

インバータ駆動誘導電動機によるトロール網の 位置制御に関する研究

山田 英二* 辻 峰 男*
泉 勝弘* 小山 純**
西ノ首 英之***

A Study of Position Control of Trawl-net Driven by a Inverter-Induction Motor System

by

Eiji YAMADA*, Mineo TSUJI*, Katsuhiko IZUMI*
Jun OYAMA** and Hideyuki NISHINOKUBI***

In order to drive trawl winch, a thyristor leonard control system or a commutatorless motor system has been used. However, a current source inverter-squirrel-cage induction motor drive system will be used to drive trawl winch because of its full four-quadrant regenerative capability, fuseless short-circuit proof capability and overall ruggedness.

In this paper, the current source inverter-induction motor system for trawl winch is designed and tested. A vector control algorithm which is described by a assembly language is run by the microprocessor V20 (NEC). A DC machine driven by a chopper is used to simulate the speed-torque characteristics of the trawl-net. The armature current with some patterns is controlled by the chopper, so that the load torque of the induction motor is controlled also. The experimental results are shown to demonstrate the satisfactory speed control for the sine-wave change of load torque.

1. まえがき

最近のパワーエレクトロニクス技術の進歩は著しく、特にベクトル制御の発明により、インバータによる誘導電動機の変速運転システムが、直流機を用いた静止レオナードシステムに匹敵する制御性能を有するまでになり、保守性、信頼性、高速回転など誘導機固有の利点を生かして、陸上一般産業では広く適用されつつある。トロールウインチ用としては、現在静止レオナード装置¹⁾や無整流子電動機²⁾が用いられているが、一般産業用の動向からいって、今後インバータによる誘導電動機駆動システムが導入されるものと考えられる³⁾。

そこで本稿では、4象限運転が簡単な回路構成で実現できることや保護が容易であることなどの特徴を有する電流形インバータ制御誘導電動機をトロールウインチモータとして適用することを考え、トロール網の速度—トルク特性を模擬した負荷装置をトランジスタチョップ制御直流機で実現し、各種の基礎的試験が行えるシステムを開発したのでその概要を報告する。本システムは、16ビットマイクロプロセッサV20を中心としたデジタル制御系とし、ソフトウェア開発にも工夫を凝らしている。

昭和62年4月30日受理

*電子工学科 (Department of Electronics)

**電気工学科 (Department of Electrical Engineering)

***水産学部 (Faculty of Fisheries)

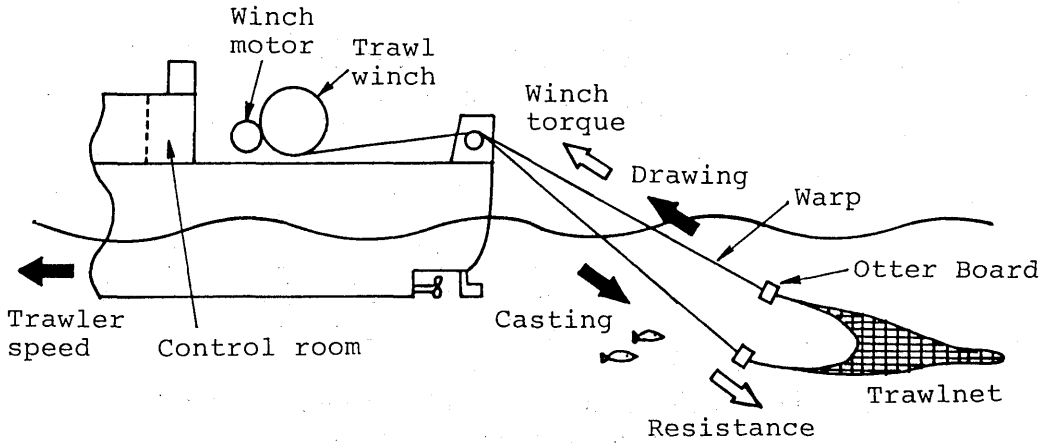


Fig. 1 Main parts of stern trawler

2. トロール網制御系のモデリング

トロール網のウインチモータによる位置制御においては、まず、ウインチモータの負荷となるトロール網がどのようなトルク特性をもつか知ること、次に、それに対するウインチモータ制御システムの特性が如何にあるべきかを検討することが重要である。本章では、これらの問題について考える。

Fig. 1 にウインチモータによるトロール網制御系のモデル図を示す。揚網時、トロール網の海水に対する速度は、“船速+ワープ巻き込み速度”であり、船速が大きいとウインチが過負荷になる恐れがあるため、ワープ巻き込み速度はあまり大きくできない。このとき、ウインチモータは電動機として動作し、正回転である。投網時には、トロール網の海水に対する速度は、“船速-ワープ繰り出し速度”となる。このとき、ウインチモータはトロール網側から逆回転させられ、発電機として動作する。しかし、ウインチトルクの方向は変化しないので、ウインチモータはトロール網に対しブレーキの役目をする。ウインチモータに接続する電力変換器（インバータ）は返還される電力を有効的に処理する必要がある。

次に、トロール網の抵抗（トルク）について述べる。小山氏は、実測結果よりトロール網の抵抗 R が近似的に次式で与えられることを示している⁴⁾。

$$R = k ab \frac{d}{l} v^2 \tag{1}$$

但し、 v ：対水曳網速度、 a ：トロール網の縮結を入れない網地の最大値、 b ：トロール網の縮結を入れない最大長さ、 d/l ：網糸の直径 d と網目の脚の長さ l の比の平均値、 k ：定数

(1)式より、抵抗 R は対水曳網速度 v の 2 乗に比例し

て急激に大きくなる。従って、ウインチモータの最大出力や最大電流の範囲内で、できるだけ高速に網の位置制御を行うためには、船速の情報を常に制御システムへ取り入れておき、それに基づいてワープの速度を決定することが望まれる。

ところで、網の抵抗は波浪の影響も受ける。Fig. 2 に、東海・黄海の波浪特性として、波高と波周期の関係を示す⁵⁾。図中、 $T=5.00\sqrt{H_{1/3}}$ の線は国際試験水槽会議で提唱された値であり、東海・黄海の波はそれに比べ険しい波であるといえる。

以上述べたトロール網の抵抗は第 4 章のチョッパ制御直流機で模擬される。

3. 電流形インバータ駆動誘導電動機系

トロールウインチ駆動のために、4 象限運転が容易

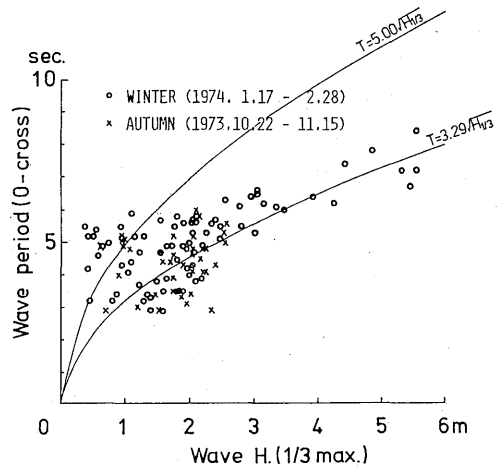


Fig. 2 The relation between the wave period and wave height at the East China Sea.

に行え過負荷に強い電流形インバータ駆動誘導電動機を用いる。本章ではこのシステムのハードウェアとソフトウェアについて述べる。

3. 1 システムのハードウェア構成

Fig. 3 にシステムの構成図を示す。以下、各部の説明を行う。

- (1) 電力変換部 順変換装置としては三相純ブリッジ回路を用いており、これだけで電力回生を行うことができる。電流形インバータは最も一般的な直列ダイオード方式を採用している。
- (2) 速度検出部 ロータリエンコーダ (RE) は1/4サイクル位相の異なる2種類のパルス(A信号, B信号)を1回転にそれぞれ1024個発生する。S360B114はこのパルスをカウントするためのICで、4個のエッジ(各相の立上り,立下り)を全てカウントする4倍モードで使用する。従って、1回転で4096パルスの分解能である。
- (3) 電流検出部 電流検出用の抵抗(1V/20A)を用いて電圧信号として取り出し、それを増幅してV/Fコンバータに入力する。V/Fコンバータは入力電圧に比例した周波数を出力し、これを8253でカウントすることにより直流電流の大きさを知る。電流検出の精度は、20Aが $60 \times 2 \times 4096\text{Hz}$ に対応している。パルス出力となることから、フォトカプラを通すことにより絶縁が可能となる。
- (4) PLL位相制御回路 この回路は8255からの点弧角指令 α に従って三相順変換装置の点弧パターンを決定する役目をもつものである。PLL回路では、零クロス検出回路により三相交流と正確に同期をとり、

15360Hzのパルス信号を電圧制御発振器(VCO)が出力する。このパルスのカウント数 α_c と制御角 α の差($\alpha_c - \alpha$)が示す番地に従って、PLL回路内のROMからコンバータの点弧パターンを出力する。 $\alpha_c - \alpha$ の演算は、8255のポートBより α を2の補数として出力し、加算器で求める。ポートCの出力はコンバータの強制停止用である。また、8255とPLL回路のタイミングに f_c の信号を利用する。

- (5) マイコン制御部 マイクロプロセッサとしては16ビットのV20を用いており、図に示すような周辺LSIやメモリのアドレスバス(20本)、データバス(8本)、コントロールバスを通して接続している。タイマ8253PITは割り込み周期を決定するためのもので、その信号を受けて割り込みコントローラ8259がCPUを呼び出し、割り込み処理プログラムの実行を促す。モニタ用パソコンとシリアルI/O8251をRS232Cケーブルで接続し、システムの状態表示や速度設定などがコマンド入力により行えるようにしている。

3. 2 システムのソフトウェア構成

開発したソフトウェアは、実際にインバータや誘導機を制御するためのプログラム(モータ制御プログラムと呼ぶ)とソフトウェア開発を容易にするための通信プログラム及びモニタプログラムである⁶⁾。

- (1) モータ制御プログラム 誘導電動機の制御法としてはベクトル制御を採用する。Fig. 4はソフト的に表示したシステムのブロック図である。システムへの指令値としては、回転角速度指令 ω_r^* 、磁化電流指令 i_{sd}^* がある。実際の回転角速度 ω_r と指令値 ω_r^* の差がPI速度制御器に入り、その出力をトルク電流指令 i_{sq}^* と

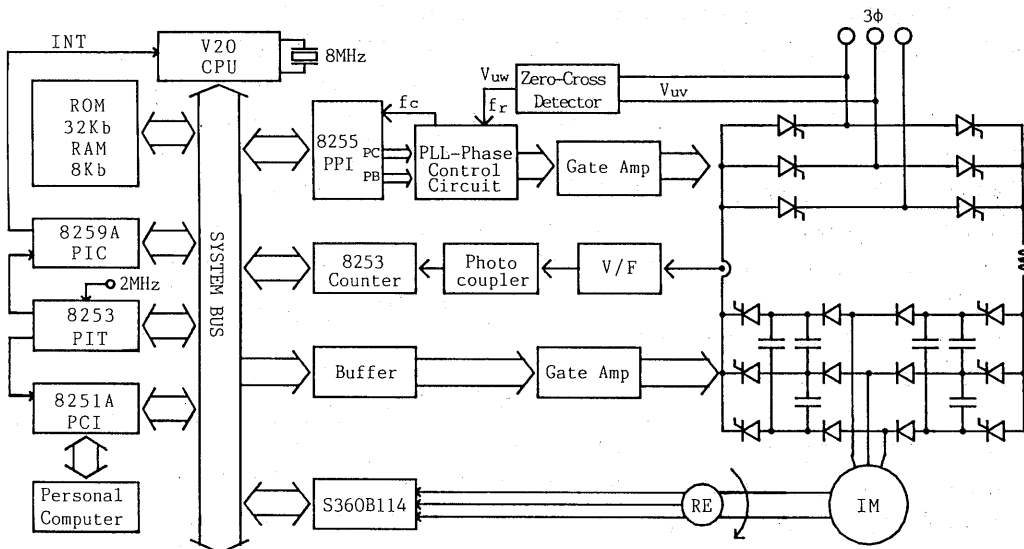


Fig. 3 Current source inverter-induction motor drive system

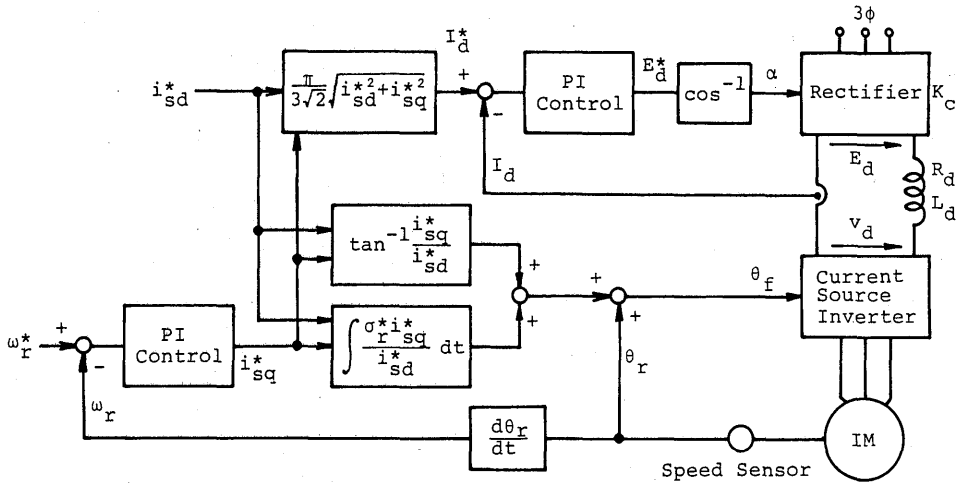


Fig. 4 Block diagram of vector control system

する。 i_{sd}^* と i_{sq}^* により直流電流指令 I_d^* 及びすべり角を演算し、PI制御器と順変換装置で直流電流を、電流形インバータで相電流の位相を制御する。

モータ制御プログラムはメインルーチンと割り込み処理ルーチンから成る。メインルーチンは初期化ルーチンとコマンド処理ルーチンに分かれる。初期化ルーチンは周辺LSIにコントロールワードを書き込むことで終了し、すぐにコマンド処理ルーチンへ入り、コマンド入力待ちの状態をループしている。モータ制御プログラムが実行されているとき、パソコン側は通信プログラムのターミナルモードにあり、パソコンよりコマンド入力するとコマンド処理ルーチンがそれを解釈して各ルーチンへジャンプさせる。各ルーチンの処理が終了すると再びコマンド待ちの状態に戻り以後これを繰り返す。コマンド処理ルーチンには次のものがある。

- (a) コマンドリストルーチン どのようなコマンドがあるか表示する。
- (b) 始動ルーチン ベクトル制御と電流PI制御を行うように割り込み処理ルーチンへ指示する。トルク電流指令は零なので、結果として励磁電流のみが流れる。
- (c) 状態表示ルーチン 直流電流 I_d と回転数の検出値を表示する。何かのキー入力があれば、コマンド入力待ちとなる。
- (d) 速度指令変更ルーチン 始動ルーチンが実行された後であることを確認し、回転数指令を読み込みメモリへ格納する。次に、割り込み処理ルーチンへ速度PI制御を行うよう指示する。その後、状態表示ルーチンを実行する。

(e) 制御パラメータ変更ルーチン 入力された制御パラメータをメモリへ書き込む。

(f) 停止ルーチン 速度PI制御、ベクトル制御の停止を割り込み処理ルーチンへ指示する。直流電流指令 I_d^* を零に設定し、 I_d が十分小さくなった時点でPLL回路にコンバータの停止指令を送る。

割り込み処理ルーチンが実質的なモータ制御ルーチンである。このルーチンは、8253で作られる一定周期(260.5 μ s)ごとに実行されるレベル1のルーチンと、8周期に1回の割合で実行されるレベル2のルーチンより成る。レベル1のルーチンは、直流電流と回転数の検出を行う。レベル2のルーチンは、Fig. 4で、速度指令を基にPI演算、ベクトル演算を行い、順変換装置とインバータに制御信号を送るまでのルーチンで、最も処理時間を必要とする。なおこのルーチンは、コマンド処理ルーチンの管理下で部分的に実行されることもある。レベル2の割り込み処理実行中でも割り込みは受け付け、レベル1の処理が実行される。Fig. 5にプログラム実行過程の一例を示す。

(2) 通信プログラム このプログラムはモニタ用パソコンのフロッピーディスクに作成しており、パソコンのOS(MSDOS)の下で走るプログラムである。主な

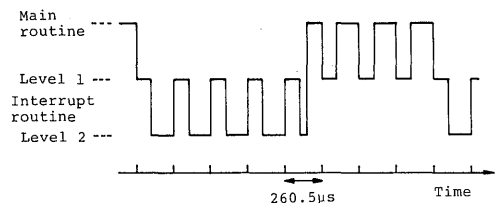


Fig. 5 Timing diagram for interrupt routine

機能は、MSDOSのアセンブラ及びリンカで作られた EXE ファイルをインテル16進形式 (HEX) ファイルに変換すること、HEX ファイルを RS232C を通して制御回路へ転送すること、ターミナル機能を有することである。ターミナルとは、パソコンのキーボードより入力された文字を RS232C へ転送し、逆に RS232C より送られて来るデータを CRT に表示することである。

(3) モニタプログラム モニタプログラムは V20 による制御回路の OS に相当するもので、制御回路の ROM に格納し、電源を入れるとすぐに走り出す。まず、割り込み禁止とし、8259 の割り込みベクトルの設定を行う。次に、データ転送に関係する 8253PIT と 8251 を初期化、起動し、パソコンからのコマンドを受信できる状態にする。その後パソコンからのコマンド入力待ちとなり、コマンド入力があるとそれを解析し、コマンド処理ルーチンへジャンプさせる。コマンドには次のようなものがある。

- (a) Load パソコンから RS232C を通して送られるインテル HEX 型式のデータをメモリへロードする。
- (b) Dump メモリの16進ダンプと ASCII ダンプを RS232C へ転送する。この時パソコンはターミナルモードにあり、データを表示する (以下同様)。
- (c) Input I/O ポートから 1 バイトデータを読み込み、RS232C へ転送する。
- (d) Output I/O ポートに 1 バイトのデータを出力する。引数で 1 バイトデータを指定する。
- (e) Go メモリ上にロードされたプログラムを実行する。引数で実行開始番地を指定する。

その他に、モータ制御プログラムを作成する上で必要となるサブルーチン群がある。これらは、主として RS232C によるパソコンとの通信に関するもので、データの入出力、入力データの解析、文字列の変換などである。このサブルーチンはソフトウェア割り込みで呼び出すようにしている。

4. 直流機を用いたトルール網模擬装置

誘導電動機の負荷となるトルール網の特性を模擬するために、4 象限運転の可能なトランジスタチョッパによる直流機の制御システムを試作した。本章では、この概要を述べる。

4. 1 システムのハードウェア構成

Fig. 6 にシステムの構成図を示す。以下、各部の説明を行う。

- (1) 電力変換部 $T_r1 \sim T_r4$ は単相インバータで、これをチョッパとして使用する。抵抗 R は直流機 (DCM) が発電機として動作する時にエネルギーを消費するためのもので、 T_r5 の ON, OFF によりコンデンサ両端の電圧をほぼ一定に保つようにする。
- (2) 速度検出部 第 3 章の場合と同様である。
- (3) 電流検出部 電流検出用抵抗 (1 V/40 A) を用いる。V/F コンバータは、電流 40 A に対し 256 kHz, 0 A に対し 128 kHz, -40 A に対し 0 kHz のパルスが発生する。電流の正方向は Fig. 6 の方向である。
- (4) トランジスタ点弧回路

8255 をモード 0 の出力ポートとして使用し、その出力でトランジスタの常時 ON, 常時 OFF, 8253 の出力

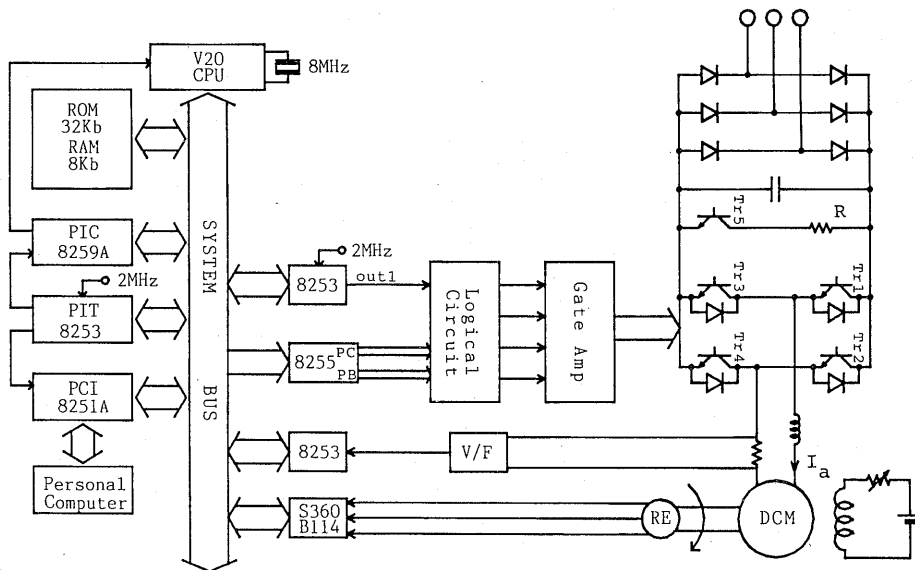


Fig. 6 Chopper-DC machine drive system

Table 1 Switching of $T_r 1$ by 8255

PB 0	PB 1	$T_r 1$
0	0	OFF
1	0	out 1 L : ON out 1 H : OFF
1	1	ON

に依存して ON または OFF のいずれかが選択できる。このために、各トランジスタに対し8255の出力ポートを2つずつ割り当てる。例えば、 $T_r 1$ の制御はPB 0, PB 1が受け持つ。 $T_r 1$ を例にとり、Table 1に8255の出力とトランジスタのON, OFFの関係を示す。8253の出力 out 1の“L”期間の長さを制御することによりトランジスタのON期間が制御でき、結果として電圧制御や電流制御が可能となる。この際、ON期間とOFF期間の和すなわち制御周期は一定とする。これは、8253の出力 out 0をモード2のレートジェネレータとして使用し、GATE 1に入力することで達成される。

(5) マイコン制御部 第3章の場合と同様である。

4. 2 システムのソフトウェア構成

通信プログラムやモニタプログラムは、第3章のものでそのまま使用できる。従って、本節では直流機の制御プログラムについてのみ述べる。

直流機制御プログラムもメインルーチンと割り込み処理ルーチンで構成され、基本的な考え方は第3章の場合と同様である。

メインルーチンの中のコマンド処理ルーチンで、特に第3章の場合と異なるものを以下に述べる。

(a) チョップ始動ルーチン 電機子電流のPI制御を行うよう割り込み処理ルーチンへ指令する。

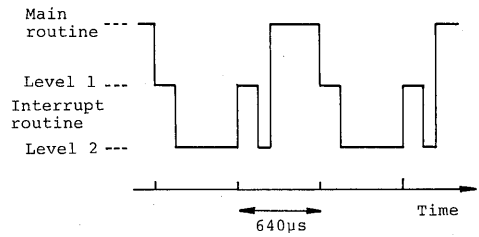


Fig. 7 Timing diagram for interrupt routine

(b) 電流指令入力ルーチン 割り込み処理ルーチンで演算する電機子電流指令 I_a^* のパターンを指令する。直流機のトルクは、界磁電流が一定のとき電機子電流に比例することから、このルーチンを負荷トルク指令ルーチンと考えることもできる。発生するパターンには、一定値、正弦波、速度の2乗に比例するパターン及びこれらの組合せがあり、トロール網の特性が模擬的に実現できる。

(c) チョップ停止ルーチン 電機子電流のPI制御を止めるよう割り込み処理ルーチンへ指示する。その後、全てのトランジスタをOFFする信号を出す。割り込み処理ルーチンは、8253により一定周期(640µs)ごとに起動される。Fig. 7にプログラム実行過程の一例を示す。レベル1で電機子電流 I_a と回転速度を検出し、電流指令入力ルーチンに基づいて指令値 I_a^* を演算する。レベル2は割り込み周期2回に1回の割合で実行され、電流PI制御演算とチョップのON期間を制御するために8255及び8253ヘデータを出力する。

5. 実験方法及び結果

5. 1 実験方法

第3章で述べた電流形インバータ駆動誘導電動機(システム1と記す)を第4章で述べたトロール網模擬装置としてのチョップ駆動直流機(システム2と記

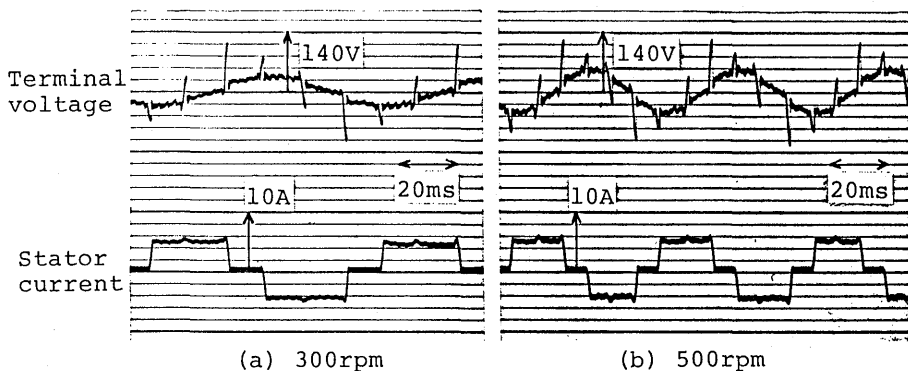
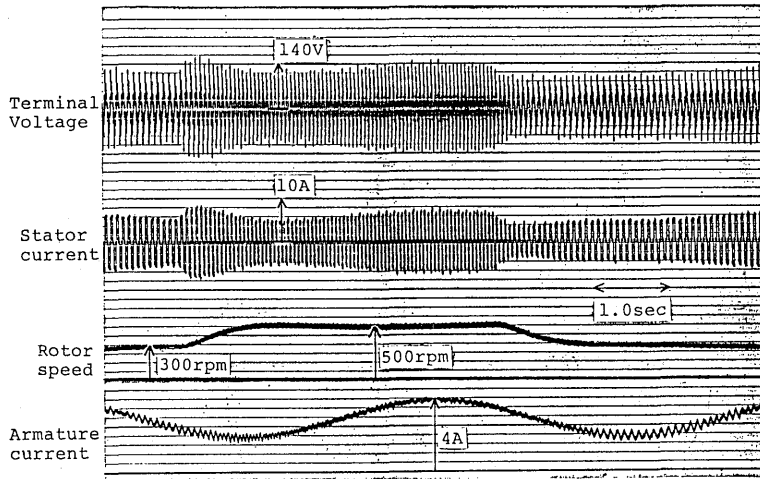
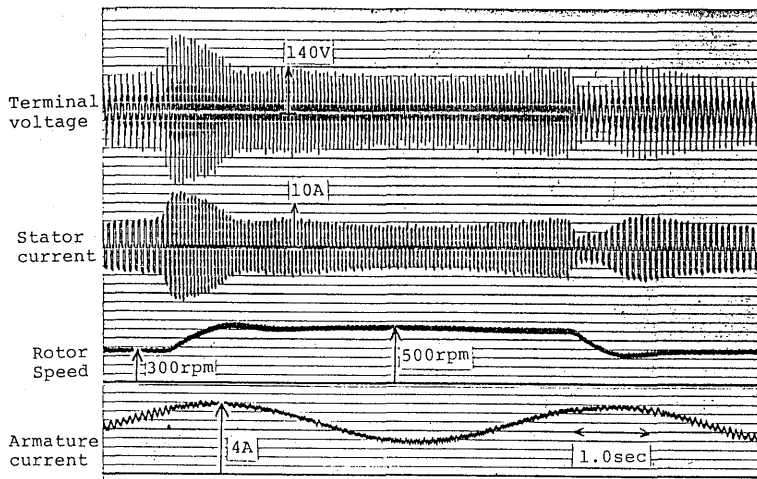


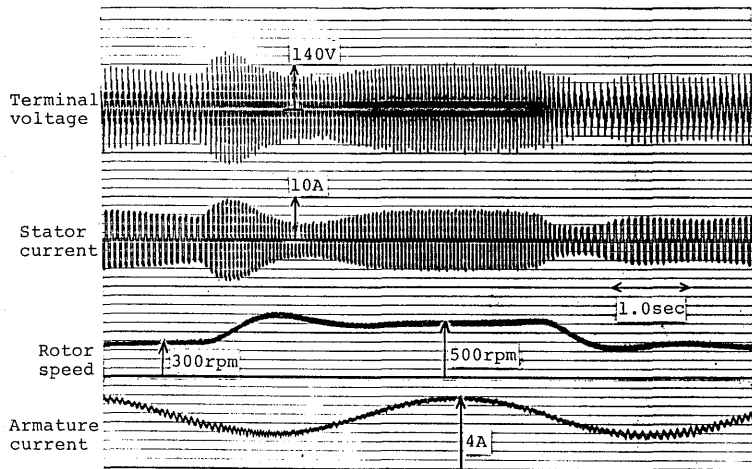
Fig. 8 Steady-state wave forms of induction motor



(a) $K_{vp}=16, K_{vi}=1/16$



(b) $K_{vp}=16, K_{vi}=1/8$



(c) $K_{vp}=8, K_{vi}=1/16$

Fig. 9 Transient responses for the step changes of rotor speed

す)に直結する。以下、実験の方法を述べる。

- ① RS232C ケーブルでパソコンとシステム 1 を接続する。
- ② パソコンで通信プログラムを起動し、ターミナルモードとする。
- ③ システム 1 のマイコン部の電源を入れる。すると、ROM 上のモニタプログラムが走り出す。
- ④ パソコンからの入力により、モニタプログラムの受信プログラム (Load) を起動する。
- ⑤ パソコン側では、ターミナルモードからファイルの転送モードに切り換え、作成しておいたシステム 1 のモータ制御プログラム (インテル HEX 型式) をフロッピーディスクから呼び出し転送する。
- ⑥ モニタプログラムは送られてきたモータ制御プログラムを RAM へ次々に格納する。ファイルの終了記号 (1AH) が送られてくると、モニタプログラムは再びコマンド待ちの状態になる。
- ⑦ パソコン側では、ファイル転送が終了すると再びターミナルモードにする。
- ⑧ パソコンで、G=0040:0000 とキー入力すると、モニタプログラムの Go コマンドが実行され、0040:0000 番地から保存されたモータ制御プログラムが走り出す。
- ⑨ システム 1 の三相電源を入れる。
- ⑩ システム 1 の始動ルーチンを起動し、三相交流入力電圧を徐々に上昇させる。
- ⑪ システム 1 の速度指令変更ルーチンで速度の設定を行う。
- ⑫ システム 2 においても①～⑧の手順は全く同じであり、これを実行する。この結果、全てのトランジスタは OFF で、割り込み処理ルーチンで電流と速度の検出だけが行われている。
- ⑬ システム 2 で、直流機の界磁電流を流す。直流機は発電機として動作するが電流は流れない (無負荷)。
- ⑭ システム 2 でチョップ始動ルーチンを起動する。
- ⑮ システム 2 の電流指令入力ルーチンで、種々の負荷トルクパターンを実現する。
- ⑯⑰ ⑬と⑮により、種々の定常及び過渡特性試験を行う。
- ⑱ 停止は、システム 2 のチョップ停止、システム 1 のモータ停止の順に行う。

5. 2 実験結果

実験に用いた誘導機は 2.2kW、直流機は 3 kW である。Fig. 8 に定常運転時の誘導機の端子電圧と相電流波形を示す。端子電圧のスパイクはインバータの転流に起因するもので、転流コンデンサの容量を大きくすると小さくなる。インバータの周波数と回転数はほぼ

比例関係にある。

Fig. 9 は、回転速度指令を 300rpm から 500rpm、次に再び 300rpm へと変化させた場合の過渡応答である。このとき、直流機の電機子電流 (負荷トルク) は波浪を模擬して 5 秒周期で変動させている。図より、負荷トルクの変動に影響されることなく回転速度の制御が実現できた。特に、PI 速度フィードバックの比例ゲイン $K_{pp}=16$ 、積分ゲイン $K_{vi}=1/16$ のときは、回転速度のオーバーシュートもなく良好な過渡特性が得られた (a) 図。 (a) 図の場合と比べて、積分ゲインを 2 倍にした (b) 図、比例ゲインを $1/2$ にした (c) 図では回転速度にオーバーシュートが見られる。

6. あとがき

トロール網の特性を模擬したトランジスタチョップ制御直流電動機の電機子電流制御により、速度の 2 乗に比例した網の抵抗や波浪の影響がシミュレートでき、ウインチモータの特性試験が行えるようになった。実験結果より、電流形インバータ駆動誘導電動機はウインチモータとして十分利用できるものと考えられる。なお、実用化に際しては、超低速運転で PWM 制御の導入によるトルク脈動の低減、理想的ベクトル制御実現のための転流遅れ補償や二次抵抗推定が望まれる。

最後に、本研究に協力された大学院学生の津森伸一君および高濱昌信君に深く感謝の意を表す。なお、本研究は昭和 61 年度教育研究学内特別経費の補助を受けており、関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 丹羽・漆畑・大野：「極洋納入大形トロール船用サイリスタレオナード装置」富士時報, Vol. 44, pp. 662—671 (昭 46)
- 2) 丹羽・野村・美齊津：「船舶における無整流子電動機の応用」富士時報, Vol. 53, pp. 616 (昭 55)
- 3) 立花：「海洋船舶用電機品の動向」富士時報, Vol. 58, pp. 706—707 (昭 60)
- 4) 小山：「トロール網の抵抗について」日本水産学会誌, Vol. 33, pp. 74—80 (昭 40)
- 5) 西ノ首・川島：「実験試験による漁船の耐航性について—VII」日本航海学会第 60 回講演会, pp. 129—135 (昭 54)
- 6) E. YAMADA, K. IZUMI, M. TSUJI & J. OYAMA: "Comparison between computed and test results of a vector controlled induction motor using microprocessor" Proc. of ICEM, Vol. 2, pp. 685—688 (1986)