

2023 年度 芝浦工業大学大学院

修 士 論 文

題目：モジュール型 VVVF インバータを用いた実習システムの構築

専 攻 理工学研究科（修士課程）電気電子情報工学専攻

学籍番号 MA22081

ふりがな せきぐち さとし

氏 名 関口 哲史

指導教員 藤田 吾郎

モジュール型 VVVF インバータを用いた 実習システムの構築

MA22081 関口哲史

Modular VVVF Inverters Practical Training System Construction

Currently, electricity is an essential energy source in our lives. Therefore, Electrical Engineering is always necessary for the society, and education and training are necessary. Therefore, it is important for Electrical Engineering students to experience actual observation and to carry out more efficient development. This paper focuses on the development of modular power system training equipment because conventional experimental equipment usually has problems such as high cost and large size. In a past study, it has been constructed a small synchronous generator system using modules. In this study, parallel operation of generators used on ships will be constructed using this system. The research was carried out for the purpose of establishing a new experiment with the module

1. はじめに ^[1]	2
2. モジュール型電力系統実習装置 ^[2]	2
3. VVVF インバータ概要	3
4. VVVF インバータモジュール	4
5. VVVF インバータ制御モデル	10
6. インバータ制御基板の製作	15
7. 動作実験	22
8. まとめ	22

1. はじめに^[1]

近年、地球温暖化対策における脱化石エネルギーの動きが世界中で広まっており、革新が求められている。また、スマートグリッドといった新たな電力システムの構築も同時に要求されている。よって、電力関係技術者のニーズは増えると予想され、その育成を高等専門学校や大学等の教育機関に強く求められている。合わせて電気主任技術者の資格取得者の増強も必要であるが、これには実体験を伴う電気設備の学習が必要不可欠である。電気設備の学習を行うことにより、現実的かつ実用的な電気の概要を理解することができる。本研究では、学校規模の環境において、電車やエアコンなどに使用されているインバータの制御方式である、可変電圧・可変周波数(VVVF)制御の学習を可能とする、VVVFインバータ実習システムを提案する。さらに実習装置を製作し、動作の検証を行うことを目的としている。



図 2.1.2 特注品(法政大学)

2. モジュール型電力系統実習装置^[2]

2.1 開発背景

既存の電力系統実習装置は大きく分けて、市販品(図 2.1.1)、特注品(図 2.1.2)、自作品(図 2.1.3)などがある。市販品や特注品は高価なものや、大型のもの、改造が困難で柔軟性が悪いものが多い。

また、試作品を組み合わせて製作する自作品の実習装置については、製作費用が安価ではあるものの、操作性に優れず耐久性も乏しいといった欠点がある。いずれの装置でも複数の系統を一体化して製作されているため固定化されてしまい、様々な事例の検討が行いにくく実習を行う学生などに対し、系統構成が理解しにくい欠点がある。さらに、複雑な結線作業を行うことで実習としては有益ではあるが、誤配線による危険も生じてしまう。

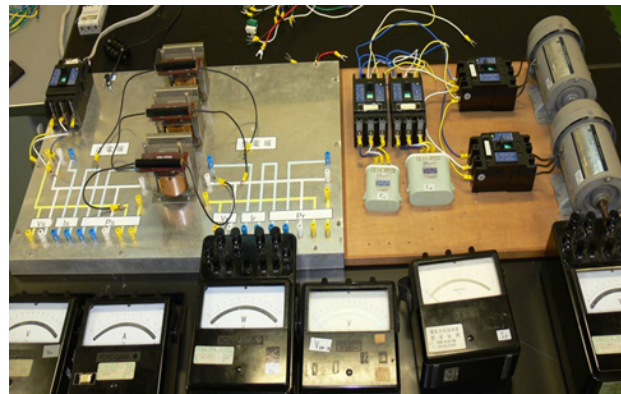


図 2.1.3 自作品



図 2.1 市販品(高橋工業)

2.2 モジュールの規格

これらの欠点を踏まえて製作したものが、モジュール型電力系統実習装置である。モジュール型電力系統実習装置の規格を図 2.2.1 に示す。縦横 300 mm の立方体の箱の内部に機器を設置、配線している。外面に端子を露出することにより、端子間を配線するだけで接続できるような構造になっているため、容易に結線することができ、安全で効率的に実験を行うことが可能となる。モジュールには左上にモジュールの名称を明記し、端子部分は上から赤・黄・青の三相用の端子、緑の大地接地端子、及び黒の筐体接地端子としている。また用途に応じて、内部機器を確認できるように窓を、持ち運ぶための取手を設置している。電力系統実習装置をモジュール型にすることによって次の特徴を得る。

1. 回路の組み換えおよび改造がしやすく、また電力回路部分を統一したデザインとしており、理解が容易である。
2. 使用者はモジュールごとの機能と、実習系統全体の関連に対する理解が深まる。
3. 大幅な改造が生じても正面パネルの交換のみで、ハウジング部分は流用可能な為、廃棄物の低減にも貢献できる。

4. 使用電圧を 200 V，最大使用電流を 10 A 程度としているため，コンパクトになり，省スペースとなる。
5. 使用するモジュールと使用しないモジュールの配置を入れ替えることにより，収納する場所を準備する必要がなくなる。

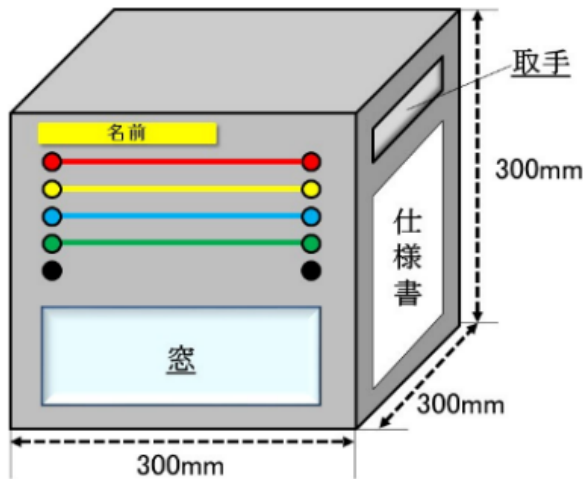


図 2.2.1 モジュールのイメージ

3. VVVFインバータ概要

3.1 VVVF インバータ使用例^[3]

VVVF インバータとは，電動機を制御するために用いられる電力実習装置である。VVVF とは，インバータの制御方式である可変電圧・可変周波数(Variable Voltage Variable Frequency)の略称である。

VVVF インバータの主な使用例として，電気鉄道が挙げられる。近年電車で搭載されている主電動機は，三相かご型誘導電動機が主流であり，誘導電動機の回転数は，電源周波数 f とすべりによって定まる。電動機のトルクは，電動機(インバータ)電圧 V と電源周波数との比の 2 乗に比例するので，トルクを一定にするために，VVVF インバータを用いることにより V/f 一定制御を行なっている。

電車で使用されている VVVF インバータ装置(図 3.1.1)の主回路は図 3.1.2 に示すように，電力用半導体とダイオードが並列に接続されたモジュール 3 組で構成されており，電力用半導体の ON/OFF により回路を切り替え，パンタグラフから供給される直流を三相交流に変換する。現在，半導体素子には，高速で ON/OFF が可能である IGBT 素子が主に用いられている。また，IGBT を 2 段直列に接続することで電圧を 2 段階に加圧して波形改善を行う 3 レベルインバータが主に使用され，電力変換器の低損失化や波形歪みの軽減が図られている。

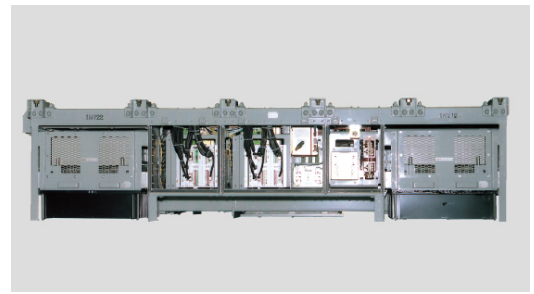


図3.1.1 VVVFインバータ装置^{*1}

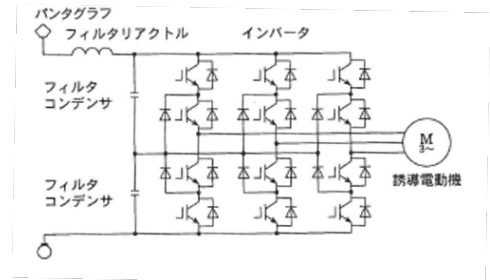


図3.1.2 VVVFインバータ主回路^{*2}

3.2 VVVFインバータ実習システム概要

本研究では，学校規模の環境において，可変電圧・可能周波数(VVVF)制御を学習するシステムの構築を行なっている。

本研究で，製作を行う VVVF インバータ実習システムの構成を図 3.2.1 に示す。このシステムでは，市販のインバータユニット(MWINV-1R022)(図 3.2.2)を使用する。インバータユニット内のコンバータ(ダイオードモジュール)により，AC200V の整流・平滑化を行う。VVVF インバータは主にインバータ制御基板，ゲートドライバ，2 レベルインバータ(IPM)回路によって構成されている。インバータ制御基板はマイコン(C2000) (図 3.2.3)を搭載し，simulink(PC)上で作成された PWM 信号指令を基にインバータ(IPM)回路内の IGBT の ON/OFF を行うゲート信号を生成する。ゲートドライバでは生成されたゲート信号を基に，インバータ(IPM)回路を構成する 6 つの IGBT のスイッチングを行うことにより，直流から三相交流を生成し，三相誘導電動機の制御を行なっている。

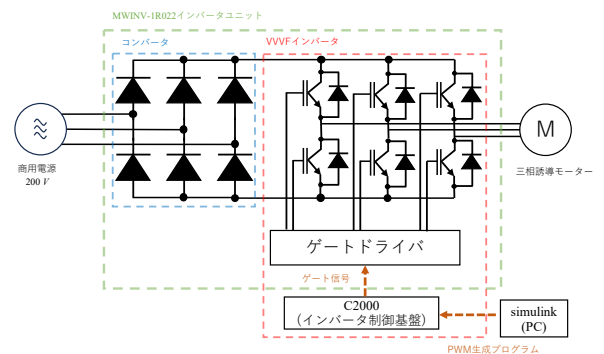


図3.2.1 VVVFインバータ実習システム構成図



図 3.2.2 インバータユニット(MWINV-1R022)



図 3.2.3 C2000

4. VVVFインバータモジュール

4.1 使用機器

前項の VVVF インバータ実習システムを基に, VVVF インバータモジュールの製作を行なった. モジュールに使用した機器を記載する.

[1] インバータユニット(MWINV-1R022)

三相誘導電機の制御に MY Way インバータユニット (MWINV-1R022)を使用した. インバータユニットの主回路を図 4.1.1 示す. 主回路はトランスファーモールド外形のインテリジェントパワーモジュール(DIP-IPM=Dual-In-Line Package Intelligent Power Module)で構成されている. DIP-IPM は図 4.1.2 に示すように, 6 個の絶縁型バイポーラトランジスタ(IGBT)を内蔵し, 三相 2 レベルインバータを形成している. 平滑コンデンサとして, 電解コンデンサ(LGU 2 W 221MELA ニチコン)(容量 220 μ F)を直流側に 3 個並列接続している. インバータユニットの仕様を表 4.1.1 に示す.

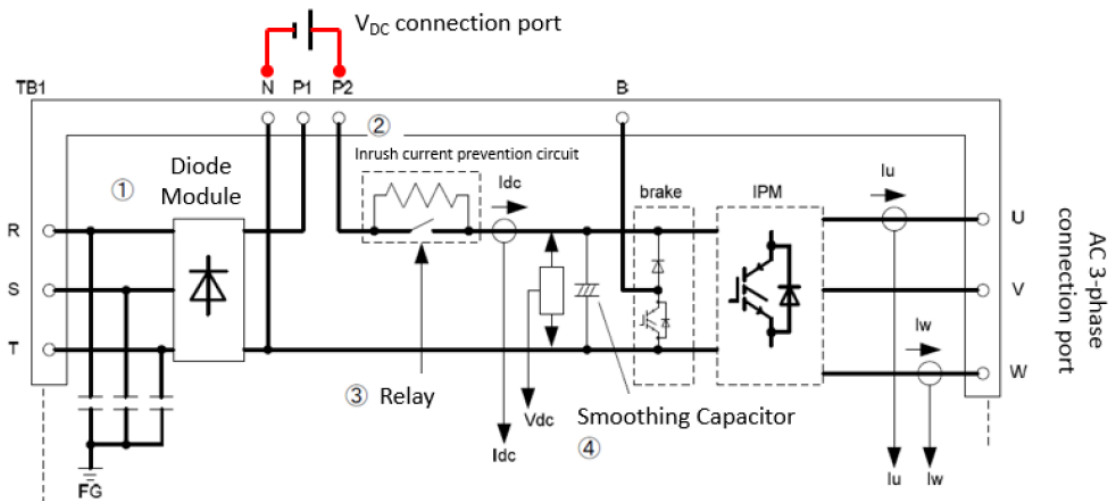


図 4.1.1 インバータユニット主回路*3

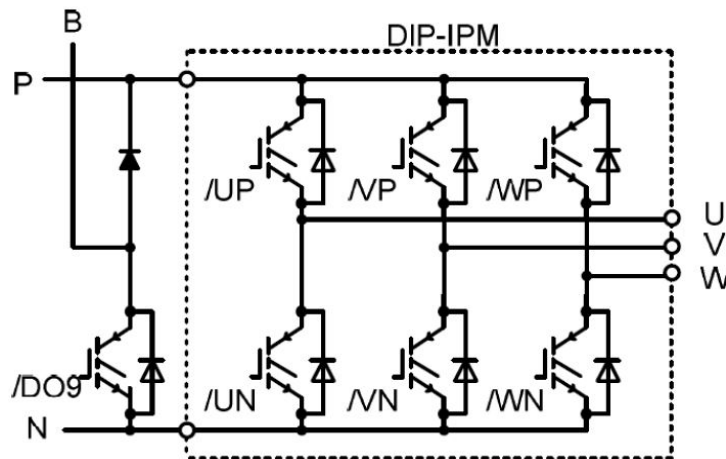


図 4.1.2 IGBT を内蔵した IPM*3

表 4.1.1 インバータユニットの仕様

項目		仕様
出力	定格容量	1 kVA(出力 200 V) 1.1 kVA(出力 220 V)
	定格電流	2.88 A
	定格電圧	0~230 V
入力	定格電圧	200/230 V ±10%
	定格電流	3.2 A
	入力電圧範囲	0~230 V
スイッチング周波数		~20 kHz
制御電源電圧		DC 24 V 入力
外形寸法		W180×D160×H126.8 mm

[2] インバータ制御基板

インバータ内の IGBT の ON/OFF を行うゲート信号を生成し、制御を行なっている。インバータ制御基板を図 4.1.3 に示す。詳細は 6 章に記載する。

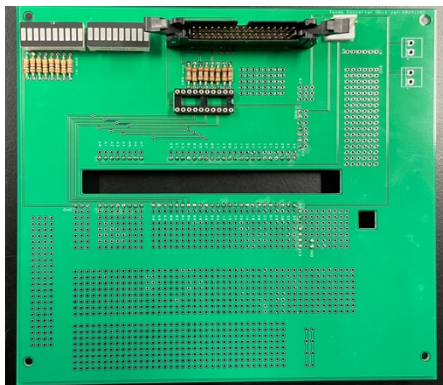


図 4.1.3 インバータ制御基板

[3] デジタルパネルメーター

インバータユニット内の IPM に流れる直流電圧・電流の測定を行うため、渡辺電機工業株式会社のデジタルスケールリングパネルメーター(A7000 シリーズ)(図 4.1.4)を使用した。このパネルメーターは入力レンジの切り替えで測定範囲の変更が可能である。

電圧測定に使用した型式は A7211-0、電流測定に使用した型式は A7213-0 である。以下に仕様を示す。



図 4.1.4 デジタルパネルメーター(A7000 シリーズ)*4

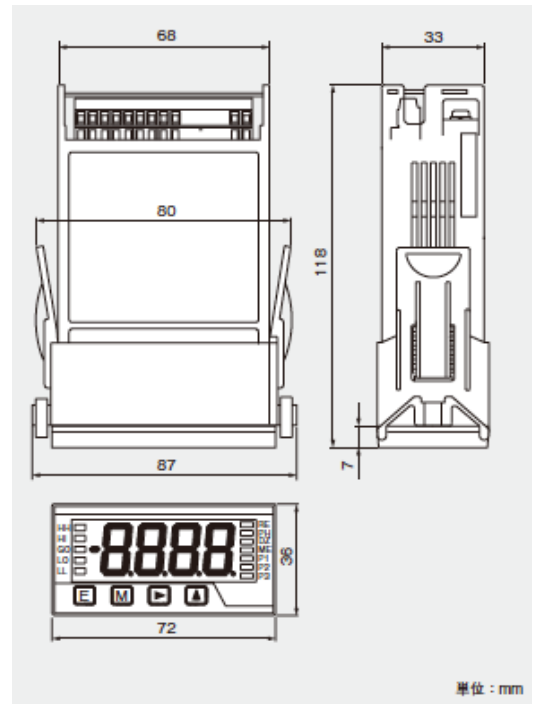


図 4.1.5 外見寸法図*4

表 4.1.2 共通仕様

項目	仕様
電源	DC 12~48 V
消費電力	7 W (max)
外形寸法	W72×D118×H36 mm

表 4.1.3 A7211-0 の仕様

測定範囲	分解能	入力抵抗	最大許容入力
±99.99 mV	10 μV	100 MΩ	± 50 V
±999.9 mV	100 μV		
±9.999 V	1 mV	1 MΩ	± 250 V
±99.99 V	10 mV	10 MΩ	
±700.0 V	100 mV		

表 4.1.3 A7213-0 の仕様

測定範囲	分解能	入力抵抗	最大許容入力
±999.9 mA	100 μA	0.1Ω	±3 A
±2.000 A	1 mA		

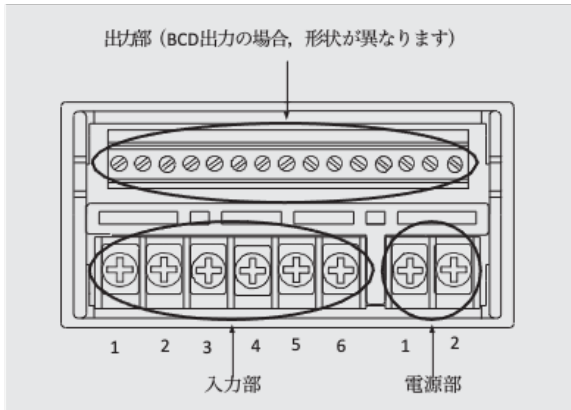


図 4.1.6 接続図*4

表 4.1.4 A7211-0 の入力部

番号	内容
1	入力端子(+) ±99.99 mV
2	入力端子(+) ±999.9 mV
3	入力端子(+) ±9.999 V
4	入力端子(+) ±99.99 V
5	入力端子(+) ±700.0 V
6	入力端子(-)

表 4.1.5 A7213-0 の入力部

番号	内容
1	入力端子(+) ±999.9 mA
2	入力端子(-) ±999.9 mA
3	空端子
4	入力端子(+) ±2.000 A
5	入力端子(-) ±2.000 A
6	空端子

表 4.1.6 電源部

番号	内容
1	電源端子(-)
2	電源端子(+)

[4] トグルスイッチ

インバータユニットへ直流・交流両方の電源の使用を想定しているため、電源の切り替えを容易に行える様にトグルスイッチを使用した。使用したスイッチは、nKK スイッチズ株式会社の小型トグルスイッチ(S-3A)(図 4.1.6)である。以下に仕様を示す。

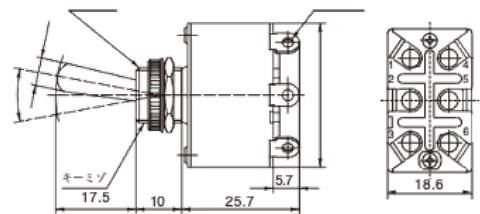


図 4.1.6 トグルスイッチ*5

表 4.1.7 トグルスイッチの仕様

項目	仕様
回路	単極双役
機能動作	ON-OFF-ON
絶縁抵抗	DC 500 V
耐電圧	AC 2.0 kV

表 4.1.7 トグルスイッチの電気容量

電機容量			
抵抗負荷			誘導負荷
AC 125 V	AC 250 V	DC 30 V	AC 125V 力率=0.6
15 A	6 A	20 A	8 A

[5] 可変抵抗器

本研究では、外部アナログ入力により、インバータの制御を可能とするために可変抵抗器(ボリューム)を使用した。使用した可変抵抗器は Supertech 社のパネル取り付け型可変抵抗器(図 4.1.7)である。以下に仕様を示す。



図 4.1.7 可変抵抗器

表 4.1.8 可変抵抗器の仕様

項目	仕様
抵抗値	2 kΩ
カーブ	B
許容誤差	±20 %
定格電力	0.125 W
最高使用電圧	200 V

[6] USB ケーブル(Type-B)

PC と C2000 の接続に使用した。モジュールのパネル部に取り付けるため、StarTech.com のパネルマウント型ケーブル(図 4.1.8)を採用した。



図 4.1.8 USB ケーブル(Type-B)

[7] AC-DC コンバーター

インバータユニット及びデジタルパネルメーターに供給する電源として、AC-DC コンバーターを使用した。

インバータユニットの推奨電源は 24 V 1.5 A であり、デジタルパネルメーターの推奨電源は 24 V 0.3 A であるため、定格出力が 24 V 2.2A である、COSEL の AC-DC コンバーター(R50A-24-N)(図 4.1.9)を使用した。以下に仕様を示す。

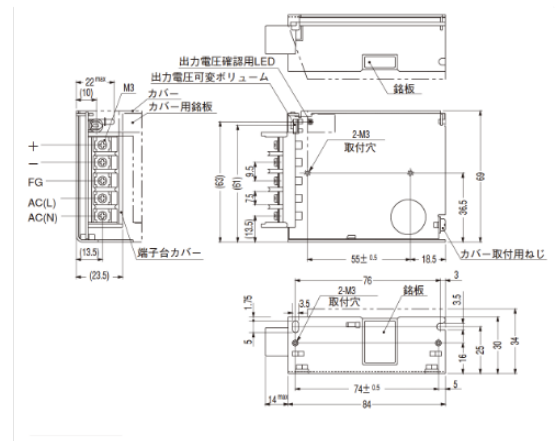
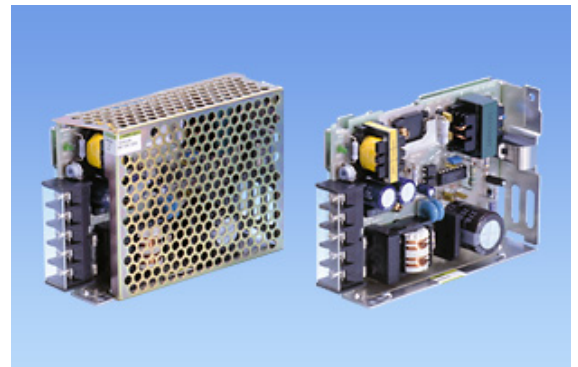


図 4.1.9 AC-DC コンバーター

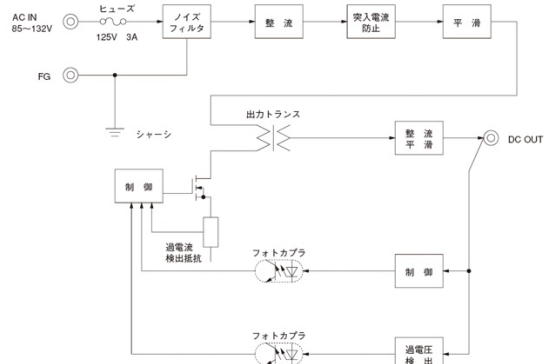


図 4.1.10 コンバーターのブロックダイアグラム*7

表 4.1.9 AC-DC コンバーターの仕様

項目	仕様	
入力	電圧	AC 85~132 V
	電流	1.1 A
	周波数	47~440 Hz
	効率	83 %
出力	定格電圧	24 V
	定格電流	2.2 A
	静的入力変動	96 mV
	静的負荷変動	150 mV
	電圧可変範囲	21.6~26.4 V
外形寸法	W33×D85×H119 mm	

4.2 筐体の設計

4.2.1 アルミパネルの製作

VVVF インバータモジュールの正面と背面パネルを Auto CAD, MISUMI の Web サイト(<http://jp.misumi-ec.com/>)上にて設計した。設計したパネルは MISUMI へ発注し製作した。設計時に考慮したことを以下にまとめる。

- AC-DC コンバータへの電源(AC 100 V)を外部から接続出来る様に、背面パネルにインレット(ミスミ WTN-1171AA)用の穴をつけた。
- インバータユニットへ外部から直流電源を接続出来るように、端子穴を2つ追加した。
- インバータユニットの保護回路の状態表示 LED を正面から確認できるように、窓用の穴をつけた。
- モジュール内部に設置した機器により発生する熱を放出するために、背面パネルに通気口を設置した。

設計した、正面と背面パネルを以下に示す。

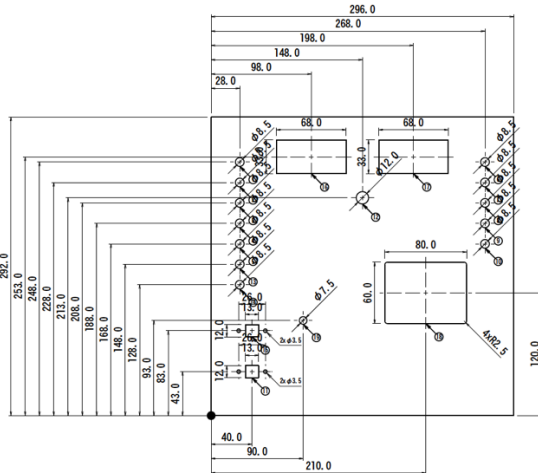


図 4.2.1 アルミパネル(正面)

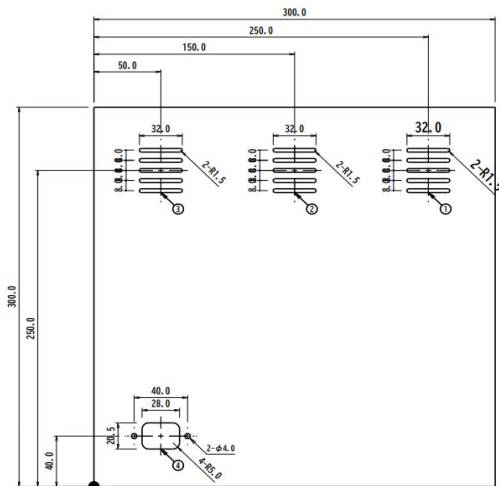


図 4.2.2 アルミパネル(背面)

4.2.2 ポリカーボネイトパネルの製作

VVVF インバータモジュールがどのようなモジュールであるか、一眼でわかるデザインを施したパネルの製作を行なった。このデザインパネルは、ポリカーボネイト製である。デザインは Auto CAD を用いて作成した。作成したデザインを元に、株式会社菅原工芸の運営するアクリルショップ・はざいや(<https://www.hazaiya.co.jp/>)へ発注し製作した。デザイン時に考慮したことを以下にまとめる。

- ポリカーボネイトパネルは、アルミパネルに重ねて取り付けるため、縦幅を 286 mm (上下 6 mm) に縮めて機器の取り付け穴のデザインを行なった。
- インバータユニットの主回路である、整流回路のダイオードとインバータ回路の IGBT の回路記号をデザインすることにより、モジュール内部の構造を示している。
- 実験時に入力電源また出力の三相(U・V・W)交流端子及び線の配線ミスを防ぐため赤・黄・青と色分けしている。
- アルミパネルとポリカーボネイトパネルの厚さは 2 mm あるため、機器の取り付け穴をデザインする際にアルミパネルより、0.5~1.0 mm 余裕を持たせた。
- はざいやでポリカーボネイトパネルを製作する際に、発注したデータより角穴が内角 2 R 丸まることを考慮し、デザインを行なった。

デザインした、ポリカーボネイトパネルを以下に示す。

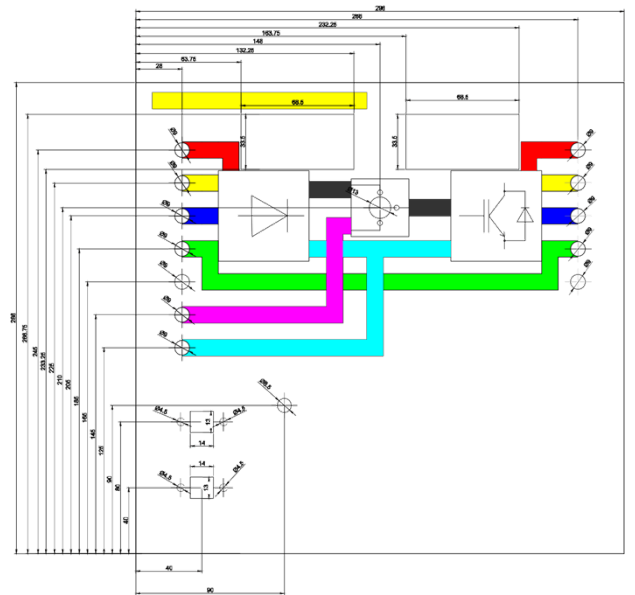


図 4.2.3 ポリカーボネイトパネルデザイン

4.3 モジュールの製作

本モジュールに内蔵する My Way インバータユニットが、モジュールの運搬時や組み替え時に破損するのを防止するために、スチール製の蝶番を4つ使用し、底板に固定した。また、AC-DC コンバーターからインバータユニット、直流電圧計、直流電流計の3つの機器に電源供給を行なっているため、安全性を考慮し春日電機製の端子台を使用した。加工を行なったモジュールを以下に示す。

モジュールの正面には、直流電圧計、直流電流計を取り付け整流された電圧・電流の計測を可能とした。直流電源の使用を想定し、トグルスイッチを取り付けた。ボリュームを取り付けることにより、外部からの制御を可能にした。また、USB ケーブルを取り付けることにより、PC との接続を容易にした。インバータの外観を以下に示す。

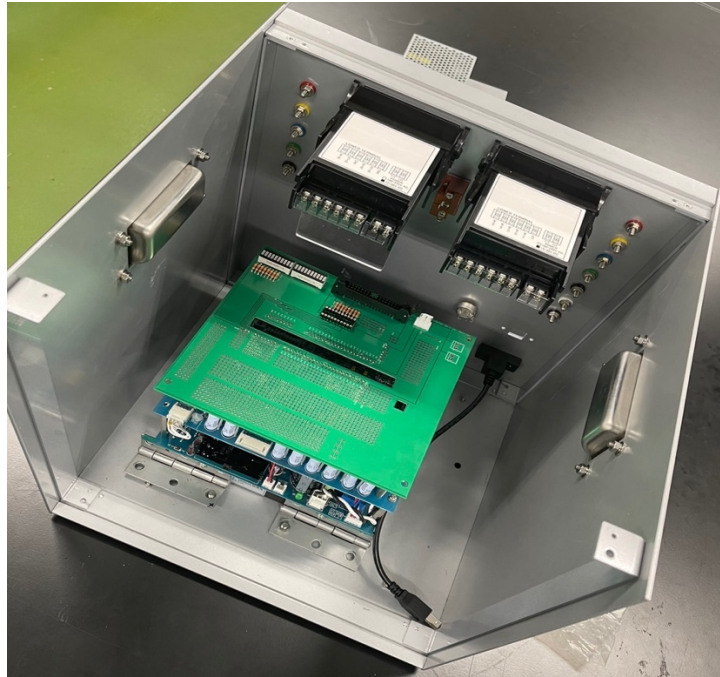


図 4.3.1 モジュールの加工

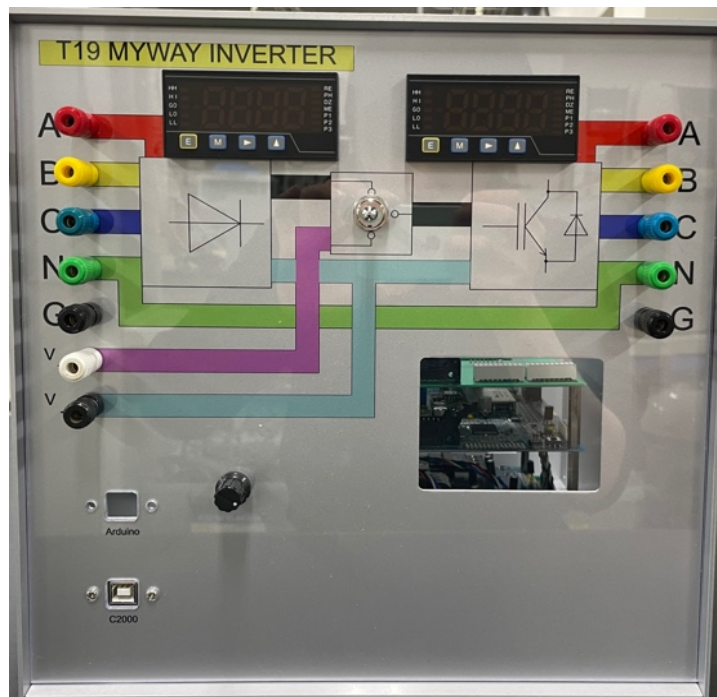


図 4.3.2 モジュールの外観

5. VVVFインバータ制御モデル

5.1 正弦波PWM制御^[4]

一般的なインバータの各スイッチに対する ON/OFF 信号の生成法として、正弦波 PWM 制御法が採用されている。正弦波 PWM 制御を行う場合、搬送波(キャリア波)と変調波(指令信号)の大きさを比較器で比較することで、得られるノッチ波(デバイスの ON/OFF 信号)によりスイッチを動作させることにより、出力電圧の制御を可能としている。また、搬送波の周波数はキャリア周波数やスイッチング周波数と呼ばれている。

PWM には、非同期式 PWM と同期式 PWM がある。非同期式 PWM とは、スイッチングを行う搬送波と指令信号の同期を取らない方式であり、搬送波の周波数を指令信号の周波数と比べて十分に高くできれば、問題とならない方式であるが、インバータの性能によりスイッチング周波数を上げられない場合には、ビート現象(周波数が近い 2 つの音が同じくらいの音圧で到達すると、全体として 2 つの周波数の、差の周波数で音圧が大きくなったり小さくなったりを繰り返す物理的現象)が顕著となる。

また、同期式 PWM とは搬送波と指令信号の同期を取った方式である。この方式では、生成されるノッチ波が対象波形となるように、搬送波の周波数 f_c と指令信号の周波数 f の比 $K_c = f_c/f$ が整数倍(三相の場合には 3 の倍数)となるように、 f_c を設定する。指令信号に正弦波を入力するため正弦波 PWM 制御と呼ばれる。また搬送波には三角波が用いられることから三角波比較方式 PWM 制御とも呼ばれる。インバータに対する正弦波 PWM 制御の原理図を図 5.1 に示す。

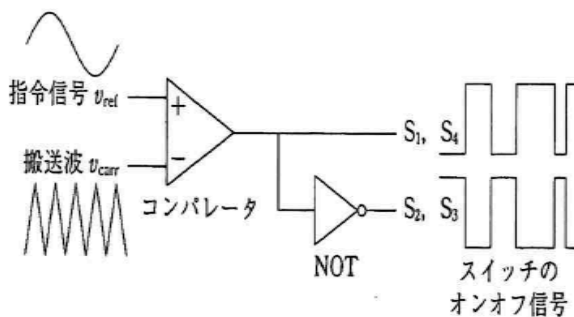


図 5.1 インバータの正弦波 PWM 制御回路^{*6}

5.2 モーター駆動用インバータの制御(鉄道)^[4]

鉄道に使用されているモーターは台車内の限られたスペースに収める必要があるため、高回転形モーターが採用されている。最高速度におけるインバータ周波数は 150~200 Hz の比較的高い周波数になる。そのため、以前主流であった GTO サイリスタを使用したインバータでは、最大スイッチング周波数は 500 Hz 程度であるため図 5.2 に示すような同期式 PWM のパルス数切り替えが多用されていた。特に、中速から高速にかけて停電力特性でトルクを速度に反比例で減速して良いことから、電圧利用率最大、スイッチング損失最小となる同期 1 パルスモードを用いられていた。

しかし、同期 PWM 方式はインバータ出力周波数を下げるとスイッチング周波数も比例して低下する為、平滑が困難となる短所がある。その対策として、搬送波のパルス数を切替える方式が取られている。また、非同期 PWM 方式ではこの切り替えが不要である反面、インバータ出力周波数と搬送波周波数との比率(パルス数)が十分に大きくなると搬送波の側帯波がインバータ出力周波数に接近しビートなどの不安定現象を生じる。

また、パルス数の切替えにおいては電圧基本波成分の不連続、トルク急変による乗り心地悪化の可能性と、高調波成分の切替わりに伴う耳障りな電磁音の変化が発生する。

近年、インバータに使用されているスイッチング素子が IGBT に置き換わっているが、スイッチング損失低減冷却器小型の観点から PWM スwitching 周波数は 1000 Hz 程度以下に設定されているのが一般的である為、電磁騒音の課題が完全に解消したわけではない。これに対して、1 パルスまでの PWM スwitching 周波数を連続可変とすることによりパルスモード切替えなどの耳障りな電磁騒音変化をなくす方法や、搬送波周波数をランダムに可変するキャリア分散変調、電磁騒音をホワイトノイズ化して耳障りでなくさせる方法などにより、実用上問題ない電磁騒音レベルになっている。

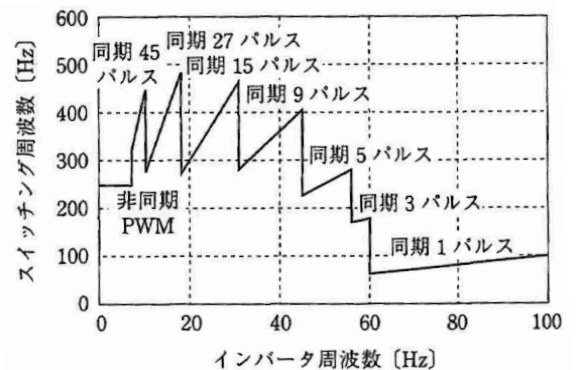


図 5.2 PWM パルスモード切り換え方式^{*6}

5.3 チャープ信号^[5]

チャープ信号とは、時間と共に周波数が増加するか、時間と共に周波数が減少する信号である。チャープ信号は一般的にソナー及びレーダーに使用されている。

チャープ信号には、周波数が時間と共に線形に変化する線形チャープ信号と信号の周波数が時間に対して指数関数的に変化する指数チャープ信号がある。本稿では、線形チャープ信号について記す。

線形チャープ信号の瞬時周波数 $f(t)$ は時間と共に変化する。瞬時周波数 $f(t)$ の変化を表した式は以下のようになる。

$$f(t) = f_0 + kt$$

f_0 は開始時の周波数である。 k は増加率またチャープ率と呼ばれており、以下の式で表すことができる。

$$k = \frac{f_1 - f_0}{T}$$

f_1 は最終的な周波数で f_0 は開始周波数である。 T は f_0 から f_1 までを移行するための時間である。

次に時間領域において任意の周期波形の位相は角周波数の積分値であるため、位相の微分値は以下のようになる。

$$\Phi'(t) = 2\pi f(t)$$

線形チャープ信号において考えると以下のようになる。

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= \Phi_0 + 2\pi \int_0^t f(t) dt \\ &= \Phi_0 + 2\pi \int_0^t (f_0 + kt) dt \\ &= \Phi_0 + 2\pi(f_0 t + \frac{k}{2} t^2) \end{aligned}$$

Φ_0 は、初期位相($t = 0$)である。

時間領域での正弦波の線形チャープ信号は、以下の式になる。

$$x(t) = \sin [\Phi_0 + 2\pi(f_0 t + \frac{k}{2} t^2)]$$

5.4 制御モデルの作成

本研究では、三相誘導電動機の世界制御を行うインバータの制御モデルの作成を MATLAB Simulink を使用して作成した。制御モデルは時間による制御と、外部アナログ入力による制御の2種類作成した。

制御モデルに採用した方式及び条件等を以下に記載する。

- 三相誘導機の世界制御範囲は 0~50 Hz (回転速度 0~1500 m⁻¹)である。
- インバータの各スイッチに対する ON/OFF 信号の生成法として、正弦波 PWM 制御法が採用した。また、搬送波には三角波を使用した。
- PWM の方式として同期式 PWM を採用した。
- 誘導電動機の世界制御方式として、PWM パルスモード切り換え方式を採用した。
- PWM の生成に用いる正弦波及び三角波は、時間領域での正弦波の線形チャープ信号を基に生成した。

PWM 生成に用いる、変調波(正弦波)・搬送波(三角波)の周波数及び比率(パルス数)を表 5.4.1 にまとめる。

表 5.4.1 周波数信号の変化

項目	条件		
	①	②	③
変調波	0~30 Hz	30~40 Hz	40~50 Hz
搬送波	0~270 Hz	90~120 Hz	40~50 Hz
パルス数	9 パルス	3 パルス	1 パルス

5.4.1 時間による制御モデル

作成した、時間による制御モデルを図 5.4.1 に示す。

時間信号には、Repeating Sequence ブロックを使用した。1周期を25秒として、表 5.4.1 を基に0~15秒間に条件①、15~20秒間に条件②、20~25秒間に条件③となる信号生成を行なった。変調波及び搬送波の生成には、MATLAB Function ブロックを使用した。変調波及び搬送波は、時間領域での正弦波の線形チャープ信号を基に生成した。

また、生成された変調波及び搬送波を Relational Operator ブロックで比較しノッチ波として、インバータの各スイッチに出力している。変調波及び搬送波の生成プログラムを図 5.4.2 に示す。生成された信号を図 5.4.3 に示す。

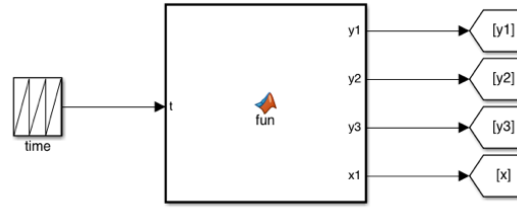


図 5.4.1(a) 変調波及び搬送波の生成モデル

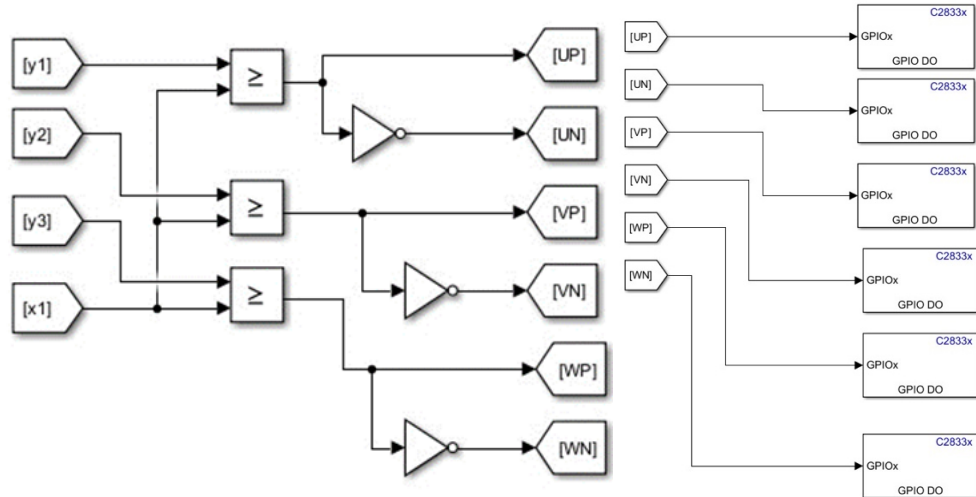


図 5.4.1(b) ノッチ波生成及びインバータ出力モデル

```
function [y1,y2,y3,x1]= fun(t)
%25 秒間に 0~50Hz の変調波及び伴った搬送波を生成する

If (t >= 0) && (t <=15) %0~15 秒の間
k =30/15; %周波数増加率(15 秒間に 0~30Hz 増加)
y1= 0.8*sin(2*pi*(k*t^2/2)); %U 相変調波
y2= 0.8*sin(2*pi*(k*t^2/2)-2*pi/3); %V 相変調波
y3= 0.8*sin(2*pi*(k*t^2/2)-4*pi/3); %W 相変調波
x1= sawtooth(2*9*pi*(k*t^2/2)-pi/2,1/2); %搬送波(変調波の 9 倍)

elseif (t >0.3) && (t <=0.4) %15~20 秒の間
k =(40-30)/0.1; %周波数増加率(5 秒間に 30~40Hz 増加)
y1= 0.8*sin(2*pi*(k*t^2/2)); %U 相変調波
y2= 0.8*sin(2*pi*(k*t^2/2)-2*pi/3); %V 相変調波
y3= 0.8*sin(2*pi*(k*t^2/2)-4*pi/3); %W 相変調波
x1= sawtooth(2*3*pi*(k*t^2/2)-pi/2,1/2); %搬送波(変調波の 3 倍)

else
k =(50-40)/0.1; %周波数増加率(15 秒間に 0~30Hz 増加)
y1= 0.8*sin(2*pi*(k*t^2/2)); %U 相変調波
y2= 0.8*sin(2*pi*(k*t^2/2)-2*pi/3); %V 相変調波
y3= 0.8*sin(2*pi*(k*t^2/2)-4*pi/3); %W 相変調波
x1= sawtooth(2*pi*(k*t^2/2)-pi/2,1/2); %搬送波(変調波の等倍)
```

図 5.4.2 変調波及び搬送波の生成プログラム(MATLAB Function 内部)

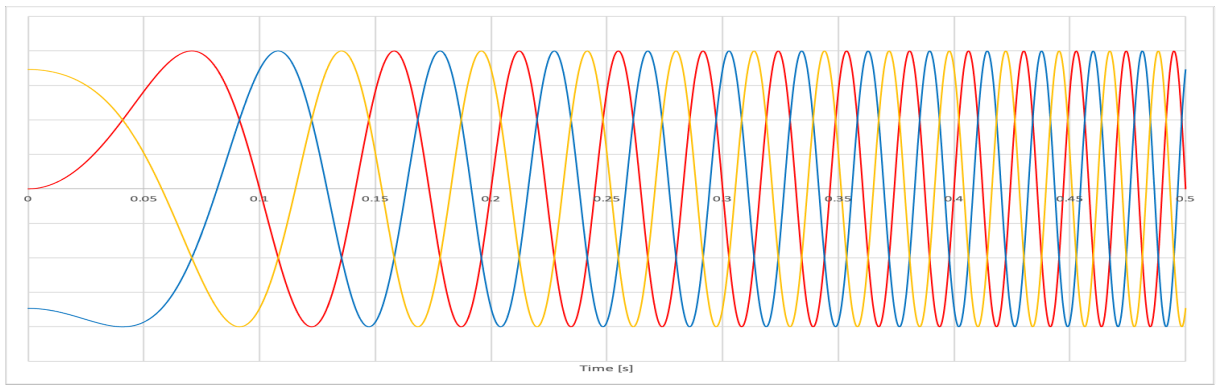


図 5.4.3(a) 変調波(U・V・W 相)

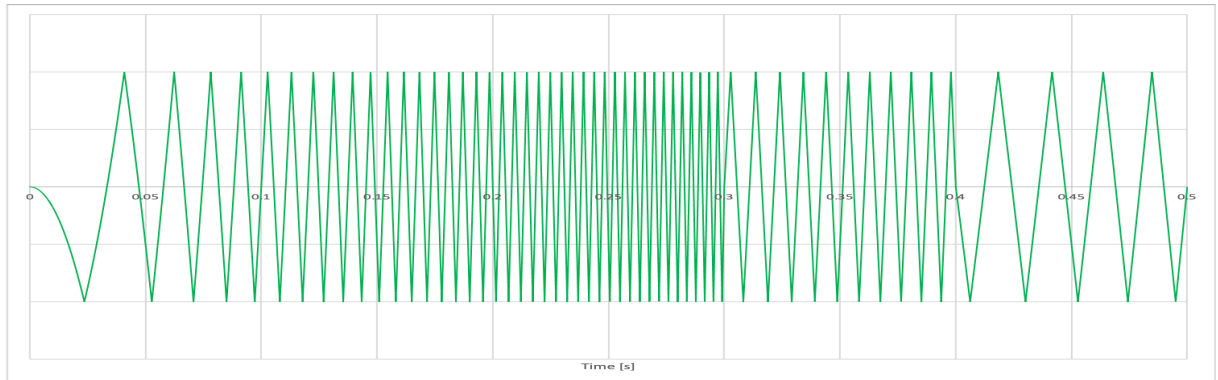


図 5.4.3(b) 搬送波

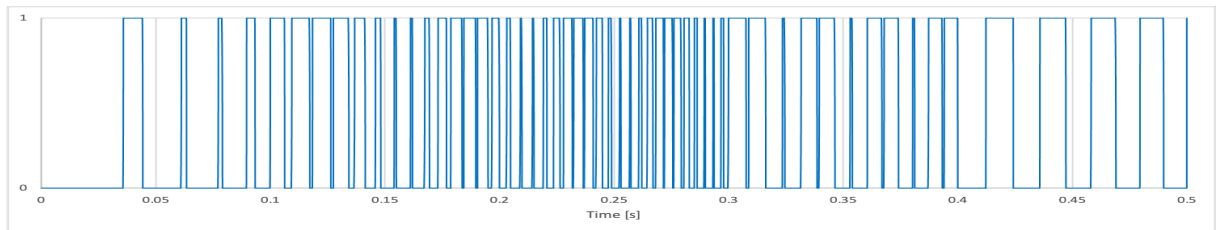
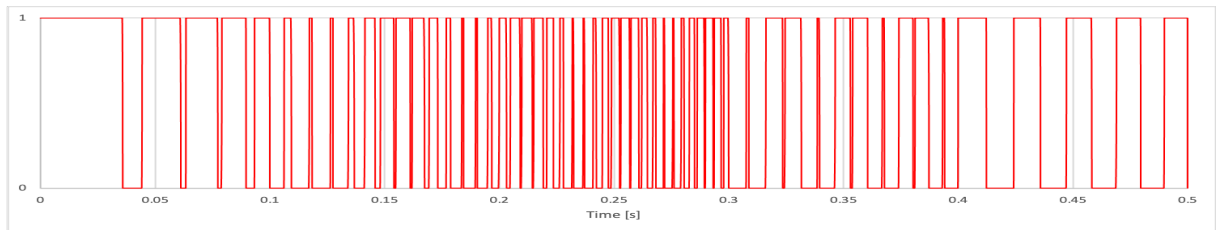


図 5.4.3(c) ノッチ波(UP・UN)

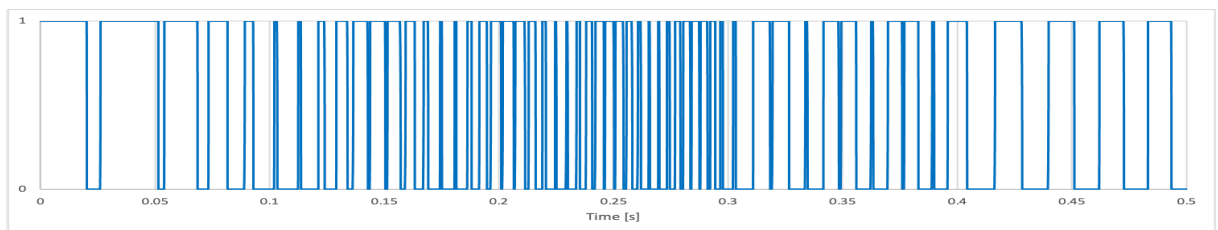
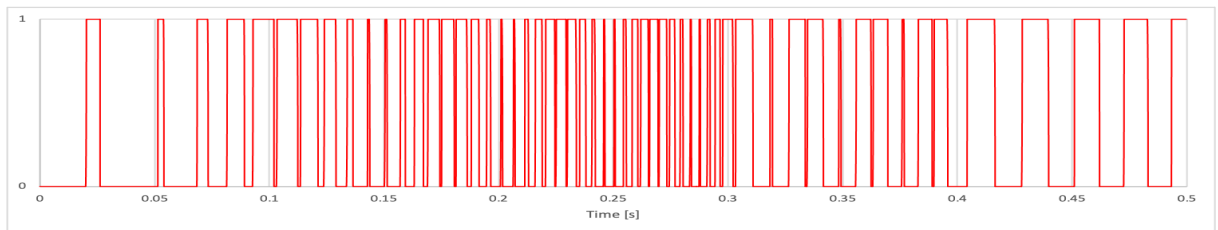


図 5.4.3(d) ノッチ波(VP・VN)

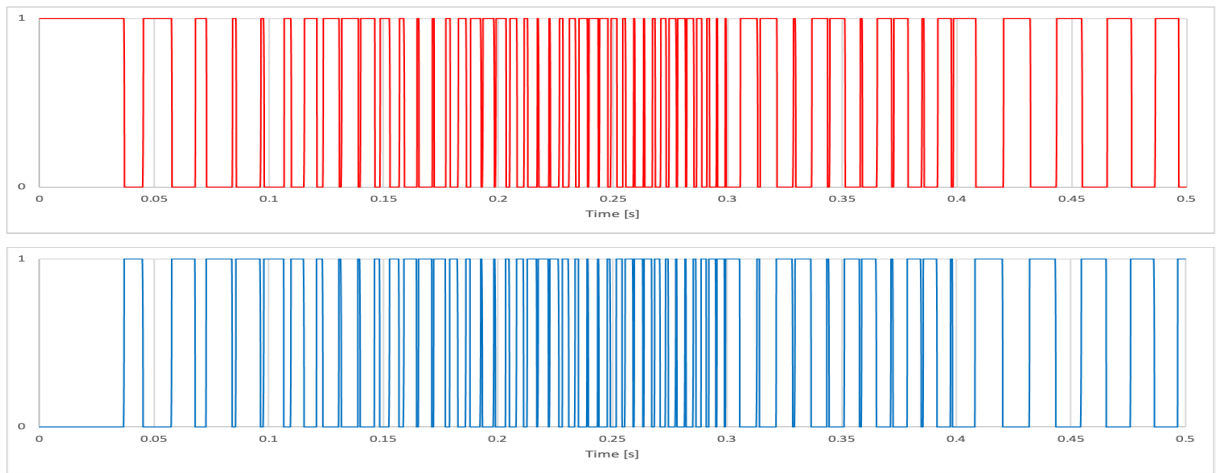


図 5.4.3(d) ノッチ波(WP・WN)

5. 4. 2 外部アナログ入力による制御モデル

作成した、外部アナログ入力制御モデルを図 5.4.4 に示す。

外部アナログ入力には、可変抵抗器(ボリューム)を使用した。ボリュームによる指令信号は ADC ブロックを用いて読み取りを行なった。また、C2000 の分解能が 12bit であるため、ボリュームの値を 0~4095 の値で表すために、255/4095 の値のゲインに設定した(今回ボリュームの値を 0~255 としている)。

ボリュームによる司令信号を t とした、t の値(0~255)を MATLAB Function を用いて、周波数を模した 0~50 の値に

変換を行なった(図 5.4.5)。変換を行なった信号を f とした。信号 f を Integrator ブロック使用して積分することにより、変調波及び搬送波に使用するチャープ信号式 $f(t)$ の積分値として扱っている。この信号を k とした。信号 f, k を基に、MATLAB Function を用いて、表 5.4.1 に示した変調波、搬送波の生成を行なった(図 5.4.6)。また、ノッチ波生成及びインバータ出力は時間による制御モデルと同様のものを使用した。

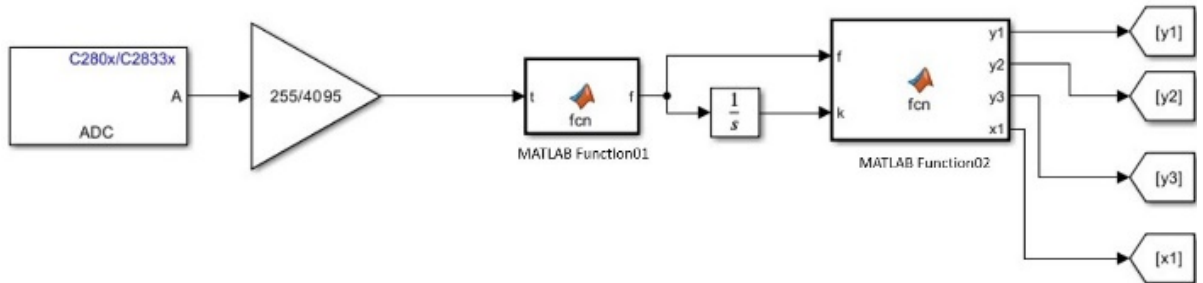


図 5.4.4 外部アナログ入力制御モデル

```
function f= fun(t)
%ボリュームの値(0~255)を f の値 (0~50)に変換する

if (t>=0)&&(t<=50) % ボリュームの入力値が 0~50 の場合
    f=30*t/50; %f の値(0~30)を出力する

elseif (t>50)&&(t<=100) % ボリュームの入力値が 50~100 の場合
    f=t/5+20; %f の値(30~40)を出力する

elseif (t>100)&&(t<=150) % ボリュームの入力値が 100~150 の場合
    f=t/5+20; %f の値(40~50)を出力する
else %ボリュームの入力値が 150 以上の場合
    f=50; %f の値は 50 となる
```

図 5.4.5 信号変換プログラム (MATLAB Function01 内部)

```
function [y1,y2,y3,x1]= fun(f,k)
%fの値(0~50)を基に 0~50Hz の変調波及び伴った搬送波を生成する

if(f>=0)&&(f<=30) %fの値が 0~30 の場合
    y1 = 0.8*sin(2*pi*k); %U 相変調波
    y2 = 0.8*sin(2*pi*k-2*pi/3); %V 相変調波
    y3 = 0.8*sin(2*pi*k-4*pi/3); %W 相変調波
    x1=sawtooth(2*9*pi*k-pi/2,0.5); %搬送波(変調波の9倍)

elseif(f>30)&&(f<=40) %fの値 30~40 の場合
    y1 = 0.8*sin(2*pi*k); %U 相変調波
    y2 = 0.8*sin(2*pi*k-2*pi/3); %V 相変調波
    y3 = 0.8*sin(2*pi*k-4*pi/3); %W 相変調波
    x1=sawtooth(2*3*pi*k-pi/2,0.5); %搬送波(変調波の3倍)

else %fの値が 40~50 の場合
    y1 = 0.8*sin(2*pi*k); %U 相変調波
    y2 = 0.8*sin(2*pi*k-2*pi/3); %V 相変調波
    y3 = 0.8*sin(2*pi*k-4*pi/3); %W 相変調波
    x1=sawtooth(2*pi*k-pi/2,0.5); %搬送波(変調波の等倍)
```

図 5.4.6 変調波及び搬送波の生成プログラム(MATLAB Function02 内部)

6. インバータ制御基板の製作

インバータ内の IGBT の ON/OFF を行うゲート信号を生成し、制御を行なっているインバータ制御基板の製作を行った。

6.1 使用機器

[1] 制御ボード (TMS320F28335)

Texas Instruments 製のデジタルシグナルプロセッサ (DSP= Digital Signal Processor),C2000 DIMM100 Experimenter’s Kit は, Experimenter’s Kit USB Docking Station(基板)と TMS320F28335(制御デバイス)で構成されている。本稿では, C2000 と記載している。

本研究では, MATLAB Simulink で作成した制御モデルをデバイスにコンパイルすることで, インバータにート信号を生成している。また, ボリュームからのアナログ入力信号をこのデバイスで読み取っている。

この, DSP はフローティングサポート付き 150 MPS プロセッシングコア, 512 KB 内蔵フラッシュ, 高解像機能付き 18PWM チャンネル, 12 bit12.5MSPSADC, シリアル接続などの機能を備えている。

TMS320F28335 の仕様を以下に示す。



図 6.1.1 制御ボード (TMS320F28335)

表 6.1 TMS320F28335 の仕様

項目	仕様
入力電圧	-0.3 V ~ 4.6 V
出力電圧	-0.3 V ~ 4.6 V
入力クランプ電流	-20 mA ~ 20 mA
出カクランプ電流	-20 mA ~ 20 mA
接続温度	-40 °C ~ 150 °C
保管温度	-65 °C ~ 150 °C

[2] 電圧変換器

MyWay インバータ主回路では IPM に必要なゲートスイッチング信号は 5V である。しかし, 制御ボードから出力されるスイッチング信号は 3.3V であるため昇圧または変換する必要がある。そのため, 3.3V のスイッチング信号を 5V に変換するバッファ回路が必要となる。この要件を満たすために 8 進数バッファ IC(74ACT540P) (図 6.1.2) を用いる。IC の動作範囲の仕様を以下に示す。



図 6.1.2 8 進数バッファ IC (74ACT540P)

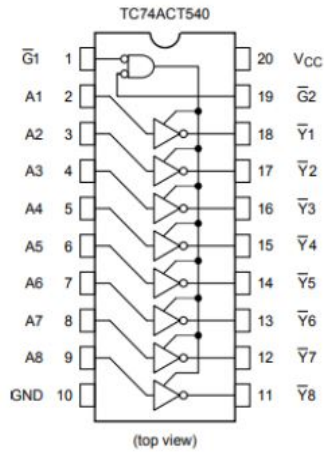


図 6.1.2 74ACT540P の回路構成

表 6.2 74ACT540P の仕様

項目	仕様
供給電圧 V_{cc}	4.5~5.5 V
入力電圧	0~ V_{cc} V
出力電圧	0~ V_{cc} V
動作温度	-40~85 °C
立ち上がり・下がり時間の入力	0~10 ns/V

[3] LED モジュール

制御ボードから、インバータユニットへ信号が正常に入力されているか、ボリュウムからのアナログ入力信号を確認する LED モジュールを使用した。

LED モジュールは、Opto Supply の OSX10201(図 6.1.3)を使用した。以下に仕様を示す。



図 6.1.3 LED モジュール

表 6.3 OSX10201 の仕様

項目	仕様
順電圧	3.3 V
最大順電流	25 mA
逆電圧	5 V
ドミナント波長	465 nm
動作温度	-30~70 °C

[4] 端子類

制御基板とインバータモジュール及びボリュウムの接続に使用した。ボリュウムの接続には HV コネクタを使用した。インバータモジュールとの接続には、日本圧着端子製造のボックスヘッダ 34 ピン(RA-H341TD)(図 6.1.4)を使用した。



図 6.1.4 ボックスヘッダ 34 ピン

6.2 基板の設計

本研究では、既存の制御基板設計図(図 6.2)を基に VVVF インバータモジュールに適した、基板の設計を行なった。また、基板の設計には KiCad を使用した。

KiCad は基板設計 CAD である。KiCad には、回路図設計(Eeschema)と PCB 設計(PcbNew)がある。今回は PCB 設計(PcbNew)のみを使用した。

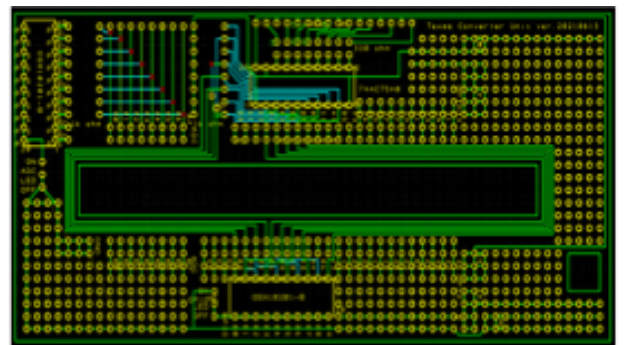


図 6.2 既存の制御基板設計図(c2000)

6.2.1 KiCad 準備

[1] KiCad のインストール

KiCad のサイト(<https://www.kicad.org/>)を開き Download ページからインストールする。

[2] プロジェクトの作成

KiCad を起動し、左ツールバーの”空のプロジェクトを作成”をクリックする。

注意点

”プロジェクト用に新しいフォルダーを作成”をクリックする。プロジェクトファイルやプロジェクト用のフォルダ名に半角スペースを含むと、KiCad の拡張プラグインや、

モジュール型 VVVF インバータを用いた実習システムの構築プロジェクトのファイルにアクセス出来ない可能性がある。

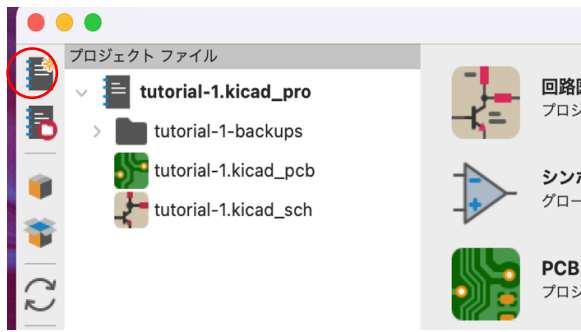


図 6.2.1 空のプロジェクト作成(赤丸部分)



図 6.2.3 制約

6.2.2 PCB(PcbNew)の準備

[1] PCB エディターの起動

KiCad マネージャーの PCB エディターを起動する。

[2] 座標系の設定

KiCad では、設計画面の座標を設定することができる。メニューバーの設定を開き、設定ダイアログの”PCB エディター/原点と座標軸”を選択する。今回は、以下のように設定した。

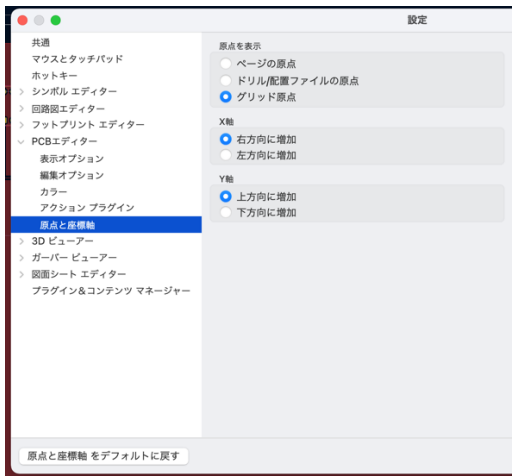


図 6.2.2 座標系の設定

[3] デザインルールを設定

基板の配線幅、線間距離、ドリル径などのデザインルールを設定を行う。

- ① 上ツールバーの”基板の設定”をクリックする。
- ② ”デザインツール/制約”を選択し、銅、穴、マイクロビア、シルクスクリーンの各項目を入力する(図 6.2.3)
- ③ ”定義済みサイズ”を選択し、”配線”、”ビア”欄に入力する。(図 6.2.4)(この値が手動配線の配線幅とビアサイズの選択項目となる。)



図 6.2.3 定義済みサイズ

[4] レイヤーについて

KiCad の PCB エディターは用途ごとに、レイヤーが用意されている。以下にレイヤーの種類を示す。

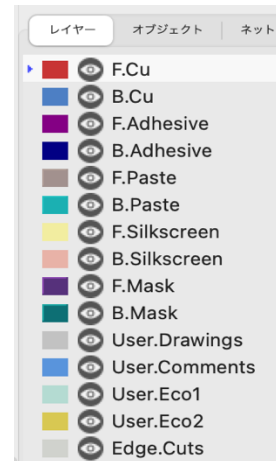


図 6.2.4 レイヤー

表 6.4 レイヤーの種類

レイヤー	用途
F.Cu	前面・配線パターン
B.Cu	背面・配線パターン
F.silkscreen	前面・シルク
B.silkscreen	背面・シルク
F.Mask	前面・ソルダーマスク
B.Mask	背面・ソルダーマスク
Edge.Cuts	基板外形

6.2.3 フットプリントの作成

基板の設計を行う前に基板に使用する部品のフットプリントの作成を行う。フットプリントとは、部品の外形や、パッド(部品を取り付ける端子)のことである。フットプリントの作成手順を以下に示す。

[1] フットプリントのダウンロード

使用する部品が市販品の場合、Web からフットプリントを入手する。今回は、部品データ提供 Web サイト SnapEDA (<https://www.snapeda.com/>)を使用した。

注意点

ダウンロードするフットプリントの CAD フォーマット及び、バージョンに注意する。

フットプリントをダウンロードする際に、3D モデルもダウンロードする。

[2] ダウンロードしたフットプリントの登録

- ① KiCad マネージャーのフットプリントエディタを起動する。
- ② メニューバーの”ファイル”をクリックし、”インポート/フットプリント”を選択する。(図 6.2.5)
- ③ “フットプリントをインポート”ダイアログが開き、ダウンロードしたフットプリントファイル内の”部品名.kicad_mod”を開く。次に、エディターにダウンロードしたフットプリントが表示される。(図 6.2.6)



図 6.2.5 フットプリントのインポート

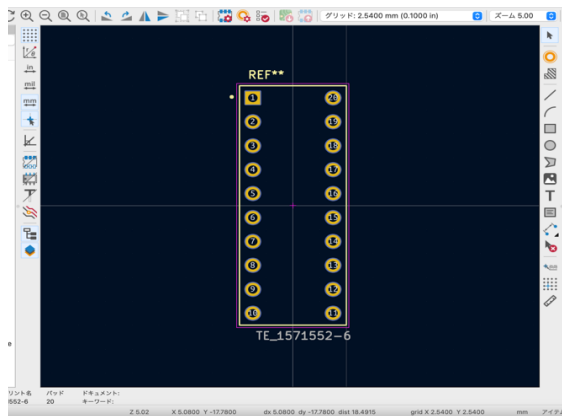


図 6.2.6 ダウンロードしたフットプリント

[3] 3D モデルの登録

- ① エディターにダウンロードしたフットプリントが表示された状態で、メニューバーの”ファイル”をクリックし、”フットプリントのプロパティ”を選択する。
- ② “フットプリントのプロパティ”ダイアログの”3D モデル”タブを選択し、ファイルアイコンの”3D モデルを追加”をクリックする。(図 6.2.7)
- ③ “3D モデルの選択”ダイアログが開き、ダウンロードした 3D モデルファイル内の”部品名.step”を開く。
- ④ “フットプリントのプロパティ”のプレビュー欄に 3D モデルが表示される。(図 6.2.8)
- ⑤ 図 6.2.8 に表示された 3D モデルは基板に対して位置がずれている為、プレビュー欄左側の回転、オフセット値を調節し、位置を合わせる。(図 6.2.9)



図 6.2.7 フットプリントのプロパティ

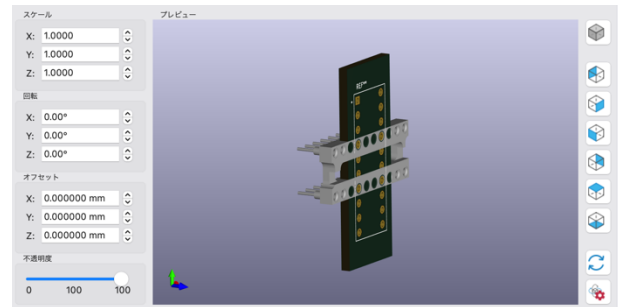


図 6.2.8 ダウンロードした 3D モデル

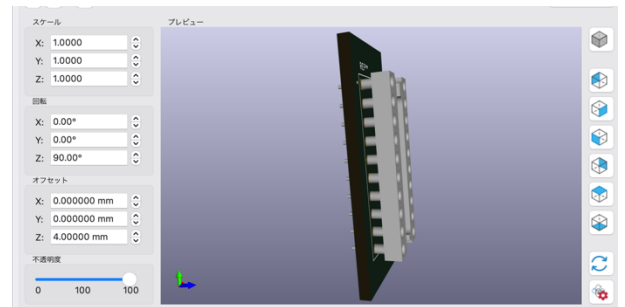


図 6.2.9 修正した 3D モデル

[4] パッドのフットプリント

基板を設計する際に、ピンソケットに使用するスルーホールのパッドを追加した。PCB エディター上では、パッドを追加することができないため、フットプリントエディター上でパッドの追加を行なった。エディターの右ツールバー”パッドを追加”を選択し、パッドを配置する。(図 6.2.10)

また、使用した、パッドのプロパティを(図 6.2.11)に示す。

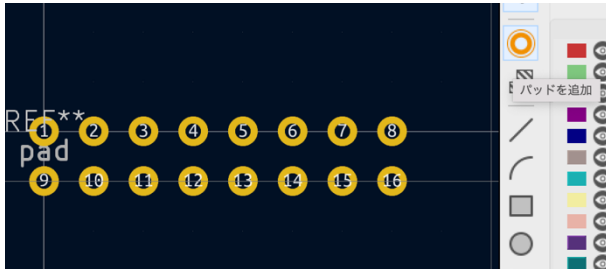


図 6.2.10 パッドの追加



図 6.2.11 パッドのプロパティ

6.2.3 基板のデザイン

PCB エディターを開き、基板の設計を行う。

[1] 基板の外形

基板寸法は、インバータユニット上部に取り付ける為、縦：160 mm×横：160 mm とした。

- ① エディターの右ツールバー”矩形を描画”を選択する。
- ② レイヤーを”Edge.Cuts”に変更する。
- ③ グリッドを 5.00 mm に設定し、作業原点から x:180.00 mm y:160.00 mm の点でクリックし矩形を固定し、矩形外形線を確定する。

[2] 部品の配置

- ① エディターの右ツールバー”フットプリントの追加”を選択する。
- ② “フットプリントを選択”ダイアログから、基板へ追加したいフットプリントを選択する。
- ③ ラッツネスト(フットプリント端子間の電氣的接続を示す細い線)を参考にして、配置を行う。

この際、回路がわかりやすく、見やすい部品配置を行う。また、配線と半田付けもやりやすいように考慮する。(図 6.2.12)

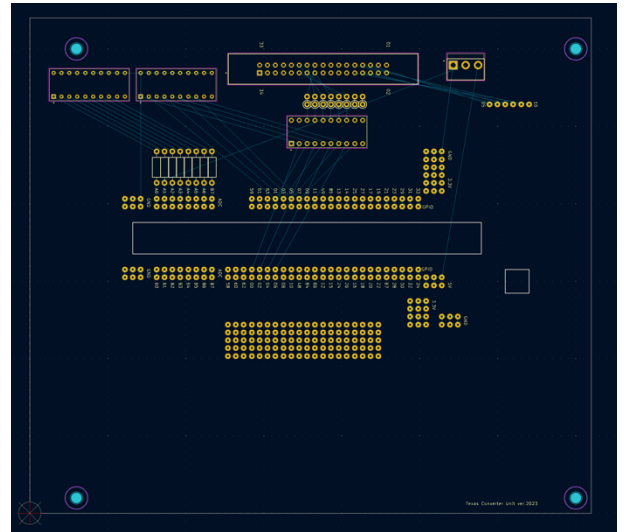


図 6.2.12 部品の配置を行なった基板

[3] 配線

- ① グリッドを 0.6350 mm にする。
- ② エディターの右ツールバー”単線/配線”を選択する。
- ③ 前面に配線したい場合は”F.Cu”レイヤーを、背面に配線したい場合は”B.Cu”レイヤーを選択する。
- ④ 配線したい端子を選択すると、ラッツネストで接続されている他の端子がハイライト表示される。ハイライト表示された端子まで、配線を引き回す。(図 6.2.13)
- ⑤ 配線したい箇所が、他の配線や端子と交差や接触してしまう場合は、ビアを配置して配線レイヤーを変更する。配線を行なった、基板を(図 6.2.14)に示す。

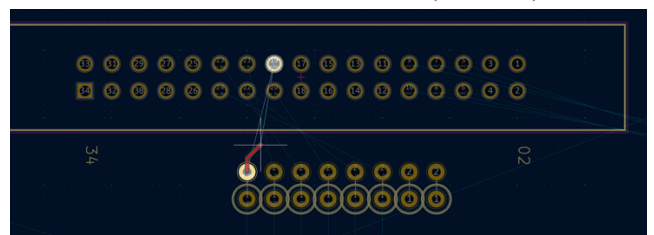


図 6.2.13 ハイライト表示された端子

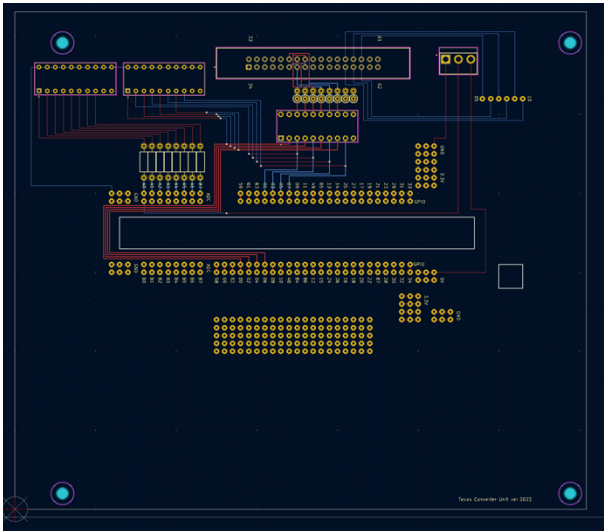


図 6.2.14 配線を行なった基板

[4] ベタグラウンド

グラウンド(GND)をベタにすることで、基板の空いている領域をGNDとして用いることをベタグラウンドという。

ベタグラウンドをすることにより、ノイズの影響を受けない、ノイズ源となりにくい、などの利点が存在する。

- ① ”F.Cu”レイヤーを選択し、エディターの右ツールバー”塗りつぶしゾーンの追加”を選択する。基板外形線の内側 0.5 mm を塗りつぶしゾーン(ベタグラウンド領域)とする。
- ② 基板外形の原点から 0.5 mm 内側の点をクリックすると、“導体ゾーンのプロパティ”ダイアログが開く。
- ③ “導体ゾーンのプロパティ”の各項目を記入する。(図 6.2.15)
- ④ メニューバーの”編集”をクリックし、”すべてのゾーンの塗りつぶし”を選択する。(図 6.2.16)
- ⑤ ベタグラウンドが生成される。(図 6.2.17)

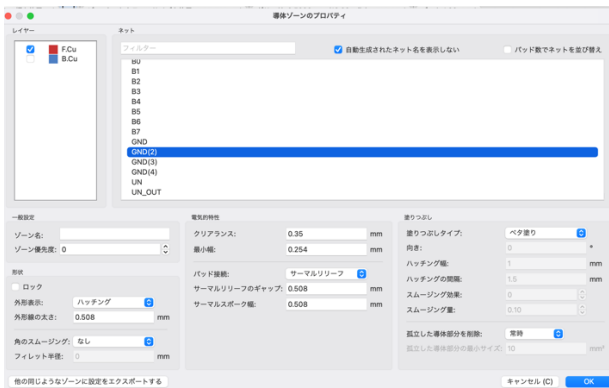


図 6.2.15 導体ゾーンのプロパティ



図 6.2.15 すべてのゾーンの塗りつぶす

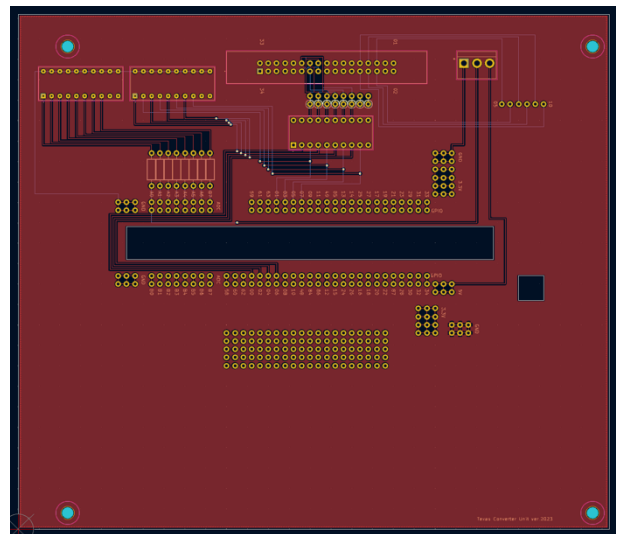


図 6.2.16 ベタグラウンドを追加した基板

6.3 基板の発注

6.3.1 製造データの出力

[1] ガーバーデータの生成

- ① PCB エディター上で、メニューバーの”ファイル”をクリックし、”製造用出力/ガーバー”を選択する。(図 6.3.1)
- ② “プロット”ダイアログが開く。ダイアログの各項目を記入する。(図 6.3.2)
- ③ “プロット”をクリックすると、出力メッセージ欄にファイル生成状況が表示される。
- ④ “ドリルファイルを生成”をクリックする。

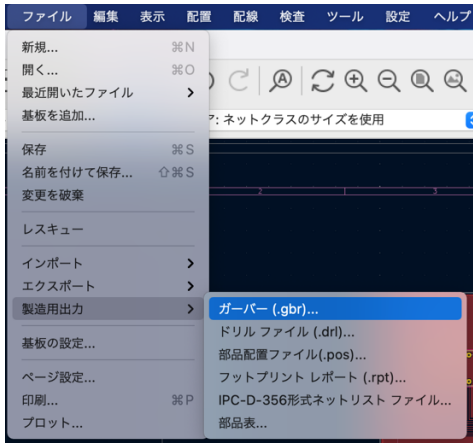


図 6.3.1 ガーバーデータの生成

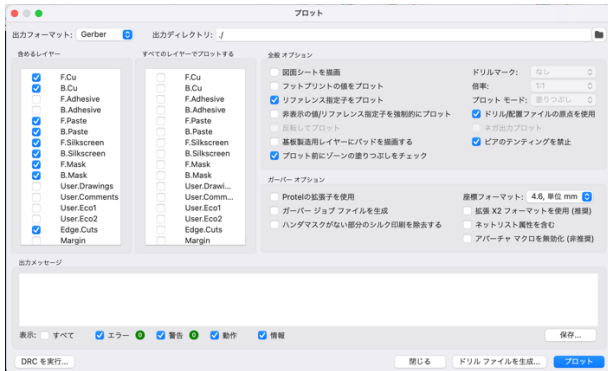


図 6.3.2 プロット

[3] ガーバーデータの確認

- ① KiCad マネージャーのガーバービューアーを起動する.
- ② ビューアーの上ツールバー”自動検出したファイルを開く”をクリックする.
- ③ ファイルエクスプローラーが開いたら, 全ファイルを選択し”開く”をクリックする.
- ④ ガーバービューアーに, 基板製造データが表示される. (図 6.3.4)
- ⑤ 各レイヤーのガーバーデータを個別表示し基板レイアウト図と正しく一致しているか確認する. ガーバーデータの種類を以下に示す.

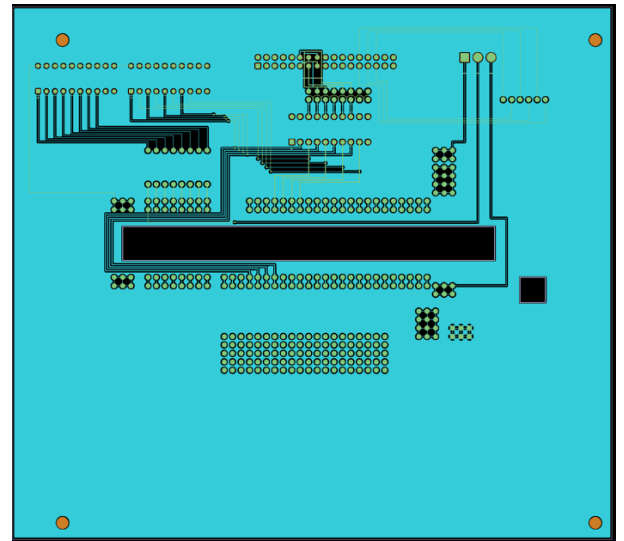


図 6.3.4 基板製造データ

[2] ガーバーデータの生成

- ① “ドリルファイルを生成”をクリックすると, “ドリルファイルを生成”ダイアログが開く. ダイアログの各項目を記入する. (図 6.3.3)
- ② “ドリルファイルを生成”をクリックし, 製造データの出力作業を終える.

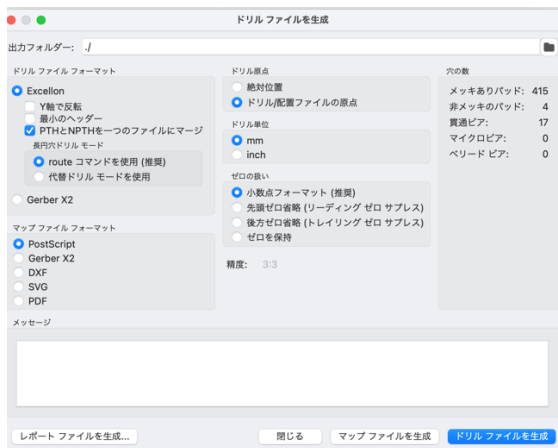


図 6.3.3 ドリルファイルを生成



図 6.3.4 ガーバーデータ層(レイヤー)

表 6.5 ガーバーデータの種類

ファイル名	種類
~.drl	ドリル
~Edge_Cuts.gbr	基板外形
~F_Silkscreen.gbr	表面シルク印刷
~F_Mask.gbr	表面ソルダーマスク
~F_Cu.gbr	表面銅箔
~B_Cu.gbr	背面銅箔
~B_Mask.gbr	背面ソルダマスク
~B_silkscreen.gbr	背面シルク印刷

[4] 発注する

“作成したデータを利用して基板を発注する。本研究ではユニクラフトというサイトを利用した。ユニクラフトのホームページにいき“プリント基板製造”を選択する。

はじめに基板の見積もりを行う。自動見積もりをクリックし見積もり画面に行く。ここで必要な情報を入れることで大まかな見積もりをもらうことができる。

まず“新規基板”にチェックを入れ，“お客様がカーバーデータをご用意”をチェックする。そして“基板サイズ”と“銅箔厚さ”を発注する基板に合わせ変更する。下にスクロールし“自動見積もり”をクリックすることで見積もりが出来る。金額を確認して下にスクロールすると必要な情報を入力し、作成したカーバーデータを選択する。最後に“正式見積もりを依頼”をクリックすると基板の発注が出来る。

7. 動作実験

7.1 実験目的

製作した、VVVF インバータ実験システムについて、動作実験を行い、設定した目標値を出力するように制御が行えているか確認する。

7.2 実験方法

図 7.1 に実験風景を示す。交流 200 V をインバータに入力し、インバータでモータの制御を行う。この時、インバータの入力電源として 24 V を入力、インバータの制御を PC からできるように C2000 をインバータに繋ぐ。目標値は電圧 200 V、周波数 50 Hz、回転速度 1500 m^{-1} 、としている。また、電源とインバーターを絶縁するために、間に Δ -Y トランジスタを接続している。

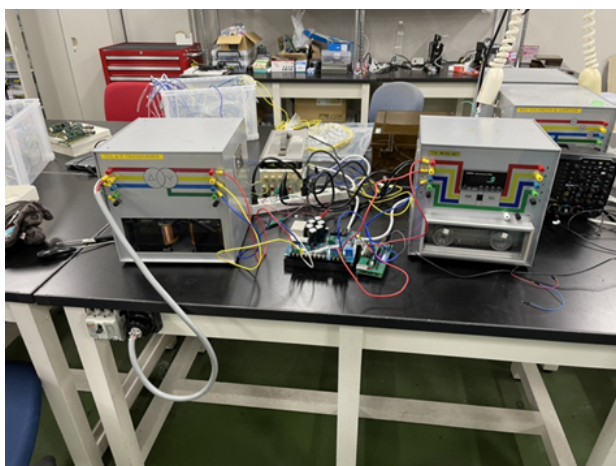


図 7.1 実験の様子

7.3 使用機器

本実験に用いた三菱電機製の三相誘導電動機の仕様と外観をそれぞれ表 7.1 と図 7.2 に示す。



図 7.2 三相誘導電動機

表 7.1 三相誘導電動機の仕様

製造	三菱電機
型番	SF-JR
定格容量	0.2[kW]
定格線間電圧	200[V]
定格電流	1.26 [A]
定格回転速度	1400[rpm]
極数	4

7.4 実験結果・考察

C2000 を用いたとき Simulink の仕様により、実験を行いつながりリアルタイムに Simulink 上で波形を取ることができなかった。そのため、周波数が変化していること、搬送波とキャリア周波数の比率が正しく変化していることを確認するために、可変抵抗器ではなく時間による制御で周波数が変化するモデルで確認した。また、実機で実験を行ったときに可変抵抗器による制御でモータの回転速度が変化していることを確認できた。周波数が 30 Hz、40 Hz、50 Hz で変化するため、モータの駆動音も変化していることを確認できた。

8. まとめ

本研究では、机上で実機を用いた VVVF インバータの実験を行うことが可能となるように、VVVF インバータシステムモジュールの製作を行なった。今後は、計測環境の構築と共に、実験マニュアルを作成し、学生実験への利用を目標とする。

モジュール型 VVVF インバータを用いた実習システムの構築 謝辞

本研究を行うにあたり、藤田吾郎教授他、安藤英一先生にご指導ご鞭撻を賜り、心より御礼申し上げます。また、たくさんのご助言を頂戴いたしました電力システム研究室の皆様へ感謝の意を申し上げます。皆様の今後のご活躍と御健康を心からお祈り申し上げます

参考文献

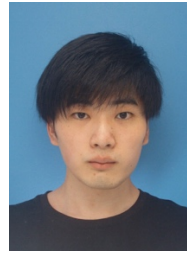
- [1] G.Fujita :Discussion on Power System Man-agement, The 4th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, 2010
- [2] 一松祥右ほか「モジュール型電力系統実習装置の提案」日本工学教育会 工学教育 61-2(2013)
- [3] 電気鉄道ハンドブック編集委員会 「電気鉄道ハンドブック」 コロナ社
- [4] パワーエレクトロニクスハンドブック編集委員会 「パワーエレクトロニクスハンドブック」 コロナ社

画像引用元

- [1] 鉄道車両機器製品ラインナップ 三菱電機会社インフラ株式会社
<<https://www.mpue.co.jp/businesses/vehicle/product-lineup.html>> 2024 年 2 月閲覧
- [2] 電気鉄道ハンドブック編集委員会 「電気鉄道ハンドブック」 コロナ社
- [3] インバータユニット MWINV-1R022/MWINV-5R022 ユーザーズマニュアル Myway プラス株式会社
- [4] デジタルスケーリングパネルメータ取扱説明書 渡辺電機株式会社
- [5] トグルスイッチ S シリーズ取扱説明書 nKKSITCHES
- [6] パワーエレクトロニクスハンドブック編集委員会 「パワーエレクトロニクスハンドブック」 コロナ社

関口 哲史

関口 哲史



2000 年 2 月 8 日生. 2024 年 3 月芝浦工業大学大学院理工学研究科電気電子情報工学専攻修了.

同年 4 月より東京電力ホールディングス株式会社入社.在籍中は学業, アルバイトに励んだ.

連絡先

〒124-0023

東京都葛飾区東新小岩 8-25-5

E-mail:ae18054@shibaura-it.ac.jp