鏡筒一体型ダイレクトドライブモータの一励磁法 A Drive Method for a Direct-drive Motor Built into a Camcorder Lens Barrel

高野博夫・于丹・上野輝雄

大阪産業大学工学部電気電子工学科, 大阪府大東市中垣内 3-1-1 (〒574-8530)

H. Takano, D. Yu, and T. Ueno

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Osaka Sangyo University,
3-1-1 Nakagaito, Daito Osaka, 574-8530

(1999年10月27日受理, 2000年1月25日採録)

Camcorders would be more compact, lighter, and lower-priced if their drive motors were built into their lens barrels. We propose a new direct-drive motor built into a lens barrel. This motor has a three-phase set of armature windings. Only two phases are excited by a rectangular source, and the other phase is not excited. This paper presents a new drive method, called "three-phase on mode by a sinusoidal source," in which all three phases are excited by a sinusoidal source to get a smooth axial shift of a rotor. We confirmed that the rotor of the motor shifted smoothly in an axial direction, using the new drive method. Calculated rotor displacements and times agree well with measured values. Torques do not depend on frequency and are constant below 20 Hz. The principles for the new drive method for the motor were verified.

Key words: camcorder, lens barrel, direct-drive motor, air-gap magnetic flux density, three-phase armature winding, sinusoidal source, displacement, laser diode, sensor.

1. まえがき

現在市販されているカムコーダ(ビデオカメラとVTRが一体になったポータブル商品)のズームレンズおよびフォーカスレンズは、ほとんど鏡筒の外部に設置されたDCモータと減速機構により駆動されており、小型化する上で限界があると思われる¹⁾。従って、駆動モータを鏡筒に内蔵することが可能になれば、カムコーダの小型・軽量・低価格化が一段と進むと考えられる。筆者等はこのような考え、新しいアイデアである「ズームレンズ用鏡筒一体型ダイレクトドライブモータ」を試作し報告した¹⁾⁻⁶⁾。

前回試作モータでは、三相電機子コイルの二個を方形波励磁し、他の電機子コイルは無励磁にして転流する方式を採用していた。(本論文では、二相方形波励磁方式と称することにする)今回、回転子の応答特性を改善する狙いから、三相正弦波励磁(三相正弦波励磁方式と称することにする)の可能性を検討した。対称構造を有する電機子コイルに対称三相交流を与えた時、回転子は軸方向に円滑な運動をし良好な結果が得られた。本論文では、トルク特性および応答特性の理論式および実験検証結果を報告する。

2. 電機子電流および空隙磁束密度

2.1 電機子電流

提案した「ズームレンズ用鏡筒一体型ダイレクトドライブモータ」の外観・構造に関しては、既に報告したので省略する⁵⁾。Table 1は、理論を検証する目的で今回試作した本モータの固定子および回転子の主要寸法を示す。

Fig.1はこのモータの三相励磁特性を解析するためのモデルである。各電機子コイルに対称三相交流を供給すると、A相

Table 1 Specifications for test motor

stator		rotor	
outside diameter	24.8mm	outside diameter	21.0mm
inside diameter	21.6 mm	length	9.5mm
length	45.0mm	magnet out. dia.	20.0mm
turns per winding	110	magnet ins. dia.	16.8mm
lead eqn.(13) q_s	1.6mm	magnet length	5.0mm
no. of wdgs	3	pole numbers	10

Fig. 1 Calculation model

電機子コイルの電流は次式により示される。

$$i_A(t) = I_m \sin \omega t \quad (1)$$

ただし、 I_m は電流の最大値、 $\omega = 2\pi f$ は角周波数である。

B相およびC相の電機子コイル電流は、それぞれ次式により示される。

$$i_B(t) = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (2)$$

$$i_C(t) = I_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \quad (3)$$

2.2 空隙磁束密度

環状永久磁石の磁極数を $2p$ 、空隙磁束密度分布の最大値を B_0 とし、各電機子コイルのコイル辺(⊗ ⊙記号)の中心を通る仮想円上の任意の位置 θ_2 における空隙磁束密度分布を次式により仮定する²⁾。

$$B(\theta_2) = B_0 \sin p\theta_2 \quad (4)$$

(4)式は、回転子が静止している場合の空間的磁束密度分布である。回転子が反時計方向に同期速度で回転する場合、同期速度は次式に示すように示される。

$$n = \frac{f}{p} \quad (5)$$

A相電機子コイルのコイル辺には、次式に示す空隙磁束密度を有する磁束が鎖交する。

$$B_A(t) = B_0 \sin(\omega t - \alpha) \quad (6)$$

ただし、 α は電機子コイル電流と空隙磁束密度の位相差である。対称三相構造なので、A相電機子コイル、B相電機子コイルおよびC相電機子コイルは等しい構造を有し、空間的に $2\pi/3$ 離れて配置されている。従って、(6)式を基準として、B相およびC相の電機子コイルに鎖交する空隙磁束密度はそれぞれ次式により表される。

$$B_B(t) = B_0 \sin(\omega t - \alpha - 2\pi/3) \quad (7)$$

$$B_C(t) = B_0 \sin(\omega t - \alpha - 4\pi/3) \quad (8)$$

Fig. 2 は、(6)式に示したA相の空隙磁束密度 $B_A(t)$ と(1)式に示したA相電機子コイル電流 $i_A(t)$ を測定した一例であり、上半分は $\alpha = 90^\circ$ 、下半分は $\alpha = 20^\circ$ の場合の測定結果を示す。この結果から(4)式に示すように空隙磁束密度分布を正弦波状に仮定出来ることが明らかになった。Fig. 1に示す回転子の位置は、磁石NSの境界とA相のコイル辺(⊗記号)が一致しており、位相差 $\alpha = 90^\circ$ の場合に対応する。 $B_A(t)$ の測定は、ホール素子を直接A相のコイル辺の直下に挿入することが困難なので、1磁極対離れた位置に設置して行った。

3. トルク

3.1 トルク理論式

N を電機子コイルの巻数、 R_c を電機子コイルの中心径、 L_m を磁石の軸方向の長さとする、(1)式および(6)式からA相のトルクは次式により示される。

$$\begin{aligned} T_A(t) &= 2R_c L_m B_A(t) N i_A(t) \\ &= B_0 N I_m R_c L_m \{ \cos(\alpha) - \cos(2\omega t - \alpha) \} \end{aligned} \quad (9)$$

同様に、(2)、(3)式に示す電機子コイル電流および(7)、(8)式に示す空隙磁束密度から、B相およびC相のトルクが求まり、それぞれ次式に示すようになる。

$$\begin{aligned} T_B(t) &= 2R_c L_m B_B(t) N i_B(t) \\ &= B_0 N I_m R_c L_m \{ \cos(\alpha) - \cos(2\omega t - \alpha - 4\pi/3) \} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T_C(t) &= 2R_c L_m B_C(t) N i_C(t) \\ &= B_0 N I_m R_c L_m \{ \cos(\alpha) - \cos(2\omega t - \alpha - 8\pi/3) \} \end{aligned} \quad (11)$$

従って、(9)～(11)式から合成トルクは次式により示される。

$$T = T_A(t) + T_B(t) + T_C(t) = 1.5 R_c L_m N I_m B_0 \cos \alpha \quad (12)$$

この式には時間 t が含まれてないので、時間に無関係な一定値である。

3.2 トルク測定結果

電機子コイルに供給する対称三相交流は、 120° の位相差を有する二相発振器の出力信号A,Bを加算器に入力して出力信号Cを得、これらを電力増幅器で増幅して得た。Fig.3は、電源周波数 $f=10\text{Hz}$ の時、トルク T 対位相差 α の関係について、計算値と実測値を比較した結果である。計算トルクは、空隙磁束密度の最大値 B_0 、電流の最大値 I_m および位相差 α の測定値をFig.2に示す測定値から求め、(12)式に代入して求めた。実測トルクはプロニーレーキ法により測定した。 $\alpha = 50^\circ \sim 90^\circ$ の範囲では、計算値と実測値が良く一致しているが、 $\alpha = 50^\circ$ 以下では計算トルクと測定トルクの差が大きい。 $\alpha = 20^\circ$ 以下では、ト

Fig. 2 Airgap-magnetic flux density and armature winding current

Fig. 3 Torque vs. angle

ルクの測定は出来なかった。この原因は以下のように考えられる。ブローブレーキ法では、モータの回転軸に糸を巻き付けて摩擦力を発生させ負荷トルクを調整している。今回の測定では、発生トルクが微小なため負荷トルクの調整を精密に出来ず、トルクの測定精度が良くなったためと推測される。

Fig. 4 は、電機子コイル電流の周波数を $0 < f \leq 20$ Hz の範囲にわたって変化させ、トルク、電流、空隙磁束密度および位相差を測定した結果である。トルク、電流、空隙磁束密度は周波数に関係なく略一定であった。位相差は周波数の増加とともに増加している。(12)式から明らかなように、位相差はトルクに影響する。しかし、 $\alpha = 10^\circ$ 付近では、 $\cos \alpha$ の値が殆ど一定でありトルクは一定になる。

Fig. 4 Torque, current, magnetic flux density, and phase angle vs. frequency

4. 回転子の応答

4.1 回転子のリード

回転子が一回転した時、軸方向に進む距離 q_s をリード

と称することにする。スイッチ ON からスイッチ OFF まで波数 n_f を有する正弦波電流（トーンバースト波）を電機子コイルに供給した時、軸方向移動距離 z は次式により示される。

$$Zr = q_s \frac{n_f}{p} = v_r t_{rz} \quad (13)$$

ただし、 p は磁極対数、 v_r は回転子の軸方向移動速度、 t_{rz} は移動時間である。(13)式の移動時間は、次式により示される。

$$t_{rz} = \frac{n_f}{f} \quad (14)$$

スイッチ ON から任意の時間 t を経過した時の軸方向距離 $Z(t)$ は次式により示される。

$$Z(t) = \frac{Zr}{t_{rz}} t \quad (15)$$

4.2 測定方法

Fig. 5 は測定方法を示す。発振器は、SW を押した瞬間に発振を開始し、カウンタにより正弦波電流の波数 n_f を計数し停止する。発振器の出力を電力増幅器で増幅し、電機子コイルに供給した。ズームレンズは回転子から取り外してある。レーザーダイオードから回転子の側面に投光されたレーザー光は、反射して受光センサ (CCD) により検出される。回転子が Z 方向に移動すると、移動距離に比例した信号が得られるのでこの時間変化を測定した。鏡筒一体型モータを駆動した時の回転子の過渡応答測定法については既に報告した⁴⁾。しかし、回転子に測定機構を連結したので、この方法では無接触で測定することが出来なかった。今回、無接触状態で回転子の応答を測定することが可能になった。

Fig. 5 Method for measuring rotor displacement vs. time

Fig. 6 Rotor displacement vs. time

4.3 測定結果

Fig.6 は、電機子コイルに $NI=17.6A$ peak-zero ($110 \times 0.16A$), $f=13Hz$ 波数 $n_r=40$ の対称三相起磁力を供給し、回転子の軸方向移動距離 $Z(t)$ 対移動時間 t 特性を測定した結果であり、両者は比例関係にある。回転子が始動して停止するまでの移動距離 Z_r およびその移動時間 tr_z に関して、計算値と実測値を比較すると下記のようになる。計算値は、 $q_s=1.6mm$, $p=10/2$ なので(13)式から $Z_r=12.8mm$, (14)式から $tr_z=3.1s$ である。測定値 $Z_r=13.0mm$, $tr_z=3.13s$ と良く一致している。なお、Fig.6 の Trigger signal は、Fig.5 に示した SW を投入した瞬間にトーンバースト信号を発生するための同期信号である。

Fig.7 は、 $M=40$ の時、回転子の軸方向移動距離 Z_r および移動時間 tr_z 特性が周波数 f によりどのように変化するかを測定した結果である。 Z_r および tr_z の計算値は測定値と良く一致している。電機子コイル起磁力 $NI=11.0A$ では、

Fig. 7 Displacement, time, and current vs. power source frequency

$f \geq 10Hz$ の周波数にตอบสนองしなかった。起磁力を大きくする程、トルクも大きくなるので応答周波数は増大する。しかし、起磁力を大きくし過ぎると回転子が行き過ぎることが判明した。これは、回転慣性率に原因していると考えられる。モータが起動できる最小起磁力と周波数との関係を示す曲線から判断すると、周波数が高くなる程、必要最小起磁力が増大している。

5. あとがき

鏡筒一体型ダイレクトドライブモータの特徴は、円環磁石とレンズを組み込んだ回転子を螺旋回転させ、レンズを光学軸方向に移動させることである。今回、新しい駆動方式「三相正弦波励磁方式」を検討し下記の有用な結論を得た。

一定電源周波数の場合、回転子の軸方向移動距離は供給した正弦波の波数に比例し、移動時間は周波数に反比例する。この事実を理論的にも実験的にも確認した。このことは、正弦波の波数と周波数を制御さえすれば、ユーザーが望むズーム比を正確に得ることが出来ることを意味しており、設計上非常に重要な結論である。

今回、二相方形波励磁方式および三相正弦波励磁方式の特性比較を行わなかったが、今後の課題である。

参考文献

- 1) 井上孝志, 白藤芳則, 小野周佑, 矢吹隆宣: *National Technical Report*, 37, no. 3, 70 (1991).
- 2) 高野博夫, 勢木真一: *日本応用磁気学会誌*, 18, 46 (1994).
- 3) H. Takano: *IEEE T-CE*, 47, 132 (1995).
- 4) 高野博夫, 畠中恵司, 井上徹: *電気学会論文誌 D*, 115, 478 (1995).
- 5) 高野博夫, 井上徹, 大西健: *電気学会論文誌 D*, 116, 785 (1996).
- 6) 高野博夫, 上野輝雄: *日本応用磁気学会誌*, 23, 1609 (1999)