大規模数値解析による静止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*2、田宮 智彰*2、河瀬 順洋*3、山口 忠*3、片桐 弘雄*3、

- 小寺 崇*3、西川 憲明*4
- *1 川重テクノロジー株式会社
- *2 川崎重工業株式会社
- *3 国立大学法人岐阜大学
- *4 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 4 月 1 日~平成 26 年 3 月 31 日

アブストラクト

トランス、リアクトルといった静止器の高効率化は、省エネルギーの観点から非常に重要な課題である。 静止器の高効率化においては、その損失発生個所の特定と要因分析、対策等を実施する必要がある。そ のためには、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、静止器高効率化の 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静止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、特にコイルやコア、その他構成部材の表面の電流分 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、静止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、静止器における詳細な電磁気現象を明らかにするとともに、静止 器を高効率化するための技術を開発することを目的とした。本年度は平成24年度に引き続き主にリアクトル を対象とし、リアクトルに冷却用(水冷)ヒートシンクを組み込んだ場合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、水冷による小型化におけ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

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静止器の大規模三次元有限要素解析を実行し、静止器 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。具体 的には、地球シミュレータを用いて静止器の損失分布を特定し、その損失を低減する対策を講じ、地 球シミュレータを用いてその有効性を確認する。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小型化を検討する上では 発熱、特に PWM の高調波による発熱が問題となる。その発熱を取り除くために用いる冷却用ヒート シンク、コイルについて、その電磁気的な挙動を詳細に解析し、水冷による小型化のための指針を得 ることを目的とした。



2. 解析手法

解析手法は、昨年度までと同一であるため、本稿では省略する。(平成 24 年度の報告書参照¹⁾。)

3. 冷却用ヒートシンクがリアクトルの損失に及ぼす影響

3.1. 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において、冷却用ヒートシンクが損失に及 ぼす影響について示す。このリアクトルは、水冷プレートをコイルとコアとで挟み込むような構造と なっている。この水冷プレートを、冷却用ヒートシンクと呼ぶこととする。昨年度までの解析により、 特にコアのギャップの近くのコイルの発熱が大きいことが確認されている。ギャップから漏れてコイ ルを通る漏れ磁束が原因である。このヒートシンクには、主目的である冷却に加えて、その漏れ磁束 を打ち消す役割も期待できる。

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。

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。表1に解析条件を示す。ヒートシンクの有無でリアクトルの特性 に差が出ないようにするために、インダクタンスが同程度になるようギャップ長を調整した(ヒート シンク無:1.33g、ヒートシンク有:g)。ヒートシンクは伝導性が高い、非磁性体を想定している。こ こでは、ヒートシンクはアルミの板としている。



図2 解析モデル

表1	解析条件

材料	項目	ヒートシンク無	ヒートシンク有			
コイル	電圧 [V _{rms}]	424.3				
	抵抗[Ω]	0.001540384				
	周波数 [Hz]	4,200				
	ターン数	24				
	密度 [kg/m ³]	8,950				
コア	比透磁率	70,000				
	ギャップ長 [mm]	1.33g	g			
	密度 [kg/m ³]	7,300				
	導電率σ [S/m]	29,841,000				
E=r979	密度 [kg/m ³]	2,7	00			

3.3. 解析結果と検討

図3(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。各図の(ii) はギャッ 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。ヒー トシンクの影響により、ギャップ部での漏れ磁束が低減されていることがわかる。これは漏れ磁束が ヒートシンクに鎖交することで渦電流が発生し、漏れ磁束が打ち消されるためである。

図4にヒートシンクとコイルの渦電流密度分布を示す。ヒートシンク有モデルでは前述の漏れ磁束 の減少によりコイルの渦電流が減少している様子がわかる。図5にコイルの渦電流損分布を示す。ヒー トシンク有モデルでは渦電流損が減少している。これは、図4の渦電流が減少しているためである。 一方で、ヒートシンクには図6に示すようにコイルの渦電流損と比較して大きな渦電流損が生じている。

図7にヒートシンクとコイルの損失(銅損)を示す。ヒートシンクのシールド効果によりコイルの 渦電流損は低減できたが、ヒートシンク自体の渦電流損が大きいため合計の損失は増加している。

以上のことから、このヒートシンクによりコイルの損失を低減させることはできたが、実際にはヒー トシンクの損失が大きいため、損失合計はかえって大きくなる結果となったことがわかる。なお、ヒー トシンクの損失は、そのままヒートシンクにより冷却される。













図5 渦電流損分布 (コイル)





4. ヒートシンクの流路がリアクトルの銅損に及ぼす影響

4.1. 概要

前節では、解析モデル中の冷却用ヒートシンクをアルミの塊としてモデル化している。しかし、実際の冷却用ヒートシンクは内部に冷却水を流すための流路が設けてある。実機と同様の条件で解析するために、本節では流路も含めてモデル化して解析を実施した。

4.2. 解析モデルと解析条件

図8に解析モデルを示す。前章の解析モデルから冷却用ヒートシンクに冷却水用の流路を設けた。なお、 出入口は省略している。解析条件は前章のヒートシンク無モデルと同様とした(ギャップ長はg)。

本解析では冷却用ヒートシンクの影響を確認する他、前年度と同様にコイルの素線分割を実施して、 関連性および影響の度合いを確認した。分割パターンを図9に示す。



4.3. 解析結果と検討

図 10 にヒートシンクとコイルの渦電流密度分布を示す。ヒートシンク中の渦電流分布については 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 5 × 2 分割の結果を示している。前 章の結果(図 4(b))と比べると、ヒートシンクに流路を設けたことにより、シールド効果が低減され たことがわかる。図 11 にコイルの渦電流密度分布をそれぞれ示す。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12にコイルの渦電流損分布を示す。いず れの分割数でもギャップ近傍のコイルの損失が増加し ており、この渦電流損は分割数が少ないほど大きいこ とがわかる。図13にヒートシンクの渦電流損を示す。 コイルと同様にギャップ近傍に大きな渦電流損が発生 している。また、コイルの素線分割によりヒートシン クの損失も変化することがわかる。図14に、損失特 性を示す。損失の合計は、8×3分割が最も大きくなっ た。これは当方が以前に実施したコイル単体の素線分







(b) 5×2分割



(d) 12×5分割



(c) 8×3分割

図11 渦電流密度分布 (コイルのみ)

割と同様の傾向である²⁾。素線単体の損失は分割数が多いほど減少しているが、損失は表皮効果³⁾に より素線表面に集中している。分割数が多くなると表面積が増加するため、コイルの渦電流損の合計 は増加した。また、コイルの渦電流が増加したことによりヒートシンクに鎖交する磁束とこれによる 渦電流も増加、ヒートシンクの渦電流損も増加したと考えられる。一方で、それ以上細かく分割すると、 分割によるコイルの素線の損失低減の影響が大きくなる。

表2に解析時のパフォーマンスを示す。本年度は最大で約二億要素の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10時間であり、これだけ詳細に挙動を解析する大 規模な解析としては、実用的な計算時間となっている。





(a) 5×2分割 (b) 8×3分割 図13 渦電流損分布 (ヒートシンク)



(c) 12×5分割



表2 パフォーマンス(16 ノード使用)							
銅線分割数	5×2	8×3	12×5	25×10			
周波数 (Hz)	4,200						
要素数	56,830,375	136,667,438	143,612,611	197,221,279			
未知数	74,621,037	189,631,558	204,835,617	259,342,772			
収束判定値	1.00E-11			1.00E-10			
解析方法	A- φ 法						
計算時間 (min.)	75.65	385.551	408.08	595.68			
ベクトル演算率 (%)	99.532	99.724	99.744	99.732			
MFLOPS	5493.519	6823.877	7,185.89	7,680.03			

	J)
--	----

5. 考察

本年度は入出力フィルタ用リアクトルに冷却用ヒートシンクを組み込んだ場合の電磁気現象を明ら かにした。ヒートシンクをコアとコイルとの間に配置することで、磁気シールドとしての役割を幾分 持たせ、コイルへの漏れ磁束ならびに銅損を低減する当初の狙いは達成できた。しかし、ヒートシン ク自体の損失が大きく、効率は低下する結果となった。今後、水冷化によるリアクトルの小型化を目 指す上で有用な知見を得ることができた。

6. まとめ

本年度の大規模数値解析により、リアクトルの冷却用ヒートシンクおよびコイルにおける磁東密度 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を定量的に明らかにし、また、可視 化することができた。一方で大規模数値解析あるいはその結果を設計に適用する際の課題も明らかに なった。これらの実現により、より高効率・小型化の静止器の設計が容易となり、省エネルギー化へ の貢献、小型化による必要資源の低減に寄与するものと考えている。

今後は高周波数帯域における積層鋼板内の渦電流の振る舞いおよび渦電流損の算出を調査するため、積層鋼板をモデル化し、これらの影響を解析・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

- 澤田正志、進藤祐司、田宮智彰、河瀬順洋、山口忠、中野智仁、石川雅武、西川憲明、"大規模 数値解析による電気機器高効率化技術の開発"、平成24年度先端研究施設共用促進事業「地球シ ミュレータ産業戦略利用プログラム」利用成果報告書、pp.43-51 (2013)
- 澤田正志、進藤裕司、田宮智彰、河瀬順洋、山口忠、片桐弘雄、石川雅武、小寺崇、"三次元有 限要素法を用いた並列計算によるリアクトルの銅損解析"、平成25年電気学会全国大会(2013)
- 3) 卯本重郎:「電磁気学」昭晃堂 (1975)