

省エネ・高精度油圧アクチュエータ駆動システム

—AC サーボ油圧システム—

Energy-saving and Precision Hydraulic actuator driving system

—AC-servo Hydraulic system—

キーワード

省エネ, 高精度, 油圧システム, AC サーボモータ, 両回転ポンプ, フィードバック制御

部品事業部 技術二部

久保 光生

■ 摘要

現在, 温暖化防止をはじめとして世界的に地球環境問題への取り組みが行われており, 省エネ法の改正など, 企業に対する規制も強化されてきている。それに伴い各分野で省エネが求められているが, さまざまな機械で使用されている油圧システムも例外ではない。その一方, 加工製品の高精度化に伴って, 制御性能の高精度化の要求も高まっている。これらの要求に応え得る新しい概念の油圧アクチュエータ駆動システムとして商品化したものが「AC サーボ油圧システム」である。

■ Abstract

Now, the measure is globally taken for global environment problems, for example, warming prevention. The regulation on companies has also been tightened up, such as revision of Law concerning the Rational Use of Energy. Therefore, energy saving is called for in each field, the hydraulic system currently used by various machines is not an exception. On the other hand, precision controlled system is required for precision manufactured goods. It is "AC-servo Hydraulic system" which is new concept hydraulic actuator driving system, can meet these demands.

1. はじめに

近年, 地球環境問題への対応の一環として, 各分野で省エネが求められており, 油圧機器に対しても省エネ化の要求は大きい。不二越では機器効率の向上などさまざまな取り組みを行っており, その結果の一つとして工作機械のクランプ・チャック用途に適した省エネ油圧ユニット「ナチッコII」を商品化している。一方, 鍛造機械や成形機械などでは, 省エネ化の要求とともに, 加工製品の高精度化にともない油圧システムに対する高精度化要求も高まっている。そのためこれらの機械においても, 制御性の良さ, 省エネの点から出力の小さいものから電動化が進んでいるが, 高負荷対応に少なからず問題を抱えている。そこで不二越では, シンプルで高負荷対

応が容易な油圧システムの良さに, 電動システムの制御性の良さと省エネ性を融合した油圧制御システム「AC サーボ油圧システム」を商品化した。これは AC サーボモータで油圧ポンプを駆動し, ロボットで培ったデジタル制御技術によりその回転数と方向を制御してシリンダの位置・速度・圧力を高精度に制御する油圧制御システムである。以下にシステムの概要について紹介する。

2. 動作原理

動作原理を図 1 の油圧リフトを例に説明する。両回転の油圧ポンプにサーボモータが直結されており, 油圧ポンプを正転させると油が図 1(a)の方向に流れシリンダが伸びてテーブルが上昇する。逆転さ

せると油が図 1(b)の方向に流れシリンダが縮んでテーブルが下降する。シリンダが伸縮する際に生じる油の過不足分は、補助バルブを介してタンクとやりとりする。テーブルの動作方向はポンプの回転方向で制御し、動作速度はポンプの回転速度で制御する。また、ポンプの回転を止めることで停止する。

簡単に言えば、電動システムがモータの回転を減速機、ボールネジを介して直線運動に変換しているのに対して、「ACサーボ油圧システム」はポンプ、シリンダを介してモータの回転運動を直線運動に変換していると考えられることもできる。

しかし、実際にはモータの回転とシリンダの動きは1対1ではない。そこで位置センサや圧力センサ信号をフィードバックし、制御的にポンプ回転を補償してやることで動作精度を確保している。

3. 特長

ここでは、このシステムの特長について述べる。

(1) 従来油圧システムに比べ、電動システムと同等の省エネルギー

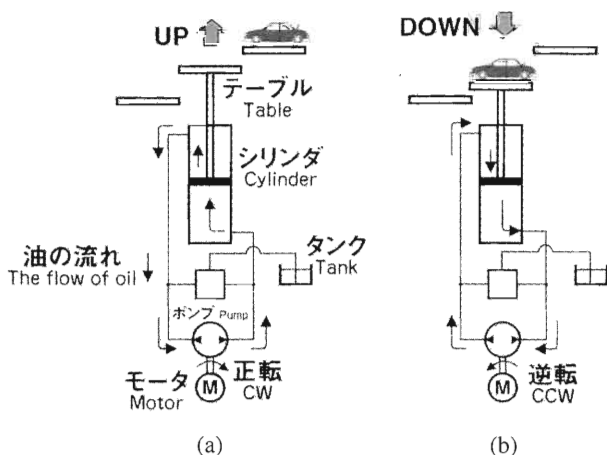


図 1 動作原理説明図

- ①必要な時に必要な分だけポンプを回転させる。
(仕事をしないときはポンプを止める)
- ②圧力、流量制御バルブを使用せず、制御バルブによるエネルギー損失がない。
- ③油温上昇が小さく、作動油寿命も向上する。
- ④冷却装置なしでも作動油量の低減が可能で、タンクを小さくできる。
- ⑤必要な時にのみ回転するので、従来システムに対して低騒音になる。

(2) 電気-油圧サーボシステムや電動システムと同等に高精度なシステム

- ①位置・速度・圧力のフィードバック制御を前提とした高精度システムである。
- ②独自の油圧制御技術を盛り込んだ油圧サーボコントローラによる高精度デジタル制御を実現する。

(3) 電動システムに比べ、シンプルな機構と高負荷対応が容易

- ①油圧源からシリンダへの配管 2 本のみで、駆動部と駆動源の配置自由度が高い。
- ②点接触で負荷を受けるボールネジに対し、面で受ける油圧シリンダにより寿命が長い。
- ③ポンプ容量設定によりいわゆる“減速比”をモータ容量に合わせ無段階に最適設定が可能である。
- ④重力相殺力をモータトルクではなく、カウンターバランスバルブを用いた油圧力による分担も可能である。
- ⑤高圧化により推力 UP も容易である。

表 1 に他のシステムと「ACサーボ油圧システム」の対比を示す。

表 1 他のシステムと「ACサーボ油圧システム」の対比

| | 電動システム | ACサーボ油圧システム | 電気-油圧サーボシステム |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 駆動部機構 | ○ (ボールネジ+減速機) | ◎ (簡単) | ◎ (簡単) |
| 高負荷対応 | △ (高負荷ボールネジ) | ◎ (容易) | ◎ (容易) |
| メンテナンス性 | ○ (グリース補給要) | ○ (作動油交換要) | △ (作動油管理厳しい) |
| 寿命 | △ (ボールネジ摩耗) | ◎ | ○ (作動油寿命) |
| 省エネ | ◎ | ◎ | × |
| 速度制御精度 | ◎ (位置センサ使用) ○ (位置センサ未使用) | ◎ (位置センサ使用) △ (位置センサ未使用) | ◎ (位置センサ使用) △ (位置センサ未使用) |
| 位置制御精度 | ◎ (位置センサ使用) ○ (位置センサ未使用) | ◎ (位置センサ使用) × (位置センサ未使用) | ◎ (位置センサ使用) × (位置センサ未使用) |
| 推力制御精度 | ◎ (ロードセル使用) △ (モータトルク制御) | ◎ (圧力センサ使用) △ (モータトルク制御) | ◎ (圧力センサ使用) × (圧力センサ未使用) |

◎優れている, ○普通, △やや劣る, ×不可またはかなり劣る

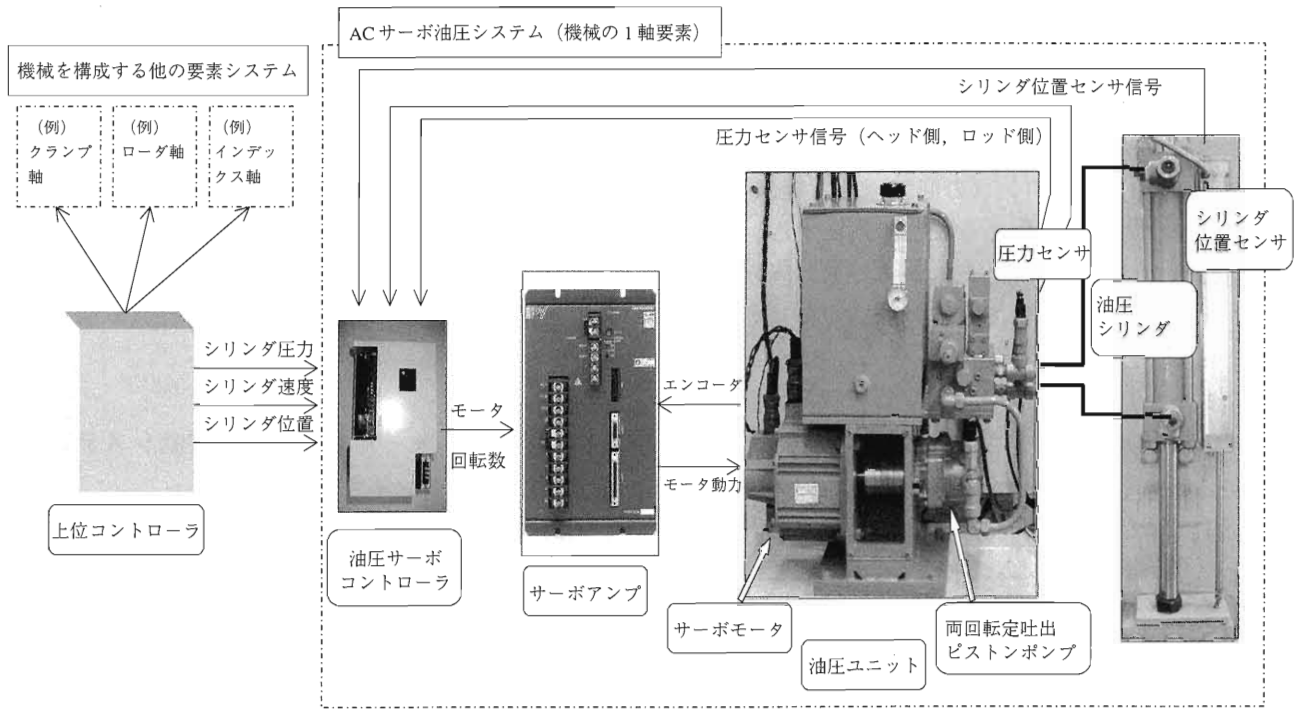


図2 システム全体構成

4. システム構成

ここでは、システムの構成とその構成要素について説明する。

まず、システムの全体構成について図2に示す。「ACサーボ油圧システム」は、機械においては、1軸要素システムに相当し、この部分が商品としての提供範囲となる。機械を構成する他の要素を含め機械全体を制御する上位コントローラから、機械の1軸として動作指令を受け、指令にシリンダが追従動作するように制御される。

このシステムは、油圧サーボコントローラ、サーボアンプ、油圧ユニット、油圧シリンダなどから構成され、油圧ユニットと油圧シリンダ間を2本の油圧配管で接続する。

次に、各構成要素について説明する。

(1) 油圧サーボコントローラ

圧力センサ信号とシリンダ位置センサ信号をフィードバックし、上位コントローラからのシリンダ動作指令に追従するようにサーボアンプを介してモータの回転、つまり、ポンプの回転を制御する。シリンダの位置、速度、圧力の制御は全てポンプの回転数と方向制御により行う。システムの制御性能はこのコントローラに依存するところが大きく、油温によるポンプ内部漏れ量や回路リー

ク量の違いなどもこのコントローラにより補償される。

位置、速度、圧力の指令方法としては、アナログ電圧、接点、通信の組合せ(9通り)が可能で、さまざまな上位コントローラに対応できる。

また、圧力制御部と速度制御部の操作量を比較し、その大小で制御モードを切り換える独自の制御モード自動切換機能を搭載している。これにより、負荷状態に応じて速度・位置制御から圧力制御へ、または逆へ、制御モードがスムーズに切り替わる。また、上位コントローラで制御モード切換点を意識する必要がなく、上位コントローラ側での処理も簡単にできる。制御ブロック図を図3に示す。

(2) サーボアンプ

油圧ユニットに搭載するサーボモータに対応したアンプを使用する。モータ容量により使用するアンプ容量も変える必要がある。

(3) 油圧ユニット

ACサーボモータ、両回転ポンプ、タンク、補助バルブ等をまとめて油圧ユニットとして構成する。

ACサーボモータは、システムに必要なポンプ出力に応じて容量選定を行う。また、両回転ポン

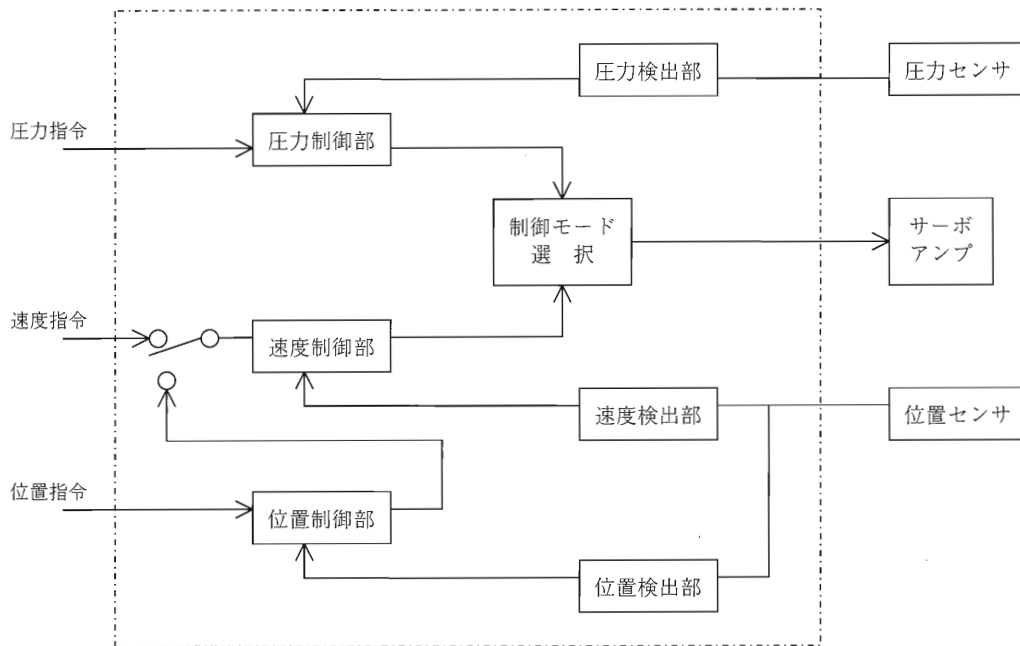


図3 制御ブロック図

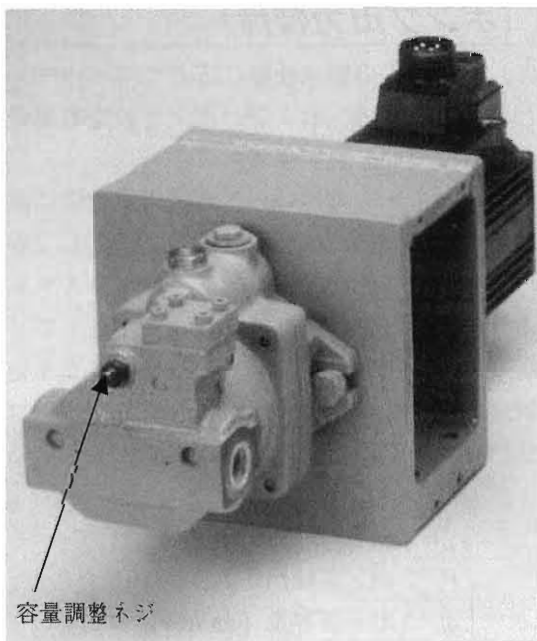


図4 両回転ポンプ（手前）とサーボモータ（奥）

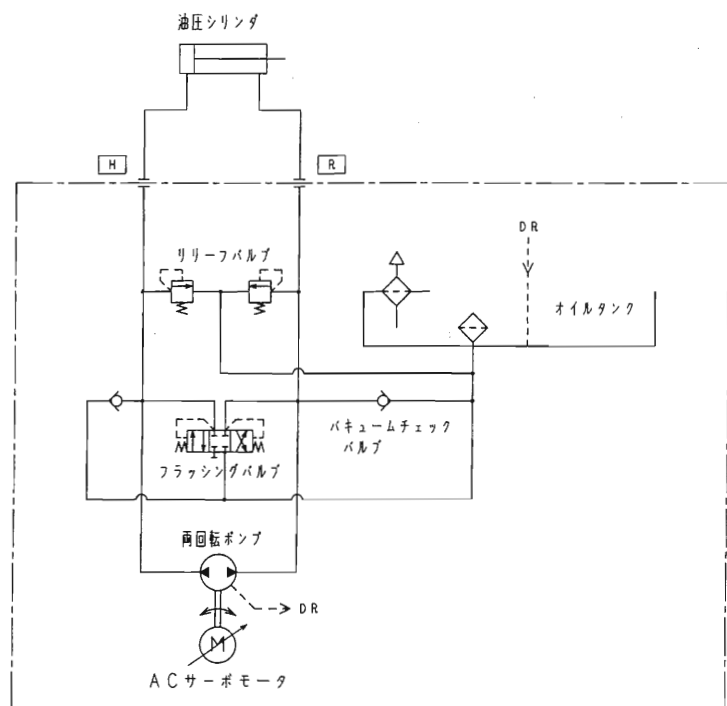


図5 油圧ユニット基本回路

プとしては、3サイズの定吐出ピストンポンプがあり、1回転当たりの吐出容量調整ネジ（以下、容量調整ネジ）によりポンプ容量をそれぞれの範囲で無段階に設定することができる。3サイズのポンプと容量調整ネジにより3~35cm³/revの間でポンプ容量が設定でき、モータ容量にあわせて最適な組合せを選定できる。図4にポンプとサーボモータを組み合わせた例を示す。なお、ACサ

ーボモータ容量、ポンプサイズ、ポンプ設定容量の選定方法については後述する。

補助バルブとしては、異常時の回路保護のためのリリーフバルブと、シリンダの伸縮で生じるシリンダ容積差分をタンクとの間で吸収するためのバルブ（バキュームチェックバルブ、フラッシングバルブ）を搭載しており、図5に示す油圧ユニットの基本回路となるが、アプリケーションに

応じて落下防止バルブなど、容易に追加が可能な油圧ユニットの構成としている。

(4) 油圧シリンダ

油圧シリンダは機械の仕様(出力, ストローク)に合わせて選定する。また, アクチュエータが油圧シリンダではなく, 油圧モータの場合にも対応が可能である。

(5) センサ

圧力センサは専用圧力センサをシリンダヘッド側, ロッド側の計2個使用する。圧力センサ信号は油圧サーボコントローラよりモニタ信号として出力されており, 簡単に圧力を確認することができる。

シリンダ位置センサとしては一般的なリニアスケール(インクリメンタル, ラインドライバ出力)に対応している。分解能としては, 速度分解能の観点からも, 1 μ m 以内のものを推奨している。位置センサ信号は油圧サーボコントローラよりラインドライバ出力されており, 上位コントローラで位置の確認や, 上位コントローラによる位置制御を行うことも可能である。

5. システム制御性能

システムの制御性能は, シリンダサイズや配管長さ, 負荷条件等により異なるが, ここでは参考として実験システムでの制御性能を例に示す。実験システムはサーボモータ 5.5kW (定格 2000min⁻¹), ポンプ PVS-0B サイズ, ポンプ設定容量 5cm³/rev で, ポンプ出力は最高圧力 30MPa, 最大流量 12.5l/min である。シリンダは $\phi 63 \times \phi 35.5 \times \text{st}280$, 位置センサは分解能 1 μ m のものを使用している。このシステムでの位置決め精度は数 μ m, 速度制御は使用シリンダの許容最小速度 5mm/s から最高 97mm/s (ポンプ 2500min⁻¹ 相当) まで可能である。なお, 位置決め精度については位置センサ上の精度であり, 機械として精度を確保するためには, 剛性やたわみ補正等の考慮が必要となることはいうまでもない。

図 6 には圧力指令電圧に対する制御圧力の特性を示す。これは指令を 0V \rightarrow 10V \rightarrow 0V と変化させた時の特性であるが, 低圧 0.15MPa から高圧 30MPa までヒステリシスもなく, 指令通りリニアに制御されているのがわかる。

図 7 はシリンダの代わりにオイルモータ(ピストンモータ 8cm³/rev)をアクチュエータとし, その回転速度を制御した場合の速度指令電圧に対する制御速度の特性である。シリンダはストロークが限られており連続的に速度を出すことができないためオイルモータを使用している。なお, オイルモータにはエンコーダ(8192pulse/rev)を取り付けて速度フィードバックを行っている。これも指令を 0V \rightarrow 10V \rightarrow 0V と変化させた時の特性であり, 最高 1500min⁻¹ までヒステリシスもなく指令通り制御されているが, 50min⁻¹ 以下の低速域ではオイルモータの起動トルクの影響で若干の速度変動がみられる。

一方, 応答性について, 図 8, 図 9 に 1Hz 正弦波応答を示す。応答性としては数 Hz までであり, 一般的に位置, 速度, 圧力の制御を要求される機械の 1 軸システムとして広く適用が可能である。

6. サーボモータとポンプの組合せ選定 (ポンプ出力特性)

最後に, システムの要求仕様に応じてサーボモータ容量とポンプサイズ, および, ポンプ設定容量を選定する方法について説明する。

従来の油圧システムで用いられる汎用電動機は商用周波数で決まる定格回転数を暗黙の条件として容量(kW)でモータを選定してきたが, 本システムで用いるサーボモータはトルク(N \cdot m)が選定ポイントとなり, これにサーボモータの仕様で決まる定格回転数をかけたものがモータ容量となる。ポンプ出力とサーボモータ出力との関係は次式で表される。

$$P \times q_m = 2\pi \times T \times \eta_m \dots\dots\dots (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P : \text{ポンプ吐出圧力 [MPa]} \\ q_m : \text{ポンプ容量 [cm}^3/\text{rev]} \\ T : \text{モータトルク [N}\cdot\text{m]} \\ \eta_m : \text{機械効率} \end{array} \right.$$

$$Q = q_m \times N_p \times \eta_v \dots\dots\dots (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q : \text{ポンプ吐出流量 [l/min]} \\ N_p : \text{ポンプ回転数 [min}^{-1}\text{]} \\ \eta_v : \text{ポンプ容積効率} \end{array} \right.$$

式(1)はポンプ吐出圧力とポンプ容量の積がモータトルクに比例すること, 式(2)はポンプ容量に回転数をかけるとポンプ吐出流量となることを示して

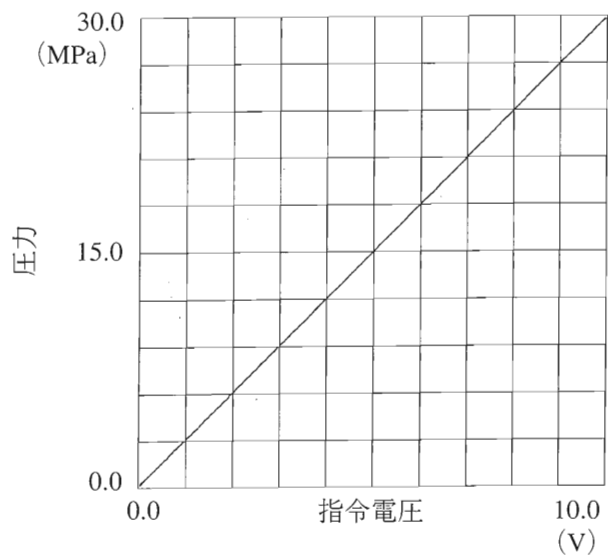


図6 圧力指令電圧-圧力特性 (0-100%)

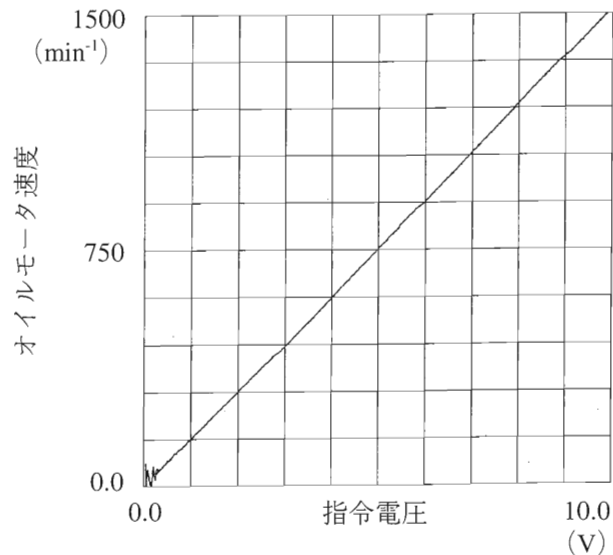


図7 速度指令電圧-速度特性 (0-100%)

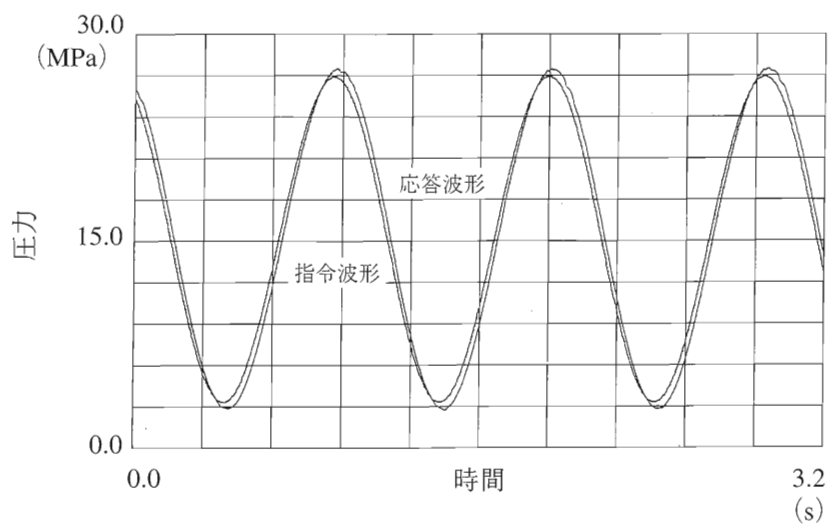


図8 圧力正弦波応答 (1Hz, 振幅10-90%)

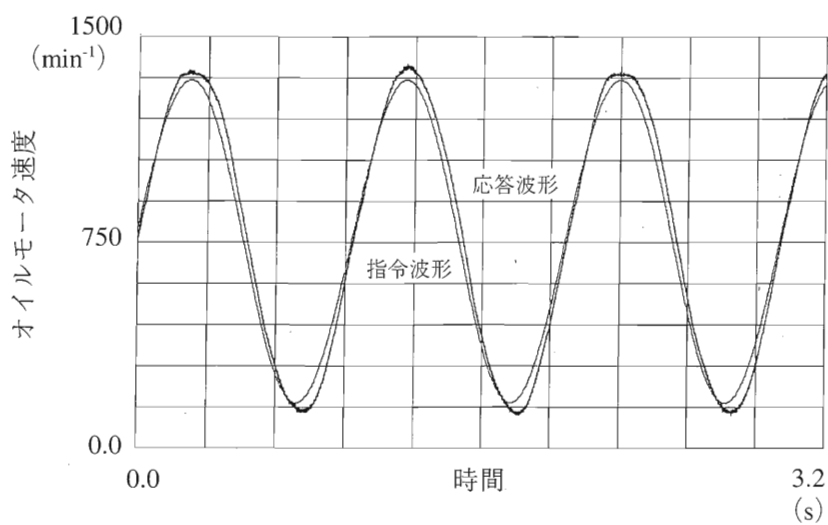


図9 速度正弦波応答 (1Hz, 振幅10-90%)

いる。つまり、モータトルクが決まっているときには、ポンプ容量の設定がポンプ出力（吐出圧力、吐出流量）を決める重要なパラメータとなる。この設計ポイントは限られたモータトルクを、システムの要求仕様に合わせてポンプ出力の吐出圧力に配分するか、吐出流量に配分するかということになる。逆に必要な吐出圧力、吐出流量が明確になっている場合には、ポンプ容量を決め、必要なモータトルクを求めることになる。なお、ポンプ回転数については、ポンプ最高回転数、または、モータ最高回転数の小さい方に制限される。

サーボモータ容量とポンプサイズ、および、ポンプ設定容量の選定を行うに際し、基本的にはモータの定格トルクを使用して計算するが、サイクルと動作パターン、つまり、負荷デューティが明らかになっている場合には、圧力保持時のモータトルクをオーバーロードで使用するような設定にして、サーボモータの容量を小さくすることもできる。ただし、モータトルクは、圧力保持時だけでなくサーボモータ加減速時にも必要となる。シリンダ移動時の加減速はもちろんだが、昇圧時には圧縮のための初期流量が必要で、要求される圧力応答によってはサーボモータに大きな加速度、つまり、モータトルクが要求される。また、ポンプが停止状態から回転する際には起動トルク（静止摩擦トルク）が必要となる。このように、モータには瞬時的に大きなトルクが要求されるが、瞬時トルクとして定格トルクの2倍以上を出力できるモータであることが、このシステムでACサーボモータを使用している理由でもある。ところで、サーボンプでは過負荷保護のためモータの実効トルクが定格トルクを越えるとアラームを発生するようになっているが、実際にはある程度余裕を持った設計で、実効トルクが定格トルクの70%以下になるように使用するのが望ましい。

このように、設計に当たってはさまざまな条件を考慮して選定を行うが、このシステムではシステム完成後にもポンプ容量調整ネジでポンプ設定容量を最適設定に変更できるという大きな利点がある。例えば、実際の負荷が当初の設計よりも小さかった場合にサイクルを短くして負荷率を上げる、あるいは、負荷デューティが変更になり当初の設定では過負荷となってしまうような場合でも、容量調整ネジでポンプ設定容量を小さくすることで、吐出流量は減るが、吐出圧力に余裕ができるためモータの実効トルクを下げることができる。

表2 サーボモータとポンプの組合せ例
(定格トルク時圧力 21MPa)

| モータ容量[kW] (定格回転数 min ⁻¹) | ポンプ サイズ | ポンプ容量 [cm ³ /rev] | 最大流量[l/min] (最高回転数 min ⁻¹) |
|---|------------|---------------------------------|---|
| 3.5 (2000) | PVS-0B | 4.5 | 10.6 (2500) |
| 4.5 (2000) | PVS-0B | 5.8 | 13.7 (2500) |
| 5.5 (1500) | PVS-1B | 9.4 | 22.3 (2500) |
| 7.5 (1500) | PVS-1B | 12.9 | 30.6 (2500) |
| 11 (1500) | PVS-2B | 18.8 | 35.7 (2000) |
| 15 (1500) | PVS-2B | 25.7 | 48.8 (2000) |

参考に組合せ選定例として、3.5~15kWのサーボモータで、定格トルク時の圧力 21MPa とした条件の場合を表 2 に示す。まず、式(1)より各サーボモータの定格トルクと圧力 21MPa、機械効率を 0.9 としてポンプ容量を求めている。次に、式(2)よりポンプ最高回転数とサーボモータ最高回転数の小さい方を選んで最大流量を求めている。ただし、容積効率を 0.95 としている。

7. おわりに

省エネ要求に対する油圧システムの一つとして、今回「ACサーボ油圧システム」について紹介した。実際にシステムを使用されているお客様からは、低騒音、低油温上昇など、制御性能以外の点でもご満足を頂いている。ポンプの回転数を制御する油圧制御システムは他社からも発表されており、油圧システムの省エネ化手段としての認識も広まりつつあるが、従来のシステムと使い勝手が違うことから普及は今一步の感がある。しかし、世界的な地球環境保護の高まりとともにいずれブレークスルーが訪れるものと思われる。そのためにも、油圧の特長をさらに活かせるシステムとして今後も改良を行っていきたい。



久保 光生

1991年 入社
技術開発部電子技術部に
て、汎用数値制御装置(NC)、
ロボット制御装置の開発に
従事
1999年 部品事業部技術二部に、AC
サーボ油圧システムの
開発に従事、現在に至る