

パワーエレクトロニクス実験・実習教材

誘導モータの制御技術 その4

職業能力開発総合大学校 山本 修・佐々木英世・荒 隆裕

8. アナログ・デジタルユニットの回路構成

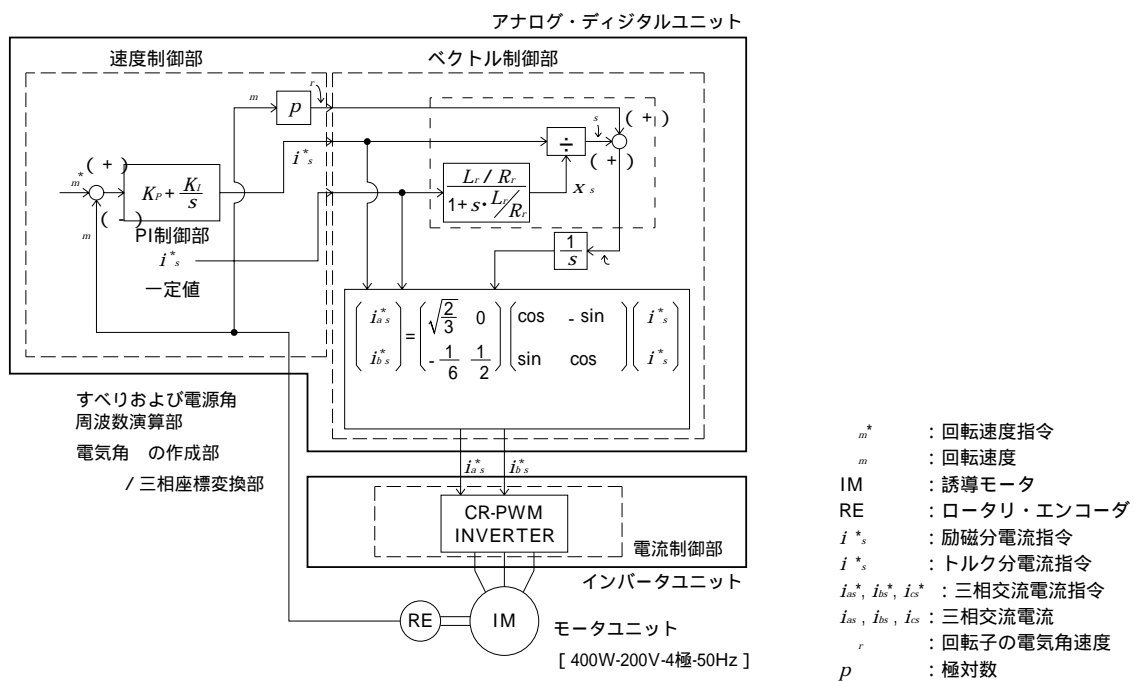
図18は、ベクトル制御システムのブロック図である。アナログ・デジタルユニットは、図18に示す速度制御部およびベクトル制御部の演算を行うユニットであり、一連の演算処理は、汎用素子で構成された電子回路により実現される。

学習者は、演算増幅回路素子、論理素子およびEPROMを主として用いた本ユニットの制御回路の設計・製作実習および動作実験を通して、ベクトル制御理論ならびにアナログ・デジタル素子を用いた電子制御回路について総合的に学習することがで

きる。また、インバータユニットおよびモータユニットとの組み合わせにより、ベクトル制御による三相誘導モータの可変速ドライブの実験実習を行うことができる。

図19および図20は、本ユニットの回路図である。表2は、その部品表である。ユニットの回路は、

- (1) 速度制御部
 - 1) 始動・停止スイッチ部
 - 2) 速度検出部
 - 3) PI速度制御部
- (2) ベクトル制御部
 - 1) すべりおよび電源角周波数演算部



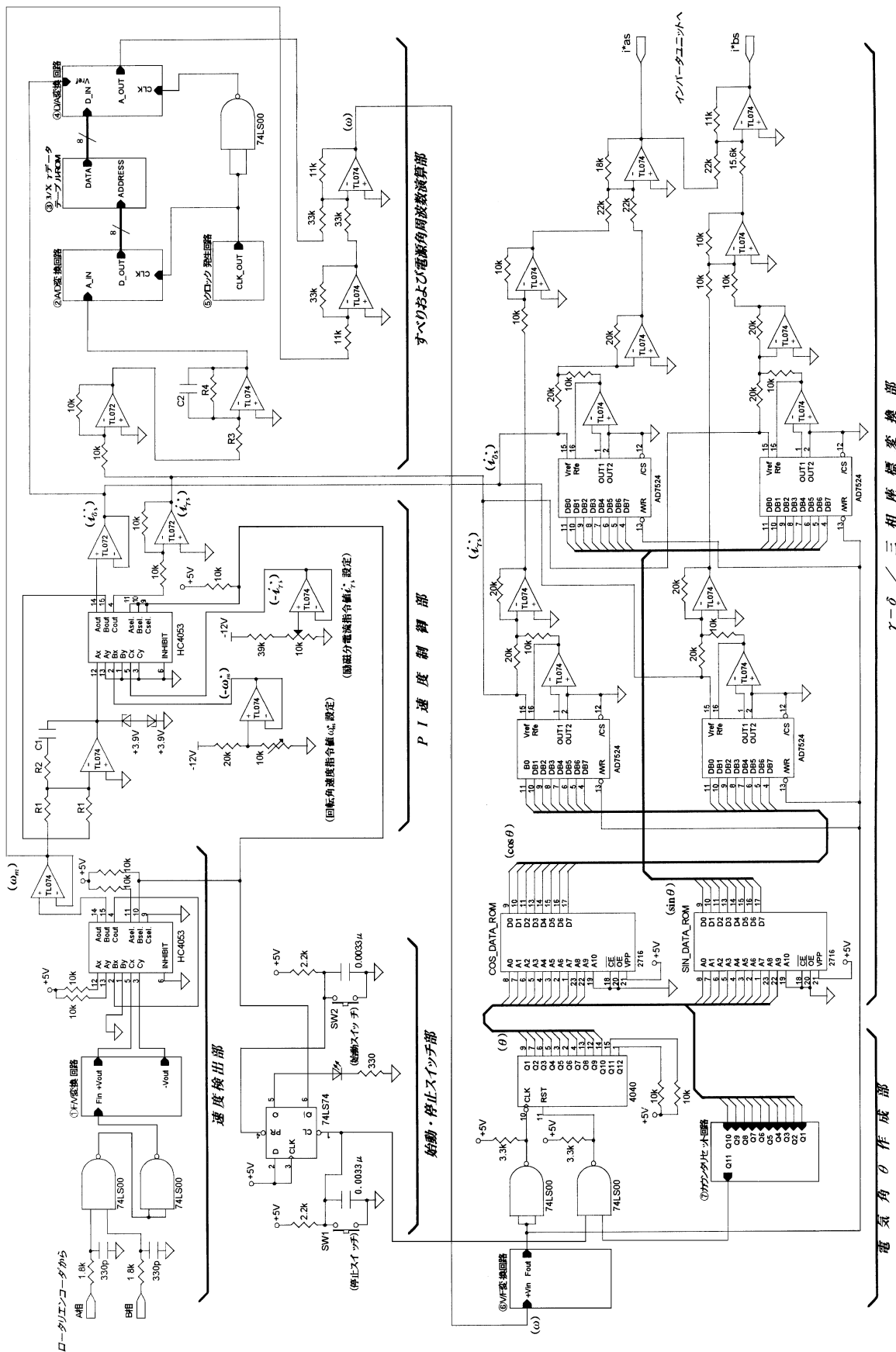
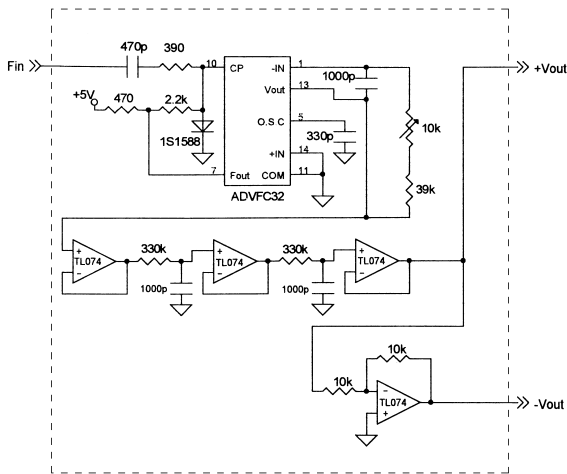


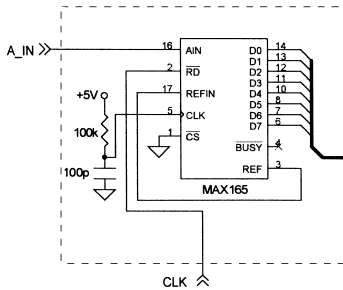
図19 アナログ・デジタルユニット回路図

γ-θ / 三相座標変換部

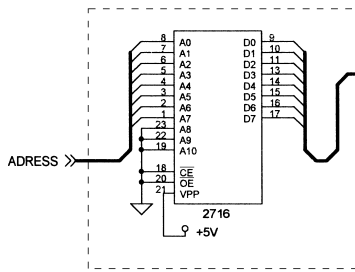
電圧角の作成部



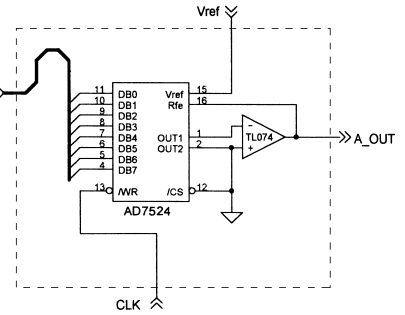
F/V変換回路



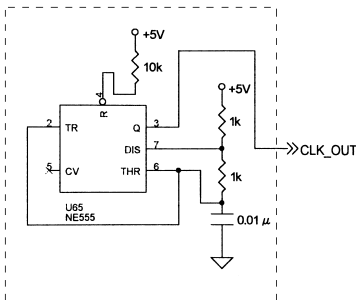
A/D変換回路



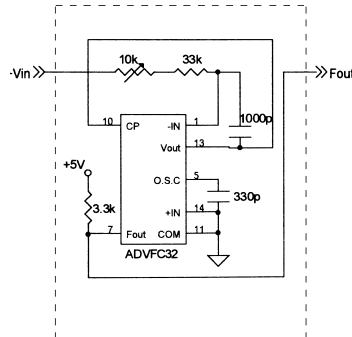
3/x データテーブルROM



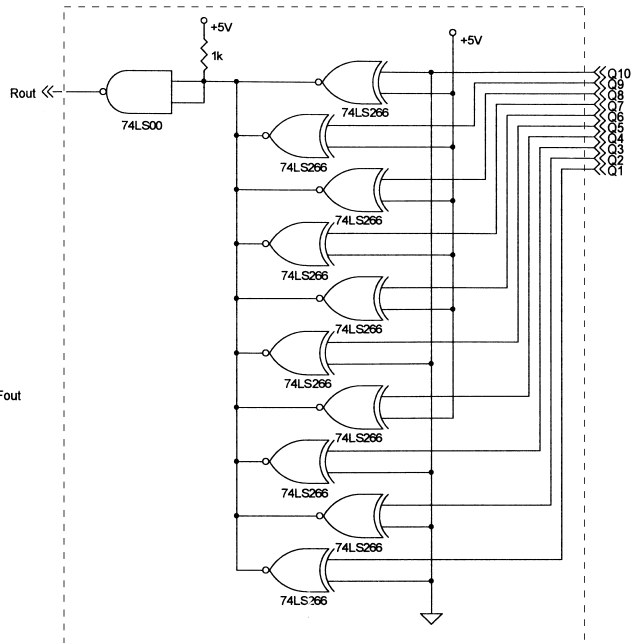
D/A変換回路



クロック発生回路



V/F変換回路



カウンタリセット回路

2) 電気角 作成部

3) - /三相座標変換部

から構成され、ブレッドボード上に製作される(第3章および図4を参照)。

図19に示した本ユニットの制御回路における信号の流れを簡単に説明する。

始動・停止スイッチ部は、始動・停止信号を発生し、アナログスイッチの制御および電気角 作成部のカウンタのリセットを行う。速度検出部は、ロータリ・エンコーダから得られる回転角速度 ω_m をパルス周波数からアナログ電圧値に変換する。PI速度制御部は、回転角速度指令値 ω_m^* および励磁分電流指令値 i_s^* を設定し、設定した回転角速度指令値 ω_m^*

図20 図19における ~ の詳細図

と回転角速度 ω_m からトルク分電流指令値 i_s^* を出力する。すべりおよび電源角周波数演算部は、励磁分電流指令値 i_s^* 、トルク分電流指令値 i_s^* および回転角速度 ω_m からすべり電源角周波数 ω_s 、さらに固定子電流の電源角周波数 ω_s を演算し電気角作成部へ出力する。電気角作成部は、電源角周波数 ω_s を電気角 θ_e に変換する。・ / 三相座標変換部は、トルク分電流指令値 i_s^* 、励磁分電流指令値 i_s^* および電気角 θ_e から、三相交流電流指令値のa相、b相分 (i_{as}^* , i_{bs}^* いずれも瞬時値) を出力する。

つづいて各部について詳述する。

8.1 速度検出部および始動・停止スイッチ部

速度検出部は、後段で行うアナログ回路演算のために、ロータリ・エンコーダから得られる回転角速度 ω_m を、F/V変換回路を用いてパルス周波数からアナログ電圧値に変換する。F/V変換器出力はリップルを含むため、ローパスフィルタ(LPF)により交流成分をカットする必要がある。

本ユニットでは、図19に示すように、ロータリ・エンコーダ(1000P/R)から出力されるA相とB相パルス(90°の位相差)をAND演算し、デューティ比25%のパルスとして、F/V変換回路(図19、図20の)に入力している。F/V変換回路では、F/V変換器(ADVFC32, アナログ・デバイス)により、0~100[kHz]のパルス周波数を0~+10[V]のアナログ電圧値に変換している。したがって、1500[rpm]でモータが回転している場合、F/V変換器から+2.5[V]の出力電圧値が得られる。

出力部にはカットオフ周波数 $f_c = 500$ [Hz]のLPFを2段用いて出力電圧のリップルを除去している。始動および停止信号は、D-F.F.を用いて生成して

表2 アナログ・デジタルユニット部品表

速度検出部および始動・停止スイッチ部

部品名	型名・仕様	数量	
抵抗	330	1	
	390	1	
	470	1	
	1.8k	2	
	2.2k	3	
	10k	6	
	39k	1	
	330k	2	
	可変抵抗器	10k	1
	コンデンサ	330pF	3
	470pF	1	
	1000pF	3	
	0.0033 μ F	2	
	0.1 μ F	2	
ダイオード	1S1588	1	
LED	TLG102	1	
TTL	74LS00	1	
	74LS74	1	
アナログスイッチ	74HC4053	1	
オペアンプ	TL074	1	
F/Vコンバータ	ADVFC32 (アナログ・デバイス)	1	
プッシュスイッチ	AP1F-2M (FUJISOKU)	2	

速度制御部

部品名	型名・仕様	数量
抵抗	R_1 (=1k)	2
	R_2 (=100k)	1
	10k	3
	20k	1
	39k	1
	100k	1
可変抵抗器	10k	2
コンデンサ	C_1 (=0.47 μ F)	1
ツェナーダイオード	3.9V	2
オペアンプ	TL074	1
	TL072	1
アナログスイッチ	74HC4053	1

すべりおよび電源角周波数演算部

部品名	型名・仕様	数量	
抵抗	R_3 (=68k)	1	
	R_4 (=68k)	1	
	1k	2	
	10k	3	
	11k	2	
	33k	3	
	68k	2	
	100k	1	
	コンデンサ	C_2 (=1 μ F)	1
		0.01 μ F	1
タイマIC	NE555	1	
TTL	74LS00	1	
オペアンプ	TL074	1	
	TL072	1	
A/Dコンバータ	MAX165(マキシム)	1	
D/Aコンバータ	A D 7524(アナログ・デバイス)	1	
EPROM	μ PD2716D (NEC)	1	

電気角作成部

部品名	型名・仕様	数量
抵抗	1k	1
	3.3k	3
	10k	2
	33k	1
可変抵抗器	10k	1
コンデンサ	330pF	1
	1000pF	1
	0.1 μ F	2
TTL	74LS00	1
	74LS266	3
カウンタIC	4040B	1
V/Fコンバータ	ADVFC32(アナログ・デバイス)	1

・ / 三相座標変換

部品名	型名・仕様	数量
抵抗	10k	9
	11k	1
	15.6k (=10k+5.6k)	1
	18k	1
	20k	8
	22k	3
	オペアンプ	TL074
乗算型D/Aコンバータ	AD7524 (アナログ・デバイス)	4
EPROM	μ PD2716D (NEC)	2

いる。始動信号によって、F/V変換回路で得られた回転角速度 ω_m (アナログ電圧値)は、アナログスイッチ(HC4053)を通過し、次段のPI制御部へ出力される。また、停止信号によって、速度検出部とPI速度制御部のアナログスイッチ(HC4053)の信号通過が遮断されるとともに、電気角作成部のカウンタICがリセットされる。

8.2 PI速度制御部

PI速度制御部は、主として回転角速度 ω_m と回転

角速度指令値 ω_m^* の偏差にPI制御演算を行い、トルク分電流指令値 i_s^* を作成する。

図21にオペアンプを用いたPI制御演算回路を示す。この回路の入出力関係は、

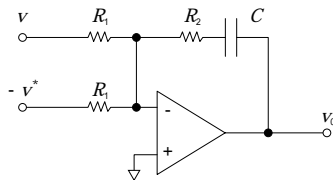


図21 PI制御演算回路

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{R_2 C s} \right) (-v^* + v) \quad \dots(24)$$

である。したがって、(24)式を、

$$i_s^* = \left(K_P + K_I \frac{1}{s} \right) (-\omega_m^* + \omega_m) \quad \dots(25)$$

$$= K_P \left(1 + \frac{1}{(K_P/K_I)s} \right) (-\omega_m^* + \omega_m)$$

と置いて考えれば、各素子の値は、

$$\frac{R_2}{R_1} = K_P \cdot 20 \quad \dots(26)$$

$$C R_2 = \frac{K_P}{K_I}$$

となるように決定すればよい。ここで、20 の係数を(26)式で乗じているのは、回転角速度[rad/s]や電流値[A]の値を、実際の演算回路では電圧値[V]によって取り扱っていることに由来する。つまり、回転速度1500[rpm]を2.5[V]に設定していることから、1[rad/s]=0.1/2 [V]である。そこで、比例係数 K_P は、偏差 $(\omega_m^* - \omega_m)$ [rad/s] に対してトルク分電流指令値 i_s^* [A] を出力する係数なので、1[A/rad/s]=20 [V]となる。

供試機の三相誘導モータの比例ゲイン K_P および積分ゲイン K_I は、第7章で求めたように、

$$K_P = 1.66$$

$$K_I = 33.2$$

であることから、例として各素子の値は、

$$R_1 = 1 \text{ [k } \Omega \text{]}, R_2 = 100 \text{ [k } \Omega \text{]}$$

$$C = 0.47 \text{ [} \mu\text{F]}$$

と決定すればよい。また、回路保護のためにツェナ

ーダイオードを用いて、トルク分電流指令値 i_s^* の出力値を制限している。

PI速度制御部では、励磁分電流指令値 i_f^* も作成され、PI速度制御演算出力であるトルク分電流指令値 i_s^* とともに、アナログスイッチ(HC4053)を通過し、すべりおよび電源角周波数演算部へ出力される。

8.3 すべりおよび電源角周波数演算部

すべりおよび電源角周波数演算部では、図18の破線内に示す演算を行う。一般に、 x_s および i_s を表す電圧信号値は非常に小さくなるため、ノイズの影響を受けやすい、またデジタル値に変換する際に量子化が粗くなる等の問題が生じる。このため、図22のブロック図に示すように回路構成を工夫することによって前述した問題を回避している。まず、 i_s^* に一次遅れ演算を行った結果は、 R_r/L_r (≈ 10) が乗じられた値として演算する。この値($x_s \cdot R_r/L_r$)をA/Dコンバータ、ROMおよびD/Aコンバータで構成されるFunction tableに入力するようにし、アナログ量の出力値として $3/x_s$ の値が得られるようにROMのデータを作成する。その後、最終段にて1/3の演算が行われ補正される。

図19の“すべりおよび電源角周波数演算部”が図22の演算を行う回路である。まず、一次遅れフィルタの設計法について述べる。図23に一次遅れフィルタの回路を示す。

この回路の入出力関係は、

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + C R_2 s} \cdot (-V_{in}) \quad \dots(27)$$

で表される。一方、ここで行いたい演算は、

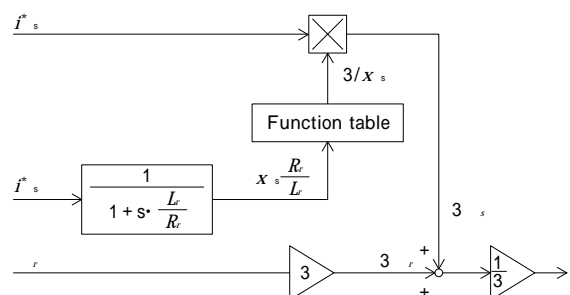


図22 すべりおよび電源角周波数演算部のブロック図

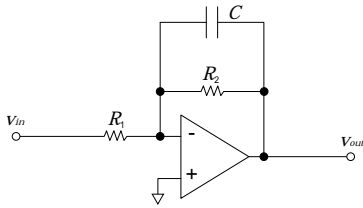


図23 一次遅れフィルタ回路

$$\frac{R_r}{L_r} \cdot X_s = \frac{1}{1 + \frac{L_r}{R_r} s} \cdot (-i^* s) \quad \dots(28)$$

である。したがって、

$$\frac{R_2}{R_1} = 1, \quad CR_2 = \frac{L_r}{R_r}$$

となるように、各素子の値を決定すればよい。

例えば、二次時定数 $L_r/R_r = 0.0708$ [s] のとき (<その3>表1参照)、

$$R_1 = 70.8 \text{ [k]} \approx 68 \text{ [k]}$$

$$R_2 = 70.8 \text{ [k]} \approx 68 \text{ [k]}$$

$$C = 1 \text{ [}\mu\text{F]}$$

とすればよい。

次に、Function table部の設計法について述べる。モータの回転速度が1500[rpm] (つまり回転子電気角速度 ω_r が100 [rad/s] (=2・50[Hz]) のとき、エンコーダパルスは25[kHz] (=1500[rpm]/60[s]・1000[pulse]) であり、そのときの電圧信号値は+2.5[V] に設定している。したがって、回転子電気角速度1[rad/s] は、1/40 [V] (=2.5[V]/100 [rad/s]) で表される。また、 i^*_{as} 、 i^*_{bs} 等の電流値は、1[A] を1[V] で表していることから、すべり電気角周波数 ω_s を表す電圧信号値は (i^*_{as}/X_s) (1/40) のように演算すればよい。

以上のことから、本ユニットにおいては、 $(R_r/L_r) \cdot X_s$ で表されるROMアドレスに対応して、 $3/X_s \cdot 1/40$ の値(8ビットデジタルコード)を除算データテーブルROMに書き込んでいる。

一連の演算処理は、タイマーIC(NE555)を用いた回路(図20)で作成されるクロック(48.1[kHz])のタイミングに同期して行われる。

8.4 電気角の作成部

電気角の作成部は、図18の部分の演算を行う。すなわち、アナログ電圧値である電源角周波数 ω_s を、 ω_s /三相座標変換部に入力するデジタルデータの電気角 θ_s に変換する。

図19の“電気角作成部”が、この演算を行うための回路である。まず、アナログ電圧値である電源角周波数 ω_s をV/F変換回路(図20)により、パルス周波数に変換する(0~+10[V] 0~100[kHz])、8.1節参照)。この出力パルスをバイナリカウンタでカウントアップすることにより積分演算を行い、電源角周波数 ω_s から電気角 θ_s を10bitデジタルデータ ($2^{10}=1024 > 1000$) として得ている。また、ロータリ・エンコーダの分解能は100(P/R)であることから、バイナリカウンタは1000パルスでリセットされるようにしている。

8.5 α /三相座標変換部

ここでは、ベクトル制御理論に基づいて演算が行われてきた α - 座標系の電流値であるトルク分電流指令値 i^*_{as} 、励磁分電流指令値 i^*_{bs} をa相、b相分の三相交流指令値 i^*_{as} 、 i^*_{bs} (瞬時値) に変換する。

三相交流座標系において各相の電流には、

$$i^*_{as} + i^*_{bs} + i^*_{cs} = 0$$

の関係があるため、このユニットでは、 i^*_{as} 、 i^*_{bs} を求め、インバータユニットにおいて、

$$i^*_{cs} = -(i^*_{as} + i^*_{bs})$$

の演算を行っている。したがって、座標変換の式は、

$$\begin{pmatrix} i^*_{as} \\ i^*_{bs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 \\ -\frac{1}{6} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos & -\sin \\ \sin & \cos \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i^*_{as} \\ i^*_{bs} \end{pmatrix} \quad \dots(29)$$

である。

本ユニットでは、三角関数の演算は、ROMに書き込まれた電気角 $\theta_s = 0^\circ$ から 720° の \sin 、 \cos の値を呼び出すことによって行っている。その値と、トルク分電流指令値 i^*_{as} および励磁分電流指令値 i^*_{bs} を、乗算型D/Aコンバータを用いて演算し、アナログ値を得る。最終的にオペアンプによる演算回路で、三相交流電流指令値 i^*_{as} 、 i^*_{bs} (いずれも瞬時値) が得られる。