

TB9M003FG

センサーレス矩形波駆動（120 度通電）制御事例

本資料について

対象と目的

本資料では、TB9M003FG を使用したブラシレスモーターの位置センサーレス矩形波制御について説明します。特に車載の電動ウォーターポンプや電動オイルポンプ、電動ファン、電動ブロワーに用いられるブラシレスモーターの制御システムを構築する際の参考になれば幸いです。

なお、本資料は当社が提供するリファレンス SW（ソフトウェア）（注）を活用していることを前提に記載しています。

想定した対象者

本資料は、TB9M003FG と当社が提供するリファレンス SW を組み合わせて、上記のモーター制御システムを開発しようとするユーザーを対象者としています。

（注） 当社営業窓口までお問い合わせください

東芝デバイス&ストレージ株式会社

これは参考資料です。本資料での最終機器設計はしないでください。

目次

本資料について	1
対象と目的	1
想定した対象者	1
目次	2
1. 本資料の意図と狙い	4
2. 概要	4
2.1. SWD の概要	4
2.2. パラメーター一覧	6
3. システム構成および原理	8
3.1. モーター制御システムの構成	8
3.2. 位置検出（誘起電圧ゼロクロス検出）の原理	9
4. SWD（Square Wave Drive）によるモーター制御の概要	9
4.1. SWD の状態遷移	9
4.2. 動作波形例	10
5. PI（Proportional Integral）制御の概要	11
5.1. PI 制御の原理	11
5.2. 速度制御の概要	11
記載内容の留意点	12
使用上のご注意およびお願い事項	12
使用上の注意事項	12
使用上の留意点	13
製品取り扱い上のお願い	14

図目次

図 2.1 モーター制御システムのイメージ図 4

図 2.2 SWD における回路動作の例（V 相から U 相に通電時） 4

図 3.1 モーター制御システムの構成 8

図 3.2 SWD における各波形のイメージ 9

図 4.1 モーター制御の状態遷移 9

図 4.2 SWD の動作波形例 10

図 5.1 PI 制御のブロック図 11

図 5.2 速度制御のブロック図 11

表目次

表 2.1 ブラシレスモーターの駆動方式の特徴 4

表 2.2 通電モードと合成磁界の関係 5

表 2.3 設定パラメーター一覧 6

1. 本資料の意図と狙い

マイコンとモータードライバーを統合した IC「SmartMCD™」のシリーズ製品の TB9M003FG は、3 相ブラシレスモーターのセンサレス制御に適しています。

本資料では、弊社が提供するリファレンス SW（ソフトウェア）を使用した位置センサレス矩形波制御（SWD：Square Wave Drive）について説明します。

本資料が、より良いシステム構築の一助となれば幸いです。

2. 概要

2.1. SWD の概要

ブラシレスモーターの駆動方式の特徴を表 2.1 に示します。駆動方式は、SWD、FOC（Field-Oriented Control）などがあります。

本資料では、TB9M003FG を用いた SWD について説明します。FOC の制御事例については、アプリケーションノート「1 シャントセンサレスベクトル制御事例」で解説しています。

表 2.1 ブラシレスモーターの駆動方式の特徴

駆動方式	長所	短所	備考
SWD	処理が単純	騒音大	位置センサレス化可能 FOC よりも低速で位置検出可能
FOC	低騒音、高効率	処理が複雑	位置センサレス化可能 高速領域で高精度に制御可能 低速領域で位置検出精度が制限

モーター制御システムのイメージを図 2.1 に示します。SWD で V 相から U 相への通電時の回路動作の例を図 2.2 に示します。

SWD では、インバーターの通電期間を電気角 120 度ごとに切り替えることにより、モーターを駆動します。このため「120 度通電制御」とも呼ばれます。

次ページに示すように、60 度ごとに通電パターンを変化させて合成磁界が回転すると、これに同期して回転子が回転します

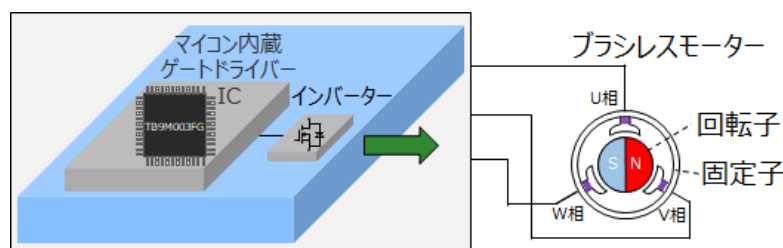


図 2.1 モーター制御システムのイメージ図

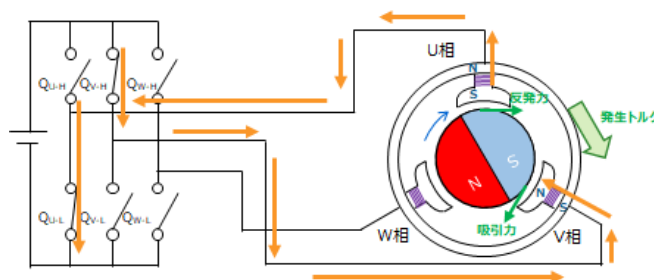


図 2.2 SWD における回路動作の例（V 相から U 相に通電時）

通電モードと合成磁界の関係を表 2.2 に示します。

表 2.2 通電モードと合成磁界の関係

通電モード	2	3	4	5	6	1
PWM 出力パターン	Q_{U-H}					
	Q_{U-L}					
	Q_{V-H}					
	Q_{V-L}					
	Q_{W-H}					
	Q_{W-L}					
電気角[度]	30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 0 30					
通電相	UからV	UからW	VからW	VからU	WからU	WからV
発生トルク						

2.2. パラメーター一覧

リファレンス SW で設定が必要なパラメーターの一覧を表 2.3 に示します。各パラメーターを適切に設定することで、SWD を実現できます。なお、一部パラメーターはデフォルト値から変更する必要がない場合もあります。

表 2.3 設定パラメーター一覧

No.	項目	パラメーター名	単位	説明	備考
1	初期設定	V_MAX	V	電圧の最大値を設定。	使用する基板(電圧検出回路)に依存する。 車載用途では一般的に 40V まで扱う可能性があるため、デフォルト値を 50V としている。
2		SPD_MAX	Hz	モーター速度（電気角）の最大値を設定。	実際に使用するモーターの最大回転速度（電気角）よりも大きな値を設定する。 目安としては、最高回転数の 1.1~1.2 倍程度の設定を推奨する。
3	位置決め	RAMP_UP_TIME_INIPOS	s	ランプアップ時間を設定。	設定するデューティーが、V_INIPOS に到達するまでにかかる時間を設定する。
4		INIPOS_TIME1	s	位置決め時間 1 を設定。	U 相から V 相へ通電する時間を設定する。起動を早めたい場合は、この値を小さくする。
5		INIPOS_TIME2	s	位置決め時間 2 を設定。	U 相から W 相へ通電する時間を設定する。起動を早めたい場合は、この値を小さくする。
6		V_INIPOS	V	位置決め時の電圧指令を設定。	位置決め時の電圧指令を設定する。 モーターが動作しない場合は、指令値を徐々に大きくする。
7	強制転流	V_FORCE	V	強制転流時の電圧指令を設定。	強制転流時の電圧指令を設定する。 モーターが動作しない場合は、指令値を徐々に大きくする。
8		SPD_FORCE_INI	Hz	強制転流時の目標周波数を設定。	設定値が小さ過ぎると、ゼロクロス検出に失敗する可能性がある。
9		RAMP_UP_TIME_FORCE	s	ランプアップ時間を設定。	設定したデューティーが V_INIPOS から V_FORCE に到達するまでにかかる時間を設定する。

No.	項目	パラメーター名	単位	説明	備考
					基本的には変更する必要がないが、必要に応じて調整する。
10	定常	SPD_KP_V	V/Hz	速度制御比例ゲインを設定。	速度制御の応答性や追従性を確認しながら調整する。
11		SPD_KI_V	V/Hzs	速度制御積分ゲインを設定。	速度制御の応答性や追従性を確認しながら調整する。
12		SPD_UP_STEADYL	Hz/s	速度指令（電気角）の加速度の制限を設定。	モーターの加速が遅い場合は、設定値を大きくする。 設定値が大きい場合、慣性が大きなモーターでは追従しない可能性がある。
13		SPD_DW_STEADYL	Hz/s	速度指令（電気角）の減速度の制限を設定。	モーターの減速が遅い場合、設定値を大きくする。 設定値が大き過ぎると、慣性が大きなモーターでは追従できない可能性がある。
14	その他	DEAD_TIME	μs	デッドタイムを設定。	使用する基板（インバーター）に依存する。
15		SPD_TARGET	Hz	モーターの目標速度（電気角）を設定。	設定値を目指して速度指令が上昇する。設定値はSPD_MAX よりも小さく設定する。
16		VDC_MAX	V	最大直流電圧を設定。	必要に応じて調整する。
17		BEMF_STABLE_CNT	—	安定する連続ゼロクロス検出回数を設定。	基本的には変更する必要がないが、必要に応じて調整する。
18		BEMF_TRIAL_CNT	—	起動時の最大通電試行回数を設定。	設定した試行回数以内で、安定してゼロクロス検出をする必要がある。 センサーレス制御に切り替わらない場合、この周波数では安定したセンサーレス制御は実現できない。
19		BEMF_TIMEOUT	s	位置検出のタイムアウト時間を設定。	基本的には変更する必要がないが、必要に応じて調整する。
20		OMEGA_AVE_WINDOW	—	平均値計算の係数を設定。	基本的には変更する必要がないが、必要に応じて調整する。
21		PWM_PERIOD_BOOT	μs	起動から強制転流ステージまでの PWM 周期を設定。	基本的には変更する必要がないが、必要に応じて調整する。
22		PWM_PERIOD_SWL	μs	センサーレス駆動時の PWM 周期を設定。	基本的には変更する必要がないが、必要に応じて調整する。
23		SPD_CTRL_PERIOD	s	速度制御周期を設定。	基本的には変更する必要がないが、必要に応じて調整する。

3. システム構成および原理

3.1. モーター制御システムの構成

モーター制御システムの構成を図 3.1 に示します。

ここでは、SWD の制御方法の概要について説明します。PMD (Programmable Motor Driver) および ENC (Encoder) などの説明の詳細は、ハードウェア・ユーザーマニュアル「TB9M003FG_UM_J」を参照してください。

SWD では、各相の誘起電圧と疑似中性点電圧 V_N を比較することで、電気角 1 周期ごとに 6 回の誘起電圧ゼロクロスを検出し、誘起電圧ゼロクロス検出信号 BEMFX (X は U、V、W) を生成します。次ページの図 3.2 に各波形のイメージを示します。

ENC では、検出された誘起電圧ゼロクロス検出信号のエッジ間隔から、エッジパルスカウント値 CNT を算出します。矩形波制御部では、エッジパルスカウント値 CNT から回転速度 ω を算出します。速度制御部では、回転速度指令 ω_{ref} と回転速度 ω が一致するように PI 制御を行い、SWD 時の PWM 出力に設定するデューティDuty を算出します。PMD では、PMD 通電制御レジスタ[MDOUT]により、位置に応じて各相の PWM 出力設定を変更します。

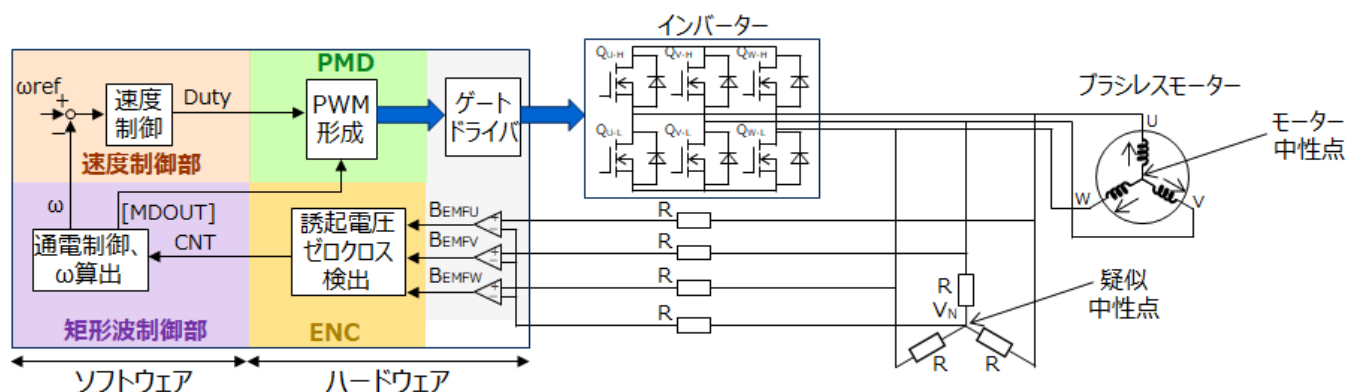


図 3.1 モーター制御システムの構成

3.2. 位置検出（誘起電圧ゼロクロス検出）の原理

SWD における各波形のイメージを図 3.2 に示します。SWD では、3 相のうち 2 相が通電されており、1 相は開放状態です。スイッチが動作し、モーターに電圧が印加されている状態では、モーターの誘起電圧が観測できませんが、開放されている相は誘起電圧が現れ、誘起電圧のゼロクロスを検出することで位置を検出することができます。

例えば図 3.2 は、SWD における各波形のイメージを示しています。U 相誘起電圧としきい値である疑似中性点電圧を比較することにより、電気角 1 周期で 2 回のゼロクロスを検出できます。このゼロクロス検出により、制御に必要な回転子の位置情報を取得することが可能です。図 3.2 には U 相のゼロクロスを検出する場合のみ記載していますが、V、W 相に関しても同様であり、電気角 1 周期で合計 6 回、すなわち 60 度ごとの位置が検出できます。

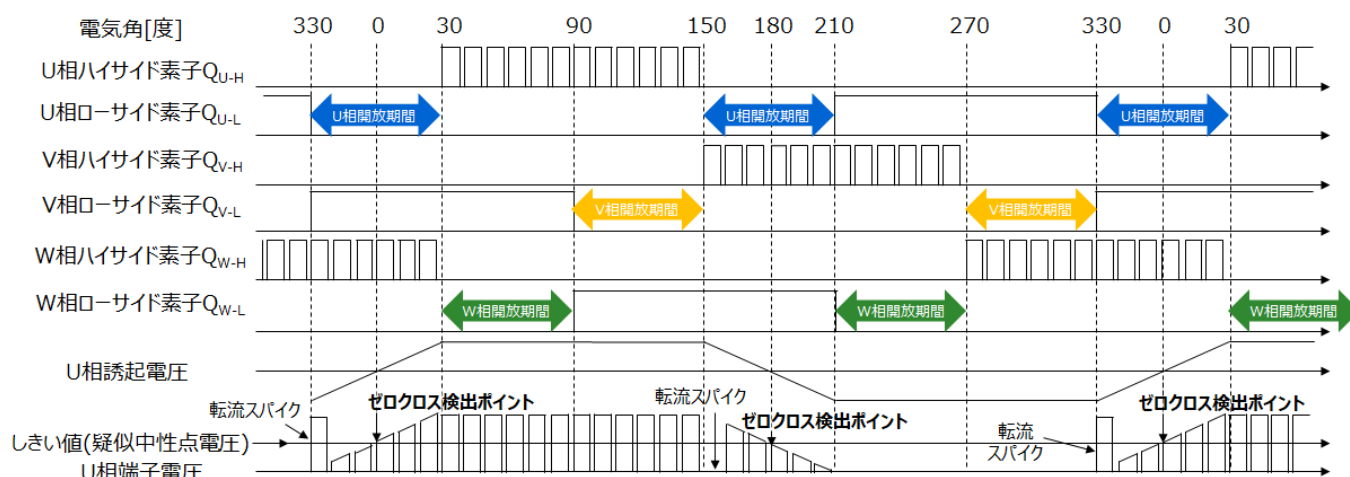


図 3.2 SWD における各波形のイメージ

4. SWD（Square Wave Drive）によるモーター制御の概要

4.1. SWD の状態遷移

モーター制御の状態遷移図を図 4.1 に示します。

前述のとおり、電気角 1 周期ごとに 6 回発生する誘起電圧ゼロクロス信号を検出することで、SWD を実現しています。この誘起電圧はモーター速度に比例するため、起動直後や低速時には、誘起電圧が小さく、位置検出が困難になります。

モーターを停止状態から起動するため、リファレンス SW では図 4.1 のように、「位置決め → 強制転流」で動作させます。モーター速度が上昇し、誘起電圧が十分に検出可能な大きさになった時点で定常状態に遷移させることで、SWD を実現しています。

次ページの図 4.2 に、動作波形を示します。

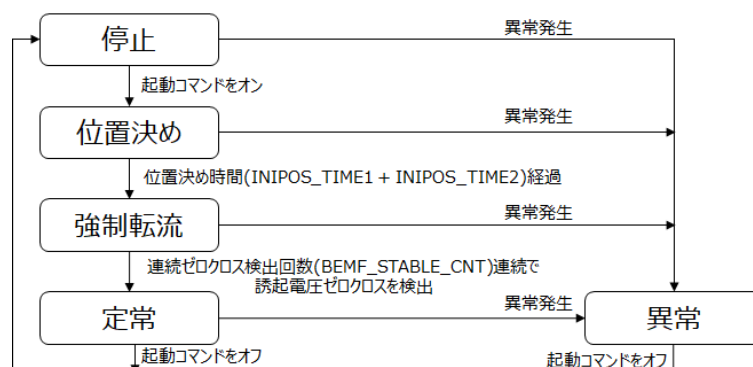


図 4.1 モーター制御の状態遷移

4.2. 動作波形例

モーターが停止している状態から定常状態へ遷移するまでの各波形を図 4.2 に示します。図中の各パラメーターは、起動から定常まで動作における設定例です。各パラメーターは、表 2.3 を参考に使用するモーターやシステム要求に応じて調整してください。

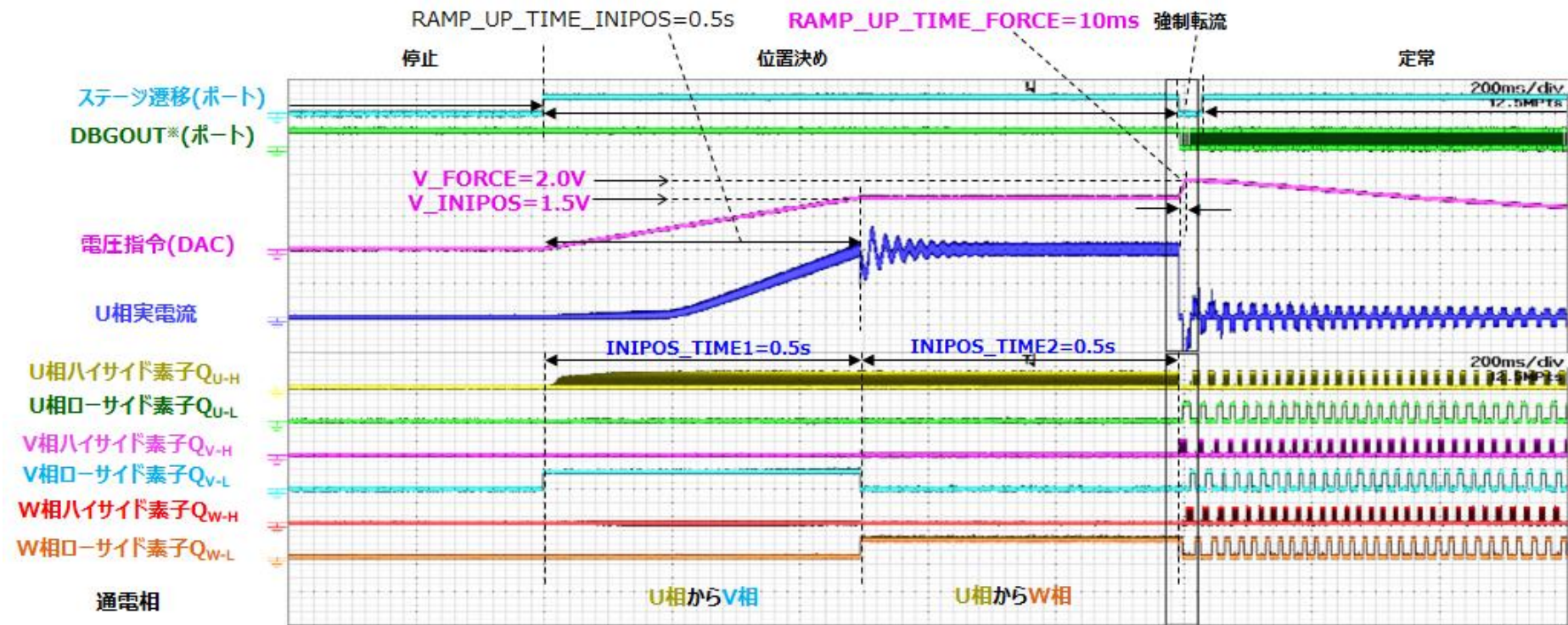


図 4.2 SWD の動作波形例

5. PI (Proportional Integral) 制御の概要

5.1. PI 制御の原理

PI (Proportional Integral) 制御は、フィードバック制御の一種です。この PI 制御では目標値(指令値)と制御量(出力)との偏差がゼロになるように操作量を調整します。PI 制御のブロック図を図 5.1 に示します。

P 制御のみでも目標値に近づけることはできますが、偏差を十分に 0 にはできません。この偏差を無くすように I 制御を動作させます。

一般に制御ゲインが大きい場合、応答が良くなる反面、不安定になりやすくなります。一方、制御ゲインが小さい場合、安定性は増しますが、応答性が低下します。

PI 制御ゲインの安定動作範囲は条件によって異なります。

PI 制御の基本

操作量 = 比例項	+	積分項	
比例項 = 比例ゲイン	×	偏差	
積分項 = 積分ゲイン	×	偏差	× PWM 制御周期 + (前回の積分項)

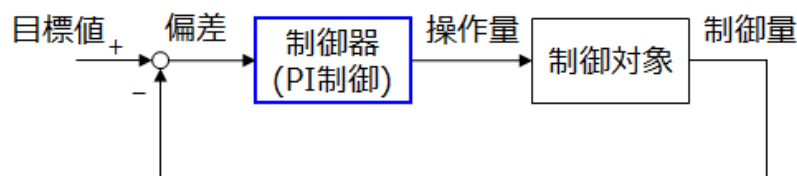


図 5.1 PI 制御のブロック図

5.2. 速度制御の概要

SWD の実現には、PI 制御ゲインの調整が必要です。弊社が提供するリファレンス SW では、図 5.2 に示す速度制御ブロックで構成されます。この PI 制御は、ユーザーが設定した指令速度 ω_{ref} と、検出速度平均値 ω_{ave} が一致するように出力を調整します。

なお、PI 制御の出力は電圧指令 V_{ref} ですが、検出した直流電圧の平均値 V_{dc_ave} で V_{ref} を割った結果を Duty として算出し、PWM のパルス幅を設定します。

速度制御の調整方法は、基本的に FOC の速度制御と同様です。アプリケーションノート「FOC モーターパラメーター調整手法」を参考に調整してください。

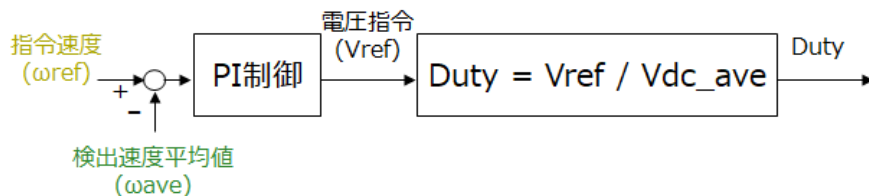


図 5.2 速度制御のブロック図

記載内容の留意点

1. ブロック図
ブロック図内の機能ブロック/回路/定数などは、機能を説明するため、一部省略・簡略化している場合があります。
2. 等価回路
等価回路は、回路を説明するため、一部省略・簡略化している場合があります。

使用上のご注意およびお願い事項

使用上の注意事項

- (1) 絶対最大定格は複数の定格の、どの1つの値も瞬時たりとも超えてはならない規格です。
複数の定格のいずれに対しても超えることができません。
絶対最大定格を超えると破壊、損傷および劣化の原因となり、破裂・燃焼による傷害を負うことがあります。
- (2) 過電流の発生や IC の故障の場合に大電流が流れ続けないように、適切な電源ヒューズを使用してください。IC は絶対最大定格を超えた使い方、誤った配線、および配線や負荷から誘起される異常パルスノイズなどが原因で破壊することがあり、この結果、IC に大電流が流れ続けることで、発煙・発火に至ることがあります。破壊における大電流の流出入を想定し、影響を最小限にするため、ヒューズの容量や溶断時間、挿入回路位置などの適切な設定が必要となります。

使用上の留意点

- (1) 過電流検出回路
過電流検出回路はどのような場合でも IC を保護するわけではありません。動作後は、速やかに過電流状態を解除するようにお願いします。
絶対最大定格を超えた場合など、ご使用方法や状況により、過電流制限回路が正常に動作しなかったり、動作する前に IC が破壊したりすることがあります。また、動作後、長時間過電流が流れ続けた場合、ご使用方法や状況によっては、IC が発熱などにより破壊することがあります。
- (2) 熱遮断回路
熱遮断回路（通常：サーマルシャットダウン回路）は、どのような場合でも IC を保護するわけではありません。動作後は、速やかに発熱状態を解除するようにお願いします。
絶対最大定格を超えて使用した場合など、ご使用法や状況により、熱遮断回路が正常に動作しなかったり、動作する前に IC が破壊したりすることがあります。

製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事情報の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>