比較のためインダクタンスおよび結合係数の値を概ね一致させた Mn-Zn フェライトを用いたトランスについても評価を行った.

実験結果

Fig.3 に電力変換効率を示す. 効率は 1.2A~1.3A 出力時に最大となり約 89%が得られている. 軽負荷時は結合係数の低い巻線 A のトランスの方が効率は高い. これは, こちらの方が等価直列抵抗が低いためであると考えられる. 一方, 重負荷時においては, 漏れインダクタンスに蓄積され 2 次側に伝達されないエネルギーの影響が大きくなるため, 結合係数が良い巻線 B のトランスの方が高効率になることがわかる.

参考文献

- 1) 上野, 他; 平成 28 年電気学会全国大会, 2-097, p.118(2016).

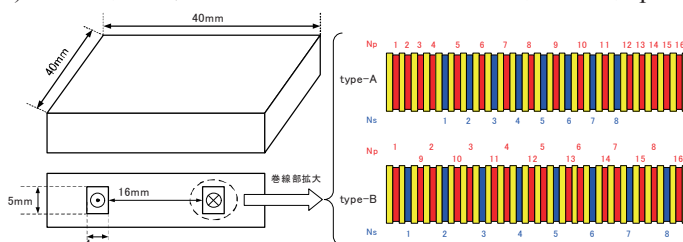


Fig.1 Device structure

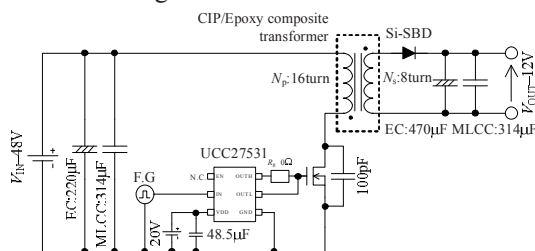


Fig.2 Circuit diagram

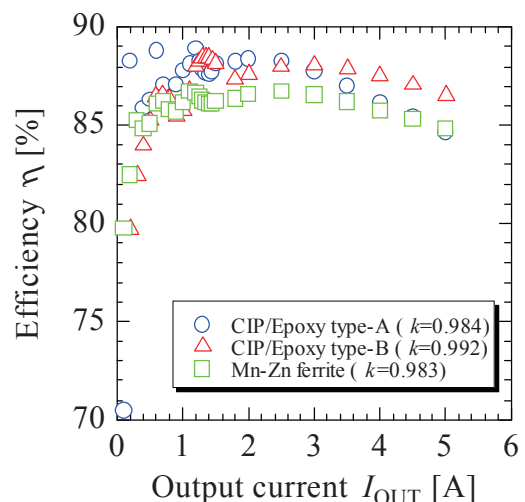


Fig.3 Power conversion efficiency