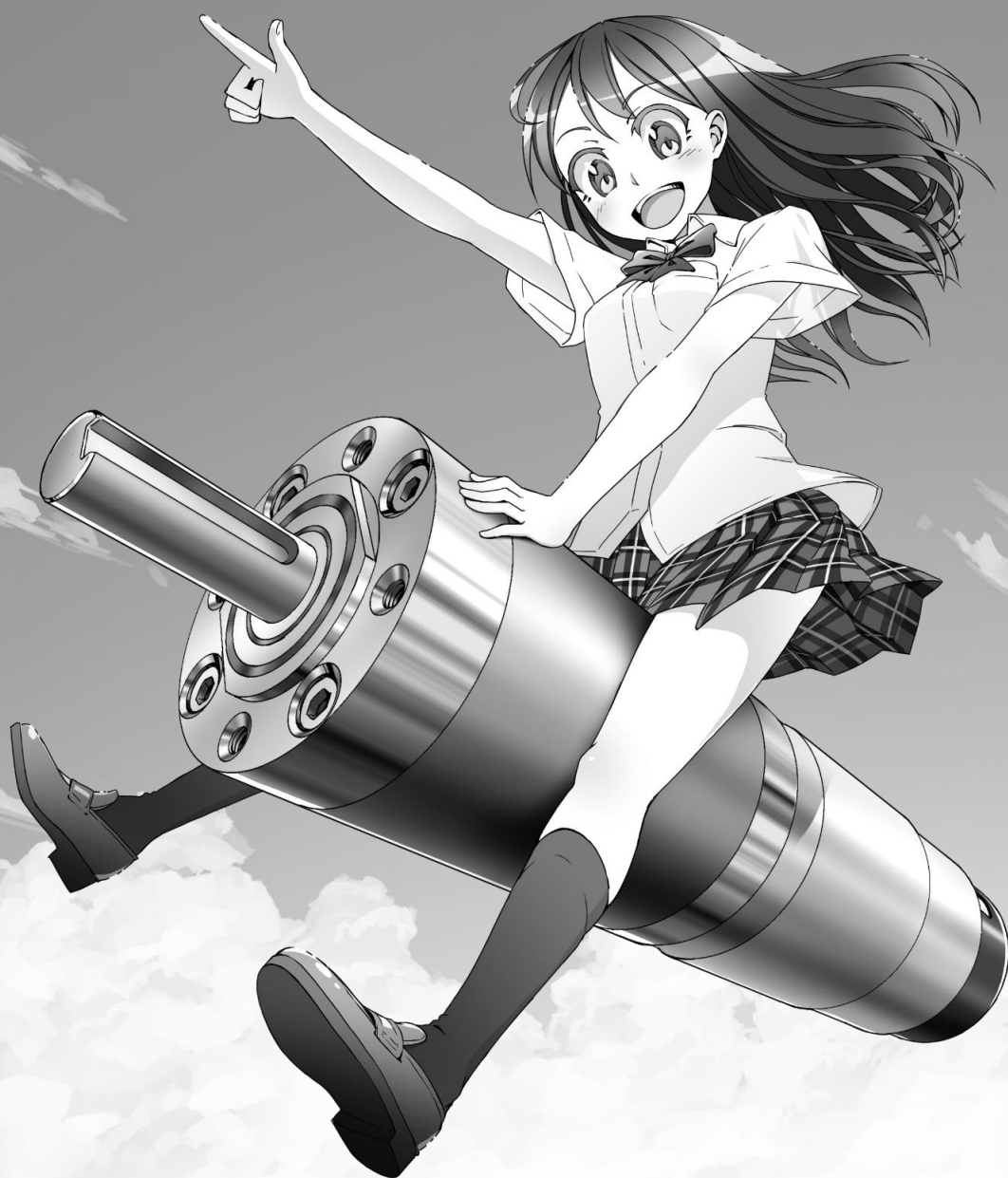


# モータドライバの つくりかた

—Vol.1 DC モータのまわしかた—

STRV



# もくじ

もくじ.....	1
1. DC モータドライバをつくる!! .....	3
1.1. この本の目的 .....	3
1.2. モータドライバって? .....	3
1.3. なんでモータドライバを作るの? .....	5
2. DC モータの使い方 .....	6
2.1. DC モータの動作原理.....	6
2.2. 電気回路と力学の確認.....	8
2.2.1. インダクタンス(コイル) .....	8
2.2.2. キャパシタンス(コンデンサ) .....	9
2.2.3. 運動の回転系.....	9
2.3. DC モータの基本的な性質 .....	9
2.3.1. トルク特性 .....	10
2.3.2. 回転数特性 .....	10
2.3.3. トルクー回転数特性.....	11
2.3.4. 逆起電力定数の求め方 .....	12

2.4. DC モータのその他の性質 .....	13
2.5. DC モータを電子部品として「見る」 .....	13
3. PWM でモータを回す .....	18
3.1. PWM の基本 .....	18
3.2. PWM 周波数の決め方 .....	18
3.3. PWM をモータにかけてみる .....	19
3.4. 逆起電力も考えた場合 .....	22
3.5. PWM 周波数の注意 .....	23
4. PWM の作り方 .....	25
4.1. スイッチング回路 .....	25
4.2. フライバックダイオード .....	25
4.3. PWM の種類 .....	27
4.3.1. ON-BRAKE(同期整流)方式 .....	27
4.3.2. ON-FREE (ダイオード整流)方式 .....	28
4.3.3. Locked Anti-Phase 方式 .....	29
4.4. 回生にご注意 .....	29
5. あとがき .....	34

# 1. DC モータドライバをつくる!!

## 1.1. この本の目的

みなさまどうも，strv です．今回は DC モータドライバについての本です．楽しく動くロボットを作ろうと思うと，必ず何かしらのアクチュエータが必要となります．アクチュエータは，油圧やら空圧やらエンジンやらいろいろとありますが，やはり電動モータが一番よく利用されています．その中でも，DC(直流)モータは構造も簡単で，制御も簡単なことから多くの用途で利用されています．

DC モータを回そうと思ったら，それこそ電池に直結するだけでも回る簡単さですが，何かしらの制御をしようと思ったら，モータドライバが必要になります．このモータドライバが厄介者で，多くの人が苦労したことがあるのではないかと思います．この本は，そんなモータドライバを設計する人に向けて，モータドライバを作るために必要な情報をまとめていくつもりです．ただ，楽しくモータを回せるモータドライバを作るためには，知っておきたい知識が多くあります．そこで第一弾として，この本ではまずはモータの動かし方から説明を初めていきたいと思ひます．

## 1.2. モータドライバって？

さて，モータドライバについての本であることは書きました．では，モータドライバとはなんでしょう．そもそもなんでモータドライバが必要なのでしょう．

モータドライバが必要となるのは，「モータを電子的に制御したい」ときです．タミヤの工作キットのように，人間がモータを操作したいだけなら，物理的なスイッチを切り替えるだけでモータを動かすことができます．ですが，そこから発展し，リモコンのジョイスティックの傾きに比例した速度を出したい，負荷が変わっても一定の速度が出るようにしたい，決まった位置に動かしたい，といった制御をしたくなると，物理的なスイッチ切り替えでは実現が難しくなり，電子的にモータを操作することになります．ところがモータが必要とする電力は，マイコンや

ロジック IC, オペアンプなどが消費・出力できる電力よりも遥かに大きいため, そのような小信号回路で操作可能な「パワー回路」が必要となります. このパワー回路部のことを指して「モータドライバ」ということが多いです. ラジコン業界では, ラジコン用モータドライバのことを「ESC(Electrical Speed Controller)」や「アンプ」, 「スピコン」と表現することが多いです.

おそらく, 世の中の的に一番よくモータドライバとして認識されているのは, ワンチップのモータドライバ IC だと思われます. 例えば東芝の TA7291 なんかはいろいろな書籍でも紹介されている有名なモータドライバ IC です. この IC が持っている機能は

- ▶ ロジック入力信号に応じて内蔵のパワー回路を操作する
- ▶ パワー回路の保護

という単純なものですが, 前述の通りロジック回路からモータを制御可能にするキーデバイスです. ですが, あくまでも物理スイッチを電子スイッチに変えただけの存在であり, これだけではモータを楽しく制御することはできません. 例えば, 一定の回転数でモータを回したいのであれば, モータの回転数を測るセンサの値を使って, モータの回し方を変えなければなりません. そのモータの回し方を変える役目が「制御回路」です. この部分だけを指して「モータコントローラ」と呼ばれることがあります.

パワー回路だけではモータを制御できず, また, 制御回路だけではモータを回すことはできません. そこで, もう一つの考えとして, これらを合わせたものを指して「モータドライバ」という場合があります. この本が対象とするモータドライバは, この定義のモータドライバになります. また, 後述する DC サーボモータ(≠ラジコン用サーボモータ)を制御するための回路(ユニット)を特別に「サーボコントローラ」や「サーボアンプ」として販売している例も多くあります. この場合, サーボコントローラはモータドライバだといえます. また, DC モータでは少ないですが, 例えば PC 用のファンモータ制御用の IC なんかは, ワンチップで制御とパワー回路まで内蔵しているものもあります.

### 1.3. なんでモータドライバを作るの？

モータドライバはワンチップ IC のものもある，メーカーが販売しているものもあると，と書きました．ではなぜ自作するのか，という事になりますが，趣味の世界なので一番に「作ってみたいから」があると思います．次に「自分の望む仕様のものがないから」が出てくるかと思います．モータドライバは回路単体で動くものではなく，モータと組み合わせて，そしてモータは何かしらのメカと組み合わせて使うものです．そうすると，メカの仕様からモータが決まり，モータの仕様からモータドライバの電氣的仕様が決定します．さらにメカからモータドライバの設置可能な場所などの機械的仕様も決まってきます．そうなった場合に市販品では対応できず，自作することが多くなります．

また，例えば車輪で走るロボットの場合，特に左右の車輪の回転数差で回るような(戦車とかセグウェイ的なのとか)タイプの場合，両輪の回転数を同期して制御すると，より細かい動きを実現したり，ロボットの位置を推定するオドメトリの計算が正確になったりという利点が考えられます．一つの制御回路で二つのパワー回路を制御すれば，そのような仕組みが簡単に作ることができます．更に言うと，IMU(慣性センサ(ジャイロ・加速度センサ))と統合することで，より良いオドメトリを得られます．このような特殊な希望を満たすような製品は当然売られていないため，自作する必要が出てきます．

## 2. DC モータの使い方

### 2.1. DC モータの動作原理

この本が対象とするのは「モータドライバ」だと宣言しました。その中でも、DC モータを回すためのモータドライバが主題です。そこでまずは DC モータの構造についておさらいすることにしましょう。

図 2-1 は、最も一般的な模型用永久磁石型 DC モータの構成です。図はモータをシャフトの方向から見たものとなります。実際のモータを分解したようすを図 2-2 に示します。モータは、界磁(モータ内部の磁界)を作るための磁石と、回転するコイルと、電流の向きを切り替えるブラシとコミュテータが最低限の構成要素となります。コミュテータはモータの シャフトに固定された電極で、コイルごとに用意されています。ブラシがコミュテータに触れることで回転しているコイルに電流を流すことができます。交流モータではブラシ・コミュテータが無いものが多いことから、DC モータのことをブラシモータ、ブラシ付きモータなどと呼ぶことも多いです。また、モータの中の回転する部分全体をさしてロータと一般的に呼ばれ、回らない部分をステータと呼ぶことが多いです。

図 2-3 の状態から電流を流すと、界磁と、電流がコイルに流れてできた磁界とが反発・吸着し合うことでコイルが回ります。スタートから 90 度回った図 2-4 のところでコイルは落ち着くはずですが、その前にブラシがコミュテータの境目をまたぐため電流の流れるコイルが変わり、当初左下だったコイルの極性が反転し、それまでと同じ方向にコイルは回り続けます。なお、ブラシがコミュテータの境目をまたぐときに、どちらとも接触するか、どちらとも接触しなくなるか、についてはモータに依存します。ですが、ブラシにカーボンのブロックを使っているようなモータの場合は、かなりの範囲でコミュテータとブラシが接触するため、どちらとも接触する構造になるのが基本です。また、このような構造になっているため、ブラシとコミュテータの状態によってコイルの回路構成が変わります。モータの端子間抵抗を測るときは、意識しましょう。

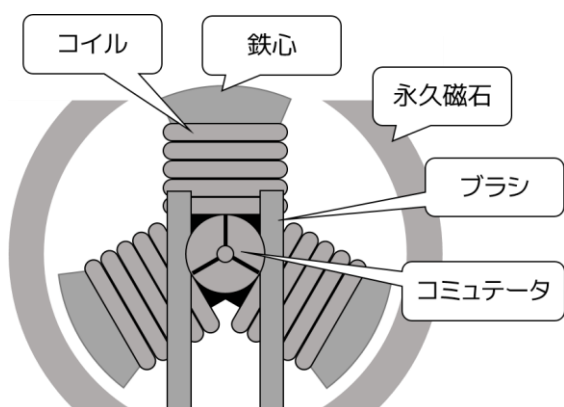


図 2-1 DC モータの模式図

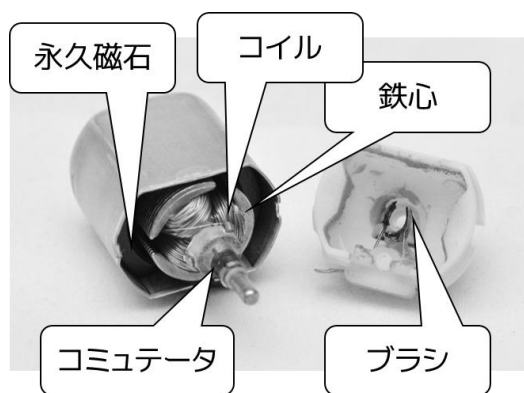


図 2-2 模型用モータを分解した様子

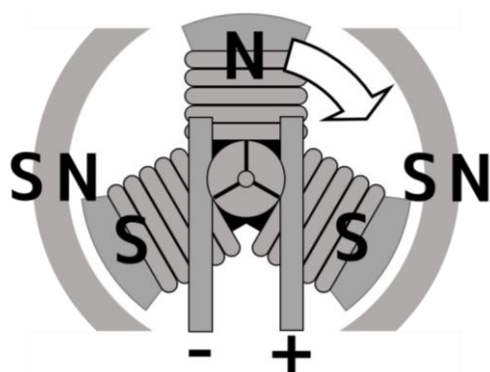


図 2-3 モータが回り始めるとき

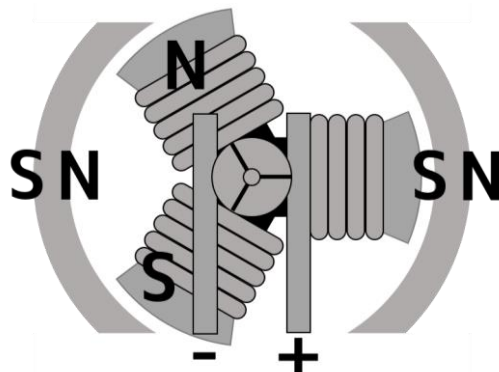


図 2-4 ブラシがコミュテータをまたぐ瞬間の様子

安い DC モータは磁力を集中させるためにコイルが鉄心(コア)に巻いてあります。そのようなモータをコアド(コアード)モータと呼びます。このコイルが巻いてあるコアとコアの間隙をさしてスロットと呼びます。スロット数が多い=コイルの極数が多い=コミュテータの極数が多い、モータほど滑らかに回りやすくなります。スロットの形状によっても分類されることがあります。

それに対して、鉄心を使わずコイルだけでロータを構成している場合にはコアレスモータと分類されます。コアレスモータは制御性が良いものの、ネオジムなどの強力な磁石を必要とするため、一部の用途に限られて使われてきましたが、最近では磁石も安くなったことから多くの用途に利用されるようになりました。研究・産業ロボット用途では、もっぱらコアレスモータが利用されます。また、詳しくは後述しますが、ブラシでの放電が少なく、放電に弱いけど電氣的にも物理的



にも接触抵抗が低い貴金属製のブラシが使えるようになるという特徴もあります。

本当は、ここでより細かくモータの構造や分類などを説明したいところですが、世の中のモータメーカーがすでに良い資料を複数提供しているので、そちらに説明を譲ります。

- ▶ 日本電産株式会社 「技術情報 モータとは」  
<http://www.nidec.com/ja-JP/technology/motor/basic/>
- ▶ マブチモーター 「技術ガイド」  
<https://www.mabuchi-motor.co.jp/product/knowledge/>
- ▶ maxon motor 「モータ基礎知識」  
<http://academy.maxonjapan.co.jp/knowledge>

## 2.2. 電気回路と力学の確認

モータは電気と機械との間を取り持つ存在であるため、両方の知識が必要になります。必要な知識を言い始めるときりがないので、ここではこの後の説明に必要な部分だけを抜き出して説明します。なお、記号類は電気系や制御系に準じたものを使います。例えば、複素記号は  $j$  を使い、イナーシャは  $I$  ではなく  $J$  を使います。これは直流電流の  $I$  や交流電流の  $I$  とかぶってしまうのを防ぐための習慣です。

### 2.2.1. インダクタンス(コイル)

モータの大きな構成要素であるコイルは、電気回路のコイルとしての性質を持つものです。コイルの両端電圧(=起電力)は、コイルの容量値であるインダクタンス  $L$  を使って、

$$V_L = L \frac{dI}{dt}$$

と表現できます。つまり、電流の変化分に応じた電圧が生じるわけです。インダクタンス  $L$  は、コイルの巻き方(巻数  $N$ 、断面積  $S$ 、全長  $l$ )と、コイルが巻かれている周辺の透磁率  $\mu$ (磁石版の電気伝導度のようなもの)によって

$$L = \frac{\mu N^2 |S|}{l}$$

と決まる値です。空気中の透磁率は約  $1.26 \times 10^{-6}$   $\mu\text{H}/\text{m}$  ですが、鉄心に使われる珪素鋼では約  $5.0 \times 10^{-3}$  程度と桁違いです。そのため、同じくらいのサイズ感のモータでは(つまりコイルの巻数や断面積などが似通っているモータ)、鉄心のあるコアドモータのほうがインダクタンスが大きく、鉄心のないコアレスモータのほうがインダクタンスが小さくなります。

### 2.2.2. キャパシタンス(コンデンサ)

コンデンサは直接モータの構造にはありませんが、後述するノイズ対策や、電気機械変換をした時に出てくる重要な要素です。コンデンサの両端電圧  $E_c$  は、コンデンサの容量値であるキャパシタンス  $C$  を用いて

$$E_c = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int I dt$$

と書けます。コンデンサに溜まっている電荷  $Q$  の量で、電流の積算値と等価なので、このように書くことができます。キャパシタンスはコンデンサの電極寸法(面積  $S$ 、電極間距離  $d$ )と、電極間の素材で決定する誘電率  $\epsilon$  から、

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

と決まります。

### 2.2.3. 運動の回転系

ここで扱っている DC モータは、回転モータです。そこで、モータの力学的な話は、すべて回転系で説明するのが一般的です。運動方程式を立てる時によく使われる「バネ-マス-ダンパ」系は、回転系では「バネ-イナーシャ(慣性モーメント)-粘性抵抗トルク」として表現します。

## 2.3. DC モータの基本的な性質

いろいろな構造のある DC モータですが、基本的に変わらない性質があります。それは、

- ▶ 電流とトルクが比例

- ▶ 電圧と回転数が比例
- ▶ トルクと回転数が逆比例

というとても明確かつ利用しやすい性質です。

### 2.3.1. トルク特性

トルクと電流が比例することは、界磁が一定の中で電磁石に発生する力を考えると想像しやすいと思います。電磁石に発生する力(ローレンツ力)は電流に比例することから、DC モータはトルクと電流が比例関係となります。一般的に、トルクと電流の係数をトルク定数  $K_T$  と呼びます。

$$T_m = K_T I_m$$

### 2.3.2. 回転数特性

電圧と回転数の関係は、モータの発電動作で説明されます。コイルに掛かる磁束が変化すると、その変化量に応じてコイルに電圧(起電力)が発生します(電磁誘導)。つまりモータに電源を繋がずに軸を回すと、ロータが界磁中を回転し、つまりコイル周りの磁束が変化するためにコイルに起電力が発生します。この起電力は磁束の変化量に比例するため、モータの回転数に比例して発生します。一般的に、回転数と起電力の電圧の係数を逆起電力定数や誘導起電力定数、回転数定数などと呼び、 $K_E$ と書きます。

$$E_r = K_E \omega$$

DC モータの場合、本来はモータに電流を流してモータが仕事をするはずなので、モータで発生する起電力は特に逆起電力という言葉が使われます。ややこしいのですが、モータでは「軸が回転して発生する電磁誘導による起電力」と「コイルに流れる電流が変化したことによる起電力」の二つ起電力が発生します。どちらも逆起電力と言われますが、モータの逆起電力といった場合には、通常は前者を指します。モータのコイルの逆起電力と言われると、確認が必要になります。

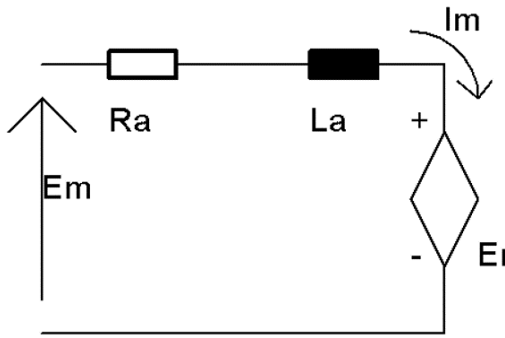


図 2-5 簡単な等価回路

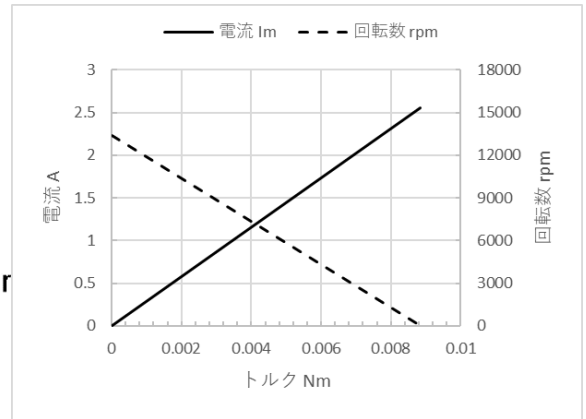


図 2-6 モータの特性図

### 2.3.3. トルクー回転数特性

ここで、簡単なモータの等価回路を考えると図 2-5 のように表せます。その時のモータ端子間電圧 $E_m$ は、次の式で表されます。 $E_m$ はモータ端子間電圧、 $R_a$ はモータ内部抵抗(ロータを別名アーマチュア(電機子)と呼ぶので添字に a が使われるようです)、 $I_m$ がモータ電流、 $L_a$ がモータコイルインダクタンス、 $E_r$ が逆起電力です。

$$E_m = R_a I_m + L_a \frac{dI_m}{dt} + E_r$$

ここで負荷変動がない=電流変化がなく、モータ電流と逆起電力をそれぞれの定数を使って表現を変えると

$$E_m = R_a \frac{T_m}{K_T} + K_E \omega$$

となります。この式より、モータ電圧が一定の場合に、トルク $T_m$ と回転数 $\omega$ が逆比例の関係になっていることがわかります。ちなみに、実はトルク定数と逆起電力定数は、SI 単位系で記述すると完全に同じ値になります。この事の導出はここではあまり重要ではないので、先にあげた日本電産のサイト(<http://www.nidec.com/ja-JP/technology/motor/basic/00013/>)が参考になります。

これをグラフに書くと、図 2-6 のようになり、よくモータメーカーが提示しているグラフになります。電源電圧を上げると、電流のグラフが伸び、電圧のグラフが上側にシフトしつつ右下に伸びたのと同義になり、最大回転数と最大トルクがあ

がります。グラフ上のどの点でモータが動作するかは、モータに与えられた負荷によって決まります。

図 2-6 のグラフは、モータの回転方向が一定の場合です。それを両方向に回ることまで考えると、トルクと回転数のそれぞれが正負の値をとれる場合が考えられます。そのような動きを考え得るためには横軸をトルク(電流)、縦軸を回転数(電圧)としたグラフにおいて考えます。モータが正逆転したり、加減速すると、そのグラフ中のすべての象限を移動する動作になるため、四象限動作と呼ばれます。逆に、モータが単一方向にしかも加速動作しかなければ一象限動作となるわけです。必要な象限数により、モータに正負の値を与える必要性が変わり、モータドライバの構成に影響します。

#### 2.3.4. 逆起電力定数の求め方

世の中すべてのモータのすべての特性が公表されているわけではありません。maxon motor のように、もともと制御用として販売されているサーボモータであれば、かなりの情報が記載されていますが、マブチやツカサなどのモータでは、逆起電力定数すら掲載されていない場合があります。ですが、逆起電力定数とトルク定数がわからないと、メカの設計ができません。そこで、巻線抵抗をテストで計測するように、これらの定数についても計測します。先に書いたとおり、トルク定数と逆起電力定数は SI 単位系であれば同じ値であるため、どちらか一方を知ることができれば良いわけです。簡単なのは、逆起電力定数のほうです。要は図 2-6 のグラフの切片が分かれば良いわけです。切片はトルクかが 0 のときの回転数なので、定電圧でモータを回し、その時の電圧をその時の無負荷回転数で割ればそれだけで逆起電力定数を求めたことになります。ただし、この方法ではブラシ電圧降下とモータの粘性抵抗の影響が含まれるため、電圧が低いモータや無負荷時の抵抗が大きいモータでは誤差が大きくなります。その時は、電動ドリルなどでモータの軸を外部から回し、その時の端子間電圧をテストで、回転数を何かしらで計測します。テストには電流がほぼ流れないため、ブラシ電圧降下はほぼ発生せず、誤差の少ない計測結果が得られます。

## 2.4. DC モータのその他の性質

実際のモータを考えると、ブラシとコミュテータという大きな回路要素が存在します。この部分で発生する電圧降下を特にブラシ電圧降下と呼んでいます。ブラシ電圧降下まで踏まえて考えた等価回路はよくダイオードを入れた回路として描かれます。ブラシとコミュテータでの接触部は、ある一定のオフセット電圧と、電流に応じた電圧が生じるため、ダイオードとして近似されるようです。実際の電圧降下量はブラシの素材や摩耗具合、回転数、潤滑状況などによって大きく変動するため、見積もることはほぼ絶望的なようです。幾つか論文も読んでみましたが、残念ながら明確な回答はいまのところ得られていません。ブラシ電圧降下のオフセット値は、0.1~0.6Vくらいになるのが一般的なようです。そのため、電源電圧が低いと、ブラシ電圧降下による影響が大きく無視できません。

その他に注意する点としては、とくにコアドモータの場合、ノイズ対策としてモータにコンデンサがついている場合が多いことです。モータはコミュテータとブラシの間でコイルの切り替えが発生した瞬間に、大きな電流変化が生じます。その時、電流の微分は無限大に近くなり、コイルの起電力はとても大きなものとなります。その結果、ブラシとコミュテータの間で放電が起こります。これがモータでの一番大きな電磁ノイズとなるため、コンデンサを挿入してノイズを減らそうと努力しているわけです。コアドモータは、インダクタンスが大きいことから、放電も発生しやすく、対策としてのコンデンサが良く利用されています。このコンデンサまで含めてモータの等価回路として考えなければならないか、もしくはコンデンサを外してしまうかのどちらか選択が必要です。ラジコンの世界では、このコンデンサのことをよくノイズキラーコンデンサと呼びます。

## 2.5. DC モータを電子部品として「見る」

普通の電子部品であれば、電気特性を考えれば制御方法の検討がつかます。ところがモータは電気系と機械系の相互変換ができるため、機械系が電気系に影響します。細かい制御をするためには、しっかりこの影響を見積もることが重

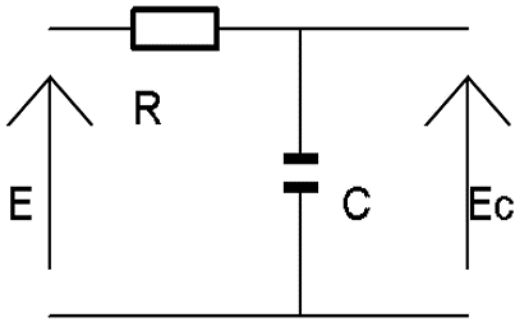


図 2-7 RC 回路

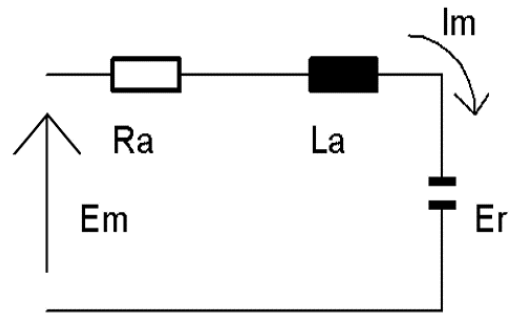


図 2-8 逆起電力が C に見える

要です。ただ、導出が若干面倒なので(回路の LCR と機械のバネマスダンパの係数が入るため)、ここでは高校物理の時からおなじみの「ただし摩擦は無いものとする」場合でまずは考えてみたいと思います。

まず、準備として図 2-7 の抵抗とコンデンサでできた普通の回路を考えます。はじめにコンデンサが充電されていない状態からスタートし、抵抗を介してだんだん充電されている状況でのコンデンサの電圧を求めます。これは、電流を電荷に置き換えて、回路を次の式で考えます。

$$E = RI(t) + \frac{1}{C} \int I(t) dt = R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{C}$$

すると、簡単な微分方程式として解くことができ、コンデンサの両端電圧は

$$E_C(t) = E (1 - e^{-\frac{1}{CR}t})$$

となります。t = 0 のとき、E<sub>C</sub> = 0 であり、充電が終わった t = ∞ では、E<sub>C</sub> = E となるのがわかります。この時、充電の早さを決めるのが t の係数である  $\frac{1}{CR}$  であり、この値の逆数のことを時定数といい、よく τ で表現します。

さて、次にモータの等価回路に注目します。今度は電流変化が十分にゆっくりなものであると考えて、インダクタンスの影響はないものとして考えます。すると、この回路は次の式で表せます。

$$E_m = R_a I_m + E_r = R_a I_m + K_E \omega(t)$$

このとき、電流をトルクで変換すると、次のように表せます。

$$E_m = \frac{R_a}{K_T} T_m(t) + K_E \omega(t)$$

$$T_m(t) = \frac{K_T}{R_a} (E_m - K_E \omega(t))$$

また、運動方程式を次の式で表せます。

$$T_m(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + D \omega(t)$$

ここから先は摩擦を無視するために、 $D = 0$ で考えます。これらの式を代入しあうと、一本の微分方程式として表せます。

$$\frac{d\omega(t)}{dt} + \left( \frac{K_T K_E}{J R_a} \right) \omega(t) = \frac{K_T E_m}{J R_a}$$

これを解くと、次の式になります。

$$\omega(t) = \frac{E_m}{K_E} \left( 1 - e^{-\frac{K_T K_E}{J R_a} t} \right)$$

つまり、逆起電圧は

$$E_R = K_E \omega = E_m \left( 1 - e^{-\frac{K_T K_E}{J R_a} t} \right)$$

となります。これは、先程のコンデンサの両端電圧の式と同じ形になっていることがわかります。つまり、イナーシャのあるモータは、電気回路としてみるとコンデンサと同様であると言えるわけです(図 2-8)。また、コンデンサのときと同様に考え、 $t$  の係数の逆数である

$$\frac{J R_a}{K_T K_E}$$

が時定数となります。この時定数を特に機械的時定数 $\tau_m$ と呼んでいます。こちらは、モータの加速の早さを決めるパラメータだと考えられます。

重たいタイヤをモータのシャフトに直結してモータに電圧を与えたときにだんだん加速していく様子を考えてください。内部抵抗 $R_a$ が大きいと、電流があまり流れないために加速に時間がかかる、イナーシャが大きいと加速に時間がかかる、というイメージと直結してわかりやすいかと思います。

この式のイナーシャは、モータ単体のイナーシャである必要はありません。例えば、高専ロボコンのような大きなロボットの駆動モータを考えたいときは、重量がタイヤ径と減速比を利用してモータの軸回りのイナーシャに変換できます。すると、モータ軸回りに巨大なモーメントが存在することになり、回路からすると、とてつもなく巨大なコンデンサが搭載されたように見えるわけです。実際には、摩擦も大きいので、ここでは無視した摩擦も考慮した式を使ったほうが良い



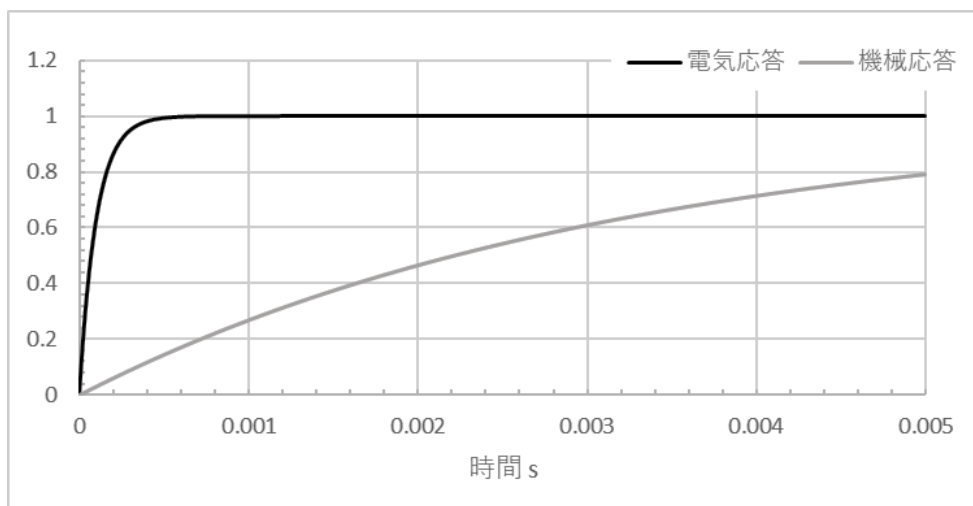


図 2-9 maxon DCX22L の応答

場合もありますが、どちらにせよ機械系が電気系としてみれるということがわかってもらえたかと思います。

一方で、モータの回路要素であるコイルについても考えてみます。図 2-8 の C がない場合を考えると、回路は次の式で表現されます。

$$E_m = R_a I_m(t) + L_a \frac{dI_m(t)}{dt}$$

この式を、そのまま先程と同様に微分方程式を解いてやると、

$$I_m = \frac{E_m}{R_a} (1 - e^{-\frac{R_a t}{L_a}})$$

となります。こちらは電流について同じ形式の式になることがわかります。そこで、今度は  $\frac{L_a}{R_a}$  が時定数となります。そして、これがモータの電気的時定数  $\tau_e$  となります。  $L_a$  が大きいほど電流変化を抑止するので、  $L_a$  が大きくなると時定数も大きくなることは想像しやすいかと思います。

このように、時定数は系の応答時間を示すための指標によく用いられます。電気的時定数はモータ固有の値なので、負荷が変わっても変動しませんが、機械的時定数はモータの負荷によって変動するので注意が必要です。図 2-9 に maxon motor の DCX22L というモータのパラメータから求めた応答のグラフを示します。電気時定数は 0.000100947s で、機械時定数は 0.0032 です。見

での通り、大きな違いがあることがわかります。なお、縦軸は最大値を 1 に正規化しています。

時定数は、これまでに紹介した方法で算出できますが、逆に時定数からモータのパラメータを求めることがあります。時定数の単位は秒なので、系の時間応答のグラフに書き込むことができます。つまり、図 2-9 のグラフに書き込むことができるわけです。電気時定数は小さすぎるので難しいですが、機械時定数でみると、0.0032 秒の機械応答は、約 0.6 になっていることがわかります。正規化した応答の式は  $1 - e^{-\frac{1}{\tau}t}$  であり、 $t$  に  $\tau$  を代入すると、 $1 - e^{-1} \cong 0.632 \dots$  となり、先程のグラフから読み取った値と一致することがわかります。つまり、ステップ状の操作をした時の応答を計測し、値が 63.2% まで上昇するのにかかった時間が時定数となるわけです。これは、メカに組み込んだあとに機械的時定数を求めるために利用が可能です(ただし、ステップ状の入力はメカにダメージを与えることも多いので、それ以外の方法を使うことが多いです)。

## 3. PWM でモータを回す

### 3.1. PWM の基本

考慮することはたくさんあるものの、とりあえず DC モータを駆動するためには電圧を可変すれば良いことがわかりました。モータを駆動する電圧を可変するために、古くはアナログパワーアンプを利用していました。その名残がサーボアンプなどに残っています。現在では、大きな排熱を必要とするアナログアンプは利用されず、PWM(Pulse Wide Modulation : パルス幅変調)という方式で変調したスイッチング回路が利用されます。PWM なスイッチング回路では、その ON と OFF の時間の比である duty 比により仮想的に電圧を与えます。例えば、電源電圧が 12V で、ON duty(周期のうち ON になっている割合)が 25% ならば、仮想電圧は  $12V \times 0.25 = 3V$  と求めることができます。あとは、この仮想電圧を使って、これまでに説明した関係を考えれば良いです。

### 3.2. PWM 周波数の決め方

PWM の duty は、制御に応じて可変させればよいことがわかりましたが、次の問題は周波数です。ON と OFF の 1 サイクルの合計時間を周期として、その逆数が PWM の周波数となります。一般に、PWM 周波数は、20kHz 以上にすると言われていています。これは、人間の耳が聞こえる範囲に PWM 周波数があると、モータのコイルが振動し、音として聞こえてしまい、不快に感じるからです。ディスクリートで回路を組んでいた時代や非力なマイコンでは高い周波数の PWM を作ることが困難だったため、18kHz から 25kHz 程度で作られることが多かった印象があります(あくまで印象です)。場合によっては、数 kHz の音が一番不快に感じるからといって、数百 Hz の PWM を使っている例もあるようです。ラジコンの ESC ではなぜか現代でも 8kHz 程度を利用しているものが多いです。

さて、では 20kHz 以上の PWM とは言ったものの、どこまであげればいいのか。これはかなりの難問で、後述するスイッチング回路や、マイコンの

アナログ信号処理にも依存してくる部分なので、一概には決められないのです(さらに製品なら EMI の試験にクリアする必要があったり…)。ですが、モータドライバとして都合の良い周波数ではなく、まずはモータにとっての都合を考えてみることにします。モータにとっての都合の良い周波数はモータの時定数から考えられます。

### 3.3. PWM をモータにかけてみる

図 3-1 は、手元にあった適当にコアドモータの実測したインダクタンス  $1.9\mu\text{H}$ ・内部抵抗値  $4.4\Omega$  を使って、回路シミュレータで PWM 波形をかけたときの電圧・電流波形の様子です。ただし、逆起電力定数は 0、ノイズキラーコンデンサは無しとして、インダクタンスと抵抗だけの簡単なモデルにしてあります。周波数が低いと電流波形は大きな振幅を持ちますが、周波数が高いと振幅が小さくなります。これはインダクタンスによる影響です。

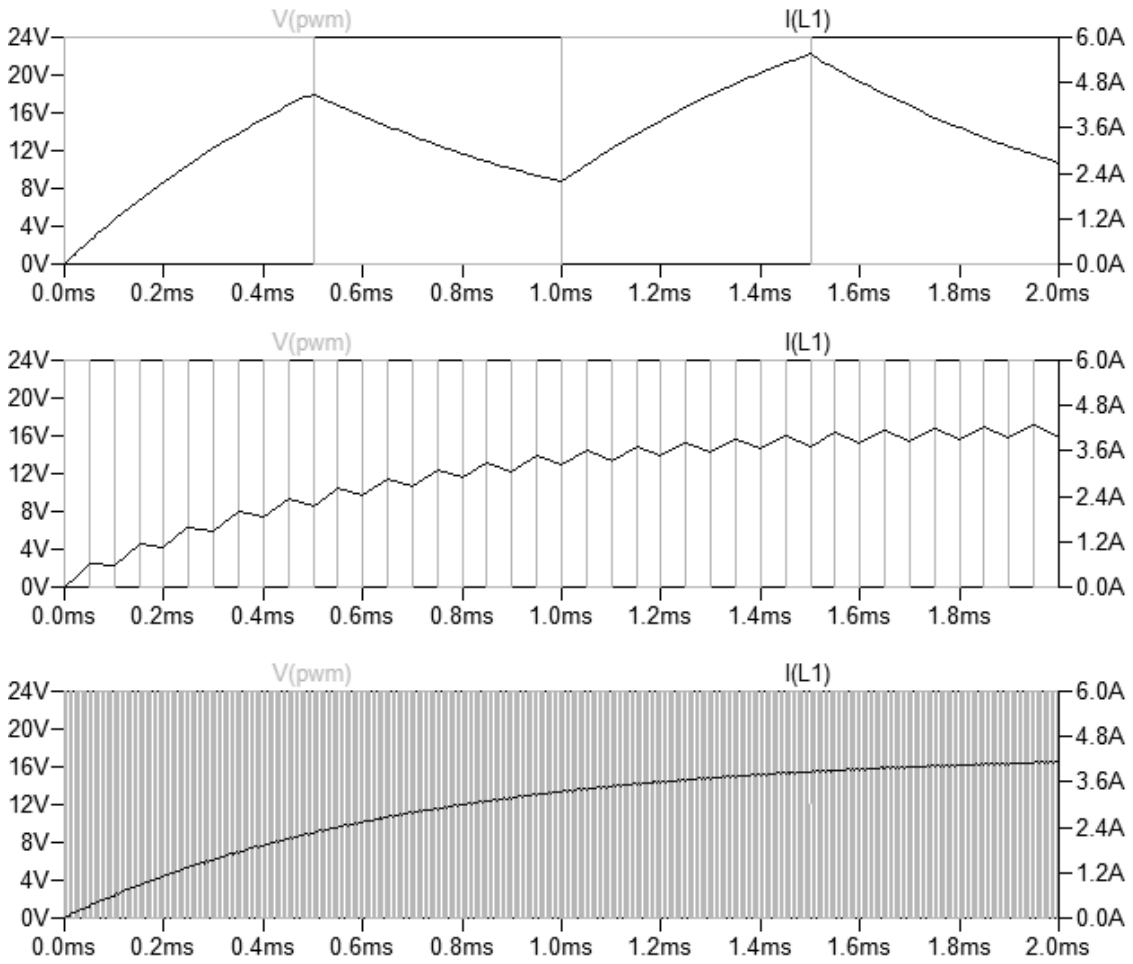
この時の電流振幅をどれくらいに抑えたいか、がモータにとっての都合となります。平均電流はどの場合も同じですが、ピーク電流が違うことから、モータの内部抵抗で消費する電力が変わります。一番ひどい場合として、電流波形が電圧波形と同じ矩形波の場合、一番良い場合として、完全に平滑化された直流の場合として計算してみると次のようになります。duty 比を  $d \times 100\%$  としてモータでの発熱を  $W_m$ 、電源電圧  $E$  とします。直流の場合は、電源電圧に  $d$  をかけた電圧をモータにかけると考え、PWM の場合は、ON のときの発熱と OFF のときの発熱の時間分割で考えます。

- ▶ 直流の場合

$$W_m = E_m I_m = \frac{(dE)^2}{R_a}$$

- ▶ PWM の場合

$$W_m = \left( d \frac{E^2}{R_a} + (1-d) \frac{0^2}{R_a} \right) = \frac{dE^2}{R_a}$$



**図 3-1 モータを PWM 駆動したシミュレーション波形. 上から 1kHz, 10kHz, 100kHz の場合**

以上より、平均電流が同じ、つまり同じトルクを発揮しているにもかかわらず、 $d$ 倍の発熱量差が生まれることとなります ( $0 \leq d \leq 1$ なことに注意)。モータの連続動作限界は、ほとんど熱によって決まっていますので、余計な熱が出るのはよろしくありません。そのため、十分に電流振幅が小さくなる PWM 波形にすると良いと言えます。ちなみに、電流波形が 0 に落ちないような波形になる場合、電流連続モード制御といい、電流波形が 0 になる事がある場合は電流不連続モード制御といいます。

図 3-2 は、先に上げたコアドモータと同程度の出力を持つコアレスモータとして maxon motor の DCX26L の 24V 10600rpm 品を例にカタログに書かれてい

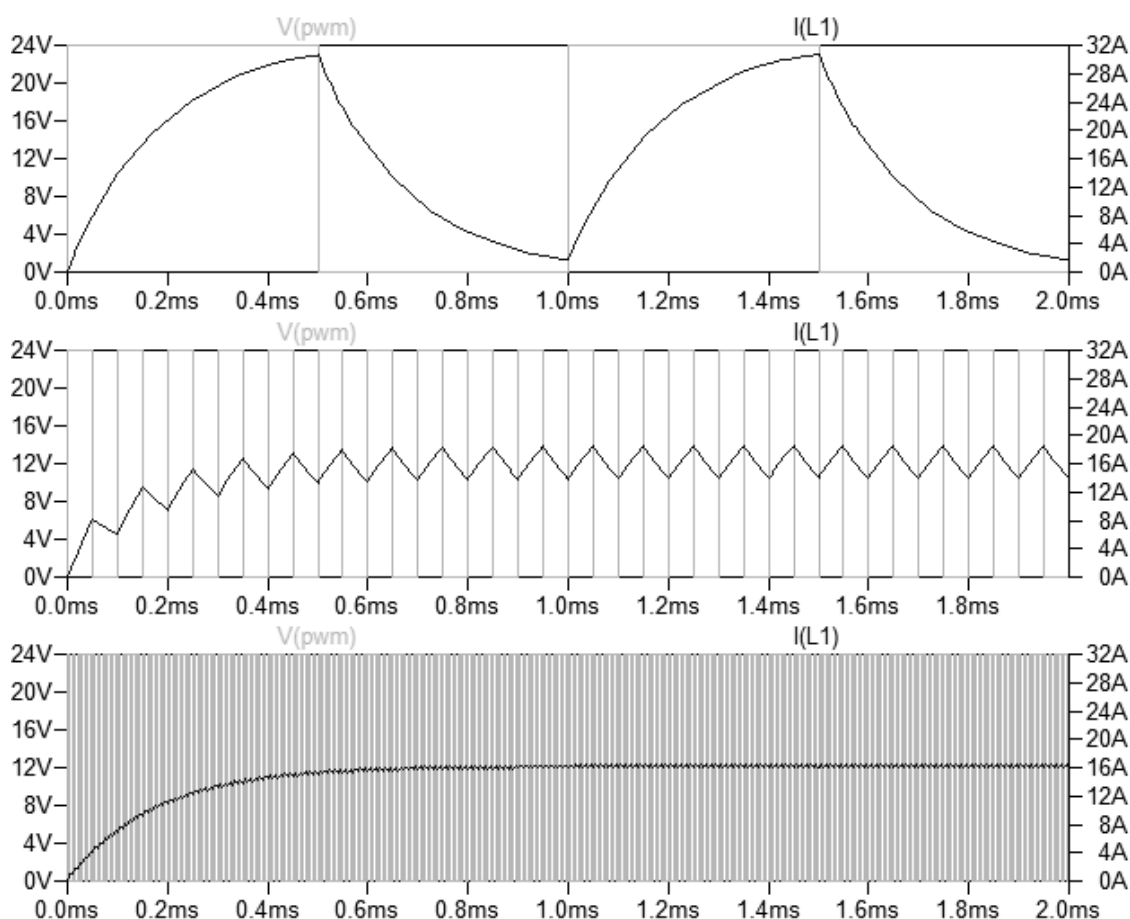
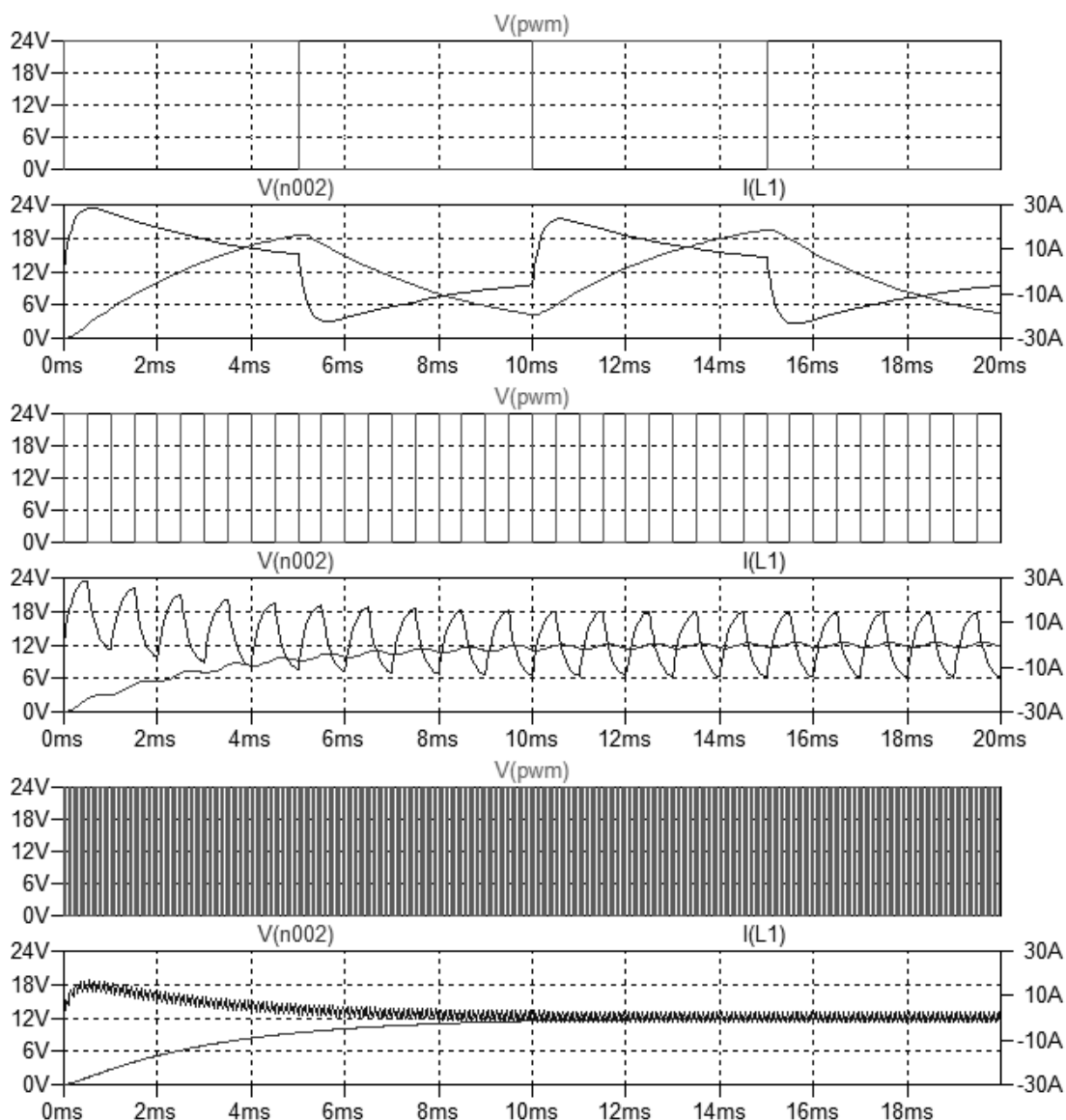


図 3-2 コアレスモータのシミュレーション。並びは同様。

るインダクタンス  $129\mu\text{H}$  と内部抵抗  $0.74\Omega$  を使って同じシミュレーションをした結果です。インダクタンス値が大きく違うため、応答も大きく変わっています。コアドモータとは桁違いに低いインダクタンスのため、コアドモータでは電流振幅が十分に小さくなっていた PWM 周波数でも、コアレスモータだと許容できない場合があるということです。ですが、PWM 周波数はどこまででもあげられるわけでは無いので、対策としてモータに外付けでコイルをつけてしまう方法があります。すると、電流振幅は小さくなり、モータでの余分な発熱を抑えることができます。一方で、外付けコイルの内部抵抗により余分な電力を消費してしまうようになるため、システム全体としてみると、あまり効率が上がらないという場合もあります。ですが、モータの発熱を抑えられるだけでかなりのメリットが有ると考えられます。また、モータドライバとモータ間の配線抵抗での損失も同様



**図 3-3 逆起電力を考えた場合. 上から 100Hz, 1kHz, 10kHz の波形.**  
 に抑えられるため、特に大型ロボットでモータとモータドライバの距離が離れているような場合にはよりメリットが強くなります。

### 3.4. 逆起電力も考えた場合

同じ maxon モータについての電圧-回転数波形は図 3-3 のようになります。この図を求めるために、イナーシャをコンデンサとして考えた式を利用しており、回転数の代わりに逆起電圧でプロットしています。そのため実際の回転数

は、V(n002)のプロットを 445 倍(逆起電力係数を rpm/V に変換した値)したものととなります。それぞれの周波数において、上段が PWM 波形、下段が電流波形と回転数波形です。機械時定数は電気時定数よりも大きいので、シミュレーション範囲と PWM 周波数が先ほどとは変えてあるので気をつけてください。図を見てみると maxon モータのイナーシャが小さいため、応答が早く、PWM 周波数が小さいときに、それに合わせて回転数も変化してしまう様子が観測できます。1kHz の波形でも、すこしリップルが残っていることが観測できます。一方でコアドモータであれば、イナーシャはこれの 10 倍以上あるはずなので、リップルはほぼ観測できないと思われます(コアドモータのカタログスペックを見つけられなかったのでここでは省略します)。一部の WEB ページではこの結果をうけて「コアドのマブチモータなんて数百 Hz の PWM で十分」とする意見もあるようですが、先に述べたように回路特性で考えればそんなことはなく、コアドモータであってもある程度の高い周波数で駆動してやるのが良いと自分は考えています。

### 3.5. PWM 周波数の注意

ノイズキラーコンデンサがついていると、また事情は異なります。コンデンサのインピーダンスは周波数上がるほど小さくなる特性を持っています。そのような特性のコンデンサがモータの端子間に入っているため、高い周波数の PWM をモータに与えると、モータ本体には電流が流れず、コンデンサばかりに電流が流れてしまいます。例えばノイズキラーコンデンサによく使われる 0.01 $\mu$ F や 0.1 $\mu$ F という容量で考えると、100kHz でのインピーダンスは約 160 $\Omega$ と 16 $\Omega$ となり、無視できない小さい値となります。このコンデンサに流れた電流はモータの回転には寄与せず熱になってしまいモータの性能が出ません。それどころか、コンデンサが発熱し、最悪の場合はこわれてしまいます。そこで、ノイズの問題さえなければノイズキラーコンデンサを外してしまったほうが効率良い駆動ができると考えています。

また、「PWM 周波数を高くすると、なんか回り始めるのに必要な duty が大きくなる」という印象を持っている人も多いかと思います。これはちゃんと確認し



ているわけでは無いですが、PWM 周波数が低いとモータに流れるピーク電流が大きくなり、その瞬間つよくロータにトルクが加わり、静止摩擦を振り切って回転が始まり、後は動摩擦なので回り続ける、と考えられます。これは、直流電源器でだんだん電圧を上げていったときにモータが回り始める電圧よりも、回っているところから電圧を下げていき止まったときの電圧が低くなることが多いことと同じ要因として考えられると思います。それ以外にも、ブラシ電圧降下の影響などもありうるのかもしれませんが、検証不足です。（ブラシ電圧の回転数特性、カーボンブラシの非線形性などなど）

## 4. PWM の作り方

### 4.1. スイッチング回路

モータドライバにとって一番重要なパワー回路部の設計について説明します。モータドライバにとって、モータにつながる部分は出口に当たるため、出力回路と表現できます。

2章でも書いたとおり、現代的なモータドライバは、ほぼ全て PWM でモータに与える電圧を制御しています。PWM は ON と OFF の切り替えを行うことで表現されることから、スイッチング回路だと言えます。図 4-1 の左は出力回路を ON と OFF を切り替えるスイッチで表現した模式図です。この時、上側のスイッチ(ハイサイドスイッチ)を ON にすればモータが回り、下側のスイッチ(ローサイドスイッチ)を ON にすればモータが止まります。逆回転に対応したスイッチの配置は図 4-1 の右図のとおりで、その形状から H ブリッジ回路やフルブリッジ回路と呼ばれます。それに対して、先程の図の回路をハーフブリッジ回路といいます。ハーフブリッジにしる、H ブリッジにしる、スイッチの状態によっては+側の電源から-側の電源までつながってしまうことがあります。そのような状態のことを貫通といい、貫通状態で流れる電流を貫通電流といいます。運用上、貫通電流は絶対流さないようにしなければなりません。スイッチの開閉(ON/OFF 動作のこと)に時間がかかったりすると、意図せずに貫通してしまうことがあるので、注意が必要です。

### 4.2. フライバックダイオード

モータにはコイルがあり、無視できないインダクタンスを持っています。その結果、スイッチで電流を開閉すると、大きな逆起電力を発生します。これはスイッチに使う半導体を壊すのに十分な電圧となります。この逆起電力のことをフライバック電圧といい、フライバック電圧から素子を守るためのダイオードをフライバックダイオードと呼びます。その他にも、フリーホイールダイオード(おそらく正

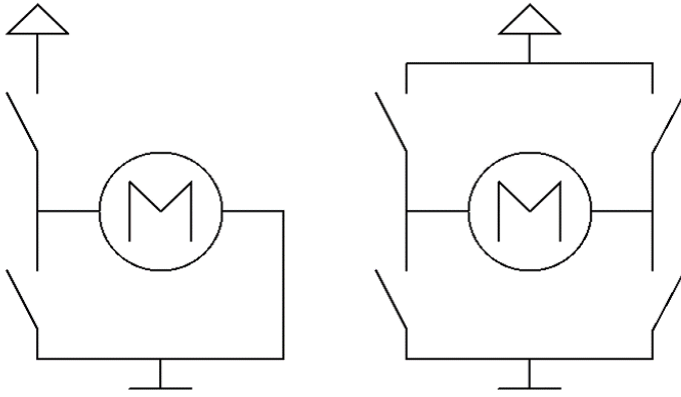


図 4-1 ハーフブリッジ回路と H ブリッジ回路

しい)や、フライホイールダイオード(間違い)とも呼ばれます。最も簡単な例として、図 4-2 の左の回路を考えます。この回路のスイッチを ON の状態から OFF にすると、コイルに流れる電流の微分はマイナス方向に無限大となります。その結果、コイルの起電力もマイナス無限大になり、スイッチには電源電圧よりも大きな電圧がかかってしまいます。これを防ぐためには、コイルに流れる電流の変化をゆるくしてやればよいので

す。図 4-2 の左の回路にフライバックダイオードをつけたのが図 4-2 の右の回路になります。同じようにスイッチを切ると、コイルの起電力が上がりますが、ダイオードの順方向電圧を超えたところでダイオードに電流が流れ始め、平衡します。その後、ダイオードやコイルの内部抵抗などで蓄えられていたエネルギーが消費され、電圧が 0 まで落ちます。このように、フライバックダイオードがあることで、逆起電力はダイオードの順方向電圧に抑えることができます。このフライバックダイオードを H ブリッジの各場所に入れた例が図 4-3 の回路になります。ポイントは、守る対象のスイッチと直列につながっているダイオードがフライバックダイオードとなることです。並列でつながっている方ではないのです。

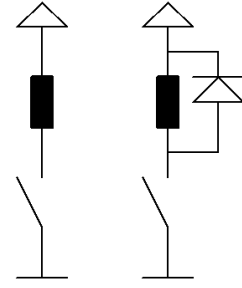


図 4-2 インダクタを含んだスイッチ回路

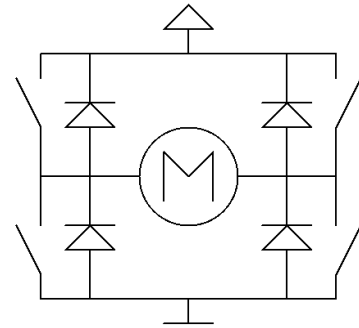


図 4-3 フライバックダイオード付き H ブリッジ

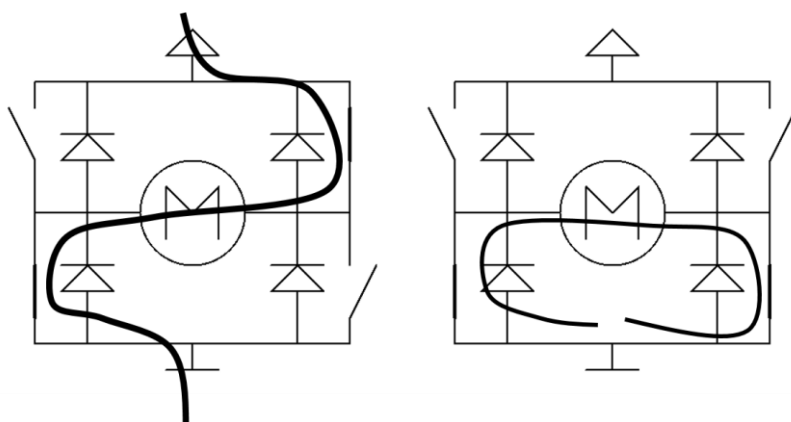


図 4-4 ON-BRAKE の動作モード

現代の個人が趣味でつくるレベルのモータドライバであれば、スイッチ素子として MOS-FET を用いることがほとんどだと思われます。この MOS-FET は、内部の構造上、どうしても並列にダイオードを持つことになります。そのため、スイッチ回路と言いながら、純粋なスイッチにはなりきれず、反対方向の電流は流してしまうという性質を持ちます。ですが、フライバックダイオードとしての機能に最適で、MOS-FET で H ブリッジ回路を組むと、勝手にフライバックダイオードが組み込まれ、保護された H ブリッジ回路となり好都合です。ただ、実際には FET 内蔵のダイオードはそこまで性能が良いわけではないので、より高速動作するダイオードを外付けしたりします。

### 4.3. PWM の種類

H ブリッジ回路のスイッチの使い方により、いくつかの PWM 駆動方法が考えられます。一番の問題は、これらの方法に定まった名前がついていないという点です。一応、スイッチング電源で使われている言葉や、一部の半導体メーカー・WEB サイトで使われている言葉があるので、それらも合わせて紹介します。

#### 4.3.1. ON-BRAKE(同期整流)方式

おそらく世の中で一番一般的な方法です。図 4-4 にスイッチングの状態を示します。図の通り、モータに電源電圧を印加する状態と、モータをショート状態にする 2 状態があります。DC モータは、端子間をショートさせた状態で外部か

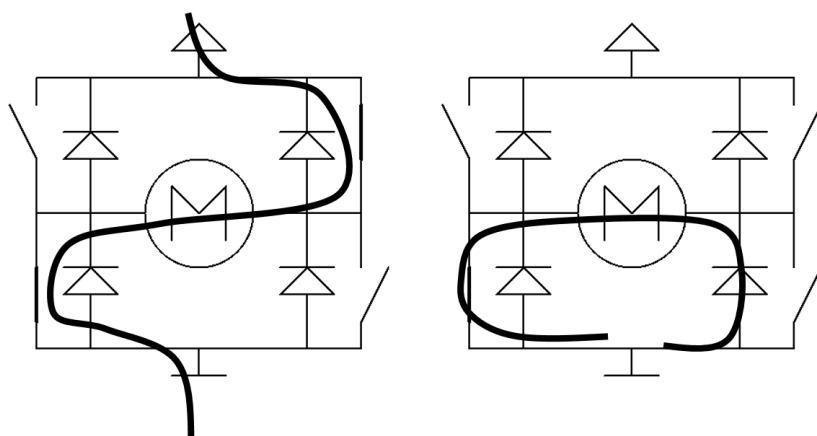


図 4-5 ON-FREE の動作モード

ら軸を回すと、逆起電力により電流が流れ、ブレーキがかかります。それゆえ、ON とブレーキの状態を行き来するということから ON-BRAKE 方式とごくまた、回転方向を変えたい場合は、Hブリッジの左右を入れ替えます。この方法の場合、Hブリッジの片側をスイッチングし、反対側はONにし続ける必要があります。実際の回路構成で起こる問題から、一般にはローサイドスイッチ側をONにし続ける構成で利用します。なお、同期整流方式では、スイッチングしている側のハーフブリッジで、少しでもスイッチに遅延があると貫通電流が流れてしまいます。それを防ぐため、スイッチがOFFからONに変わるときに遅延を追加します。これをデッドタイムといいます。デッドタイム中は次のダイオード整流と同じ動作になると考えられます。

#### 4.3.2. ON-FREE (ダイオード整流)方式

PWM がハイのときに、スイッチをONにしてモータに電流を流し、ローの時だけ同期整流方式とは異なり、すべてのスイッチをOFFにする方式です。この方法は、貫通電流が流れる心配がないため、簡単に駆動できます。ですが、OFF時の電流はすべてフライバックダイオードに流れるため、十分な電流容量のフライバックダイオードを持った回路でなければなりません。また、OFF状態では、フライバックダイオードのスレッシュホールド電圧を超えない限り電流が流れないため、ブレーキ効果が得らにくいという問題もあります。そのため、あまり使われ

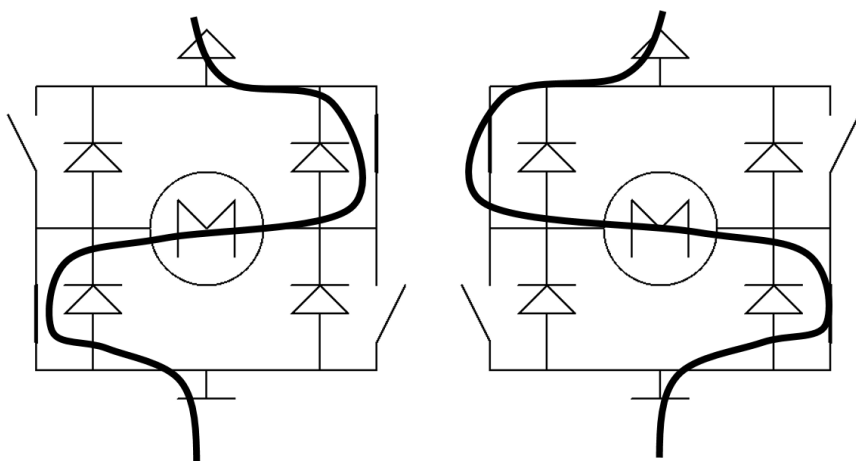


図 4-6 Locked Anti Phase 方式の動作モード

ることにはない方法となります。スイッチング電源ではこのような構成も多く使われており、一般にダイオード整流方式などと呼ばれています。

#### 4.3.3. Locked Anti-Phase 方式

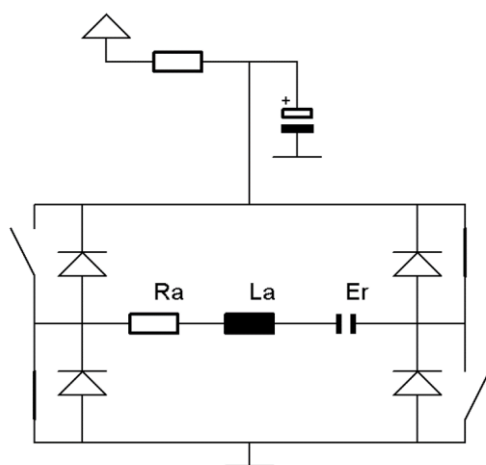
この方式は、これまでの2つとは異なり、モータに正転と逆転の電流を与え続け、その比率が大きい方に回るという方式です。スイッチの状態を図に示します。これまでの方法に比べ、スイッチング電圧の振幅が2倍になるため、電流の振幅も2倍になってまいります。十分なスイッチング周波数が得られない場合は、大きな損失になるので注意が必要です。この方式は1つのPWM信号ですべてのスイッチを操作可能であり、簡単な回路でも実現しやすいのが特徴です。また、モータが回っていないときでも左右どちら側のスイッチもスイッチングされているため、dutyを0%や100%にできない一部のモータドライバでも採用し易い特徴があります。

ちなみに、この名前が一般的なのかはよくわかりませんが、LT社が利用していたので、採用しました。

#### 4.4. 回生にご注意

モータドライバが駆動する負荷はモータです。これまでも述べてきた通り、モータのイナーシャは巨大なコンデンサだと考えられます。また、回路から電源

を供給していなくても、モータが外力で回されると発電してしまい、回路側に電流が流れ込んでくる可能性があります。このように電流が戻されることを回生と言います。この回生がある時にスイッチング動作を併用すると、電源電圧よりも高い電圧を作り出してしまい、場合によっては回路を破壊してしまうので注意が必要です。



**図 4-7 モータを等価回路で表した Hブリッジ**

具体的な例を考えてみます。図 4-7 は同期整流方式で駆動する H ブリッジ

で、負荷として、「3.3PWM をモータにかけてみる」で計算した maxon の DCX26L モータの等価回路が繋いであります。また、電源は、バッテリーを想定して内部抵抗  $0.1\Omega$  を挿入し、 $470\mu\text{F}$  の電解コンデンサを接続してあります。この回路に  $20\text{ms}$  から  $100\text{ms}$  までは  $100\%$  の duty を、 $100\text{ms}$  から  $200\text{ms}$  は回転方向は同じまま  $50\%$  の duty を指定しています。duty を  $100\%$  から  $50\%$  に落としているため、ブレーキを掛けたと考えられます。その時の右側スイッチング波形を図 4-8 に、電源電圧波形を図 4-9 に、モータ電流を図 4-10 に示します。まずスタート時には、電源についている電解コンデンサを充電するため、電源電圧はゆっくり上昇しています。その後、 $20\text{ms}$  地点でモータを  $100\%$  駆動し始め、やはり大きな電流が流れるために多少の電圧降下をしていますが、これまでに紹介してきた動作と違いはありません。ところが、 $100\text{ms}$  地点で duty が落ちたところで、モータ電流の平均値が反転し、電源電圧が上昇していることがわかります。 $100\text{ms}$  はこの等価回路の機械的時定数よりも十分に長く、モータは最高回転数に達している、つまり等価回路のコンデンサが満タンまで充電されている状態でスイッチングが始まったことになります。これを少し整理した回路図でみると、図 4-11 のようになります。モータを減速動作させるときには duty がハイの状態のときの電流が duty ガローの状態のときの電流よりも小さくな

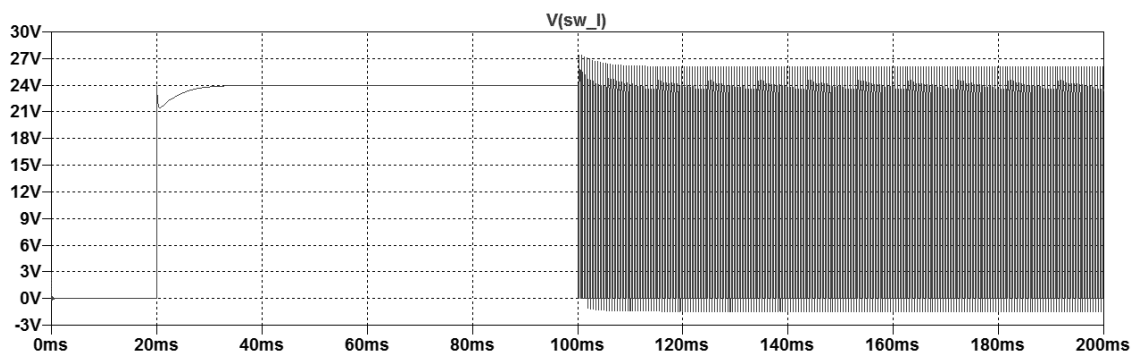


図 4-8 ハーフブリッジのスイッチング波形

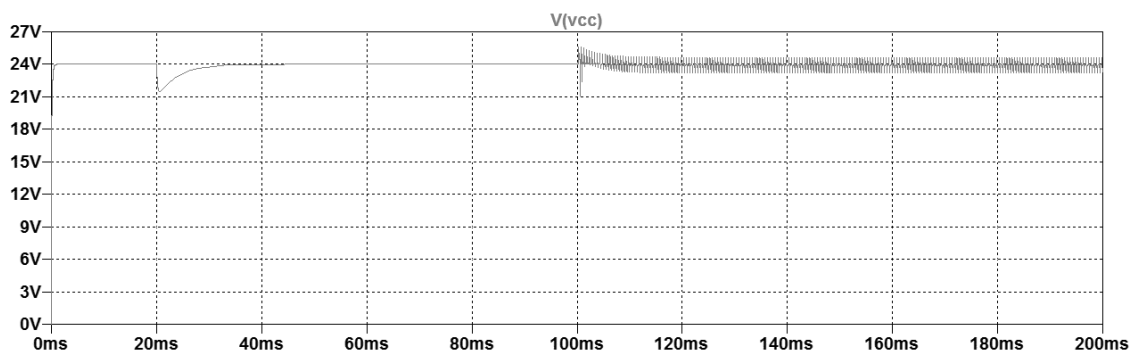


図 4-9 電源波形

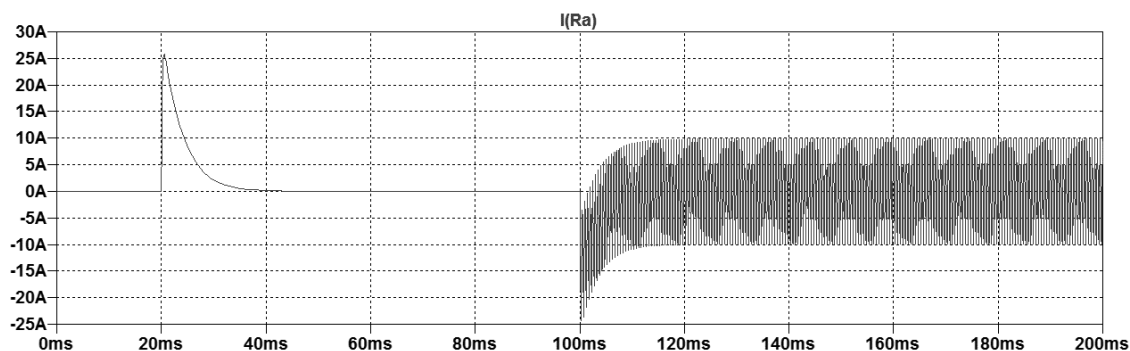


図 4-10 モータ電流波形

り、スイッチング時の電流の傾きが反転し、モータのコイルが昇圧動作モードになってしまいます。それゆえ、電源に電流が逆流して、電源電圧上昇を招きます。

ここまでは電源がバッテリーの場合を考えましたが、電源として安定化電源をつかっていると、電源が電流を受け取ってくれないため、電源電圧が大幅に上昇してしまいます。また、民生品のリチウム系バッテリーパック(ビデオカメラとか)の場



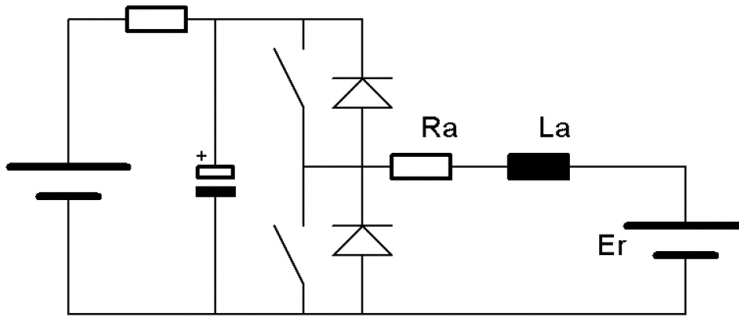


図 4-11 少し整理した回路

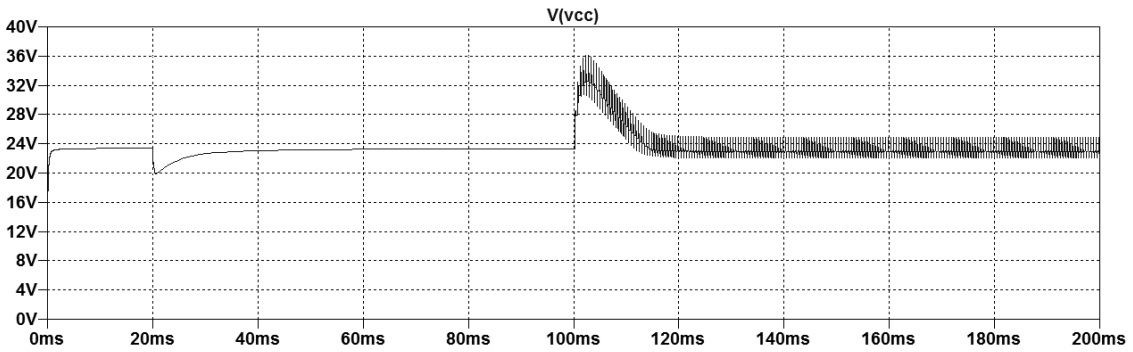


図 4-12 電源にダイオードがある場合

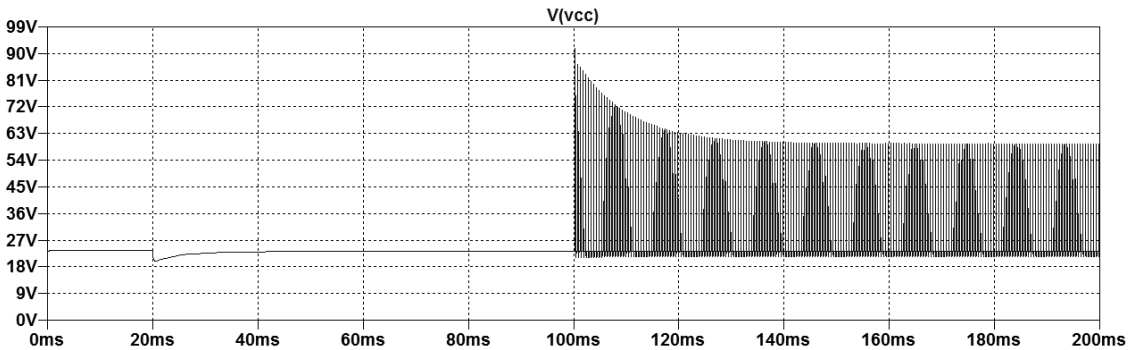


図 4-13 電解コンデンサが 10 $\mu$ F の場合

合、バッテリーを保護するために逆流防止ダイオードが入っている場合があります、その場合も回生電流を受け取る存在が居なく、電源電圧上昇を招きます。試しに、先程の回路で電源にダイオードを挟んだ場合のHブリッジ側電源電圧波形を図 4-12 に示します。さらに電解コンデンサが 10 $\mu$ F だった場合を図 4-13 に示します。どちらの場合も、バッテリーが回生を受け付ける時に比べて大きく電源電

圧が上昇していることがわかります。特に後者は、最大で 90V 程度と電源電圧の 4 倍まで上昇しており、部品が壊れるのは必至です。

ここで示したのはあくまでもシミュレーションなので、実際の電源電圧上昇は実機で確認したほうが無難です。とくに最大電圧はモータコイルのインダクタンスや回路の消費電力や電源電解コンデンサの容量に、電圧の維持時間はモータのイナーシャに依存するため、それぞれの状態でチェックが必要です。また、電源が回生を受け取れる鉛蓄電池のようなものであっても、電源からモータドライバの配線が長いと、電圧上昇しやすくなります。

このような電源電圧上昇を防ぐための根本的な手段は、回生電力を消費する抵抗を用意することです。たとえば maxon が販売しているシャントレギュレータ (<https://www.maxonjapan.co.jp/maxon/view/product/accessory/chopper/235811>) はその役目を担っています。また、先のシミュレーションでも分かる通り、容量の大きなコンデンサも役に立ちます。モータドライバの耐電圧を十分に確保することも大事ですが、電源に応じて回生電力の行き先を用意するとモータドライバを無駄に壊さずに済みます。

## 5. あとがき

みなさま、今回の本はいかがでしたか？今回はすこし装丁を見直して、シングルカラムにしてみました。果たして読みやすくなっていますかね。

内容についてはまた随分と尻切れトンボになってしまっているところがありますが、ひとえに検算と実験に時間がかかりすぎたところに問題があります… ちょっと自分が思っていたよりも脳みそが退化しすぎています。一応、この本に書かれている内容については、C91で頒布したモータドライバ基板ですべて動作確認をして実機と整合することを確認しています。実機で動かすと成ると、またもう二回りぐらい書きたいことがあるので、今後、ちまちまと書き進めていきたいと思います。

また、今回はふと思い立って表紙絵をシャポコさん(Twitter : @shapoco)お願いして描いて頂きました。本当にふと、「あ、こんな表紙をみたい」と思っしまい、その絵だったらシャポコさんしか居ないだろうと思っていたので、引き受けていただけると本当に有難うございました。

奥付

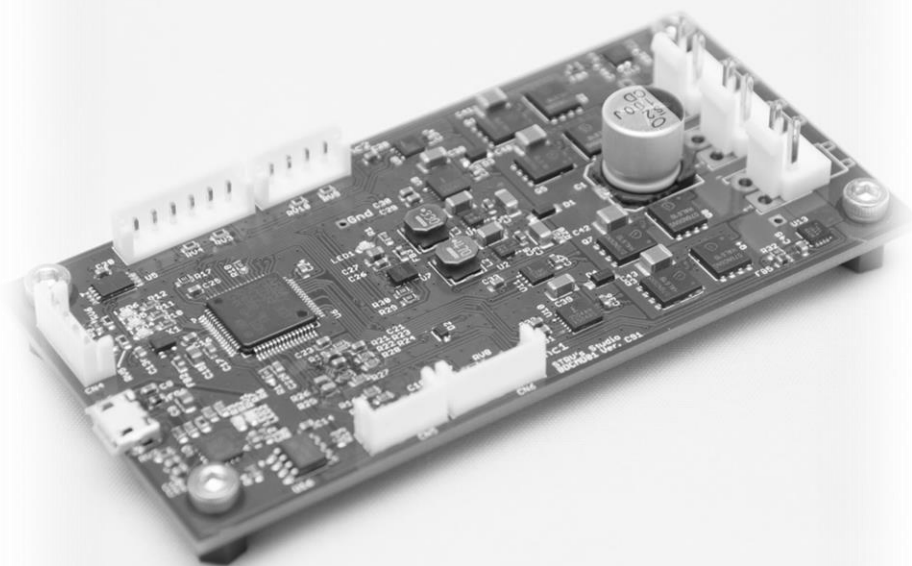
発行 : STRV's Studio strv

連絡先 : Twitter : @strv

e-mail : strv.analoger@gmail.com

発行日 : コミックマーケット 92 2017年8月11日

印刷会社 : みかんの樹



モータドライバのつくりかた  
—Vol.1 DC モータのまわしかた—

同人誌 No.13

Twitter : strv

WEB : <http://strv.jp/>

DL 販売



WEB

