

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)とを組み合わせて、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、同期電動機の一種)に接続され、速度制御などが行われる。

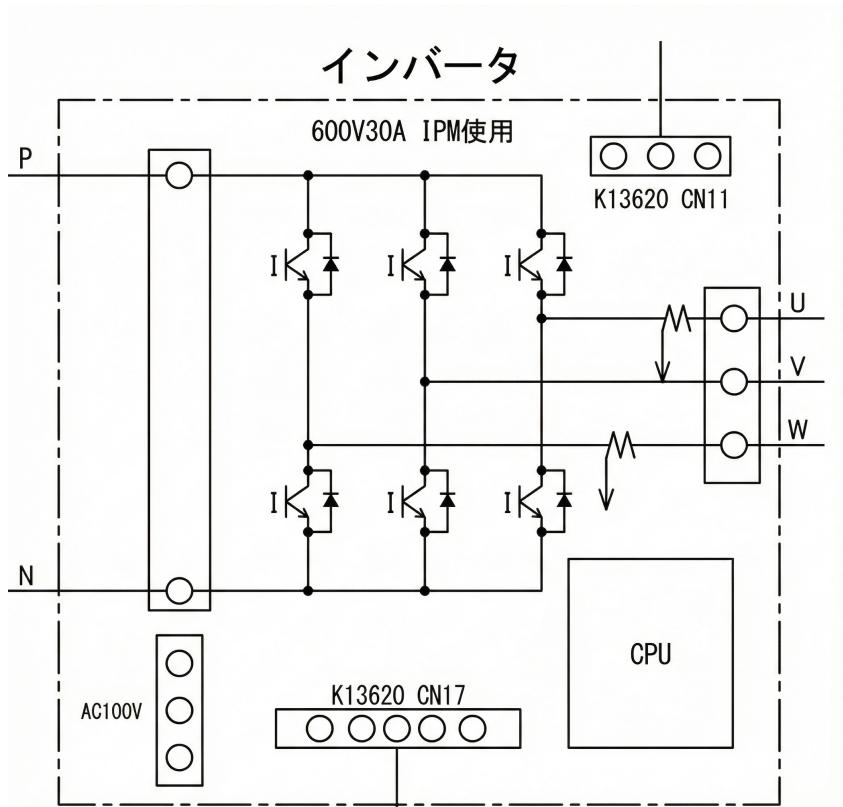


図1 三相インバータの動作原理図

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

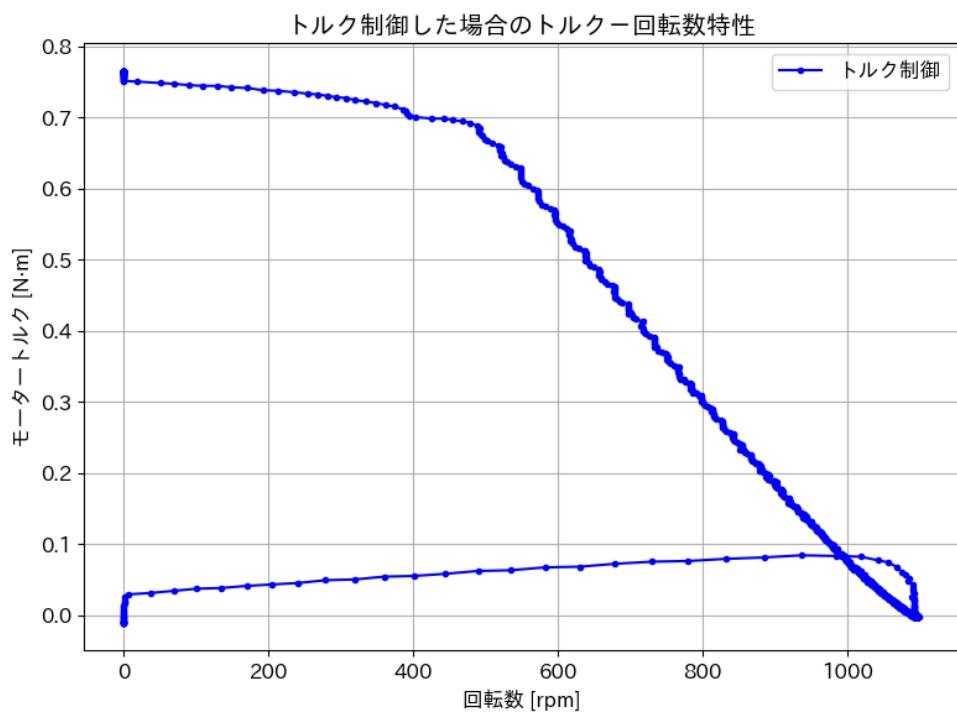
1. 電源装置の電圧を 15V に設定した後に、計測ソフトウェアの設定数値画面で「制御方法：速度制御」、「出力変動方法：自動」に設定して、サンプルパターンをロードしてから「開始」ボタンを押してモータのトルク－回転数特性を測定する。
2. 「速度制御した場合のトルク－回転数特性」を作成する。「トルク制御した場合のトルク－回転数特性」と「速度制御した場合のトルク－回転数特性」とを重ねたグラフを作成して、比較検討を行う。

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

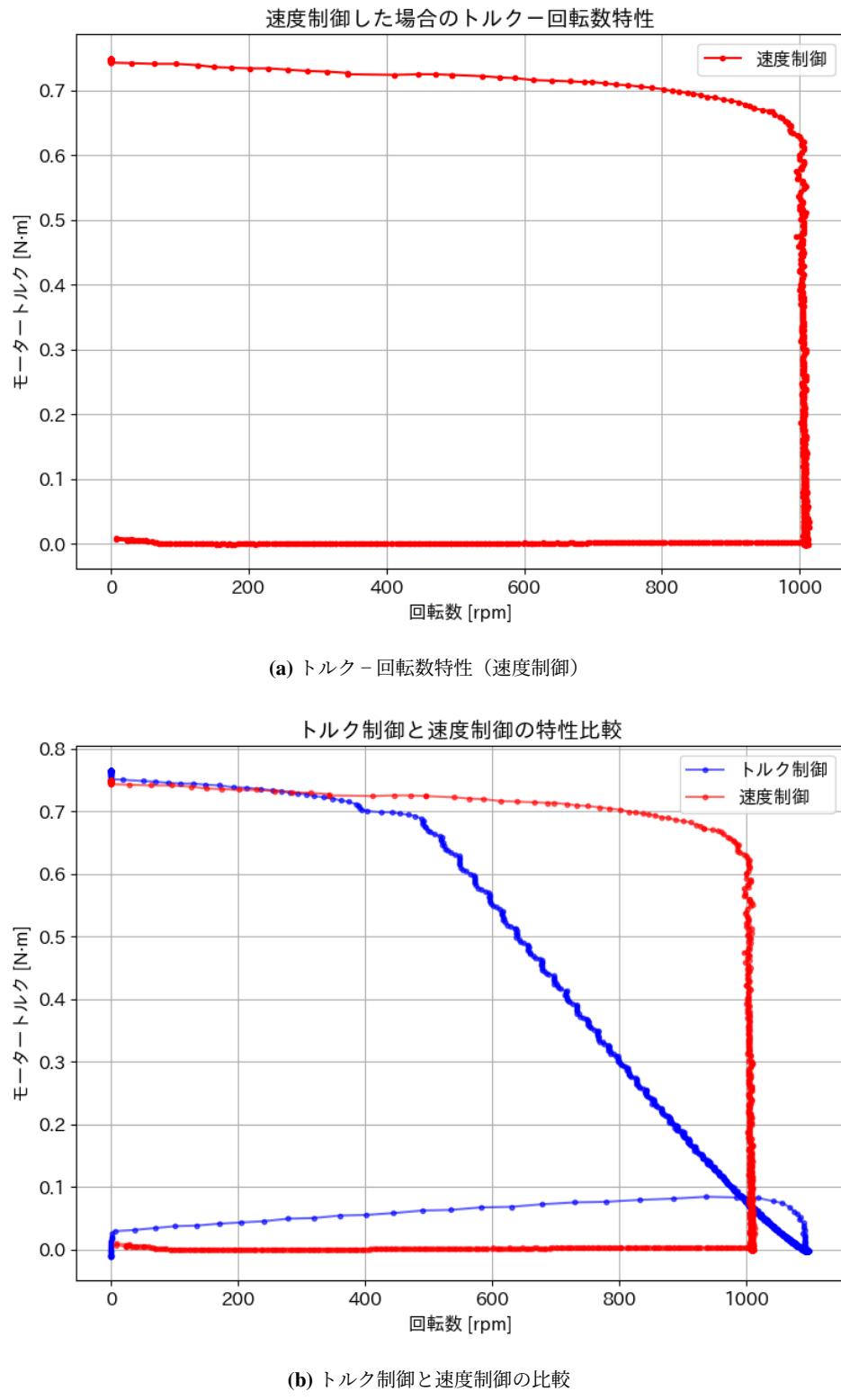


図3 速度制御の測定結果

4.3 回生実験の結果

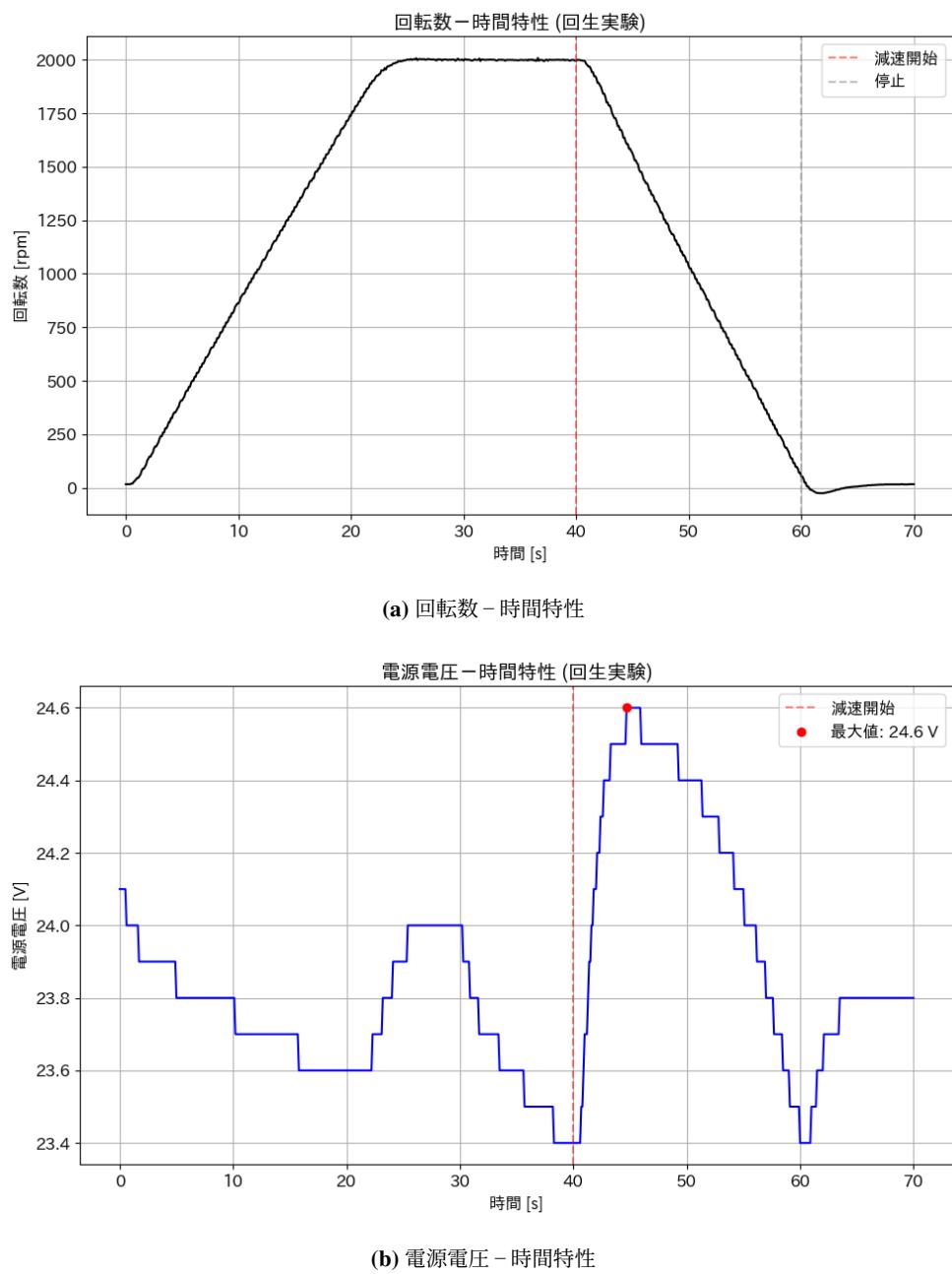


図 4 回生実験の測定結果 (1/2)

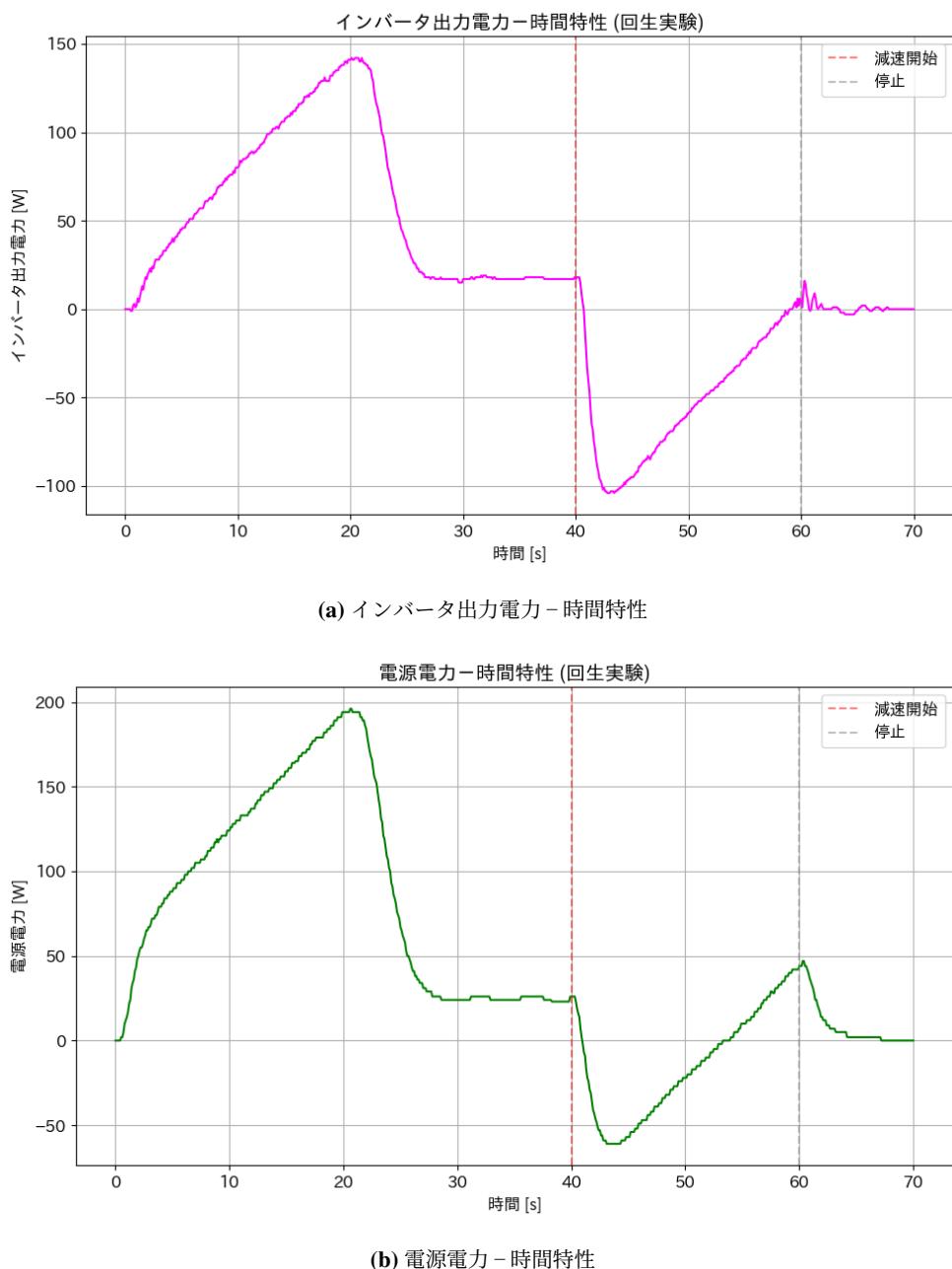


図 5 回生実験の測定結果 (2/2)

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 :

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2} \times 0.07069 \times \left(\frac{2000}{60} \times 2\pi \right)^2 = 1549 \cdot 8J \quad (2)$$

コンデンサの蓄積エネルギー (100% 変換と仮定) :

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2}C(V_1^2 - V_0^2) \\ &= \frac{1}{2} \times 38.6 \times (V_1^2 - 24^2) = 1549 \cdot 8J \end{aligned} \quad (3)$$

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つたと考えられる。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流れる際、巻線抵抗 R_{motor} によりジュール熱 ($P_{cu} = 3R_{motor}I^2$) 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 ($V_{CE(sat)}$ 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つたと結論付けられる。