

磁束制御型変圧器の開発

Development of a Magnetic-Flux-Control-Type Transformer

大日向 敬, 赤塚 重昭, 川上 峰夫, 前田 満, 佐藤 博道, 佐々木 彰*, 関 長隆*, 一ノ倉 理**

東北電力株式会社, 仙台市青葉区中山 7-2-1(〒981-0952)

*北芝電機株式会社, 福島市松川町字天王原 9(〒960-1292)

**東北大学, 仙台市青葉区荒巻字青葉 05(〒980-8579)

T. Ohinata, S. Akatsuka, M. Kawakami, M. Maeda, H. Sato, A. Sasaki*, N. Seki*, and O. Ichinokura**

Tohoku Electric Power Co., Inc., 7-2-1, Nakayama, Aoba-ku, Sendai 981-0952, Japan

* Kitashiba Electric Co., Inc., 9, Tennohara, Matsukawa-machi, Fukushima 960-1292, Japan

** Tohoku Univ., 05Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-0579, Japan

(2000年10月6日受理, 2000年12月6日採録)

This paper describes the development of a magnetic-flux-control-type transformer (MFC transformer).

An on-load tap changing transformer and step voltage regulator is used as a conventional voltage-controller for distribution lines. But the response time for controlling the voltage is not satisfactory, and the voltage control is performed in discrete steps. An MFC transformer can control the output voltage and reactive power at high speed, and continuously, and its copper and iron composition gives it high endurance and reliability.

In this paper, we report on the basic structure of an MFC transformer, the control characteristics of a trial single-phase 30-kVA MFC transformer, and the outline of a three-phase 350-kVA prototype.

Key words: magnetic flux control, transformer, line voltage regulation

1. はじめに

近年の負荷の多様化や太陽光発電, 風力発電などの分散電源の導入拡大に伴い, 電力系統においても特に配電系統を中心として, 従来から行われてきた電圧制御方法では対応が困難な状況になりつつある。

電力系統の電圧制御は, 従来負荷時タップ切換変圧器のタップ切換やSVR(Step Voltage Regulator)などの機械式接点により行われてきたが, タップ切換に時間を要すること, 電圧制御がステップ状に限られることなどから, 近年は高速かつ連続的に電圧制御が可能なTVR(Thyristor Voltage Regulator), SVC(Static Var Compensator), SVG(Static Var Generator)などの調相設備が導入される例が見受けられる。

しかし, サイリスタ等の半導体素子により制御する静止型電圧調整機器は, 高速かつ連続的に出力電圧を制御することが可能であるものの, 構造や制御が複雑であるとともに価格も高価であるなどの欠点を有している。

筆者らはこれまで直交磁心形可変インダクタンスなど磁束制御技術を用いた制御用磁気デバイスの開発を進めるとともに, 配電系統の自動電圧調整装置への適用を進めてきた^{1,2)}。

今回開発した磁束制御型変圧器は, 新たな磁束制御技術を用いることにより, これまでの変圧器としての機能に加えて, 高速かつ

連続的に出力電圧および遅れ無効電力を制御する機能を持ち, さらに, 主回路に半導体素子を用いないために構造が簡単で銅鉄機器として高い信頼性を有するなどの特徴をもっている。

本論文では, 開発した磁束制御型変圧器の基本動作ならびに基礎特性についての概要と三相原理確認器および単相試作器による制御特性の概要ならびに三相実証器の概要について報告するものである。

2. 磁束制御型変圧器の構成

Fig. 1に開発した磁束制御型変圧器の基本構成を示す。

磁束制御型変圧器は, 通常の変圧器と同様の一次巻線 N_1 , 二次巻線 N_2 で構成した磁路において, 磁路の一部を二分割し, それぞれの分割磁路に制御巻線 NC_1 , NC_2 を直列に接続して制御回路に接続した構成である。制御巻線 NC_1 , NC_2 は, 主磁束による誘起電圧が打消されるように直列に接続されており, 制御を行わない場合においては制御回路側に電圧が誘起しない構成となっている。

制御巻線に直流制御電流を流すと, 二分割した磁路に制御磁束を還流させることができ, 制御磁束が還流することで, 交流主磁束と制御磁束が分割磁路を共有するため主巻線側の磁気抵抗が変化する。

すなわち, 直流制御電流により交流主磁束が制御され, 主巻線のインダクタンスが変化することにより, 通常の変圧器の機能に加えて出力電圧や遅れ無効電力を高速かつ連続的に制御することができる。

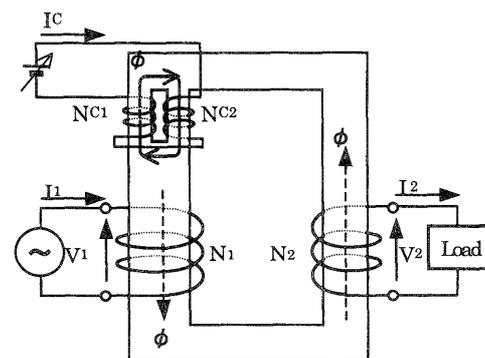


Fig. 1 Structure of the MFC transformer.

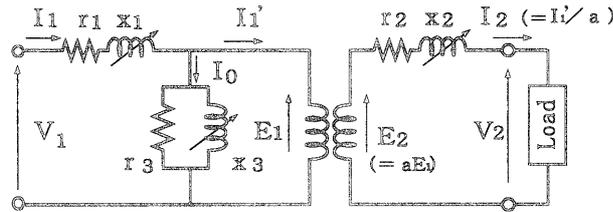


Fig. 2 Equivalent circuit of the MFC transformer.

Fig. 2に磁束制御型変圧器の等価回路を示す。非制御時の磁束制御型変圧器の等価回路は通常の変圧器と同等であるが、直流制御電流を流すことにより励磁リアクタンスおよび漏洩リアクタンスが制御され、励磁電流が増加するとともに漏洩リアクタンスの影響により出力電圧が変化するものである。

3. 原理確認器の構成と制御特性

磁束制御型変圧器の原理確認および基礎特性検証を行うため三相原理確認器を製作し、特性評価を行った。

三相原理確認器の巻線構成をFig. 3に示す。三相原理確認器は定格容量2kVA、定格一次電圧および二次電圧はそれぞれ200Vとした。また、一次巻線、二次巻線および制御巻線の位置関係により、制御時の磁気抵抗の変化に伴い生ずる漏洩磁束の二次巻線に与える影響が異なることから、電圧制御ならびに無効電力制御特性が変化するものと予想される。このため、巻線配置による影響評価を行えるように一次巻線、二次巻線の配置を以下のように設定した。

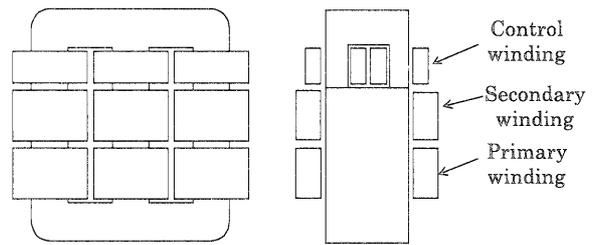
- 巻線配置A：一次巻線、二次巻線の磁氣的結合が弱い巻線配置
- 巻線配置B：一次巻線、二次巻線の磁氣的結合が強い巻線配置

Fig. 4は、Fig. 3で示した巻線配置における無負荷電圧制御特性を示したものであり、巻線配置により電圧制御特性が異なることが確認できる。

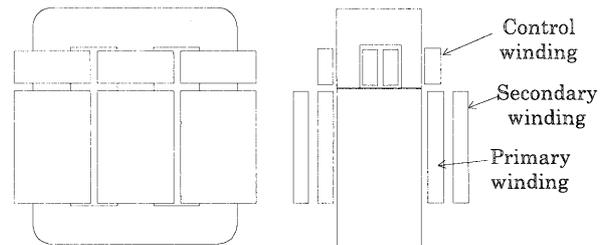
巻線配置Aは、一次巻線と二次巻線の位置がずれているため、漏れ磁束の二次巻線への影響が大きくなり電圧が大きく変化する。

一方、巻線配置Bは、一次巻線と二次巻線が重ね巻となっているため、漏れ磁束の二次巻線への影響が少なく電圧はほとんど変化しない。

すなわち、電圧制御幅の大きな巻線配置は、一次巻線と二次巻線位置がずれているなど、一次巻線と二次巻線間の磁氣的結合が弱い場合である。しかし、磁氣的結合が弱い巻線配置は同時に非制御時における漏洩リアクタンスが大きく、%インピーダンスが大きくなるため、実証器の開発には巻線配置による電圧制御幅と%インピーダンスの設定が重要である。



(a) Winding type A



(b) Winding type B

Fig. 3 Structure winding of the three-phase 2-kVA MFC transformer.

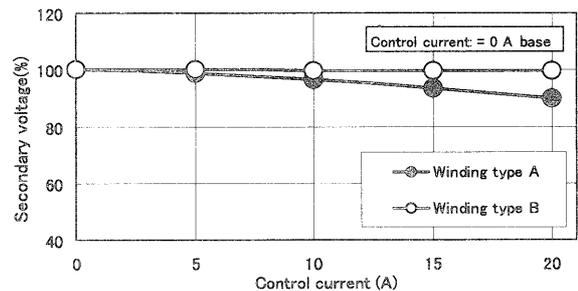


Fig. 4 Control characteristics of the voltage (three-phase 2-kVA MFC transformer).

4. 単相試作器の構成と制御特性

三相原理確認器の基礎特性検証結果を基に、磁束制御型変圧器の詳細検証を行うため、30kVA単相試作器を製作した。

30kVA単相試作器の仕様をTable 1、巻線構成をFig. 5、外観をFig. 6に示す。

Table 1 Specifications of the single-phase 30-kVA MFC transformer.

	Specification
Output power	30 kVA
Frequency	50 Hz
Voltage	200 V / 200 V
Control current	DC 0-20 (40) A
Type	Dry type

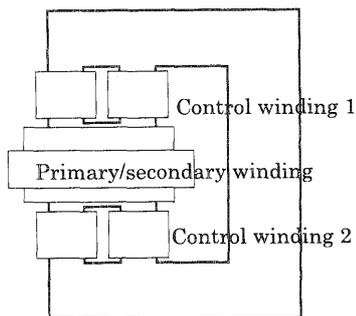


Fig. 5 Structure of the single-phase 30-kVA MFC transformer.

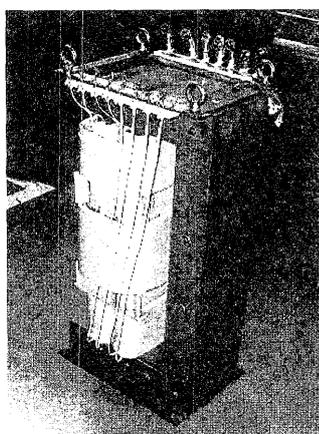


Fig. 6 Photograph of the single-phase 30-kVA MFC transformer.

単相試作器の定格一次電圧および二次電圧はそれぞれ 200V であるが、280V まで変更可能な巻線構成とした。

また、磁路が効果的に飽和するように分割磁路を 2 箇所設けて各々に制御巻線を巻いて、両分割磁路間に一次・二次巻線を配置した構造としている。

Fig. 7 は、単相試作器の無負荷時および定格負荷時 (30kVA、力率 1.0) の電圧制御特性例を示したもので、制御電流を調整することにより、電圧が線形に制御されており、負荷接続時においても無負荷時と同等の制御が可能であることが確認できる。また、Fig. 8 は定格負荷時 (30kVA、力率 1.0) の無効電力制御特性を示したもので、制御電流を調整することにより、無効電力も同様に線形に制御されることが確認できる。

5. 三相実証器の仕様と制御特性

実証器の仕様を Table 2、外観を Fig. 9 に示す。

実証器は一次側 400V/二次側 6600V/三次側 400V、定格容量 350kVA であり、電圧制御幅は一次側 $400V \pm 5\%$ と設定した。また、巻線の接続は $\Delta-\Delta-\Delta$ 結線とすることにより第 3 次高調波

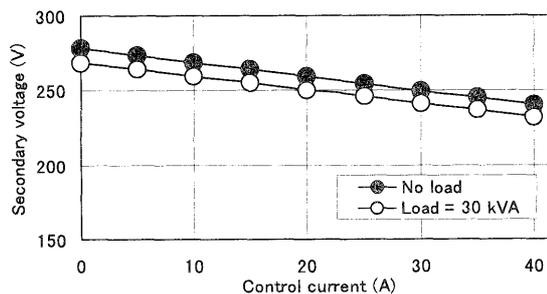


Fig. 7 Control characteristics of the voltage (single-phase 30-kVA MFC transformer).

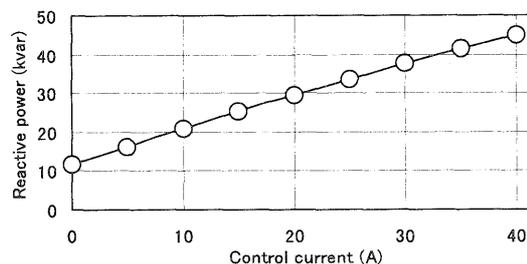


Fig. 8 Control characteristics of the reactive power (single-phase 30-kVA MFC transformer).

Table 2 Specifications of the 350-kVA prototype.

	Specification
Output power	350 kVA
Frequency	50 Hz
Voltage	400 V / 6600 V / 400 V
Control current	DC 0-25 (30) A
Wire connection type	$\Delta-\Delta-\Delta$
Type	Dry type

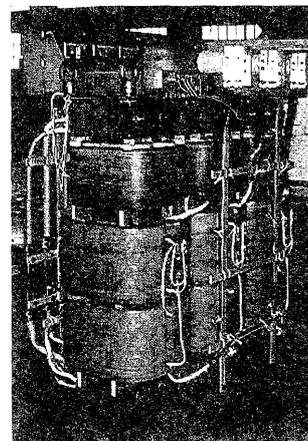


Fig. 9 Photograph of the 350-kVA prototype.

成分を環流させて、制御時においても電流総合高調波含有率を5%以下にしている。

350kVA 実証器の磁心構造・巻線構成は、単相試作器の特性検証結果を基にシミュレーションを行い設計したが、単相試作器とは異なる、高電圧・三相型・大容量化に対応するため、新たに漏れ磁束設計や絶縁設計などを行った。

試作器の磁心は一般的な三相変圧器と同等の三脚磁心を適用し、それぞれの脚の一部を二分して制御巻線を設置した。それぞれの脚には一次巻線および二次巻線を設置しているが、電圧制御値が設定可能な、一次巻線と二次巻線の磁気的な結合が異なるように両巻線の重なり部分を変えた巻線タップを設けている。

Fig. 10は、無効電力制御特性を示したもので、図中巻線タイプAは最も磁気的な結合の弱いタップ、巻線タイプBは磁気的な結合が中間のタップ、巻線タイプCは磁気的な結合の最も強いタップを示しており、巻線タップに関わらず励磁電流の制御量自体の変化はほとんどなく、巻線配置によらず線形に無効電力制御ができることがわかる。

Fig. 11は、巻線タップの設定による電圧制御特性を示したもので、巻線タップの設定により一次巻線と二次巻線の磁気的な結合が変わるため電圧制御特性が異なり、最も磁気的な結合の強い巻線タイプCの場合には電圧変化を無くし、無効電力調整のみの単機能器としての動作が可能となる。

6. あとがき

出力電圧と遅れ無効電力を高速かつ連続的に制御可能な磁束制御型変圧器を開発した。三相原理確認器では磁束制御型変圧器の原理確認を行うとともに基本特性を検証し、電圧調整が線形に制御可能であることを確認した。また、単相試作器では、電圧調整と無効電力調整が線形に制御可能であることを確認した。さらに、単相試作器の検証結果を基に350kVA 三相実証器を製作した。今後は、実フィールドにおいて制御特性の確認試験を進めるとともに、制御手法の確立やコンパクト化など最適設計についての検討を進める予定である。

文 献

- 1)前田, 坂本, 三田村, 一ノ倉, "直交磁心形電力用可変リアクトルの開発", 日本応用磁気学会誌, 22, 733-736(1998)
- 2)前田, 赤塚, 伊藤, 一ノ倉, "直交磁心形無効電力補償装置の開発動向", 日本応用磁気学会誌, 23, 1787-1792(1999)

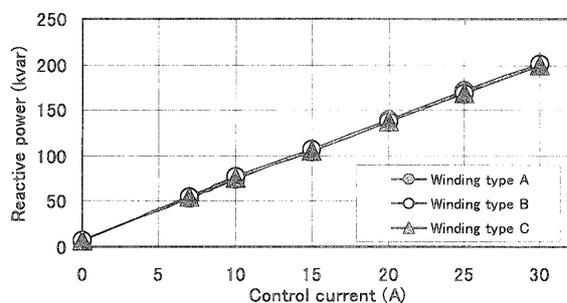


Fig. 10 Control characteristics of the reactive power (350 kVA prototype).

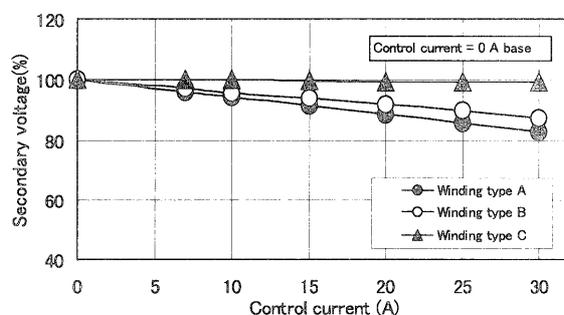


Fig. 11 Control characteristics of the voltage (350-kVA prototype).