

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

2.1 三相インバータ

図 1 に三相インバータの動作原理図を示した。インテリジェントパワーモジュール（IPM、三相 600V、30A、6 素子内蔵）とマイクロコンピュータ（ルネサスエレクトロニクス、SH2 7085）とを組み合わせ、三相交流を発生する。三相インバータの出力は AC サーボモータ（ブラシレス DC モータ、同期電動機的一种）に接続され、速度制御などが行われる。

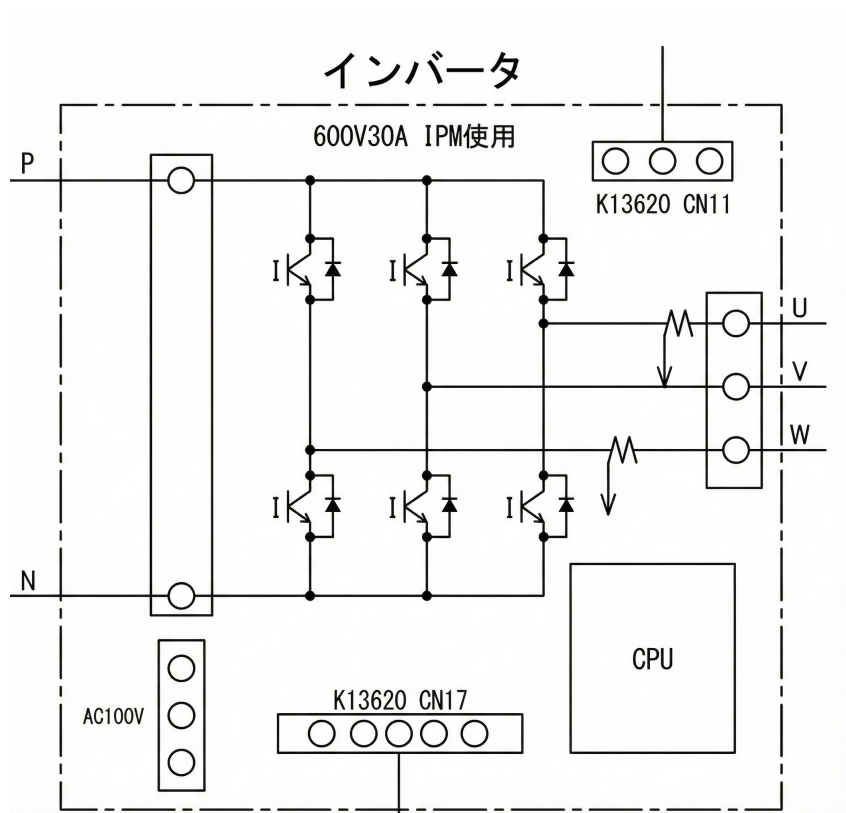


図 1 三相インバータの動作原理図

3 実験方法

詳細は取扱説明書（昭和電業社作成）にしたがって実験を行います。

3.1 AC ブラシレスモータのトルク制御

1. 電源装置の電圧を 10V に設定した後に、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」に設定して、サンプルパターンをロードしてから「開始」ボタンを押してモータのトルク－回転数特性を測定する。
2. 「トルク制御した場合のトルク－回転数特性」を作成する。

3.2 AC ブラシレスモータの速度制御

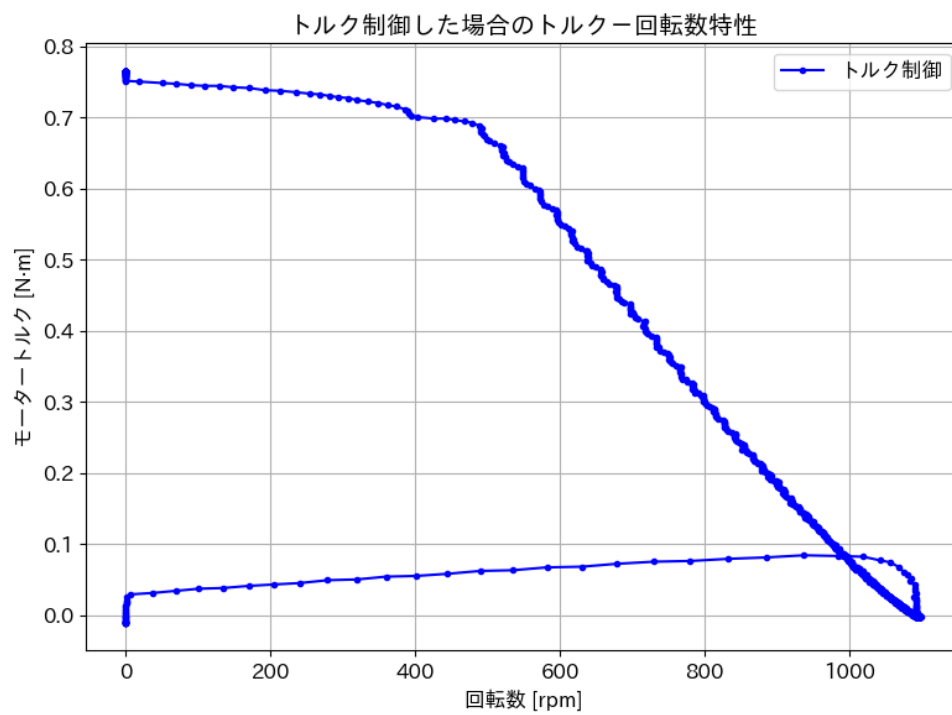
1. 電源装置の電圧を 15V に設定した後に、計測ソフトウェアの設定数値画面で「制御方法：速度制御」, 「出力変動方法：自動」に設定して、サンプルパターンをロードしてから「開始」ボタンを押してモータのトルク－回転数特性を測定する。
2. 「速度制御した場合のトルク－回転数特性」を作成する。「トルク制御した場合のトルク－回転数特性」と「速度制御した場合のトルク－回転数特性」とを重ねたグラフを作成して、比較検討を行う。

3.3 AC ブラシレスモータの回生実験

1. 電源装置の電圧を 24V に設定して、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」に設定して（出力パターンが台形になっていることを確認）, 「開始」ボタンを押す。測定開始後 20 秒間で 2000rpm に達していることを確認する。
2. 測定開始してから 30 秒（2000rpm 一定速度で回転している状態）経過したら電源装置の出力スイッチを OFF にする。
3. 測定開始してから 40 秒後から減速を開始して、60 秒後にモータが停止する。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る。
4. 「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」を作成する。「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する。

4 実験結果

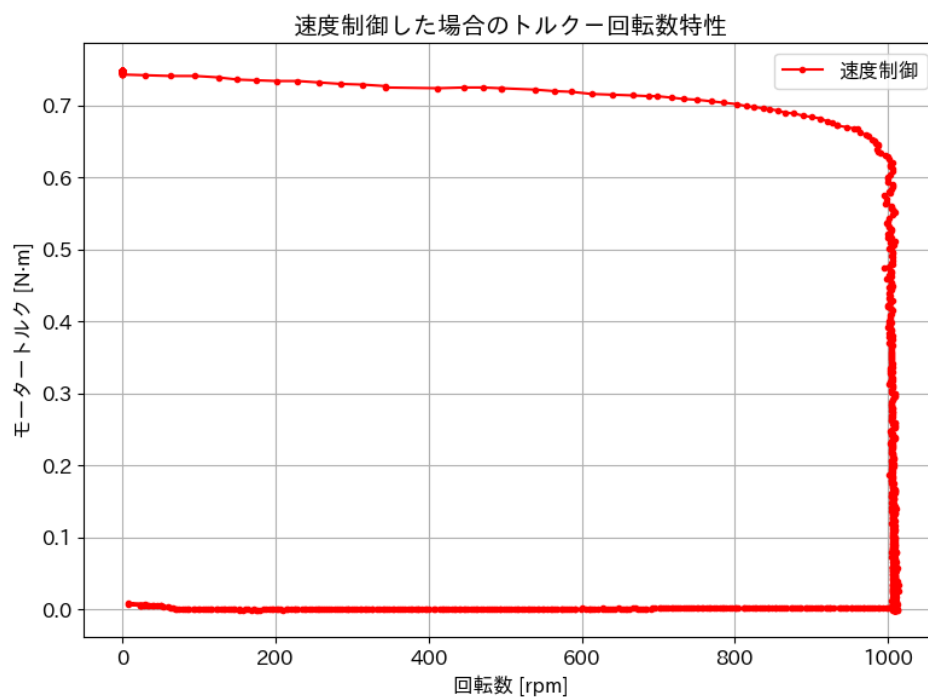
4.1 電流制御実験の結果



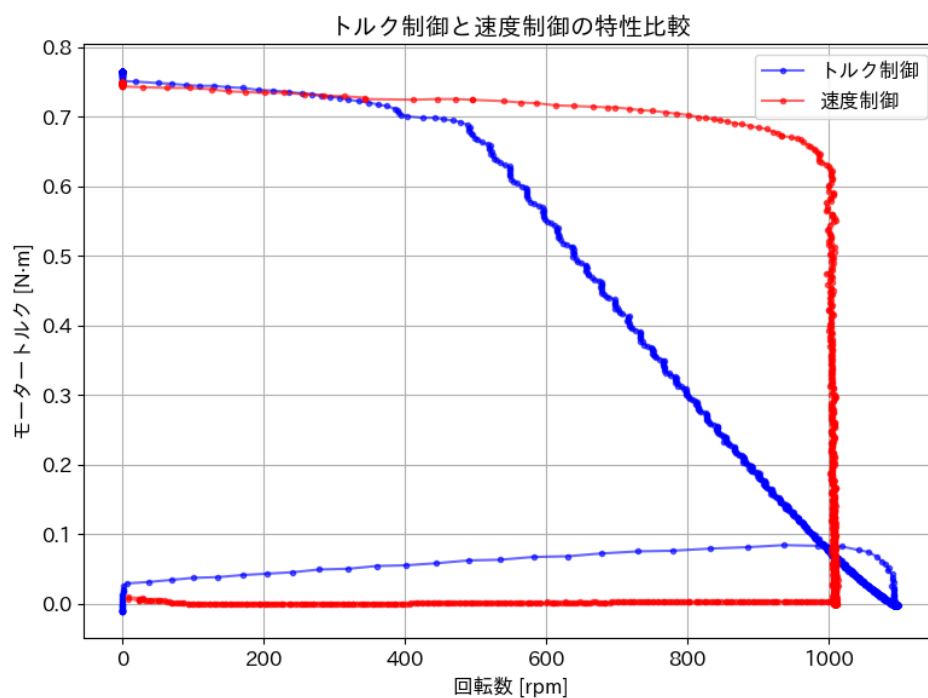
(a) トルク－回転数特性（電流制御）

図 2 電流制御の測定結果

4.2 速度制御実験の結果



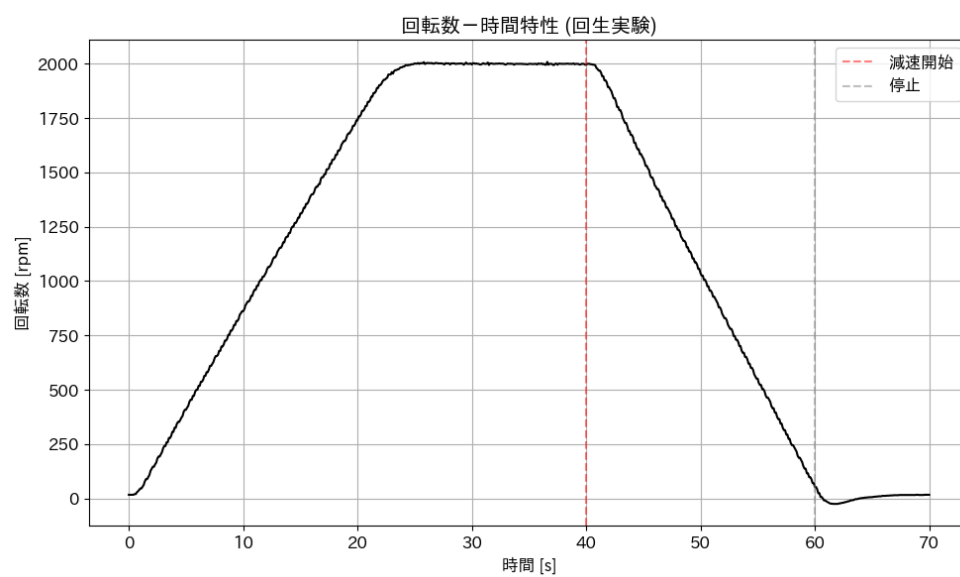
(a) トルク-回転数特性 (速度制御)



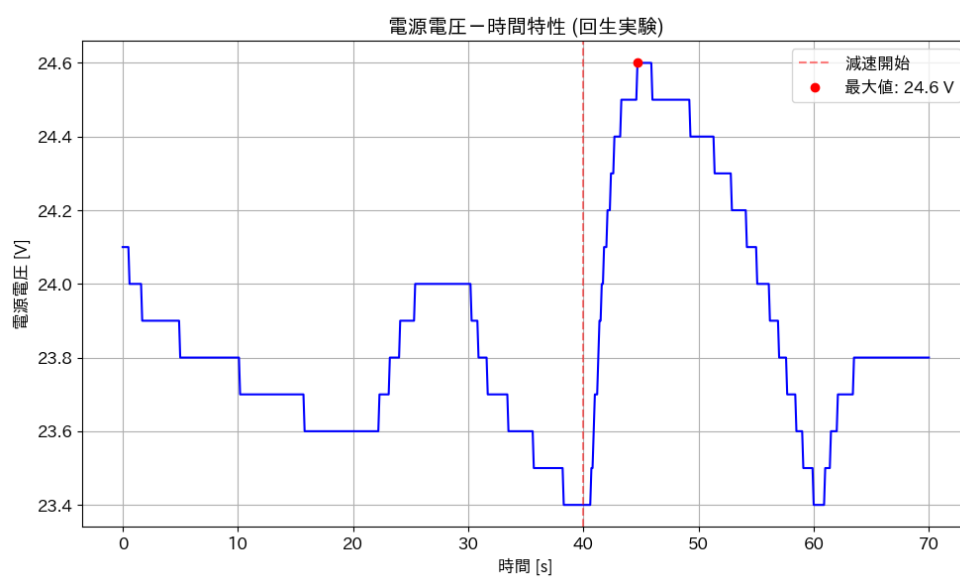
(b) トルク制御と速度制御の比較

図 3 速度制御の測定結果

4.3 回生実験の結果

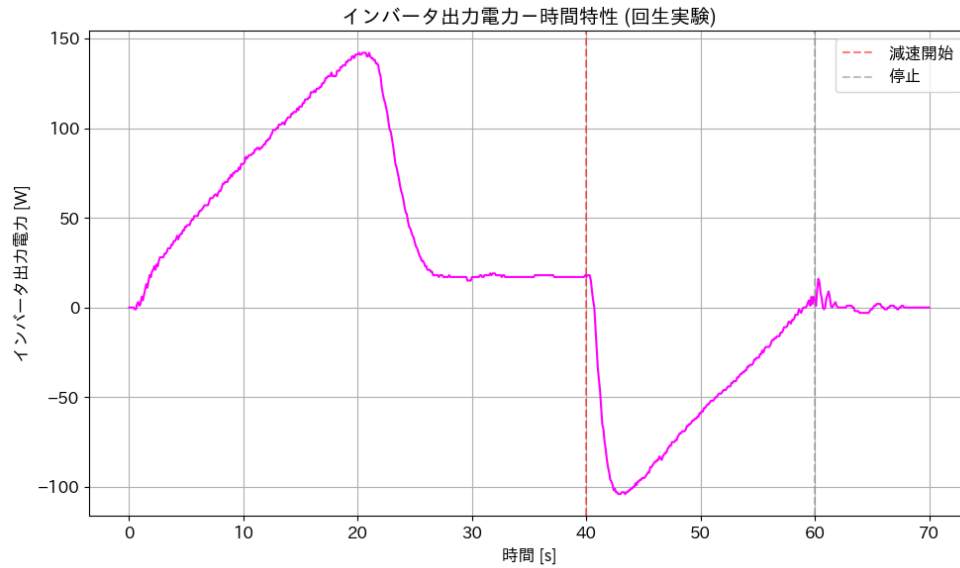


(a) 回転数-時間特性

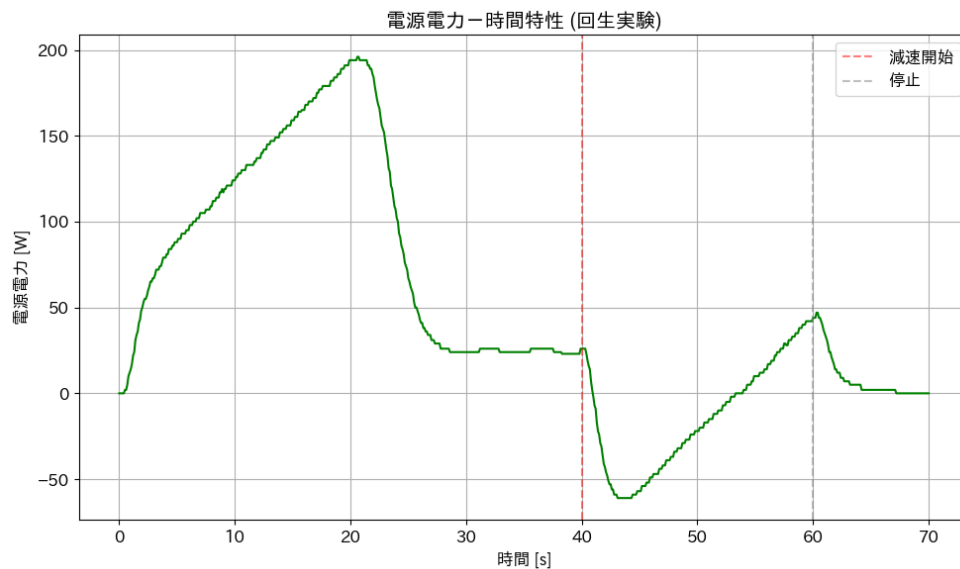


(b) 電源電圧-時間特性

図4 回生実験の測定結果 (1/2)



(a) インバータ出力電力-時間特性



(b) 電源電力-時間特性

図 5 回生実験の測定結果 (2/2)

5 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 $V_1 = 25 \cdot 61V$ となり、コンデンサの初期電圧 (= 電源電圧) V_0 と比較して $1 \cdot 61V$ 増加することになる。

【理論値計算の参考】

フライホイールの慣性モーメント：

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

フライホイールの運動エネルギー：

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

コンデンサの蓄積エネルギー（100% 変換と仮定）：

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2}C(V_1^2 - V_0^2) \\ &= \frac{1}{2} \times 38.6 \times (V_1^2 - 24^2) = 1549.8 \text{ J} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、

- 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]

【解答】

1. 実測値の導出

回生実験の結果（図 4）より、減速開始直前（ $t = 40\text{s}$ 付近）の電源電圧 V_0 および、減速動作中に観測された最大電圧 V_1 は以下の通りである。

- 減速開始直前電圧： $V_0 = 23.40\text{V}$
- 最大到達電圧： $V_1 = 24.60\text{V}$

したがって、実測による電圧の変化量 ΔV_{exp} は次のように求められる。

$$\Delta V_{\text{exp}} = V_1 - V_0 = 24.60 - 23.40 = 1.20\text{V} \quad (4)$$

2. 理論値との比較

課題で与えられた理論値 $\Delta V_{\text{th}} = 1.61\text{V}$ と実測値 $\Delta V_{\text{exp}} = 1.20\text{V}$ を比較すると、実測値のほうが 0.41V 小さい値となった。これは理論値に対して約 25% の減少に相当する。

3. 誤差要因の検討

理論計算式では、フライホイールの運動エネルギー E が損失なく 100% コンデンサの静電エネルギーに変換されると仮定している（エネルギー保存則）。しかし、実際の実験系ではエネルギー変換および伝送の過程で複数の損失が発生する。これら損失により、コンデンサに回収されるエネルギーが減少し、電圧上昇量が理論値よりも小さくなったと考えられる。具体的な損失要因を以下に挙げる。

(1) モータ内部における損失

- **機械損:** 減速時においてもロータは回転しているため、軸受の摩擦やフライホイールの空気抵抗（風損）によって運動エネルギーの一部が熱として消費される。これは発電機としての入力エネルギーそのものを減少させる要因となる。
- **鉄損:** モータコア内の磁束変化により、ヒステリシス損および渦電流損が発生する。これらは回転数（周波数）に依存してエネルギーを消費する。
- **銅損:** 発電された回生電流がモータの巻線を通る際、巻線抵抗 R_{motor} によりジュール熱 ($P_{\text{cu}} = 3R_{\text{motor}}I^2$) が発生し、電力が消費される。

(2) インバータおよび回路における損失

- **パワーデバイスの損失:** インバータを構成するスイッチング素子（IGBT 等）や還流ダイオードにおいて以下の損失が発生する。
 - **オン損失（導通損失）:** 素子に電流が流れる際のオン電圧 ($V_{\text{CE(sat)}}$ や V_F) による電力損失。
 - **スイッチング損失:** 素子がオン・オフする遷移期間における電圧・電流の重なりによる電力損失。
- **配線の損失:** モータからインバータ、およびインバータからコンデンサまでの配線抵抗によるジュール熱損失。
- **コンデンサの内部損失:** 電気二重層コンデンサの等価直列抵抗（ESR）に回生電流が流れることで電力損失が発生する。

以上の要因により、フライホイールが持っていた運動エネルギーの一部は熱エネルギーとして散逸し、最終的にコンデンサに蓄積されたエネルギーは理論値よりも小さくなったと結論付けられる。