

# ポンプ用センサレスDCモータのデジタル制御

Digital Control of Sensorless-DC Motor for Water Pump

駒田 圭成  
Komada Yoshinari  
山崎 周一  
Yamazaki Shuichi

## 1 まえがき

近年、高効率・可変速・小型軽量・低価格などをキーワードとして、誘導電動機やブラシ式モータからブラシレスDCモータへの移行が活発である。

それとともに、ブラシレスモータに対しても、回転子位置センサの存在が問題視されるケースがあり、センサレス化への期待が高まってきている。

センサレスドライブ方法については、従来から多数の研究報告がなされており、特に120度通電形電圧インバータ駆動時の開放相逆起電力を用いるセンサレス駆動装置は、コストやサイズ面でのメリットが大きく、家電機器への適用例が多い。

この開放相逆起電力を利用する方式は、始動時や低速領域での不安定性や低いトルク限界などの諸問題が存在するために、イナーシャやトルクが特定される用途に限定して適用されている。

一方当社では、120度通電形電圧インバータでドライブされる三相PMモータの電流波形の特徴に着目して通電相の切替(以下、転流と呼ぶ)を行う「電流波形規範形センサレスブラシレスDCモータ」について検討し、始動性・定常運転特性・負荷変動時の安定性・電源電圧変動時の安定性・PWM制御の適用について報告してきた<sup>(1)-(6)</sup>。これらの報告は、「電流波形規範形センサレスドライブ方式」の有効性を示すものである。

今回筆者らが報告するポンプ用センサレスモータシステムは、この電流波形規範形センサレスドライブ方式の良好な始動性に着目し、大きな始動トルクを必要とするポンプに適用して、IPMモータ出力250Wのポンプシステムの実現を図ったものである。マイクロコンピュータを用いたデジタル制御により、始動時から十分なトルクを確保するとともに、IPMモータ特有の複雑なロータ表面磁束分布に対しても、安定した定速運転を実現しており、ポンプ運転に必要な全機能を備えている。

このセンサレス技術の適用により、センサとセンサ信号用ハーネスが不要となるため、使用温度・ノイズなど耐環境性が向上する。使用上限温度の向上により空冷ファンの小型化や省略が可能となり、モータの小型軽量化も期待できる。これらの理由により、材料費や工数も低減でき、低コスト化が可能となる。始動初期の逆転問題は存在するが、ポンプの性質上不問と考える。

本稿では、このマイクロコンピュータ制御によるポンプ用モータ・コントローラを紹介するとともに、併せてポンプシステムの実験結果について報告する。

## 2 ポンプユニットの構成

ポンプユニットは、IPMモータおよびセンサレス式ポンプコントローラを当社で開発し、他のポンプ部・アクチュエータ・圧力流量センサなどは市販井戸ポンプをそのまま流用して構成した。図1にポンプユニットの外観を、図2にポンプユニットの構成図を示す。

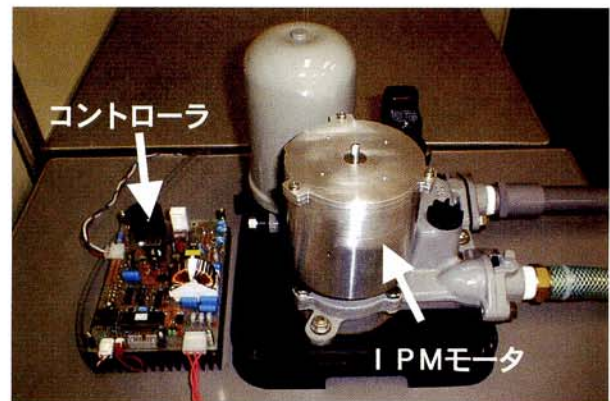


図1 ポンプユニット外観

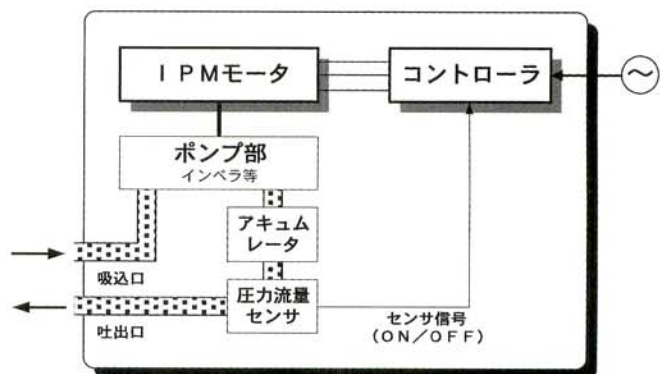


図2 ポンプユニット構成図

## 3 IPMモータ

### 3.1 IPMモータ構造

表1、図3、図4にIPMモータの諸元、ロータ構造、1/4電磁界解析モデルを示す。



図3 ロータ構造



図4 電磁界解析モデル

表1 モータ緒元

ステータ外径	φ 105 mm
ステータ内径	φ 56 mm
積厚	ステータ35 mm ロータ40 mm
エアギャップ	0.5 mm
極数	4 極
永久磁石	焼結フェライト
永久磁石の磁束密度 (Br)	0.44 T
永久磁石の保磁力 (Hc)	262.6 kA/m
定格出力	250 W
定格トルク	0.7 N・m
定格回転数	3450 r.p.m.
スロット数	12

試作モータは、三相12スロット分布巻のステータと、4極の永久磁石界磁を持つロータより構成され、ロータコア内に永久磁石を埋め込んだIPM (Interior Permanent Magnet: 埋込磁石形)モータである。

IPM モータについては、既に多数の研究結果が報告されており、エアコンのコンプレッサモータなどとして実用化されている。本稿ではポンプに適したモータ構造について検討を加えた。IPM モータのロータ構造の細部は、電磁界解析による事前評価を加えて候補を選定し、その結果を基にモータを試作して、最終的に実機評価試験により決定した。

具体的には、ステータを同一条件に設定し、電磁界解析により市販ポンプに搭載されているモータと同等の平均トルクを確保できる4種類のロータ構造に絞り込み、試作を実施した。さらに、この試作モータについてトルク負荷試験を実施し、定格トルク運転時のモータ効率と電磁界解析から得られるトルク脈動データの双方を勘案して図3のロータ構造に決定した。

### 3.1.1 センサレス駆動技術の適用によるモータ構造上の利点

#### (1) 低コスト化

従来の磁極位置検出センサを内蔵したモータにおいては、次のような問題があった。分布巻のステータは、ステータコアより軸方向に出るコイル部分(コイルエンド)が存在する。この分布巻したステータを用いた永久磁石モータの場合、回転子磁極位置を検出する磁気センサ装着位置はコイルエンドの制約を受ける。そのため永久磁石を含むロータ長をコイルエンド端まで伸ばしてセンサが確実に磁極検出できるようにする方法と、ロータシャフト上に小型磁極位置検出用磁石を装着する方法が実用化されている。しかし、前者の場合は磁石量増加に伴い価格が増加し、後者の場合はロータ磁極と検出用磁石の磁極の位置合わせに要する工数が追加されるという問題があり、いずれもコストダウンの障害となっていた。

これに対してセンサレス化した場合はセンサ装着の必要がないので上記問題は存在せず、材料費の削減および工数の低減が容易で低コスト化が可能である。

#### (2) モータの小型化

市販ポンプには、空冷ファンを装着したブラシレスDCモータが搭載されている。一般に磁極位置検出用センサとして使用される半導体センサは熱に弱く(使用周囲温度100℃以下)、ブラシレスDCモータ運転の温度上昇限界を支配する。よって温度的な側面から見ても、センサはモータを小型化する上で障害となる。

他方、センサレス駆動用に特化した場合には、センサに起因する温度上の制約はなく、コイル温度限界(絶縁の種別:E種120℃)のみを念頭において設計することができる。図5に示す温度上昇試験によって試作モータを250W出力で連続運転したときのコイル温度は、周囲温度25℃に対し65℃上昇する結果を得た。このことは最大周囲温度40℃においても自然空冷でコイル最高許容温度以下となることを意味する。

そこで、空冷ファンを省略してモータをさらに小型化した。

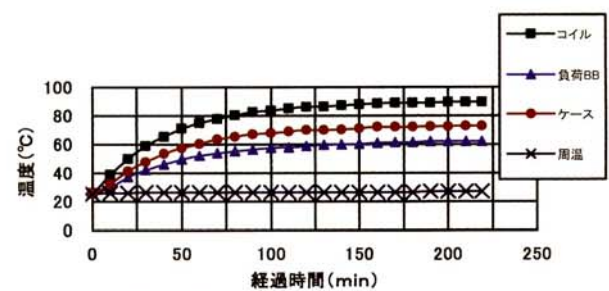


図5 ポンプ温度上昇

### 3.1.2 IPMモータ特有の複雑な表面磁束分布

IPMモータのロータ構造は、ロータコア内部に永久磁石を埋め込むという構造である。その特徴に起因して、磁束密度分布が複雑な波形となる。図6にロータの表面磁束密度分布を例示する。

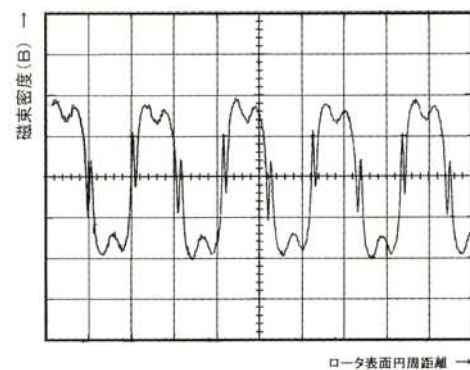


図6 IPMモータロータ表面磁束分布

磁束は磁気抵抗が少ない経路を辿る性質がある。ステータコイルに通電した場合には電流と回転子磁極位置に応じて磁束密度分布はさらに変化する。この複雑な磁束密度分布および挙動は、回転時の逆起電力波形の歪みを増加させるので、開放相逆起電力を利用するセンサレス駆動方式では安定運転上の障害となる。他方、本稿の電流波形規範形センサレス駆動方式はステータコイルのインダクタンス成分によって電流高調波が抑圧されるので、センサレス運転時の安定性は極めて高い。

# 4 コントローラ

本章ではコントローラの概要およびモータ制御・ポンプ制御について説明する。

## 4.1 概要

試作したIPM モータはホール素子などの回転子位置センサを装着せず、モータからは3本の動力線が引き出されている。コントローラには回転子位置センサのための信号処理機能は一切無く、しかも始動・停止および速度制御・電流制御を含む大半の機能をシングルチップマイクロコンピュータでソフトウェア処理しているため、回路構成は非常にシンプルである。図7にコントローラの基本構成を示し、以下にコントローラ各部の概要を列記する。

定子巻線への通電制御を行う。このインバータモジュールの採用によりフォトカプラや上側ドライブ用電源の省略が可能となり、部品点数が大幅に減少した。

### (4) 整流・平滑部

三相AC200V入力をダイオードブリッジとコンデンサによって整流・平滑し、インバータおよび制御電源回路へ直流電源を供給する。

### (5) 制御電源部

RCC (リングング・チョーク・コンバータ)方式のスイッチング電源であり、コントローラ各部へ直流電源を供給する。

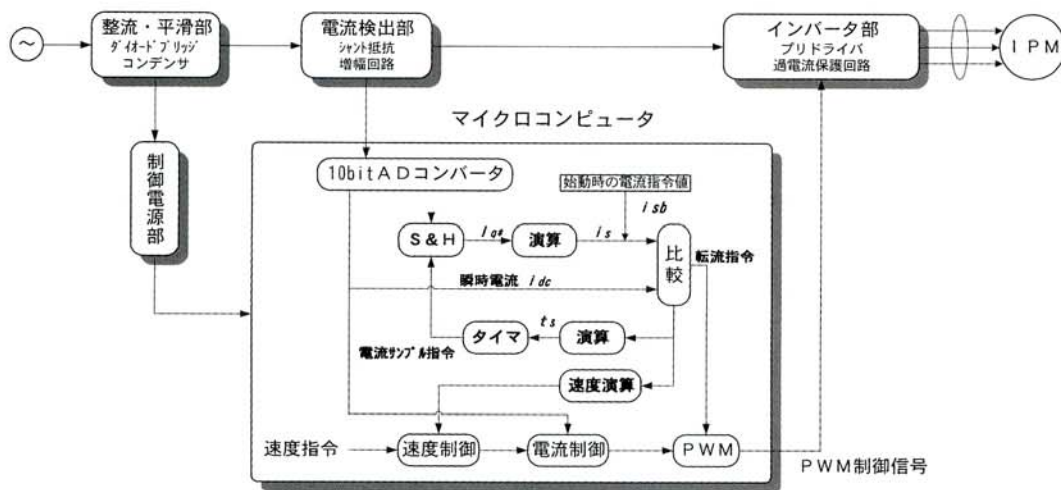


図7 コントローラの基本構成

### (1) マイクロコンピュータ

16 bitシングルチップマイクロコンピュータで1チップLSI中に、10 bit ADコンバータ・各種タイマなど、センサレスモータ制御に必要な機能が組み込まれており、コントローラの大抵の制御機能をソフトウェア処理で実現している。

### (2) 電流検出部

インバータ部DCラインのグラウンド側に挿入した1個のシャント抵抗で電流波形を検出する。このDC電流波形は転流時期の決定ならびに電流制御・速度制御を行うために使用される。

### (3) インバータ部

三相120度通電形電圧インバータで、使用したインバータモジュールは三相インバータのパワー出力段・ブリドドライブ回路・過電流保護回路が1パッケージ化されており、PWM制御信号は絶縁回路無しにCMOSレベルで入力可能であり、マイコンからのPWM制御信号に従ってモータ固

## 4.2 モータ制御

モータ制御については、電流波形規範形センサレスドライブ方式の基本ルールと制御プログラム、および速度制御・電流制御ならびに異常検出・過電流保護について述べる。

### 4.2.1 センサレスドライブの基本ルール

電流波形規範形センサレスドライブ方式による通電相切替は、インバータ部DCラインのグラウンド側に挿入された1個のシャント抵抗により電圧変換されたDC電流  $i_{dc}$  を利用して決定している。モータのセンサレスドライブ制御は、このDC電流波形が常に最適な波形に収束するように通電切替え時期を決定し、インバータを介して固定子巻線への通電電流を切替えることで行われる。

図8に定常運転時の転流タイミングを示し、以下に説明する。

(a)は定常運転時のDC電流  $i_{dc}$  の電流波形である。(b)に

は  $i_{dc}$  より推定したトルク電流推定値  $I_q$  の変化を示した。トルク電流推定値  $I_q$  とは各通電モードごとに転流指令が発せられた時点からサンプル時刻  $t_s$  後に  $i_{dc}$  の大半がトルク寄与成分になると推定しサンプルした電流値である。

ここでサンプル時刻  $t_s$  はひとつ前の転流周期  $T_{n-1}$  にサンプリング係数  $K_t$  を乗じて決定することとした。 $K_t$  は  $0 < K_t < 1$  の範囲で対象となるモータの特性により決定する。

$$t_s = T_{n-1} K_t \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $n$  : 転流回数

$T_0$  は通電開始から最初の転流までの時間

(c)は、 $I_q$  から転流目標電流値  $i_s$  を求め、その変化を示したものである。

定常運転時の転流目標電流値  $i_{sf}$  は式(2)により定まり時間と共に低減する。式(2)の低減項は、図8(a)に示すように  $i_{dc}$  のサンプル以降  $i_{dc}$  が減少傾向を示す場合においても、 $i_{dc}$  が  $i_s$  を確実に超えるようにしたものである。

$$i_{sf} = K_s I_q e^{-\frac{t}{\tau_d}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $\tau_d$  : 低減時定数

$t$  : サンプル時刻  $t_s$  からの時間

ただし、サンプル時刻  $t_s$  の度に  $t = 0$  にリセット

(d)(e)には、 $i_{dc}$  と  $i_s$  を比較し、 $i_{dc}$  が  $i_s$  に達した時点で転流指令を発する様子を示した。

なお、転流からサンプル時刻  $t_s$  後のDC電流  $i_{dc}$  をトルク電流推定値とみなして転流目標電流を決定するルールのみでは、始動時には  $t_s$  が不定となり転流目標電流  $i_s$  が決定できず始動不能となる。この回避策として、時間とともに低減する始動電流指令(始動時の転流目標電流)  $i_{sb}$  を設けて初期の転流を行う事とした。図9に始動時の転流タイミングを示す。

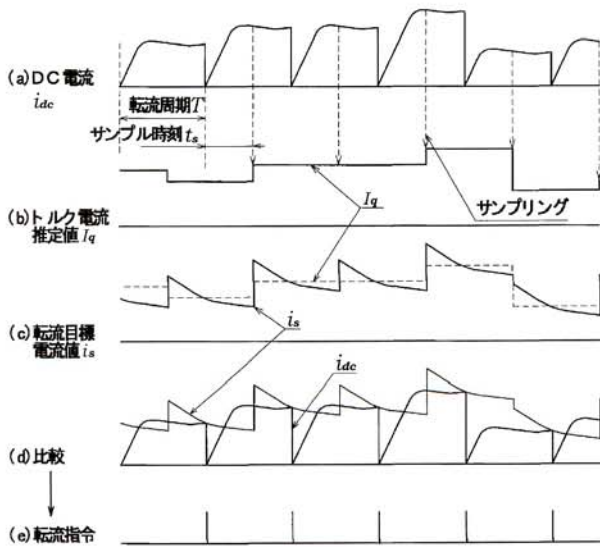


図8 常運転時の転流タイミング

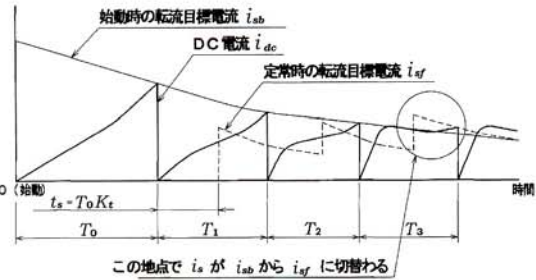


図9 始動時の転流タイミング

### 4.2.2 センサレス制御プログラム

図10にセンサレスドライブのフローチャートを示し、以下、各処理の内容について述べる。

#### (1) 始動

PWMのキャリア周波数、通電比率(デューティサイクル)を初期値に設定し、転流目標電流値  $i_s$  に始動電流指令値  $i_{sb}$  を代入した後、通電を開始する。キャリア周波数は回転数によって切り替える。始動時はキャリア周波数を低く設定して滑らかに電流を増加させている。通電比率は通電開始から定常運転に至る間にゼロから徐々に増大させ、その後は電流制御ループ・速度制御ループにより算出決定される。

#### (2) 目標値と $i_{dc}(t)$ の比較および $i_s$ の計算

転流目標電流値  $i_s$  は、始動時の転流目標電流値  $i_{sb}$  と定常運転時の転流目標電流値  $i_{sf}$  のいずれか大きな値が選択されるが、一度  $i_{sf}$  が  $i_{sb}$  を上回った時点で  $i_s = i_{sf}$  となる。始動時  $i_{sf}$  は不定のため  $i_{sb}$  が  $i_s$  となる。

転流目標電流値  $i_s$  と瞬時電流値  $i_{sc}(t)$  は比較され、 $i_{sc}(t)$  が  $i_s$  に達した時点で転流処理が実行される。

また、 $i_{sc}(t)$  が  $i_s$  を超える迄の間は、繰り返し  $i_{sb}$ 、 $i_{sf}$  を計算し、いずれか大きな値が選択される。

ここで、 $t$  は転流の度に  $t = 0$  にリセットされ、 $i_{sb}$  は通電開始からの時間により計算される。

#### (3) 転流

瞬時電流値  $i_{sc}(t)$  が転流目標電流値  $i_s$  に達した時点で現通電モードの終了とし通電相を切り替える。このとき  $t$  をリセットする。

#### (4) サンプル時刻の算出とトルク電流推定値

式(1)よりサンプル時刻  $t_s$  を算出し、 $t = t_s$  となった時点の瞬時電流  $i_{dc}(t_s)$  をトルク電流推定値  $I_q$  としてサンプルする。

#### (5) 転流目標電流値 $i_{sf}$ の算出

$t_s$  をリセットし、式(2)より  $i_{sf}$  を計算する。

#### (6) 速度制御・電流制御

モータ回転数  $N$  とトルク電流推定値  $I_q$  からインバータへの電圧指令値  $V_q^*$  (PWMのデューティサイクル) を決定する。

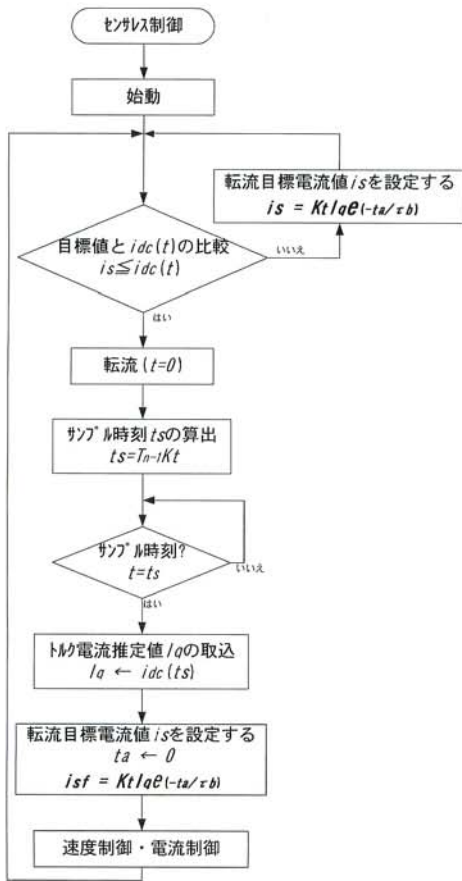


図10 センサレス制御フローチャート

### 4.2.3 速度制御と電流制御

図11にモータ制御系の構成を示す。

先に述べたように、電流波形規範形センサレスドライブ方式は、DC電流  $i_{dc}$  を唯一の情報源としているため、モータの速度検出も転流周期から算出している。

モータが最大出力 ( $I_q(\max)$ ) 以下で運転しているときは、図11の外側の速度制御ループにより定速運転を実施する。また最大出力に達した場合には、モータを保護するために電流指令値  $I_q^*$  を  $I_q(\max)$  に制限し定電流制御(定出力制御)を行う。始動時は所定値(回転数または電流値)に達するまで時間と共に増加する電流指令値  $I_q^*$  を電流制御ループに与えて加速させ、所定値に達した後、定速運転あるいは定出力運転を実施する。停止時にはモータ停止電流に達するまで時間と共に減少する電流指令値  $I_q^*$  を電流制御ループに与えて減速させ、モータ停止電流に達した時点でモータへの電力供給を停止する。

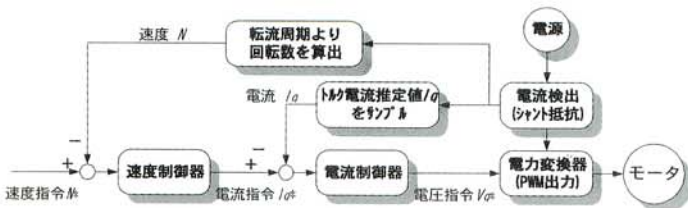


図11 モータ制御系の構成

### 4.2.4 異常検知と過電流保護

センサレス方式ではモータの運転状態は、センサ信号により監視することは出来ない。そこで本コントローラではセンサレス制御で常に監視しているDC電流  $i_{dc}$  と転流周期  $T_n$  よりモータの運転状態を監視し、異常を検知した場合は、モータへの電力供給を停止する事とした。異常検知の条件は下記とした。

- ① 転流周期を計測し、この周期が最高回転時の周期より小さい場合。
- ② DC電流  $i_{dc}$  の瞬時値が、モータの最大定格から決定した過電流値に達した場合。

また、プログラムでは対応出来ない瞬間的な過電流に対しては、ハードウェアで過電流保護回路を構成し、瞬時に出力を停止させるとともにマイコンへ過電流信号を送る。マイコンではこの過電流信号を割込信号として受け取り、即座に動作中の処理を中止し、エラーを表示する。

## 4.3 ポンプ制御

ポンプ制御については、圧力流量センサとポンプの基本動作、およびポンプ停止時のソフトストップ制御、異常停止時のリトライ動作について述べる。

### 4.3.1 圧力流量センサとポンプ基本動作

圧力流量センサは、アキュムレータ内の圧力と使用流量を検出しON/OFFの信号を出力するものである。出力は接点スイッチとなっており、アキュムレータ内に蓄圧された圧力が下がり、始動揚程まで下がったと判断すると出力の接点が閉じON信号が出力される。使用流量が減少し停止水量以下になると出力の接点が開きOFF信号が出力される。

ポンプは圧力流量センサの信号により始動・停止を繰り返す。図12にポンプの基本動作を示す。

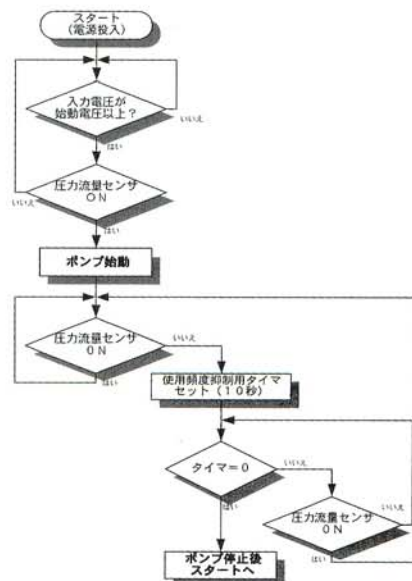


図12 ポンプ基本動作

ポンプは入力電圧が始動揚程を確保できる始動電圧に達し、且つセンサがONになった時点で始動する。始動後はセンサがONの間運転を継続し、センサがOFFとなった場合はただちに停止せず始動頻度抑制タイマ(約10秒)が作動している間運転を継続し、その後停止する。またタイマ動作中にセンサがONとなった場合は運転を継続する。

始動頻度抑制タイマとはポンプ始動後、最低10秒は運転を続けるためのタイマであり、これによりセンサのON/OFFしきい値切りでの始動・停止の回数を抑制し、ポンプの劣化を防止する。

### 4.3.2 ソフトストップ制御

ポンプの始動・停止などにより管内の流体の流れが瞬間的に閉塞されると、閉塞した上流側の圧力は異常に上昇し、上昇圧力は圧力波となってその点と給水源との間を往復して次第に減衰する。この現象をウォーターハンマ現象といい、配管の破裂、接続部の劣化および漏洩、管の振動および騒音などの問題が生じる。

この問題を解決するため、ポンプを停止させる際には回転数を緩やかに低下させた後に停止させるソフトストップ機能を採用した。ソフトストップ制御は、圧力流量センサのOFF信号に応じて制御ループを電流制御に切り替え、電流指令値を徐々に下げていき、所定値に達した時点でポンプを停止させる制御である。このソフトストップ制御によってウォーターハンマ現象の発生を抑制した。

### 4.3.3 異常停止時のリトライ動作

ポンプを運転する場合、砂利・ゴミなどによるインペラの詰まりが原因で過電流、あるいはモータの同期脱出に陥る恐れがあり、その場合には異常検知機能によりポンプは停止する。しかし、インペラの詰まりが原因で停止した場合は何度か始動を繰り返すと詰まりが解消され正常に運転されることもある。そこで今回は最大3回まで再始動を繰り返す事とした。それでも始動に失敗するようであればモータあるいはポンプの異常と判断し、エラーを表示して停止させる。

なお、短絡電流など瞬間的に大電流が流れ、過電流保護回路が働いた場合は、即座にモータあるいはポンプ異常と判断し、リトライは行わずポンプは停止する。

## 5 実機試験

今回開発した試作機について、モータ特性試験およびポンプ特性試験を行った。

### 5.1 モータ特性試験

開発した試作機のトルク負荷試験を実施した。図13にトルク負荷特性の試験結果を示す。測定負荷範囲は、ポンプ負荷における全揚程をカバーできる範囲とした。トルク0.7N・mでポンプ定格出力250Wとなる。

モータ効率は、低負荷から高負荷まで広い範囲で80%以上の高効率を維持している。回転数は低負荷から高負荷まで安定しており、速度制御が有効に作用していることを確認した。また、モータおよびコントローラ保護の目的でPWMの最大デューティ幅を低く設定したことに起因して、トルクが0.8N・m以上で回転数が下がり始める傾向を示した。しかしこの領域でも、モータ効率としては依然80%以上の高い値を維持した。

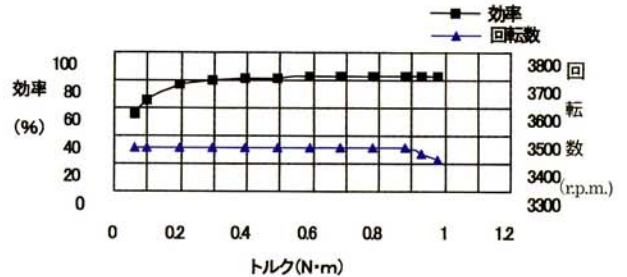


図13 トルク負荷特性

### 5.2 ポンプ特性試験

ポンプユニットの性能を評価する。図14に示すポンプ特性測定回路を作成し、ポンプ特性試験を実施した。図15に流量に対する全揚程、図16に流量に対する消費電力の関係を示す。なお、比較のために市販同等機(以下、市販機と呼ぶ)の測定も行った。

測定回路の吐出圧力計を監視しながら吐出バルブ2つ(大:メインバルブ, 小:微調整バルブ)を調整して吐出圧を調整し、式(3)を用いて全揚程Hを算出した。

$$H = K_p (P_{out} - P_{in}) \text{ [m]}^{(7)} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $P_{out}$ : 吐出圧力計の読み [Mpa]

$P_{in}$ : 吸込圧力計の読み [Mpa]

$K_p$ : 10 [m/Mpa]

測定は吐出バルブを全開状態から少しずつ閉めていき圧力流量センサのOFF信号が出力されるまで継続した。

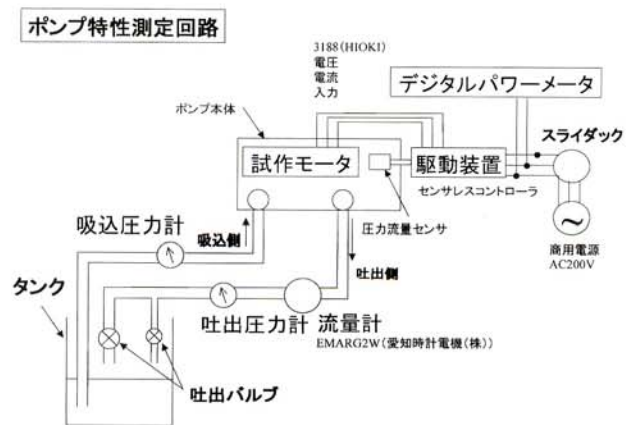


図14 ポンプ特性試験回路

図15の流量に対する全揚程の測定結果から、試作機・市販機の測定値はほぼ同一となった。ポンプとしての特性は市販機と同等であることを確認した。

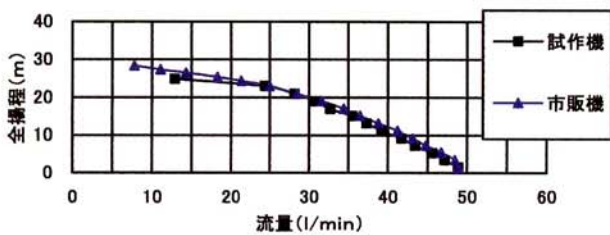


図15 流量に対する全揚程

流量に対する消費電力の測定結果を図16に示す。測定した流量ほぼ全域において試作機の消費電力の方が市販機を下回っており、市販機より省エネ効果があることを示した。試作機では消費電力が300 Wに達した辺りから永久磁石の減磁を防ぐための定電流制御を行っているので、消費電力はほぼ一定となる。この結果、市販機との消費電力の差はさらに大きくなり、省エネ効果は一層顕著になった。

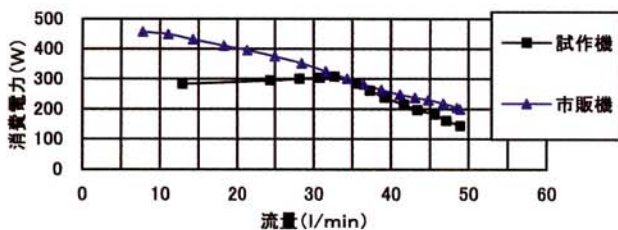


図16 流量に対する消費電力

## 6 あとがき

電流波形規範形センサレスドライブ技術の良好な始動性に着目し、出力250 WのIPM モータを対象としたセンサレスポンプ駆動システムを開発した。マイクロコンピュータを用いたデジタル制御によってIPM モータに対しても安定したセンサレス駆動・定速運転が達成できることを示した。さらにソフトウェア処理の側面から特徴・メリットおよびポンプ制御・センサレス制御の要点について紹介した。そして開発した本ポンプユニットの特性試験を実施し、市販ポンプユニットとのデータ比較を行い、ポンプ能力面で同等の性能を確認するとともに、省エネ効果についても良い結果が得られた。

今回の開発を通して、この電流波形規範形センサレスドライブ技術が極めて実用的で、適応範囲が広い事を実感した。今後は、この成果を基に次なるモータ応用製品の開発を進めて行く所存である。

## 7 参考文献

- (1)太田 他：「永久磁石同期電動機のセンサレス始動法」愛知電機技報No.21(1997)
- (2)太田：「センサレスブラシレスDCモータドライバの方式」平成9年電気学会産業応用部門全国大会予稿
- (3)太田：「センサレスブラシレスDCモータの定常運転時の特性」平成9年10月回転機研究会資料
- (4)太田：「センサレスブラシレスDCモータの負荷変動時のドライブ安定性」平成10年電気学会全国大会予稿
- (5)太田 他：「センサレスブラシレスDCモータの電源電圧変動時のドライブ安定性」平成9年電気学会産業応用部門全国大会予稿
- (6)太田 他：「電流形センサレスブラシレスDCモータへのPWM制御の適用」平成10年回転機研究会資料
- (7)梶原：「新版 ポンプとその使用法」丸善株式会社(1989)

## 筆者紹介

### 駒田 圭成

Komada Yoshinari

機器開発事業部 商品開発部 開発  
2グループ  
電子制御装置の開発および設計に従事



### 山崎 周一

Yamazaki Shuichi

機器開発事業部 商品開発部 開発  
1グループ  
モータの開発および設計に従事

