

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14206

研究課題名(和文) 立体構造3相一体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 a novel three-dimensional three-phase variable inductor and application to reactive power compensator in electric power systems

研究代表者

中村 健二 (Nakamura, Kenji)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：70323061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光や風力などの自然エネルギー発電の導入促進に欠かすことができない、系統電圧安定化装置として応用可能な、可変インダクタについて、本研究では新たに立体構造の3相一体可変インダクタを提案するとともに、その実用可能性について数値解析、並びに実証実験の両面から検証した。その結果、従来の平面構造と同等の優れた特性を有し、かつ漏れ磁束に起因する損失を大幅に低減できること明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A variable inductor can be applied as a reactive power compensator in electric power systems, and has desirable features such as a simple and robust structure, low cost. In a previous work, a concentric-winding type three-phase variable inductor with a two-dimensional structure was proposed. To further improve the performance, novel concentric-winding type three-phase variable inductor with a three-dimensional structure was proposed in this research. As a result, it was demonstrated that the leakage flux of the proposed three-dimensional variable inductor is reduced by more than 30%. Furthermore, a 6.6 kV-100 kVA three-dimensional variable inductor was designed and compared to its two-dimensional counterpart. It was proved that eddy current loss, which is induced within an oil-immersed self-cooled tank because of leakage flux, can be reduced to one-third of that of the two-dimensional variable inductor.

研究分野：電気機器工学

キーワード：可変インダクタ 無効電力補償 電圧安定化装置 電力系統

1. 研究開始当初の背景

2011年3月の東日本大震災以降、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拡大がより一層強く求められている。しかし、これらの発電出力は天候に左右されるため、電力系統の電圧を不規則かつ急峻に変動させる問題が生じている。これまでは負荷時タップ切替変圧器などにより電圧制御が行われてきたが、これらの装置は制御が段階的で、タップ切替えに時間を要することから、急峻な電圧変動への対応は困難である。

これに対して、申請者は可変インダクタを用いた系統電圧安定化装置の開発を目指している。可変インダクタは鉄心と巻線で構成され、制御側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ため、これを電力用コンデンサと組み合わせることで、無効電力補償型の電圧安定化装置として応用できる。可変インダクタは、変圧器と同じ銅鉄機器であるため、構造が堅牢で安価、サージ電圧や過電流に対する耐性が高いなどの特長を有する。また、応答速度も60~80ms以内と実用上十分な速さを実現している。しかしながら一方で、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。特に電力系統機器は3相構成にする必要があるため、実用化には小型軽量化が必須である。しかし、これまで国内外の研究機関で提案された可変インダクタはすべて単相器であり、3相一体化による小型軽量化が強く望まれていた。

2. 研究の目的

上述の問題に対して、申請者は世界で初めて3相一体の可変インダクタを提案し、優れた特性を有することを明らかにした。その後も、様々な改良を加えた3相一体可変インダクタを複数提案してきたが、いずれも比較的特殊な鉄心形状や巻線配置を有するため、実用化を目指すには、製作性の向上やコスト低減の観点から新構造の可変インダクタの提案が必要不可欠である。

そこで本研究では、上記の問題の解決を目指し、新たに立体構造の3相一体可変インダクタを提案するとともに、その実用可能性について数値解析、並びに実証実験の両面から明らかにする。

3. 研究の方法

平成28年度においては、まず本研究で提案する立体構造の3相一体可変インダクタについて、有限要素法(FEM)並びに申請者らが考案した磁気回路網解析(RNA)を用いて動作解析することで、磁心各部の適切な寸法比などを明らかにする。次いで、容量4kVAの立体構造3相一体可変インダクタの最適設計を行う。

平成29年度においては、前年度設計した

立体構造3相一体可変インダクタの試作・試験を行い、所望の性能を有することを明らかにする。さらに、6.6kV高圧配電系統への適用を想定した100kVA級の立体構造3相一体可変インダクタの最適設計を行うとともに、先行開発されている従来器と比較を行うことで、提案する3相一体可変インダクタの有用性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) RNAによる4kVA級立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの設計

図1に、立体構造重ね巻型三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磁心形状は、従来の平面構造重ね巻型三相一体可変インダクタの2つの円環状のヨークを上下に配置し、両ヨークを周方向に等間隔で並んだ6つの磁脚で接続することにより構成される。巻線は6つの直流制御巻線 N_1 と6つの交流主巻線 N_u, N_v, N_w があり、各相の交流主巻線は3の倍数の高調波電流を還流させるため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、対面する2つの磁脚に施された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_{dc} に接続する。

立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの解析・設計には、申請者らが提案している磁気回路網解析(RNA)を用いた。以下では、立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの3次元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、図2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、磁心外空間を2層として解析領域に含め分割する。分割した各々の要素は、図3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積層面に平行な R_x, R_y は、磁心部においては非線形磁気特性を考慮するため、材料の $B-H$ 曲線と要素寸法から決定する。一方、磁心外空間については真空の透磁率と要素寸法から決める。また、磁心積層方向の磁気抵抗 R_z については、磁束が鋼板間の非磁性層を貫通して流れることから、これを勘案した実効的な透磁率を用いて決める。

図4に、上述のようにして導出した、立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの3次元RNAモデルを示す。同図の赤で示された磁気抵抗は磁心部の積層面に平行な非線形磁気抵抗である。一方、それ以外の黒で示された磁気抵抗は磁心部の積層方向および磁心外空間の線形磁気抵抗である。このRNAモデルを外部の電気回路と適切に連成すれば、SPICEなどの汎用の回路シミュレータによって、立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの特性が計算できる。

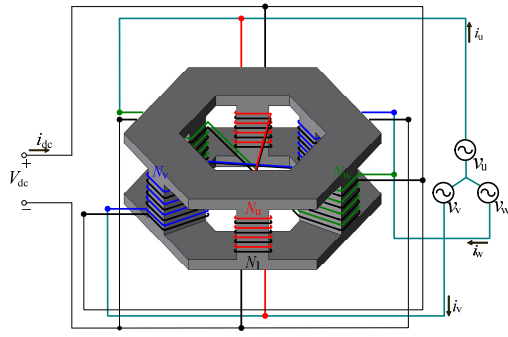
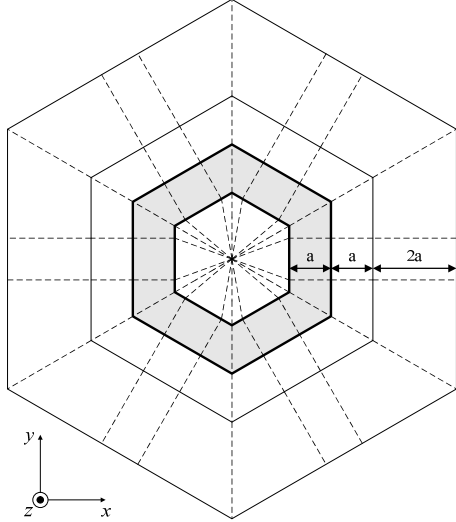
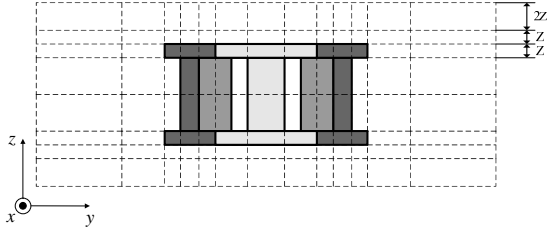


図 1 立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの基本構成



(a) 上面図



(b) 側面図

図 2 RNA に基づく要素分割

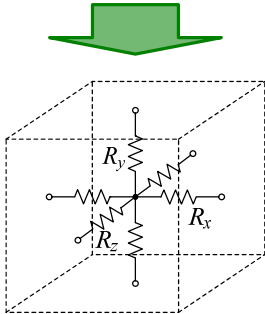
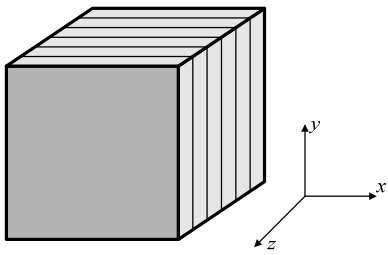
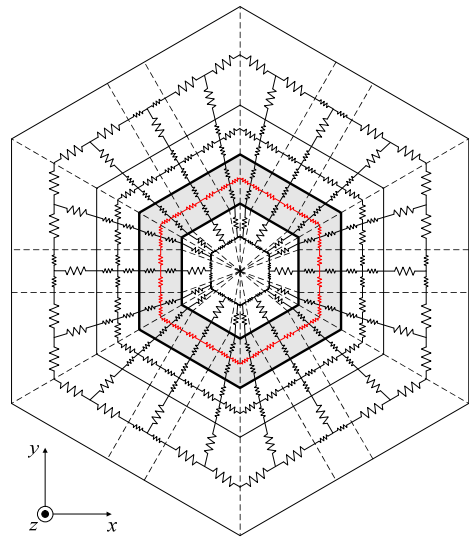
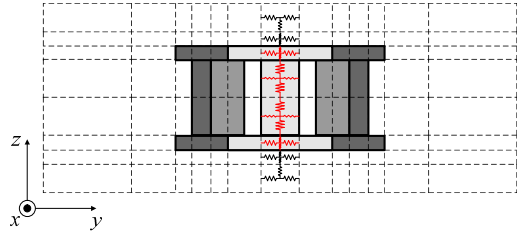


図 3 単位磁気回路 (立法体要素の場合)



(a) 上面図



(b) 側面図

図 4 立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの 3次元 RNA モデル

図 5 に、上述の RNA モデルを用いて設計した 4.0 kVA 級立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの諸元を示す。磁心材質は無方向性ケイ素鋼板 (35A250) である。なお、磁脚とヨークの接合面で積層が交差すると、接合面上で短絡電流が流れる恐れがあるため、磁脚と上下のヨークの積層が一致した構造となっている。また、2 次側の交流主巻線電圧の実効値 V_{ac} は 200 V、周波数 f は 50 Hz である。

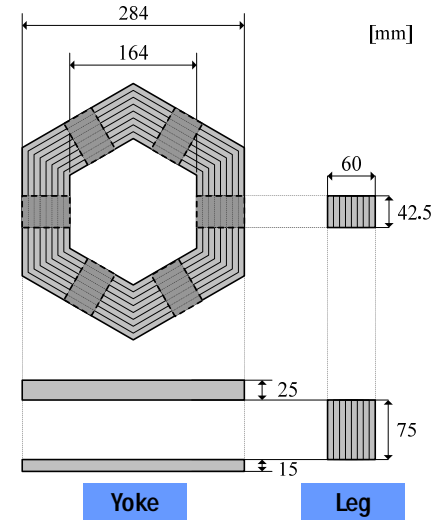
(2) 4kVA 級立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの試作試験結果

図 6 に、試作した 4 kVA 級立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの試作器外観を示す。以下では、この試作した 4.0 kVA 級立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの実証試験の結果を示す。

図 7 に、無効電力制御特性を示す。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、RNA の設計値と概ね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 4.0 kvar まで制御可能であることがわかる。

次いで、図 8 に定格換算した出力電流の歪み率を示す。同図より、歪み率は全制御範囲で 4 % 以下と極めて小さく、電力機器として良好な特性を示していることがわかる。また、これもほぼ RNA の設計通りの性能が得られていることが了解される。

図9は、制御電流15A時および全制御時の交流側の観測波形である。この図から、4kVA級立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの実証器は、三相のバランスの取れた正弦波出力電流を有することが確認できる。また、直流制御電流によって、出力電流を制御可能であることがわかる。



N_1	114 turns 0.163 Ω
N_u, N_v, N_w	208 turns 0.532 Ω
Rated voltage	200 V
Rated capacity	4.0 kVA
Control current	DC 0 to 30 A
Core material	Non-oriented silicon steel Lamination factor 95.0% Peculiar resistance $5.6 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ Density 7.60 kg/dm ³

図5 4kVA級立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの諸元

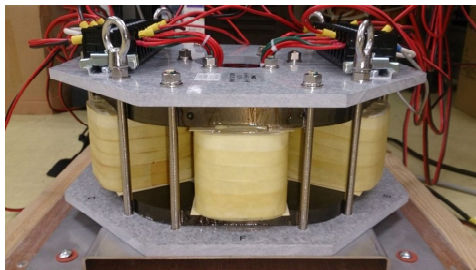


図6 4kVA級立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの試作器外観

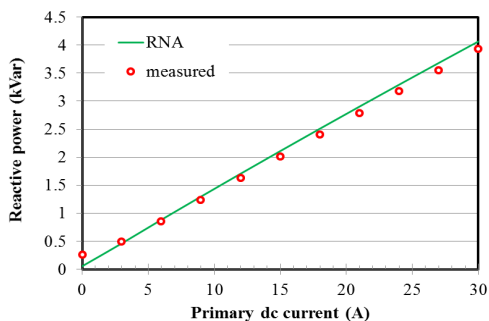


図7 試作器の無効電力制御特性

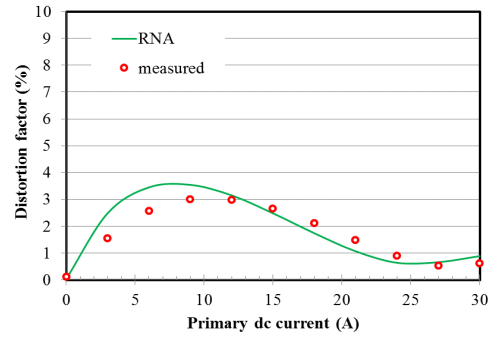
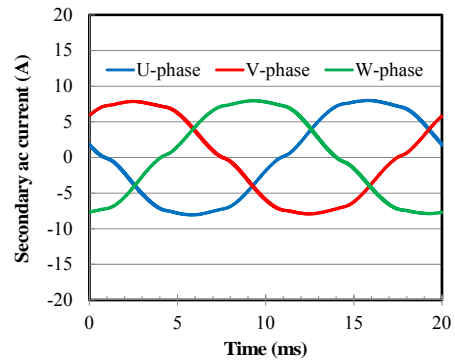
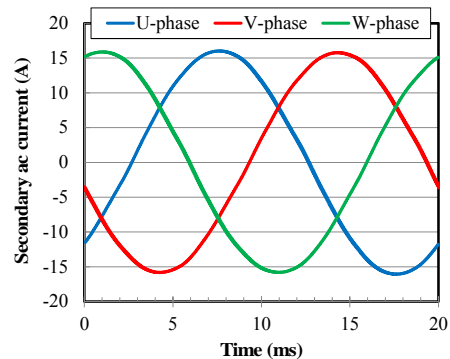


図8 試作器の定格換算歪み率



(a) 半制御時



(b) 全制御時

図9 出力電流観測波形

(3) 100kVA級立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの設計

上述の成果に立脚し、RNAを用いて、6.6kV-100kVA級の立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの解析・設計を行った。

図10に、設計した立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの諸元を示す。

図11に、100kVA級立体構造重ね巻型三相一体可変インダクタの無効電力制御特性を示す。なお、比較のため従来の平面構造重ね巻型三相一体可変インダクタの実測値を併せて同図中に示す。この図を見ると、本可変インダクタは、設計通り無効電力を連続かつ線形に制御可能であり、従来の平面構造と同等の良好な特性を有することがわかる。

図12に、定格換算した出力電流歪み率を示す。この図より、電流歪み率は全制御範囲

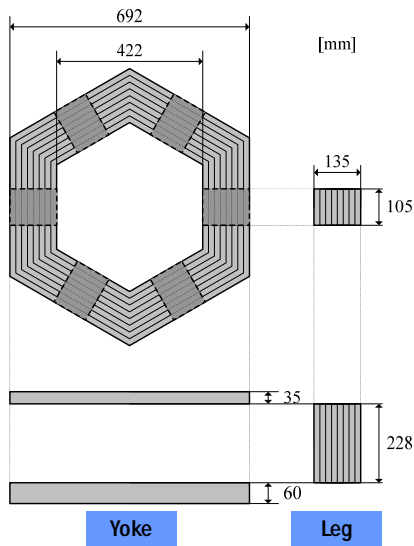
で5%以下と十分に小さく、電力機器として良好な特性が得られていることがわかる。また、従来の平面構造と比較してもほぼ同等の特性であることが了解される。

(4) タンクに生じる渦電流損の解析結果

可変インダクタは、磁気飽和を積極的に利用する磁気デバイスであることから、運転時に漏れ磁束が生じることが知られている。そのため、可変インダクタを収納するタンクには、漏れ磁束に伴う渦電流が生じ、これが損失の増加につながる。従来の平面型では漏れ磁束がタンク側面に向かって垂直に流れ込む位置関係であったため、大きな渦電流損が生じたが、本研究で提案する立体型ではタンク側面に対して平行に漏れ磁束が流れることが予想されるため、渦電流損の低減が期待できる。これを確かめるため、3次元有限要素法(FEM)による電磁界解析によって、タンクに生じる渦電流損を求めた。

図13に、タンクも含めた解析モデルを示す。比較のため、従来の平面型についても同様にモデルを作成し、比較を行った。

図14(a)にFEMによる全制御時のタンクの渦電流損失の解析結果を示す。この図を見ると、渦電流損失の大半はタンク側板において発生しており、タンク全体で約1.4kWとなった。同図(b)の平面型と比較すると、約1/3に渦電流損失が低減されたことがわかる。これは実用上、大変有益な成果である。



N_1	560 turns 2.16 Ω
N_u, N_v, N_w	1300 turns 7.1 Ω
Rated voltage	6.6 kV
Rated capacity	115 kVA
Control current	DC 0 to 33.3 A
Core material	Non-oriented silicon steel Lamination factor 95.0% Peculiar resistance $5.9 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ Density 7.60 kg/dm ³

図10 100 kVA 級立体構造重ね巻型三相一可変インダクタの諸元

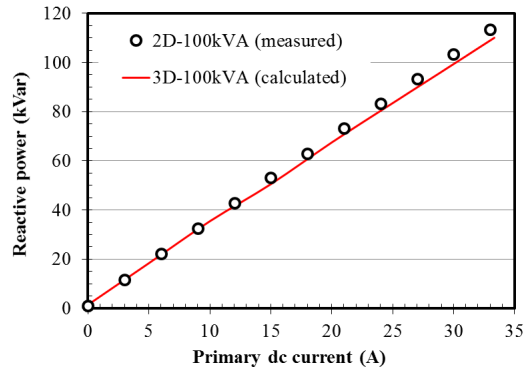


図11 無効電力制御特性

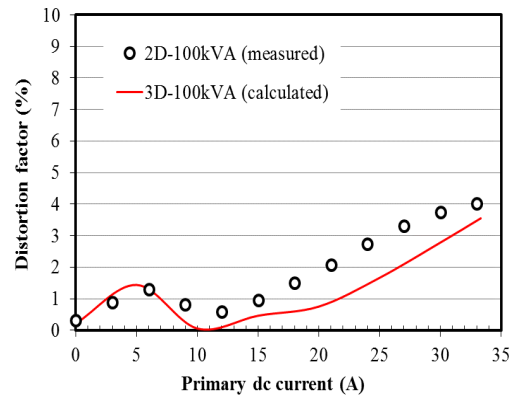
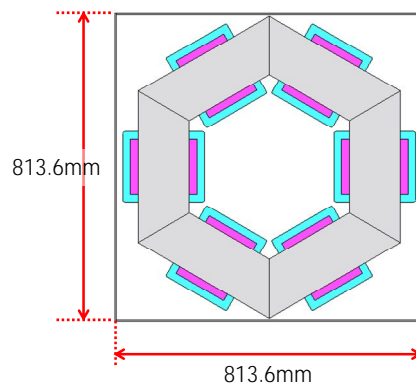
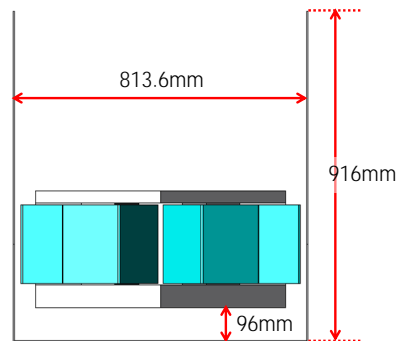


図12 定格換算歪み率

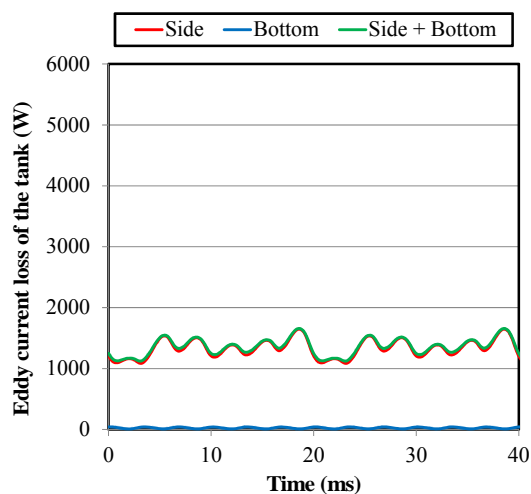


(a) 上面図

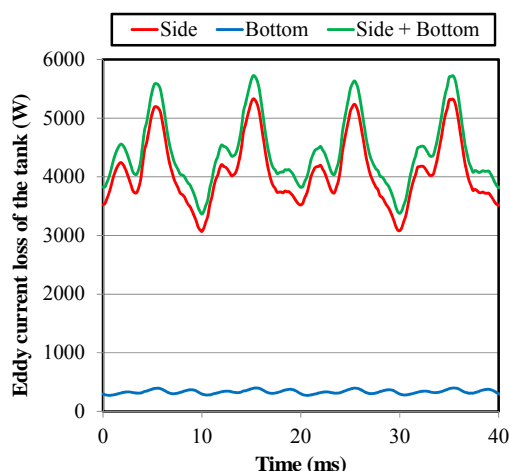


(b) 側面図

図13 タンクも含めた解析モデル



(a) 立体型



(b) 平面型

図 14 タンクに生じる渦電流損の比較

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

K. Nakamura, Y. Yamada, R. Nono, T. Ohinata, K. Arimatsu, O. Ichinokura, A Novel 3-D Concentric-Winding-Type Three-Phase Variable Inductor for Reactive Power Compensation in Electric Power Systems, IEEE Trans. Magnetics, 査読有, Vol. 53, 2017
DOI:10.1109/TMAG.2017.2717479

[学会発表](計4件)

野々竜聖,大日向敬,有松健司,中村健二, RNAに基づく立体構造重ね巻型3相一体可変インダクタの鉄損算定,電気学会マグネティクス研究会,2017
野々竜聖,中村健二, Iron Loss Calculation for Three-Dimensional

Variable Inductor based on RNA,電気関係学会東北支部連合大会,2017

K. Nakamura, Y. Yamada, R. Nono, T. Ohinata, K. Arimatsu, O. Ichinokura, A Novel 3-D Concentric-Winding-Type Three-Phase Variable Inductor for Reactive Power Compensation in Electric Power Systems, INTERMAG 2017, 2017

山田雄太,中村健二,大日向敬,有松健司,一ノ倉理,立体構造重ね巻型3相一体可変インダクタの基礎特性,電気学会マグネティクス研究会,2017

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・教授

研究者番号: 70323061