

ブラシレス DC モータを用いた電動車両の制作

Control of Electric Vehicles using Brushless DC Motors

栗 秋 亮 太 *1

Ryota KURIAKI

要約 電動車両 (EV : Electric Vehicle) とは、エンジン・燃料の代わりに電池に蓄えた電気をエネルギー源としてモータにより駆動する車両であり、電気・電子回路工学や電気機器、制御工学などの電気エネルギー制御科で学習した内容を総合的に活用したものづくりができるとの考えから、2016 年より総合制作のテーマとして取り組んでいるものである。本稿では、2018 年度総合制作実習での取り組んだ、ブラシレス DC モータを用いた電動車両の制作についての研究成果について報告する。

1. はじめに

電気エネルギー制御科では、制御工学や電気機器、電気・電子回路などのカリキュラムがあるが、これらを総合的に活用する実習や負荷装置がない。そこで我々は、実習で負荷装置として使用できる制作物を作ること为目标とし、総合制作課題として取り組んだ。図 1 に今回制作した電動バギー (以下、EV とする) の外観を示す。制作初年度の 2016 年度は、筐体の制作およびブラシ付き DC モータ (以下、DCM とする) による運転、モータドライバの制作などを行い、2018 年度では、DC モータからブラシレス DC モータ (以下、BLDC とする) に交換を行った。この制作を通して、以下に示す 4 点について成果を得ることができた。その内容についてまとめる。

- ① 所要動力およびトルク的设计方法
- ② マグネットワイヤの太さ、巻線数の设计方法
- ③ BLDC の制作方法
- ④ 簡易的な負荷試験の方法とその精度

2. 制作する EV の概要

本機は、BLDC およびモータドライバに CQ 出版社の『CQ ブラシレス・モータ&インバータ・キット』を使用し、電動バギーの BLDC 化を行った。使用した BLDC は、アウト・ロータ型 12 極 18 スロットであり、マグネットワイヤを手巻きして制作を行う。モータコイル

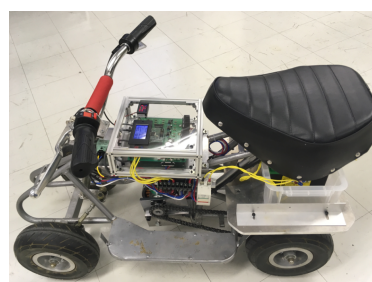


図 1 制作した EV (電動バギー) の外観

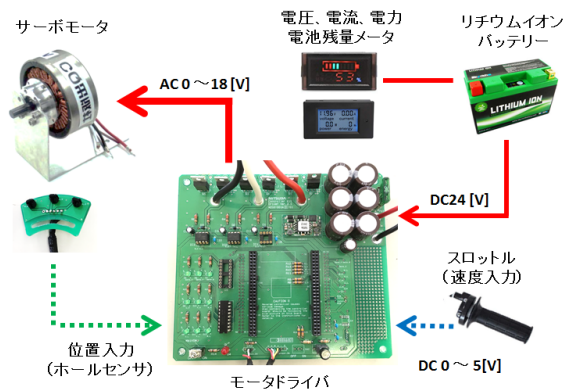


図 2 BLDC のシステム構成イメージ

の巻線数や太さ、結線方法を変更することで、必要となるトルクや回転数に対応したモータを制作することができる。また、モータドライバはキットに付属されているドライバ基盤に各素子を半田付けして制作を行い、制御基板にはルネサス社製 V850 を使用した。

図 2 に BLDC のシステム構成イメージを示す。

*1 電気エネルギー制御科

Department of Electricity energy and control Engineering

3. BLDC の設計・制作

3.1 モータ出力とトルクの設計

BLDC の制作にあたり、必要となるモータの出力およびトルクの設計を行った。走行は屋内で行うものとし、平坦な通路 (勾配 0°) を目標運転速度 $V = 10 \text{ km/h}$ (回転速度: 177 min^{-1}) で運転するものとした。また、目標速度までの加速時間は緩やかに加速を行うものとして 10 秒で設定した。次に、車両の転がり摩擦抵抗および走行時の空気抵抗、加速抵抗を求める。車体重量 W は実測値で約 30 kg であり、操縦者の体重は 70 kg とした。車両の転がり摩擦係数 μ は、車両の引張荷重 / 車体重量で求められ、車両の引張荷重はバネばかりで車両をけん引して車両が動いた際の重量から求める。実測の結果、引張荷重は 0.5 kg であり、 $\mu = 0.017$ と求められた。また、車両の空気抵抗係数 Cd の値は自転車での値を参考に $Cd = 0.9$ とし、空気密度 ρ の値は 15°C での標準大気圧の値で 1.25 kg/m^3 、車体の全影投影面積 A の値は、車両を実測し 0.2 m^2 、機械効率 η は 0.85 とした。

以上の値から、転がり摩擦抵抗および走行時の空気抵抗、加速抵抗を求めると次の値となった。

- ① 転がり摩擦抵抗 $R_r [\text{N}] = \mu \cdot W = 16.33$
- ② 空気抵抗 $R_a [\text{N}] = \frac{1}{2} \cdot Cd \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 = 0.868$
- ③ 加速抵抗 $R_v [\text{N}] = (W + W_r) \times \alpha / g = 13.89$

上記の計算結果より、全走行抵抗 $R_{all} [\text{N}] = 31.09$ であり、この値から必要となる所要動力およびトルクの値を以下のように求められた。

- ④ 所要動力 $P_{all} [\text{W}] = R_{all} \cdot V / \eta = \boxed{101.6}$
- ⑤ トルク $\tau_{all} [\text{N} \cdot \text{m}] = R_{all} \cdot D / 2 / \eta = \boxed{5.49}$

3.2 簡易巻線設計法によるモータ設計

3.1 で求めた所要動力およびトルクを満たす BLDC の設計を「簡易巻線設計法」を用いて行う。簡易巻線設計法は、標準仕様 (6 直 20T) の BLDC のパラメータを求め、この値を基準として BLDC の巻線数や太さなどの設計を行う手法である。表 1 に標準巻線仕様様のモータのパラメータを示す。なお、設計に使用した標準仕様様のパラメータは、職業能力開発総合大学校で実施された技能・技術実践研修「ブラシレス DC モータの設計・制作技術」の値を参考としている。

- ① 目標速度 $V : 10 [\text{km/h}] \Rightarrow$ タイヤ回転速度換算値 $N : 177 [\text{min}^{-1}]$
- ② 加速度 $\alpha : 0.139 [\text{m/s}^2]$
- ③ 総重量 $M : 100 [\text{kg}]$
- ④ 転がり摩擦係数 $\mu : 0.017$
- ⑤ 全投影面積 : $0.2 [\text{m}^2]$
- ⑥ 機械効率 $\eta : 0.85$
- ⑦ スプロケット比 : $1 \sim 3$

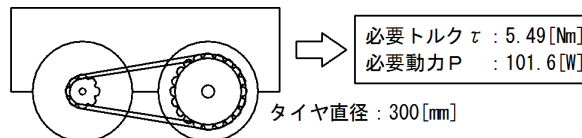


図 3 所要動力およびトルクの算出結果

表 1 標準仕様 (6 直 20T) の BLDC のパラメータ

a_0	並列回路数	1
n_0	コイルの巻回数 [回]	20
d_0	コイルの線径 [mm]	1.0
r_0	コイルの抵抗 [Ω]	0.448
r_{inv}	インバータの等価抵抗 [Ω]	0.382
R	2 端子間全抵抗 [Ω] = $r_0 + r_{inv}$	0.448
KE_0	誘導起電力定数 [V/min^{-1}]	0.0256
$K\tau_0$	トルク定数 [$\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$]	0.215

(1) 仕様の決定

① 定格出力 $P_n [\text{W}]$ の決定

使用する BLDC の標準の定格出力 P_n は 60 W である。モータの出力はモータ体格でほぼ決まるため、出力を大きくしすぎるとコイルが巻ききれなくなるなど、物理的な要因により製作が難しくなる。そこで、本設計では出力の最大値を 120 W とし、この範囲内で設計を行うものとした。今回の制作では、「標準仕様」のものとして「3.1 で求めた仕様のもの (以下、「設計仕様」とする)」を制作する。「標準仕様」は 60 W、「設計仕様」のものは所要動力に近い値の 100 W とした。

② 定格回転数 $N_n [\text{min}^{-1}]$ の決定

定格回転数 N_n は、使用するスプロケットの比を考慮して選定を行った。スプロケット比は 1 ~ 3 の範囲で選択可能であるため、回転速度は最大で 180 min^{-1} 程度で選定すれば負荷に応じて柔軟に対応できると考えた。今回の制作では、「標準仕様」は 910 min^{-1} 、「設計仕様」は 550 min^{-1} とした。

③ 定格トルク $\tau_n [\text{N} \cdot \text{m}]$ の決定

定格トルク τ_n は、定格出力 P_n と定格回転数 N_n から、次式により決定した (式 1)。

$$\tau_n = \frac{60P_n}{2\pi N_n} \quad \dots \text{(式1)}$$

式1より、それぞれのトルクを求めると、「標準仕様」は $0.630 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、「設計仕様」は $1.763 \text{ N}\cdot\text{m}$ となり、スプロケット比の選定により、所要トルクにも対応できると考えた。

(2) 簡易巻線設計

① 巻線回数の決定

定格電流 I_n は、バッテリーの容量およびインバータの最大出力に考慮して選定した。今回使用したインバータのFETの定格は 10 A であるため、「標準仕様」は 3 A 、「設計仕様」は 6 A とした。

② トルク定数 K_τ の決定

トルク定数 K_τ は、極数 p 、磁束 ϕ 、導体数 z に比例し、並列回路数 a に反比例する。ここで、導体数 z は、コイルの巻回数 n に比例するため、トルク定数 K_τ は、標準仕様の巻回数 n_0 、並列回路数 a_0 、トルク定数 K_{τ_0} を用いて求められる (式2)。

$$K_\tau = \left(\frac{n}{n_0} / \frac{a}{a_0}\right) \times K_{\tau_0} \quad \dots \text{(式2)}$$

計算の結果、トルク定数 K_τ は「標準仕様」では 0.215 、「設計仕様」では 0.269 とした。

③ コイルの巻回数の設計

式2を変形すると、コイルの巻回数 n [T] は次式で求められる (式3)。

$$n = \frac{aK_\tau}{a_0K_{\tau_0}} \times n_0 \quad \dots \text{(式3)}$$

計算の結果、「標準仕様」は 20T 、「設計仕様」は 25T となった。

④ 線径 d の決定

コイル線径 d は、コイルの抵抗値および占積率に影響する。設計時ではマグネットワイヤが 1.0 mm のものしかなかったため、これを利用した。線径 1.0 mm の最大皮膜外径を D [mm] とすると、スロット内の全コイルの断面積 $n\pi D^2/2$ がスロットの断面積 A_s を占める率 (コイルの占積率) f_c [%] は、次式4で求めることができる (式4)。

$$f_c = \frac{n\pi D^2/2}{2A_s} \times 100[\%] \quad \dots \text{(式4)}$$

計算の結果、「標準仕様」は 30.3% 、「設計仕様」は 37.8% となり、制作上問題のない値であることが確認

できた。

表2 設計したBLDCの各パラメータ

設計項目	標準仕様	設計仕様
電源電圧 V_n [V]	24	24
定格出力 P_n [W]	60	100
定格回転速度 N_n [min^{-1}]	910	600
定格トルク τ [$\text{N}\cdot\text{m}$]	0.630	1.6
定格電流 I_n [A]	3.0	6.0
巻線数 n [T]	20T	25T
線径 d [mm]	1.0	1.0
電流密度 Δ	2.55	6.37
占積率 [%]	30.3	37.8

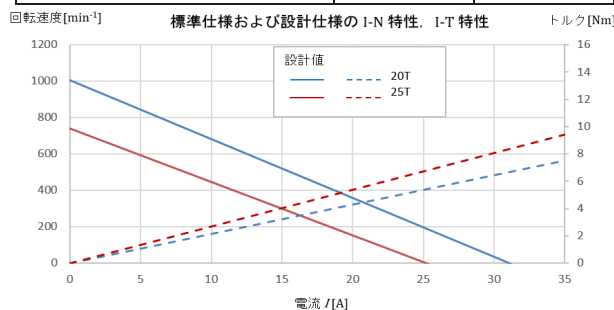


図4 設計したBLDCのI-N特性およびT-I特性

⑤ 定格電圧 V_n の妥当性の確認

2端子間の全抵抗 R を求め、設定した定格電圧 V_n の妥当性を確認した。コイルの抵抗は、巻回数 n に比例し、並列回路数 a 、線径 d の2乗に反比例するため、2端子間の全抵抗 R は、試作モータの巻回数 n_0 、並列回路数 a_0 、線径 d_0 、抵抗 r_0 から次式で求められる (式5)。なお、インバータの等価抵抗 r_{inv} は簡単化のため、一定値 ($r_{inv} = r_{inv0}$) として取り扱った。

$$R = \left(\frac{n/n_0}{(a/a_0)^2 \times (d/d_0)}\right) r_0 + r_{inv} \quad \dots \text{(式5)}$$

式5の計算の結果、「標準仕様」は 0.830Ω 、「設計仕様」は 0.942Ω となった。

次に、定格電圧 V_n は、定格電流 I_n 、定格回転数 N_n における電圧のため、次式で求められる (式6)。

$$V_n = RI_n + K_E N_n \quad \dots \text{(式6)}$$

計算の結果、「標準仕様」、「設計仕様」ともにほぼ 24.0 V と求められた。

以上の設計した「標準仕様」および「設計仕様」の各パラメータおよびI-N特性、I-T特性を表2および図4

に示す。

3.4 BLDCの制作および評価

BLDC の評価には自作した簡易トルク測定装置を使用した。図5に制作した簡易トルク測定実験装置の概要を示す。まず、基準となる標準仕様のBLDCを制作し、その速度およびトルク特性の評価を行った。測定はBLDCのシャフトにロータを接続し、アーム板で上下から挟み込んで蝶ナットで固定する。蝶ナットにより締め付けた際の摩擦により発生する重量を計測しトルクに換算した。図6に「標準仕様」のBLDCの設計値と実測値のI-N特性およびI-T特性の比較を示す。測定は無負荷状態から10Aまでの範囲で行った。標準仕様の値は、事前に測定した基準の特性と近似しており、精度は高いとは言えないものの、簡易的な測定方法としては十分活用可能なものであることが確認できた。次に、「設計仕様」のBLDCの測定結果を図7に示す。こちらにも、ほぼ設計値と実測値が同じであり、設計通りのBLDCを制作することができた。

4. BLDCの搭載および走行試験

EVに制作したBLDCを搭載し走行試験を行った。標準仕様のBLDCは、モータのトルク不足により過負荷となり、遮断器が動作して運転が停止した。その際にバッテリーの過負荷による影響から出力電圧が大きく低下することが確認された。

次に、BLDCを設計仕様のもので変更し、その他に以下の改良を行って再度走行試験を行った。

- ① 電源をリチウムイオンバッテリーに変更
- ② ホールセンサ取付位置の調整
- ③ 機械的損失の低減

以上の改善を行った結果、定常運転時において電流8A、タイヤ回転速度は 180 min^{-1} ($\approx 10 \text{ km/h}$)であり、ほぼ目標値を達成し、かつ、安定した速度での運転を行うことができた。電源をリチウムイオンバッテリーに変更することにより出力電圧の安定化、車体重量の軽量化を行うことができ、さらに、車体のゆがみやチェーンの張り、ベアリングの交換、タイヤ空気圧の調整などの機械分野の整備を行ったところ、大きな改善を行うことができた。これらの改善点において、特に機械的な損失が与える影響は大きく、機械分野の調整の重要性を再確認した。

5. まとめ

本制作を通して、BLDCの設計、制作、評価の一貫し

た知見を得ることができた。特に、制作したBLDCの評価において、高額な試験装置を使用せず簡易的で

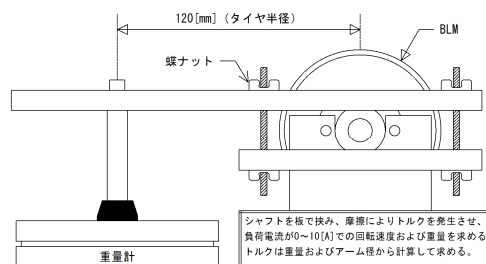


図5 簡易トルク測定実験装置の概要

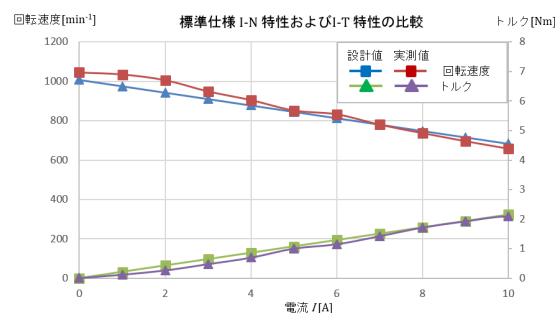


図6 標準仕様の設計値と実測値のI-N、I-T特性比較

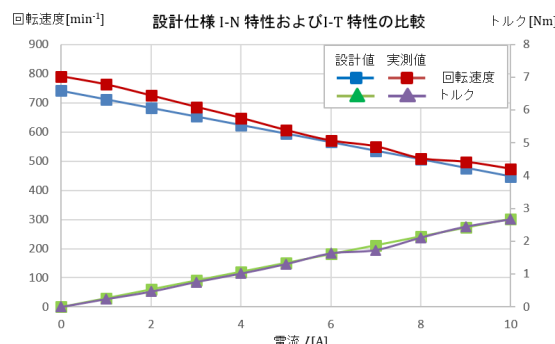


図7 設計仕様の設計値と実測値のI-N、I-T特性比較

実用的な試験が行える装置を自作できたことは大きな成果であったと考える。しかし、モータドライバや制御プログラムに関して評価用のものを流用したため、より効率の良い高機能な制御を行うにはこれらの改良が必要であると考え、今後はこれらについての課題について引き続き取り組むところである。

参考文献

- 1) 山本 修, 平原 英明, 技能・技術実践研修「ブラシレスDCモータの設計・製作技術」
- 2) モータから手作り!フルクラフトEVカート (トラ技エレキ工房 No.3) トラ技エレキ工房編集部 CQ出版_2014
- 3) MOTOR エレクトロニクス No.1 トランジスタ技術編集部 CQ出版_2015