

高周波数帯での電磁界解析技術の開発

Development of Electromagnetic Field Analysis Technology with High Frequency Band

井上一史 K. INOUE

The electric motor and sensor used in electric power steering require further miniaturization and higher accuracy, and therefore it is necessary to establish technology that accurately reflects the performance characteristic of the product in order to satisfy demands. Once this had been achieved, the electromagnetic phenomenon inside the product was made visible, and electromagnetic field analysis technology was developed using the Finite Element Method to enable confirmation of the performance characteristic which takes into account the influence of the electromagnetic phenomenon. This report introduces verified examples regarding the Variable Reluctance resolver by using electromagnetic field analysis technology in a high frequency band, while taking into account the Magnetic Skin Effect, eddy current loss and hysteresis loss.

Key Words: steering system, vr resolver, electromagnetic field analysis, eddy current loss, hysteresis loss, magnetic skin effect

1. はじめに

電動モータによるアシスト機能を備えた電動パワーステアリング (EPS) システムは、運転者の誤操作や認識不足による事故防止を目的とした高度運転支援システムへの進化が期待されており、そのシステムを実現する電気・電子部品の開発が急がれるが、解決すべき課題も多い。その一つとして、電動モータの角度センサである可変リラクタンス式レゾルバ (Variable Reluctance resolver : VR レゾルバ) の検出精度を確保するために、ECU の A/D (アナログ - デジタル変換 : Analog/Digital Conversion) 取込み周期から VR レゾルバとして最適な周波数を決め、その周波数で VR レゾルバの出力が最大となる構造の最適化が必要であるが、従来の実機試験をベースとした開発では、各諸元による影響度合いの比率の推定が難しく、また製品内部の電磁現象が測定できないため、その諸元が最適であるかの判断が難しい。

そこで、製品内部の電磁現象を可視化し、そのメカニズムの解明と対策を検討した上で、要求性能を満足する最適諸元を導出することを目的に、VR レゾルバを対象とした高周波数帯での電磁界解析技術を開発した。その事例を紹介する。

2. VR レゾルバ

図 1 に対象である VR レゾルバを示す。VR レゾルバは、回転子のロータコア、固定子のステータコア、正弦波信号を入力する励磁コイル、ステータコアに流れる磁束の変化を検出する出力コイルをステータコアに巻き付けたシンプルな構造である。

VR レゾルバの回転角度の検出方法は、励磁コイルに正弦波信号を流した状態で、ロータコアを回転させる。ロータ回転により、ステータコアとロータコア間のすきまが変化し、そのすきまの変化に応じてステータコア内に流れる磁束が変化する。その磁束の変化の影響を受けた出力コイルの信号の変化量から、ロータコアの回転角度を算出する。



図 1 VR レゾルバ

Variable Reluctance resolver : VR resolver

3. 電磁界解析シミュレーション

3.1 VR レゾルバモデル

図2にVRレゾルバモデル，図3にVRレゾルバモデルの積層構造を示す。電磁界解析のVRレゾルバモデルは，ロータコア，ステータコア，励磁コイル，出力コイルの形状を有限要素法で作成したモデルである。

ロータコア，ステータコアのモデル形状は図面値から作成し，ロータコア，ステータコアに使用している電磁鋼板の性能を表す磁化特性は，加工・組立てによる磁化特性への影響を考慮するために，磁化特性の実測値をモデルに設定した。電磁鋼板内での磁束の流れやすさを表す導電率は，公称値を設定した。

励磁コイル，出力コイルのモデル形状は，ステータコアから漏れる磁束の影響を考慮するため，各コイルの巻数からスロットに組立てた状態でのコイルの断面積値から作成した。各コイルの抵抗値は，実機の測定値をモデルに設定した。

VRレゾルバモデルの積層構造は，対称性を考え全体の1/2サイズをモデル化の範囲として，ロータコア，ステータコアは電磁鋼板5枚分のモデルを作成することで計算時間を短縮した。また，電磁鋼板間で磁束が流れないように電磁鋼板の表面にコーティングしている皮膜を，電磁鋼板間に薄い空気層のモデルを作成することで模擬した。

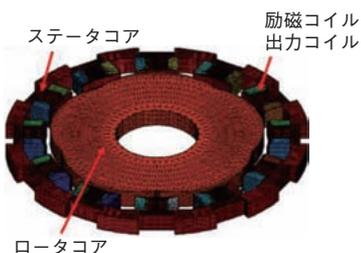


図2 VRレゾルバモデル
VR resolver model

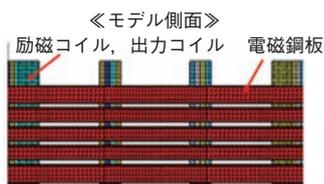


図3 VRレゾルバモデルの積層構造
Laminated structure of VR resolver model

3.2 渦電流損，ヒステリシス損

VRレゾルバが使用する周波数は1kHz以上の高い周波数帯域である。周波数が高い製品を解析対象とした電磁界解析を行う場合には，渦電流損，ヒステリシス損による影響を考慮しなければならないことは一般的に知られている。そこで，VRレゾルバを対象とした電磁界解析では，渦電流損，ヒステリシス損の影響を考慮したVRレゾルバモデルを開発した。図4にVRレゾルバモデルの理論式を示す。第1項はVRレゾルバの出力，第2項は渦電流損，第3項はヒステリシス損であり，周波数が高くなると渦電流損，ヒステリシス損が大きくなり，出力が低下する。

VRレゾルバにおける渦電流損，ヒステリシス損の影響度を確認するためにこれらの値を実測した。図5に渦電流損，ヒステリシス損の測定に使用したVRレゾルバ，図6に渦電流損，ヒステリシス損の測定結果を示す。励磁周波数が12.5kHz付近では，全出力に対して20%程度，20kHz付近では，60%程度の損失が発生しており，VRレゾルバを対象とした電磁界解析では，渦電流損，ヒステリシス損を考慮する必要があることを確認した。

$$W_{out} = VI \cos \theta - \left[\frac{K_e f^2 B^2}{\text{過電流損}} + \frac{K_h f B^2}{\text{ヒステリシス損}} \right]$$

Wout：電気エネルギー，V：励磁電圧，I：励磁電流， θ ：励磁電圧と励磁電流の位相差，Ke：過電流係数，Kh：ヒステリシス係数，f：周波数，B：磁束密度

図4 VRレゾルバモデルの理論式
Theoretical formula of VR resolver model

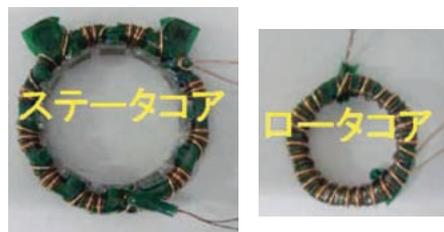


図5 実機測定に使用したVRレゾルバ
VR resolver used for real machine examination

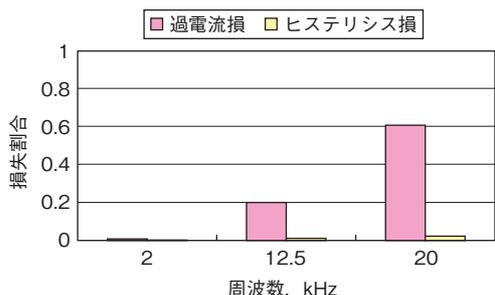


図6 渦電流損、ヒステリシス損の測定結果
Result of a measurement of eddy current loss and hysteresis loss

3.3 磁束の表皮効果

図7に電磁鋼板内部に流れる磁束のイメージ図を示す。周波数が低い場合、電磁鋼板内部の磁束は均一に流れている。しかし、周波数が高くなるにつれて、渦電流の影響が大きくなり、その影響を受けて電磁鋼板内部の磁束が表面に集中し、中心部に磁束が流れなくなる。この電磁現象を磁束の表皮効果という。前述したとおり、VR レゾルバは周波数が高く、渦電流による磁束の表皮効果が現れていることが考えられる。そのため、磁束の表皮効果が再現できる積層構造をモデル化する必要がある。そこで、図7に示す磁束が電磁鋼板内のどのくらいの深さまで浸透するか（磁束の浸透深さ）の算出式から、VR レゾルバの磁束の浸透深さを算出し、その値よりも電磁鋼板を積層方向に分割した厚みが小さくなる最適な分割数を割り出す方法を電磁界解析に組み込んだ。

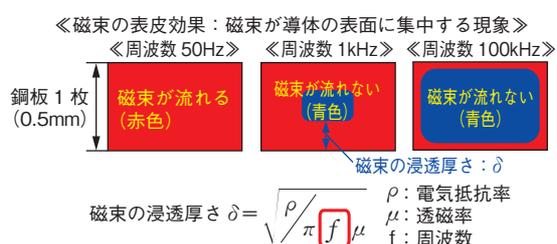


図7 電磁鋼板内部の磁束の流れ
Flow of magnetic flux inside electromagnetic steel

4. モデル検証

モデルの妥当性を検証するために、VR レゾルバのステータコアを治具で固定し、正弦波信号を励磁コイルにかけた状態でロータを回転させ、出力信号の振幅が最大となった時の出力信号と励磁信号の比（変圧比）を各周

波数で実測し、シミュレーション結果と比較した。

図8に横軸を励磁周波数、縦軸を変圧比とした周波数特性を示す。黒線は実機データ、赤線は渦電流損、ヒステリシス損を考慮したシミュレーションデータ、青線は渦電流損、ヒステリシス損を考慮しないシミュレーションデータである。渦電流損、ヒステリシス損を考慮したシミュレーションの周波数特性と実機の周波数特性が同じピークをもつ特性となり、モデルが妥当であることを確認した。また、シミュレーション同士の比較結果から、周波数が高くなると出力信号が低下する要因として、渦電流損、ヒステリシス損の影響であることを解明した。

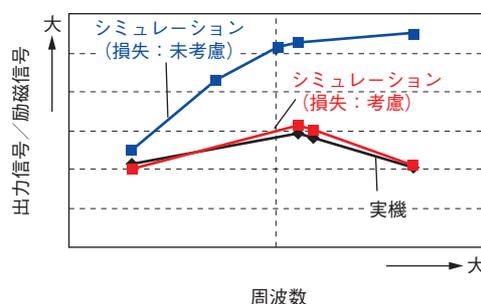


図8 VR レゾルバの周波数特性
Frequency characteristic of VR resolver

さらに、VR レゾルバにおける磁束の表皮効果の影響を確認するために、電磁鋼板内部に流れる磁束密度の大きさを色で可視化したコンタを図9に示す。磁束密度の高い部分が赤く、磁束密度の低い部分が青く表示されており、この結果から、電磁鋼板内部に磁束が流れない領域が可視化できた。また、この領域の大きさは周波数に依存することを確認している。

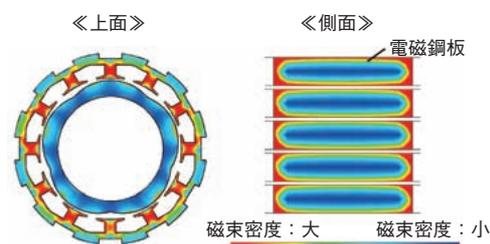


図9 VR レゾルバ内部の磁束密度のコンタ図
Contour chart of magnetic induction in VR resolver

5. 耐ロバスト性の設計検討

5.1 ロータ偏心による影響

VR レゾルバは、ロータコアとステータコアが分離している構造であるため、組立て誤差により互いの回転中心がずれる（ロータ偏心）場合がある。これにより、出力信号がばらつき、回転角度の検出誤差が発生する。図10にロータ偏心量に対する回転角度の検出誤差を実測した結果を示す。

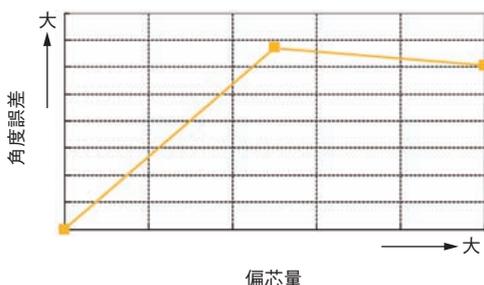


図10 ロータ偏心による回転角度の検出誤差の実測結果

Measurement result of detection error margin of turning angle by rotor eccentric

5.2 耐ロバスト性の高いVR レゾルバ設計

ロータ偏心の耐ロバスト性を検討するにあたり、シミュレーション上でロータ偏心による影響を確認した。その結果を図11に示す。ロータ偏心の影響により、出力信号の振幅にばらつきが生じている。

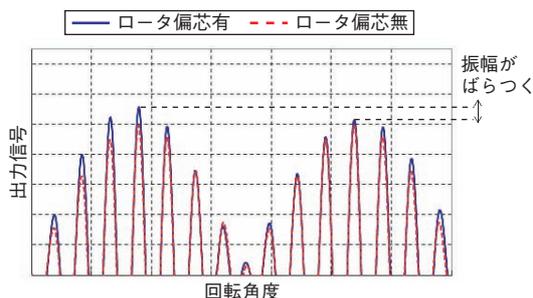


図11 ロータ偏心による出力コイルの信号波形
Signal pulse type of output coil by rotor eccentric

本解析技術を用いて、VR レゾルバの出力信号の振幅を低下させずに、ロータ偏心による出力信号の振幅のばらつきを抑制する対策を織り込んだVR レゾルバの設計諸元を導出し、対策品を試作した。対策品での実測結果を図12に示す。対策品のロータ偏心による回転角度

の検出誤差が小さく、本解析技術が耐ロバスト性設計に有用であることを確認した。

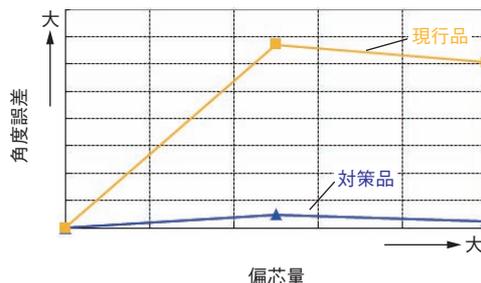


図12 対策品の実測結果
Measurement result of measures goods

6. おわりに

高周波数帯での電磁界解析技術を開発し、以下の結果が得られた。

- ・周波数に起因した渦電流損、ヒステリシス損を考慮したモデルおよび磁束の表皮効果を考慮した積層方向の最適な分割数の設定などにより、高周波数帯での電磁界解析手法を確立した。
- ・高周波数帯では、周波数に起因した渦電流損、ヒステリシス損、および磁束の表皮効果がVR レゾルバの出力信号の低下に影響することが明らかとなった。
- ・今回開発した解析技術は、耐ロバスト性の設計に十分活用できる。

本報では、高周波数帯での電磁界解析技術を開発テーマとして取り上げたが、温度変動や応力ひずみによる電磁鋼板への影響を考慮した電磁界解析も必要とされている。また、高度運転支援システムの開発に活用していくには、部品単体だけではなく、その周辺の機構、制御を組合せたシステム全体を解析対象として設計検討できる解析技術の開発が必要である。

謝辞

本解析技術を開発するにあたり、共同研究者としてご指導頂きました岐阜大学 河瀬順洋教授、山口忠准教授、ならびに研究室の皆様に感謝の意を表します。

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, 森北出版株式会社(1997年)199.
- 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, 森北出版株式会社(2000年)162.
- 3) 中田高義, 伊藤昭吉, 河瀬順洋: 有限要素法による交直電磁石の設計と応用, 森北出版株式会社(2005年)170.
- 4) 河瀬順洋, 山口 忠, 田中 憲, 太田信治: インバータ駆動時における IPM モータの積層鋼板中の三次元渦電流解析, 平成 24 年電気学会全国大会, 21-24 (2012年)2.

筆者



井上一史*
K. INOUE

* 自動車部品事業本部 システム開発部