

# 高速永久磁石同期モータの連成解析シミュレーション

## Interaction Analysis Simulation of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor

村山 隆彦 技術開発本部総合開発センター電機システム開発部  
平尾 俊幸 技術開発本部総合開発センター電機システム開発部  
遠嶋 成文 技術開発本部総合開発センター電機システム開発部

高速の永久磁石同期モータを対象とした、磁場と回路の連成解析シミュレーション技術の現状を紹介する。一般に高速モータを用いた製品開発では、モータ軸振動や設置スペースの問題から、軸方向の長さを短くすることが要求される。この結果、モータ端部巻線の影響が無視できなくなるため、モデル化の制限を受ける二次元(2D)磁場を用いた連成解析では精度に問題が発生する。本稿では、三次元(3D)磁場を用いた駆動回路との連成解析を行い、試験機と比較した結果、良く一致していることを確認した。

Using a high-speed permanent magnet synchronous motor, Electromagnetic Field-Circuit interaction analysis is described. In general, product development of a high-speed motor requires shorter motor length of the rotation axis because of motor shaft vibrations and the installation location. In other words, the motor edge winding cannot be disregarded. Therefore, two-dimensional Electromagnetic Field-Circuit interaction analysis, which limits the simulation model, has a problem with accuracy. In this report, three-dimensional Electromagnetic Field-Circuit interaction analysis confirmed that the result of this interaction analysis and the test machine corresponded.

### 1. 緒言

永久磁石同期モータの産業分野への適用がますます拡大している。ターボ機械を中心としたダイレクト駆動用の高速モータおよびその制御技術開発では、主要なモータパラメータを正確に把握することが性能の決め手となる。

一般に高速回転領域の危険速度に実回転速度が近づくと、モータの軸振動が増大する傾向にある。さらには、モータの設置スペースが制限を受けることがある。これらの対策として、モータの軸方向長さを極力短くし、モータを薄型化することが求められるが、モータ磁場解析においては、モータ端部の巻線(コイルエンド)の影響が無視できなくなってくるため、コイルエンドをモデル化できない二次元(2D)の磁場解析では精度に問題が発生してくる。また、試作回数の削減による開発期間短縮のためには、高精度なモータ解析技術が必要である。

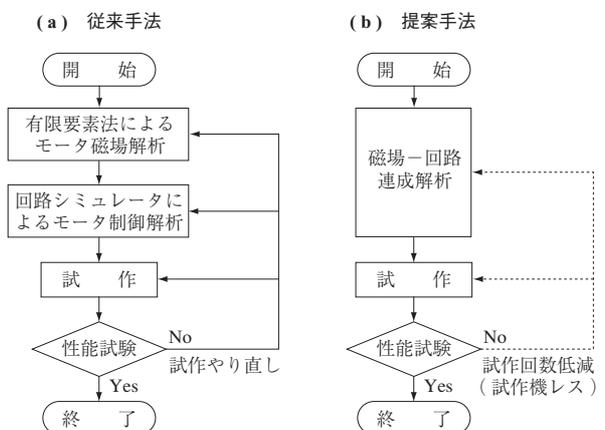
これらの課題を解決するために近年、三次元(3D)の磁場解析と回路シミュレータとの3D磁場連成解析が適用され始めている。3D磁場解析はコイルエンドを正確にモデル化できるため、2D磁場解析に比べて高い精度が期待できる。そして3D磁場解析で得られた詳細情報を回路シミュレータに反映することによって、実機と同じキャリ

ア周波数やデッドタイムなどを考慮した詳細な回路シミュレーションが実現できる。

本稿では高速の永久磁石同期モータを対象として、3D磁場連成解析を実施し、試験機と比較検証した。

### 2. モータドライブシステムの開発手順

モータドライブシステムの開発手順を第1図に示す。従来手法(第1図-(a))では、モータ磁場解析を実施した後に、ある動作点の代表パラメータを抽出し、回路シミュレーションを実施する。しかし、一部の磁場解析結果



第1図 モータドライブシステムの開発手順  
Fig. 1 Development process of motor-drive system

しか回路シミュレータに反映できないため、実機で生じるさまざまな現象（インダクタンスの飽和特性やコギングトルクなど）が十分シミュレーションできないという問題がある。この結果、試作後の性能試験において当初の開発目標と実機の性能に差が生じる可能性がある。

本稿で提案（第1図 - (b)）の3D 磁場連成解析手法では、磁場解析の詳細情報が回路シミュレータにそのまま反映されるため、従来手法に比べて誤差の少ない解析が実現できる。結果として試作回数を低減でき、開発スピードの高速化を図ることができる。

### 3. 磁場連成解析

#### 3.1 モータモデル概要

解析対象のモータモデルの主仕様を次に示す。

モータの種類	SPMSM ( Surface Permanent Magnet Synchronous Motor )
定格回転数	> 20 000 r/min
定格出力	> 10 kW
ロータの長さ比 (軸方向/径方向)	約 1 : 1

定格回転数は毎分 2 万回転を超える高速モータである。モータの種類は、表面型永久磁石同期モータ ( SPMSM ) であり、ロータ表面に永久磁石を接着し、遠心力による飛散防止のための保護リングを設けた構造となっている。また、薄型化を示す指標として、ロータの軸方向長さとの径方向長さの比を示す。本比率は磁場解析の各種文献で述べられている 2D 解析から 3D 解析へ移行する一般的な目安である比率（約 1 : 1）に相当する。

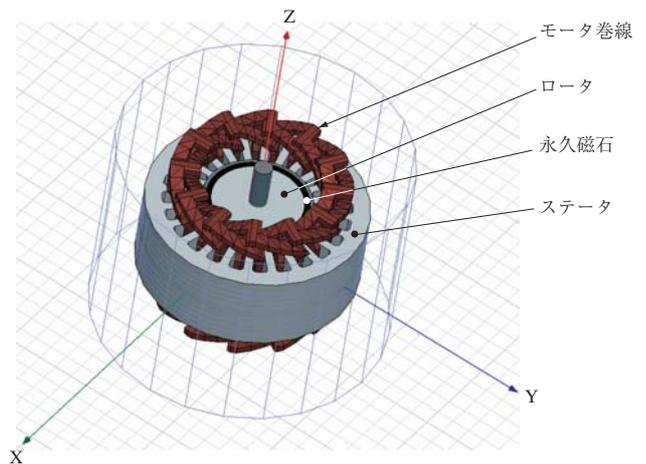
#### 3.2 モータ磁場解析

3D のモータ磁場解析モデルを第2図に示す。解析精度を上げるため、解析要素数は 20 万前後の条件とした。また、磁束が集中する箇所は特に細かい要素に分割し、磁場解析のさらなる精度向上を図った。

第3図に連成解析で使用するモータの詳細データを示す。3D 磁場解析によって、ロータ回転角度、各相のモータ電流の入力に対して、電機子鎖交磁束、各相の自己・相互インダクタンスおよびモータトルクの詳細情報がマトリクス形式で出力される。

#### 3.3 回路シミュレータとの連成解析

連成解析モデルを第4図に示す。3.2 節で得たモータ磁場解析の詳細情報を回路シミュレータに入力することで、詳細な解析が実現できる。



第2図 解析モータモデル (3D)  
Fig. 2 3D analysis of motor model

入力項		出力項		
$\theta$ (度)	$I$ (A)	$\phi$ (Wb)	$L$ (H)	$T$ (N·m)
ロータ 回転角度 0 ~ 360	電流 $I_u : I_{\min} \sim I_{\max}$ $I_v : I_{\min} \sim I_{\max}$ $I_w : I_{\min} \sim I_{\max}$	磁束 $\phi_u, \phi_v, \phi_w$	インダクタンス $L_{11}, L_{22}, L_{33}$ $L_{12}, L_{13}, L_{23}$	モータ トルク

第3図 連成解析で使用するモータの詳細データ  
Fig. 3 Motor parameters for interaction analysis

モータ制御回路は速度制御部、電流制御部などで構成されており、各センサから出力される位置およびモータ電流情報を入力値として、3 相 PWM ( Pulse Width Modulation ) の信号をインバータ回路に出力している。第5図に定格出力での解析結果（誘起電圧 (EMF)、モータ駆動電圧およびモータ電流）を示す。

### 4. 試験機との比較・検証

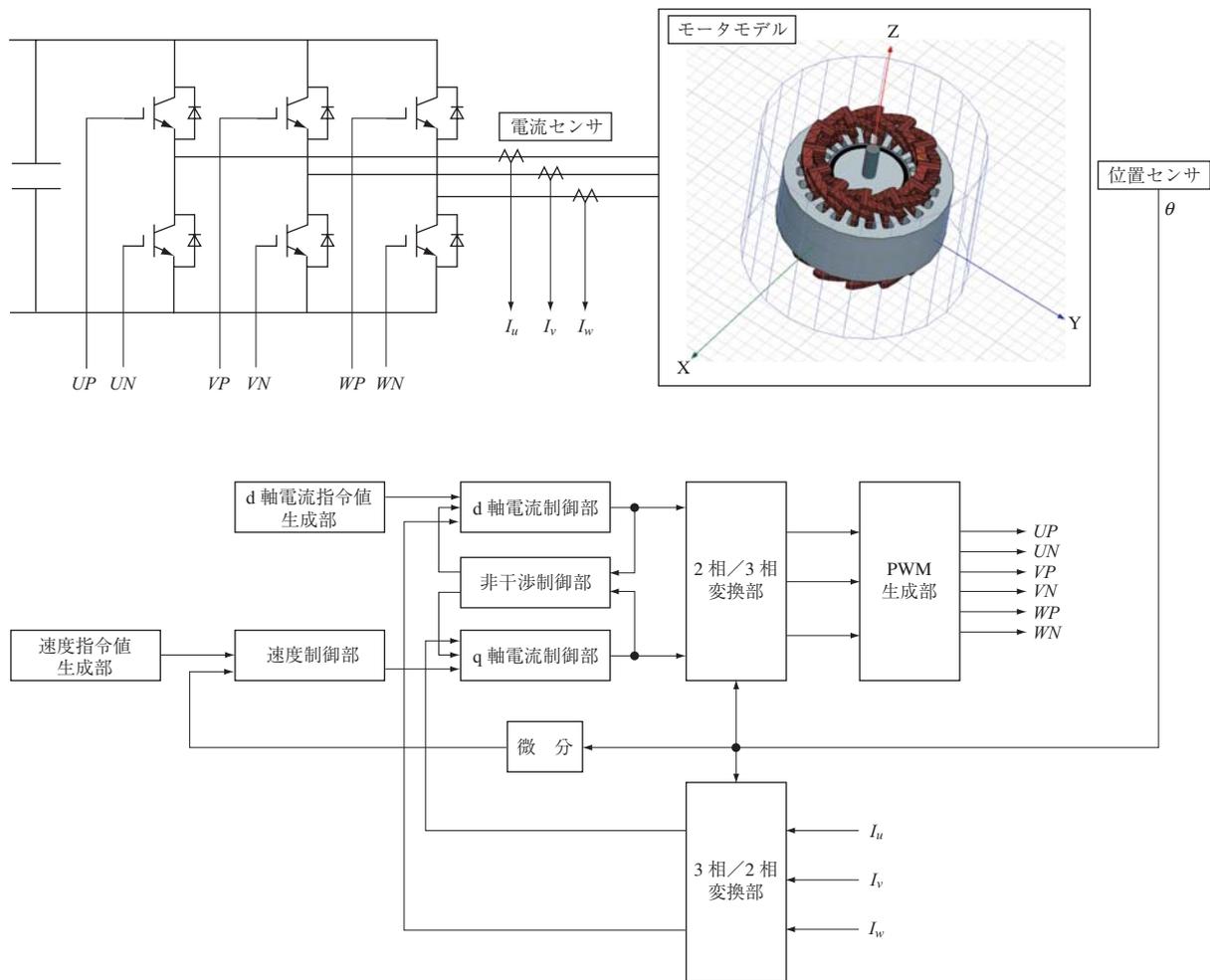
#### 4.1 試験機の結果

試験機の外観を第6図に示す。今回実施した解析結果を検証するため、試験機を製作した。冷却方式はモータの小型化を図るため水冷にした。

第7図に連成回路シミュレーションと同じ条件で実施した試験機の測定波形を示す。試験機では解析結果と異なり、モータ駆動電圧波形に配線インダクタンスなどの影響による PWM のスイッチングサージが生じている。また、モータ電流波形の電流リップル値の大きさも最大で 5% 程度異なっているが、比較的良好に模擬できている。

#### 4.2 モータパラメタの比較

永久磁石同期モータの主要なパラメタである EMF およ



第4図 連成解析モデル  
Fig. 4 Interaction analysis model

び回転座標系のインダクタンス値 ( $L_d$ ,  $L_q$ ) を比較し、検討した。

#### 4.2.1 EMFの比較

SPMではEMFに低次の高調波が重畳されずに良好な正弦波が得られるため、基本周波数の実効値で評価した。

EMFの比較結果を次に示す。

2D 磁場連成解析	89.9%
3D 磁場連成解析	97.6%
試験機	100%

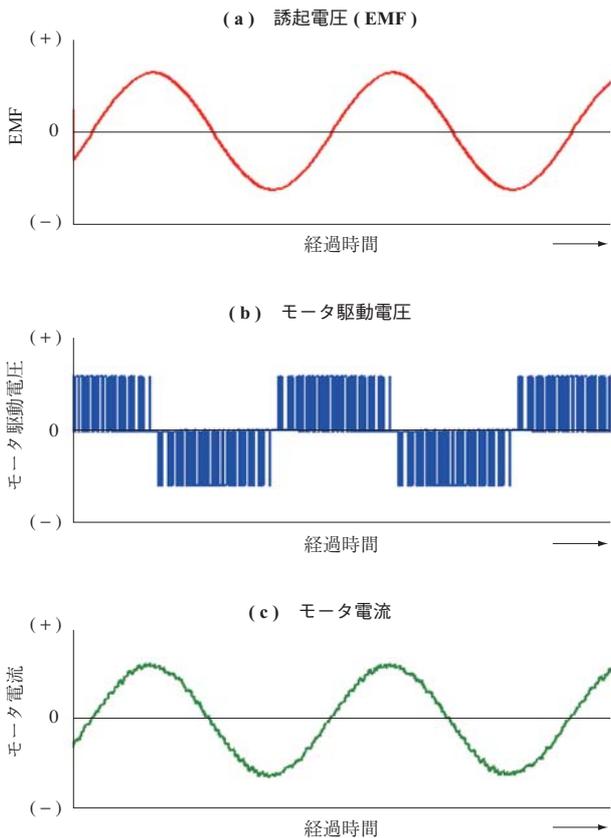
数値は試験機を100%とした場合の比率を示す。また解析手法を比較するため、2D磁場連成解析の結果も算出した。3D磁場連成解析値は97.6%であり、2D磁場連成解析値と比べて、試験機の値に近くなっていることが分かる。対象モータは、ロータ軸長がステータ軸長に比べて若干長い構造となっているが、3D磁場連成解析では、軸長の違いを正確にモデル化できるため、試験機に近づいた結果となっている。

また、温度によって永久磁石のBH (B:磁束密度, H:磁界の強さ) 特性は低下するため、解析結果に影響を与えることが予想される。解析データ値にあらかじめ永久磁石の温度特性データを考慮した解析を実施することで、前記のような解析精度を確認することができた。

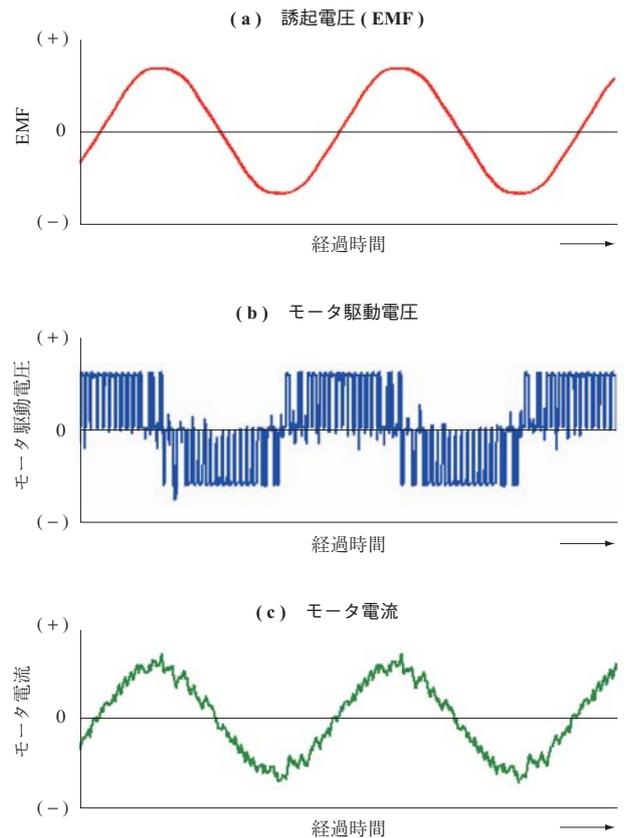
#### 4.2.2 インダクタンスの比較

実機のモータインダクタンスを測定する場合、インピーダンスメータなどによる方法が考えられる。しかし、実際のPWMの駆動電圧とは異なる正弦波電圧によって測定すること、また電流は最大で100mA程度(大容量モータにおける定格電流の1/1000以下)であることから、インピーダンスメータなどでは正確なインダクタンス値の測定ができないと判断した。そこで、実際にPWM駆動している波形からモータインダクタンスを求め、回転座標系の電圧、電流、モータ巻線抵抗、角周波数および永久磁石による鎖交磁束の各値を使う方法を用いた<sup>(1)</sup>。

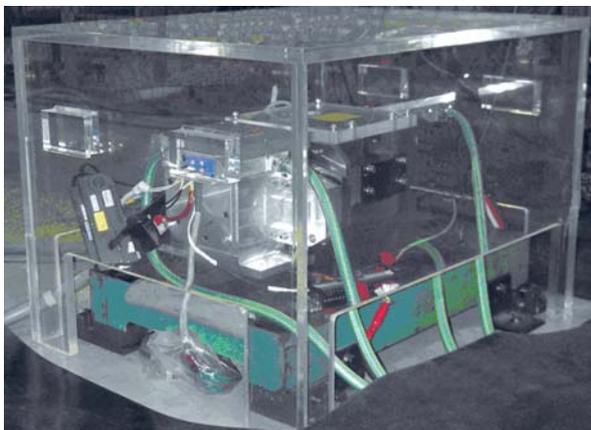
計算式を次に示す。



第 5 図 連成解析出力波形  
Fig. 5 Wave form output with interaction analysis



第 7 図 試験機の測定波形  
Fig. 7 Wave form output of test motor



第 6 図 試験機の外観  
Fig. 6 Test motor

$$L_d = \frac{V_q - RI_q - \omega\phi_a}{\omega I_d} \dots\dots\dots (1)$$

$$L_q = \frac{RI_d - V_d}{\omega I_q} \dots\dots\dots (2)$$

$L_d, L_q$  : d 軸, q 軸インダクタンス (H)  
 $V_d, V_q$  : d 軸, q 軸電圧 (V)  
 $I_d, I_q$  : d 軸, q 軸電流 (A)

$R$  : 巻線抵抗 ( $\Omega$ )  
 $\omega$  : 角周波数 (rad/s)  
 $\phi_a$  : 鎖交磁束 (Wb)

モータインダクタンスの計算結果を第 8 図に示す. 数値は試験機のインダクタンスの平均値を 100%とした場合の比率としている. また解析手法を比較するため, 2D 磁場連成解析の結果も算出した.

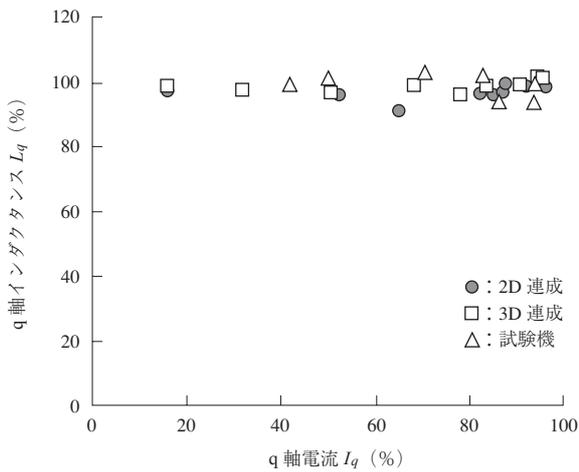
2D, 3D 磁場連成解析ともに, 各点での比較値は 90 ~ 110%以内とほぼ同等の結果であった.

#### 4.2.3 鉄損の比較

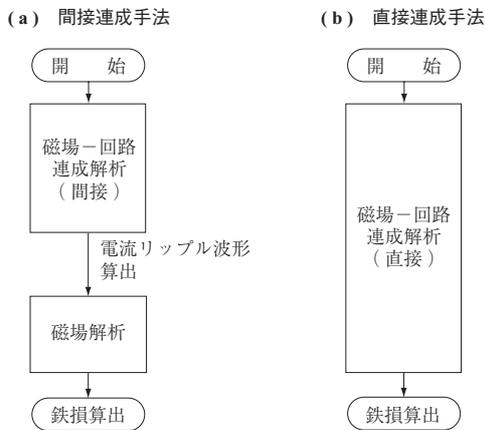
次に鉄損の比較結果を示す. 算出方法を第 9 図に示す. 連成解析で鉄損を求める場合, 磁場解析と同時に回路解析を平行して行う解析手法 (直接連成) が考えられるが, 解析時間が大幅に長くなる欠点がある.

そこで連成解析手法 (間接連成) を用いて, 鉄損を求めた. 間接連成解析を用いて PWM 駆動したモータリップル電流をいったん求め, これを入力条件として, 有限要素法による磁場解析で求める. これによって, 直接連成に比べてトータルの解析時間を短くすることが可能である.

また試験機において鉄損を求めるには, モータの入出力



第 8 図 モータインダクタンス比較  
Fig. 8 Motor inductance calculation results



第 9 図 鉄損の算出方法  
Fig. 9 Analysis method of core loss

の差から、全損失を求め、モータ巻線による銅損と機械損（風損、軸受損など）を差し引くことで推定した。鉄損の比較結果を次に示す。

試験機の推定値 約 200 ~ 400 W 以下

高調波成分を考慮した解析結果 約 200 W

基本周波数成分に加えて高調波成分を考慮した解析によって、鉄損の解析精度が向上することを確認した。

## 5. 試験結果の考察

EMF 解析結果では、2D と 3D で結果が異なることが確認できた。しかし、インダクタンスの比較では、対象としている軸長と径の比のモータでは解析結果に差はなく、試験機とほぼ同等の結果がでている。

そこで、解析対象モータの軸長を半分にした場合（ロータ軸方向と径方向の比が約 0.5 : 1）のインダクタンスを解析で求めた。インダクタンスの比較（モータ軸長 1/2 モデル）結果を次に示す。

2D 磁場連成解析 68%

3D 磁場連成解析 100%

数値は、3D 磁場連成解析のインダクタンス値を 100% とした場合の比率とした。試験機との比較結果はできていないが、2D 連成解析でのインダクタンス値は 32% 程度、解析結果に誤差が生じてくる。

モータ軸長が短くなったことで、コイルエンドによる影響が無視できなくなったことが解析誤差を生じる原因と考えられる。

## 6. 結 言

高速の永久磁石同期モータを対象として、3D 磁場連成解析を実施した。この結果、3D 磁場連成解析は高い精度を得ることが実証された。今後、本格的に開発ツールとして使用していき、さらには熱、流体、応力、振動、騒音などの連成解析へ拡大展開していく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) 森本茂雄, 武田洋次, 平沙多賀男: PM モータの dq 軸等価回路定数の測定法 電学論 D 113 巻 11 号 1993 年 11 月 pp. 1 330 - 1 331
- (2) 村山隆彦, 平尾俊幸, 遠嶋成文: 高速モータにおける回路-磁場連成解析の一考察 平成 19 年電気学会全国大会講演論文集 [5] 講演番号 5-118 2007 年 3 月