

第 5 章 結 論

第 5 . 1 節 本 研 究 の 総 括

第 2 章では交番及び回転磁束条件下におけるベクトル磁気特性の瞬時モデルの定義及びそれを導入した有限要素磁界解析を行い、第 3 章では交番及び回転ヒステリシスを考慮したベクトル磁気特性の過渡モデルの定義及びそれを導入した有限要素磁界解析を行った。また、解析結果から直接検証用モデル鉄心内の鉄損分布を求めた。第 4 章ではベクトル磁気特性を導入した有限要素磁界解析の応用として、一般三相変圧器鉄心の T 接合部における接合法の違いによる鉄損分布の変化を過渡モデルを用いて解析し、変圧器鉄心内の鉄損低減について検討した。これらの内容に関して以下に総括する。

- (1) 異方性の強い材料、交番磁束条件下における高磁束密度領域の場合、または回転磁束条件下では、圧延方向とそれに垂直な方向の磁気特性から任意方向の磁気特性を表現するという従来法では正確な磁場の振る舞いを把握することが出来ない。そこで、磁束密度と磁界強度をベクトル量として測定したベクトル磁気特性をベクトル的に表現するためのモデルの定義が必要である。そこで実効異方性磁気抵抗率 κ と B と H の空間的位相差を θ_{ph} を用いて瞬時的な B と H の関係を表現する瞬時モデルを定義した。
 - (a) 交番及び回転磁束条件下でのベクトル磁気特性を共通のモデルで定義することにより、各励磁条件下における比較検討が行える。
 - (b) このモデルでは、 B と H の空間的位相差と実効異方性磁気抵抗率とで表され、異方性の効果は実効異方性磁気抵抗率の方に強く現れ、回転ヒステリシスの効果が空間的位相差に強く現れていると言える。
- (2) 瞬時モデルを導入した有限要素磁界解析手法を提案し、ベクトル磁気測定装置を解析モデルとして磁界解析を行い、実際のデータと比較検討した。以下にその結果を示す。
 - (a) 無方向性けい素鋼板においては、回転磁束条件下での高磁束密度領域における、 $\langle 111 \rangle$ 方位である約 60° 方向の困難軸出現を正確に表現で

きている。また交番磁束条件下においても空間的位相差が生じているのが分かる。

(b) 方向性けい素鋼板においては、異方性が強いため交番磁束条件下においても回転磁束条件下においても位相差が大きく現れ、高磁束密度領域においてはやはり約 60° 方向に困難軸が出現するが、これも瞬時モデルを導入した磁界解析手法によって正確に表現できている。

(3) 瞬時モデルを導入した有限要素磁界解析手法を検証用単相及び三相鉄心モデルに適用して磁界解析を行った。

(a) 新手法と従来法との差は、特に高磁束密度領域において顕著に現れる。

(b) 検証用単相鉄心モデルにおいて磁化難易軸方向を出来るだけ避けて磁束は分布しようとするが、コーナー部では磁束線が連続である性質のため避けることが出来ない。そのため本手法においてはコーナー部内側で磁界強度が大きくなる。

(c) 検証用三相鉄心モデルにおいて検証用三相鉄心中央部での左側と右側において、回転磁束の回転方向は両側とも同じであるが、圧延方向に対する回転磁束の傾き角が異なるため、 B 及び H の軌跡分布は非対称となる。

(4) 磁性材料の非線形性には磁気飽和現象、異方性問題、磁気ヒステリシス現象等があり、その磁気特性をどのようにモデリングし磁界解析に導入するかが重要である。そこで、ベクトル磁気特性の交番及び回転ヒステリシスの履歴を過渡的にモデリングした。過渡モデルを導入した有限要素磁界解析手法を検証用単相及び三相鉄心モデルに適用して磁界解析を行った。

(a) 過渡モデルは交番及び回転磁束条件下のどちらのヒステリシスにも適用できる。またこのモデルでは交番磁束条件と回転磁束条件が連続的に表現出来るため、交番及び回転磁束が混在する条件下での磁界解析に有効である。また各種磁性材料のベクトル磁気特性にも適用できる。

(b) 磁界強度の第3高調波までしか考慮しなかったため、一つの磁束条件を表現するのに必要なデータ数はわずか16個と少なくすみ、それでいてある程度精度のよいベクトル磁気特性のモデリングが可能となった。

(c) 検証用鉄心モデルの解析結果において、従来法では不可能であった交番ヒステリシスの表現を可能とし、実測結果に対して良好な一致を示した。また交番及び回転ヒステリシスの統一的表現により、得られた解析結果から直接鉄損計算を行うことが可能である。また検証用三相鉄心モデルの鉄損分布は、解析結果及び測定結果共に非対称の分布となった。

(5) 高効率化の一手段として電気機器鉄心内の鉄損を小さくすることが挙げられるが、そのためには構造上の違いによる電気機器鉄心内の鉄損分布を調べる必要がある。そこで一般三相変圧器鉄心のT接合部における接合法の違いによる鉄損分布の変化を過渡モデルを用いて解析し、変圧器鉄心内の鉄損低減について検討を行った

(a) T接合部にて 90° 接合を行うと、 45° 接合に比べ圧延方向に垂直な方向への磁界印加が多いため磁束の流れが悪くなり、磁束密度及び磁界強度に歪みを発生させる。

(b) 鉄損を用いて比較すると、 90° 接合に比べて 45° 接合の方が鉄損低減となることが分かる。また 90° 接合と 45° 接合の複合接合で接合方法が互いに逆である2つの変圧器の場合、従来では両者の鉄損値はほとんど変わらないと思われる。しかしながら解析結果では両者の鉄損は大きく異なった。これはT接合部にて発生する回転磁束の回転方向はU相側、W相側の両側とも同じであるが、圧延方向に対する回転磁束の傾き角が異なるため、磁化過程がU相側、W相側で違ってくるためである。このことはすなわち、電気機器鉄心に使われている磁性材料の磁気特性を正確に把握した上で、それをどのように用いるかを検討する必要があることを示す。これはまた電気機器の最適設計技術にベクトル磁気特性を考慮した有限要素磁界解析が有用であることを示した。

第 5 . 2 節 今後の課題

本研究の課題として以下の点が挙げられる。

本研究に用いたベクトル磁気特性は励磁周波数が商用周波数の50 [Hz] 一定であるため、周波数の違いによる磁界解析は行っていない。周波数の変化による渦電流の効果などを調べるためには、様々な励磁周波数で測定されたベクトル磁気特性に本研究におけるモデルを適用し解析する必要がある。

また、本研究においては変圧器表面における磁界解析及び鉄損解析であり、積層方向への影響は無視した。そこでベクトル磁気特性及び電気機器鉄心の積層効果を考慮した3次元磁界解析の開発の必要がある。

さらに、本研究においてベクトル磁気特性を考慮した有限要素磁界解析が電気機器の最適設計技術に有用であることを示したが、三相変圧器のT接合部における接合法の最適な角度を求めている。そのためベクトル磁気特性を考慮した有限要素磁界解析の最適設計への応用が望まれる。

最後に、本研究における磁気特性モデルでは、交番及び回転磁束条件下に共通な定義を行ったが、データの共有は現時点では行っておらず、それぞれ個別に実測結果から導出している。そこで交番または回転磁束条件下に限らず、様々な磁束条件下に共通するベクトル磁気特性の特徴を見だし、磁界解析に必要とする入力データ量をより軽減するのが望ましい。

謝 辞

本論文は、著者が大分大学大学院工学研究科に在籍中、磁気工学研究室において行った「ベクトル磁気特性による有限要素磁界解析」に関する研究の結果についてまとめたものである。本研究の遂行にあたって懇切なる御指導と御鞭撻を頂いた大分大学工学部電気電子工学科電気工学教室榎園正人教授に心から感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

本論文をまとめるに当たって数々の有益な御教示を頂きました、広島大学工学部山下英生教授、大分大学工学部岡田英彦教授、田中充教授、小川幸吉助教授に感謝の意を表します。

また、本研究の全過程を通じ、懇切なる御助言を頂いた大分大学工学部電気電子工学科電気工学教室戸高孝助教授に心から感謝致します。

そして、本研究を進めるにあたり、種々の御協力を頂いた大分大学電気電子工学科電気工学教室槌田雄二助手、同佐藤茂信技官、大分高等工業専門学校の岡茂八郎先生、また院生諸氏及び卒論生諸氏に感謝致します。

最後に著者が研究を進めるにあたり精神的、経済的に支えて下さった両親に深く感謝すると共に、本論文を捧げます。

参考文献

- (1) 電気学会：「基礎電気機器学」、オーム社(1985)
- (2) 田口悟：「新しい方向性珪素鋼板の開発」、日本機械学会誌、第81巻、第710号、pp. 46-51 (1977)
- (3) 成田、山口、千田：「3相3脚モデル変圧器鉄心のT接合部における回転磁束分布と鉄損分布」、電気学会論文誌、Vol. 95-B, p.431 (1975)
- (4) I.Daut and A. J. Moses, "Some Effects of Core Building on Localised Losses and Flux Distribution in A Three-Phase Transformer Core Assembled From Powercore Strip", IEEE Trans. on Magn., Vol. 26, No. 5 pp. 2002-2004 (1990)
- (5) M. Enokizono and J. D. Sievert, "Magnetic Field and Loss Analysis in an Apparatus for the Determination of Rotational Loss", Physica Scripta. Vol. 39, 356-359, 1989 (SMM8, 1987 in Badgastein)
- (6) 榎園正人、白川五郎、鈴木毅浩、J. Sievert：「けい素鋼板の2次元磁気特性」、日本応用磁気学会誌、15, 265-270 (1991)
- (7) A. J. Moses and T. Meydan, "Results of Thermal and H-coil sensor Measurements of Rotational Loss in Soft Magnetic Materials", The Proceedings of International Workshop-Oita, 60 (1992)
- (8) 榎園正人、戸高孝、金尾真一：「2次元磁気測定による磁気特性」、日本応用磁気学会誌、17, 559 (1993)
- (9) M. Enokizono, K. Kawamura, J. D. Sievert, "Two-dimensional magnetic properties of three-phase transformer core", Elsevier Studies in Applied Electromagnetics in Materials, Vol.6, pp. 659-662 (1995)
- (10) P. P. Silvester, R. P. Gupta, "Effective computation models for anisotropic soft B-H curves", IEEE Trans. on Magn., Vol. 27, No. 5 (1991)
- (11) T. Nakata, K. Fujiwara, N. Takahashi, M. Nakano, N. Okamoto, "An Improved Numerical Analysis of Flux Distributions in Anisotropic Materials", IEEE Trans. on Magn., 30 (1994)
- (12) M. Enokizono, G. Shirakawa, "Magnetic Field Analysis by Finite Element Method using Two-dimensional Magnetization Curve", Proceedings of the 6th CEFC, P3C09 (1994)
- (13) M. Enokizono, N. Soda, "Magnetic Field Analysis by Finite Element Method using Anisotropic Field", IEEE Tran. on Magn., Vol. 31, No. 3, pp. 1793-1796 (1995)
- (14) 榎園正人、祖田直也：「異方性磁性材料の磁化特性を表す実効異方性磁界の提唱とその応用」、日本AEM学会誌、Vol. 2, No. 4, pp. 20-24 (1995)
- (15) M. Enokizono, K. Yuki, S. Kanao, "Magnetic Field Analysis by Finite Element Method taking Rotational Hysteresis into Account", IEEE Trans. on Magn., 30, 3375 (1994)
- (16) M. Enokizono, S. Kanao, S. Kawano, "Two-dimensional magnetic properties of silicon steel sheet subjected on an alternating field", J. MMM 133 pp. 212-215 (1994)

- (17) 榎園正人, J. D. Sievert : 「回転磁束鉄損測定装置の測定精度の磁界解析による検討」、日本応用磁気学会誌、13, 403-406 (1989)
- (18) M. Enokizono, N. Soda, "Finite Element Analysis of Transformer Model Core with Measured Reluctivity Tensor", IEEE Tran. on Magn., Vol. 33, No. 5 ,pp. 4110-4112 (1997)
- (19) M. Enokizono, N. Soda, "Improvement of Reluctivity Tensor Expression for Finite Element Analysis", Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 11, pp. 83-90 (1997)
- (20) M. Enokizono, N. Soda, "Direct Magnetic Loss Analysis by FEM Considering Vector Magnetic Properties", IEEE Tran. on Magn., Vol. 34, No. 5 ,pp. 188-195 (1998)
- (21) M. Enokizono, N. Soda, "Study on Numerical Modelings for Anisotropic Problems", Journal of Technical Physc. (1998)
- (22) M. Enokizono, N. Soda, "A New Modeling of Vector Magnetic Properties for Magnetic Field Analysis", Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 13, pp. 418-421 (1998)