

モータのしくみから位置/速度制御の実践テクニックまで

実践講座 小型モータの選定と制御技術

第16回(最終回) 回転速度制御システムのシミュレーション解析

～MATLAB/Simulinkを使用した～
萩野 弘司/Igeta Kenichiro
Hiroshi Hagino

前回(本連載第15回, 本誌2007年10月号)は, 基本的な制御理論をブラシ付きDCモータ(以下省略してDCモータと呼ぶ)の速度制御系に適用して, その特性を確認しました。

今回は, 前回の測定結果について, 理論値と実験値の差の分析を行い, シミュレータを使って理論的な検討を行います。

また前回は, できるだけ単純な伝達関数を得るために, 速度センサ部にタコジェネレータを, パワー・アンプ部にリニア・アンプをあえて使用しました。

今回は, 実際の速度制御に多く使われているインクリメンタル・エンコーダやPWM制御のフル・ブリッジ回路を用いて, 伝達関数や制御特性がどのように変化するのかを調べます。

1次遅れ近似の速度制御系をシミュレーション

前回説明したように, DCモータの伝達関数を, 電機子抵抗 R_a に比べて電機子インダクタンス L_a が小さく, かつ粘性制動係数 D も小さいときには1次遅れ系になります。これにより, その後の制御系全体の数式の展開が容易になりました。

すなわち, 無負荷時のDCモータの伝達関数 $G_{m1}(s)$ は, 式(16-1)のように1次遅れで近似できるとしました。このDCモータに, パワー・アンプの伝達関数を A [倍], 速度センサ(速度フィードバック要素)の伝達関数を K_f [V/(rad/s)] として速度制御を行い

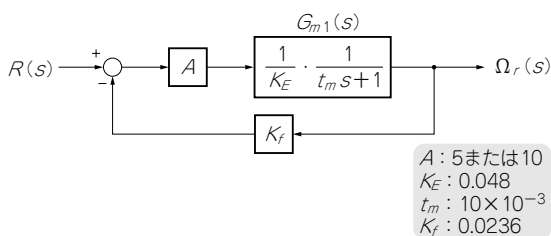


図16-1 速度制御系(1次遅れ)のブロック線図
無負荷時のDCモータの伝達関数を1次遅れで近似

(図16-1), 周波数応答を測定して時定数や周波数応答が無制御時に比べて改善されることを確かめました。

$$\begin{aligned}
 G_{m1}(s) &= \frac{\Omega_r(s)}{V_a(s)} \\
 &= \frac{1}{K_E} \cdot \frac{1}{t_m s + 1} \\
 &= \frac{1}{0.048} \cdot \frac{1}{10 \times 10^{-3} s + 1} \dots\dots (16-1)
 \end{aligned}$$

ただし, $\Omega_r(s)$ [rad/s]: 回転角速度, $V_a(s)$ [V]: 印加電圧, K_E [V/(rad/s)]: 誘導起電力定数(0.048はDCモータDMN37JBの値), t_m [s]: 機械の時定数(10×10^{-3} はDCモータDMN37JBの仕様から求めた値)です。

● ボーデ線図の作成

今回は, 制御系シミュレータであるMATLAB/Simulinkを使ってボーデ線図を作成してみます。

図16-1の各ブロックにそれぞれの要素の定数を代入してMATLAB/Simulinkでボーデ線図を作成すると, 図16-2のように速度制御系(1次遅れ近似)の伝達関数 $G_{S1}(s)$ のボーデ線図が求まります。

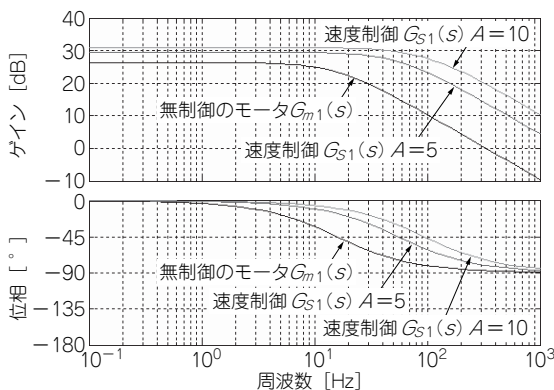


図16-2 DCモータと速度制御系(1次遅れ)のボーデ線図

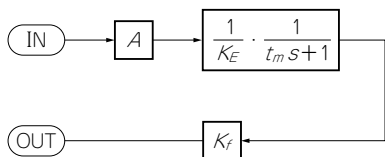


図 16-3 安定判別を行うために作成した閉ループの一巡伝達関数

ここでは、無制御時のモータの伝達関数 $G_{m1}(s)$ と速度制御時の伝達関数 $G_{S1}(s)$ (パワー・アンプのゲイン $A = 5$ 倍と 10 倍) を、比較のためいっしょに示しています。

速度制御を行い、さらにゲインを大きくすることによって、回転速度の指令値応答特性が改善されることがボード線図からも確認できます。

● 制御系の安定判別

この速度制御系の安定判別を行うために、図 16-3 に示すようにフィードバック経路を切り離し、この系の閉ループを一巡する伝達関数(一巡伝達関数と呼ぶ)を求め、そのボード線図(開ループ・ボード線図とも呼ぶ)を作成します(図 16-4)。

一般に安定判別は、開ループ・ボード線図から位相余裕やゲイン余裕を下記のように求めて行います。

- 位相余裕：ゲイン曲線が 0 dB のときの位相角を、 -180° から測った角度
- ゲイン余裕：位相曲線が -180° のときのゲインを、0 dB のラインから測った負のゲイン値

サーボ機構の位相余裕とゲイン余裕の適当な範囲は、一般に以下の値であると言われています。

- 位相余裕： $40 \sim 60^\circ$
- ゲイン余裕： $-10 \sim -20$ dB

1 次遅れ系の場合、位相遅れの最大値が -90° なので安定判別の必要は無いこととなりますが、あくまで 1 次遅れ近似自体が正しいということが前提条件になります。

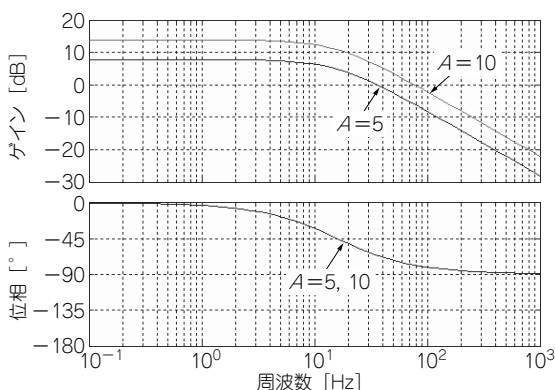


図 16-4 速度制御系(1 次遅れ)の一巡伝達関数のボード線図
開ループ・ボード線図とも呼ばれる

電機子インダクタンスを含めた 2 次遅れの伝達関数

1 次遅れ要素はボード線図(図 16-2)に示すように、位相遅れの最大値は -90° になります。

しかし、周波数応答特性の実測値(連載第 15 回の図 15-16, 本誌 2007 年 10 月号)をよく見ると、位相遅れが -90° を超えています。これは、電機子インダクタンス L_a を省略したことが原因とも考えられます。そこで、図 16-5 に示すように、電機子インダクタンス L_a を含めたモータの伝達関数 $G_{m2}(s)$ を求めると、式(16-2)のようになります。

$$\begin{aligned}
 G_{m2}(s) &= \frac{\Omega_r(s)}{V_a(s)} \\
 &= \frac{K_T}{(sL_a + R_a)sJ} \\
 &= \frac{1}{1 + K_E \cdot \frac{K_T}{(sL_a + R_a)sJ}} \\
 &= \frac{1}{K_E} \cdot \frac{1}{\frac{L_a J}{K_E K_T} s^2 + \frac{R_a J}{K_E K_T} s + 1} \\
 &= \frac{1}{K_E} \cdot \frac{1}{t_e t_m s^2 + t_m s + 1} \dots\dots\dots(16-2)
 \end{aligned}$$

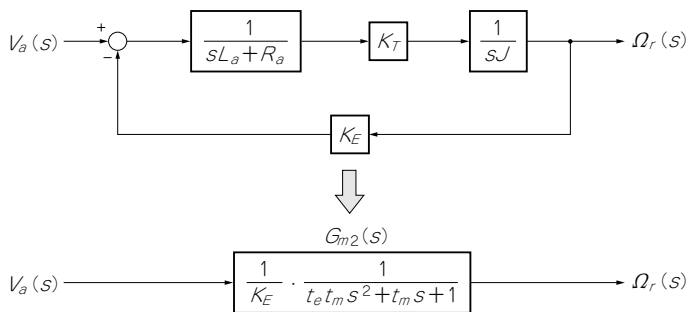


図 16-5 電機子インダクタンスを追加した DC モータのブロック線図(無負荷, $D = 0$)