

研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2007～2008  
課題番号：19760188  
研究課題名（和文）  
三相一体構造可変インダクタの開発と系統電圧安定化装置への応用に関する研究  
研究課題名（英文）  
Development of the three-phase-laminated-core variable inductor and its application to the voltage stabilizer in electric power systems  
研究代表者  
中村 健二 (NAKAMURA KENJI)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：70323061

研究成果の概要：可変インダクタは、電力系統の電圧安定化装置として応用が期待されているが、従来は単相構造であったため、同一構造の可変インダクタを3台用いる必要があり、サイズや重量が増大化する問題があった。そこで本研究では、新しい三相一体構造の可変インダクタを提案し、実用化に向けた基礎的な特性を明らかにすることを目的として、2年の研究期間で可変インダクタの解析・設計・試作・試験に取り組んだ。その結果、良好な制御特性と低電流歪み特性を有すること、約30%の軽量化が可能であることを明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 2,200,000 | 0       | 2,200,000 |
| 2008年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,300,000 | 330,000 | 3,630,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：可変インダクタ、三相一体構造、無効電力補償、系統電圧安定化、磁気回路解析

## 1. 研究開始当初の背景

近年、世界規模で地球温暖化や省エネルギーに対する関心が高まっており、我が国においても太陽光や風力などの自然エネルギーを利用した分散型電源の導入が進められている。しかしながら一方で、このような電源の発電電力は天候などに左右され易いため、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はじめている。今後、化石燃料の枯渇やCO<sub>2</sub>の削減に対応するためには、自然エネルギーへのシフトが必要不可欠であり、これを促進する有効な電圧安定化装置の

導入が望まれる。

これまで系統の電圧調整は、負荷時タップ切替変圧器や、SVR (Step Voltage Regulator) など、機械式接点を有する機器により行われてきた。しかし、これらの機器では、制御がステップ状になり、またタップ切り換えに時間を要するため、不規則かつ急峻な電圧変動を抑制することは困難である。

これに対して、主巻線の実効的なインダクタンスを任意に連続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れば線路に並列に接続し、系統の無効電力を

適切に補償することで、電圧変動を抑制することができる。可変インダクタは、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、信頼性が特に重要視される我が国の電力系統に適した機器である。

これまで筆者は、種々の可変インダクタについて研究・開発を進めてきた。その中で田形磁心は、積み鉄心で構成可能であるため大容量化が容易であること、出力電流歪みが小さいことなど、電力用可変インダクタとして望ましい特長を多数有している。また、応答速度も 60~80 ms 以内と実用上十分な速さを実現している。

一方、可変インダクタは銅鉄機器であることから、大容量化に伴いサイズと重量が増大する傾向にある。特に電力系統機器として応用する場合には、三相構成とする必要があるため、小型・軽量化は実用化に向けた最重要課題である。ここで電力用変圧器の場合には、小型・軽量化のため、三相一体構造が広く一般に採用されている。一方、田形磁心も含めて、これまで考案された可変インダクタはすべて単相構造であり、三相一体構造化が強く望まれている。

## 2. 研究の目的

上述の背景に基づき、本研究では高速かつ連続的な電圧制御が可能で、信頼性も高い可変インダクタによる電圧安定化装置の実用化を目的として、2年の研究期間で以下の検討を行うこととした。

- (1) これまで単相構造であった可変インダクタを、三相一体構造へと改良し、機器の小型・軽量化を実現する。
- (2) 考案した三相一体構造可変インダクタの制御性などについて実験および数値解析の両面から検討を行い、機器の最適設計について明らかにする。
- (3) 高压配電システム用 300 kVA 級実証器の設計を行い、数値解析によって電圧安定化効果を検証する。

## 3. 研究の方法

本研究では、主として三相一体構造可変インダクタの解析・設計・試作・試験に取り組んだ。それぞれの方法は以下の通り。

- (1) 解析・・・筆者が考案したリラクタンスネットワーク解析 (RNA) を用いて、提案する三相一体構造可変インダクタの動作原理の解明と基本特性の算定を行った。
- (2) 設計・・・上記の RNA を用いて、定格容量 4.0 kVA の三相一体構造可変インダクタの設計を行った。
- (3) 試作・・・上記の設計結果に基づき、可変インダクタの試作を行った。これは外部に製作を委託した。

- (4) 試験・・・3相 200V の交流電源に本試作器をつなぎ、無効電力制御特性、電流歪み率、銅損、鉄損、効率などの測定を行った。なお、実測値については、上記 (1)、(2) で得られた計算値と比較を行い、RNA による解析・設計が有用であるかについても検証も行った。

## 4. 研究成果

### (1) 三相一体構造可変インダクタの解析・設計について

三相一体構造可変インダクタの仕様については、以下に述べるような考えに基づいて決定した。

まず、定格容量を実験室で扱える程度の 4.0 kVA とし、交流側の定格電圧を 200 V とすると、定格電流は約 11.5 A となる。ここから交流主巻線の巻線直径が決まる。一方、直流制御電流は 1 相当たり 10 A、3 相合計で 30 A とした。

次いで、主磁路の動作磁束密度を 1.2 T 程度と定めると、定格電圧から磁路の断面積と巻数が決まる。なお、巻線の占積率は現有の田形磁心と等しいものとした。また、磁路の断面積はすべての脚および継鉄で同一とした。

上述のごとく設計した三相一体構造可変インダクタの形状と寸法を図 1 に示す。

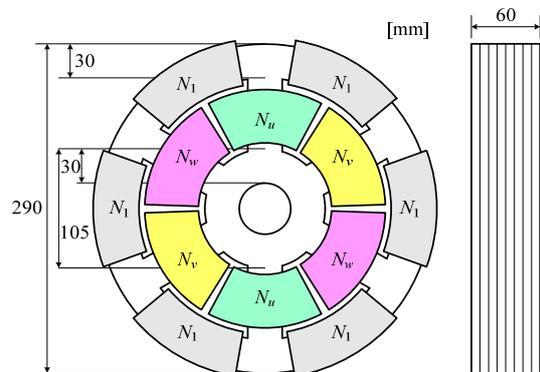
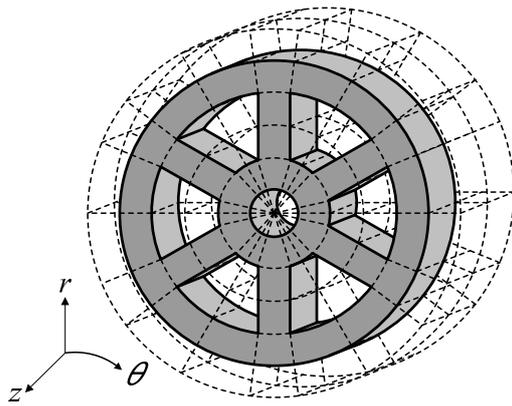


図 1 設計した三相一体構造可変インダクタ

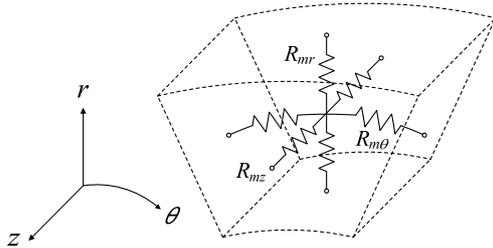
上記の可変インダクタの解析には、筆者が考案した RNA を用いた。解析モデルの導出方法の概略は、以下の通りである。

まず、三相一体構造磁心を形状および磁束の流れを勘案して、図 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て分割する。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。これらの磁気抵抗は、材料の  $B-H$  曲線と要素寸法から求まる非線形磁気抵抗である。

図 3 に、上述のモデルを用いて求めた、三相一体構造可変インダクタの無効電力制御特性を示す。この図を見ると、提案する可変



(a) 磁心の分割図



(b) 単位磁気回路

図2 三相一体構造磁心の RNA モデル

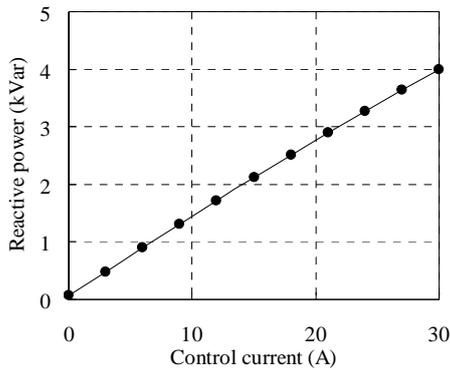


図3 無効電力制御特性の計算値

インダクタは、無効電力を連続かつ線形に制御可能であることがわかる。また、全制御時の無効電力は 4.0 kVar であり、設計通りの特性が得られていることがわかる。

図4に、定格換算した出力電流の歪み率を示す。ここで歪み率とは、可変インダクタにおいて高調波の主成分となる第5調波、第7調波の基本波に対する割合である。なお、3の倍数の高調波は主巻線をデルタ結線して還流させているため、出力電流には現れない。

この図より、歪み率は全制御範囲で 3%以下と極めて小さいことがわかる。図5は、全制御時の交流側の出力電流波形である。この図を見ると、電流波形はほぼ正弦波であることがわかる。

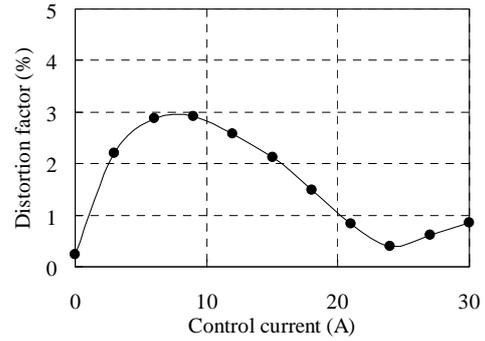


図4 主巻線電流歪み率の計算値

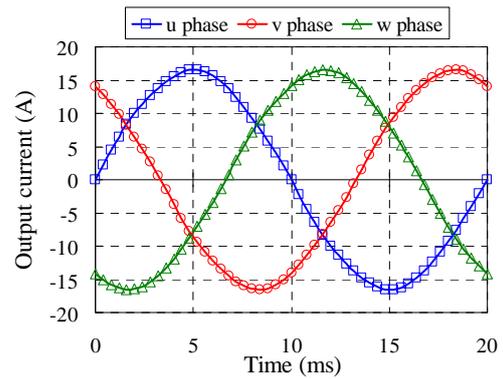


図5 全制御時の出力電流の計算波形

可変インダクタの三相一体構造化により、軽量化がどの程度期待できるかについても、検討を行った。比較に用いたのは、田磁路型可変インダクタである。図6に示す単位重量当たりの無効電力制御特性を見ると、三相一体構造可変インダクタの方が約 30%程度優れていることがわかる。すなわち、同一容量であれば、三相一体構造可変インダクタの方が 3 割程度軽量化できることを意味する。

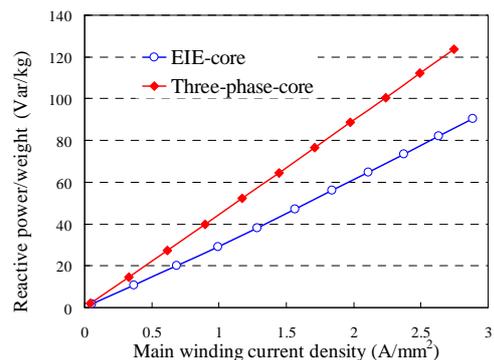


図6 単位重量当たりの無効電力制御特性の比較

(2) 三相一体構造可変インダクタの試作・試験について

上述の検討結果に基づき、実証器の試作・試験を行った。試作した三相一体構造可変インダクタの形状・寸法は、図1に示したもの

と同一である。

図 7 に試作器の外観写真を示す。

図 8 に無効電力制御特性を示す。この図を見ると、RNA の算定結果と同様に、直流制御電流によって無効電力が線形かつ連続的に調整されていることがわかる。

図 9 に、定格換算した出力電流の歪み率を示す。図 4 に示した RNA の算定結果とは若干の差異が認められるが、全制御範囲で 3% 以下と電流歪みは極めて小さく、電力機器として良好な特性を有していることがわかる。

以上の実証試験の結果により、三相一体構

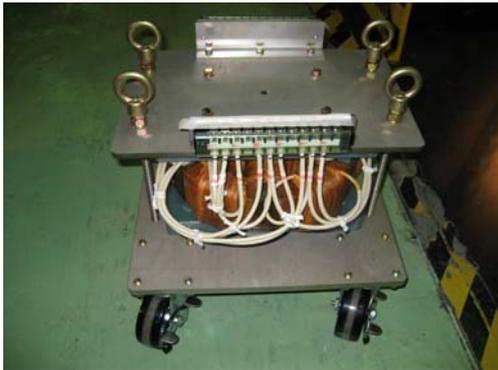


図 7 三相一体構造可変インダクタの外観

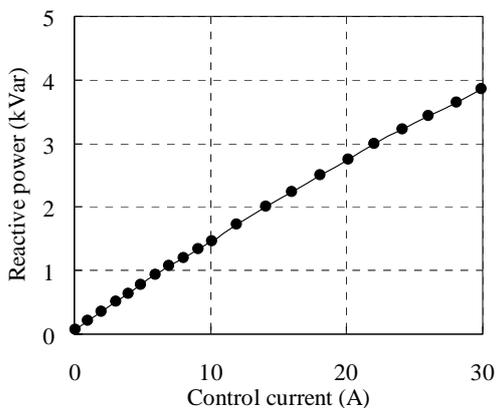


図 8 無効電力制御特性の実測値

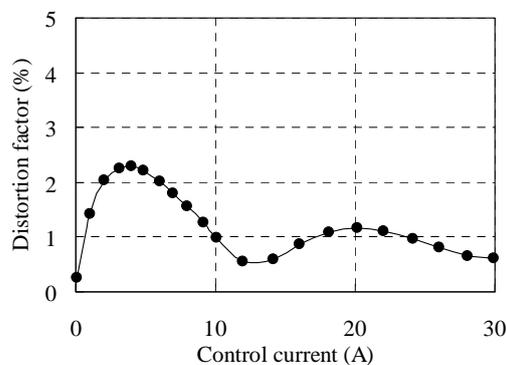


図 9 主巻線電流歪み率の実測値

造可変インダクタが良好な制御特性と低電流歪み特性を有することが明らかになった。また、RNA による解析・設計の有用性と信頼性が示された。

引き続き、定格電圧 200 V 以外の特性についても解析および実験を行った。

図 10(a)~(d)に、電圧を 180~220 V とした場合の、無効電力制御特性と主巻線電流歪み率の計算値と実測値を示す。

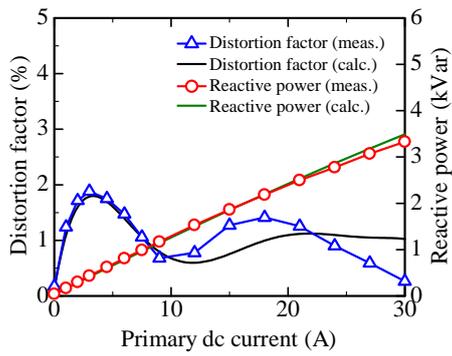
これらの図の実測値を見ると、交流電圧が大きくなるにつれて、制御電流の小さい領域でひずみ率が大きくなることがわかる。これは電圧の上昇に伴い、動作磁束密度が高くなるのが原因であるが、いずれの交流電圧の場合でも、全制御範囲でひずみ率は 4% 以下と極めて小さく、電力機器として望ましい特性を有していることがわかる。一方、RNA の算定結果を見ると、交流電圧が 220 V を超えたあたりから、ひずみ率の上昇率が実測値に比べて大きくなり、誤差が拡大していることがわかる。この原因としては、磁束密度が高くなると、動作点は材料の  $B-H$  曲線のより深い飽和領域に達することになるが、この領域での  $B-H$  曲線の傾きが、解析に用いたカタログ値と実機では異なることが考えられる。これについては、今後の検討課題である。

次いで、損失と効率についても測定を行った。図 11 に、交流電源電圧の実効値  $V_{ac}$  を 180 V, 200 V, 220 V, 240 V と種々変えた場合の、3 相一体構造可変インダクタの銅損  $W_c$ 、鉄損  $W_i$ 、および効率  $\eta$  を示す。これらの図において、まず銅損について見てみる。ここで、銅損とは直流制御巻線と交流主巻線の銅損の和であり、巻線抵抗と各巻線に流れる電流の実効値から求めている。これらの図を見ると、交流電圧が大きくなるにつれて、銅損も大きくなることが了解される。

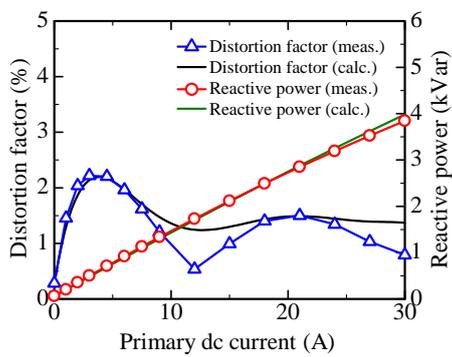
次に、鉄損について考察する。ここで、鉄損とは制御巻線および主巻線からの入力電力に対して、銅損を引いたものである。図 11 を見ると、銅損の場合と同様に、交流電圧の上昇に伴い、鉄損が大きくなっていることがわかる。これは、交流電圧が大きくなると、磁心の動作磁束密度が高くなるためである。また、どの交流電圧においても、制御電流が大きくなるにつれて、鉄損が若干上昇する傾向を示すことがわかる。これは、制御電流の増加によって動作磁束密度が上昇し、これにより積層方向への漏れ磁束が増えるため、積層鋼板上での渦電流が増加することに起因する。

最後に、効率について見てみる。可変インダクタの効率は、無効電力と損失の和に対する無効電力の割合として与えられる。図 11 を見ると、どの交流電圧の場合でも、最大効率は約 92% であり、全制御時においては、85~87% であることがわかる。本可変インダク

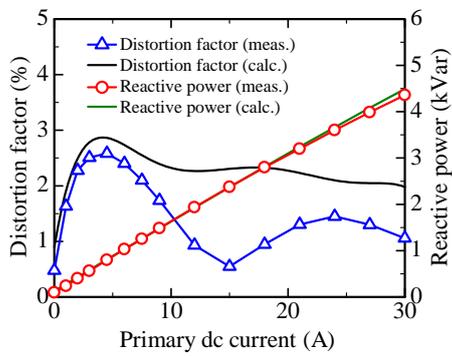
タの効率があまり高くない原因としては、巻線が巻き難い形状であるために、巻線の占積率が低くなったことが考えられる。



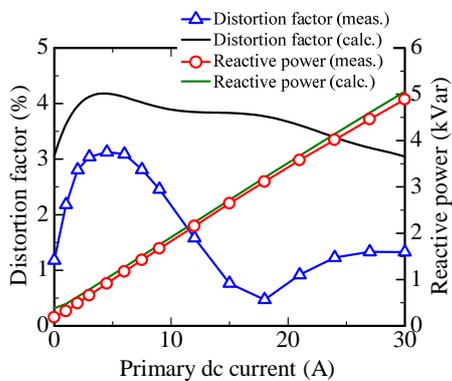
(a)  $V_{ac} = 180 \text{ V}$



(b)  $V_{ac} = 200 \text{ V}$

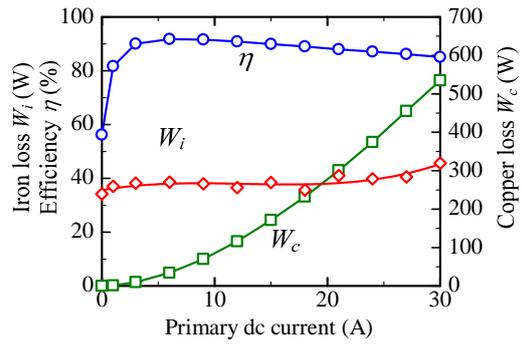


(c)  $V_{ac} = 220 \text{ V}$

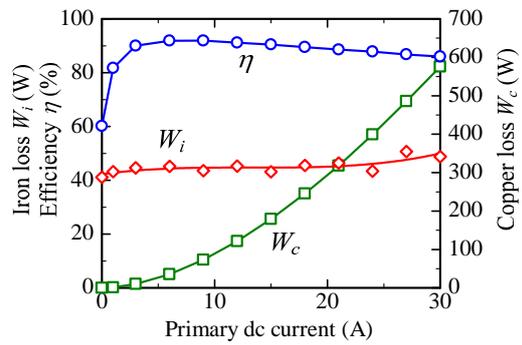


(d)  $V_{ac} = 240 \text{ V}$

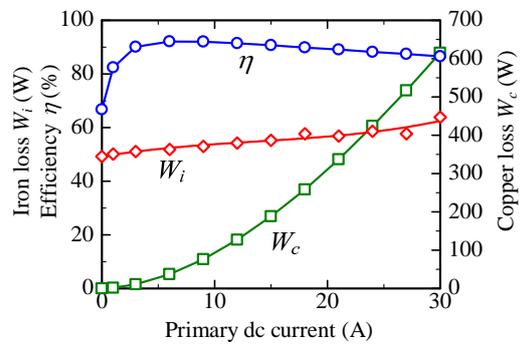
図 10 可変インダクタの基礎特性



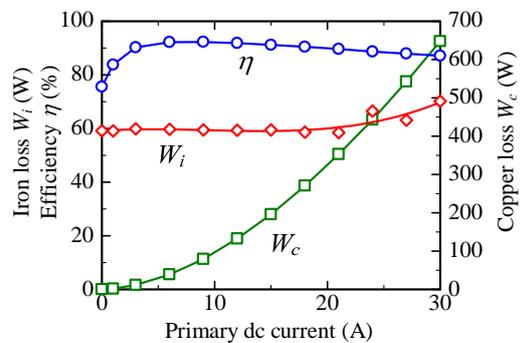
(a)  $V_{ac} = 180 \text{ V}$



(b)  $V_{ac} = 200 \text{ V}$



(c)  $V_{ac} = 220 \text{ V}$



(d)  $V_{ac} = 240 \text{ V}$

図 11 可変インダクタの損失効率特性

### (3)まとめと今後の展望

以上、本研究では、小型・軽量化を目指した新しい三相一体構造可変インダクタを提案し、実用化に向けた基礎的な特性を明らかにすることを目的として、2年の研究期間で可変インダクタの解析・設計・試作・試験に取り組んだ。

まず初めに、RNAを用いて解析・設計を行ったところ、提案した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することが示された。また、従来の单相構造の可変インダクタと比較して、30%程度の軽量化が期待できることを明らかにした。

次いで、RNAによる設計に基づき、実機を試作して実証試験を行ったところ、RNAであらかじめ見積もられた通りの良好な特性が、実機においても確認された。これにより、RNAによる解析・設計の有用性・信頼性が証明されたと言える。

最後に、種々の交流電圧下において、可変インダクタの基礎特性、ならびに損失・効率特性を実測した。その結果、定格電圧から $\pm 10\%$ 程度交流電圧が変動しても、制御特性や歪み特性、効率にほとんど影響が無いことが明らかになった。これは系統用電圧安定化装置として応用する際に、望ましい特性であると言える。

一方で、RNAの算定値と比較したところ、交流電圧が大きくなるにつれて、計算値と実測値に差異が見られた。この原因については、今後の検討課題である。

実証器の効率は、最大で約92%、全制御時では85~87%であった。ここで、すでに実系統での実証試験が行われている、田磁路型可変インダクタの効率は95%以上であることから、今後は更なる効率向上のために、分割磁心など、巻線の巻き易い構造についても検討する必要がある。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

①久田周平, 中村健二, 有松健司, 大日向敬, 坂本邦夫, 一ノ倉理, 3相一体構造可変インダクタの実証試験, 日本磁気学会誌, 33巻, 126-129頁, 2009年, 査読有

②K. Nakamura, S. Hisada, K. Arimatsu, T. Ohinata, K. Sakamoto, O. Ichinokura, Development of a Novel Three-Phase Laminated-Core Variable Inductor for Var Compensation, IEEE Trans. Magnetics, Vol. 44, pp. 4107-4110, 2008, 査読有

③K. Nakamura, T. Ohinata, K. Arimatsu, K. Sakamoto, O. Ichinokura, Three-dimensional Reluctance Network Analysis of an EIE-Core Variable Inductor and Application to Reactive Power Compensation in a Distribution System, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol. 128, pp. 511-516, 2008, 査読有

④中村健二, 久田周平, 大日向敬, 有松健司, 佐藤佳彦, 一ノ倉理, 3相一体構造可変インダクタの基礎特性, 日本磁気学会誌, 32巻, 415-418頁, 2008年, 査読有

[学会発表] (計4件)

①久田周平, 中村健二, 大日向敬, 有松健司, 坂本邦夫, 一ノ倉理, 3相一体構造可変インダクタの鉄損算定, 電気学会全国大会, 2009年3月18日, 札幌

②K. Nakamura, S. Hisada, K. Arimatsu, T. Ohinata, K. Sakamoto, O. Ichinokura, Development of a Novel Three-Phase Laminated-Core Variable Inductor for Var Compensation, INTERMAG 2008, 2008年5月5日, マドリッド(スペイン)

③中村健二, 久田周平, 大日向敬, 有松健司, 佐藤佳彦, 一ノ倉理, 3相一体構造可変インダクタの基礎特性, 日本応用磁気学会学術講演会, 2007年9月14日, 東京

④中村健二, 久田周平, 大日向敬, 有松健司, 佐藤佳彦, 一ノ倉理, RNAに基づく3相一体構造可変インダクタの特性算定, 電気関係学会東北支部連合大会, 2007年8月24日, 青森

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 健二 (NAKAMURA KENJI)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70323061

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし