

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

本実験は、インバータを用いた電動機制御技術と、インバータの応用例である電気自動車の動作原理を理解し、回生動作の意義と挙動を検証することを目的とした。

2 原理

2.1 単相インバータ

直流電力を交流電力に変換する装置をインバータと呼ぶ。単相交流を出力する単相インバータには、回路構成により「单相半ブリッジ形」と「单相ブリッジ形（フルブリッジ形）」がある。

2.1.1 单相半ブリッジインバータ

单相半ブリッジインバータは、最も基本的なインバタ回路構成である。2個の直流電源（それぞれの電圧を E とする）と、トランジスタ等のスイッチング素子2個(T_1, T_2)、およびそれらに逆並列に接続されたダイオード(D_1, D_2)により構成される。

この回路において、スイッチング素子 T_1 と T_2 をデッドタイム（短絡防止期間）を設けて交互にオン・オフさせることで、負荷に対して交流電圧を印加する。動作原理は以下の通りである。

1. T_1 がオン、 T_2 がオフの期間：電源電圧 $+E$ が負荷に印加される。
2. T_2 がオン、 T_1 がオフの期間：電源電圧 $-E$ が負荷に印加される。

このようにして、出力端子には振幅 E の方形波状の電圧が得られる。出力電圧のレベルが $+E$ と $-E$ の2つの値をとることから、この方式は「2レベルインバータ」とも呼ばれる。なお、負荷が誘導性(L成分を含む)の場合、電圧と電流の位相がずれるため、スイッチング素子がオフした瞬間に負荷電流を還流させる経路が必要となる。逆並列に接続されたダイオード(還流ダイオード)はこの電流経路を確保し、素子の破壊を防ぐ役割を担う。

2.1.2 单相ブリッジインバータ

单相ブリッジインバータは、1個の直流電源 E と4個のスイッチング素子(T_1, T_2, T'_1, T'_2)をブリッジ状に結線して構成される。半ブリッジ形と比較して、同一の電源電圧で2倍の出力電圧が得られる特徴がある。また、インバータとして最小単位の構成であり、さらに複雑なインバータを構成する基礎となる。

この回路の基本的な動作（方形波駆動）は以下の通りである。

- 対角にある素子対(T_1 と T'_2)をオンにすると、負荷には電圧 $+E$ が印加される。
- 逆の対角にある素子対(T_2 と T'_1)をオンにすると、負荷には電圧 $-E$ が印加される。

これらを交互に繰り返すことで交流波形を得る。さらに、ブリッジ形インバータでは、素子数の多さを利用した高度な制御が可能である。例えば、上アーム同士(T_1 と T'_1)または下アーム同士(T_2 と T'_2)をオンにすることで、出力電圧を0にすることができる。これにより、出力電圧は $+E, 0, -E$ の3つのレベルをとることが可能となり(3レベルインバータ)，方形波の幅を変化させることで出力電圧の実効値を制御したり、波形を正弦波に近づけたりするPWM(パルス幅変調)制御が容易に行えるようになる(参照:[1])。

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った。

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、計測ソフトウェアで「制御方法：電流制御（トルク制御）」「出力変動方法：自動」と設定した後、サンプルパターンをロードし「開始」ボタンを押して、モータのトルク－回転数特性を測定した。
2. 測定結果より「トルク制御時のトルク－回転数特性」を作成した。

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、計測ソフトウェアで「制御方法：速度制御」「出力変動方法：自動」と設定した後、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。
2. 測定結果より「速度制御時のトルク－回転数特性」を作成し、トルク制御時の特性と重ね合わせて比較検討を行った。

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、計測ソフトウェアで「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」と設定した（出力パターンが台形であることを確認）後、「開始」ボタンを押して実験を開始した。測定開始後 20 秒で 2000rpm に達していることを確認した。
2. 測定開始から 30 秒（2000rpm で一定回転中）経過後に電源装置の出力スイッチを OFF にした。
3. 測定開始から 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、フライホイールの慣性により発電動作が行われ、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が蓄えられた。
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」を作成し、特に「インバータ出力電力」「電源電圧」の時系列から回生動作時のエネルギーの流れについて検討した。

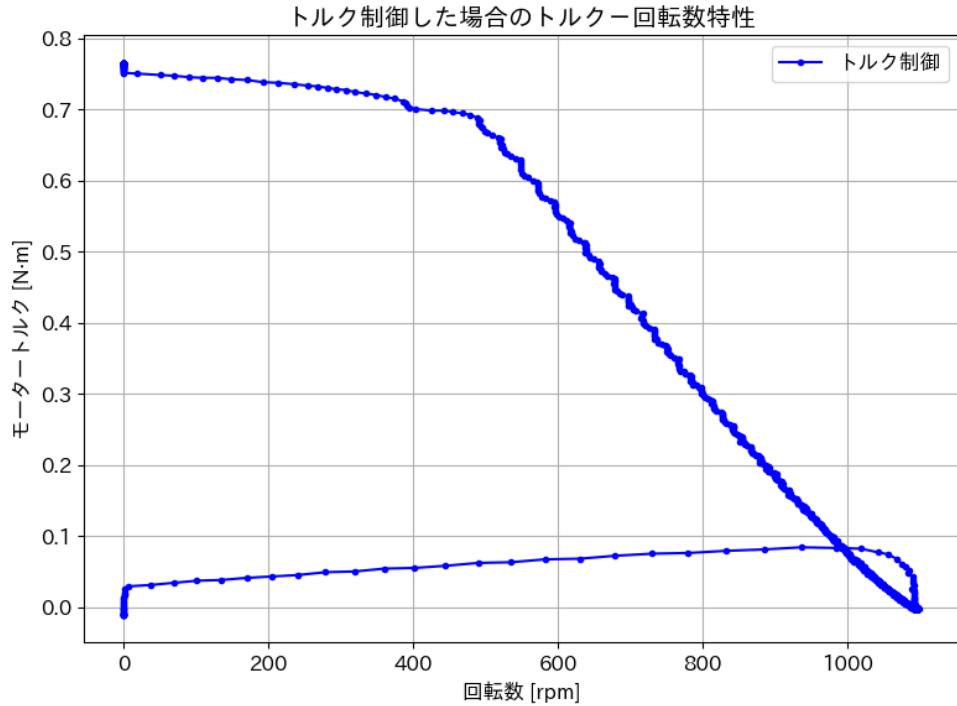
4 使用機器

本実験で使用した主要な装置・計測器は実験室配布資料に準拠するため、本報告書では詳細記載を省略する。

5 実験結果

5.1 電流制御実験の結果

各実験における代表的な測定結果を示す。図を基に、制御方法間での特性差と回生時の挙動について検討した。



(a) トルク - 回転数特性（電流制御）

図 1 電流制御の測定結果

5.2 速度制御実験の結果

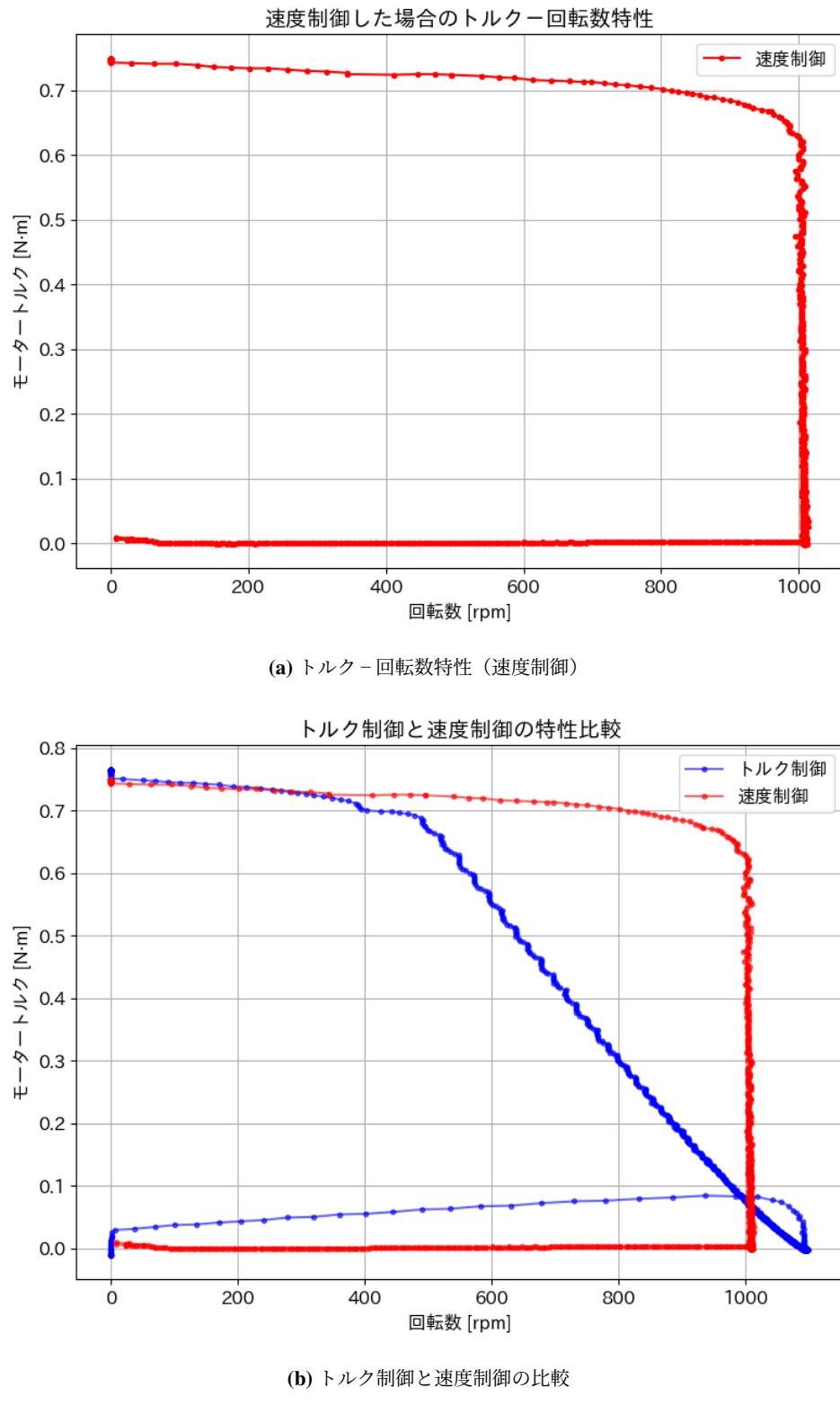


図 2 速度制御の測定結果

5.3 回生実験の結果

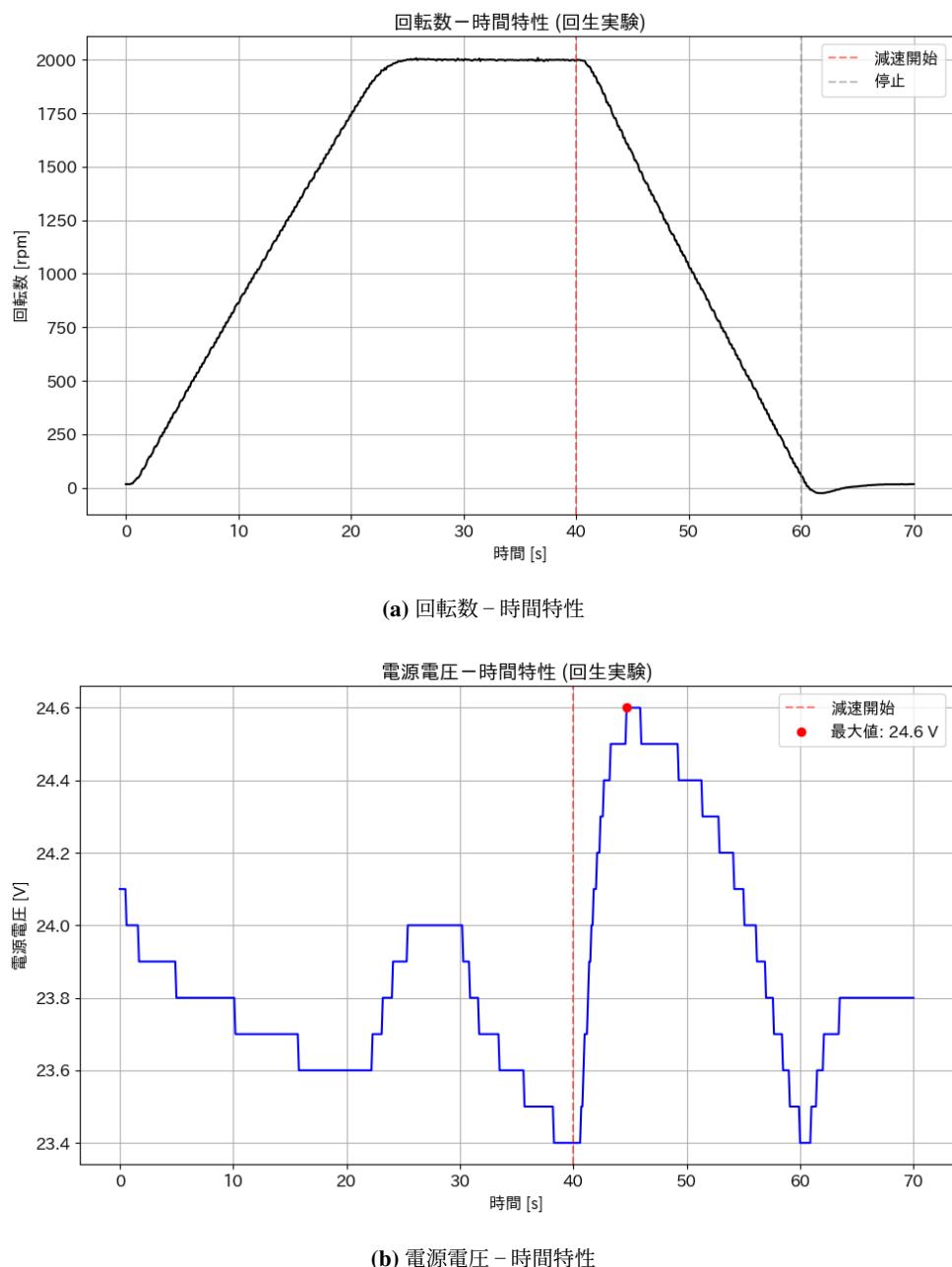


図 3 回生実験の測定結果 (1/2)

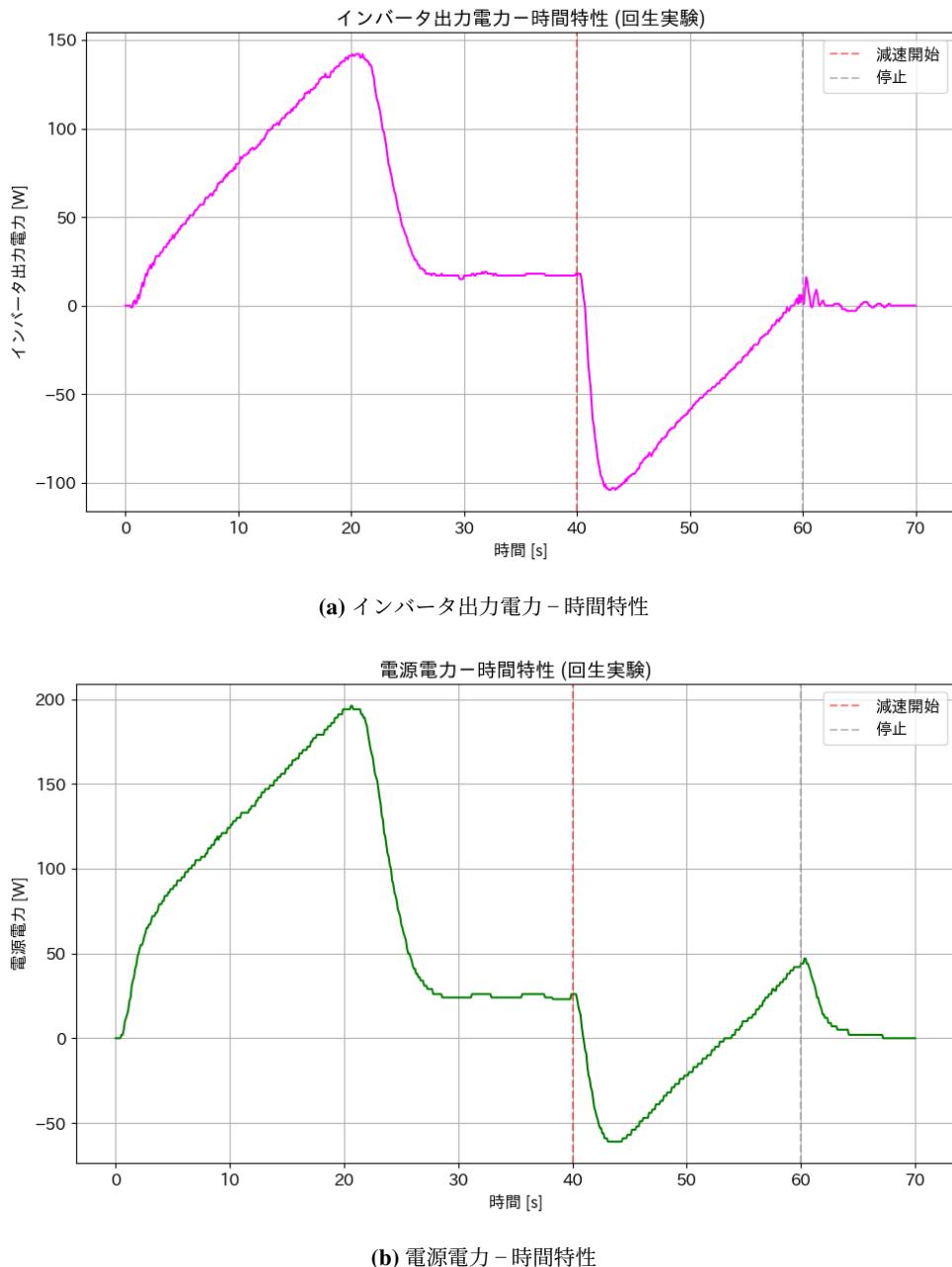


図 4 回生実験の測定結果 (2/2)

6 考察

本実験の結果から、電流（トルク）制御ではトルクが比較的安定して得られた一方、速度制御では回転数の一定性を優先するためトルクに変動が見られた。回生実験に関しては、理論値 (ΔV_{th}) に対して実測値 (ΔV_{exp}) が小さい結果となった。これは機械的損失や電気的損失（配線・素子・コンデンサの ESR 等）が主因であると考えられる（詳細は次節参照）。

7 結論

本実験により、以下が得られた。

1. インバータを用いた電動機制御に関する基本的な動作原理と、電流制御・速度制御の特性差を理解した。
2. 回生実験により、理論計算と実測の差異を確認し、損失要因が回生効率に与える影響を考察した。

8 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：

$$J = \frac{1}{8}mD^2 = \frac{1}{8} \times 17.65 \times 0.179^2 = 0 \cdot 07069 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (1)$$

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 3) 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 ($P_{\text{cu}} = 3R_{\text{motor}}I^2$) 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つたと結論付けられる。

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.