外鉄形磁心によるギャップレス三相可変インダクタの開発

Development of Gapless Three-Phase Variable Inductor with Shell-Type Magnetic Core

葵木 智之, 赤塚 重昭, 大日向 敬, 川上 峰夫, 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. Aoki, S. Akatsuka, T. Ohinata, M. Kawakami, H. Sato, A. Sasaki*, N. Seki*, and O. Ichinokura**

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

* Kitashiba Electric Company, Ltd., 9, Tenuhara, Matsukawa-machi, Fukushima 960-1292, Japan

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

This paper describes structural and Performance characteristics development of a gapless three-phase variable inductor with a shell-type magnetic core.

A variable inductor is a magnetic device having an insulated three-terminal function and electromechanical devices for direct control of an electric power system. High durability and reliability are ensured by a structure of copper and iron.

A gapless variable inductor is easy to construct because inductance can provide continuous, high-speed control and space is not needed for electric current warp improvement.

Key words: magnetic flux control, variable inductor

1. はじめに

可変インダクタは、絶縁された三端子機能を有する磁気デバイスで、電力を直接制御できる電磁機器である。また、銅鉄で構成される電磁機器として変圧器なみの耐久性・信頼性を有することから、電力機器への適用が期待されている。しかし、電力機器としての可変インダクタの検討はほとんど行われていない。

筆者らはこれまでに、U型カット磁心を用いた直交磁心型や三脚磁心を用いた磁束制御型の可変インダクタを提案¹⁾してきたが、これら可変インダクタの基本動作は、制御電流により磁路全体あるいは一部を磁気飽和させてインダクタンスを制御していた。このため、高調波歪みの発生や、線路に直列接続しても負荷電流による磁気飽和が生じ、インダクタンスの制御が困難であるなどの課題が生じていた。

これらの課題を解消し、可変インダクタの性能を更に高めた田形磁路構成による単相の可変インダクタ²⁾⁴⁾は、新たな磁路巻線構成を採用することで、制御電流による直流磁束の調整により主巻線磁束を制御し、主磁路の磁束密度を常に飽和磁束密度内に保った状態でインダクタンス制御を可能とする。このため、負荷電流の有無に関わらず、制御電流を調整することにより連続かつ高速にインダク

タンス制御が可能であると共に、高調波歪み改善のための間隙を必要としない簡単な構成であるという特長を有している。

今回開発したギャップレス三相可変インダクタは、田形磁路による単相可変インダクタの動作原理に基づき、磁心構造を三相一体化したもので、単相器同様に優れた特性を有している。

本論文では、開発したギャップレス三相可変インダクタの基本動作ならびに試作器による基礎特性の概要について報告するものである。

2. ギャップレス三相可変インダクタの構成と動作原理

Fig.1 に開発したギャップレス三相可変インダクタの基本構成を示す。

磁心は六つの窓部を設けた三相一体構成としており、磁心中央を横に貫く中央脚に配置した巻線 N_u , N_v , N_w を三相交流主巻線とする。各々の交流主巻線電流によって発生する交流主磁束 ϕ_u , ϕ_v , ϕ_w は破線にて示すように中央脚から、上下脚に至る磁路を通過する。上下脚には、各相毎に直流制御巻線を2分割して配置する。各

Fig. 1 Structure of gapless three-phase variable inductor.

相の直流制御巻線は、交流主磁束により誘起される電圧が打消されるように直列に接続しているため、制御を行わない場合には、制御回路側に電圧が誘起しない構成となっている。

直流制御電流によって発生する直流制御磁束 ϕ_c は、二点破線で示すように磁心の外周磁路を通過する。外周磁路は、交流主磁束と直流制御磁束の共通磁路となり、制御を行わない場合は交流主磁束は上下脚を通過するが、制御を行うことにより直流制御磁束 ϕ_c が増加すると共通磁路の磁気抵抗が増加しインダクタンスが低下するとともに、中央脚における三相交流磁束の相互作用が現れる。

3. 試作器の仕様と基礎特性

3.1 試作器の仕様

ギャップレス三相可変インダクタの原理確認および基礎特性試験を行うため3.5 kVA 級試作器を製作し、特性評価を行った。

3.5 kVA 級試作器の仕様を Table 1、外観写真を Fig.2 に示す。

基礎特性試験は、Fig.1 に示す基本構成図において、交流主巻線をデルタ結線として三相交流電源に、直流制御巻線を三相並列結線とし直流制御回路にそれぞれ接続して実施した。

Table 1 Specifications of prototype

Item	Specification
Output power	3.5 kVA
Voltage	150 V
Control current	DC 0-15 A
Main winding	308 turn
Control winding	462 turn
Core size (H×W×D)	260×540×50 mm
Material	Silicon steel board

Fig. 2 Photograph of prototype.

3.2 基礎特性

Fig.3 は、制御電流 I_c をパラメータとした磁化特性を示したもので、それぞれ V 相ピーク値より算出した。 B は主巻線直下の磁束密度を、 H_m は主巻線起磁力を表している。

同図において、主巻線磁化力 H_m の増加に対して磁束密度 B は磁気飽和による非線形な特性を示しているが、制御電流 I_c の増加に従って非線形性が緩和されている。

この現象は、制御電流がない場合、主巻線磁路の磁気飽和特性による磁化特性となるが、制御電流 I_c が流れることにより共通磁路部分の磁束密度が高まって磁気抵抗が増加する。これにより、主巻線の磁化力は閉磁路から高抵抗磁路状態へ移行し、各相相互に作用し、同一磁化力に対する磁束密度が低下したものと考えられる。

すなわち、主巻線部分の磁束密度は制御電流により制御できることになる。

Fig.4 は、主巻線電圧 V をパラメータとしたアンペアターン特性を示す。

同図において、主巻線アンペアターンと制御巻線アンペアターンの関係はほぼ 1 対 1 の関係を示しているが、制御巻線起磁力の増加量に対して主巻線起磁力の増加量が低下している。これは制御巻線起磁力の増加に伴い共通磁路部分が高磁束密度となると磁気抵抗が

Fig. 3 Characteristics of magnetization.

Fig. 4 Characteristics of ampere turn.

高くなり、主巻線の誘起する交流磁束が磁気回路から漏洩し、磁気抵抗が一定の周辺空間に交流磁路を形成するため、制御効果が低下するためと考えられる。一方、主巻線電圧が高くなると主巻線起磁力が強まり、制御可能な磁気回路上の交流磁束量が増加するため、制御巻線起磁力が増加しても線形性の高い制御特性を示す。

Fig.5 は、主巻線電圧 V をパラメータとした三相可変インダクタのインピーダンス制御特性を示す。

同図において、制御電流が小さい領域においては高インピーダンス値を示している。これは制御電流が小さい場合、共通磁路は未飽和領域にあって、主巻線磁束は各相相互に作用することなく共通磁路を通過することができる。しかし、制御電流が流れると、共通磁路の磁束密度が制御磁束により制御され、制御電流の増加に従い共通磁路の磁気抵抗が増加し、主巻線磁束が共通磁路を通過することが困難となる。このため、共通磁路の磁気飽和現象と主巻線磁束の各相相互の作用量が増え、インピーダンスは低下する。

4. 電力機器への適用検討

ギャップレス三相可変インダクタの電力機器への適用例として、並列型の無効電力調整装置への適用を検討した。

Fig. 5 Characteristics of impedance control.

Fig. 6 Structure of reactive power adjustment system.

Fig.6 に並列型の無効電力調整装置の概略図を示す。

試験は、Fig. 1 に示した基本構成において、三相交流電源および直流制御電源を接続し、電圧一定の制御特性試験とした。

Fig.7 は、印加電圧をパラメータとした三相無効電力制御特性を示す。

同図において、無効電力は制御電流の増加に従いほぼ線形に増加しており、制御電流により無効電力が制御可能であることが確認できる。

制御電流は連続的な調整が可能であることから、ギャップレス三相可変インダクタを適用した無効電力調整装置は、連続的な無効電力制御が可能である。したがって、電圧調整を目的として電力系統に並列に接続した場合も連続的な電圧調整が可能となる。

Fig.8 は、印加電圧 V をパラメータとした高調波電流歪み特性を示す。

同図において、歪み率は制御電流の増加に従い低減している。これは、制御電流の増加により、共通磁路の磁気抵抗が増加することにより、主巻線磁束の各相相互の作用量が増加し、歪み成分が減少しているものとする。

Fig. 7 Characteristics of reactive power control.

Fig. 8 Characteristics of current harmonic distortion at constant voltage impressed.

Fig.9は、定格電圧印加時の歪み率を定格換算したものを示す。

同図より、定格換算した総合歪み率は5%以下の値であり、実用レベルであると考えられる。図中で歪み率が高い部分については、磁化特性における線形-非線形領域の変曲点付近であるため若干の歪みを生じたものとする。

Fig.10に定格時の線電流および線間電圧の波形を示す。

同図より、線電流、線間電圧ともにほとんど歪みのない正弦波であることが確認でき、電力機器としても実用レベルにある。

Fig.11は、印加電圧Vをパラメータとした損失特性を示す。なお、損失は以下により算出した。

$$\text{損失}[\%] = \frac{\text{損失}[\text{W}]}{\text{制御容量}[\text{VA}]} \times 100$$

定格時における損失は約5%であった。このうち、約半分がIRによって算出される銅損、残り半分が鉄損および漂遊負荷損である。本試作器は、損失を考慮した最適設計を行っておらず、損失値は磁路構成等により変化するものと考えられる。損失低減が今後の機器の大型化や実用化に向けて、最適設計による検討が必要な部分であると考えられる。

Fig. 9 Characteristics of current harmonic distortion at ratings conversion.

Fig. 10 Waveforms of line current and line voltage.

Fig. 11 Characteristics of total loss.

5. あとがき

高速かつ連続的にインダクタンス制御が可能で、高調波電流歪みの少ないギャップレス三相可変インダクタを開発した。試作器により原理確認を行うとともに基礎特性を検証し、三相一体型の磁心構造においても広範囲のインピーダンス制御が可能であること、ほぼ線形のアンペアターン特性を持つこと等を確認した。また、電力機器への適用例として、並列型の無効電力調整装置への適用が可能であることを確認した。今後は、電力用機器への適用について検討を進めるとともに、損失低減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) 船渡寛人, 神山健三, 河村篤男: 電気学会論文誌D, **120**, 694 (2000)
- 2) 赤塚重昭, 大日向敬, 川上峰夫, 前田満, 佐藤博道, 中村健二, 一ノ倉理: 日本応用磁気学会誌, **25**, 1023-1026 (2001)
- 3) 前田満, 葵木智之, 赤塚重昭, 大日向敬, 佐藤博道, 一ノ倉理: 電気学会全国大会予稿集, **5**, 1928 (2001)
- 4) 大日向敬, 葵木智之, 赤塚重昭, 前田満, 佐藤博道, 一ノ倉理: 電気学会全国大会予稿集, **5**, 1929 (2001)
- 5) 葵木智之, 赤塚重昭, 大日向敬, 前田満, 佐藤博道, 一ノ倉理: 電気学会全国大会予稿集, **2**, 726 (2001)

2002年10月4日受理, 2003年1月17日採録