

## 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

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

中村健二<sup>a)†</sup>・山田雄太<sup>a)</sup>・大日向 敬<sup>b)</sup>・有松健司<sup>b)</sup>山田 真<sup>c)</sup>・瀧口雅也<sup>c)</sup>・小島武彦<sup>c)</sup>・一ノ倉 理<sup>a)</sup><sup>a)</sup>東北大学 大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 (〒980-8579)<sup>b)</sup>東北電力(株), 仙台市青葉区本町 1-7-1 (〒980-8550)<sup>c)</sup>富士電機(株), 東京都品川区大崎 1-11-2 (〒141-0032)K. Nakamura<sup>a)†</sup>, Y. Yamada<sup>b)</sup>, T. Ohinata<sup>b)</sup>, K. Arimatsu<sup>c)</sup>M. Yamada<sup>a)</sup>, M. Takiguchi<sup>b)</sup>, T. Kojima<sup>b)</sup>, and O. Ichinokura<sup>c)</sup><sup>a)</sup> Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-05 Aoba Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan<sup>b)</sup> Tohoku Electric Power Co., Inc., 1-7-1 Honcho, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8550, Japan<sup>c)</sup> Fuji Electric Co., Ltd., 1-11-2 Osaki, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0032, Japan

Variable inductors consist of a magnetic core and primary dc and secondary ac windings. The effective inductance of the secondary ac winding can be controlled quickly and continuously by the primary dc current due to a magnetic saturation effect. Thus, the variable inductors can be applied as a reactive power compensator in electric power systems. The variable inductors have several desirable features including a simple and robust structure, low cost, and high reliability. In a previous paper, a concentric-winding type three-phase variable inductor was proposed, and it was demonstrated that the proposed variable inductor had good controllability and a low distortion current. This paper describes the design of a 6.6 kV-100 kVA concentric-winding type three-phase variable inductor based on reluctance network analysis (RNA) and reports the results of prototype testing.

**Keywords:** variable inductor, line voltage stabilization, electric power systems, reluctance network analysis (RNA)

## 1. はじめに

太陽光や風力などの分散型電源の導入拡大に伴い、系統の電圧が不規則かつ急峻に変動する問題が顕在化している。従来、系統の電圧調整は負荷時タップ切換変圧器など、主として機械式接点を有する機器により行われてきた。しかしながら、これらの機器はタップ切り換えに時間を要し、制御もステップ状になる。したがって、不規則かつ急峻な電圧変動を抑制するためには、従来機器だけでは対応は困難であり、高速かつ連続制御が可能で、安価で信頼性の高い電圧調整装置の開発が望まれる。

近年では、電力用半導体素子を用いた SVC (Static Var Compensator) や STATCOM (Static Synchronous Compensator) などが提案され、一部実用に供されている<sup>1)~3)</sup>。しかしながら、これらの機器は主回路に半導体素子が用いられるため、信頼性が特に重視される我が国の電力系統には、必ずしも適さないと考えられる。また、大電力を高速にスイッチングした際に生じる、電磁ノイズの問題も指摘される。

これに対して、制御巻線からの直流励磁により、交流主巻線の実効的なインダクタンスを任意に調整できる可変インダクタは、これを電力用コンデンサと組み合わせて系統に並列に接続することで、無効電力補償型の電圧調整装置として応用できる<sup>4)</sup>。可変インダクタは、変圧器と同じ銅鉄機器であるため、構造が簡単で堅牢、サージ電圧や過電流に対する耐性が高いなど、信頼性が特に重視される我が国の電力系統に適した特長を有する。

筆者らは、これまでに直交磁心や田形磁心などの種々の可変インダクタの開発を進めるとともに、高圧配電系統への適用技術に関する検討を進めてきた<sup>5)~8)</sup>。しかしながら、従来の可変インダク

タはすべて単相構造であったため、電力系統への応用を考えた場合、同一構成の可変インダクタが最低 3 台必要になり、サイズや重量の増大が懸念されていた。

上述の問題に対して、先に筆者らは、3 相一体構造の可変インダクタを提案し、良好な制御特性と低電流歪み特性を有することを明らかにした<sup>9)</sup>。また、さらなる小型軽量化を目的として、通常別々の磁脚に施される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新たに開発した<sup>10)</sup>。

本稿では、本可変インダクタの高圧配電系統への実用を想定し、リラクタンスネットワーク解析 (RNA) を用いて 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。

## 2. 重ね巻型 3 相一体可変インダクタの基本構成

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。本可変インダクタの鉄心は、放射線状に等間隔に並んだ 6 つの磁脚と、それらをつなぐ内外 2 つの円環状のヨークからなる。また同図に示すように、磁脚の断面積よりヨークの断面積の方が小さい。巻線は 6 つの直流制御巻線  $N_1$  と 6 つの交流主巻線  $N_w$ ,  $N_v$ ,  $N_w$  があり、各相の交流主巻線は同図の矢印の向きに磁束が流れるように磁脚に施され、3 相デルタ結線される。また、直流制御巻線  $N_1$  も交流主巻線に重ねるようにして同一の磁脚に施され、交流磁束による誘起電圧を打ち消すように、同一線上の 2 つの巻線同士を接続する。さらに、これら 3 組の制御巻線を並列に結線し、直流電源  $V_d$  に接続する。

上述のような構成において、制御巻線に直流電流を流すと、磁脚よりも細い円環状のヨークが磁気飽和し、交流主巻線から見た

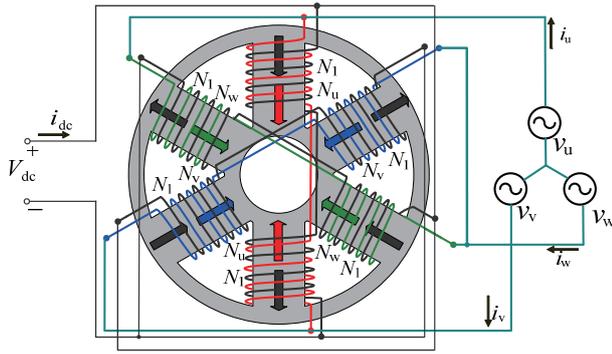


Fig. 1 Basic configuration of a concentric-winding type three-phase variable inductor.

磁気抵抗が増加する。すなわち、主巻線の実効的なインダクタンスが減少するため、可変インダクタとして動作する。

### 3. RNA による 100 kVA 器の解析設計

RNA は、解析対象を複数の要素に分割し、これらを形状と材料の磁気特性で決まる磁気抵抗で表すことで、解析対象全体を一つの磁気抵抗回路網として扱う手法である<sup>11)</sup>。有限要素法 (FEM) と比べて解析モデルが簡便で計算が速いこと、算定精度が比較的高いこと、電気系、熱系、運動系との連成解析が容易であること、汎用の回路シミュレータをソルバとして利用できることなどの特長を有する。以下では、重ね巻型 3 相一体可変インダクタの RNA モデルの導出方法について述べる。

まず、磁心を形状および磁束の流れを勘案して、Fig. 2(a)に示すように複数の要素に分割する。このとき磁心からの漏れ磁束も考慮できるように、磁心外空間も解析領域に含める。分割した各々の要素は、同図(b)に示すような 3 次元方向の 6 つの磁気抵抗に置き換える。これらの磁気抵抗のうち  $R_{mr}$ 、 $R_{m\theta}$  は、磁心部においては非線形磁気特性を考慮して決める必要がある。本稿では、材料の  $B-H$  曲線を次式のように表す。

$$H = \alpha_1 B + \alpha_m B^m \quad (1)$$

式中の  $\alpha_1$ 、 $\alpha_m$  は係数である。次数  $m$  は  $B-H$  曲線の非線形性の強さで決まり、本稿では  $m=13$ 、 $\alpha_1=106$ 、 $\alpha_m=6.3$  である。Fig. 3 に、材料の  $B-H$  曲線のカタログ値とその近似曲線を示す。

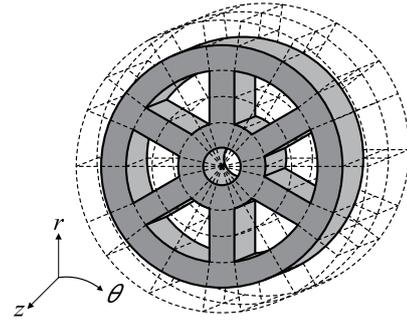
(1)式より、各々の磁気抵抗における起磁力  $f$  と磁束  $\phi$  の関係は、分割した各要素の断面積  $S$  と磁路長  $l$  を用いて、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} f = Hl &= \frac{\alpha_1 l}{S} \phi + \frac{\alpha_m l}{S^m} \phi^m \\ &= \left( \frac{\alpha_1 l}{S} + \frac{\alpha_m l}{S^m} \phi^{m-1} \right) \phi \end{aligned} \quad (2)$$

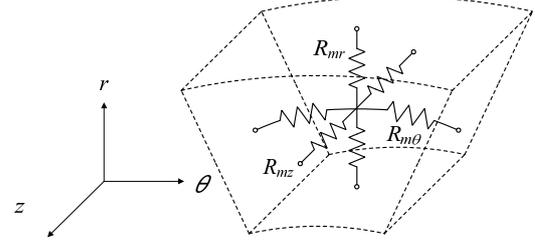
上式中の括弧内が非線形磁気抵抗を表す。

一方、磁心積層方向の磁気抵抗  $R_{mz}$  は、磁束が鋼板間の非磁性層を貫通することから、これを考慮して決める。すなわち、積層方向の実効的な透磁率を  $\mu'$  とし、磁気抵抗を次式で与える。

$$R_{mz} = \frac{l}{\mu' S} \quad (3)$$



(a) Division of the magnetic core.



(b) Three-dimensional unit magnetic circuit.

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

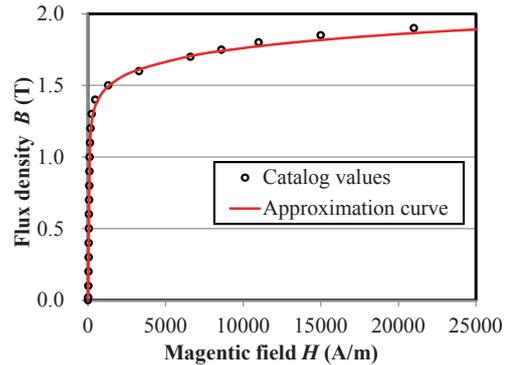


Fig. 3  $B-H$  curve of the core material.

積層鉄心は、透磁率  $\mu_s$  の鋼板と透磁率  $\mu_0$  の非磁性層が  $d_f : (1-d_f)$  の比で積層されている。ここで、 $d_f$  は磁心の占積率である。したがって、積層方向の実効的な透磁率  $\mu'$  は、次式で与えられる。

$$\frac{1}{\mu'} = \frac{d_f}{\mu_s} + \frac{1-d_f}{\mu_0} \quad (4)$$

本可変インダクタにおいて、積層方向の磁束は漏れ磁束に相当し、磁気飽和を生じることは無いため、鋼板の積層方向の透磁率  $\mu_s$  は真空の透磁率  $\mu_0$  に比べて十分大きい。したがって、(4)式は次式のように近似することができる。

$$\frac{1}{\mu'} \cong \frac{1-d_f}{\mu_0} \quad (5)$$

よって、磁心積層方向の磁気抵抗  $R_{mz}$  は、次式で与えられる。

$$R_{mz} = \frac{(1-d_f)l}{\mu_0 S} \quad (6)$$

また、磁心外空間の磁気抵抗は、要素寸法と真空の透磁率  $\mu_0$  を

用いて、以下の式で与える。

$$R_{air} = \frac{l}{\mu_0 S} \quad (7)$$

次いで、巻線電流による起磁力については、巻線が施されている磁脚を2等分し、その間に集中的に配置する。以上のようにして、RNAモデルが導出される。最後に、導出したRNAモデルと外部の電気回路を、Fig. 4に示すように接続すれば、3相一体可変インダクタの特性が計算できる。

Fig. 5に、導出したRNAモデルを用いて設計した6.6 kV・100 kVA級重ね巻型3相一体可変インダクタの磁心形状・寸法を、Table 1に諸元を示す。設計上の定格容量は余裕を持たせて115 kVAとした。定格電圧は6.6 kVである。磁心材質は厚さ0.35 mmの無方向性ケイ素鋼板である。制御巻線 $N_1$ の巻数は560、主巻線 $N_u$ 、 $N_v$ 、 $N_w$ の巻数はそれぞれ1300である。

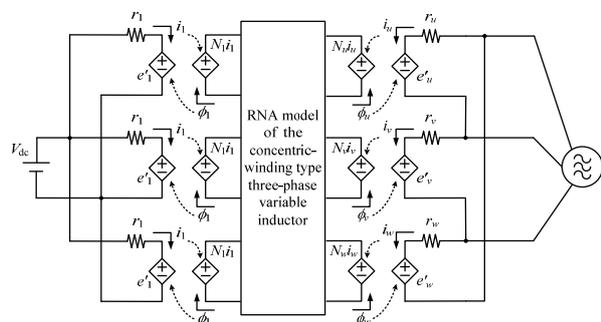


Fig. 4 Electric- and magnetic-coupled model of the concentric-winding type three-phase variable inductor.

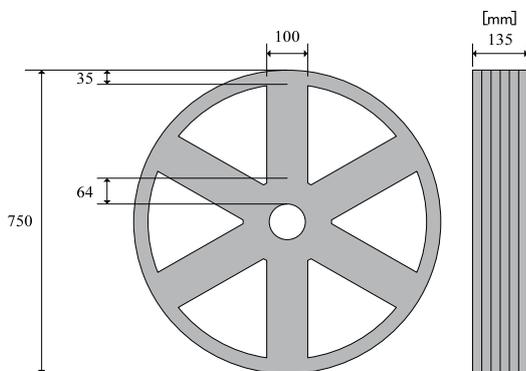


Fig. 5 Shape and dimensions of 6.6 kV-100 kVA concentric-winding type three-phase variable inductor.

Table 1 Specifications of 100 kVA concentric-winding type three-phase variable inductor.

Primary dc winding : $N_1$	560 turns, 2.16 $\Omega$
Secondary ac winding : $N_u, N_v, N_w$	1300 turns, 9.8 $\Omega$
Core material	Non-oriented silicon steel Thickness: 0.35 mm
Rated capacity	115 kVA
Rated line voltage	6.6 kV
Frequency	50 Hz
Primary dc current	0 - 33.3 A

Fig. 6に、RNAにより算定した無効電力制御特性を示す。Fig. 7は定格換算した出力電流歪み率である。また比較のため、FEM(要素数約75,000)による算定結果も示す。これらの図を見ると、無効電力が線形かつ連続的に制御されていることがわかる。また、電流歪み率は全制御範囲で5%以下であり、十分に小さいことが確認される。

Fig. 8に、設計した100 kVA級重ね巻型3相一体可変インダクタの単位重量当たりの無効電力を示す。また比較のため、従来の単相の100 kVA級可変インダクタの実測値の値と、先に試作した4 kVA級および10 kVA級の重ね巻型3相一体可変インダクタの実測値も併せて示す。この図を見ると、設計した100 kVA級重ね巻型3相一体可変インダクタは従来の単相器よりも約1.3倍程度優れた特性を示していることがわかる。すなわち、同一容量であれば、単相器よりも約23%の軽量化が可能であるといえる。

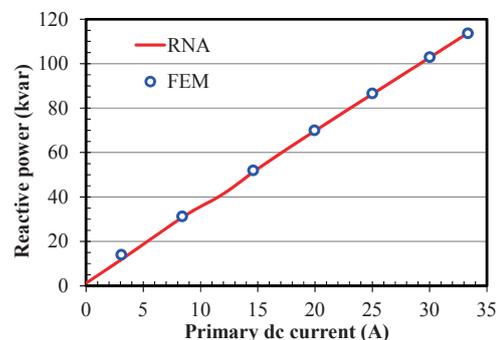


Fig. 6 Calculated reactive power characteristics of the 6.6 kV-100 kVA concentric-winding type three-phase variable inductor.

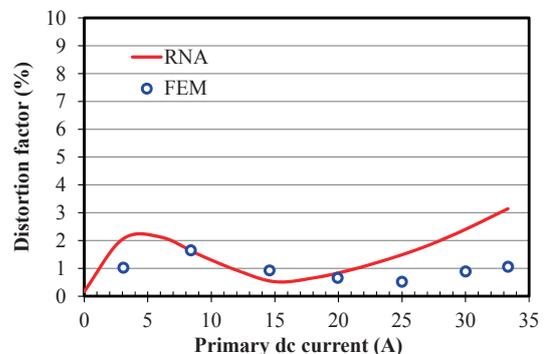


Fig. 7 Normalized distortion factor of the output current of the 100 kVA variable inductor calculated by RNA and FEM.

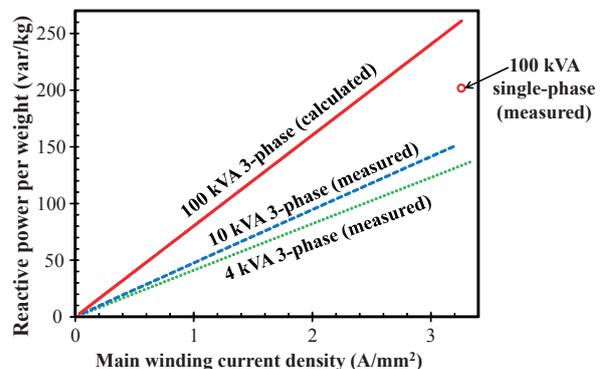


Fig. 8 Comparison of the reactive power per weight.

#### 4. 100 kVA 器の試作試験結果

本章では、RNA を用いて設計した 6.6 kV・100 kVA 級重ね巻型 3 相一体可変インダクタの試作試験結果について述べる。

Fig. 9 に実証器の外観を示す。鉄心と巻線の重量はそれぞれ約 250 kg と約 160 kg であった。Fig. 10 に試験風景を示す。実験システムは主に直流電源、可変インダクタ、昇圧トランス、発電機の 4 つで構成され、発電機の出力電圧を昇圧トランスにより 210 V から 6.6 kV に昇圧している。

Fig. 11 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、計算値とほぼ完全に一致していることがわかる。また、制御量も設計通り最大約 115 kvar まで制御可能であることがわかる。

Fig. 12 は、定格換算した出力電流の歪み率である。なお、実証実験では発電機の出力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、ほぼ RNA による設計通りの結果が得られたことが了解される。

#### 5. まとめ

以上、本稿では高压配電系統への実用を想定し、RNA を用いて 6.6 kV・100 kVA 級重ね巻型 3 相一体可変インダクタの解析設計と試作試験を行った。

設計した 6.6 kV・100 kVA 級重ね巻型 3 相一体可変インダクタは、良好な制御特性と低電流歪み特性を有し、従来の単相器と比較して、約 23 % の軽量化が可能であることが明らかになった。

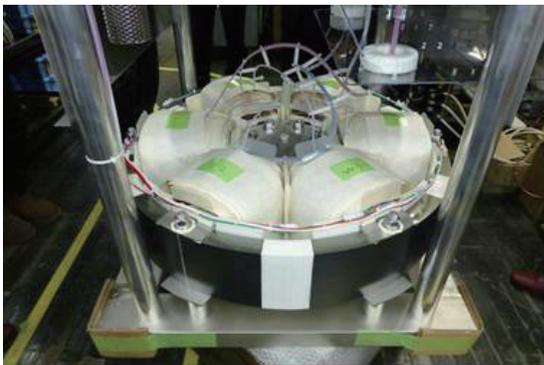


Fig. 9 Photograph of the prototype variable inductor.

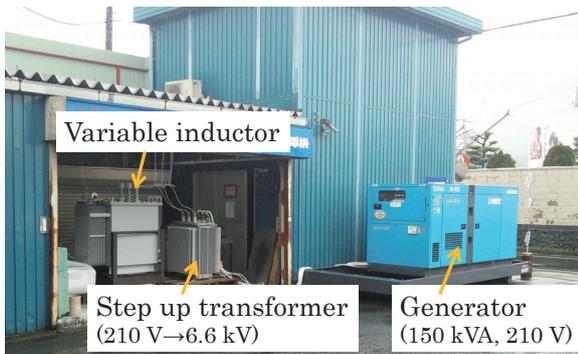


Fig. 10 Photograph of experimental scene.

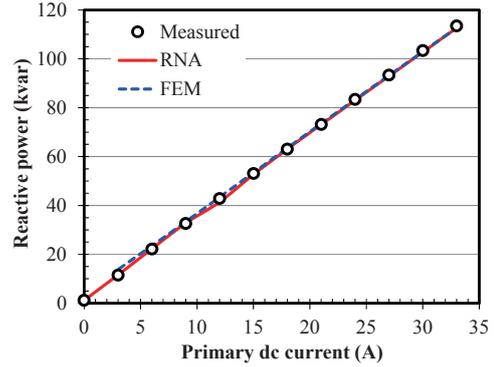


Fig. 11 Measured reactive power characteristics of the prototype 6.6 kV-100 kVA variable inductor.

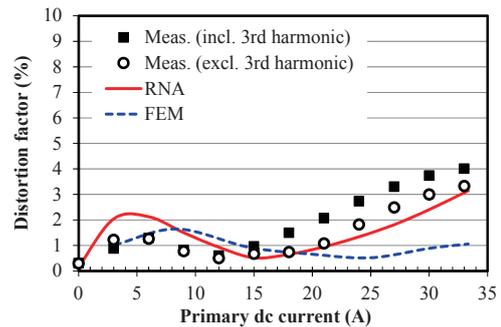


Fig. 12 Normalized distortion factor of the output current of the prototype 6.6 kV-100 kVA variable inductor.

次いで、実証試験では、設計通りの良好な制御特性および低電流歪み特性が得られたことが示された。また、このような高压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。今後は、実用化に向けた検討をさらに進めていく予定である。

謝辞 本研究はJST研究成果展開事業A-STEPの支援を受け行った。

#### References

- 1) T. Hayashi and T. Sakurai: *T. IEE Japan*, **117-B**, 901 (1997) (in Japanese).
- 2) S. Irokawa: *T. IEE Japan*, **115-B**, 1019 (1995) (in Japanese).
- 3) F. Ichikawa: *T. IEE Japan*, **112-B**, 461 (1992) (in Japanese).
- 4) O. Ichinokura, T. Tajima, and T. Jinzenji: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 3225 (1993).
- 5) M. Maeda, S. Akatsuka, T. Ito, and O. Ichinokura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, 1787 (1999) (in Japanese).
- 6) K. Nakamura, K. Tajima, M. Kawakami, M. Maeda, T. Ito, and O. Ichinokura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, 1497 (1999) (in Japanese).
- 7) K. Nakamura, S. Akatsuka, T. Ohinata, M. Kawakami, M. Maeda, H. Sato, and O. Ichinokura: *T. IEE Japan*, **122-B**, 295 (2002) (in Japanese).
- 8) M. Maeda, T. Ohinata, T. Aoki, S. Akatsuka, M. Kawakami, H. Sato, and O. Ichinokura: *T. IEE Japan*, **122-B**, 561 (2002) (in Japanese).
- 9) K. Nakamura, S. Hisada, K. Arimatsu, T. Ohinata, K. Sakamoto, and O. Ichinokura: *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 4107 (2008).
- 10) K. Nakamura, K. Honma, T. Ohinata, K. Arimatsu, T. Kojima, M. Yamada, R. Matsumoto, M. Takiguchi, and O. Ichinokura: *IEEE Trans. Magn.*, **51**, 8402104 (2015).
- 11) K. Tajima, A. Kaga, Y. Anazawa, and O. Ichinokura: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 3219 (1993).

2016年9月27日受理, 2016年11月22日採録