# 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ス(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<sup>1)</sup>。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。



Gap length :	0.5 mm
Axial length:	10.15 mm
Core material :	6.5%SiFe
Exciting voltage :	20V
Winding space factor :	24.00%

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<sup>1)</sup>。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







#### <u>参考文献</u>

 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 μm 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 μm 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 mΩ·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.



Fig. 3 Specifications of a ring core of SMC.



# 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<sup>1)</sup>。 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.







# 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、リラクタンスネ 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<sup>1)</sup>、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 たときと,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 widing turns/slot	100
Stack length	30 mm
Core materials	Relative permeability $\mu_s = 3000$
Permanent magnet materials	Ferrite (SSR-420)





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

### 参考文献

 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.)

### <u>はじめに</u>

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<sup>1)</sup>。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。

#### <u>提案する RNA モデル</u>

Fig.1(a)に解析対象の形状と寸法を示す。断面が 30mm × 20mm の C 型のフェライトコアに,巻線に 見立てた 2.0mm × 2.0mm × 20mm 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<sub>mcore</sub>, R<sub>mgap</sub>, R<sub>mcopper</sub>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<sub>mLcoil</sub>, R<sub>mLgap</sub>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向 きの起磁力として与えた。

正弦波電流 4 A<sub>rms</sub> 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.





#### 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\*\*, 曽根原誠\*\* (\*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.)

### <u>はじめに</u>

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 1.6µm 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<sup>1)</sup>.

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.

### <u>実験方法</u>

トランスの巻線には、70µm 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、スイッチング周波数は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.

## <u>実験結果</u>

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 一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).



-34-