

三相誘導電動機負荷実習装置の開発

Development of Induction Motor Load for Vocational Training

五十嵐 智彦^{*1} 栗 秋 亮 太^{*1} 佐 藤 玲 子^{*2}

IGARASHI Tomohiko KURIAKI Ryota SATO Reiko

要 約 生産設備における高精度制御や省エネへの期待から、汎用インバータが広く普及するに伴い、インバータや電動機の取り扱いに関する訓練ニーズが増加しつつある。筆者らは、工場等の生産設備やビル設備における保全業務従事者を対象とした、汎用インバータの適用、操作方法、省エネ・経済性の判断等を習得するための訓練に供する実習教材を開発し、教材としての妥当性を検証した。

1 はじめに

職業能力開発促進センター（ポリテクセンター）や職業能力開発大学校（能開大）をはじめとする職業訓練では、広くシーケンス制御に関する訓練が実施されている。その中でも誘導電動機制御に関するカリキュラムは、電気系職業訓練の中でも中核を占めるもので、その重要性は広く認識されている。このような誘導電動機の制御に関する訓練ニーズは高く、これらの訓練に供する教材を開発することは、極めて重要なことであると考えられる。

一般に、電動機制御に関する訓練では、三相誘導電動機がその主たる訓練装置となり、有接点シーケンス制御では、直入れ始動法、正逆転回路、Y-Δ始動法などの回路について習得する。その後、汎用インバータを使用したV/f制御について習得し、省エネ技術や可変速運転についての技術を身に付ける。しかし、多くの職業能力開発施設では、電動機を無負荷状態にして実習をしており、電動機の定常負荷、過負荷時の特性や熱動継電器の動作等について触れられることは少ない。通常、生産現場における電動機は定格負荷で使用されていることや、過負荷などのトラブル発生時の対応技術の習得が重要であることを考慮すると、実習装置における電動機も任意に指定できる負荷がある状態にしておけることが望ましい。

そこで筆者らは、電動機制御に関する職業訓練に供

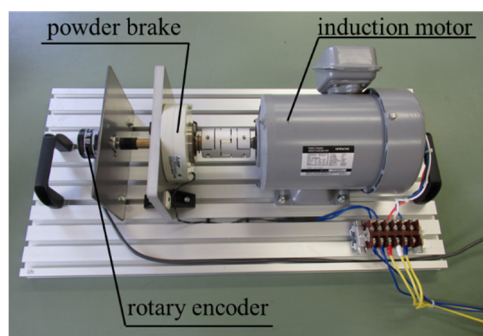


図 1 電動機負荷装置全体像

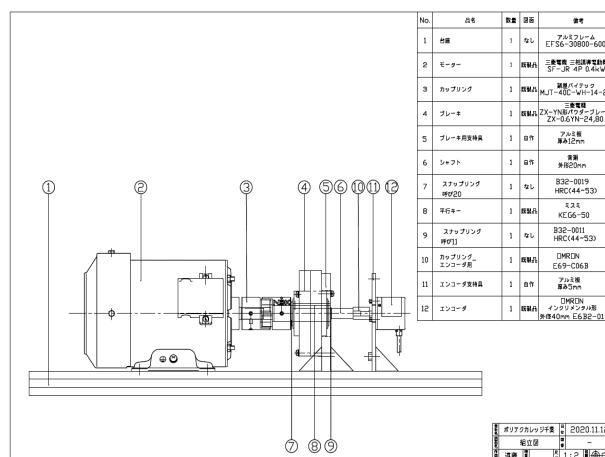


図 2 電動機負荷装置組立図

する教材を開発している¹⁾。本稿では、前回までに報告した教材の機械強度を向上させた構造にしたこと、並びに、マイコンを使用して各種状態をパネル上で確認できるような負荷制御電源を開発したので、報告する。

*1 電気エネルギー制御科
 Department of Electrical and Energy Control
 *2 メカトロニクス技術科
 Department of Mechatronics Technology

2 教材の構成

今回作製した実習装置を図1に、その組立図を図2に示す。本装置は、三相誘導電動機(200V, 0.4kW, 4極)とパウダーブレーキ(24V, 0.5kW)が機械的に結合されており、パウダーブレーキに流す電流値によって制動トルクが発生することで、任意の機械負荷を模擬的に再現することができる。更に、電動機、パウダーブレーキと同じ軸上にパルスエンコーダを結合しており、回転数(回転角度)を測定することが可能である。そのため、例えば学卒訓練における速度制御・角度制御等の設計に関する訓練にも供することができる。ベースは、凹面付アルミフレームとしたことで、機械的強度も十分であると考えられる。

3 負荷制御電源

パウダーブレーキは、そこに流れる電流の大きさに応じてトルクを発生するもので、トルクの大きさは概ね電流値に比例する。従って、適切な電流を流すことによって、任意の機械負荷を模擬することが可能である。そこで、パウダーブレーキを制御するための電源装置を開発した。合わせて、電動機の回転数と電流、およびインバータの周波数を表示できるよう各種センサとアナログ表示器も備えることにした。

負荷制御電源の外観を図3に、その全体の接続図を図4に、制御電源の回路図を図5に示す。ブレーキ電源の制御にはPICマイコン(dsPIC30F4012)を使用してPWM信号を生成し、MOSFET(2SK4017)によりスイッチングすることによって、所望の電圧をパウダーブレーキに印加している。パウダーブレーキは電流値に応じたトルクを発生するので、本来は電流制御とすることが望ましいが、電流と電圧が概ね比例関係にあるので、電圧制御によって代用している。制御電源の操作パネルに取り付けられたポテンショメータにより、PWMのデューティ比を定め、出力電圧を操作できるようにしている。パウダーブレーキは誘導性の負荷であり、OFF時に発生する過大な逆起電力によりFETが破損するのを防ぐため、フリーホイリングダイオードを逆並列に接続している。

制御電源の付加機能として、電動機や汎用インバータの状態をアナログ計器により表示する機能を設けた。表示する値は、0チャンネルに電動機の回転数、1チャンネルにトルク負荷率、2チャンネルにインバータの出力周波数、3チャンネルに電動機の電流値である。それぞれの値は、センサの値をdsPICの10bitADコンバータ機能により取り込み、各値を計算の上、DAコ

ンバータ(MCP4922)からアナログ信号として出力している。dsPICとDAコンバータの間は、SPI通信により出力電圧を信号で伝送している。

0チャンネルの回転数は、電動機に直結された光学式パルスエンコーダの出力をdsPICで読み取り、計算により求めている。dsPICは直交エンコーダインターフェース(QEI)モジュールを有しており、エンコーダが発生するパルス信号をdsPICに入力することで、比較的簡単な処理によって回転角度 θ [rad]を計算することができる。これは、パルスが入力されるごとにdsPIC内部で専用カウンタがカウントアップしていき、ある一定の値(例えば、エンコーダのPPR値)になった時にリセットされるように設定する。この値に係数をかけ、最大値が 2π になるように数値を変換すると、専用カウンタから回転角度を算出することができる。このとき、回転角速度 ω [rad/s]は、

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \cdots (1)$$

によって求めることができる。マイコンで処理する場合は、離散時間系になるので、式(1)を差分方程式で書くと、

$$\omega[n] = \frac{\theta[n] - \theta[n-1]}{\Delta t} \cdots (2)$$

となる。ただし、 n はサンプリング点、 Δt は計算周期(すなわち、マイコンの割り込み周期)である。

2チャンネルの汎用インバータの周波数の表示は、インバータのFM機能を使用している。三菱電機製の汎用インバータには、外付けのアナログ計器で周波数が表示できるよう、周波数に比例したパルスを出力する機能がある。これは60Hzのときに60 pulse/sを発生し、出力周波数が低くなるにつれて、毎秒のパルス数が低減する。通常は、専用の周波数表示計器を接続し周波数を表示するが、専用計器は比較的高価であるため、本制御電源では周波数-電圧変換($f-V$ 変換)を行い、安価な電圧計で代用できるようにした。しかし、dsPICには、2相の直交パルスについてカウントするペリフェラルインターフェースを有しているものの、1パルスをカウントアップするインターフェース機能は有していない。従って、外部入力割り込み機能を使い、パルスが入力されるごとに値をカウントアップするようにプログラムを自作した。カウントアップした値は、式(2)で示したのと同様の手順で周波数に変換できる。

3チャンネルには、電動機の電流値を表示させる。電動機は三相交流であり、かつ汎用インバータを使用した場合、周波数は任意の値をとることになる。通常、

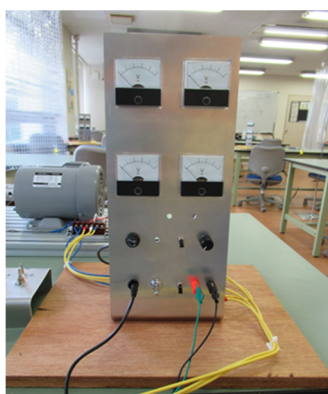


図3 制御電源の盤面

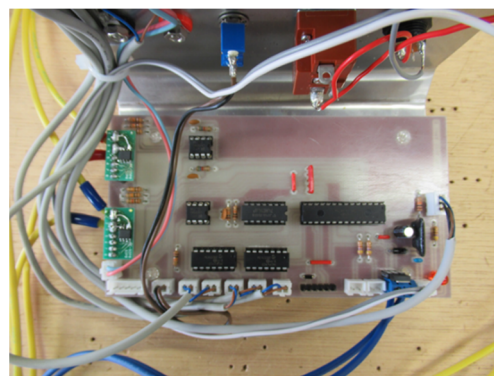


図4 制御電源の電子回路

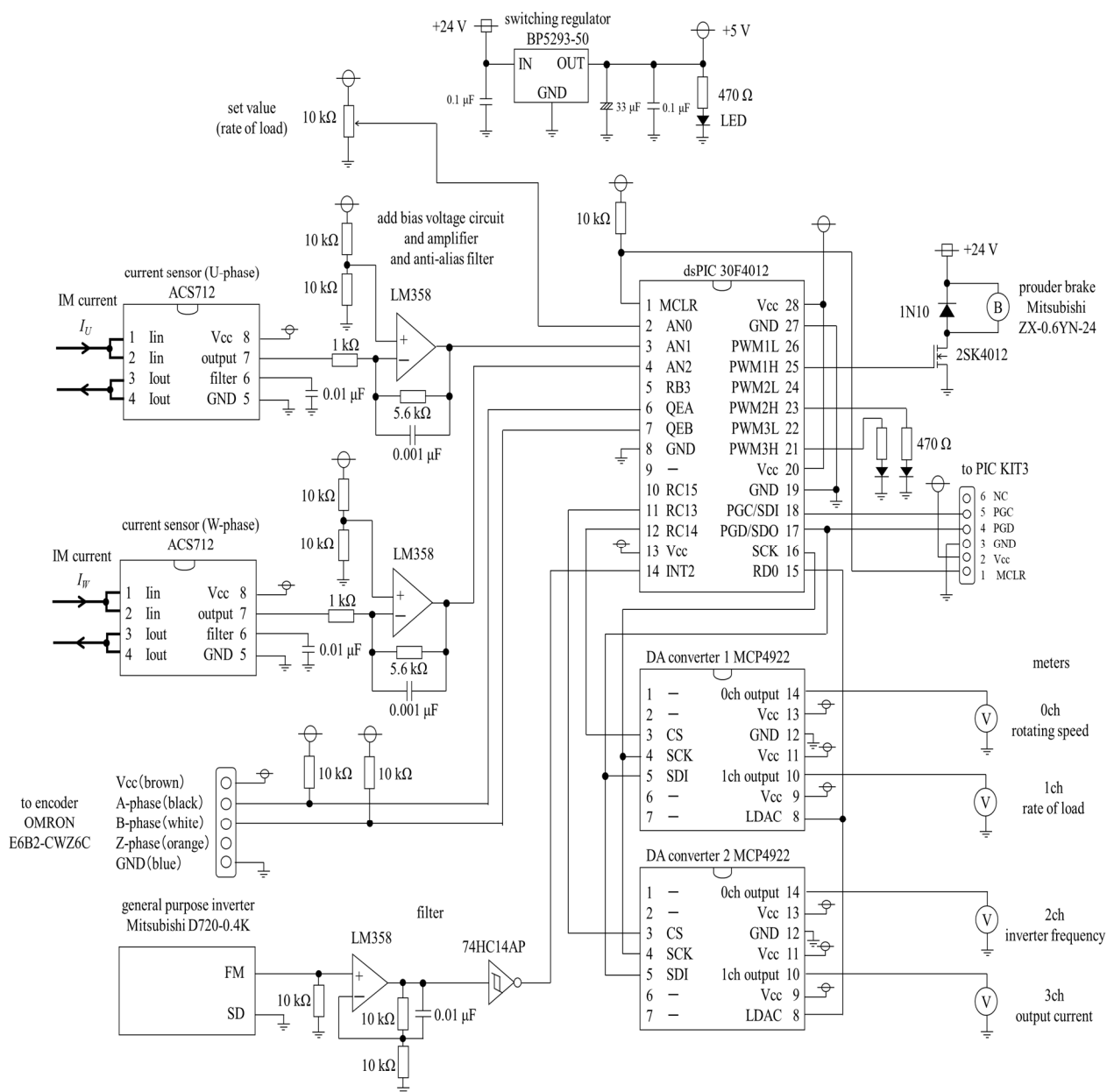


図5 制御電源の回路図

交流電流計は数 Hz 程度の低周波数の測定が困難であるため、本制御電源では、電流の瞬時空間ベクトルから実効値を換算して表示している。瞬時空間ベクトルを用いることによって、三相分の電流値 (u, v, w 相) から直交 2 相 (α, β 相) のベクトルに変換することにより、電流ベクトルの大きさと位相を瞬時値ベースで計算することができる。電動機の電流はホール素子型の電流センサ (ACS712) を使用し、電流値を電圧値に変換している。電圧値は正負の値をとるので、dsPIC で読み取ることができるよう、オペアンプを用いてバイアス電圧を付加している。また、電流センサの出力はノイズを多く含み、AD 変換時のエイリアシングを防ぐため、1 次アンチエイリアシングフィルタとしても機能させている。電流は U 相と W 相の 2 相分しか測定していないが、零相電流を無視できる場合、 V 相電流 i_v は、

$$i_v = -(i_u + i_w) \quad \dots (3)$$

と計算できる。このとき、各相の電流値を座標変換し、瞬時空間ベクトルにおける α 相、 β 相の電流値を次式により求める。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

式(4)において、座標変換前後の電力値が等価 (ユニタリ変換) となるように、係数をかけている。この空間電流ベクトルを図示すると、図 6 のようになる。定常状態における空間電流ベクトルの大きさは、電流の位相や周波数にかかわらず、一定値 (直流量) となることから、インバータが出力する低周波交流においても瞬時に電流値を確定することができる。空間電流ベクトル i の大きさは次式により求められる。

$$|i| = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad \dots (5)$$

いま、負荷が平衡三相負荷であり、したがって各相の線電流の実効値がすべて等しいとすると、空間電流ベクトル i の大きさから、等価な電流値 (実効値) I_{RST} を推定することができる。電流の実効値は、次式により求められる。

$$I_{RST} = \frac{|i|}{\sqrt{3}} \quad \dots (6)$$

よって、マイコンによって I_{RST} を求め、この値をアナログ計器に出力することによって、電流値を表示することができる。ただし、電流センサの計測値にバイアス成分が重畳していると、式(6)で計算した値に電源周

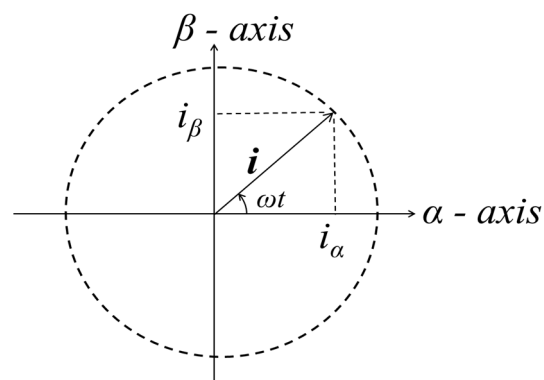


図 6 瞬時空間電流ベクトル

波数の基本波成分の交流信号が現れてしまうため、電流センサのオフセット値は、制御電源ごとにソフトウェア的に排除してやる必要がある。加えて、式(5)は開平演算が必要となるため、マイコンによっては計算時間が過大にかかってしまう点も注意する必要がある。

4 まとめ

本稿では、電動機制御の訓練に供する教材として、任意の負荷が発生でき、その時の電動機の駆動状態 (電流値、回転速度、負荷率) と、インバータの周波数を盤面に表示できる、制御電源装置を開発した。本装置により、電動機の状態をアナログ計器で表示できるため、目視により体感的に電動機の状態を知りうるようになったほか、オシロスコープを用いればより詳細なデータを得ることが可能となった。

一方で、センサ周りの信号処理回路の精度やノイズの問題、また、マイコンでのデジタル信号処理制度の問題で、精密な値を得ることができない点において、さらなるブラッシュアップが必要である。今後は、精度の検討を進め、より精密な表示ができるよう検討していく。

謝辞

本実習装置の機械設計については、千葉職業能力開発促進センターの小笠原邦夫先生にたいへん有益な助言をいただきました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 五十嵐智彦、子川昌浩、「負荷特性に応じた汎用インバータの取扱いに関する実習教材」、技能と技術、2019 Vol.1, pp11-18