研究論文

アキュムレータを用いたアイドリングストップ方式による油圧源の省エネルギー*
(第2報, 負荷流量一定時の省エネルギー)

杉 村 健**, 大 田 真 平**, 鈴 木 勝 正***, 野 中 謙一郎***

Energy Saving of Oil Hydraulic Pump Unit by Idling Stop Using Accumulator
(2nd Report: Energy saving at constant load flow rate)

Ken SUGIMURA, Sinpei OTA, Katsumasa SUZUKI, Kenichirou NONAKA

As a result of a shortage of energy resources such as oil and the need to protect the earth's environment, energy saving efforts have been made in a number of fields. In the case of hydraulic equipment, energy saving in pump units is key because this unit is the major consumer of energy.

Up to the present, variable-displacement hydraulic pump units (VD pump units) and inverter-control hydraulic pump units (INV pump units) have been widely employed. Here the authors propose the use of an intermittently operated hydraulic pump unit coupled with an accumulator (ACC pump unit). In a previous report, the superiority of the ACC pump unit was demonstrated through an experiment using a modeled machine tool and a simplified load model. In this report, we compare electric power consumption, pump output pressure, rotation speed and efficiency of the VD pump unit, INV pump unit and ACC pump unit when hydraulic fluid is supplied to the load at a fixed flow rate. In addition, the effects of the accumulator volume and the pressure ratio between the upper and lower limits on efficiency and the ON-OFF switching period of the ACC pump unit are determined.

Key words : Energy Saving, Oil Hydraulic Pump unit, Accumulator, Idling Stop, Efficiency

1. 緒 言

地球環境の保護や石油などのエネルギー資源の枯渇対策などから、様々な分野で省エネが進められている。油圧分野においても省エネは重要な課題であり、多くの工夫がなされている。油圧装置による作業では作動油の使用流量が大幅に変化する場合が多いが、固定容量形の油圧源ポンプを可変容量形（以下VD油圧源と呼ぶ）にすることやインバータ駆動（INV油圧源）にすることにより油圧源の省エネを図ってきた。可変容量形やインバータ駆動形はそれ以前の方法に比べて、出力流量を必要量まで低下させ、無駄を抑えることができる。それにより消費エネルギーを低下させることができるが、ポンプの効率も同時に低くなる。

この様な時、油圧源にアキュムレータを用いると、アキュムレータの蓄圧機能を使ってポンプ駆動用電動機の間欠的な運転、いわゆるアイドリングストップ式運転（ACC油圧源）が可能となり無駄な消費電力の削減が実現できる。この方式は技術的に難しいことではなかったが、従来ポン

プを頻繁にON-OFFする使用法は積極的には用いられて来なかった¹⁾。最近、この方式を採用した工作機械が一部出荷され、高い評価を得ている。

ACC油圧源ではポンプが回転する時は、常にポンプの最大流量でかつ高効率の状態運転し、余った流量をアキュムレータに蓄積させて、一定量蓄積して圧力が設定値を上まわった時にポンプを停止させる（アイドリングストップ）。停止中はアキュムレータより作動油が供給される。圧力が設定値を下まわった時点で再びポンプを回転させる。これを繰り返すことにより、ポンプは常に高い効率の状態でのみ回転されるのでトータルとして高い効率を得られる。著者らはACC油圧源の上述した優位性を、最初に工作機械で油圧を利用することを想定したモデルを用いた実験により示し²⁾、続いて間欠的に負荷に作動油を流す単純化したモデルを用いた実験により示した³⁾⁻⁵⁾。この優位性は作動油を流している時間の割合が特に短い場合に顕著になる⁶⁾。

本論文ではアクチュエータが連続作動する場合に着目し、変動がなく一定の流量を負荷に供給する場合のACC油圧源の省エネ性能を示す。

ACC油圧源は他の油圧源と異なりON-OFF動作を継続して行うので、停止時には静かであるが、再起動時に多少の衝撃を発生させるとともに、大きな電力のピークが発生し電気系統に負担が掛かる⁵⁾。またアキュムレータを利用し

*平成24年1月16日 原稿受付

**東京都市大学大学院機械システム専攻
(所在地 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

***東京都市大学機械システム工学科

ているため、圧力を上昇と下降させる必要があるのですが、例えば負荷の必要圧力が決まっている場合には、余分な圧力上昇を必要とするため効率の低下をまねく。そこでACC油圧源におけるアキュムレータの容積および下限に対する上限設定圧力の比が、効率とポンプのON-OFF動作の周期に及ぼす影響を明らかにする。

2. 主な記号

E_L : 負荷消費エネルギー
 E_p : ポンプ出力エネルギー
 L_L : 負荷消費動力
 L_n : 電動機消費電力
 P_0 : アキュムレータ封入圧力
 P_d : 下限圧力
 P_L : 負荷側の必要圧力
 P_u : 上限圧力
 p : アキュムレータ内の圧力
 Q_L : 油圧源の負荷流量
 Q_p : ポンプ回転時の流量
 q_i : アキュムレータ部流入流量

r_p : 上限下限の圧力比 (P_u / P_d)
 r_q : 負荷流量比 (Q_L / Q_p)
 t : 時間
 V_0 : アキュムレータ容積
 V_d : 下限圧力での窒素体積
 V_u : 上限圧力での窒素体積
 V : アキュムレータ内の窒素体積
 η_a : アキュムレータの効率
 η_u : 油圧源の効率
 κ : 比熱比

3. 実験装置

本研究の実験装置の構成をFig. 1に示す。①が油圧源の負荷で、絞り弁と流量計で構成されている。図では②のACC油圧源と接続された構成を示しているが、③のVD油圧源または④のINV油圧源とも接続して計測する。ACC油圧源とVD油圧源のポンプと電動機は共用しており、ACC油圧源ではカットオフ圧力を十分高く設定することにより、実験の範囲では固定容量形ポンプとして動作させている。アキュムレータはブラダ形を使用している。これらの油圧源

Fig. 1 Experimental equipment

Table 1 Parameter values of pump unit from catalogue

	ACC pump unit, VD pump unit	INV pump unit
Type	Vane	Gear
Displacement volume [cc/rev]	8.0 (Maximum)	5.7 (Fixed)
Maximum operating pressure [MPa]	4.0	4.0
Rated output of electric motor [kW]	0.75	1.5

Table 2 Experimental condition

$P_d = 2.6 \text{ MPa}$
$P_u = 3.0 \text{ MPa}$ (Except Fig. 9 and 12)
$V_0 = 3.0 \text{ L}$ (Except Fig. 10 and 11)
$\kappa = 1.4$
Viscosity: $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Temperature: $30 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$

は前報⁵⁾と同一である。各カタログ値をTable 1に、実験条件をTable 2に示す。

4. 各油圧源の特性の比較

4.1 ACC油圧源の特性

ACC油圧源の運転中の各部の変化の一例をFig. 2に、特性の測定結果をFig. 3に示す。出力圧力は上限と下限の各設定圧力の間を上下する。本研究では負荷に一定圧力 P_L を供給することを目的として評価する。ここでは下限圧力を P_L としている。実際の出力圧力が負荷に必要な圧力 P_L を上まわった場合には減圧弁など何らかの方法で減圧して P_L にする必要があるため、油圧源が出力して負荷で消費される動力 L_L (Output power) の計算では、(1式のように、実際の出力圧力が P_L を上まわる場合でも計算用の圧力として P_L を用いる。(2式で L_L と電動機消費電力との比を求め、油圧源の効率 η_u とする。

$$L_L = P_L Q_L \quad (1)$$

$$\eta_u = \frac{L_L}{L_N} \quad (2)$$

一般的にはポンプの効率として、ポンプ軸動力に対する

Fig. 2 Output pressure, rotation speed, flow rate and electric power of ACC pump unit

Fig. 3 Characteristics of ACC pump unit

Fig. 4 Characteristics of VD pump unit

油に与えられた動力 (油動力) の比を用いる場合が多い。それに比べ本研究の効率 η_u は電動機効率による低下分および余分な圧力上昇による損失分を含むので前者のおおよそ80%程度になっている。

Fig. 3に示されるように、ACC油圧源の効率 η_u は流量を変えても殆んど変化しないのが特長である。

4.2 VD油圧源の特性

VD油圧源の特性の測定結果をFig. 4に示す。VD油圧源では、カットオフ圧力が2.6MPaになるようにフルカットオフ圧力を3.4MPaに設定した。負荷に必要な圧力 P_L をカットオフ圧力に設定しているため、4.1節と同様にそれ以上の圧力上昇分は不要 (損失) と考える。流量の減少に伴って負荷消費動力と効率が低下している。電動機の回転速度は $1,400 \text{ min}^{-1}$ から $1,500 \text{ min}^{-1}$ 程度まで変化している。

4.3 INV油圧源の特性

INV油圧源の特性の測定結果をFig. 5に示す。流量を増加させるとポンプ回転速度が増加し、流量 14 L/min 程度まで吐出圧力が殆んど変化せず一定値2.6MPaに保たれている。また効率も流量と共に増加している。

4.4 3種類の油圧源の効率の比較

ACC油圧源、VD油圧源、INV油圧源の3種類の油圧源の効率を取り出し、Fig. 6に示す。流量が最大吐出量近辺では3者の効率の差は小さく、それぞれの最大効率となる。流量を減少させるのに従ってVD油圧源、INV油圧源では効

Fig. 5 Characteristics of INV pump unit

Fig. 6 Efficiency and flow rate of each pump unit

率が減少し、流量0で効率は0となる。一方ACC油圧源の効率は流量によってあまり変化せず、しかも高い値を保っている。これは効率の高い領域でだけでポンプを回転させ、必要の無い時は停止させるからである。従って流量の少ない使用状態でACC油圧源は優れた特性を示す。

一般的に油圧を利用する場合には、最大吐出流量だけで使用する時間はむしろ少なく、流量を0から最大吐出流量の間で変化させて利用する時間が長いと考えられるので、ACC油圧源を使うことによって省エネとなる場合が多い。

5. ACC油圧源における効率と切替え周期に及ぼすアキュムレータ容積と設定圧力比の影響

前章でACC油圧源が優れた効率特性をもっていることを示したが、アキュムレータ内の窒素を圧縮して作動油を蓄積と放出をさせるため、それに伴って圧力を上下させる必要があるのが欠点である。下限圧力を負荷の必要圧力とする場合に、それよりも高い圧力をポンプで発生する必要があるため、その分は損失と考えなければならない。またポンプは一定回転速度ではなく、起動と停止を頻繁に繰り返さなければならない。ここでは下限圧力に対する上限圧力の比とアキュムレータ容積が効率と切り換え周期に及ぼす影響について明らかにする。

Fig. 7のようにアキュムレータを取り付けて負荷に一定流量 Q_L を供給する場合について、Fig. 8に一例（理論計算

Fig. 7 Input flow and load flow of accumulator

Fig. 8 Pressure p of ACC pump unit

結果)を示すように、初めから T_1 の間ポンプが一定速度で回転し、アキュムレータに余剰油が蓄積され、次に T_2 の間ポンプが停止し、この間にはアキュムレータより作動油が吐出される $0 < t < T_1 + T_2$ の間の一周期を考える。作動油の圧縮性を無視し、ポンプは瞬時に起動して一定回転速度に到達し、停止も瞬時に行われると仮定する。圧力 p は、 $P_d < p < P_u$ であり、この間の圧力変化は短時間の現象と考え、可逆断熱変化（等エントロピー変化）を仮定すると^{7), 8)}、気体の状態式は(3)式で表される。

$$pv^\kappa = P_d V_d^\kappa = P_u V_u^\kappa \quad (3)$$

ここで κ は窒素の比熱比で1.4とする。

アキュムレータの封入圧力と下限圧力の関係には十分時間をかけた変化として等温変化を仮定すると、両者の関係は次式で表される。

$$P_0 V_0 = P_d V_d \quad (4)$$

$0 < t < T_1$ の間はポンプが回転しているので、アキュムレータ内部の窒素体積は次式で表される。

$$v = V_d - (Q_p - Q_L)t \quad (5)$$

(3)式を用いて変形すると、アキュムレータ内部の圧力は次式で表される。

$$p = P_d \left(\frac{V_d}{V_d - (Q_p - Q_L)t} \right)^\kappa \quad (6)$$

$t = T_1$ の時、(7)式が得られ、 T_1 が(8)式で表示される。

$$V_d - V_u = (Q_p - Q_L) T_1 \quad (7)$$

$$T_1 = \frac{V_d}{Q_p - Q_L} \left\{ 1 - \left(\frac{P_u}{P_d} \right)^{-\frac{1}{\kappa}} \right\} \quad (8)$$

一方、 $T_1 < t < T_1 + T_2$ の間はポンプが停止しているので、アキュムレータ内部の窒素体積は次式で表される。

$$v = V_u + Q_L(t - T_1) \quad (9)$$

(3)式を用いて変形すると、アキュムレータ内部の圧力は次式で表される。

$$p = P_d \left\{ \frac{V_d}{V_d \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{1}{\kappa}} + Q_L(t - T_1)} \right\}^{\kappa} \quad (10)$$

$t = T_2$ の時、(11)式が得られ、(3)式を用いて変形すると、ポンプ停止時間 T_2 は(12)式で表される。

$$V_d - V_u = Q_L T_2 \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{V_d}{Q_L} \left\{ 1 - \left(\frac{P_u}{P_d} \right)^{-\frac{1}{\kappa}} \right\} \quad (12)$$

作動油の蓄積と放出の一周期を T_0 とすると、次式で表される。

$$T_0 = T_1 + T_2 = \frac{V_d}{Q_p} \frac{1}{\frac{Q_L}{Q_p} \left(1 - \frac{Q_L}{Q_p} \right)} \left\{ 1 - \left(\frac{P_u}{P_d} \right)^{-\frac{1}{\kappa}} \right\} \quad (13)$$

次にポンプからの供給エネルギーを求めると、ポンプはONの間だけ出力し、この間のポンプ出力エネルギー E_p は次式で表される。

$$E_p = \int_0^{T_1} p Q_p dt \quad (14)$$

p に(6)式を代入すると、次式が得られる。

$$E_p = \frac{P_d V_d}{(\kappa - 1) \left(1 - \frac{Q_L}{Q_p} \right)} \left\{ \left(\frac{P_u}{P_d} \right)^{1 - \frac{1}{\kappa}} - 1 \right\} \quad (15)$$

負荷消費エネルギー E_L の算出に当たっては、圧力を p ではなく負荷側の必要圧力 P_d を用いると、

$$E_L = (T_1 + T_2) Q_L P_d \quad (16)$$

であり、(13)式を代入して、次式で表される。

$$E_L = V_d P_d \frac{\left\{ 1 - \left(\frac{P_u}{P_d} \right)^{-\frac{1}{\kappa}} \right\}}{\left(1 - \frac{Q_L}{Q_p} \right)} \quad (17)$$

E_p に対する E_L の割合をアキュムレータの効率 η_a と定義すると、

$$\eta_a = \frac{E_L}{E_p} = \frac{(\kappa - 1) \left\{ 1 - \left(\frac{P_u}{P_d} \right)^{-\frac{1}{\kappa}} \right\}}{\left(\frac{P_u}{P_d} \right)^{1 - \frac{1}{\kappa}} - 1} \quad (18)$$

である。

次に(13)式および(18)式で示される周期と効率の計算結果と実験結果を示す。Fig. 9に下限設定圧力に対する上限設定圧力の比 r_p およびポンプ吐出流量に対する負荷流量の比 r_q が油圧源の効率 η_u と切換え周期 T_0 に及ぼす影響を示す。 $Q_p =$

125L/minである。負荷流量が大きくなると、ポンプ運転時間 T_1 が長くなり、負荷流量比が1に近づくとも無限大になる。反対に負荷流量比が0に近づくともポンプ停止時間 T_2 が無限大になる。したがってFig. 9, Fig. 10のように T_1 と T_2 の和である周期 T_0 は(13)式より両端で無限大、中央で最小値をとる。圧力比 r_p が大きくなるのに従って切換え周期 T_0 は長くなるが効率 η_u は低下するのが分かる。

Fig. 9 Effect of pressure ratio and flow rate on efficiency η_u and period T_0 of ACC pump unit

Fig. 10にアキュムレータ容積および負荷流量が油圧源の効率 η_u と切換え周期 T_0 に及ぼす影響を示す。アキュムレータ容積により周期は大幅に変化するが効率はあまり変化しないことが分かる。

Fig. 10 Effect of accumulator volume and flow rate on efficiency η_u and period T_0 of ACC pump unit

Fig. 11は負荷流量比 r_q が48%のときのアキュムレータ容積に対するアキュムレータ効率 η_a と周期 T_0 の関係を示す。理論計算では周期 T_0 は比例で効率 η_a は一定となるが、実験結果も計算値に近い値となっている。

Fig. 12は同じ負荷流量比 r_q での圧力比 r_p がアキュムレータ

Fig. 11 Effect of accumulator volume on efficiency η_a and period T_0 of ACC pump unit

の効率 η_a と周期 T_0 に及ぼす影響を示す。圧力比の増加に対して理論計算の周期 T_0 は増加、効率 η_a は減少となっている。実験結果も理論計算結果とよく一致している。

Fig. 12 Effect of pressure ratio on efficiency η_a and period T_0 of ACC pump unit

6. 結 言

著者らは3種類の油圧源により効率の比較を行って来ており前報で、工作機械で油圧を利用することを想定したモデルによる実験、および間欠的に負荷に作動油を流す単純化したモデルによる実験によりACC油圧源が優れていることを明らかにした。今回の研究では、一定流量を定常的に負荷に供給する場合でも、ポンプの可能な最大吐出流量よりも少ない流量を負荷に供給する場合にはACC油圧源が優れていることを示した。

アキュムレータ容積および下限に対する上限設定圧力の

比が効率と切り換え周期に及ぼす影響について明らかにした。

最後に、実験を行うに当たり、本学卒研学生の安藤邦生氏、山田兆路氏の助力を得たことを記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 内田條治：高効率化への考察，油圧化設計，Vol. 13, No. 11, p. 10-13 (1975)
- 2) Katsumasa Suzuki, Yoshitaka Niimura, Kazutoshi Akitani, Ken Sugimura: Energy Saving of Oil Hydraulic Pump Unit by Idling Stop Method Using an Accumulator, 10th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization, Moscow Russia (2009)
- 3) Ken Sugimura, Katsumasa Suzuki: Energy Saving of Oil Hydraulic Pump Unit by Idling Stop Using an Accumulator, 7th International Fluid Power Conference, Aachen Germany (2010)
- 4) Ken Sugimura, Katsumasa Suzuki, Shinpei Ota, Teturo Doi: Energy Saving of Oil Hydraulic Pump Unit by Idling Stop Using an Accumulator, 12th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere Finland (2011)
- 5) 杉村健，大田真平，土井哲郎，鈴木勝正，野中謙一郎：アキュムレータを用いたアイドリングストップ方式による油圧源の省エネルギー 第1報，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 42, No. 4, pp. 14-20 (2011)
- 6) Sinpei Ota, Ken Sugimura, Katsumasa Suzuki: Energy Saving of Oil Hydraulic Pump Unit by Idling Stop with Accumulator, JFPS International Symposium, p. 433-439 (2011)
- 7) 中野和夫，田中豊：油圧用ブラダ形アキュムレータのエネルギー収支（第1報 熱時定数の実験的検討），油圧と空気圧，Vol. 22, No. 6, p. 96-102 (1991)
- 8) 田中豊，中野和夫：油圧用ブラダ形アキュムレータのエネルギー収支（第2報 連続サイクルにおけるエネルギー効率の評価），油圧と空気圧，Vol. 23, No. 3, p. 99-105 (1992)