

## 2. パワーエレクトロニクス

### 1. 実験目的

- 1) 実験にて、降圧チョッパ回路、ダイオード整流器、インバータの動作原理を理解する。
- 2) ダイオード整流器において、DC リンクコンデンサ、負荷抵抗の変化に対する入力電流、出力電圧の変化について考察する。
- 3) 降圧チョッパ回路において、負荷抵抗とデューティと電流リップルの関係を考察する。
- 4) インバータの V/f 運転・方形波運転によるモータの動作特性を考察する。
- 5) 実験を通じて、各種実験機器の使用方法、および注意事項について学ぶ。

### 2. 用意するもの

- 1) Zoom に接続可能な PC もしくはタブレット端末
- 2) ノート PC (実験データ整理用。各班 2 台)
- 3) 関数電卓
- 4) グラフ用紙 (表計算ソフトがある場合は不要)
- 5) パワーエレクトロニクスの教科書 (所有者のみでよい)
- 6) USB フラッシュメモリ (データ記録用)

### 3. 実験内容

#### 3.1. 実験計画日

##### 3.1.1. 概要

実験計画日は以下のことを行う。

- 1) 実験概要の説明と班分け
- 2) 実験計画立案法の説明
- 3) 原理の調査法の説明
- 4) 原理、実験計画発表会 ※ 4, 5) については指定した集合時間に集合してから行う。
- 5) 安全教育：感電事故防止，救護

##### 3.1.2. 実験計画の立案

テキストに沿って具体的な実験手順と測定条件を考える。実験方法は手順ごとの箇条書きにし、測定する負荷条件や回路条件、場所を明確にすること。表にまとめるとよい。

##### 3.1.2.1. 整流器・降圧チョッパ実験

整流器の実験では、平滑コンデンサ及び負荷抵抗を下記の条件で変化させた場合の波形の変化を観測する。

## &lt;測定項目（整流器実験）&gt;

オシロスコープおよびパワーアナライザを用いて、下記の測定を行う。

測定対象：入力電流波高値，直流電圧最大値，電圧リプル，入力電流高調波，入力力率

●やること1:ダイオード整流器の波形の変化を観測するために必要な実験条件を考える。

実験回路の組み合わせは全部で8通り（コンデンサ2通り×負荷抵抗2通り×リアクトル値2通り）となる。このうち、各パラメータの変化に応じた波形の変化がわかるように5通りの組み合わせを選択する。

- ・コンデンサ: 205  $\mu\text{F}$ , 470  $\mu\text{F}$
- ・負荷抵抗: 28  $\Omega$ , 56  $\Omega$
- ・リアクトル: なし, DC リアクトル(DCL)

※DC リアクトル（ダイオードブリッジと平滑コンデンサ間）にリアクトルを挿入する。

## &lt;測定項目（降圧チョッパ実験）&gt;

2種類の負荷に対し、降圧チョッパのデューティ比を変えた際の下記パラメータをオシロスコープにより測定する。

測定対象：入力電圧（高圧側），出力電圧（低圧側），リアクトル電流（電流リプル）

- ・負荷抵抗：28 $\Omega$ , 56 $\Omega$

## 3. 1. 2. 2. インバータ実験

## 3. 1. 2. 2. 1. 波形観測

直流から三相交流への変換を行うインバータ回路を駆動し、下記の測定を行う。

測定対象：相電圧  $V_{uo}$ （方形波制御のみ），相電圧  $V_{un}$ ，線間電圧  $V_{uv}$ ，中性点電位  $V_{no}$ ，線電流  $I_u$ ，高調波解析( $I_u$ ) ※ただしモータの実験は  $V_{un}$ ,  $V_{no}$  の観測は不要

- ・負荷：抵抗負荷，誘導電動機(モータ)負荷の2種類
- ・制御方式：方形波，PWM (4kHz)，PWM(16kHz)の3種類

これらの組み合わせは全部で6通り（負荷2通り×制御方式3通り）

●やること2：波形を観測する制御条件（V/f比（0～2の範囲で1種類）），負荷条件，インバータの出力周波数を選択する。

方形波とモータの組み合わせ+それ以外の5通りから、各パラメータの変化に応じた波形の変化がわかるように4通りの組み合わせ(計5通り)を選択する。つまり、方形波とモータの組み合わせは必ず行う。

### 3.1.2.2.2. モータ駆動特性検証

インバータ回路によりモータ（誘導電動機）を駆動し、下記の測定を行う。

測定対象：周波数  $f$  に対する線間電圧  $V_{uv}$ 、電流  $I_u$ 、回転数  $N$

●やること3：横軸の刻み、制御方式、V/f 比（0～2 の範囲で2種類）を決定する。

インバータによるモータ駆動において、出力周波数に対するインバータ出力電圧、出力電流、モータ速度の関係を調べ、グラフを書く。なお、実験は2通りの V/f 比で行う。

### 3.1.3. 原理調査

●やること4：パワーエレクトロニクスに対する理解を深めるため以下のことを調査する。

調査後、調査を担当した学生が、それぞれの項目について、ホワイトボードまたは黒板に図や式、説明文等を書いてレクチャーを行い、班のメンバの理解度を高める。

- 1) ダイオード整流器の動作原理 ※直流電圧波形、入力電流波形はどうか
  - a) 単相全波整流器
  - b) 三相全波整流器
- 2) 降圧チョップ回路の動作原理
  - a) 電圧を降圧する原理（リアクトルに流れる電流波形とデューティ、負荷抵抗の関係はどうか）
- 3) インバータの動作原理
  - a) インバータの動作原理
  - b) 駆動方法（方形波駆動と PWM 駆動の違いと特徴）

### 3.1.4. 安全教育（感電事故防止）

人体に電流が通じると、表 4-3 に示す影響を受ける恐れがある。パワーエレクトロニクスは高電圧・大電流を扱う分野であり、本実験でも最大で 141V の電圧、10A の電流を取り扱う。そのため、本実験を行うにあたっては感電しないよう十分な対策と、最大限の注意を払うこと。

なお、人体の抵抗値は感電経路、汗、湿度等の環境によって変化し、また個人差もあるため危険となる電圧値は一概にはいえないが、40V でも死に至った例が報告されている。

表4-3 電流値による人体への影響

電 流 値 [mA]	影 響
1 (以下)	電氣的衝撃やしびれを感じる。
5 以上	痛みを感じ、だるさが残る。
10	耐えられないほどの苦痛を感じ、電流の流入点に外傷ができる。
20	筋肉が収縮し、また、けいれんが起これり身体が自由がきかなくなり、感電者自身充電物から逃げるできない。
30	火傷のような症状を生じ、意識を失うこともある。
50	呼吸が止ったり、場合によっては心臓機能が停止したりする。
100	致命的結果を生じ、ほとんどの場合死亡する。

- (3) 高圧は触れなくとも危険である。2,500V以上は30 cm以上、50,000V以上は1 m以上離れなければならない。
- (4) 電気機器は、水、特に塩水に濡らしてはならない。なお、濡れている場合は、乾燥した後、絶縁抵抗計（メガテスター）で絶縁抵抗を測定後に使用する。
- (5) コンデンサを取り扱う際は、両端子を必ず短絡（放電）してから扱う。短絡する際は、直接短絡せず、抵抗器などを介して行う。コンデンサは、短絡してもその後時間がたつと、電圧を回復し、感電することがある。電解コンデンサ、高圧コンデンサの場合は、特に注意を要する。
- (6) オシロスコープで電源電圧を測定する際は、ケースの部分が帯電していることがあるから、ケースを直接触ると感電するおそれがあるため、感電保護具等を着用する。
- (7) スイッチの開閉のとき、ハンドルを握らない方の手は他の物、特に金属に触れないこと。スイッチの操作は、右手で行う。左手で行うと、感電のとき心臓に電撃を受ける。
- (8) 電磁石のような大きなインダクタンスを有する回路のスイッチを切ると、火花が飛んでやけどや感電するおそれがあるため、感電保護具、防具を着用する。直流電動機の界磁電流を切る時も、素早くスイッチを切ること。

(安全のための手引き p28,29 より)

### 3.2. 実験（1日目，2日目）

#### 3.2.1. 実験装置

- |                     |          |
|---------------------|----------|
| 1) 実験セット            |          |
| 2) オシロスコープ（テクトロニクス） | TBS1052B |
| 3) 差動プローブ（横河電機）     | 700925   |
| 4) 電流プローブ（テクトロニクス）  | A622     |
| 5) クランプ電力計          | CW240    |
| 6) モータ              |          |
| 7) 交流電圧計            |          |
| 8) 交流電流計            |          |
| 9) 回転速度測定器          |          |

#### 3.2.2. 整流器実験（AC-DC 変換）

図1にダイオード整流器の回路図を示す。単相回路の実験では (a) の回路を，三相回路では (b) の回路を用いて実験を行う。本実験では，抵抗負荷，コンデンサ，リアクトルの変化による，DC リンク電圧，DC リンク電圧リプル，入力電流，入力電流高調波，入力力率の変動を観測・考察する。

- 1) 実験パラメータとして，抵抗負荷が2種類（ $28\ \Omega$ ， $56\ \Omega$ ），コンデンサが2種類（ $205\ \mu\text{F}$ ， $470\ \mu\text{F}$ ），リアクトル設置条件が2種類（リアクトルなし，DC リアクトル）ある。実験計画日に検討した実験条件に従って，回路定数を設定する。
- 2) 選択したパラメータを用いて実験回路を構成する。
- 3) 入力電圧を実効値  $100\text{V}$  とし，DC リンク電圧と入力電流波形，および入力電流高調波解析波形をオシロスコープで観測し，保存する。
- 4) DC リンク電圧最大値，DC リンク電圧リプル，入力電流波高値をオシロスコープの測定機能を用いて測定する。特に，入力電流波高値の測定に注意すること。
- 5) 入力力率を電力計で観測する。
- 6) パラメータを変えて2)～5)の実験を繰り返す。

※入力電流高調波はオシロスコープの高調波解析機能 (FFT) により取得する。

※DCLはコンデンサと整流器の間に入れること。負荷（抵抗）とコンデンサの間に入れること。挿入箇所を間違った場合は再実験とする。

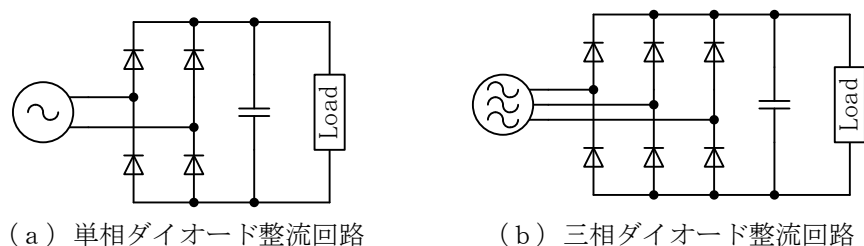


図1 ダイオード整流器

### 3.2.3. 降圧チョップパ実験 (DC-DC 変換)

図2に三相ダイオード整流回路の後段に降圧チョップパ回路を接続した回路図を示す。本実験では、整流器により得られた直流電圧を基に、降圧チョップパ回路の試験を行い、デューティと負荷抵抗を変化させたときの降圧チョップパ回路の動作波形を観測・考察する。

- 1) 実験3.2.2.で行った三相ダイオード整流回路の後段に降圧チョップパ回路を接続する。ただし、リアクトルはDCL, コンデンサは $470\mu\text{F}$ とする。また、降圧チョップパの負荷には摺動抵抗を使用する。本回路でスライダックを調整し、降圧チョップパの入力電圧が $100\text{V}$ となるよう調整する。
- 2) 降圧チョップパ回路のスイッチ (IGBT) にゲート駆動回路(GDU)及び、制御回路を接続する。なお制御回路内のキャリア周波数を $4\text{kHz}$ とする。
- 3) 制御回路内の変調波を操作し、回路のデューティ $D$ を $0.15$ から $0.85$ まで変化させ、デューティに対する出力電圧及びリアクトル電流を測定、記録する。なお、デューティを変化させるとキャリア周波数が変化する場合があるため、その場合には再度周波数を調整すること。

キャリア周波数の調整：IIN

デューティの調整：DADJ

- 4) 負荷抵抗値を $28\Omega$ ,  $56\Omega$ の2通りに変え、3)の実験を繰り返し行う。

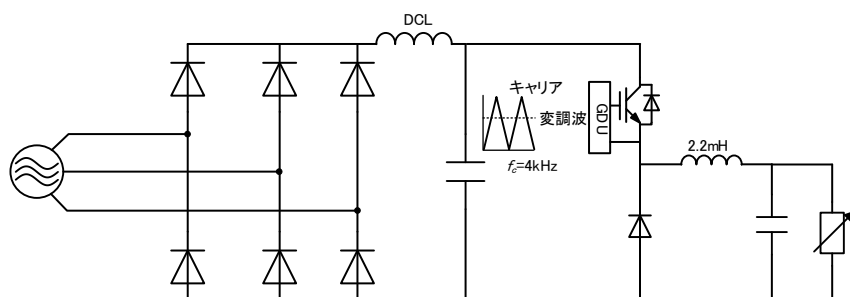


図2 ダイオード整流器と降圧チョップパ回路

### 3.2.4. インバータ実験 (DC-AC 変換)

図3にインバータの回路図を示す。本実験では、制御方式による動作の変化と、V/f 運転時のモータの動作特性を観測・考察する。

- 1) インバータの制御方式3種類（方形波, PWM 4kHz, PWM 16kHz）、負荷2種類（抵抗負荷  $19\Omega$ , モータ）から、実験計画日に検討した条件を使用する。
- 2) V/f 比設定値、および出力周波数を設定し、インバータを動作させる。
- 3) 出力電圧と出力電流波形、および出力電流高調波解析波形をオシロスコープで観測し、保存する。ただし、出力電圧は相電圧（直流中性点基準, 負荷中性点基準）、線間電圧、中性点電位の4種類観測する。また、モータ負荷の相電圧（負荷中性点基準）と中性点電位は測定しなくてよい。
- 4) パラメータを変え、2)～3)の実験を繰り返す。
- 5) 負荷をモータ、制御方式をPWMとしてインバータを駆動する。このとき、電流計が振り切れないように注意しながら周波数指令を徐々にあげ、定格回転数にすること。
- 6) 出力電圧, 出力電流, モータの回転数を測定する。
- 7) 出力周波数を0～50Hzの間で変化させて6)の実験を行う。プロット点は5～10点とする。
- 8) V/f 比の設定値を変化させ、5)～7)の実験を行う。
- 9) 出力周波数の変化に対する、出力電圧, 出力電流, 回転数の変動をグラフにまとめる。

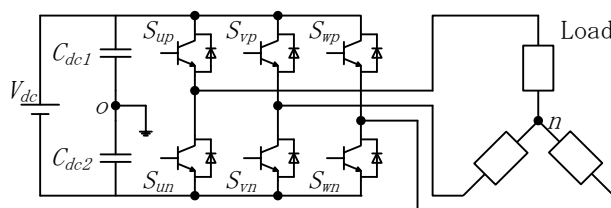


図3 三相インバータ回路

### 3.2.5. 実験時の注意事項

- 1) 実験装置のスイッチは教職員もしくはTAの許可を取ってからONすること。
- 2) 回路に触れる前に、電源スイッチがOFFとなっていることを必ず確認し、感電しないよう注意すること（特にダイオード整流回路の出力はDC142V程度になる）。
- 3) すべての設定、配線作業及び測定用プローブのつなぎ替えは三相メインスイッチをOFFして行うこと（制御回路電源は除外）。
- 4) オシロスコープのプローブのグランドは、制御回路信号のグランドと主回路のグランド（DCリンク中性点oや三相負荷中性点n）を一緒にとらないこと（同時に検出する際、片側は差動プローブを使用する。間違えると計測器の破損につながる）。
- 5) 電圧を上げる時は電流計を見ながら徐々に上げること（電動機が過励磁されないように）。
- 6) 実験終了時に、実験台など周りをきれいに掃除すること。

### 3.3. レポート作成日

#### 3.3.1. 結果のまとめ方

##### 3.3.1.1. 整流器実験

- 1) 実験内容及び実験結果が読者に伝わるよう、結果をまとめること。※何も考えずに結果を並べただけは不可。
- 2) 高調波解析結果や、測定波形は実験内容及び結果を報告するために必要な図表を抜粋して載せること。
- 3) パラメータの違いによる波形の違いがわかるように工夫してまとめること。

##### 3.3.1.2. 降圧チョッパ実験

- 1) デューティと出力電圧の関係をグラフにまとめること。
- 2) 負荷抵抗, デューティ, 電流リップルの関係をグラフにまとめること。

##### 3.3.1.3. インバータ実験

- 1) 波形は制御方式の違い, 負荷の違いにより波形が変わる様子がわかるように工夫してまとめること ※何も考えずに結果を並べただけは不可。
- 2)  $V/f$  特性の取得はかならずグラフを書くこと。

#### 3.3.2. 考察のポイント

実験計画日と同様に下記について調査・検討した後、発表し合い、理解する。レポートの考察はディスカッションした内容について各自でまとめて、文章、式、図を使って説明をすること。なお、考察は現象が生じている理由を説明するのであって、単に現象を列挙した内容は考察として認めない。考察についてわからない場合は、教職員や TA に相談すること。

##### 3.3.2.1. 必須考察課題

- 1) 整流器実験  
単相整流器と三相整流器における入力電流の周波数成分の違いについて、その差異と原因について考察せよ。
- 2) 降圧チョッパ実験  
負荷抵抗値及びデューティを変えた場合の出力電圧及び、リアクトル電流波形（リップル）について理論と実験の差異を考察せよ。
- 3) インバータ実験  
モータ負荷における PWM 制御の 4kHz, 16kHz, 方形波制御の違いについて電流波形を元に考察せよ。また、使い分けについても考察せよ。
- 4) インバータ実験



モータの電流、速度（回転数）がインバータの出力周波数に対して取得した結果のように変化する理由について考察せよ。特に  $V/f$  比が変わったときのモータの運転特性について考察せよ。

### 3.3.2.2. 追加考察のヒント

#### 1) 整流器実験

負荷抵抗及び、平滑コンデンサが入力電流波形に及ぼす影響について考察する。

#### 2) インバータ実験

方形波駆動時、インバータの中性点電位  $V_{no}$  がどのように変化するか、またなぜそのように変化するか考察する。

※その他 追加で考察を行った場合には、その考察対象、内容、完成度に応じて加点する。

### 3.3.3. レポート作成上の注意点

- 1) レポートは、「実験レポートの書き方」に則り、「概要、目的、理論的背景、実験方法、実験結果、考察、工夫した点、結論、参考文献」とする。
- 2) レポートの目的欄は文章で記載すること。全体的な目的を明確にし、実験の方法についても簡単に記載すること。
- 3) 理論的背景には、計画日に調査した内容を各自自分でまとめ、記載すること。ページ数の制限はない。
- 4) 各考察課題はグループで討議するが、考察を書く際には討議した結果を各自で整理、検討、理解した上で、自分なりの表現で文章にし、図や式を使って説明すること。グループで考察に同じ表現や図を共有するのは認めない。ページ数の制限はない。
- 5) 小班の中では、シミュレーション結果、実験データは共有してよいが、結果のまとめは各自で行うこと。
- 6) レポートの評価は下記とする。レポートの提出から1週間後を目処に成績を表示するため、掲示板を確認すること。

S :	90 点以上	→高い完成度。
OK :	70 点～89 点	→合格点。希望する場合はレポートを提出可能とする。
C :	60 点～69 点	→合格点ではあるが、レポートの再提出を推奨する。
NG :	60 点未満	→必ず再レポートを提出すること。
- 7) 再レポート提出に向けたレポートの受け取りは、成績の表示後から1週間以内とする。

レポートを再提出する場合は、修正前のページを付録の後ろに添付すること。

再レポートの期限を超えた場合には受理しない。

#### 4. 参考文献

- 1) 平紗多賀男：「パワーエレクトロニクス」，共立出版株式会社
- 2) 堀孝正：「パワーエレクトロニクス」，オーム社
- 3) 金東海：「パワースイッチング工学」，オーム社
- 4) 杉本他：「ACサーボシステムの理論と設計の実際」，総合電子出版社