

電気電子工学実験報告書

テーマ名 パワーエレクトロニクス実験

報告者 5 年 (E 組) 番号 234 B 班 柳原魁人

実験場所 エレクトロニクス工房 指導担当 鈴木 宏

共同実験者 石坂知尋, 倉科純太郎, 中井智大, 中澤耕平

実 験 日 令和 7 年 11 月 28 日

提出期限 令和 7 年 12 月 31 日 ⇒ 提出日 令和 7 年 12 月 16 日

(再提出期限 令和 年 月 日 ⇒ 再提出日 令和 年 月 日)

評 価 項 目		評 価
実 習 評 価	(1) 自ら積極的に実験に取り組めた	
	(2) 実験装置を適切に使用でき, 正確に実験を行なえた	
	(3) グループ内で協力的に実験が行なえた	
報告書 評 価	(1) 結果のまとめかた (図表を含む)	
	(2) 結果に対する考察	
	(3) 報告事項/課題 (正しい解答や適切な引用など)	
	(4) 報告書としての体裁が整っているか	

1 目的

インバータを利用した電動機制御技術と、インバータの応用例として電気自動車の動作原理について理解する。さらには、電力の有効活用として回生について学ぶ。

2 原理

3 原理

3.1 三相インバータの基本動作

図 1 に三相インバータの原理図を示す。三相インバータは、直流電源に対して 3 組の単相ハーフブリッジ回路（アーム）を並列に接続し、計 6 個のスイッチング素子（IGBT や MOSFET など）により構成される。各相（u, v, w 相）の上アームおよび下アームのスイッチング素子を、互いに電気角で $2\pi/3\text{rad}$ （ 120° ）の位相差を持って順次オン・オフさせることで、出力端子に三相交流電圧を発生させる [1]。

任意の 2 相間（例えば u-v 間）の線間電圧 v_{uv} は、各相の出力端子の対接地電位をそれぞれ v_u, v_v とすると、次式で表される。

$$v_{uv} = v_u - v_v \quad (1)$$

基本波成分のみに着目すれば、直流電圧をスイッチングすることで、任意の周波数・電圧の交流電力を得ることができる。

3.2 PWM 制御とデッドタイム

本実験装置では、モータのトルクや速度を精密に制御するため、PWM（Pulse Width Modulation：パルス幅変調）制御方式が用いられている。PWM 制御は、正弦波状の信号波（変調波）と、高周波の三角波（搬送波）の振幅を比較し、その大小関係に基づいてスイッチング素子をオン・オフさせる手法である。これにより、出力電圧の平均値が正弦波となるように制御される。

また、同一アームの上下の素子（例えば u 相の上側と下側）が同時にオン状態になると、直流電源が短絡し過大な電流が流れて素子が破壊される。素子のターンオフには時間を要するため、これを防ぐために上下アームの切り替わりの際には、両方の素子がオフとなる期間（デッドタイム）を設ける必要がある。本実験で使用するインテリジェントパワーモジュール（IPM）は、これらの保護回路や駆動回路をスイッチング素子と共にパッケージ化したものである。

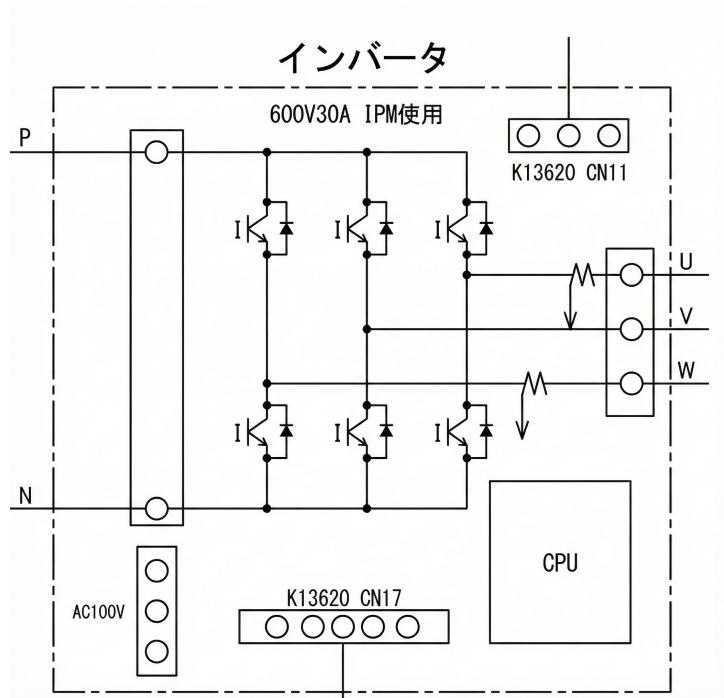


図1 三相インバータの動作原理図

3.3 AC サーボモータ

AC サーボモータは同期電動機に位置付けられ、別名「ブラシレス DC モータ」とも呼ばれている。このモータは回転子（ロータ）が永久磁石、固定子（ステータ）が三相巻線となっている。モータと回転角を検出するレゾルバ（回転角度を二相の交流電圧で検出するセンサ）、電流センサの信号を利用してマイクロコンピュータが回転角に応じた適切な制御を行うため、モータには機械的なブラシが存在しない。

3.4 AC サーボモータの制御

トルク制御とは、モータ電流を制御することによってモータのトルクを制御するもので、電気自動車などの制御に用いられている。本装置ではベクトル制御技術を使ってマイクロコンピュータからPWM信号を発生させて、インバータを動作させている。

速度制御とは、レゾルバを用いてモータの回転速度を測定して、速度設定値と比較してPID制御(Proportional-Integral-Derivative Controller)をすることで速度を制御するもので、これにより電気自動車が快適な走行（クルーズコントロールなどの名称の機能）を行うことができる。

4 使用機器

4.1 エネルギー回生実習装置（主な構成品）

- AC サーボモータ

ワコー技研 ANR020-C308 (200 W, 14.5 A, 2000 rpm, 8 極, レゾルバ付)

- **フライホイール**
昭和電業社 (質量 17.65 kg, 慣性モーメント $0.070\,69\text{ kg}\cdot\text{m}^2$)
- **ブレーキ**
三菱電機 ZHA-20A (トルク 2 Nm, 2000 rpm)
- **電気二重層コンデンサ**
日本ケミコン MDLA15R0V116FB0 ($38.6\text{ F} \times 3 = 115.8\text{ F}$)
- **電源**
昭和電業社 (DC 0 V to 30 V, 10 A, 回生機能内蔵)
- **インバータ**
昭和電業社 (IPM 使用)
- **計測装置**
昭和電業社
- **ブレーキ用電源**
昭和電業社 (DC 24 V, 1 A)
- **トルク検出器**
小野測器 SS-050 (5 Nm, 6000 rpm, トルク表示器と組)

4.2 電気自動車実習装置（主な構成品）

- **AC サーボモータ**
ワコー技研 B751E-D4R (48 V, 750 W, 21 A, 2000 rpm, レゾルバ付)
- **バッテリー**
FIAMM 12SPX42 (12 V, 42 Ah) \times 4 直列

5 実験方法

実験系の概略図および計測系の結線図を図 1 に示す。詳細は取扱説明書に従い、実験を実施した。取得した測定データは保存し、後節に示す図 2, 3, 4 にまとめた。

5.1 AC ブラシレスモータのトルク制御

1. 機器を準備した後、軸継手を用いてモータ、トルク検出器、ブレーキを連結した（図 1 参照）。
2. 電源装置の電圧を 9 V に設定し、計測ソフトウェアの設定数値画面で「制御方法：電流制御（トルク制御）」、「出力変動方法：手動」、「一定制御時間：120 秒」に設定した。「開始」ボタンを押した後、「電流」の数値を変化させることでモータの回転数が変化することを確認した。
3. 電源装置の電圧を 10 V に設定し、計測ソフトウェアの設定数値画面で「制御方法：電流制御（トルク制御）」、「出力変動方法：自動」に設定した。サンプルパターンをロードしてから「開始」ボタンを押し、モータのトルク－回転数特性を測定した。
4. 測定データを保存し、「トルク制御した場合のトルク－回転数特性」を作成した（図 3 参照）。

5.2 AC ブラシレスモータの速度制御

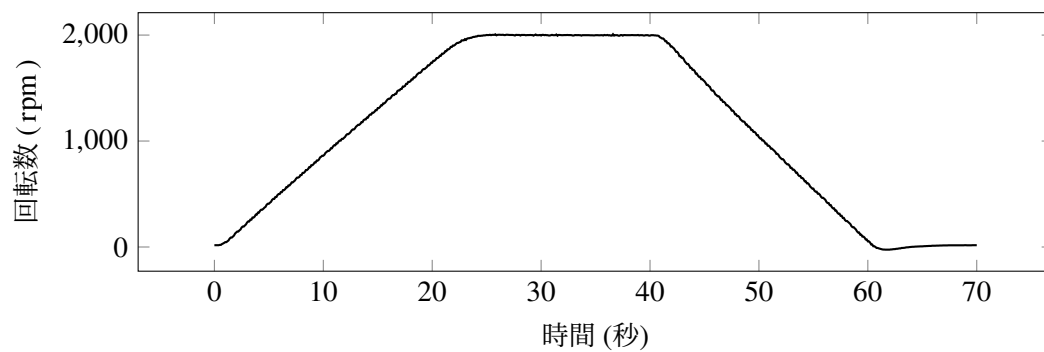
1. 電源装置の電圧を 15 V に設定し、計測ソフトウェアの設定数値画面で「制御方法：速度制御」，「出力変動方法：手動」，「一定制御時間：120 秒」に設定した。「開始」ボタンを押した後，「速度」の数値を変化させることでモータの回転数が変化することを確認した。また，回転させているときに「ブレーキ電流」の数値を変化させることでモータの回転数が変化することを確認した。
2. 電源装置の電圧を 15 V に設定し、計測ソフトウェアを「制御方法：速度制御」，「出力変動方法：自動」に設定した。サンプルパターンをロードして「開始」ボタンを押し，モータのトルク－回転数特性を測定した。
3. 測定データを保存し，「速度制御した場合のトルク－回転数特性」を作成した。「トルク制御した場合のトルク－回転数特性」と「速度制御した場合のトルク－回転数特性」を重ねたグラフを作成して比較検討した（図 3, 4 参照）。

5.3 AC ブラシレスモータの回生実験

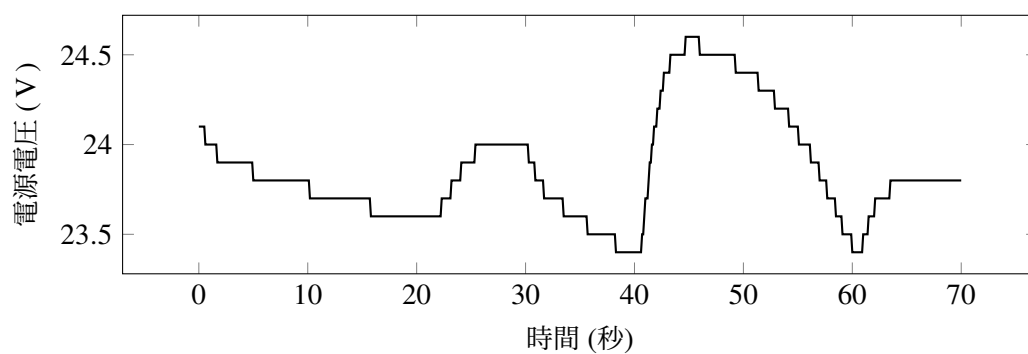
1. 機器を準備した後，軸継手を用いてモータとフライホイールを連結した（図 1 参照）。
2. 電源装置の電圧を 24 V に設定し，計測ソフトウェアの設定数値画面で「制御方法：速度制御」，「出力変動方法：加減速」，「加速時間：20 秒」，「一定制御時間：20 秒」，「減速時間：20 秒」，「停止後計測時間：10 秒」，「速度の設定：2000rpm」に設定した（出力パターンが台形になっていることを確認した）。「開始」ボタンを押し，測定開始後 20 秒間で 2000 rpm に達していることを確認した。
3. 測定開始してから 30 秒（2000 rpm 一定速度で回転している状態）経過した段階で電源装置の出力スイッチを OFF にした。
4. 測定開始してから 40 秒後に減速を開始し，60 秒後にモータが停止した。このとき，モータはフライホイールの慣性力により発電動作を行い，インバータを経由して電気二重層コンデンサに回生エネルギーとして戻された。
5. 測定開始してから 70 秒経過後に測定データを保存し，「回転数－時間特性」，「電源電力－時間特性」，「インバータ出力電力－時間特性」，「電源電圧－時間特性」を作成した。「インバータ出力電力－時間特性」，「電源電圧－時間特性」から回生動作時のエネルギーの流れについて検討した（図 2 参照）。

6 実験結果

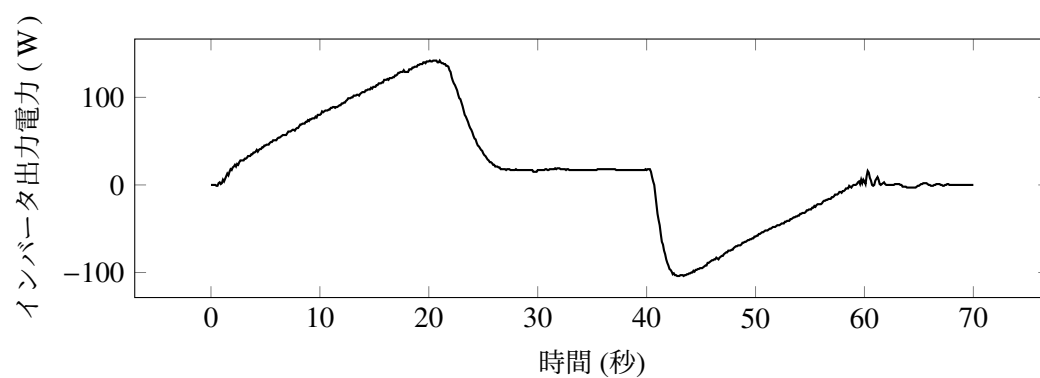
6.1 回生実験の結果



(a) 回転数 - 時間特性



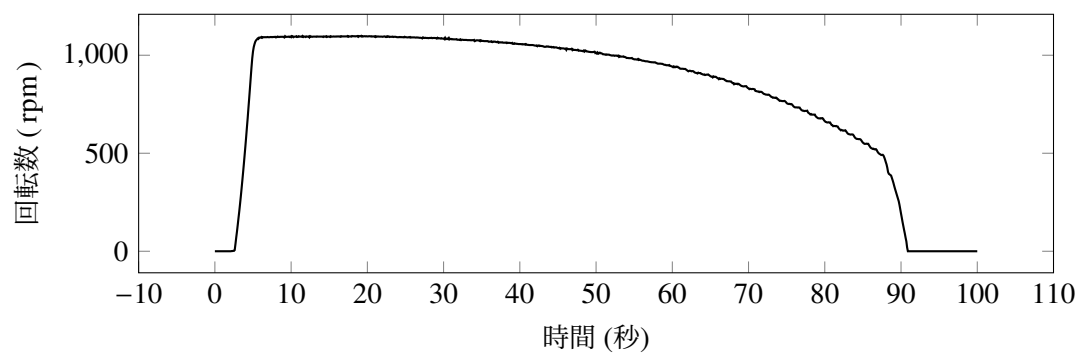
(b) 電源電圧 - 時間特性



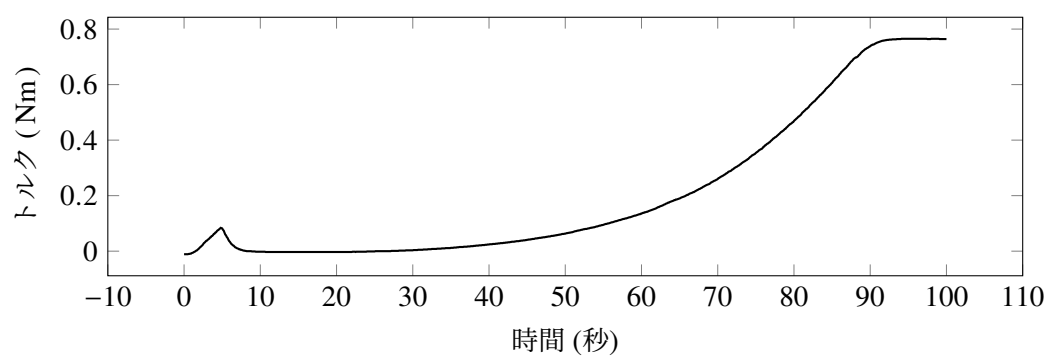
(c) インバータ出力電力 - 時間特性

図 2 回生実験の測定結果

6.2 電流制御実験の結果



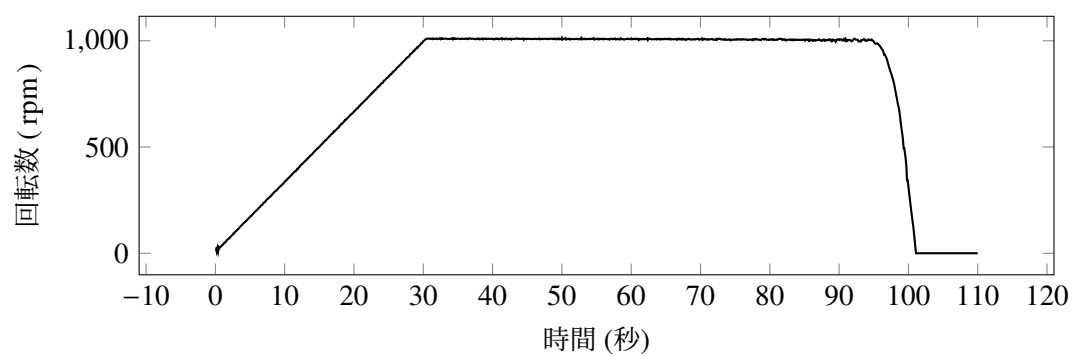
(a) 回転数-時間特性



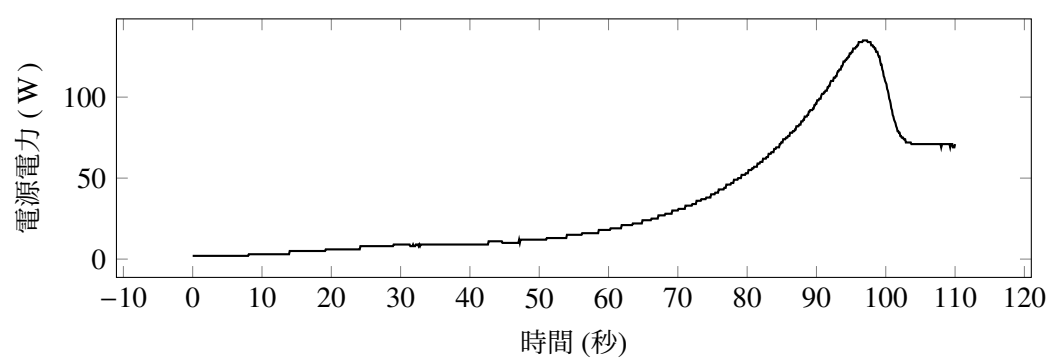
(b) トルク-時間特性

図 3 電流制御の測定結果

6.3 速度制御実験の結果



(a) 回転数 - 時間特性



(b) 電源電力 - 時間特性

図 4 速度制御の測定結果

7 報告事項

(1) 回生実験において得られた「電源電圧－時間特性」から、減速開始時の電圧の変化量を求め、理論値と比較して、なぜ値が異なるのか検討せよ。

コンデンサの電圧の理論値は以下の式より $V_1 = 25.61 \text{ V}$ となり、コンデンサの初期電圧 (=電源電圧) V_0 と比較して 1.61 V 増加することになる。

ここで、各変数は以下の通りである。

- m : 質量 [kg]
- D : 直径 [m]
- J : 慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
- ω : 回転速度 [rad/s]
- C : 静電容量 [F]
- V_0 : コンデンサの初期電圧 [V]

フライホイールの慣性モーメント I :

$$I = \frac{1}{8}mD^2 = \frac{1}{8} \times 17.65 \times 0.179^2 = 0.07069 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (2)$$

フライホイールの運動エネルギー E :

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2} \times 0.07069 \times \left(\frac{2000}{60} \times 2\pi\right)^2 = 1549.8 [\text{J}] \quad (3)$$

コンデンサの蓄積エネルギー E (100% 回生された場合) :

$$E = \frac{1}{2}C(V_1^2 - V_0^2) = \frac{1}{2} \times 38.6 \times (V_1^2 - 24^2) = 1549.8 [\text{J}] \quad (4)$$

(1) 電圧上昇量の理論値と実測値の比較検討

まず、フライホイールの運動エネルギーがすべてコンデンサに回生されたと仮定した場合の理論的な電圧上昇量を算出する。実験に使用したフライホイールおよびコンデンサの定数は以下の通りである。

- フライホイールの質量 m : 17.65 kg
- フライホイールの直径 D : 0.179 m
- コンデンサの静電容量 C : 38.6 F
- コンデンサの初期電圧 V_0 : 24.0 V
- 回転速度 N : 2000 rpm ($\omega = 209.44 \text{ rad/s}$)

フライホイールの慣性モーメント J および運動エネルギー E は次式で与えられる。

$$J = \frac{1}{8}mD^2 = \frac{1}{8} \times 17.65 \times 0.179^2 \approx 0.07069 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (5)$$

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2} \times 0.07069 \times \left(\frac{2000}{60} \times 2\pi\right)^2 \approx 1549.8 [\text{J}] \quad (6)$$

このエネルギーが損失なく電圧上昇に寄与したとすると、到達電圧 V_1 はエネルギー保存則 $\frac{1}{2}C(V_1^2 - V_0^2) = E$ より、以下のように求められる。

$$V_1 = \sqrt{\frac{2E}{C} + V_0^2} = \sqrt{\frac{2 \times 1549.8}{38.6} + 24.0^2} \approx 25.61 \text{ [V]} \quad (7)$$

したがって、理論上の電圧上昇量 ΔV_{theory} は次式となる。

$$\Delta V_{\text{theory}} = 25.61 - 24.0 = 1.61 \text{ [V]} \quad (8)$$

次に、実験結果（図 2 (b)）より実測値を読み取る。測定データより、回生ブレーキが作動し始めた時刻 $t \approx 41.0 \text{ s}$ 付近の電圧は $V_{\text{start}} \approx 23.7 \text{ V}$ であった。その後、電圧は上昇し、時刻 $t \approx 44.7 \text{ s}$ において最大電圧 $V_{\text{max}} \approx 24.6 \text{ V}$ を記録した。よって、実測による電圧上昇量 ΔV_{exp} は以下の通りである。

$$\Delta V_{\text{exp}} = 24.6 - 23.7 = 0.9 \text{ [V]} \quad (9)$$

考察

理論値 $\Delta V_{\text{theory}} = 1.61 \text{ V}$ に対し、実測値 $\Delta V_{\text{exp}} = 0.9 \text{ V}$ となり、実験値の方が低い結果となった。また、実測値から算出される実際にコンデンサに蓄えられたエネルギー E_{exp} は約 840 J であり、回生効率 (E_{exp}/E) は約 54% と見積もられる。この差異が生じた主要因として、以下のエネルギー損失が挙げられる。

1. **機械的損失:** フライホイールおよびモータ回転軸における軸受摩擦や空気抵抗により、運動エネルギーの一部が熱として散逸した。
2. **電氣的損失 (銅損):** モータ巻線および回路配線には抵抗成分が存在するため、回生電流が流れる際にジュール熱 ($I^2 R$) が発生した。
3. **電力変換損失:** インバータ内部のパワー半導体 (IPM) におけるスイッチング損失およびオン抵抗による導通損失が発生した。
4. **制御電力:** インバータ制御回路やセンサ類自体が電力を消費しているため、回生エネルギーの一部が相殺された。

以上のことから、運動エネルギーの全てを電気エネルギーとして回収することはできず、系全体の効率に応じた電圧上昇に留まったと結論付けられる。

8 参考文献

参考文献

- [1] 江間 敏, 高橋 勲. パワーエレクトロニクス (改訂版), 第 18 版, コロナ社, 2023 年 1 月 10 日, pp. 121–124, 133–140.