

24V/3.1kWブラシ付き直流モーター速度制御用 駆動装置の作製について

常三島技術部門
地域協働グループ

飯田 仁(IIDA Hitoshi)

1. はじめに

研究支援業務として、24V/3.1kWブラシ付き直流モーター速度制御用駆動装置の作製依頼が来た。打ち合わせの際にPWMによる速度制御で良いか確認した所、問題なしとの回答を得た。知識としては理解しているPWM制御であり、小型のモーター駆動には専用ICを使用すれば良いが、24V/3.1kWとなると電流は約130Aとなり、専用ICも無く非常に苦労したので、今後の参考になればと思い報告する。

2. 制御対象

制御対象はサイドスラスターの駆動モーターで、船舶の船首や船尾に推進スクリュー軸に対し直角に取り付けられ、船舶の左右方向の動きを調整するものである(図1)。フェリーなどの大型船に多く設置され接離岸時に用いられる。ただし、今回の物はスラスターのプロペラ直径が180mmと小型船舶用の物で、このプロペラを駆動するモーターを回転数制御する。



図1 船首サイドスラスターの例^[1]

3. 駆動装置の概要

今回の駆動装置は、図2に示す構成となり、電源は自動車用12Vバッテリーを2個直列接続して24Vとして使用する。サイドスラスター用モーターは定格(24V/3.1kW)のブラシ付

き直流直巻きモーターである。図2中央のIGBT(スイッチング素子)をON-OFFすることで対象モーターを制御する。

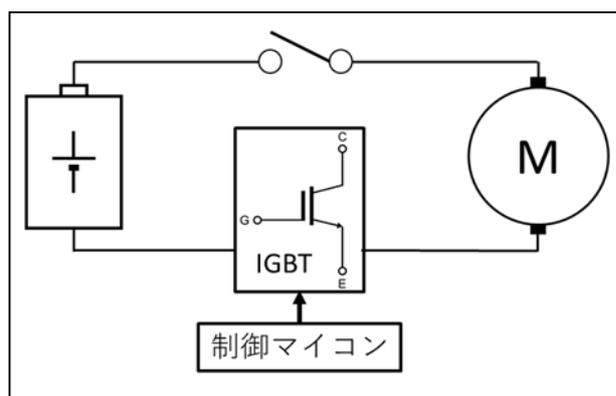


図2 駆動装置概要図

4. 直流モーターの速度制御の原理

直流モーターは印加電圧により回転数が比例する特性を持っており、小型モーターでは1.5Vの電池を一つ接続するよりも、電池を2個、3個と複数直列に接続すると、高速に回転することから経験的に理解できると思う。今回は、図2中央のスイッチング素子でON-OFF時間を高速に制御する。ONの時間を長くするとモーターに印加する平均電圧は高くなり高速回転し、逆にONの時間を短くするとモーターに印加する平均電圧は低くなり低速回転する。ON-OFFの間隔を数秒程度にゆっくりとするとモーターはONの時だけ全速回転し、OFFの時は停止するので回転数を制御できない。ON-OFFの間隔を数ミリ秒以下に短くすると、前述のとおりモーターに印加する平均電圧が変化し、モーターの回転数制御が実現できる。このように高速でON-OFFする制御をPWM制御といい、LEDライトの照度調節にも利用されている。

PWM(Pulse Width Modulation)は、パルス幅変調といわれ、パルスの周期は一定でパルス

の幅を変更するもので^[2]、今回はIGBTのON-OFF制御にPWMを利用し、モーターに印加する平均電圧を制御するものである。図3に概念図を示す。平均電圧を制御する上で、デューティ比があり、ON時間÷(ON時間+OFF時間)で表される。

なお、回転方向はスラスタに組み込まれている電磁接触器を使用し変更した。

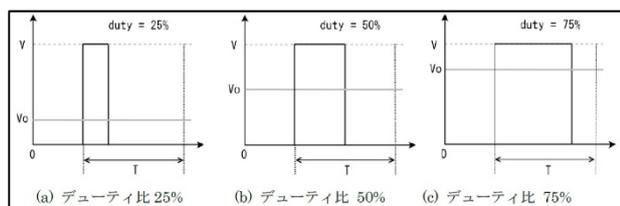


図3 PWM電圧変化の概念図^[3]

5. スイッチング素子の選定

前述したが、24V/3.1kWの直流モーターを制御するので、電流は単純計算で約130Aとなる。余裕を考えて電流値が定格の50%以下で利用できるよう、260A以上の定格容量を有するIGBTを探すことにした。

インターネットで検索すると、IXYS社のIXGN320N60A3を見つけることができた。定格も耐電圧600V、許容電流320A、単価3,390円(2020年9月ごろ)と申し分なかった。ただし、このIGBTにはフライホイールダイオードが内蔵されていないため、外付け接続するために、STMicroelectronics社のSTTH20004TV1を使用することとした。このダイオードは1つの素子に2個のダイオードが内蔵されており、定格は耐電圧400V、許容電流120A×2と並列接続することでこちらも十分である。

6. 駆動装置の製作

6-1 駆動回路

スイッチング素子等の主な部品が決定したので、周辺回路の固定や放熱も考え、アルミ板の上面に各素子を配置し、裏面に冷却用の廃棄PCから流用したCPUクーラーを配置した。IGBTやダイオードの配線は、許容電流を考えると太さ38mm²(162A)^[4]の配線を使用しなければならず、この配線をすべての素子間の配線に使用すると小型化することができない。そこで配線ではなく、15×5mm(断面積

45mm²)の銅棒を利用することとした。2D-CAD上で配置を検討し試行錯誤を繰り返し、最終的に完成した駆動装置の主回路部分を図4に示す。図4左下に、過電流保護と主電源のON-OFF用に300Aのブレーカーを設置した。この上に制御回路基板が載る。

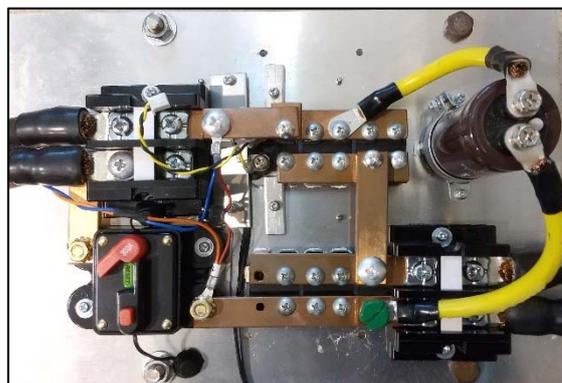


図4 完成した駆動回路主回路部

6-2 制御回路基板

IGBTの制御はマイコン(Arduino)にて実施する。ノートPCを使用してArduinoに指令を与え、ArduinoとPC間はシリアル通信を使用した。ArduinoはIGBT駆動用のゲート回路や、回転数検出用のオペアンプ等の外部回路が必要となるので、それらをまとめてユニバーサル基板上に実装した。最終的に完成した制御回路基板を図5に示す。IGBTのPWM制御に使用するスイッチング周波数は4kHzとした。

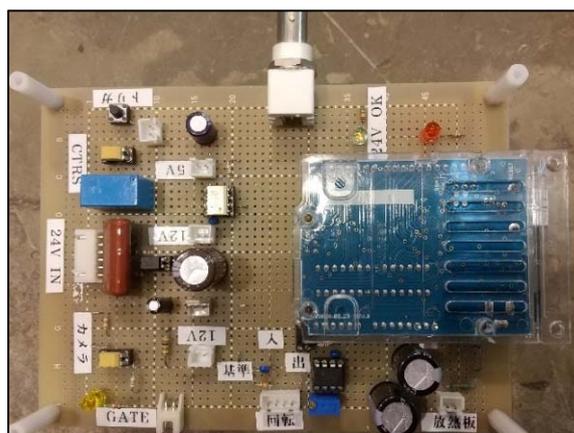


図5 完成した制御回路基板

完成した駆動装置全景を図6に示す。装置の大きさは390×190×160mmと、比較的コンパクトにまとめることができたと思う。



図6 駆動装置全景

7. 苦労した点

7-1 IGBTのON-OFF制御

24V/150Wの直流電源装置を使用し、低速で動作確認を実施後、実験室に移動してバッテリーを接続し、本番と同じ主回路として、無負荷にて動作確認をしていた所、数秒程度でモーターが全速回転となり、IGBTから煙が出た。慌ててブレーカーをOFFにして事なきを得たが、IGBTを焼損させてしまった。

焼損したIGBTを交換し、焼損原因を調査するためIGBTのゲート駆動波形であるフォトカプラの一次側（黄色）と二次側（紫色）を観察した結果を以下に示す。波形観測時はバッテリーとモーターも外した無負荷状態である。

図7はIGBTを未接続の場合で、一次側の立ち上がり波形は、ほぼ遅延なく二次側に伝達されている。一方、図8はIGBTを接続した場合で、一次側に比べ二次側の波形に明確に遅延が見られた。このような現象は、ゲート駆動電源の容量不足で発生すると指摘を受けた。焼損時はIGBTのゲート駆動電源として、ON用に12V/2AとOFF用に5V/2AのACアダプターのみを使用していた。結果論だが、このように立ち上がり時間が長くなったことでIGBTが発熱し焼損に至ったと考える。

上記の指摘を踏まえ、ゲート駆動電源のACアダプターに加え、電解コンデンサ（ON用：470 μ F、OFF用：220 μ F）を追加し容量不足を改善した。対策後の波形を図9に示す。フォトカプラの二次側波形の10Vラインの立ち上がりタイミングを図8と図9で比較すると100nsec程度の遅延に改善されていることが分かる。

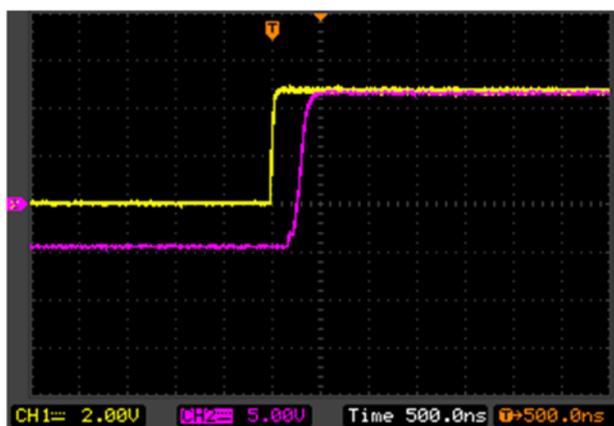


図7 ゲート駆動波形1（IGBTなし）

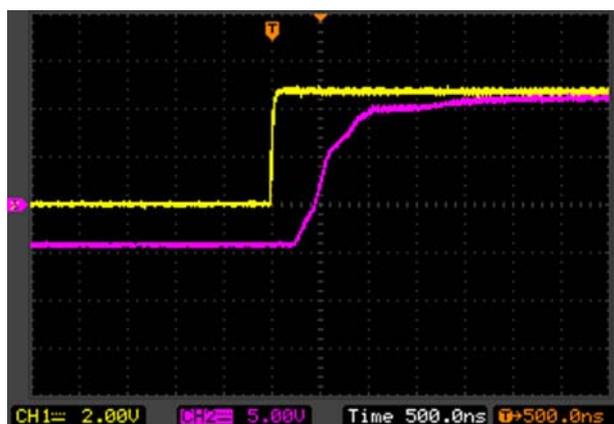


図8 ゲート駆動波形2（IGBTあり）

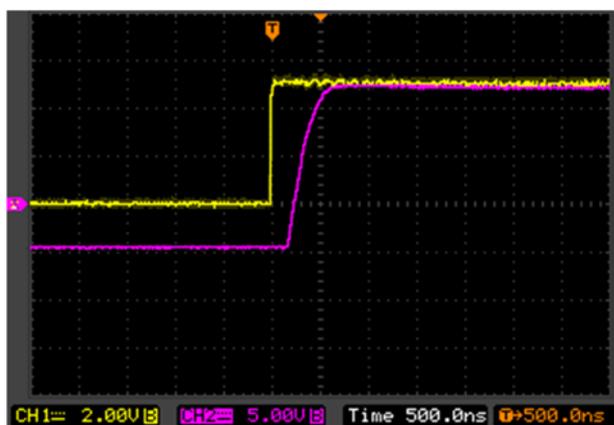


図9 対策後ゲート駆動波形（IGBTあり）

7-2 回転数検出

回転数制御を依頼されたが、回転数の検出器が対象のモーターには無かった。研究データ取得用の回転数検出器は取り付けていたが、そこから制御用のマイコンやPCに回転数を取得することができなかった。

そこで結果的には利用できなかったが、モーターの回転軸端部に放射状に白黒のパターンを書いたシールを張り付け、フォトリフレ

クタ (RPR-220) にて白と黒の反射率の違いによる簡易なエンコーダーが作れないか試してみた。シールを張り付けたモーター端部の状況を図 1 0 に示す。図 1 0 中心の回転軸左右に有るカバー取り付け用のネジ穴を利用してフォトフレクタ用の基板 (図 1 1) を固定した。図 1 1 中央部の黒く四角い部品がフォトフレクタである。取り付けしたエンコーダーの状況を図 1 2 に示す。

このエンコーダーであるが、回路はオペアンプとコンパレーターで構成するもので、手でモーター軸を回転すると正常にパルス波形を検出することができた。このパルスを Arduino に取り込むことでプログラムにて回転数を求めることができた。



図 1 0 モーター端部の状況



図 1 1 フォトリフレクタ基板

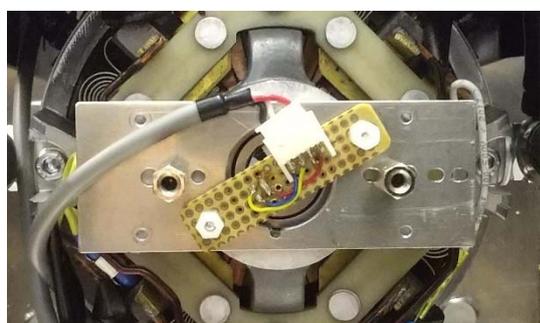


図 1 2 エンコーダーの状況

7-3 制御プログラム

Arduino に回転数を設定すると前述のエン

コーダーを使用して回転数を検出、フィードバックすることで一定回転となるように制御する予定であったが、スラスタの負荷変動が大きく、また、回転数検出はできているが、1回転あたり8パルスと精度が低く参考程度にしかならなかった。結果的には回転数制御のフィードバックデータとして利用できず、回転数を設定する方法は諦めた。

そこで、研究用回転数検出器の表示に基づく回転数制御に変更した。これは Arduino にデューティ比を設定するもので、スラスタの状況に合わせて、逐次手動でデューティ比を設定するものである。Arduino ではデューティ比は 0~255 の範囲で指定する。今回の実験では、デューティ比約 78% (200) で回転数約 2000rpm となり、電流値は約 120A であった。

7-4 ノイズ対策

今回の様に PWM 制御でモーター等の誘導性負荷の大電流を ON-OFF 制御すると、IGBT の ON-OFF 時に過電圧が発生する。この過電圧が様々な所にノイズとして悪影響を与えるため、影響のない程度まで小さくする必要がある。今回の場合は、電源の 24V バッテリー端子間に最大約 230V の過電圧を観測した (図 1 3)。スイッチング周波数が 4kHz のため、約 250μsec ごとに過電圧が発生していることが分かる。

この対策としては、駆動回路のバッテリー端子部に大型の電解コンデンサー (250V/1000μF) を追加設置した。図 6 右上がそのコンデンサである。対策後のバッテリー端子間電圧を図 1 4 に示す。

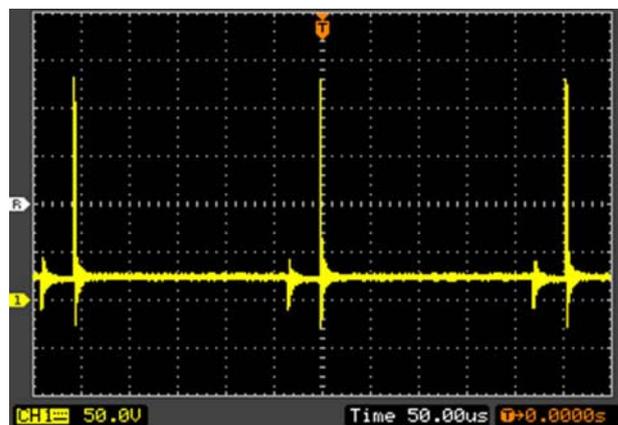


図 1 3 過電圧の状況

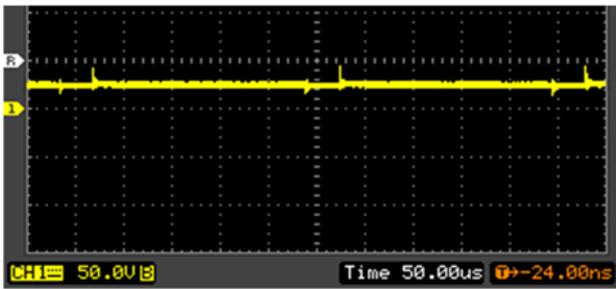


図 1 4 対策後の電源電圧

7-5 全体として

当初、比較的簡単に実現できると考えていたが、理論を知っているだけでは全く歯が立たず、知識不足を痛感した。今回の駆動装置作製では多くの事を学び、吸収することができた。

大量の水を使う屋外実験で、作製した駆動装置への水滴対策を万全にした。また、夏期の実験はそれ程問題ではなかったが、冬期の実験は、駆動装置の問題よりも筆者の寒さ対策に苦労したが、今となっては良い経験であったといえる。

8. 結果

デューティ比に応じて回転数を制御することが可能で、研究用途にも対応可能な駆動回路を作製することができた。実験を繰り返すことでデューティ比と回転数の関係も明確になり、最終的には、デューティ比の自動加速機能も付加し、今回の研究目的には十分対応できた。また、学生の研究も順調にデータ取得ができているようで、依頼にこたえることができた。

9. 今後の課題

市販されている駆動装置はIGBTやモーターを保護するために様々な保護機能が追加されているが、今回作製した駆動装置には、過電流に対するブレーカーと放熱板の温度を検出するセンサーしか付けられていない。CT（変流器）などのセンサーを追加して保護機能の充実を図る必要があると考える。

また、駆動用の24V電源回路のノイズ対策を実施したが、それでもマイコンの制御回路には多くのノイズを観測している。この対策も進めて行きたい。

謝辞

実績のない筆者に対し、我慢強く駆動装置の完成を見守って頂いた、依頼者である重光亨先生に感謝致します。また、IGBT焼損後の様々な対策に関して貴重な情報をご提供頂き大変お世話になった、山中建二先生に感謝致します。

参考文献

- [1] <https://ja.wikipedia.org/wiki/サイドスラストター>
- [2] <https://ja.wikipedia.org/wiki/パルス幅変調>
- [3] 2021年機械科学実験2テキスト p33 徳島大学工学部機械科学コース
- [4] https://www.swcc.co.jp/cs/products/tec_information/pdf/kyoyou.pdf