磁石可動形リニア振動アクチュエータの駆動方法による効率の検討 Efficiency Dependence upon Drive Methods of Moving-magnet Type Linear Oscillatory Actuator

宇津野 良, 高井 正樹, 水野 勉, 山田 一 *

信州大学工学部電気電子工学科, 長野県長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

* 博士国際協同研究所, 長野県長野市若里 3-10-39 (〒380-0928)

Makoto Utsuno, Masaki Takai, Tsutomu Mizuno and Hajime Yamada*

Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553

* Doctors International Collaboration Institute, 3-10-39 Wakasato, Nagano 380-0928

This paper describes efficiency and losses that depend on the drive methods for a moving-magnet LOA. The two drive methods investigated for an LOA are sinusoidal current drives and rectangular voltage drives. Efficiency is influenced by higher harmonic components using rectangular voltage drives. The following results are obtained: (1) Maximum efficiency is almost equal regardless of the drive method. (2) The displacement of sinusoidal current drives is small compared with that of rectangular voltage drives. (3) Iron losses in the drive methods are 3.2 W and 4.2 W respectively, at 41.3 W input power, and iron loss influences the higher harmonic components.

Key words: linear oscillatory actuator, sinusoidal wave, rectangular wave, efficiency, loss, higher harmonic

1. まえがき

コンプレッサの駆動源として磁石可動形リニア振動アクチュエータ (Linear Oscillatory Actuator, 以下 LOA と略記) の適用が検討されている^{1), 2)}. コンプレッサ用の LOA には, 小形で高効率であることが求められている³⁾.

LOA の駆動方法には, 正弦波定電流駆動, 正弦波定電圧駆動や方形波定電圧駆動などの種々の方法がある. 方形波ならびに鋸歯状波定電流駆動による, LOA の推力特性については検討されている⁴⁾. ここで, 駆動部の回路構成の観点からは, 方形波電圧は波形生成がもっとも簡単であり, 正弦波電流は複雑となる. しかし, 方形波定電圧駆動では励磁電流に高調波成分が含まれるため, 正弦波定電流駆動と比較して LOA の効率に大きな影響を与えられとされる. そこで, 駆動方法の違いによる LOA の効率についての検討が必要となる.

本論文では, 正弦波定電流駆動と方形波定電圧駆動の 2 つの駆動方法に着目して, 磁石可動形 LOA の効率と損失に関する以下の事項について述べている.

- (1) 駆動方法の違いによる LOA の効率
- (2) 駆動方法の違いによる損失の検討

2. 磁石可動形 LOA の構造

Fig. 1 に磁石可動形 LOA の基本構造を示してあり, 上下対象の構造であることから, 同図において上部だけを示し

Fig. 1 Basic structure of a moving-magnet LOA (unit : mm).

Table 1 Specifications of the moving-magnet LOA.

Item	Symbol	Value	Unit
Size		158.8×114×85	mm
Stroke	s	± 10	mm
Mass of mover	M	0.518	kg
Number of turns	N	680	
DC resistance of coil	R_{dc}	2.4	Ω
Frictional force	F_f	8	N
Thrust constant	K_f	70	N/A
Material of yoke		35H440	
Permanent magnet		Nd-Fe-B (NEOMAX-38H) $H_c = 963$ kA/m $B_r = 1.25$ T $(BH)_{max} = 302$ kJ/m ³	

た. Table 1 に LOA の基本仕様を挙げてあり, 無方向性電磁鋼板を用いたヨーク (35H440), コイル, Nd-Fe-B 系永久磁石 (NEOMAX-38H), ブラケットにより構成されている. 上下のコイルは, 1 個あたりの巻数 $N = 680$ 回のもので並列接続されており, 合成直流抵抗は $R_{dc} = 2.4 \Omega$ である. また, Fig. 1 には図示していないが, LOA には共振用の板ばねが取り付けられており, その共振周波数は $f = 37.3$ Hz である.

3. LOA の駆動方法

3.1 システム構成

Fig. 2 に LOA の効率測定ブロックを示した. 本論文では, 負荷として別のリニアモータを用意した. LOA と負荷用モータは, 発振器から電力増幅器を通すことにより, 位相

Fig. 2 LOA efficiency measurement block diagram.

差を持った任意の波形を入力させることが可能である。また、LOAと負荷モータは力センサを介して接続されている。この力センサで測定される負荷より、LOAの機械的出力は算出される⁹⁾。これら全ての測定は、演算記録計にて記録を行った。

3.2 駆動方法

LOAの駆動方法は、正弦波や方形波、定電流や定電圧など、様々な組み合わせが可能である。このなかで、方形波定電圧駆動は駆動回路構成が簡素であり、正弦波定電流駆動は複雑となる。本論文では、これら2つの駆動方法におけるLOAの効率について検討を行う。

3.2.1 駆動波形

Fig. 3 (a)に正弦波電流でLOAを駆動させたときの励磁電流 I 、励磁電圧 V と負荷電流 I_L を示した。定電流駆動を行っているため、励磁電圧 V にはひずみが生じている。Fig. 3 (b)に方形波電圧でLOAを駆動させたときの励磁電圧 V 、励磁電流 I と負荷電流 I_L を示した。本論文では、負荷電流 I_L を位相の基準として、定電流あるいは定電圧で制御している波形との位相差を θ と定めた。すなわち、Fig. 3 (a)では I_L と I の位相差、Fig. 3 (b)では I_L と V の位相差をそれぞれ θ とした。

正弦波電流駆動では励磁電流 $I = 0.80$ A一定、方形波電圧駆動では励磁電圧 $V = 87$ V一定として、共振周波数 $f = 37.3$ Hzで駆動させた。励磁電圧 $V = 87$ Vは、正弦波定電流駆動時において最高効率が得られたときの励磁電圧 V の実効値である。正弦波定電流駆動の $I = 0.8$ Aを基準とする場合、方形波定電圧駆動においても $I = 0.8$ Aが望まれる。しかし、Fig. 3 (b)に示したように電流はひずみ波形となり、また、入力電力 P_i の大きさにより $I = 0.8$ A一定を得ることは不可能となる。そこで、本論文では、励磁電圧一定条件で行うこととし、正弦波定電流駆動において最高効率が得られたときの励磁電圧の実効値 $V = 87$ Vを選定した。このときの励磁電流 I には、第1, 3, 5高調波が含まれており、それぞれ0.60 A, 0.18 A, 0.06 Aであった。また、励磁電流の実効値は $I = 0.45$ A、ひずみ率は $\mu = 0.308$ であった。

(a) Sinusoidal current drives ($I = 0.80$ A).

(b) Rectangular voltage drives ($V = 87$ V).

Fig. 3 Two drive methods for LOA ($f = 37.3$ Hz).

Fig. 4 Efficiency characteristics of LOA depending on phase angle between input current and load current ($f = 37.3$ Hz; $I = 0.8$ A for sinusoidal current drives, $V = 87$ V for rectangular voltage drives).

3.2.2 位相が効率特性に与える影響

Fig. 4に負荷電流と励磁電流あるいは励磁電圧との間の位相が効率に与える影響を示した。正弦波電流駆動では、 $\theta = 180$ deg.において最大効率 $\eta = 78.2\%$ が得られた。また、

方形波電圧駆動では、 $\theta = 135 \text{ deg.}$ において最大効率 $\eta = 77.2\%$ が得られた。以下では、最大効率が得られた位相における損失の検討を行う。

4. 2種類の駆動方法による効率と損失の測定結果

4.1 LOAの効率

Fig. 5 (a)に正弦波電流駆動における効率と変位の出力依存性を示した。ここで、LOAの効率 η は次式により与えられる。

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{\int_0^T F_L dx}{\int_0^T i v dt} \quad (\%) \quad (1)$$

ここに、 P_o : 機械的出力[W], P_i : 入力電力[W], f : 周波数[Hz], F_L : 負荷[N], x : 変位[m], T : 周期[s], i : 駆動電流[A], v : 駆動電圧[V], t : 時間[s]

効率 η は出力 $P_o = 32.3 \text{ W}$ において最大となり、 $\eta = 78.2\%$ となった。変位 x_m は、 P_o の増加にしたがい比例的に増加した。Fig. 5 (b)に方形波電圧駆動における効率と変位の出力依存性を示した。効率 η は出力 $P_o = 38 \text{ W}$ 付近で飽和傾向を示し、 $P_o = 42 \text{ W}$ において $\eta = 77.2\%$ となった。変位 x_m は P_o の増加にしたがい、わずかではあるが比例的に増加した。

効率 η は、出力 P_o の小さい範囲では正弦波電流駆動は方形波電圧駆動に対して約8%大きい値であった。しかし、最高効率は駆動方法に関わらず約77%の効率が得られた。出力 $P_o = 20 \text{ W}$ 以下の範囲では、正弦波電流駆動における変位 x_m は、方形波電圧駆動より34%小さかった。しかし $P_o = 30 \text{ W}$ 以上の範囲では、正弦波電流駆動と方形波電圧駆動の変位 x_m の差が縮まり、約13%小さいだけとなった。以上のことから、効率だけの比較では駆動方法による違いは見られなかった。しかし変位を考慮した場合、正弦波電流駆動は小さな変位で方形波電圧駆動時と等しい効率が得られた。正弦波電流駆動は、方形波電圧駆動と比較して出力 $P_o = 25 \text{ W}$ 以下の小さい範囲においても高効率であった。

本節では、2種類の駆動方法におけるLOA自体の効率について検討を行った。将来、コンプレッサの駆動源としてLOAを適用する場合には、コンプレッサ負荷を考慮したシステム効率や変位に対する検討が必要である。

4.2 LOAの損失

Fig. 6に機械損の実測値と実測値の近似曲線を示した。機械損 W_m は、ヨーク部を取り外したLOAの可動部を負荷用リニアモータで駆動することで測定を行った。機械損 W_m は、変位 x_m に対して二次関数的に増加した。正弦波電流駆動と方形波電圧駆動は、ともに時間 t に対する変位 x_m の関係が正弦波状であったため、 x_m に対する W_m の関係は駆動方法に関わらず等しいとみなして次式で近似した。

(a) Sinusoidal current drives ($I = 0.80 \text{ A}$).

(b) Rectangular voltage drives ($V = 87 \text{ V}$).

Fig. 5 Dependence of efficiency characteristics on output of LOA ($f = 37.3 \text{ Hz}$).

Fig. 6 Measured values and approximate curve of mechanical loss in LOA ($f = 37.3 \text{ Hz}$).

$$W_m = 0.19 x_m^2 + 0.17 x_m + 0.05 \quad (\text{W}) \quad (2)$$

LOAの鉄損 W_i は、銅損 $W_c (= R_{dc} i^2)$ の温度変化による影響がないものとする、次式で与えられる。

$$W_i = P_i - P_o - W_m - R_{dc} i^2 \quad (\text{W}) \quad (3)$$

Fig.7に入力電力 $P_i = 41.3 \text{ W}$ における正弦波電流駆動と方形波電圧駆動におけるLOAの各損失の割合をそれぞれ示した。なお、鉄損算出における累積誤差は、実験誤差および計算誤差をあわせて1%程度である。同図(a)は正弦波電流駆動における各損失の割合であり、変位は $x_m = 4.3 \text{ mm}$ である。同図(b)は方形波電圧駆動における各損失の割合であり、変位は $x_m = 5.4 \text{ mm}$ である。LOAの機械損は、Fig. 7 (a)では4.3 W(10.4%, 全損失中の47.8%), Fig. 7 (b)では5.6 W(13.8%, 全損失中の49.6%)であった。LOAの全損失のうち、機械損が約50%占めていることが明らかになった。LOAのベアリングを現状のものから摩擦力の少ないベアリングに変更することにより、大幅な効率の向上が期待できる。

入力電力 P_i に対する鉄損 W_i の割合は、Fig. 7 (a)において7.7%, Fig. 7 (b)において10.2%であり、その差は1 Wであった。ここで、鉄損 W_i にはヒステリシス損 W_h と渦電流損 W_c が含まれており、周波数 f 、周波数の2乗 f^2 にそれぞれ比例する。第 n 高調波は、基本波成分の n 倍の周波数の正弦波であるため、高調波含有率の増加とともに鉄損 W_i は増加する。したがって、正弦波電流駆動時よりも方形波電圧駆動時には高調波含有率の増加とともに鉄損が生じることとなる。また、本LOAはばね共振を利用した周波数 $f = 37.3 \text{ Hz}$ だけで駆動を行っていたが、高い周波数での駆動ではさらに鉄損が大きくなると考えられる。

方形波電圧駆動では、駆動電流の高調波成分の影響により鉄損が増加した。LOAの鉄損の視点から見た場合においても、正弦波電流駆動は方形波電圧駆動と比較して損失が少なく、高効率であることが判明した。

Fig. 7 Loss separation of LOA from input power of 41.3 W.

5. あとがき

本論文では、磁石可動形LOAに正弦波電流駆動と方形波電圧駆動を用いた場合の効率、損失について検討を行い、下記の結論を得た。

(1) 駆動方法の違いによる LOA の効率

正弦波電流駆動における最高効率は $\eta = 78.2\%$ であり、方形波電圧駆動における最高効率は $\eta = 77.2\%$ であった。効率の比較を行った場合、両者に大きな違いは見られなかった。出力 $P_o = 20 \text{ W}$ 以下の範囲では、正弦波電流駆動における変位 x_m は方形波電圧駆動より約34%小さいが、 $P_o = 30 \text{ W}$ 以上の範囲では約13%となり、差は小さくなった。正弦波電流駆動は、方形波電圧駆動と比較して出力 $P_o = 25 \text{ W}$ 以下の小さい範囲においても高効率であった。

(2) 駆動方法の違いによる損失の検討

入力電力 $P_i = 41.3 \text{ W}$ における正弦波電流駆動と方形波電圧駆動の機械損はそれぞれ $W_m = 4.3 \text{ W}$, 5.6 W であった。これらはベアリングの変更により低減できると考えられる。方形波電圧駆動における鉄損は、正弦波電流駆動の場合と比較して励磁電流の高調波成分の影響により鉄損が増加した。

文 献

- 1) Robert Rdlich, Reuven Unger, and Nicholas van der Walt, *International Compressor Engineering Conference*, pp. 341-346, (1996).
- 2) M. Sanada, T. Yokota, S. Morimoto, Y. Takeda, *T. IEE Japan*, Vol. 120-D, No. 4, pp. 520-526, (2000).
- 3) M. Ito, S. Morinaga, *Journal of the JSAEM*, Vol. 7, No. 3, pp. 269-272, (1999).
- 4) M. Watada, K. Yanashima, Y. Oishi, D. Ebihara, H. Dohmeki, *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 29, No. 6, pp. 3361-3363, (1993).
- 5) T. Mizuno, T. Yaegashi, H. Yamamoto, K. Shibuya, H. Yamada, *Sensors and Actuators, A* 91, pp. 137-140, (2001).
- 6) The Institute of Electrical Engineers of Japan, *Electrical engineering handbook - 6th edition*, *IEE Japan*, pp. 133-134, (The OHM-Sha, Tokyo, 2001).

2001 年 10 月 9 日受理, 2002 年 1 月 17 日採録