大規模数値解析によるコイル損失低減技術の開発

プロジェクト責任者

伊藤 一洋 東光株式会社

著者

伊藤 一洋*1、井田 浩一*1、河瀬 順洋*2、山口 忠*2、河合 良祐*2、加藤 大地*2、

- 福井 義成*3、西川 憲明*3
- *1 東光株式会社
- *2 国立大学法人岐阜大学
- *3 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設:独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ 利用期間:平成 25 年 8 月 7 日〜平成 26 年 8 月 6 日

アブストラクト

地球シミュレータを用いた撚り線コイルの大規模磁界解析の結果を報告する。近年、電源回路の高 周波化および省電力化が進んでおり、それに伴いコイル製品の損失低減が求められている。コイルの 損失低減のため、高周波抵抗低減効果を有するリッツ線などの撚り線が用いられるが、その特性を最 大限に活かした低損失な製品を開発するためには、コイルの損失現象を熟知する必要がある。損失現 象の解明や理解のためには、有限要素法によるシミュレーションが非常に有効だが、撚り線コイルの 3次元構造を解析するためには大規模計算が必要であり、パーソナル・コンピュータでは対応できない。 そこで本プロジェクトでは、地球シミュレータを用いた撚り線コイルの大規模磁界解析を試みた。そ の結果、地球シミュレータを用いることで、撚り線コイル全体を現実的な時間で解析できることがわ かった。更に、素線の撚りが損失特性に及ぼす影響を定量的に明らかにした。

キーワード:大規模シミュレーション、三次元有限要素法解析、コイル、撚り線、渦電流

1. 本プロジェクトの目的

近年、携帯電話・家電製品・自動車など、様々な機器の小型化・高周波化・省電力化が進んでおり、 それらを実現するためにコイル製品の損失低減が求められている。コイルを電源回路などで使用する 際、渦電流による損失が生じることから、損失低減のためにリッツ線などの撚り線が用いられる¹⁾。

撚り線コイルに生じる渦電流は、撚り方や近傍に存在する磁性体などに依存するため、最適設計を 行うためには膨大な組合せを考える必要がある。特に製品開発サイクル短縮化が進んでいる現代では、 コストや期間が大幅にかかる試作検討だけで開発を進めることは現実的ではない。そのため、シミュ レーションによる検討が必須となっている。ところが、撚り線コイルの3次元構造を有限要素法解析 するためには、膨大な数のメッシュを取り扱う大規模計算が必要であり、PC (パーソナル・コンピュー タ)では対応できない。また、構造の一部のみを考慮した PC レベルのシミュレーションでは、コイ ル全体の現象を十分に再現できない。そこで、コイル全体の構造を詳細に考慮した大規模シミュレー ションが必要である。

本プロジェクトでは、地球シミュレータを用いた大規模シミュレーションを行うことで、今まで解 析できなかった撚り線コイル全体の現象について知見を得ることを目的としている。更に、シミュレー ションで得た知見を基に、損失を低減し最適な設計を行うための理論体系構築を目指す。

2. 解析手法

2.1 有限要素法による磁界解析²⁾

渦電流を考慮した磁界解析のための基礎方程式は、マクスウェルの電磁方程式より磁気ベクトルポ テンシャルAと電気スカラポテンシャルØを用いて次式で表される(ただし、ドット(・)は複素数を 表す)。

$$\operatorname{rot}(v \operatorname{rot} A) = J_0 + J_e \tag{1}$$

$$\dot{J}_{e} = -\sigma(j\omega\dot{A} + \text{grad}\dot{\phi}) \tag{2}$$

$$\operatorname{div} \boldsymbol{J}_{e} = 0 \tag{3}$$

ここで、 $_{V}$ は磁気抵抗率、 \dot{J}_{0} は強制電流密度、 \dot{J}_{e} は渦電流密度、 σ は導電率、jは虚数単位、 ω は角 周波数である。

2.2 電気的損失の算出法

強制電流を与えたコイル中の銅損W_{cu}は、磁界の変化により生じる渦電流を考慮して次式により算出する。

$$W_{cu} = \frac{1}{2\sigma} \int_{V_c} \left| \dot{\boldsymbol{J}}_0 + \dot{\boldsymbol{J}}_e \right|^2 dv \tag{4}$$

ここで、 V_c は渦電流の流れる導体の領域である。この時、コイル中の渦電流損 W_{ed} は次式により算出する。

$$W_{ed} = W_{cu} - RI^2 \tag{5}$$

ここで、Rはコイルの直流抵抗、Iは電流実効値である。また、コイルの交流抵抗R_{ac}は次式により 算出する。

$$R_{ac} = \frac{W_{cu}}{I^2} \tag{6}$$

3. 撚り線コイルの解析

3.1 4本撚りコイルの解析

大規模解析の第1段階として、4本撚りコイルの解析を行った。図1に解析モデルを示す。撚りの 影響を確認するため、平行線コイルと撚り線コイルの2種類のモデルを作成した。これらは実機を簡 略化したモデルだが、2600万要素規模であり、PCでは解析が困難である。

図2に、周波数100kHzにおける渦電流密度分布の解析結果を示す。図2より、素線表面に渦電流 が集中する様子がわかる。

図3に、周波数100kHzにおける銅損分布の解析結果を示す。図3より、素線表面に銅損が集中するとともに、撚りによって銅損集中が若干緩和されることがわかる。



図1 4本撚りコイルの解析モデル



図2 4本撚りコイルの渦電流密度分布



-43 -

図4に、4本撚りコイルの損失特性と銅損周波数特性を示す。図4(a)は100kHzにおける損失特性 であり、平行線コイルの銅損で正規化した値である。また、図4(b)は1MHzにおける平行線コイルの 銅損で正規化した値である。図4に示すように、平行線コイルと撚り線コイルの銅損の差は小さいこ とがわかる。以上の結果より、素線の数が少ないと損失低減効果が小さいことがわかった。

表1に4本撚りコイルの解析諸元を示す。計算時間は16CPU使用時で30分から1時間程度であり、 地球シミュレータを用いることで、PCでは困難な計算が現実的な時間で実行できることを確認した。



図4 4本撚りコイルの損失特性と銅損周波数特性

| 表 1 4 本 然り コイルの 解析 諸 元 | | | | |
|-----------------------------|------------|------------|--|--|
| Analyzed model | Parallel | Twist | | |
| Frequency (kHz) | 100 | | | |
| Number of elements | 26,013,730 | 26,610,044 | | |
| Number of unknown variables | 32,066,563 | 32,351,226 | | |
| MFLOPS | 15121.641 | 14191.351 | | |
| Vector operation ratio (%) | 99.597 | 99.537 | | |
| Elapsed time (min.) | 54.83 | 31.84 | | |

表1 4本撚りコイルの解析諸元

Computer used : Earth Simulator (ES2) 16CPU

3.2 16本撚りコイルの解析

大規模解析の第2段階として、16本撚りコイルの解析を行った。撚り方が特性に与える影響を調査 するため、集合撚りと複合撚りの2種類について検討した。図5に、集合撚りと複合撚りの概念図を 示す。図5(a)の集合撚りは、平行線をそのまま捻る撚り方である。また、図5(b)の複合撚りは、複数 の集合撚りを束ねたものを捻る撚り方である。

図6に、16本撚りコイルの解析モデルを示す。平行線コイル、集合撚り線コイル、複合撚り線コイ ルの3種類のモデルを作成した。なお、図6のモデルは1億要素規模であり、PCでは解析が不可能 である。



図5 集合撚りと複合撚り



図7に、周波数100kHzにおける渦電流密度分布の解析結果を示す。図7より、平行線コイルは外側の素線に渦電流が集中するのに対し、撚り線コイルは渦電流の集中が大幅に緩和されることがわかる。更に、集合撚り線コイルと比べて複合撚り線コイルの方が、渦電流の集中緩和効果が高いこともわかる。

図8に、周波数100kHzにおける銅損分布の解析結果を示す。図8より、平行線コイルは内側の素線に銅損が集中するのに対し、撚り線コイルは均等に銅損が分布する様子がわかる。更に、集合撚り線コイルと比べて複合撚り線コイルの方が、より均等に銅損が分布することもわかる。

図9に、16本撚りコイルの損失特性を示す。図9より、複合撚り線コイルが最も損失低減効果が 大きいことがわかる。

Frequency: 100kHz



図7 16本撚りコイルの渦電流密度分布

Frequency: 100kHz



解析結果の検証のため、コイルの試作を行った。図10に16本撚りコイルの交流抵抗の計算値と実 測値を示す。図10に示すように、計算値と実測値は良く一致した。

表2に16本撚りコイルの解析諸元を示す。計算時間は96CPU使用時で30分程度であり、地球シミュ レータを用いることで、1億要素規模が現実的な時間で計算できることを確認した。



図 10 16 本撚りコイルの交流抵抗の計算値と実測値

| Analyzed model | Parallel | Bunch Stranded | Rope Lay |
|-----------------------------|-------------|----------------|-------------|
| Frequency (kHz) | 100 | | |
| Number of elements | 95,550,237 | 96,615,183 | 98,519,695 |
| Number of unknown variables | 119,550,399 | 122,857,758 | 123,183,480 |
| MFLOPS | 13934.393 | 13370.569 | 13164.194 |
| Vector operation ratio (%) | 99.569 | 99.530 | 99.522 |
| Elapsed time (min.) | 38.84 | 24.30 | 26.06 |

表 2 16 本撚りコイルの解析諸元

Computer used : Earth Simulator (ES2) 96CPU

4. まとめ

撚り線コイルの大規模磁界解析を行い、地球シミュレータを用いることで、撚り線コイル全体を現 実的な時間で解析できることを確認した。また、渦電流と銅損の分布を可視化することによって、撚 り線コイル全体の損失現象に関する知見を得た。更に、素線の撚りが損失特性に及ぼす影響を定量的 に明らかにするともに、実測値に近い計算値が得られることを示した。今回のようなシミュレーショ ンをコイル製品の損失低減設計に適用することによって、電気・電子機器の省エネルギー化に貢献で きると考えられる。また、シミュレーションの活用による試作回数削減により、試作に伴う資源消費 を抑えることができる。今後は磁性体の影響を考慮した解析などを行い、損失低減設計に反映させて いく予定である。

参考文献

1) J. Lammeraner and M. Stafl, *Eddy Currents*, Iliffe Books Ltd., 1966.

2) 伊藤昭吉, 河瀬順洋, 最新有限要素法による電気・電子機器の CAE, 森北出版, 2000.

- 3) 河瀬順洋,山口忠,河合良祐,加藤大地,井田浩一,伊藤一洋,福井義成,西川憲明,"三次元有限 要素法を用いたより線コイルの渦電流解析",電気学会静止器・回転機合同研究会資料,SA-14-026/RM-14-026, 2014.
- 河瀬順洋,山口忠,河合良祐,加藤大地,井田浩一,伊藤一洋,福井義成,西川憲明,"三次元有 限要素法によるより線コイルの損失特性解析",平成26年電気学会全国大会講演論文集,5-195, 2014.
- 5) Y. Kawase, T. Yamaguchi, R. Kawai, D. Kato, K. Ida, K. Ito, Y. Fukui and N. Nishikawa, "3-D Finite Element Analysis of Electrical Loss of Stranded Wire Coil," 16th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, May 2014.
- 河瀬順洋,山口忠,加藤大地,井田浩一,伊藤一洋,福井義成,西川憲明,"三次元有限要素法を用いた撚り線コイルの損失特性解析",電気学会静止器・回転機合同研究会資料,SA-14-087/RM-14-103, 2014.