

SPICE によるインバータ駆動誘導機の シミュレーション

松 坂 知 行*・佐々木 一 人**

Simulation of an inverter driven induction motor using SPICE

Tomoyuki MATSUZAKA* and Kazuhito SASAKI**

Abstract

Spice is widely used as a versatile simulation tool for electronic circuit analysis and seems to be useful for power electronic circuits. However, it is difficult to apply SPICE straightway to power electronic circuit including electrical machines because the elements of circuit models to describe machine characteristics are not included in SPICE. Hence, it is necessary to state machine characteristics using circuit models included in SPICE. This paper presents the method to express machine characteristics using circuit elements in SPICE.

1. ま え が き

本稿はパワー回路で駆動される誘導機のシミュレーションについて述べている。パワー回路はパワートランジスタ、サイリスタなどのスイッチ素子を含んでいるため連続系と異なりシミュレーションが面倒である。一方回路シミュレータとして SPICE が広く用いられている。そこで SPICE を用いてパワー回路で駆動される誘導機のシミュレーションを行う方法を研究した。しかし SPICE は電子回路解析用として設計されているため、パワー駆動回路のシミュレーションは可能であるが、誘導機のシミュレーションには特別な工夫が必要である。すなわち誘導機を等価な電子回路で表現する必要がある。誘導機を等価電子回路で表現できればパワー駆動回路と誘導機を含めた全体の系が SPICE でシミュレーションできるので、非常に便利である。本稿ではまず、誘導機を等価電子回路に置換する方法を提案する。つぎに PWM

インバータで駆動された誘導機のシミュレーション方法について述べる。

2. 誘導機の動特性方程式¹⁾

誘導機の動特性は一般に d-q 軸変換により以下のように表される。図 1 に d-q 軸変換による等価回路を示す。図 1 を参照することにより以下の式が導かれる。

(a) 電気的方程式

$$\left. \begin{aligned} v_{1d} &= R_1 i_{1d} + p\phi_{1d} \\ v_{1q} &= R_1 i_{1q} + p\phi_{1q} \\ v_{2d} &= R_2 + p\phi_{2d} + \omega\phi_{2q} \\ v_{2q} &= R_2 i_{2q} + p\phi_{2q} - \omega\phi_{2d} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \phi_{1d} &= L_{11} i_{1d} + M i_{2d} \\ \phi_{1q} &= L_{11} i_{1q} + M i_{2q} \\ \phi_{2d} &= M i_{1d} + L_{22} i_{2d} \\ \phi_{2q} &= M i_{1q} + L_{22} i_{2q} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

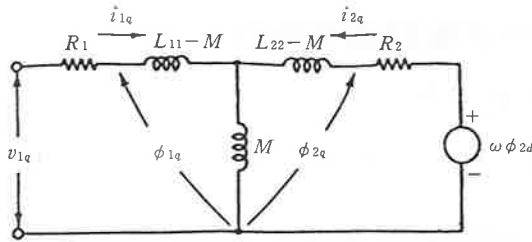
(b) トルク

$$T = \phi_{2q} i_{2d} - \phi_{2d} i_{2q} \quad (3)$$

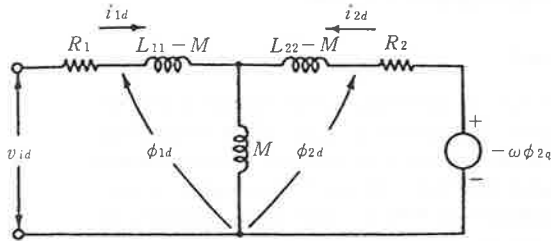
平成 4 年 12 月 15 日受理

* 情報システム工学研究所教授

** 電気工学科助教授



(a) q 座標軸等価回路



(b) d 座標軸等価回路

図1 d-q 軸等価回路

(c) 電力

$$P = \omega T \quad (4)$$

(d) 機械的運動方程式

$$T = Jp\omega + T_d \quad (5)$$

ここで

$$p = \frac{d}{dt}, T_d \text{ は負荷トルク}$$

よって (2) 式より

$$\left. \begin{aligned} i_{1d} &= \frac{L_{22}\phi_{1d} - M\phi_{2d}}{L_{11}L_{22} - M^2} \\ i_{1q} &= \frac{L_{22}\phi_{1q} - M\phi_{2q}}{L_{11}L_{22} - M^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{2d} &= \frac{L_{11}\phi_{2d} - M\phi_{1d}}{L_{11}L_{22} - M^2} \\ i_{2q} &= \frac{L_{11}\phi_{2q} - M\phi_{1q}}{L_{11}L_{22} - M^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(1) 式に (6), (7) 式を代入し (5) 式を組み合わせると ϕ_{1d} , ϕ_{1q} , ϕ_{2d} , ϕ_{2q} , ω を状態変数とする以下の状態方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} p\phi_{1d} &= v_{1d} - \frac{R_1 L_{22}}{D} \phi_{1d} + \frac{R_1 M}{D} \phi_{2d} \\ p\phi_{1q} &= v_{1q} - \frac{R_1 L_{22}}{D} \phi_{1q} + \frac{R_1 M}{D} \phi_{2q} \\ p\phi_{2d} &= v_{2d} - \frac{R_2 L_{11}}{D} \phi_{2d} + \frac{R_2 M}{D} \phi_{1d} - \omega \phi_{2q} \\ p\phi_{2q} &= v_{2q} - \frac{R_2 L_{11}}{D} \phi_{2q} + \frac{R_2 M}{D} \phi_{1q} + \omega \phi_{2d} \\ p\omega &= (T - T_d)/J \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

したがって (8) 式の状態方程式を求めることにより (6), (7) 式より i_{1d} , i_{1q} , i_{2d} , i_{2q} が求められ、実際の電流 i_a , i_b , i_c が以下のようにして得られる²⁾。

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

またこの逆変換は以下になる。

$$\begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

3. SPICE によるシミュレーション

図2は(8)式により導かれたd軸, q軸回路を表わす等価電子回路である。図中d軸q軸電圧 v_{1d} , u_{1q} は(10)式を参照し図3の回路で求められる。また図4はトルクと回転速度を表す等価電子回路で, (3), (6), (7)式から導かれる。図5は固定子d軸電流, q軸電流を求める等価電子回路で, (6), (7)式から導かれる。また図6はa相の電流を求める回路, 図7は等価電子回路に出てくる記号を示す。また図中 D は

$$D = L_{11}L_{22} - M^2 \quad (11)$$

を示す。

以上の等価電子回路で誘導機の動作を各種条件でシミュレーションしたところ, 文献(2)の

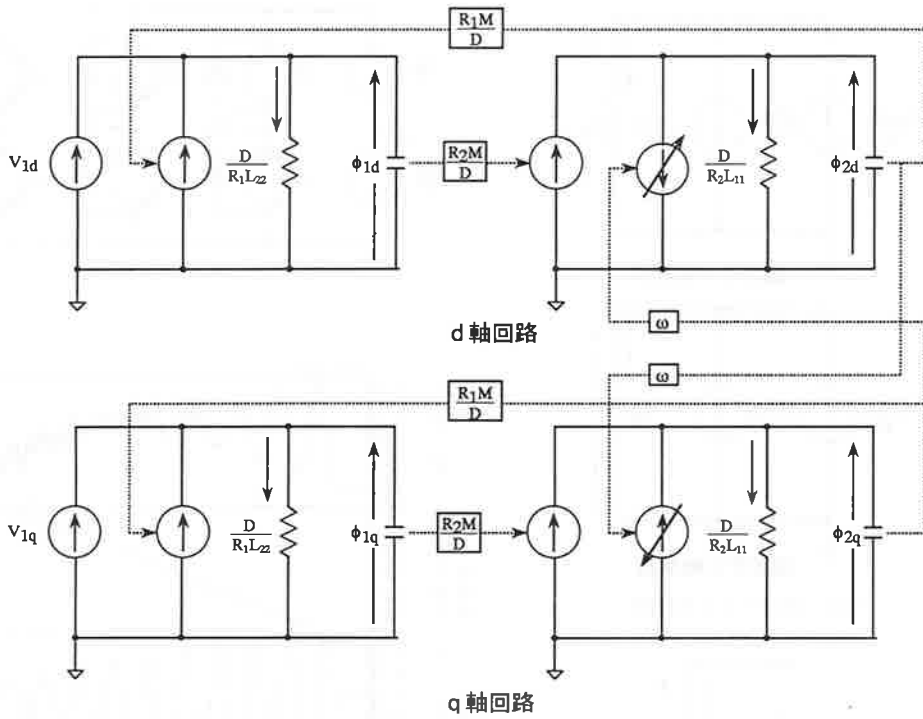


図 2 SPICE 向き等価回路

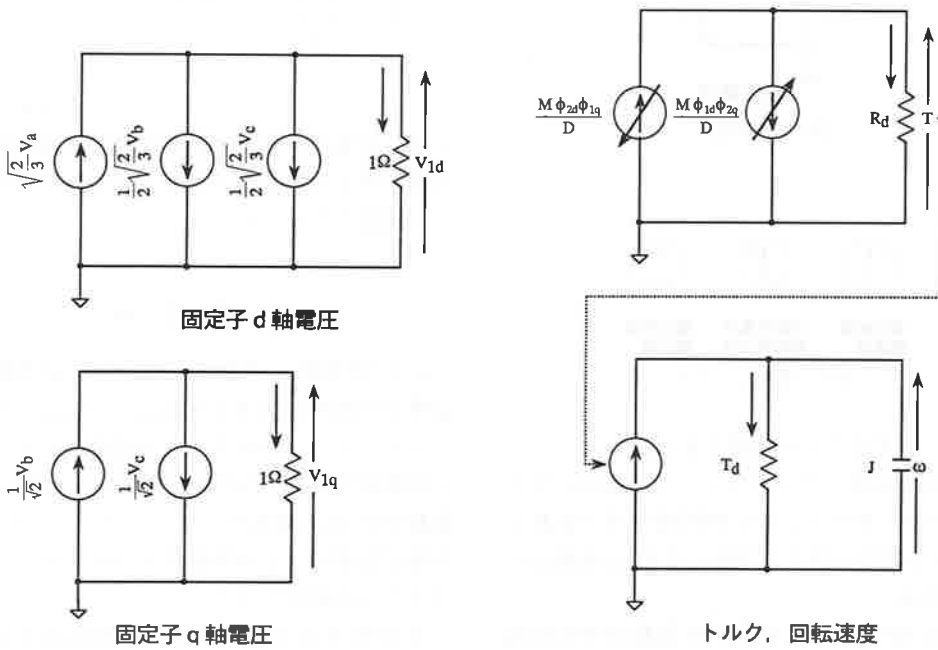


図 3 d, q 軸電圧

図 4 トルク, 回転角速度

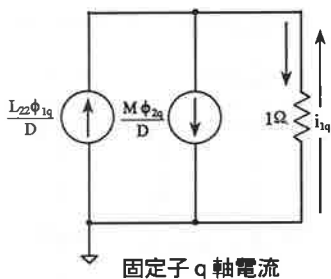
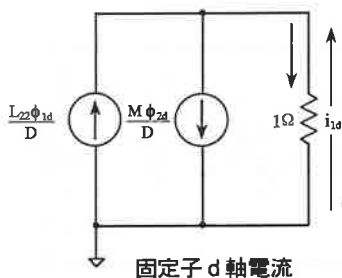


図5 固定子 d, q 軸電流

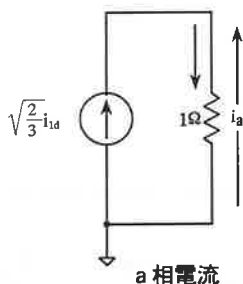


図6 a 相電流



図7 電源シンボル

結果と一致することが確認された。

つぎに図8はパワートランジスタを用いたインバータで、各スイッチはPWM信号で駆動される。出力電圧は図3の回路でd軸、q軸電圧に変換される。

図9はSPICEによるPWM駆動誘導電動機の起動トルク、回転数、起動電流のシミュレーション結果である。

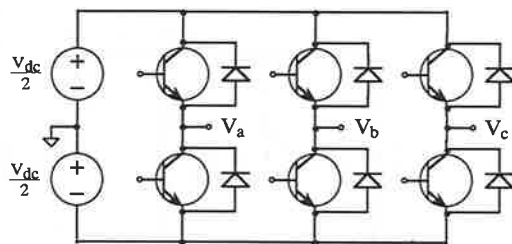


図8 インバータ回路

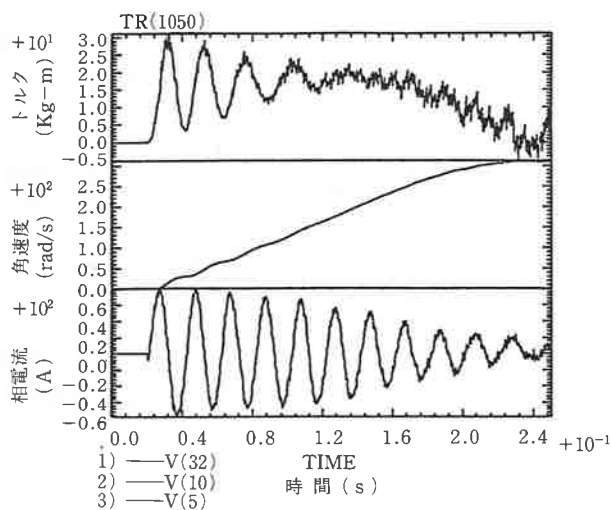


図9 シミュレーション結果

シミュレーション結果である。等価な正弦波駆動電動機の実験結果と比較したところ妥当な結果であることが確認できた。

4. まとめ

以上 SPICE に適用できるように誘導機を等価電子回路で表現する方法について述べた。シミュレーションの結果、この変換法は正しいことが確認できた。つぎに PWM 波インバータで駆動される誘導機のシミュレーションを行い、等価正弦波による実験結果と比較したところ妥当なことが確認できた。

本 SPICE は富士通により機能拡張されたもので、ワークステーションのウィンドウ上で回

路要素をマウスで接続するだけでシミュレーションが実行できるので、極めてシミュレーションの効率がよいことが分かった。

5. 参考文献

- 1) 松坂, 佐々木: 誘導機の起動電流シミュレーション, 第10回シミュレーションテクノロジーコンファレンス, p.165
- 2) 秦泉寺, 内藤訳: パワーエレクトロニクス & ACドライブ, 電気書院, p.61