接着コーティング電磁鋼板を用いたモールドコア形 ギャップ付き鉄心式リアクトルの開発

正員 桑田 稔* 正員 野川 修一*
正員 高橋 則雄** 正員 宮城 大輔**
正員 竹田 和年***

Development of Mold-Core Type Gapped Iron-Core Reactor using Adhesive Coated Electromagnetic Sheet

Minoru Kuwata*, Member, Shuichi Nogawa*, Member, Norio Takahashi**, Member,
Daisuke Miyagi**, Member, Kazutoshi Takeda***, Member

The adhesive coated non-oriented electromagnetic steel sheet is well known to be effective in realizing high efficiency, high power motors with compact size and low noise. The authors developed newly adhesive coated grain oriented electromagnetic steel sheets. Then, a gapped iron-core type reactor having a new iron-core structure is developed using the adhesive coated steel sheets. By adopting the adhesive coated grain oriented electromagnetic steel sheets to the leg of the reactor, the fastening studs of the laminated electromagnetic steel sheets, which are required in conventional reactor, and the through hole for the fastening studs could be omitted. This enabled us to simplify the structure and reduce the core diameter. On the other hand, we examined the magnetic flux distributions and local loss distributions in the yoke by the detailed magnetic field analysis to utilize the grain oriented electromagnetic steel sheet with bolt-less construction, and realized the reduction of dimensions and weights due to the increase of magnetic flux density. The reactor developed has such features of smaller size, lighter weight and lower noise level.

キーワード：リアクトル，モールドコア，接着コーティング電磁鋼板

Keywords: reactor, mold-core, adhesive coated electromagnetic steel

1. まえがき

電力用リアクトルには，方向性電磁鋼板を用いたギャップ付き鉄心式リアクトルが多く用いられている。古くは，その鉄心構造に多段積層鉄心が用いられていた⁽¹⁾。これは，短冊状の電磁鋼板を多段に積層し，それらをボルトで締め付ける構造である。そのため，ボルト貫通孔を有しており，この部分に磁束が通過せず鉄心の占積率を低下させる欠点があった。

一方，モータの分野では無方向性電磁鋼板を用いた接着電磁鋼板コアが開発され，モータの高効率化，小形高出力化，低騒音化に貢献している⁽²⁾⁽³⁾。この技術をリアクトルに適用すれば，モータ同様に小型化，低損失化が図れるとの期待がある。

モータの場合には，無方向性電磁鋼板の絶縁皮膜の代わりにプリプレグ材である接着コーティングを施し，打ち抜き積層後に加圧加熱することで鉄心を一体化している。しかし，リアクトルでは，方向性電磁鋼板が用いられており，接着コーティングは，電磁鋼板の表面のセラミック層，絶縁層のうえに施さざるを得ず，接着強度を確保できるか，また，絶縁油中で使用するので，耐油性を有しているかとの特有の課題がある。さらに，多段積層鉄心をどのように加圧加熱するかとの構造上の課題もある。

筆者らは，これらの課題を解決し，新たに方向性接着コーティング電磁鋼板を開発した。さらに，これを用いてボルトレスのモールドコア形ギャップ付き鉄心式リアクトルを開発した。

脚鉄心を構成するブロック鉄心の構造は，電磁鋼板の切

* 日新電機（株）
〒615-8686 京都市右京区梅津高畝町 47 番地
NISSIN ELECTRIC CO., LTD.

47, Umezu-Takase-chou, Ukyo-ku, Kyoto 615-8686

** 岡山大学工学部
〒700-8530 岡山市津島中 3 丁目 1 番 1 号
Okayama University

3-1-1, Tsushima, Okayama 700-8530

*** 新日本製鐵（株）技術開発本部
〒671-1188 姫路市広畑区富士町 1 番地
Nippon Steel Corporation

1, Fuji-cho, Hirohata, Himeji 671-1188

断方法を新たに考案し、モールド化にも適した八角形とした。また、ヨーク鉄心には、従来用いられていた無方向性電磁鋼板に代え、方向性電磁鋼板の適用可能性を磁界解析と磁束及び鉄損の実測を行うことにより評価し、方向性電磁鋼板を用いても問題の無いことがわかった。ボルトレス化による占積率向上に加え、高磁束密度化による小形化を実現できる。これらの特徴は、実規模試作器の製作、検証により確認しており、以下に報告する。

2. 方向性接着コーティング電磁鋼板

2・1 電磁鋼板の構成 図 1 に、新たに開発した方向性接着コーティング電磁鋼板の断面構造を示す。方向性電磁鋼板はケイ素鋼（地鉄）に張力を与えて鉄損、磁歪等の特性を改善している。この張力を与えるためにセラミック層は不可欠であり、これを保護するために設けられる絶縁層の上に、接着コーティング（A コート）⁽⁴⁾ を施すこととした。A コートは熱硬化性樹脂であるエポキシ系有機樹脂を主成分としており、強度、耐熱性に優れている。従来の方向性電磁鋼板に比べて接着コーティング層（8μm）の分だけ厚くなっているが、それが占積率に与える影響は軽微である。

2・2 加圧加熱条件 接着コーティング層を融着固化させるためには、積層面に直角に加圧した状態で加熱する必要がある。この加圧加熱条件を検討した。試料と試験状況を図 2 に示す。試料は幅 30 mm、長さ 100 mm の電磁鋼板を 10 mm 重ねて（ラップ）つなぎ合わせた。このラップ部の強度を同図 (b) に示すアムスラー試験機（島津製 AG-200E、引張速度 30 mm/min）で調査した。試験結果を図 3 に示す。160～200℃ の加熱が適切であることがわかった。この時の加圧条件は、1.0 MPa、60 秒である。また、アムスラー試験機での引張試験後の破断面の観察結果より、接着面での破断では無く、図 1 に示すセラミック層での破断であった。このことより、接着コーティング層と絶縁層の相性もよく、十分な接着強度を有していることが確認できた。

2・3 耐熱性の検討 接着コーティング材の耐熱性は別途報告されている⁽⁴⁾。この文献によれば、接着強度低下を (1) 式で示す 1 次反応と考え、この式をアレニウスの式

を用いて変形すると、初期接着強度が半減する時間は (2) 式で与えられる。

$$\ln C = -kt + \ln C_0 \dots\dots\dots (1)$$

C：接着強度
C₀：初期接着強度
k：反応速度係数
t：経過時間

$$\ln t_e = a \times 1/T + b \dots\dots\dots (2)$$

t_e：初期接着強度が半減するまでの時間
a：2.12 × 10⁴
T：絶対温度
b：-39.2

t_e は初期接着強度が半減するまでの時間を示しており、これを寿命と考える。対象とするリアクトルの耐熱クラスは、A（JIS C 4902 (1998)「高圧及び特別高圧進相コンデンサ及び附属機器」：許容温度 105℃：378 K）である。(2) 式より、雰囲気温度が 105℃ の寿命は約 6 万年となる。また、雰囲気温度が短時間許容温度上限値の 150℃：423 K の時は、151 年と計算され、リアクトルの想定寿命 30 年に

図 2 試料と試験状況

Fig. 2. Specimen and testing method.

図 1 接着コーティング電磁鋼板の断面構造

Fig. 1. Sectional views of non-oriented and oriented adhesive coated electromagnetic steel sheet.

図 3 温度が接着強度に及ぼす影響

Fig. 3. Effect of temperature on adhesive strength.

図 4 120°C の絶縁油中での耐油性の検討

Fig. 4. Adhesive strength in 120°C oil.

対して、十分に余裕のあることがわかる。

2・4 耐油性の検討 リアクトルは絶縁油中で使用するので、耐油性の検討が重要である。実使用温度より高い 120°C の絶縁油中で 40 日間の加速加熱試験を実施し、接着強度の変化を調べた。試験方法は加圧加熱条件の検討と同様である。試験結果を図 4 に示す。40 日間の加熱で接着強度の低下傾向が認められない。また、加熱した時の絶縁油の特性を調べたが変化は見られず、絶縁油中への接着コーティング材の溶出のないことが確認された。これより、十分な耐熱性を有していると考えられる。なお、上述の (2) 式を用いて、試験温度の 120°C を耐熱クラス A の運転温度の 95°C に換算すると、加速係数は 39 倍であり、40 日間の加熱は 4.3 年に相当する。

3. モールドコア形ギャップ付き鉄心の構造

3・1 鉄心構造の比較 製作した実規模試作器の定格を以下に示す。

- 定格：三相 50 Hz 66 kV 30 MVA 用 $L = 6\%$
- 用途：コンデンサ用直列リアクトル

実規模試作器の鉄心の外観を図 5(a) に示す。従来構造の同図 (b) と比較し、小形化を図ることができた。

3・2 ブロック鉄心構造 新ブロック鉄心の外観写真を図 6 に示す。また、従来のブロック鉄心との構造比較を図 7 に示す。従来のブロック鉄心は多段積層形と呼ばれ、断面が多段に構成されている。多数の電磁鋼板を一体化するために、それぞれの中央に貫通孔を設け、そこにボルトを貫通させ締め付けている。そのため、磁束方向（紙面に垂直）に対して、ボルトの貫通孔部分は、電磁鋼板が無く磁路として機能していない。新ブロック鉄心では、ボルト貫通孔がないため鉄心断面が全て磁路として機能している。同じ磁路断面積を確保するのに、従来のブロック鉄心直径 270 mm に対し、250 mm ですみ、断面積で 15% の縮小化が図れた。これは単に鉄心の縮小だけでなく、鉄心の外側に配置される巻線、さらにタンクも縮小されるため、装置全体の小型化も可能とした。

3・3 電磁鋼板の切断方法 従来の多段積層形では、各段の鋼板幅に応じた電磁鋼板（ロール材）を準備し、短

図 5 鉄心の外観

Fig. 5. Appearance of iron core.

図 6 新ブロック鉄心の外観

Fig. 6. Appearance of new iron core block.

図 7 ブロック鉄心の断面構造の比較

Fig. 7. Comparison of sectional area structure of iron core block.

冊形状に切断していた。この場合、数種類のロール材を用いることになり、端材が多く生じていた。今回、図 8 に示す電磁鋼板の切断方法を考案し、ロール材の種類と端材の発生を減らすことができた。ロール材を第 1 切断で短冊形状にしたのち、第 2 切断の位置を順にずらせることにより、ロール材幅が 1 種のみで台形断面を構成できる。中央部の電磁鋼板幅のロール材と 2 種類で、八角形の新ブロック鉄心を構成できる。ブロック製作時に方向性接着コーティング電磁鋼板を積層面に直角に加圧した状態で加熱する必要があり、この時の加圧力を均一に加えるにも適した形状である。切断の合理化が図れた。

3・4 構造の合理化 図 6 のブロック鉄心とギャッ

表 1 モールドコアと従来形コアの比較

Table 1. Comparison between mold core and conventional structure.

Item		Molded core	Conventional structure
Leg	Shape of section	Octagonal	Multistage
	Slit width	2 types	Same number as the number of stages
	Material	Grain oriented electromagnetic steel sheet	Grain oriented electromagnetic steel sheet
	Block fixing method	Solidification of prepregs material	Tightening with stud + Resin covering
	Block fastening stud	None	Round bar with insulating coat
	Through hole	None	Provided
	Iron core fastening plate (wear plate)	None	Phenol resin
	Grounding	Electric shield around the legs	Block by block
Yoke	Material	Grain oriented electromagnetic steel sheet	Non-oriented electromagnetic steel sheet
	Block fixing method	Solidification of prepregs material	Tightening with stud + Resin covering
	Yoke through bolt	None	Bolt with insulating coat
	Through hole	None	Provided

図 8 電磁鋼板の切断方法

Fig. 8. Cutting method of electromagnetic steel sheet.

ブ板を交互に積み重ねて脚鉄心を構成した。ブロック鉄心をボルトレスとしたため、ボルトに付随する絶縁チューブ、当板等がなくなり構造を簡素化できた。また、ヨーク鉄心には、従来の無方向電磁鋼板に代え方向性電磁鋼板を使用した。それにより磁束密度を高くして、さらに、ヨークのボルトレス化による占積率の向上により、ヨーク鉄心の小型化を図った。従来構造との比較を表 1 にまとめた。

以上より、新開発のモールドコア形リアクトルは従来器と比較し、次のような小形、軽量、低損失を実現できた。

設置面積： 6.1 m² (従来比 82%)
 重量： 10.7 トン (従来比 82%)
 損失： 26 kW (従来比 90%)

4. ヨーク鉄心の磁界解析

実規模試作器を対象に、電磁鋼板の新たな磁気異方性の

モデル化手法を試みた磁界解析を行い、解析と実測の比較を実施した⁽⁵⁾。

4・1 磁気異方性の取り扱い 磁束がほぼ電磁鋼板の圧延方向を向く変圧器の磁界解析では、方向性電磁鋼板は、通常、圧延方向と直角方向の 2 方向の $B-H$ カーブで特性を模擬されている。しかし、リアクトルのヨーク鉄心の場合には、圧延方向に対して 90 度の方向の脚部から磁束が流入し、ヨーク内でその向きを変えるので、電磁鋼板の圧延方向に対して磁束が傾いて通ることを考慮してモデル化することが必要である。そこで、角度による磁気特性の変化を実測し、このような異方性材料のモデル化方法の検討を行った。これまで、このように磁気異方性を忠実に考慮した方法を用いてリアクトル鉄心の磁界解析を行った例は報告されていない。

方向性電磁鋼板 (JIS C 2553 (2000) : 35G165) の磁気特性の測定結果を図 9, 図 10 に示す。これは圧延方向に対する切り出し角 θ_B を 15 度ずつ変えた短冊試料を用意し、直交型 H コイルを有する二次元磁気特性測定装置を用いて測定した。この実測値を三次曲線で補間して任意方向の $B-H$ カーブを考慮した解析プログラムに組み込んだ⁽⁶⁾。計算点が実測曲線上に無い場合は、その近傍の二曲線より補間して求めた。

4・2 解析結果 計算に用いた三相リアクトルの解析モデルを図 11 に、磁束分布の解析結果を図 12 に示す。脚鉄心で発生した磁束はヨーク内に流入し、その方向は、ヨーク鉄心の圧延方向と直角であるが、解析の結果、ヨーク内磁束分布は滑らかで、磁束はヨーク幅全面に広がっていることがわかった。また、図 11 中の E17 の位置における磁束波形を図 13 に示す。計算値と実測値が一部でずれているのは、非線形特性の模擬が未だ完全ではないためと思われる。しかし、全体としてはほぼ一致しており、図 12 の磁束分布の妥当性を確認できた。鉄損分布の計算値を図 14

 (a) 圧延方向 (B_x-H_x)

 (b) 直角方向 (B_y-H_y)

 図 9 $B-H$ 曲線 (35G165)

 Fig. 9. $B-H$ curve (35G165).

図 10 鉄損曲線

Fig. 10. Iron loss curves (35G165).

に示す。脚鉄心に対向するヨーク鉄心部分で鉄損が大きくなることわかる。鉄損分布も滑らかであり極端な分布になっていない。これより、ヨーク鉄心に方向性電磁鋼板が使用できることが確認できた。なお、図示していないが、鉄損も実測値と計算値がほぼ一致している。

図 11 三相リアクトルの解析モデル

Fig. 11. Analyzed model of three-phase reactor.

図 12 磁束分布 (計算値: U 相磁束最大時)

Fig. 12. Flux distribution (calculated, flux density in U phase is maximum).

図 13 磁束波形

Fig. 13. Flux waveforms.

図 14 鉄損分布 (計算値: W/kg)

Fig. 14. Iron loss distribution (calculated: W/kg).

表 2 主要試験結果

Table 2. Main test result.

Test item	Test results
1. Measurement of reactance	Good
2. Measurement of loss	Good
3. Temperature rise test	Good
4. Analysis of gas in oil	Good
5. Noise test	Good
6. Withstand voltage test	Good

表 3 中身騒音試験結果

Table 3. Result of noise test.

Molded core	Conventional structure	Noise reduction
60 d B	65 d B	5 d B

5. 性能検証

製作した実規模試作器を、JIS C 4902 (1998)「高圧及び特別高圧進相コンデンサ及び附属機器」に準拠し試験した。その主要試験結果を表 2 に示す。油中ガス分析、騒音試験は、規格に規定されていないが重要な項目であるので、追加実施した。全てに良好な結果が得られ、リアクトルとして十分な性能を有していることが確認できた。

表 2 に示す試験に先立ち、中身状態での騒音試験を実施した。その結果を表 3 に示す。従来構造に比較し、5 dB の低減効果を確認した。騒音の周波数分析の結果、高周波成分が減少していることがわかった。これは、従来構造のブロック鉄心では、ボルト締付力がボルト近傍の中央部から端に向かって不均一なために、高周波成分を主体に騒音が高くなっていたと考えられる。それに対し、新構造では電磁鋼板一枚一枚が互いに強固に均一に固着されているため、本来の磁歪による騒音のみとなり、低騒音化が実現できたと考えられる。

実規模試作器を用いて長期課電試験を実施した。コンデンサ用直列リアクトルは、基本波定格電流の 125% (許容電流種別 I) で温度上昇試験を実施する事が規格で定められている。これに対し、20%アップの 145%電流で 1 ヶ月 (700 時間) の長期課電試験を実施した。課電前後でリアクタンス、損失、騒音に変化のないことを確認した。また、課電中に油中ガス分析を実施し、可燃性ガスの発生のないことを確認した。

6. ま と め

新たに開発した方向性接着コーティング電磁鋼板を用いて、ボルトレスのモールドコア形ギャップ付き鉄心式リアクトルを開発した。新開発のモールドコア形リアクトルは、従来器と比較し、小形 (従来比 82%)、軽量 (従来比 82%)、低損失 (従来比 90%) を実現した。

この技術は、実規模試作器に選定したコンデンサ用直列

リアクトル以外に、5000 kVA 程度以下の小容量分路リアクトル、SVC 用リアクトル、電鉄用リアクトル等に適用できるものであり、モールドコアを採用することにより、これらの機器の小形化、低損失化、低騒音化を図っていきたい。(平成 17 年 2 月 28 日受付, 平成 17 年 6 月 10 日再受付)

文 献

- (1) 例えば、大岡 登・前川定雄：変圧器，東京電機大学出版局 (1968)
- (2) C. Kaido, K. Takeda, T. Wakisaka, and M. Mizokami: "Characteristics of adhesive coated non-oriented electrical steel sheet core", *T. IEE Japan*, Vol.119-D, No.7, pp.1010-1015 (1999-7) (in Japanese)
開道 力・竹田和年・脇坂岳・溝上雅人：「接着電磁鋼板コアの諸特性について」，電学論 D, 119, 7, pp.1010-1015 (1999-7)
- (3) C. Kaido, T. Wakisaka, T. Muneta, and K. Takeda: "The function of electrical steel sheets in rotating machines and the new approaches", The Papers of Technical Meeting on Rotating Machines, IEE Japan, RM-96-84, pp.39-48 (1996) (in Japanese)
開道 力・脇坂岳・棟田孝司・竹田和年：「回転機の置ける電磁鋼板への要求性能と新しい対応」，電気学会回転機研資, RM-96-84, pp.39-48 (1996)
- (4) K. Takeda, R. Ito, C. Kaido, and K. Hirose: "Development of a heatproof adhesive coating of non-oriented steel sheets", The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-00-132, pp.23-28 (2000) (in Japanese)
竹田和年・伊藤 良・開道 力・広瀬喜久司：「耐熱型接着コーティング」，電気学会マグネティクス研資, MAG-00-132, pp.23-28 (2000)
- (5) T. Kohsaka, N. Takahashi, S. Nogawa, and M. Kuwata: "Analysis of magnetic characteristics of three-phase reactor made of grain oriented silicon steel", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.36, No.4, pp.1894-1897 (2000)
- (6) T. Nakata, K. Fujiwara, N. Takahashi, M. Nakano, and N. Okamoto: "An Improved Neumerical Analysis of Flux Distributions in Anisotropic Materials", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.30, No.5, pp.3395-3398 (1994)

桑 田 稔 (正員) 1955 年 2 月 4 日生。1975 年 3 月阿南工業高等専門学校電気工学科卒業。同年日新電機 (株) 入社。主として変圧器・リアクトルの開発、設計に従事。現在に至る。

野 川 修 一 (正員) 1948 年 1 月 7 日生。1973 年 3 月京都大学工学部電気工学科卒業。同年日新電機 (株) 入社。主として変圧器・リアクトルの開発、設計に従事。現在に至る。

高 橋 則 雄 (正員) 1951 年 4 月 28 日生。1974 年岡山大学工学部電気工学科卒業。1976 年京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻修士課程修了。同年岡山大学工学部助手，以後講師，助教授を経て，1993 年 8 月同教授，現在に至る。工学博士。主として，有限要素法による電気・電子機器の磁界解析ならびに最適設計法に関する研究に従事。IEEE Fellow。

宮 城 大 輔（正員）1974 年 5 月 24 日生。1997 年 3 月横浜国立大学電子情報工学科卒業。2002 年 3 月同大学大学院博士課程修了。同年 4 月岡山大学工学部電気電子工学科助手，現在に至る。主として，高温超電導体の交流損失ならびに有限要素法による電気機器の磁界解析に関する研究に従事。電気学会，低温工学会会員。

竹 田 和 年（正員）1963 年 6 月 23 日生。1988 年 3 月神戸大学大学院自然研究科化学系専攻修士課程修了。同年新日本製鐵（株）入社。主として，電磁鋼板の絶縁被膜などの研究に従事。現在，同社技術開発本部広畑技術研究部主任研究員。