三次元有限要素法による回転機の 高速高精度数値解析技術の開発

プロジェクト責任者

中村 雅憲 東洋電機製造株式会社

著者

中村 雅憲^{*1}、河瀬 順洋^{*2}、山口 忠^{*2}、中野 智仁^{*2}、桜井 裕司^{*2}、西川 憲明^{*3}

- *1 東洋電機製造株式会社
- *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 23 年 4 月 1 日~平成 24 年 3 月 31 日

アブストラクト

本プロジェクトでは、地球シミュレータ上で動作する、三次元有限要素法による並列磁界解析プロ グラムを開発し、高速高精度な回転機の大規模磁界シミュレーションを実現することを目的としてい る。今年度は、これまでに開発した並列計算手法を用いて、鉄心の積層構造を考慮した埋込磁石構造 回転機の詳細な渦電流解析を実現したので報告する。

キーワード: 回転機、磁界解析、辺要素有限要素法、積層鋼板

1. はじめに

国内の消費電力のうち、50%以上が回転機によって消費されていると言われている。よって、回転機の効率向上は環境問題において避けることのできない課題のひとつであると言える。

高効率な回転機の開発設計のためには、回転機本体だけでなく、ケースやその他の構造物等、細部ま で精密にモデル化する必要があり、膨大な主記憶容量を要する。また、インバータ等による電圧波形や 電流波形を正確に考慮するためには、時間軸方向の分解能を高くする必要があり、膨大な計算時間を要 する。そのため、回転機の磁界解析の大規模化・高速化技術の開発が強く望まれている。

回転機の鉄心は、鉄心内に流れる渦電流を低減させるために、表面に絶縁処理を施した薄い鋼鈑を積 み重ねて構成されている。このため、鉄心内に流れる渦電流およびそれによって生じる損失を精度よく 計算するためには、鉄心の積層構造を考慮して解析する必要がある。しかしながら、そのような解析は 計算規模および計算時間が膨大になるため、実現が困難であった。そこで今年度は、これまでに開発し た並列計算手法¹⁾を用いて、地球シミュレータ上で積層構造を考慮した埋込磁石構造回転機の詳細な渦 電流解析を実現したので報告する。

2. 解析手法

2.1 基礎方程式

永久磁石および渦電流を考慮した磁界の基礎方程式は、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*を用いて次式で表される。

$$\operatorname{rot}(v \operatorname{rot} A) = J_0 - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + v_0 \operatorname{rot} M$$
(1)

ここで、νは磁気抵抗率、J₀は強制電流密度、ν₀は真空の磁気抵抗率、Mは永久磁石中の磁化、σは 導電率である。なお、本プロジェクトでは辺要素有限要素法を用いているため、磁気ベクトルポテンシャ ルは要素の辺上で定義される。

電圧が印加された場合の解析ではコイルに流れる電流は未知であるため、次式で表される電圧に関す る方程式も同時に解かなければならない。

$$E = V_0 - RI_0 - L\frac{dI_0}{dt} - \frac{d\psi}{dt} = 0$$
(2)

$$\psi = \frac{1}{S_c} \int A \cdot \mathbf{n}_s dv \tag{3}$$
$$J_0 = \frac{n_c}{S_c} I_0 \mathbf{n}_s \tag{4}$$

ここで、*V*₀はコイルの端子電圧、*R*はコイルの実効抵抗、*L*は解析領域外のインダクタンス、*I*₀はコ イルの励磁電流、*ψ*は総鎖交磁束数、*n*_cはコイルの巻数、*S*_cはコイルの断面積、*n*_sはコイル断面の単位 法線ベクトル、*dv*はコイル領域の微小体積である。

2.2 積層鋼鈑を考慮した磁界解析手法²⁾

本解析では、積層鋼板に流れる渦電流のうち、鋼板に垂直な成分は損失にほとんど影響しないため無 視し(垂直方向の導電率を0とした)、図1に示すように面方向に流れる渦電流のみを計算する。また、 積層鋼板の絶縁層による磁気抵抗を考慮するため、図2に示すようなギャップ要素³と呼ばれる二次元 面要素を用いた。



3. 積層鋼板を考慮した回転機の渦電流解析

3.1 解析モデルと解析条件

図3に解析モデルを示す。解析領域は対称性により、周方向に1/6、軸方向に1/2とした。図4に解 析に用いたメッシュを示す。鉄心の積層構造を考慮して渦電流解析を行うために、軸方向のメッシュは 鋼板1枚の厚さである0.5mm ごとに分割されている(図4(b))。要素数は13,713,984 である。



3.2 解析結果

図5に磁東密度分布を示す。鉄心上面付近で磁東密度が高くなっていることが確認できる。図6に磁 東密度ベクトル分布を示す。鉄心中央では磁束が鋼板に平行に流れているが、鉄心上面では磁束が鋼板 に垂直な成分を含んでおり、鉄心上部の空気に漏れている。

図7に渦電流密度分布を示す。鉄心上面のティース先端部付近や回転子表面、永久磁石付近などで 渦電流密度が特に高くなっている。これは、図6で確認されたように、鉄心上面から空気中に磁束が漏 れているためであると考えられる。図8に渦電流密度ベクトル分布を示す。図8(a)からわかるように、 鉄心の中央では、渦電流はほとんど発生してない。それに対して、図8(b),(c)より、鉄心上面では回転 子の表面付近や永久磁石の周囲、固定子のティース部分を巡るように渦電流が流れている様子が確認で きる。

表1に計算時間を示す。8ノード(64CPU)を用いることで、約1,600万元の非線形問題を1ステップあたり11分程度で完了させることができた。







number of elements	13,713,984
number of nodes	2,319,515
number of unknown variables	15,974,262
number of CPUs	64
elapsed time (s/step)	657.97

4. 結言

今年度は、これまでに開発した並列計算手法を応用することで、積層構造を考慮した埋込磁石構造回 転機の詳細な渦電流解析が可能になった。今後はさらに解析を進めて鉄損を算出し、積層構造の考慮の 有無が損失の計算精度に及ぼす影響を明らかにする予定である。

謝辞

地球シミュレータの利用にあたり、独立行政法人海洋研究開発機構地球シミュレータセンターシミュ レーション応用研究グループの皆様にご指導、ご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村雅憲,河瀬順洋,山口忠,中野智仁,柴山義康,西川憲明,上原均,"三次元有限要素法による 回転機の高速高精度磁界解析技術の開発",平成22年度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.57-64, (2011)
- 2) 山崎克己,佐藤寛之,渡邉裕太,"積層鉄心を考慮した永久磁石モータの損失解析に関する検討", 電気学会静止器・回転機合同研究会資料,SA-06-25/RM-06-25, 2006.
- 3) N. Nakata, N. Takahashi, K. Fujiwara and Y. Shiraki, "3-D magnetic field analysis using special elements," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, no. 5, pp. 2379-2381, 1990.

外部発表等

 中野智仁,河瀬順洋,山口忠,中村雅憲,西川憲明, "鉄心の積層構造を考慮した埋込磁石構造回転 機の渦電流解析",電気学会全国大会講演論文集, 5-012, (2012)