大規模数値解析による電気機器高効率化技術の開発

プロジェクト責任者

澤田 正志 川崎重工業株式会社

著者

澤田 正志*1、進藤 裕司*1、田宮 智彰*1、河瀬 順洋*2、山口 忠*2、中野 智仁*2、

- 石川 雅武*2、西川 憲明*3
- *1 川崎重工業株式会社
- *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 24 年 4 月 1 日~平成 25 年 3 月 31 日

アブストラクト

モータ、トランス、リアクトルといった電気機器の高効率化は、省エネルギーの観点から非常に重要な課 題である。高効率電気機器の新規開発設計において、電磁気シミュレーションは必要不可欠のものであり、 その技術力向上が開発の鍵を握るといっても過言ではない。中でもインバータを駆動源とする高効率電気 機器のシミュレーションにおいては、比較的高い周波数帯域での挙動が重要であり、特にコイル表面の電 流分布、磁束分布を詳細に解析する必要があるため、膨大な計算資源を必要とする。

本プロジェクトでは、電気機器の三次元有限要素法による大規模磁界解析を地球シミュレータ上で 実行し、これまで詳細にみることが困難であった、電気機器における詳細な電磁気現象を明らかにす るとともに、電気機器の高効率化技術を開発することを目的とした。本年度は昨年度に引き続き主に リアクトルの解析を実施し、コイルの素線を細分化する際の詳細な電流密度分布、磁束密度分布を明 らかにするとともに、高効率化に対する課題を明らかにした。

キーワード:大規模シミュレーション、三次元有限要素解析、リアクトル、表皮効果、高効率化

1. 本プロジェクトの目的

本プロジェクトでは、地球シミュレータ上で電気機器の大規模三次元有限要素解析を実行し、電気 機器における磁気現象を詳細まで可視化することで、設計技術の向上を図ることを目的としている。 本年度は昨年度に引き続き、電源高調波低減のために PWM (Pulse Width Modulation:パルス幅変 調) インバータと系統との間に設置する LCL フィルタに用いるリアクトル (図 1) を特に対象とした。 このリアクトルにおいては PWM の高調波による影響が特に顕著となる。リアクトルのコイルについ て詳細に解析し、高効率化における指針を得ることを目的とした。



2. 解析手法

2.1. 有限要素法による磁界解析¹⁾

電磁界の基礎方程式は、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。

$$\operatorname{rot}\left(\nu \operatorname{rot}\mathbf{A}\right) = \mathbf{J}_{0} + \mathbf{J}_{e} \tag{1}$$

$$\mathbf{J}_{e} = -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \operatorname{grad} \phi \right) \tag{2}$$

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

ここで、 ν は磁気抵抗率、 J_0 は強制電流密度、 J_e は渦電流密度、 σ は導電率である。

2.2. 電圧方程式との連立

本解析では、電圧源を条件として与えた場合の解析を実施している。電圧源を考慮した電磁界解析 では、コイルに流れる電流は未知であるため電圧に関する方程式も同時に解かなければならない。電 圧に関する方程式は次式で表される。

$$E = V_0 - \frac{d\psi}{dt} - RI_0 = 0 \tag{4}$$

$$\Psi = \frac{n_c}{S_c} \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_S dv \tag{5}$$

$$\mathbf{J}_0 = \frac{n_c}{S_c} I_0 \,\mathbf{n}_S \tag{6}$$

ここで、 V_0 はコイルの端子電圧、Rはコイルの実効抵抗、 I_0 はコイルの励磁電流、 Ψ は総鎖交磁束数、ncはコイルの巻数、Scはコイルの断面積、dvはコイル領域の微小体積、 n_s はコイル断面の単位法線ベクトルである。

(1)~(6)式を連立させることで、電圧源を考慮した電磁界解析が可能になる。

2.3. 銅損の計算

銅損 W_{Cu} は次式により算出する。

$$W_{Cu} = \frac{1}{\tau} \int_{0}^{\tau} \left\{ \int_{V_c} \frac{(\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e)^2}{\sigma} dv \right\} dt$$
(7)

ここで、 τ は周期、 J_0 は強制電流密度、 J_e は渦電流密度、 V_e はコイルの体積である。

3. コイルの素線分割数がリアクトルの銅損に及ぼす影響

3.1. 本節の概要

本節では、図1に示すLCLフィルタに用いるリアクトルの銅損に、コイルの素線分割数が及ぼす 影響について示す。解析対象を特にLCLフィルタのリアクトルとしているのは、このリアクトルが PWMインバータのキャリア周波数の影響を大きく受けるためである。本節では、PWMキャリア周 波数(ここでは4200Hz)における影響を評価した。

3.2. 解析モデルと解析条件

図2に解析モデルを示す。解析領域はモデルの対称性により、x方向に1/2、y方向に1/2、z方向 に1/2(全体の1/8領域)とした。コイルの素線分割パターンを図3に示す。素線の断面積が正方形 となるように分割した。

解析条件を、表1に示す。

衣 1 胜忉余竹				
周波数 (Hz)		4200		
電日	Ē(V)	424		
コイル	導電率 (S/m)	42,265,427		
	密度 (kg/m ³)	8,950		
コア	比透磁率	70,000		



3.3. 解析結果と検討

図 4(a), (b) に、電流最大時のコア中央 x-z 断面の磁束密度ベクトル分布を示す。(b) は、特にギャッ プおよびコイルの磁束密度を分かりやすく表示するために、ベクトルサイズを大きくしている。コア およびギャップの磁束密度には、素線分割数による差がほとんどみられなかったため、代表として 25 × 10 分割の結果を示している。ギャップからの漏れ磁束がコイル内を通過していることがわかる。 そのため、コイルに渦電流が発生すると考えられる。この渦電流により、コイル内を通過する磁束を 妨げる向きに起磁力が発生すると考えられるが、コイル分割数による差はほとんど発生しなかった。

図 5 に各分割数におけるコイルの渦電流密度ベクトル分布を示す。どの分割数においてもギャップ 付近のコイルの渦電流密度が高いが、銅線を分割することでコイル中に流れる渦電流が減少している ことがわかる。図 6 に、コイルの損失密度分布を示す。素線が太い場合は、コアのギャップに近い部 分において、局所的な渦電流損失の最大値が大きいことが分かる。コイルを通過する磁束密度は分割 数によってほとんど変化しないものの、コイルの断面積が大きくなることから総磁束量は大きくなっ て誘導される起電力が大きくなること、そして、渦電流の流れる経路における抵抗が相対的に小さく なることが、原因であると考えられる。

図 7 に、各分割数における、コイルの損失(銅損)を示す。局所的な損失の最大値は素線が細くな ることで小さくなっていたが、コイルの損失の総量は、8×3分割が最も大きくなることが分かる。 いずれの場合も素線の表面の損失が大きくなっているが、素線が太い場合は、表皮効果 2) により素線 の内部に渦電流が流れておらず、素線分割数を大きくすることで表面積が増加し、かえって合計の渦 電流損失が大きくなってしまったと考えられる。しかし、25×10分割になると、局所的な損失の最 大値を抑えられることの効果が支配的となり、コイルの損失も減少に転じている。

表 2 に解析時のパフォーマンスを示す。本年度は一億要素を超える大規模なモデルについて、解析 を実施することが可能となった。演算時間は約 11 時間(1.7 億要素)であり、これだけ詳細に挙動を 解析する場合における大規模な解析としては、実用的な計算時間となっている。



図 4 コアおよびギャップにおける磁束密度ベクトル分布(25×10分割)







表 2 パフォーマンス					
5×2	8×3	12×5	25 imes 10		
4200	4200	4200	4200		
39,363	106,322	111,708	171,920		
1.0E-13		1.0E-11			
A- ¢法					
58.88	285.01	292.81	650.18		
99.019	99.649	99.641	99.675		
3,676.6	6,511.8	6,638.6	7,083.8		
	表 2 パン 5 × 2 4200 39,363 1.0E 58.88 99.019 3,676.6	表 2 パフォーマンス 5×2 8×3 4200 4200 39,363 106,322 1.0E-13 - A- 58.88 285.01 99.019 99.649 3,676.6 6,511.8	表 2 パフォーマンス 5×2 8×3 12×5 4200 4200 4200 39,363 106,322 111,708 1.0E-13 1.0E A- ϕ 法 58.88 285.01 292.81 99.019 99.649 99.641 3,676.6 6,511.8 6,638.6		

地球シミュレータ 16 ノード (128CPU) 使用

4. コイルの素線のアスペクト比がリアクトルの銅損に及ぼす影響

4.1. 本節の概要

本節では、ほぼ同じ分割数で、 コイルのアスペクト比を変化させ た場合の結果を示す。解析条件は、 表1の通りであり、素線分割のパ ターンを図8に示す。



4.2. 解析結果と検討

図 9 に、渦電流密度分布を、図 10にコイル内の損失分布を、それ

ぞれ示す。図4にみられるように、コアから漏れ出したギャップは、半円を描くように、まず主とし て x 軸方向にコイル群に入り、z 軸方向に通過してから再度 x 軸方向に戻る。したがって、z 軸方向 に長い場合、yz 平面での渦電流は大きくなるが、磁束はその渦電流に妨げられるので、2 層目、3 層 目のコイルへの影響が軽微になる。また、xy 平面の渦電流が小さくなる。逆に x 軸方向に長い場合







は、yz 平面の渦電流が小さくなるも のの、2 層目、3 層目への影響が大 きくなり、xy 平面の渦電流も大きく なる。図 11 に、コイルの損失を示す。 傾向としては、x 軸方向に長くした 方が、損失が小さくなっている。



5. 考察

前述のように、特にインバータの パルス幅変調に起因するような高周

波数の電流においては、コイル内の渦電流が損失に与える影響が大きくなることが分かる。これらは コイルの素線分割数および素線の太さにより変化する。表皮効果や近接効果といった電磁気現象が原 因であると考えられ、これらはモータなどの他の電気機器にもみられる現象である^{3),4)}。昨年度の解 析では、4200Hz の条件では、素線分割数を大きくすると損失が大きくなる傾向であったが、本年度 はさらに素線分割数を大きく(素線を細く)したため、損失は再び小さくなった。まだ無分割の損失 よりも大きいという結果となっているが、このクラスのリアクトルでは無分割は現実的とはいえない。 素線が比較的太い場合であるが、アスペクト比の影響については、60Hz ではそれほど大きな差はな かった⁵⁾ ものの、4200Hz 条件では、平巻(x 軸方向に長い場合)の方が、コイル全体の損失を小さく 抑えることができることが示された。

6. まとめ

本年度の大規模数値解析により、リアクトルのコイルにおける磁束密度ベクトル分布、渦電流密度 分布、損失密度分布といった磁気現象が、定量的に明らかになり、また、可視化することができたと 考えている。一方でさらなる大規模数値解析への課題や銅損とコイルの素線分割数(コイル素線の太 さ)との関係においても、さらなる数値解析および設計への適用が必要であることが明らかになった。 これらの実現により、より高効率の電気機器の設計が容易となり、省エネルギー化への貢献、あるいは、 冷却の簡素化による必要資源の低減に寄与するものと考えている。今後はさらに実際にリアクトルを 製作するために必要な部材をモデル化し、それらの影響を解析、評価して、設計手法に反映させてい く予定である。

参考文献

- 1) 河瀬順洋、伊藤昭吉:「最新 三次元有限要素法による電気・電子機器の実用解析」森北出版 (1997)
- 2) 卯本重郎:「電磁気学」昭晃堂 (1975)
- Yuji Shindo, Koji Hashimoto, Masashi Sawada, "Estimasion of the Rotor Loss in a Surface Permanent Magnet motor", Proc. of IEEJ Industry Applications Society Conference, pp.III-185 -186, August 2009.
- Tsutomu Mizuno, Akira Kamiya, Yusuke Shimura, Kazutaka Iida, Daisuke Yamamoto, Naoki Miyao, Hideaki Sasadaira, "Consideration on Influences of Number of Strands on AC Resistance

of Litz Wire", The Japan Society Applied Electromagnetics and Machanics, Vol.18, No.3, pp124-129, 2010

5) 澤田正志、進藤裕司、田宮智彰、河瀬順洋、山口忠、片桐弘雄、石榑宏紀、石川雅武、中野智仁: 「リアクトルの銅損にコイルの分割方向が及ぼす影響」 平成 24 年電気学会全国大会(2012)