トルクリプルオブザーバを用いた
ブラシレスDCモータの低速域の高精度制御

正員	花本剛士	(九州工業大学)
正員	田中良明	(九州工業大学)
正員	望月琢郎	(九州工業大学)

High Precision Control at Low Speed Using Torque Ripple Observer of Brushless DC Motors

Tsuyoshi Hanamoto, Yoshiaki Tanaka, Takuro Mochizuki (Kyushu Institute of Technology)

キーワード BLD CM, 最小次元オブザーバ, トルクリプル

1. まえがき

近年、パワーエレクトロニクスの発展に伴い、永久磁石型同期電動機（PMモータ）とインバータを組み合わせたブラシレスDCモータ（BLDCM）を可変速駆動系に用いることが盛んになって来た。しかしながら、BLDCMには、界磁磁極の構造上、トルクリプルが存在し⁽¹⁾、高精度の低速制御を実現しようとする、このリプルを無視できなくなり、速度に微小振動が生じる。

従来、このような系に対して、外乱オブザーバを組み合わせた外乱抑制制御が提案されているが、本論文では、外乱トルクを交流成分と直流成分の和でモデル化した新たなトルクリプルオブザーバを提案し、フィードフォワード制御により微小振動を抑制する方法を提案する。

2. 制御系のモデルとトルクリプルオブザーバ

(1)式に dq 変換を施した後の B L D C M のトルク方程式を示す。

$$J \frac{d\omega_m(t)}{dt} = K_t i_q(t) - T_d \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ω_m ：モータ角速度、 i_q ：q軸電流、 T_d ：外乱トルク、 J ：イナーシャ、 K_t ：トルク定数である。

図1に示した制御系に従い速度制御を行うが、高精度の制御を実現しようとする、特に低速領域においては、コギングトルク等のトルクリプルにより生じる微小振動が無視できなくなる。このリプルは、電氣的角速度を ω_e とすれば、 $6\omega_e$ となる⁽²⁾。但し、 ω_e は極対数を p とすると $\omega_e = p\omega_m$ である。また、電流検出器の測定誤差やモータの電氣的なアンバランス等により発生する角速度 ω_e のリプル成分も存在する。このようなトルクリプルに対し、従来より提案されている外乱オブザーバを用いた振動抑制方法では、推定時に生じる位相遅れを小さくするためにオブザーバの固有値を大き

くとの必要があり、パラメータ誤差や、測定誤差の影響が大きくなる。また、外乱オブザーバの出力は、直流成分である負荷トルクや摩擦トルクに、交流成分であるトルクリプルが、重畳したものであり、各周波数成分をオンラインで容易に分離することができない。このため、リップル成分のみを取り出して振動抑制制御をしようとしても、十分な抑制効果が得られない場合がある。

そこで、本論文では、トルクリプルを、回転に起因する成分と、直流成分の和であると仮定して、推定する方法を提案する。具体的には、以下の式でモデル化する。

$$T_d = a_0 \cos \omega_{e6} t + b_0 \sin \omega_{e6} t + T_{d0} = T_{d1} + T_{d0} \dots (2)$$

$$\frac{d}{dt}T_{d0} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\omega_{e6} = 6\omega_e$ である。また、 a_0 、 b_0 は、トルクリプルの振幅であり、サンプル周期中は、一定値であると仮定する。(2)式は、非線形であるが、定常状態からの微小変化を考え、 ω_{e6} を定数として取り扱えば、筆者等が提案している軸ねじれ反力オブザーバ⁽³⁾と同じ形となる。

(2)式を状態変数表示にしてオブザーバによる推定を可能にするため、 $T_{a2}=dT_{a1}/dt$ を定義すれば、以下の状態方程式が導出される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T_{d1} \\ T_{d2} \\ T_{d0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\omega_{e6}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{d1} \\ T_{d2} \\ T_{d0} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4)$$

図 1 システム構成図
Fig.1 Configuration of the system

図2 実験結果 (定常波形)

Fig.2 Experimental results of the steady state

(4)式と(1)式を組み合わせ、オブザーバ理論を適用するとトルクリプルを推定することができる。

推定したトルクを、 K_a を電流フィードバック定数とし、次式により、電流の指令値相当に換算し、フィードフォワード制御により速度の振動を抑制する。

$$i_{comp} = \frac{K_a}{K_t} (k_1 T_{d1} + T_{d0} - k_2) \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 k_1 は、適当な比例定数、 k_2 は、推定した T_{d0} に含まれる、摩擦トルク成分を取り除き、電気角速度に起因した脈動成分のみを補償するために用いる定数である。

3. 実験結果

実験には、定格308WのPMモータを用い、DSPを中心としたソフトウェアサーボで実現している。トルクの推定には、正確な速度情報が必要であるため、パルスエンコーダのA相パルスのみを用いた拡張パルス間隔方式⁽⁴⁾を用いている。

図2(a)には、提案するオブザーバを用いて振動抑制制御を行った場合と、行わない場合の比較を示す。ここでは、モータの速度指令値を15rpmとした。オブザーバゲインはオブザーバの固有値が、 $\omega_g = -40\text{rad/s}$ なる重根をとるように設定した。図中(t_p)点までは、トルクリプル制御無しの場合であり、速度に、微小脈動が生じていることがわかる。 (t_p) 点以降は、提案する制御を行った結果を示している。ただし、 $k_1=3.0$ 、 $k_2=0.04$ とした。同図より、 T_{d1} は、角周波数 $6\omega_e$ のトルクリプルをよく推定していることが分かる。一方 T_{d0} は、直流成分と、電気角速度に起因したリプル成分の和を推定していることが分かる。これは、(3)式が外乱オブザーバと同じ式であるため、比較的緩やかな振動成分を直流成分と同時に推定した結果と考えられる。このように、提案する方法では、推定したトルクリプルを簡単に各周波数成分に分離できるという特徴を持っている。

図2(b)は、従来の外乱オブザーバを用いてトルクリプルを推定し、(a)と同様にリプル成分のみをフィードフォワード制御した場合の結果である。推定による位相遅れをなくすため、オブザーバの固有値は振動周波数の10倍以上に設定した。この場合、 ω_{e6} の角周波数成分の振動は減少しているが、逆に ω_e の角周波数成分のトルクリプルには、過剰に制御がかかり、振動が抑制されていないことがわかる。

図3 実験結果 (ステップ応答)

Fig.3 Step response of the proposed system

図3は、提案する方法でトルクリプルを抑制した後の、速度指令値のステップ変化に対する応答例である。トルクリプルオブザーバの設計には、モータ速度を15rpmとしており、この時点で ω_{e6} を定数としているため、厳密には正確なトルクリプルは推定できないが、微小なステップ応答に対しては、提案する制御方式である程度の振動抑制効果が得られることがわかる。

4. まとめ

BLDCMのトルクリプルを推定するオブザーバを提案し、推定したトルクを用いて速度の微小変動を抑制できることを示した。現在、さらに低速領域での高精度運転の実現について検討中である。

(平成7年8月14日受付)

文 献

- (1) H.Soebagia, et al: "Torque Ripple Improvement for small Brushless DC Motor", IPEC-Yokohama '95, 535-539
- (2) 神谷新吾, 他: 「DSPによる同期機型DDモータの高精度トルク制御」, 電学論D, 110, 117~124 (平2-2)
- (3) T.Hanamoto, et al: "A New Observer Based Vibration Supression Control Method for 2-Mass Systems", IPEC-Yokohama '95, 70-74
- (4) 杉浦, 他: 「サーボモータ用高分解能デジタル速度検出方法の検討」, 電学論D, 108, 69 (平3-1)

花 本 剛 士 (正員) 1961年7月22日生。86年3月九州工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)神戸製鋼所入社。90年5月九州工業大学地域共同研究センター助手、現在に至る。主として、モーションコントロール電力変換系のデジタル制御に関する研究に従事。

田 中 良 明 (正員) (写真省略) 70年3月九州工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。88年同講師、現在に至る。工学博士。

望 月 琢 郎 (正員) (写真省略) 58年3月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年九州工業大学電気工学科講師、73年同教授。現在に至る。工学博士。