1,2章そのまま

・第２実施、パラメータ

3章

（第1の実施形態）

　図1は、本発明の第1の実施形態に係るモータモデルシミュレータのソフトウェア構成を示す図である。図1に示すように、本実施形態のモータモデルシミュレータ1は、それぞれシミュレーション対象となるモータ及びインバータを構成する部品をモデル化した、インバータプラントモデル2、モータプラントモデル3、インバータ損失演算部4を有している。これらのモデルは、モータ、インバータの各部品の挙動を導出するものであり、例えばSimulink(商標登録)などの制御系１次元CADにおけるブロックとして表現される。ただし、他のモデル表現形式、例えば数式、C言語などによって実現されるコンピュータプログラムであってもよい。

　インバータプラントモデル2では、バッテリからインバータに供給される直流電圧やインバータからモータに出力される交流電流を入力として、インバータに流れる直流電流やインバータからモータに印可される交流電圧を計算する。また、半導体素子のスイッチング動作により消費された電力をインバータ損失演算部4へと出力する。本発明では、半導体素子の損失として、導通損失、ボディダイオードの順方向電圧降下による損失（以下、Vf損失とする）、スイッチング損失を計算する。以下、導通損失、Vf損失、スイッチング損失の算出方法をそれぞれ示す。導通損失は、スイッチオン時に半導体素子に流れる電流と半導体素子のオン抵抗を用いて式(1)により算出する。

式(1)

ここで、*PRon*は導通損、*ids*はドレイン-ソース間電流、*Ron*は半導体素子のオン抵抗である。Vf損失は、スイッチオフ時にボディダイオードに流れる電流とボディダイオード電圧を用いて、式(2)により算出する。

式(2)

ここで、*Pvf*はVf損失、*if*はボディダイオード電流、*vf*はボディダイオード電圧である。スイッチング損失は、スイッチング周波数、ターンオン損失、ターンオフ損失を用いて式(3)により算出する。

　　　　　　　　　　　　 式(3)

ここで、*Psw*はスイッチング損失、*f*はスイッチング周波数、*Won*はターンオン損失、*Woff*はターンオフ損失である。

モータプラントモデル3では、インバータからモータに印可される交流電圧から、モータの電流と角速度とトルクを計算する。また、モータに流れる電流から、鉄損、機械損をそれぞれ計算し、モータ損失としてインバータ損失演算部4へと出力する。鉄損、機械損の算出方法は後述する図2において説明する。

　インバータ損失演算部4では、インバータプラントモデル2で計算されたインバータ消費電力と、モータプラントモデル3で計算されたモータ損失を加算し、モータ駆動時のインバータ損失を求める。

　図2は、モータプラントモデル3の構成を示す図である。ここでは、モータプラントモデル3の構成例として、三相永久磁石同期モータをモデル化した例を示す。ただし、モータプラントモデル3は他の三相交流モータ、例えば三相誘導電動機などであっても良い。モータプラントモデル3は、インバータプラントモデル2から入力された交流電圧を入力とし、インバータ損失演算部4へとモータ損失を出力する。モータプラントモデル3は、電流演算部8、トルク演算部9、モータ損失演算部10、回転運動演算部11で構成される。

　電流演算部8は、インバータプラントモデル2から入力された交流電圧をdq軸電圧に変換し、式(4)及び式(5)の電圧方程式からモータに流れるdq軸電流を計算するモデルである。

　 式(4)

　 式(5)

ここで、*vd,vq*は電機子電圧のdq軸成分、Raは1相あたりの電機子巻線抵抗、*id,iq*は電機子電流のdq軸成分、*ωre*は電気角速度、*Ld,Lq*はdq軸インダクタンス、*p*は微分演算子、*Φ*はdq座標系における永久磁石の磁束鎖交数である。

　トルク演算部9は、dq軸電流を入力とし、式(6)からモータの電磁トルクを出力するモデルである。

　 式(6)

ここで、*Te*はモータの電磁トルクである。

　モータ損失演算部10は、各時刻ステップの角速度から機械損テーブル12を参照することで機械損を、各時刻ステップの角速度と負荷トルクから鉄損テーブル13を参照することで鉄損をそれぞれ算出し、式(7)によりモータの回転方向の制動力として働く等価負荷トルクに変換して出力するモデルである。

　 式(7)

ここで、は等価負荷トルク、*Pi*は鉄損、*Pm*は機械損、*ωrm*は機械角速度である。

　回転運動演算部11は、トルク演算部9で計算された電磁トルクから、モータ損失演算部10で計算された等価負荷トルク及び、モータの負荷トルクを減算したトルクを入力とし、式(8)によりモータの角速度を計算するモデルである。

　 式(8)

ここで、*Tl*は負荷トルク、*Jm*は回転軸のイナーシャである。

　図3は、モータプラントモデル3における機械損の損失テーブル12を示す図である。機械損は、モータの軸と軸受間の摩擦や回転部分と空気との摩擦により生じ、理論的にはモータの角速度の2乗に比例する。しかし、実際には前述した摩擦は非線形となるため定量化が難しい。そこで、本発明では磁石を着磁していないロータを組み付けたモータを、外部モータを用いて回転させ、その時のトルクと角速度を積算し計測することで機械損を推定する。これにより得られた機械損を横軸角速度、縦軸機械損としてテーブル化し、各時刻のモータの角速度に応じて参照することで機械損をモデル化する。

　図4は、モータプラントモデルにおける鉄損テーブル13を示す図である。鉄損は、モータの鉄心を交流で励磁するときに、鉄心部に生じる損失であり、例えば永久磁石同期モータではステータ鉄心に冷間圧延鋼板を使用しているため大きな鉄損が発生する。モータの効率はインバータの入力電力に影響するため、インバータの損失計算の観点においても無視することはできない。そこで、本発明では、実機を用いてモータの入力電力からモータの出力電力と機械損と銅損を減算することで鉄損を推定する。これにより得られた鉄損をモータの負荷トルクごとに、横軸角速度、縦軸機械損としてテーブル化し、角速度および負荷トルクに応じて参照することで鉄損をモデル化する。

(第2の実施形態)

　第2の実施形態は、第1の実施形態によるものと共通するところが多いので、以下、共通部分についての詳しい説明は省略し、異なる部分を重点的に説明する。

　第1の実施形態のモータモデルシミュレータは、モータ等価回路演算部5のパラメータが一定であることを前提としてインバータ損失を計算している。しかし、例えば弱め界磁制御などモータの電流振幅や電流位相を変化させる制御を行う場合、磁気飽和の影響によりモータのインダクタンスは変化する。そこで、本実施形態では、各時刻ステップにおける電流とインダクタンスのパラメータマップを用いて、モータ等価回路演算部5のインダクタンスを逐次更新することで磁気飽和を考慮する。

　図5は、第2の実施形態に係わる、モータモデルシミュレータのソフトウェア構成を示すブロック図である。本実施形態のモータモデルシミュレータ1は、第1の実施形態の構成に加えて、モータ等価回路演算部5のインダクタンスを逐次更新するパラメータ演算部14で構成されている。

　図６は、パラメータ演算部におけるインダクタンスのパラメータマップを示す図である。

【図1】第１の実施形態に係わる、モータモデルシミュレータのソフトウェア構成を示すブロック図である。

【図2】モータプラントモデルのソフトウェア構成を示すブロック図である。

【図3】モータプラントモデルにおける機械損テーブルを示す図である。

【図4】モータプラントモデルにおける鉄損テーブルを示す図である。

【図5】第2の実施形態に係わる、モータモデルシミュレータのソフトウェア構成を示すブロック図である。

【図6】パラメータ演算部におけるインダクタンスのパラメータマップを示す図である。

1：モータモデルシミュレータ

2：インバータプラントモデル

3：モータプラントモデル

4：インバータ損失演算部

5：モータ等価回路演算部

6：モータ回転運動演算部

7：モータ損失演算部

8：電流演算部

9：トルク演算部

10：モータ損失演算部

11：回転運動演算部

12：機械損テーブル

13：鉄損テーブル

14：パラメータ演算部



図1

図2

図3

図4



図5

4章

[請求項1]

　コンピュータにより実行可能なモータモデルシミュレータであって、直流電力を交流電力に変換し、交流電力をモータに給電するインバータプラントモデルと、前記インバータプラントモデルよりモータに印可される交流電圧から、モータの電流と角速度とトルクを計算するモータプラントモデルを備え、

　前記モータプラントモデルにおいて、損失テーブルを参照することにより、角速度と負荷トルクに応じた鉄損と、角速度に応じた機械損を算出し、前記インバータプラントモデルの半導体素子で消費された電力へと加算することでインバータ損失を計算するモータモデルシミュレータ。

[請求項2]

　請求項1に記載のモータモデルシミュレータにおいて、モータ駆動時に、前記インバータプラントモデルのスイッチング動作時に半導体素子で消費される電力として、導通損失、ボディダイオードの順方向電圧降下による損失、スイッチング損失を計算するモータモデルシミュレータ。

[請求項3]

　請求項1及び請求項2に記載のモータモデルシミュレータにおいて、前記モータプラントモデルの構成として、入力された交流電圧からモータに流れる電流を計算するモデルと、前記電流からモータの電磁トルクを計算するモデルと、損失テーブルを参照することにより鉄損、機械損を算出し、モータの回転方向に対する制動力として働く等価負荷トルクに変換して前記電磁トルクから減算することでモータトルクを算出するモデルと、前記モータトルクからモータの角速度を計算するモデルとを備えたモータモデルシミュレータ。

[請求項4]

　請求項1及び請求項2及び請求項3に記載のモータモデルシミュレータにおいて、モータ等価回路のインダクタンスを、パラメータマップを参照することで逐次更新するモデルを備えたモータモデルシミュレータ。

5章

[課題を解決するための手段]

　上記課題を解決するためになされた請求項1に記載のモータモデルシミュレータは、実機により測定した機械損、鉄損をそれぞれ機械損テーブル、鉄損テーブルとしてモデル化し、テーブルをすることで角速度に応じた機械損と、角速度と負荷トルクに応じた鉄損を計算し、インバータの半導体素子で消費された電力へと加算することでインバータ損失を計算することを特徴とする。これにより、モータ及びインバータに流れる電流を精度良く計算でき、モータ駆動時のインバータ損失を高精度に推定することができる。