

和歌山大学学生自主創造支援部門（クリエ） クリエプロジェクト
＜2023 年度ミッション成果報告書＞

プロジェクト名：ロボットプロジェクト

ミッション名：VVVF インバータ製作ミッション

ミッションメンバー：システム工学部 3 年 香山 力也，システム工学部 2 年 松浦 和貴，
システム工学部 1 年 氏原 伊吹

キーワード：VVVF インバータ， モーター制御， 誘導電動機， 正弦波 PWM， 鉄道

1. 背景と目的

VVVF インバータ製作ミッション（以下、本ミッション）では、近年 SDGs などの環境対策への関心から注目を集めている鉄道や電気自動車等の分野で主に使用されている交流電動機の制御装置を設計・製作からプログラムまでを自らの手で行うことにより、本ミッションを通してインバータや交流電動機などの理論や構造を学習し、知識として今後の活動へ役立てることを目的としている。

また、本ミッションでは汎用的に使用できるインバータ装置の製作を目指した。これは他のクリエプロジェクトやミッションにおいて交流電動機を使用する際、一からインバータ装置を製作することなく本ミッションで製作したインバータ装置の設定を使用したい環境に合わせて再設定するだけで簡単に交流電動機を制御できるようにするためである。これによりクリエ全体での活動をより高度なレベルへ高めることを目的とした。

2. 活動内容

本ミッションの活動内容は大きく分けて以下の 4 つとなっている。

① インバータと交流電動機の理論を学習

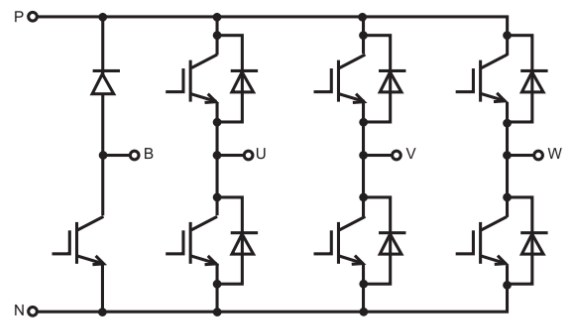
インバータ装置を製作するにあたって始めにインバータや制御対象となる交流電動機の理論や仕組みを学習した。

② インバータ装置の回路設計

学習した理論を基にデータシートや文献を参考に回路を設計した。当初の予定では PSIM というパワーエレクトロニクス向けの回路シミュレーターを用いてインバータ装置やその周辺回路までを設計からシミュレーションを行う予定だったが、後述するメイン回路で使用した部品のデータシートに回路図や部品の選定方法が事細かに記載されており、回路シミュレーションをすることなくインバータ装置の製作が可能となったため、ほとんど使用されることは無かった。その部品というのが IPM と呼ばれるインバータ用のモジュールです。



図 1 IPM



7 素子 (インバータ+ ブレーキ)

図 2 IPM の内部配線図

三菱半導体 IPM L1/S1-シリーズ活用の手引きより抜粋

IPM は Intelligent Power Module の略でインバータ装置用のパワー半導体とパワー半導体のスイッチングを制御するゲートドライブ回路、短絡や温度上昇等の異常動作時にインバータ回路を保護する保護回路が 1 つに収められた自作インバータ装置向け多機能モジュールです。本ミッションではパワー半導体に IGBT 素子が採用されている三菱電機製の製品を採用しました。製作するにあたって各種条件や細部の部品選定のために IPM のデータシートや設計の手引きを参考にしました。それらの資料に IPM を含めたインバータ装置全体の回路図が記載されていたため、そちらをベースにその他必要な回路のみを新規設計した。

その他必要な回路としてデッドタイム生成回路の回路を設計した。デッドタイム生成回路はインバータ回路の IGBT 素子のスイッチング時に発生するタイムラグによる短絡を防ぐために用いられる回路である。図 2 の IPM 内部配線図からもわかる通り、三相の各相にそれぞれ IGBT 素子が 2 つ配置されておりそれぞれを反転した信号で制御します。IGBT 素子には ON もしくは OFF になるタイミングでごく微小な時間タイムラグが発生するため、普通に制御するだけではこの時間中 IPM が短絡し破損してしまう。そこで、制御信号にもタイムラグを発生させることで短絡を防ぐための回路が必要になる。この人工的に生成したタイムラグをデッドタイムと言い、このデッドタイムを発生させる回路をデッドタイム生成回路と言う。今回は IPM のタイムラグが $2\ \mu\text{s}$ ~ $3\ \mu\text{s}$ 程度なので $4.55\ \mu\text{s}$ のデッドタイムを発生させる回路を製作した。回路設計にあたり東京電機大学出版局の『たのしくできる単相インバータの製作と実験』を参考にコンデンサの充電時間を使用した回路を採用し、部品の選定とデッドタイムの長さを決定した。

③ 制御ソフトウェアの開発

インバータ装置を動作させるための制御ソフトも製作した。本ミッションでは VVVF 制御と呼ばれる方式を採用した。VVVF は Variable Voltage Variable Frequency の頭文字をとったもので、直訳すると可変電圧可変周波数制御となる。これは周波数を自由に制御することで電動機の回転数を制御でき、周波数に比例して電圧も制御することで電流を一定に保ちトルクを一定にすることができる制御方式である。

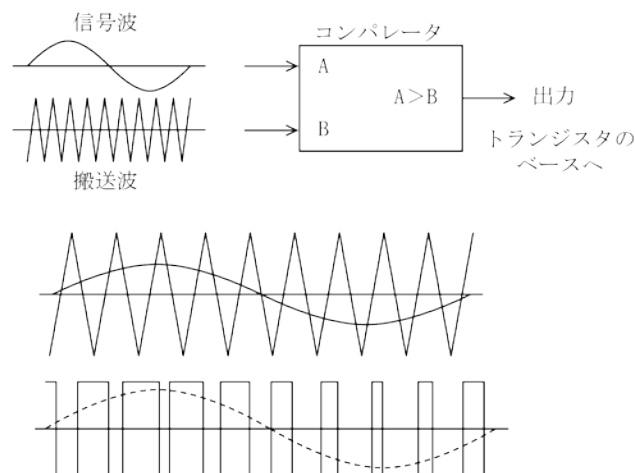


図 3 制御信号の生成方法

図3はインバータ装置の制御信号の生成方法を再現したものである。制御信号は $\sin(t)$ で表される信号波と、 $\cos(\cos(t))$ で表される搬送波をコンパレータで比較することで矩形波のPWM信号を生成し、この信号が制御信号となる。周波数を変更する時は信号波の周波数を、電圧を変更する時は信号波の振幅を変更することでVVVFインバータ装置を制御することができる。

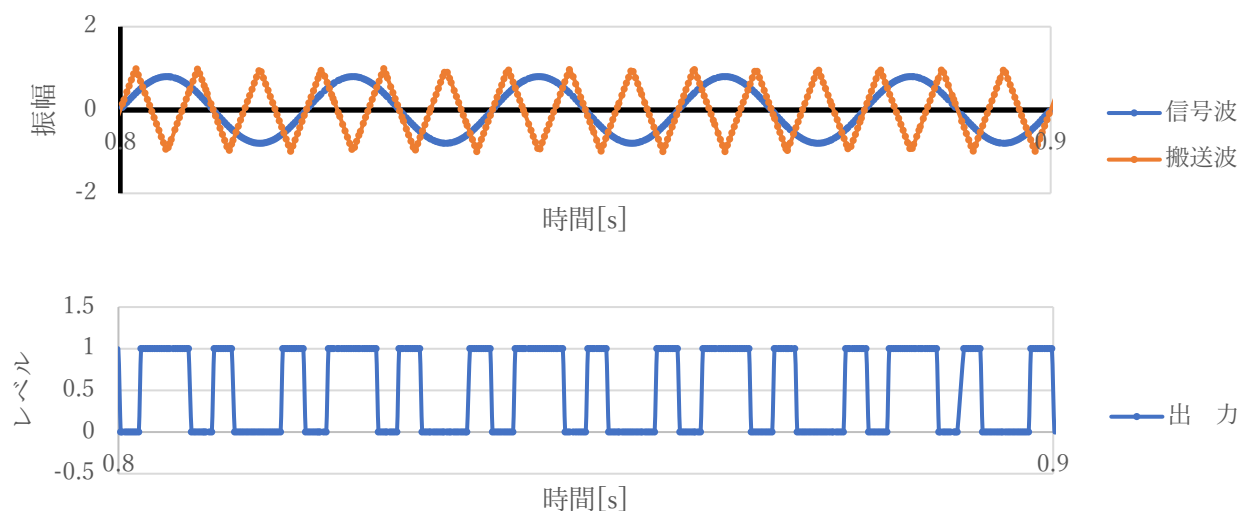


図4 制御信号生成テスト

図4は信号波と搬送波の生成と信号の出力をテストした際のデータをグラフ化したものである。制御信号の生成にはPython使用し設定に応じて信号波では周波数と振幅を、搬送波では周波数を変化させることで矩形波状のPWM信号の波形を変化させ周波数と電圧を制御している。

④ インバータ装置の組み立て

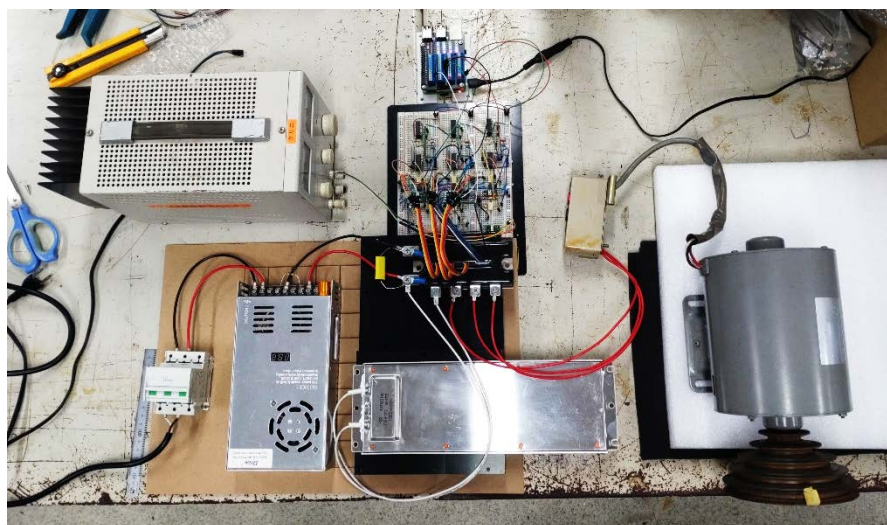


図5 インバータ装置の全体図

図 5 は製作したインバータ装置の全体図である。左上が制御回路用の電源で左下はモーター駆動用の電源である。中央上側が今回制御に使用した Raspberry Pi 3B で、ここで生成した信号をその下のデッドタイム生成回路とゲートドライブ回路の一部に入力し中央の IPM を制御する。中央下側は発電ブレーキ用の回生抵抗で右側が動作試験に使用した 0.3 kW, 4 極の三相かご型誘導電動機である。

3. 活動の成果や学んだこと

製作したインバータ装置を使用して実際に電動機をプログラムで指定した周波数と電圧で回転させることに成功した。しかし、指定した一定の周波数で回転することには成功したが、段階的に回転数を上げるもしくは下げる制御の際に逆回転やスムーズに回転しないなどの不具合が発生したため正常に回転させることはできなかった。これは信号波と搬送波の生成プログラムに何らかの不具合があり、生成された制御信号が正しい PWM 信号になっていないためと考えられるが、正確な理由は判明していない。

本ミッションでは自作でインバータ装置を製作したが、今回の動作試験に使用した電動機の規模では国内大手メーカーが 2 万円程度でインバータ装置を販売している。本ミッションでは 7 万円の予算をいただいてインバータ装置を製作したが、市販品は低コストで多種多様な制御法に対応するなど性能も高いためインバータ装置を自作することはあまり現実的でないことも分かった。

一方、本ミッションを通してインバータ装置の仕組みを学習することができた。また、本ミッションで製作したインバータ装置では使用しなかったが日本でのインバータ装置製造大手の各メーカーで採用している独自の制御法や構造についても学ぶことができたためとても良い経験になった。

4. 今後の展開

本ミッションで得た制御に対する知見を基に来年度以降人の乗れる 1/10 スケール程度の鉄道模型を製作し、地域のイベントなどで乗車体験や運転体験を提供したいと考えている。

5. まとめ

本ミッションでは鉄道や電気自動車などの電動機制御に使用される VVVF インバータ装置を設計から製作まで自ら行った。インバータや電動機の理論や構造を学習し、三菱電機の IPM を使用し周辺回路の設計やシミュレーション、使用する部品の選定を行いインバータ装置に必要な回路を製作した。また、制御のためのソフトウェアも自ら開発した。Python を使用して制御に必要な波形を生成し矩形波状の制御信号を出力し、完成したインバータ装置の動作試験ではプログラムで指定した任意の周波数で回転することに成功した。低速から高速まで自由に回転速度を制御できることを確認できたが、プログラムの不具合で連続的に回転速度を変化させる動作については実現することができなかった。

本ミッションを通じてインバータ装置を一から自作したが、日本のインバータ大手メーカーからは様々なインバータ装置がとても安価に販売されており機能性や制御のレベルも高いため、日本メーカーの技術力の高さを改めて実感しました。しかし、今回自作したことで仕組みや電気回路の設計法についても学ぶことができ大変よい経験をする事ができた。