

直流モータ駆動用チョッパ回路

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2013/5/8 舞鶴高専 平地克也

平地研究室技術メモ No. 20130430「直流モータの回転原理と等価回路」^[1]では直流モータの基本を説明しました。今回は直流モータの駆動回路を説明します。直流モータは印加電圧を変化させることにより容易に回転速度を制御することができます。インバータの進歩により最近では交流モータも精密な速度制御ができるようになりましたが、昔は精密な速度制御が必要な用途にはほとんど直流モータが使われました。今でもロボットの制御など多くの制御システムで直流モータの速度制御が使用されています。直流モータは基本的には降圧チョッパで制御されますが、直流モータの駆動に特化して通常の降圧チョッパとはやや異なる回路構成となります。

なお、本技術メモを読む前に平地研究室技術メモ No. 20130430「直流モータの回転原理と等価回路」を読んでいただくことを希望します。

回転速度と入力電圧の関係

図1に直流モータの等価回路を示します。次の式が成立します。

$$\text{入力電圧 (電機子電圧)} V_a = I_a R_a + E \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{速度起電力 } E = K_E \omega_m \quad \dots\dots (2)$$

$$\text{トルク } T = K_T I_a \quad \dots\dots (3)$$

なお、 R_a は電機子巻線抵抗、 K_E と K_T はそれぞれ速度起電力定数とトルク定数です。 ω_m は回転角速度で単位は[rad/sec]です。回転速度 N [rpm]との間には次の関係があります。

$$\omega_m = N \div 60 \times 2\pi \quad \dots\dots (4)$$

(1)(2)(3)式から E と I_a を消去して整理すると次の式を得ます。

$$\omega_m = \frac{1}{K_E} V_a - \frac{R_a}{K_E K_T} T \quad \dots\dots (5)$$

この式から直流モータの次の特性が分かります。

- ・ 無負荷時 (トルク $T=0$ の時) は回転速度は入力電圧 V_a に比例する。
- ・ トルクが大きくなると回転速度は低下する。

この特性をグラフに表すと図2となります。図から、直流モータは入力電圧を制御すれば回転速度を全範囲で制御できることが分かります。

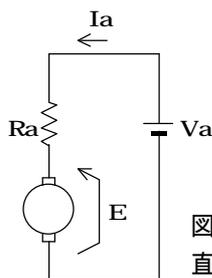


図1 直流モータの等価回路

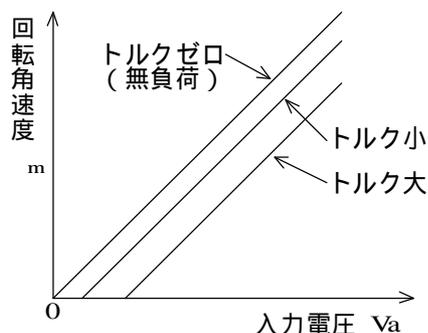


図2 直流モータの速度特性

直流モータの回転速度制御回路

直流電圧を制御すると言えばチョッパ回路を使用することになります。図3に降圧チョッパによる直流モータの回転速度制御回路を示します。Mは直流モータです。直流モータ入力電圧 V_2 は次の式で表されます。

$$V_2 = V_1 \cdot a \quad \dots\dots (6)$$

a は降圧チョッパの通流率です。なお、降圧チョッパについては参考文献[2]を参照下さい。(6)式を(5)式に代入すれば次の式が得られます。

$$\omega_m = \frac{1}{K_E} V_1 a - \frac{R_a}{K_E K_T} T \quad \dots\dots (7)$$

よって、降圧チョッパの通流率 a をコンピュータなどで制御すれば直流モータの回転速度を自由に制御することができます。

図4では直流モータを等価回路で表しています。直流モータには電機子インダクタンス L_a があるので降圧チョッパの平滑リアクトル L_1 は L_a で置き換えることができます。降圧チョッパのコンデンサ C_2 は電圧を安定させるために設けますが、直流モータには安定した電圧の速度起電力 E があるので C_2 も不要です。よって、直流モータ駆動用の降圧チョッパは図4に示すように L_1 と C_2 は省略して C_1 、 Q_1 、 D_1 だけでOKです。

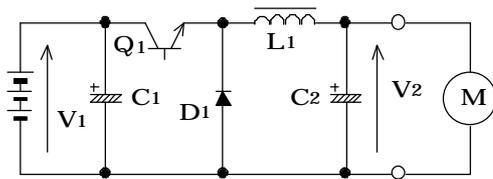


図3 降圧チョッパによる回転速度制御

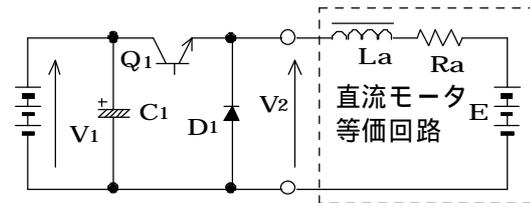


図4 実際の直流モータ駆動回路

直流モータの回生動作

平地研究室技術メモ No. 20130430「直流モータの回転原理と等価回路」で説明したように、直流モータで電気自動車を走行させる場合、下り坂では車輪がモータを回転させることになり、モータが発電機として動作します。これを回生動作と言います。発電電圧 E は(2)式で与えられ、回転速度に比例します。発電電力を電源に回生させるために図5のように昇圧チョッパを用いて電圧を制御する必要があります。降圧チョッパの時と同様に図5の L_1 と C_2 は直流モータの L_a と E で置き換えられ、実際には図6の回路が使われます。モータ(発電機)による発電電圧 E は回転速度によって変化します。電源電圧 V_1 も電池の充電状態に応じて変化します。次の式が成立するように昇圧チョッパの通流率 a を制御します。なお、昇圧チョッパについては参考文献[2][3]を参照下さい。

$$\frac{V_1}{E} = \frac{1}{1-a} \quad \dots\dots (7)$$

なお、実際には電流 I_a を制御してその結果(7)式の状態になります。 I_a の値は自由に選ぶことができ、大きくすれば逆トルク(回生ブレーキと言う)が大きくなります。

図4と図6を組み合わせれば図7となります。通常の動作(力行動作)時は Q_2 と D_1 は常にOFFであり、 Q_1 と D_2 で降圧チョッパとして動作します。回生動作時は Q_1 と D_2 は常にOFFであり、

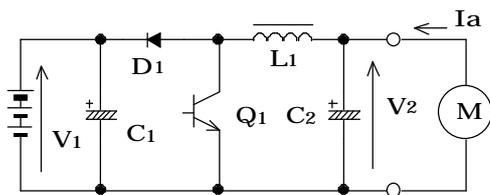


図5 昇圧チョッパによる回生電力制御

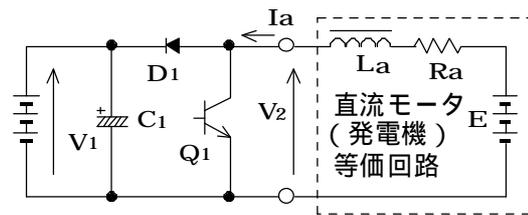


図6 L1とC2の省略

Q2とD1で昇圧チョッパとして動作します。図8はさらにモータの逆回転も可能とした回路です。例えば一例として表1のように動作します。それぞれの動作に対応する電流経路を図9に示します。実線はON/OFF動作しているトランジスタがONの時の電流経路、点線はOFFの時の電流経路です。各動作の概要は以下の通りです。

(a) 正転、力行

Q1とQ4がONすると $V_2 = V_1$ となり、電源電圧 V_1 がそのままモータに印加されます。

Q1がOFFするとモータの電機子のインダクタンス成分 L_a の定電流特性により「M Q4 D2 M」の経路で電流が流れ続けます。この時 V_2 はほぼ0Vです。

(b) 逆転、力行

Q2とQ3がONすると $V_2 = -V_1$ となり、モータには負の電圧が印加されます。よってモータは逆回転します。Q3がOFFするとモータの電機子のインダクタンス成分 L_a の定電流特性により「M Q2 D4 M」の経路で電流が流れ続けます。この時 V_2 はほぼ0Vです。

(c) 正転、回生

Q2がONすると速度起電力 E が電機子巻線の抵抗成分 R_a とインダクタンス成分 L_a に印加され、 L_a にエネルギーが蓄積されます。Q2がOFFすると L_a の定電流特性により「M D1 電源 D4 M」の経路で電流が流れ、電源に電力が回生されます。なお、通常 R_a は小さく、 L_a 電圧 R_a 電圧です。

(d) 逆転、回生

Q4がONすると速度起電力 E が R_a と L_a に印加され、 L_a にエネルギーが蓄積されます。なお、逆転しているのでモータの電流は(c)の時と逆方向になります。Q4がOFFすると L_a の定電流特性により「M D3 電源 D2 M」の経路で電流が流れ、電源に電力が回生されます。

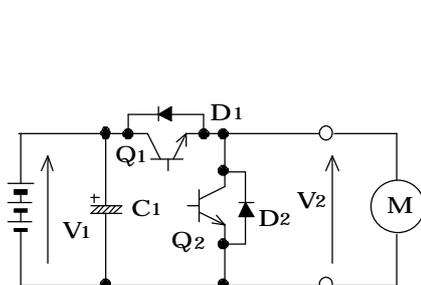


図7 回生動作可能な直流モータ駆動回路

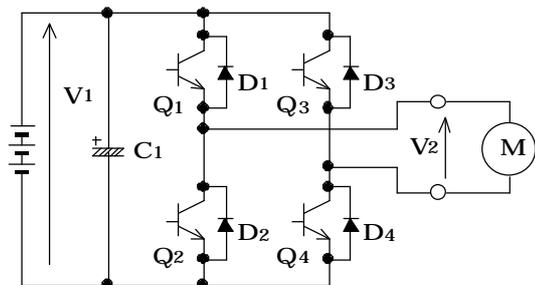


図8 逆転も可能な直流モータ駆動回路

表 1 逆転も可能な直流モータ駆動回路の動作

	(a)正転、力行	(b)逆転、力行	(c)正転、回生	(d)逆転、回生
Q1	ON/OFF	常時 OFF	常時 OFF	常時 OFF
Q2	常時 OFF	常時 ON	ON/OFF	常時 OFF
Q3	常時 OFF	ON/OFF	常時 OFF	常時 OFF
Q4	常時 ON	常時 OFF	常時 OFF	ON/OFF
D1	常時 OFF	常時 OFF	ON/OFF	常時 OFF
D2	ON/OFF	常時 OFF	常時 OFF	常時 ON
D3	常時 OFF	常時 OFF	常時 OFF	ON/OFF
D4	常時 OFF	ON/OFF	常時 ON	常時 OFF

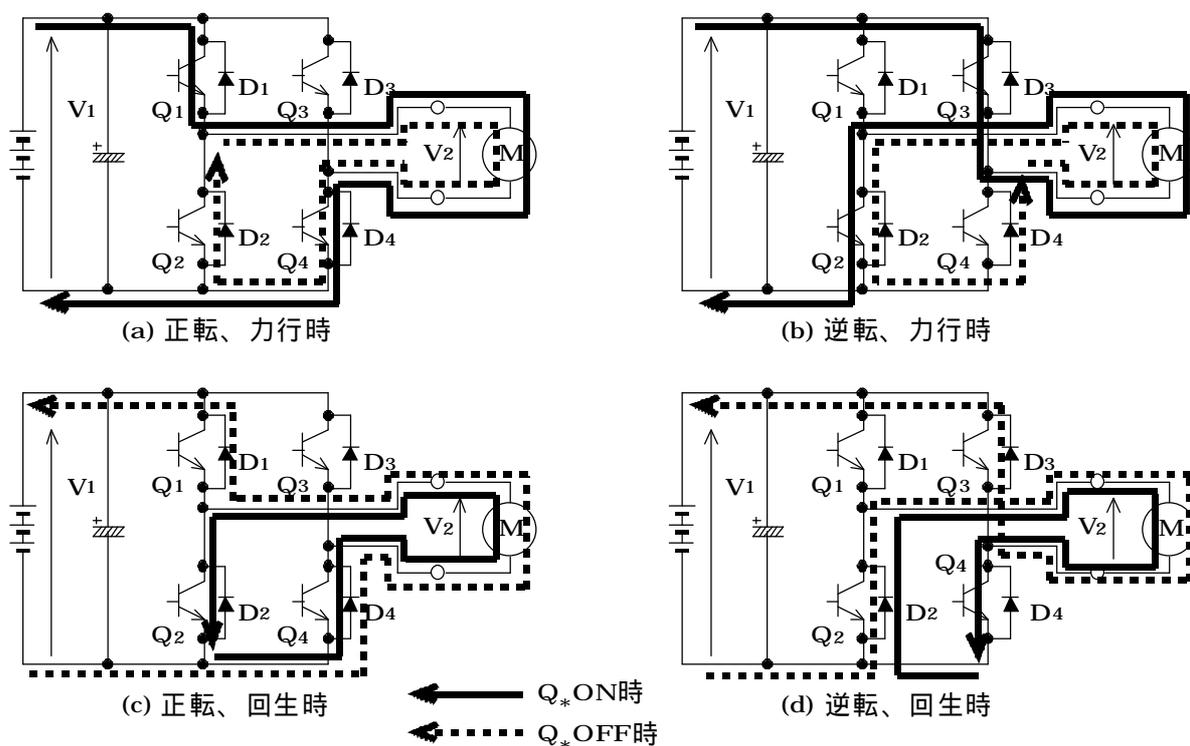


図 9 直流モータ駆動回路の各動作時の電流経路

参考文献

- [1] 平地研究室技術メモ No. 20130430、「直流モータの回転原理と等価回路」, カテゴリ: パワエレ入門
- [2] 平地研究室技術メモ No.20060918、「チョッパ回路の考え方」, カテゴリ: パワエレ入門
- [3] 平地研究室技術メモ No.20080214、「昇圧チョッパはなぜ「昇圧」できるのか?」, カテゴリ: パワエレ入門

以上