

## TB9M003FG

# FOC モーター制御パラメーターの調整法

### 本資料について

#### 対象と目的

本資料では、SmartMCD™ TB9M003FG を使用する際、ブラシレス DC モーターの位置センサーレスベクトル制御に必要なパラメーターの調整方法について一例をご紹介します。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、電動ブロワーなどで使用するブラシレス DC モーターの制御システムを構築する際に、ご参考になれば幸いです。

また、本資料では当社の提供するリファレンス SW<sup>(注)</sup> を活用されていることを前提に説明します。

#### 想定した対象者

本資料は、TB9M003FG と組み合わせて当社が提供するリファレンス SW の活用を考えている上記モーター制御システムを開発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
目次 .....	2
1. 本資料の意図と狙い .....	6
2. 概要 .....	6
2.1. パラメータ調整手順 .....	6
2.1.1. 第1段階：簡易調整 .....	6
2.1.2. 第2段階：微調整 .....	6
2.2. パラメータ一覧 .....	8
3. 制御パラメータ設定 .....	13
3.1. モーター制御の状態遷移 .....	13
3.2. ステージの遷移および制御状態 .....	14
3.3. FOC の実験波形 .....	15
4. 電流検出に関するパラメータ設定 .....	16
4.1. 電流検出に関するパラメータの概要 .....	16
4.1.1. シャント抵抗の両端にリング発生時の設定 .....	16
4.1.2. シフト 2PWM の電流検出タイミング .....	16
4.2. 電流検出に関するパラメータの設定例 .....	17
4.2.1. 電流誤検出確認フラグが発生の場合 .....	18
5. モーターパラメータ測定 .....	19
5.1. モーターパラメータ測定の概要 .....	19
5.2. 抵抗測定 .....	19
5.3. インダクタンス測定 .....	20
5.4. 逆起電力定数測定 .....	21
5.5. 極数測定 .....	22
6. PI 制御ゲイン調整 .....	23
6.1. PI 制御ゲインの概要 .....	23
6.2. 各 PI 制御ゲインの調整手順 .....	24
6.2.1. ①電流制御ゲイン(位置決めステージにおける調整を推奨) .....	24
6.2.2. ②位置推定ゲイン(チェンアップステージにおける調整を推奨) .....	24
6.2.3. ③速度制御ゲインの調整(定常ステージで調整) .....	24
6.3. 電流制御の概要 .....	24
6.3.1. 電流制御ゲインの調整方法 .....	25
6.4. 位置推定の概要 .....	26
6.4.1. 位置推定ゲインの調整 .....	27
6.5. 速度制御の概要 .....	29
6.5.1. 速度制御ゲインの調整 .....	30

7. MTS (Motor Tuning Support) による調整.....	31
7.1. MTS の概要.....	31
7.1.1. MTS 画面の説明.....	31
7.1.2. MTS 使用前の準備.....	32
7.1.3. MTS ウィンドウの説明.....	33
7.2. MTS の使用方法.....	34
7.2.1. モーターパラメータの自動測定および PI 制御ゲインの自動計算に必要なパラメータ一覧.....	34
7.2.2. パラメータ設定ウィンドウ.....	36
7.2.3. (A):PWM モード設定に関するパラメータの測定.....	37
7.2.4. (B):R、L の測定および電流制御ゲインの設定.....	38
7.2.5. (C): $K_e$ 、 $J$ の測定および位置推定ゲイン、速度制御ゲインの設定.....	41
7.2.6. (D):(A)-(C)の設定値を使用した FOC によるモーター駆動.....	44
記載内容の留意点.....	45
使用上のご注意およびお願い事項.....	45
使用上の注意事項.....	45
使用上の留意点.....	46
製品取り扱い上のお願い.....	47

## 目次

図 2.1	パラメータ調整手順のフローチャート	6
図 2.2	簡易調整のフローチャート	7
図 2.3	微調整のフローチャート	7
図 3.1	モーター制御の状態遷移図	13
図 3.2	FOC の実験波形	15
図 4.1	シャント抵抗両端電圧に発生するリンギング	16
図 4.2	シフト 2PWM における電流検出タイミング	17
図 4.3	シフト 2PWM における電流検出タイミング	17
図 4.4	シフト 2PWM における電流検出タイミング	18
図 5.1	U-V 間の抵抗の測定例	19
図 5.2	供試モーターを回転させたときの U-V 線間インダクタンスの変化のイメージ	20
図 5.3	U-V 間のインダクタンスの測定例	20
図 5.4	逆起電力定数の測定例	21
図 5.5	駆動モーターで極数 4 の供試モーターを回転させたときの誘起電圧波形(@1,000rpm)	21
図 5.6	供試モーターをある一定速度で回転させた場合の誘起電圧(相電圧)のイメージ	21
図 5.7	極数測定のイメージ(極数 4 のモーター)	22
図 5.8	極数測定の例(極数 4 のモーター)	22
図 6.1	PI 制御のブロック図	23
図 6.2	位置決めステージのブロック図	24
図 6.3	電流制御のブロック図	24
図 6.4	電流制御ゲインの調整例	25
図 6.5	位置推定ゲイン調整のブロック図	26
図 6.6	位置推定のブロック図	26
図 6.7	位置推定のイメージ	27
図 6.8	位置推定ゲインの調整例	28
図 6.9	FOC のブロック図	29
図 6.10	速度制御のブロック図	29
図 6.11	負荷変動による電流指令値の変化イメージ	29
図 6.12	速度制御ゲインの調整例	30
図 7.1	MTS 画面のウインドウ表示の一例	31
図 7.2	MTS 画面(基板情報表示)	32
図 7.3	「Motor Tuning Support」ウインドウの拡大図	33
図 7.4	「Motor Tuning Support」ウインドウの一部拡大図	36
図 7.5	PWM モード設定に関するパラメータの測定の画面	37
図 7.6	R、L の測定の画面	38

図 7.7	電流制御ゲインの初期値計算の画面 .....	39
図 7.8	電流制御ゲイン調整の画面 .....	40
図 7.9	Ke、J の測定時の画面 .....	41
図 7.10	位置推定、速度制御ゲインの初期値計算の画面 .....	42
図 7.11	位置推定、速度制御ゲイン設定の画面 .....	43
図 7.12	モーター駆動の画面 .....	44

## 表目次

表 2.1	設定パラメーター一覧 .....	8
表 3.1	ステージの遷移および制御状態 .....	14
表 7.1	MTS の設定パラメーター一覧 .....	34

## 1. 本資料の意図と狙い

マイコン内蔵ゲートドライバーIC「SmartMCD™」のシリーズ製品 TB9M003FG は、ブラシレス DC モーターの位置センサーレスベクトル制御(FOC : Field-Oriented Control)に適しています。

本資料では、当社が提供するリファレンス SW を使用した FOC によるモーター制御のパラメーター調整方法をご紹介します。

FOC の実現には、使用するモーターに応じて各パラメーターを調整する必要があります。適切なパラメーター調整はシステムによって異なるため、本資料では一例を紹介します。

本資料を参照いただき、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. パラメーター調整手順

本資料では、FOC で必要なパラメーター調整を 2 段階に分けて説明します。調整方法の一例ですので、アプリケーションやシステムに応じて変更してください。

FOC におけるパラメーター調整のフローチャートを図 2.1 に示します。

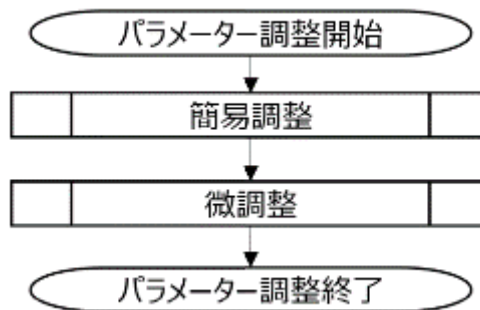


図 2.1 パラメーター調整手順のフローチャート

#### 2.1.1. 第 1 段階 : 簡易調整

第 1 段階として、FOC でモーター制御(リファレンス SW における定常ステージで安定して制御)できる状態を目指します。簡易調整は、負荷付きで実施しても構いませんが、モーターが途中で停止する場合は、無負荷で実施してください。

手動によるモーターパラメーター取得や簡易調整を実施しても問題ありませんが、測定器や SW 変更後のリビルドが必要な場合があります、開発に時間がかかります。

当社は、モーター制御の開発支援するため、PC ツールである SmartMCD™ MTS ( Motor Tuning Support )を提供しています。

MTS は、モーターパラメーターの自動測定および制御ゲインの設定の支援する機能を搭載しています。また、MTS は各パラメーターを動的に変更可能であり、開発効率の向上が期待されます。

#### 2.1.2. 第 2 段階 : 微調整

次に第 2 段階として、実際のシステム要求に合うようにパラメーターを微調整します。

第 1 段階のパラメーターを基準に駆動条件を徐々に厳しくしながら、追従性や応答性が対象のアプリケーションやシステム要求を満たすことを確認して調整します。微調整は必ず手動で実施してください。

簡易調整フローチャートを図 2.2 に示します。

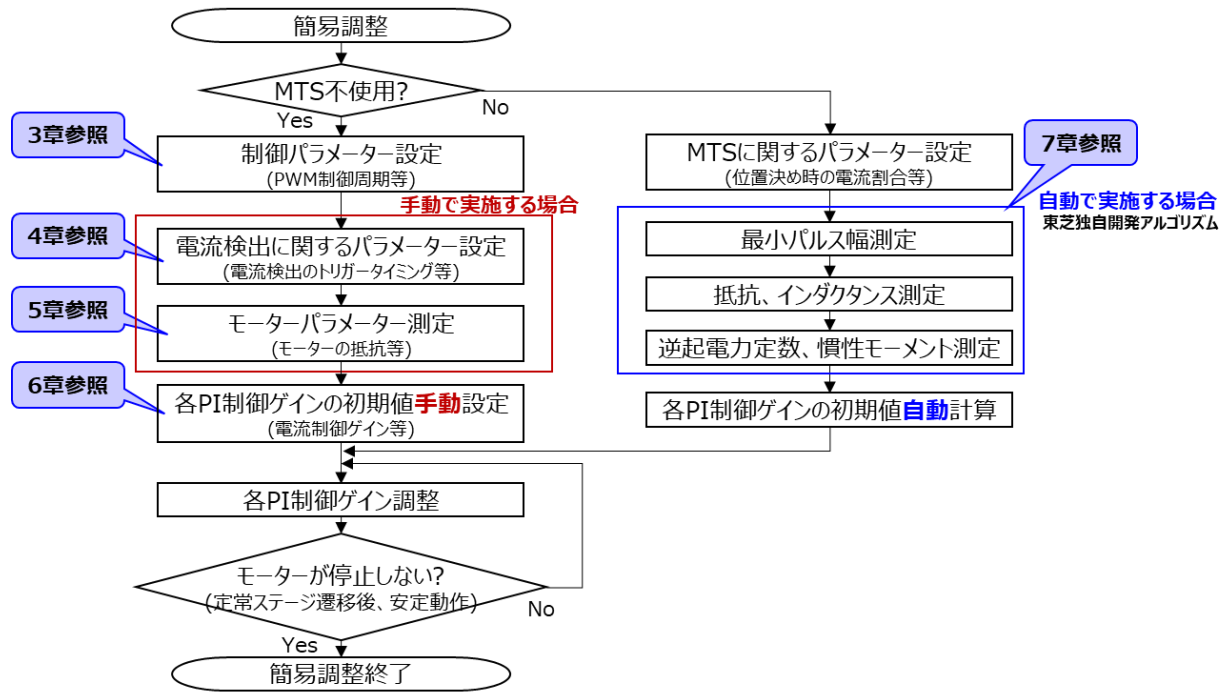


図 2.2 簡易調整のフローチャート

微調整のフローチャートを図 2.3 に示します。

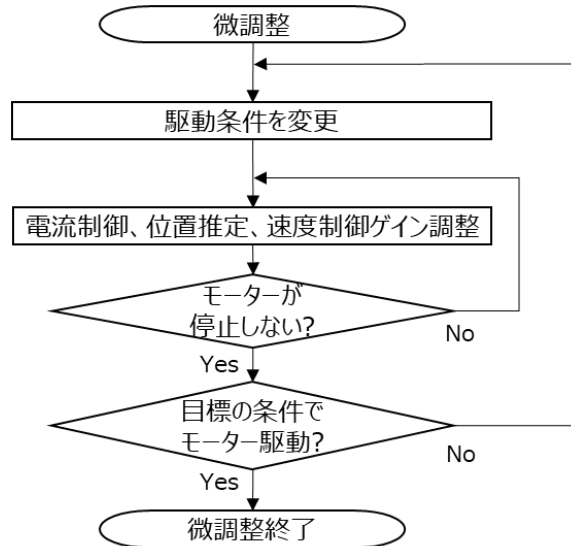


図 2.3 微調整のフローチャート

### 2.2. パラメータ一覧

表 2.1 は、リファレンス SW でモーターごとに設定が必要なパラメータ一覧を示します。

各パラメータを設定することにより、FOC が実現できます。

この章では、各パラメータ調整の概要を説明します。なお、一部パラメータはデフォルト値から変更する必要がない場合があります。

MTS の場合はこの列の  
パラメータ名を使用

表 2.1 設定パラメータ一覧

	パラメータ名 (リファレンス SW 対応の mc_config.h)	パラメータ名 (Motor Studio 対応のヘッダー ファイル)	単位	説明	備考	詳細 記載 の有無
初期 設定	SPD_TARGET	SPD_MAX_DEF	Hz	モーターの目標速度(電気角)を設定。	設定値を目標に速度指令が上昇する。設定値は SPD_MAX よりも小さくする。	×
	V_MAX	V_MAX_DEF	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。 車載では一般的に 40V まで扱う可能性があるため、 50V をデフォルトとする。	×
	A_MAX	A_MAX_DEF	A	電流の最大値を設定。	使用する基板(電流検出回路)およびモーターに流す電 流の最大値も考慮して設定する必要がある。 A_MAX を決定する関係式は以下のとおり。 シャント抵抗値(Ω) × A_MAX(A) × 電流検出アン プゲイン = 2.5(V) ⇔ A_MAX(A) = 2.5(V) / シャント 抵抗値(Ω) / 電流検出アンプゲイン	×
	SPD_MAX	SPD_MAX_DEF	Hz	モーター速度(電気角)の最大値を設定。	実際に回す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、最高回転数 × (1.1~1.2)程度を推奨す る。	×
	A_OVC	A_OVC_DEF	A	SW 過電流保護の電流しきい値を設定。 各相検出電流の振幅の絶対値で判定。	使用するモーターに応じて、減磁しない値を設定す る。A_MAX より必ず小さい値を設定する。	×
	I_LIM	I_LIM_DEF	A	指令制限値を設定。	必要に応じてデフォルト値から変更する。	×
	MTR_R	MTR_R_DEF	ohm	モーターの抵抗値を設定。	使用するモーターに応じて、1 相当りの抵抗値を設 定する。	5.2
	MTR_LQ	MTR_LQ_DEF	mH	モーターの q 軸インダクタンスを設定。	使用するモーターに応じて、1 相当りの q 軸インダ クタンス値を設定する。	5.3
	MTR_LD	MTR_LD_DEF	mH	モーターの d 軸インダクタンスを設定。	使用するモーターに応じて、1 相当りの d 軸インダ クタンス値を設定する。	4.3



	パラメーター名 (リファレンス SW 対応の mc_config.h)	パラメーター名 (Motor Studio 対応のヘッダー ファイル)	単位	説明	備考	詳細 記載 の有無
初期 設定	MTR_KE	MTR_KE_DEF	V/Hz	モーターの逆起電力定数を設定。	使用するモーターに応じて、誘起電圧(相電圧)ピークを電気角周波数で割った逆起電力定数を設定する。	5.4
	POLE	POLE_DEF	-	モーターの極数を設定。	使用するモーターの極数を設定する。	5.5
	PWM_PERIOD	PWM_PERIOD_DEF	μs	PWM 制御周期を設定。	上げ過ぎると騒音となる可能性がある。下げ過ぎると PWM 周期内に処理が間に合わなくなる可能性がある。	×
	DEAD_TIME	DEAD_TIME_DEF	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。	×
	SPD_CTRL_PERIOD	×	μs	速度制御周期を設定。	必要に応じてデフォルト値から変更する。	×
	MAINLOOP_USER_PERIOD	×	μs	メインループにおけるユーザー処理周期を設定。	必要に応じてデフォルト値から変更する。	×
電流 検出	ADC_TIMING0_SHIFT2	ADC_TIMING0_SHIFT2_DEF	μs	シフト 2PWM 時の AD トリガータイミング 0 を設定。	常に V 相電流を取得する必要がある (U 相センターのシフト 2PWM の時)。	4.1.1
	ADC_TIMING1_SHIFT2	ADC_TIMING1_SHIFT2_DEF	μs	シフト 2PWM 時の AD トリガータイミング 1 を設定。	常に W 相電流を取得する必要がある (U 相センターのシフト 2PWM 時)。 注意: AD トリガータイミング 1 は、AD トリガータイミング 0 の値を設定すれば、自動で設定される。	4.1.2 4.2
	NPWM_PHASE_NUM	NPWM_PHASE_NUM_DEF	-	通常 PWM の変調方式の設定(2:2 相変調、3:3 相変調)。	必要に応じて変更する。	×
	NPWM_TH	NPWM_TH_DEF	%	通常 PWM の切り替えデューティのしきい値を設定。	注意) デューティ = $\sqrt{3} \times V_{dq} / V_{dc}$ (ここで、 $V_{dq} = \sqrt{(V_d^2 + V_q^2)}$ であり、 $V_{dc}$ は電源電圧である)	×
	NPWM_HYS	NPWM_HYS_DEF	%	通常 PWM の切り替えデューティのヒステリシス値を設定。	変調方式の切り替えが頻繁に起きる場合は、ヒステリシスを大きく設定する。	×
	SPWM_TH	SPWM1_TH_DEF	%	シフト PWM の切り替えデューティのしきい値を設定。	Duty = $\sqrt{3} \times V_{dq} / V_{dc}$	×
	SPWM_HYS	SPWM1_HYS_DEF	%	シフト PWM の切り替えデューティのヒステリシス値を設定。	変調方式の切り替えが頻繁に起きる場合は、ヒステリシスを大きく設定する。	×
	MINPLS_NPWM2	MINPLS_NPWM2_DEF	μs	通常 PWM2 相変調時の最小パルス幅の設定。	電流の誤検出が発生しない値を設定する必要がある。	○
	MINPLS_NPWM3	MINPLS_NPWM3_DEF	μs	通常 PWM3 相変調時の最小パルス幅の設定。	電流の誤検出が発生しない値を設定する必要がある。	○
	MINPLS_SHIFT1	MINPLS_SHIFT1_DEF	μs	シフト 1PWM 時の最小パルス幅の設定。	電流の誤検出が発生しない値を設定する必要がある。	○
MINPLS_SHIFT2	MINPLS_SHIFT2_DEF	μs	シフト 2PWM 時の最小パルス幅の設定。	電流の誤検出が発生しない値を設定する必要がある。	○	
位置 決め	VD_TARGET_INI1	VD_TARGET_INI1_DEF	V	位置決めに必要な電圧指令値を設定。	位置決め時の始動 d 軸電圧を設定する。電圧駆動時のみ本設定が有効である。 モーターが動かなければ値を徐々に大きくする。	×

	パラメーター名 (リファレンス SW 対応の mc_config.h)	パラメーター名 (Motor Studio 対応のヘッダー ファイル)	単位	説明	備考	詳細 記載 の有無
位置 決め	INIPOS_TIME	INIPOS_TIME_DEF	s	位置決め時間を設定。	基本的に調整の必要なし。起動を早めたい場合は小さくする。	○
	RAMP_UP_TIME_INIPOS	RAMP_UP_TIME_INIPOS_DEF	s	ランプアップ時間を設定。	基本的に調整の必要なし。	6.3.1
	POS_INIPOS_DEG	×	deg	位置決め角度を設定。	基本的に0度を推奨する。	6.3.1
	ID_TARGET_INI	ID_TARGET_INI_DEF	A	位置決めに必要な電流指令値を設定。	モーターが動かなければ徐々に大きくする。	3.2 6.3.1 6.4.1
	ID_KP	ID_KP_DEF	V/A	d 軸電流の電流制御比例ゲインを設定。	電流制御の応答性を確認しながら徐々に大きくする。	○
	ID_KI	ID_KI_DEF	V/As	d 軸電流の電流制御積分ゲインを設定。	電流制御の応答性を確認しながら徐々に大きくする。	○
	IQ_KP	IQ_KP_DEF	V/A	q 軸電流の電流制御比例ゲインを設定。	基本的に d 軸電流の電流制御比例ゲインと同じ値を設定する。	○
	IQ_KI	IQ_KI_DEF	V/As	q 軸電流の電流制御積分ゲインを設定。	基本的に d 軸電流の電流制御積分ゲインと同じ値を設定する。	○
強制 転流	VD_TARGET_INI2	VD_TARGET_INI2_DEF	V	強制転流に必要な追加の電圧指令値を設定。	強制転流時に、VD_TARGET_INI に対して加算する d 軸電圧指令値を設定する。 電圧駆動時にもみ本設定が有効である。モーター電流が減少して回らなくなった場合、設定値を大きくする。	×
	SPD_UP_FORCE	SPD_UP_FORCE_DEF	Hz/s	強制転流時の指令速度の加速度を設定。	モーターの加速が遅い場合、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。	×
	SPD_DW_FORCE	SPD_DW_FORCE_DEF	Hz/s	強制転流時の指令速度の減速度を設定。	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。	×
	SPD_CHANGE_UP_TH	SPD_CHANGE_UP_TH_DEF	Hz	チェンジアップの切り替え周波数を設定。	使用するモーターの誘起電圧に依存する。 調整開始時は大きめに設定して、低速でセンサーレスに切り替える必要があれば徐々に下げながら調整する。	6.4.1
チェン ジアップ	IQ_TARGET_INI	IQ_TARGET_INI_DEF	A	q 軸電流指令の初期値を設定。	無負荷時は小さくて支障ないが、負荷時は負荷に応じて設定が必要である。	6.4.1
	WAIT_TIME_CHGUP		s	チェンジアップ後の待ち時間を設定。	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。	6.4.1
	POS_KP	POS_KP_DEF	Hz/V	位置推定比例ゲインを設定。	d 軸誘起電圧が 0 になるように調整する。	○
	POS_KI	POS_KI_DEF	Hz/Vs	位置推定積分ゲインを設定。	d 軸誘起電圧が 0 になるように調整する。	○
定常	SPD_KP_I1	SPD_KP_I1_DEF	A/Hz	速度制御比例ゲイン 1 を設定。	速度制御の追従性や応答性を確認しながら調整する。	○
	SPD_KI_I1	SPD_KI_I1_DEF	A/Hzs	速度制御積分ゲイン 1 を設定。	速度制御の追従性や応答性を確認しながら調整する。	○

	パラメーター名 (リファレンス SW 対応の mc_config.h)	パラメーター名 (Motor Studio 対応のヘッダー ファイル)	単位	説明	備考	詳細 記載 の有無
定常	SPD_KP_I2	SPD_KP_I2_DEF	A/Hz	速度制御比例ゲイン 2 を設定。	SPD_KP_I1 のみでは、制御がうまくいかない場合に使用する。	×
	SPD_KI_I2	SPD_KI_I2_DEF	A/Hzs	速度制御積分ゲイン 2 を設定。	SPD_KI_I1 のみでは、制御がうまくいかない場合に使用する。	×
	SPD_KPI_TH	SPD_KPI_TH_DEF	Hz	速度制御ゲイン 1 と 2 の切り替え速度を設定。	指令速度が SPD_KPI_TH 以上になると、速度制御ゲイン SPD_KP_I2、SPD_KI_I2 を使用する。	×
	SPD_UP_STEADY	SPD_UP_STEADY_DEF	Hz/s	定常時の指令速度の加速度を設定。	モーターの加速が遅い場合、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。	×
	SPD_DW_STEADY	SPD_DW_STEADY_DEF	Hz/s	定常時の指令速度の減速度を設定。	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。	×
弱め 界磁	FLDWK_TH	FLDWK_TH_DEF	V	弱め界磁制御を行う条件に使用される値を設定。	使用するモーターおよび直流電圧に応じて設定する。 (直流電圧 - FLDWK_TH) > Vdq_r3 の場合、d 軸電流を弱める。 (直流電圧 - (FLDWK_TH + FLDWK_HYS)) > Vdq_r3 の場合、d 軸電流を弱める。 $Vdq\_r3 = \sqrt{3} \times (Vd^2 + Vq^2)$	×
	FLDWK_HYS	FLDWK_HYS_DEF	V	弱め界磁制御のヒステリシス電圧を設定。	弱め界磁制御のオン/オフの切り替えが頻繁に起きる場合は、ヒステリシスを大きく設定する。	×
	FLDWK_ID_DEV	FLDWK_ID_DEV_DEF	A/s	弱め界磁電流の変化量を設定。	使用するモーターに応じて設定する。	×
	FLDWK_ID_MAX	FLDWK_ID_MAX_DEF	A	弱め界磁電流の最大値を設定。	負の値を設定する。	×
その他 (必要に 応じて 調整)	OMEGA_AVE_WINDOW	×	-	速度に対する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。	×
	VDQ_AVE_WINDOW	×	-	dq 軸電圧に対する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。	×
	IXO_AVE_WINDOW	×	-	ゼロ電流に対する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。	×
	VDC_SUPPLY	×	V	理想インバーター電圧を設定。	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。	×
	ADC_ZERO_OFS	×	A	電流が 0A の場合の ADC への理想入力電圧を設定。	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。	×
	ADC_ZERO_ERR	×	A	ゼロ電流オフセットが設定値からずれていた場合にエラーを検出するしきい値を設定。	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。	×
	ADC_RAW_MAX	×	-	ADC 入力 MAX レベルに固定された場合のエラーを検出するしきい値を設定。	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。	×

	パラメーター名 (リファレンス SW 対応の mc_config.h)	パラメーター名 (Motor Studio 対応のヘッダー ファイル)	単位	説明	備考	詳細 記載 の有無
その他 (必要に 応じて 調整)	ADC_RAW_MIN	×	-	ADC 入力に MIN レベルに固定された場合のエラーを検出するしきい値を設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×
	VDC_MIN	VDC_MIN_DEF	V	最小の直流電圧値を設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×
	VDC_MAX	VDC_MAX_DEF	V	最大の直流電圧値を設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×
	DUTY_MAX	×	%	デューティ最大値の制限を設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×
	DUTY_MIN	×	%	デューティ最小値の制限を設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×
	SPWM_DUTY_OFS	×	%	デューティのオフセットを設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×
	VD_OFS	×	V	d 軸電圧のオフセットを設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×
	VQ_OFS	×	V	q 軸電圧のオフセットを設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×
	ADC_OFS_NPWM2	ADC_OFS_NPWM2_DEF	μs	通常 PWM2 相変調時の AD 変換の遅延時間を設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×
	ADC_OFS_NPWM3	ADC_OFS_NPWM3_DEF	μs	通常 PWM3 相変調時の AD 変換の遅延時間を設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×
ADC_OFS_SHIFT1	ADC_OFS_SHIFT1_DEF	μs	シフト 1PWM 時の AD 変換の遅延時間を設定。	基本的には変更する必要はないが、必要に応じて調整する。	×	

### 3. 制御パラメータ設定

#### 3.1. モーター制御の状態遷移

モーター制御の状態遷移図を図 3.1 に示します。

前述した通り、リファレンス SW による FOC は、センサーレスでモーター制御するため、位置推定をしています。

位置推定ではモーター速度に比例する誘起電圧を利用しているため、誘起電圧が低い起動直後や低速時は位置推定が困難です。このため、リファレンス SW では図 3.1 のように、停止状態からモーターを駆動する際、位置決め→強制転流→チェンジアップを経て定常に遷移させて、FOC を実現しています。もし、モーター駆動中に過電流検出などの異常が発生した場合は、異常状態に遷移します。以降のスライドで詳細を説明します。



図 3.1 モーター制御の状態遷移図

### 3.2. ステージの遷移および制御状態

各ステージにおけるステージの遷移条件および各制御の状態を表 3.1 に示します。

表 3.1 ステージの遷移および制御状態

ステージ		①停止	②位置決め	③強制転流 (オープンループ制御)	④チェンジアップ (強制⇒定常)	⑤定常 (FOC)
次のステージへの 遷移条件		起動 コマンド	位置決め時間(INIPOS_TIME) 経過	指令速度>= 切り替え周波数 (SPD_CHANGE_UP_TH)	切り替え時間(WAIT_TIME_CHGUP)経過	
電流 制御	d 軸電流指令 Idref	0	0→目標 d 軸電流 (ID_TARGET_INI) 目標値到達後は一定値を維持	目標 d 軸電流 (ID_TARGET_INI)	目標 d 軸電流(ID_TARGET_INI)→0	0 (注)
	q 軸電流指令 Iqref	0	0	0	0→目標 q 軸電流(IQ_TARGET_INI)	速度制御の出力値
	状態	オフ	オン	オン	オン	オン
速度 制御	指令速度	0	0	目標速度まで加速(ランプ変化) 加速度はユーザーが変更可能		
	状態	オフ	オフ	オフ	オフ	オン
位置 推定	位相 $\theta$	初期位置	初期位置→目標位置 (POS_INIPOS_DEG)	指令速度から算出 (位置=前回位置+PWM 制御周 期×指令速度)	Ed < 0 に変化するまでは、指令速度から算出 (位置=前回位置+PWM 制御周期×指令速度) Ed < 0 に変化後は、推定速度から算出 (位置=前回位置+PWM 制御周期×推定速度)	推定速度から算出 (位置=前回位置 +PWM 制御周期×推 定速度)
	状態	オフ	オフ	オン	オフ ⇒ オン	オン

注意：表中の起動/停止コマンドは、デバッガーを介して変数を制御し、モーターを起動/停止させることを指しています

(注)：定常ステージにおける d 軸電流指令は Id=0 制御以外に弱め界磁制御および MTPA(Maximum Torque Per Ampere)制御等も選択可能です

### 3.3. FOC の実験波形

モーターが停止から定常へ遷移するまでの各波形を図 3.2 に示します。図中の各パラメータは設定例です。  
表 2.1 および表 3.1 を参考に、使用するモーターやシステム要求に合うようにパラメータを調整してください。

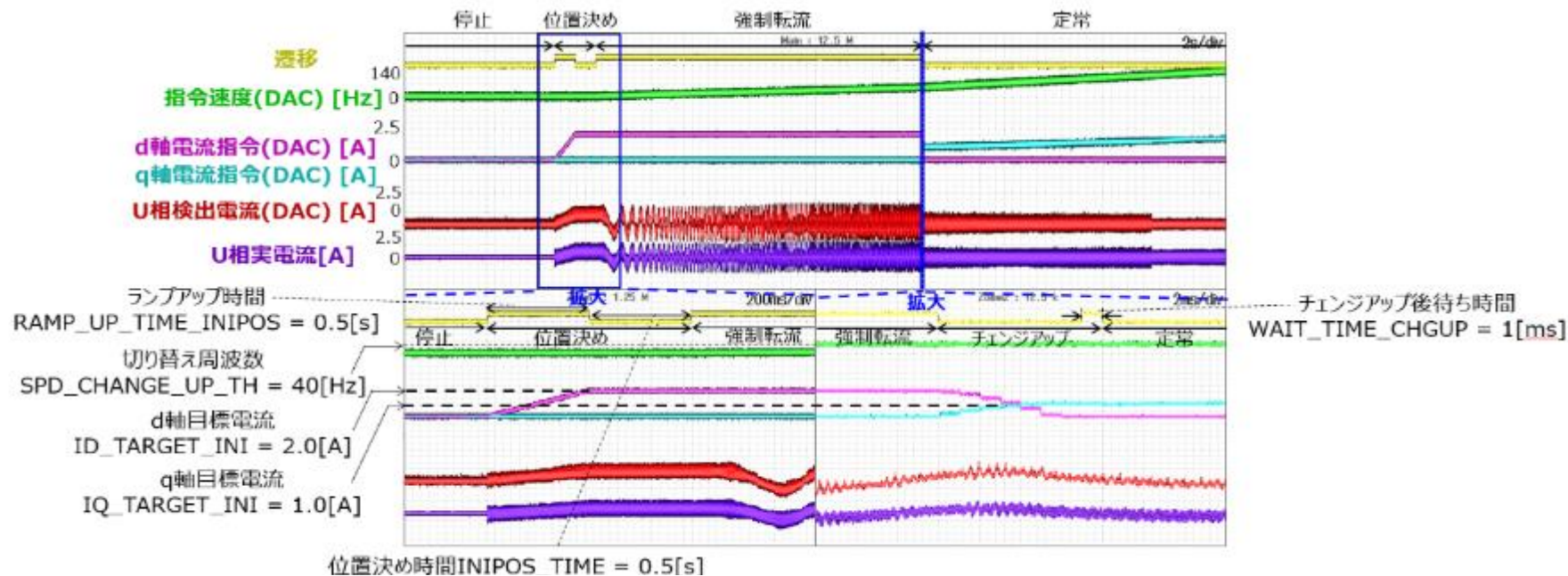


図 3.2 FOC の実験波形

## 4. 電流検出に関するパラメータ設定

### 4.1. 電流検出に関するパラメータの概要

#### 4.1.1. シャント抵抗の両端にリングング発生時の設定

TB9M003FG は、小型・低コスト化のため、1 シャント電流検出<sup>(1)</sup>のみに対応しています。1 シャント電流検出では、インバーターのスイッチングによって変化するシャント抵抗両端電圧から三相のモーター電流を検出しています。シャント抵抗両端電圧には、変調方式によらず、スイッチの切り替え直後にリングングが発生する場合があります。一例を図 4.1 に示します。

リングングが発生している期間は、シャント抵抗両端電圧が変動するため、正確な電流が検出できません。このため、電圧の変動が収束し、安定したタイミングで検出する必要があります。

TB9M003FG では、電流を検出するタイミングとして、2 つのトリガーADC\_TIMING0\_SHIFT2、ADC\_TIMING1\_SHIFT2 を設定します。シフト 2PWM では固定のタイミングをユーザーが設定し、シフト 1PWM および通常 PWM では VE が自動で設定します (TB9M003FG User Manual 記載の図 20.5.3.5.1 (トリガー生成タスクによるトリガー生成位置イメージ図)を参照)。

シフト 2PWM は、PWM 信号をシフトすることにより、固定のタイミングで電流検出します。リングングを避けるようなタイミングを設定してください。

(1) 【アプリケーションノート】 1 シャントセンサーレスベクトル制御事例を参照

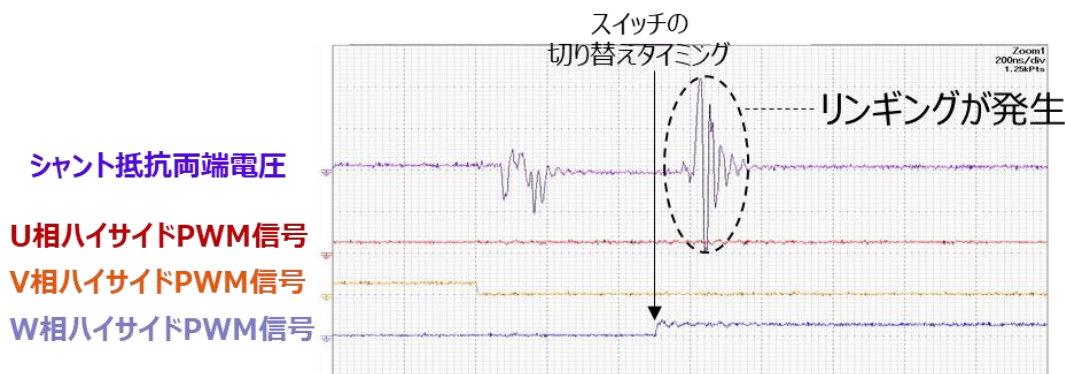


図 4.1 シャント抵抗両端電圧に発生するリングング

#### 4.1.2. シフト 2PWM の電流検出タイミング

図 4.2 にシフト 2PWM における電流検出タイミングの例を示します。図中の電流検出期間は、V 相が検出できる期間を示しています。この期間中は正しい相(V 相)の電流検出が可能ですが、前述のとおり、リングングの影響を受けるため、リングング終了に対し少し余裕を持って検出タイミングを設定することを推奨します(使用するインバーターや基板設計によって異なります)。

図中の(1)PWM 制御周期では、ADC\_TIMING0\_SHIFT2 の設定が V 相電流の電流検出期間中です、(2)PWM 制御周期では、V 相電流検出期間外であり、誤って U 相電流を検出してしまいます。この電流誤検出を防止するため、リファレンス SW には、電流検出に最低限必要な期間としてユーザーが最小パルス幅(MINPLS)を設定できます。

MINPLS 未満の場合は電流検出が不可能であると VE(Vector Engine)が自動で判定し、このとき検出した電流は制御に使用せず、前回値を使用します。電流検出が不可能な期間(前回値を使用する期間)が長くなると、制御が破綻する恐れがあるので、MINPLS は電流検出に必要な期間相当の時間を設定するように、注意してください。シフト 2PWM の場合は、リングングを避けて設定した検出タイミングと同じ時間を設定すれば基本的に問題ありません。



シフト 1PWM および通常 PWM では出力される PWM 信号のパターンが変化するため、トリガーを動的に変更しています。そのため、スイッチ切り替え時に発生するリンギング中にトリガーが設定される可能性があります。設定する MINPLS は、リンギングを避けるよう基本的にシフト 2PWM の MINPLS と同じ値で問題ありません。

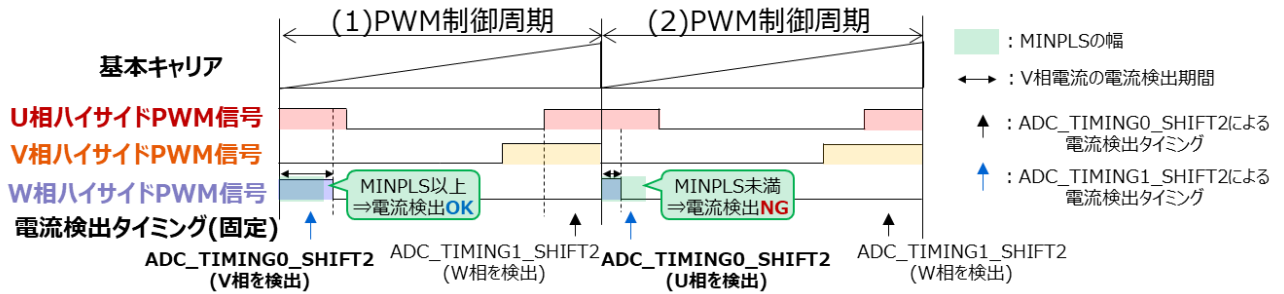


図 4.2 シフト 2PWM における電流検出タイミング

#### 4.2. 電流検出に関するパラメータの設定例

シフト 2PWM 時の実験波形を図 4.3 に示します。図中の AD 変換タイミングは内部信号のデバッグ出力をモニターしています。デバッグ信号は、[DBGOUTCR]<DBGMD[1:0]>で選択可能です。各パラメータは以下のとおりです。

- PWM 制御周期(PWM\_PERIOD)は  $50.0 \mu s$
- ADC\_TIMING0\_SHIFT2 は  $3.0 \mu s$
- ADC\_TIMING1\_SHIFT2 は  $47.0 \mu s$

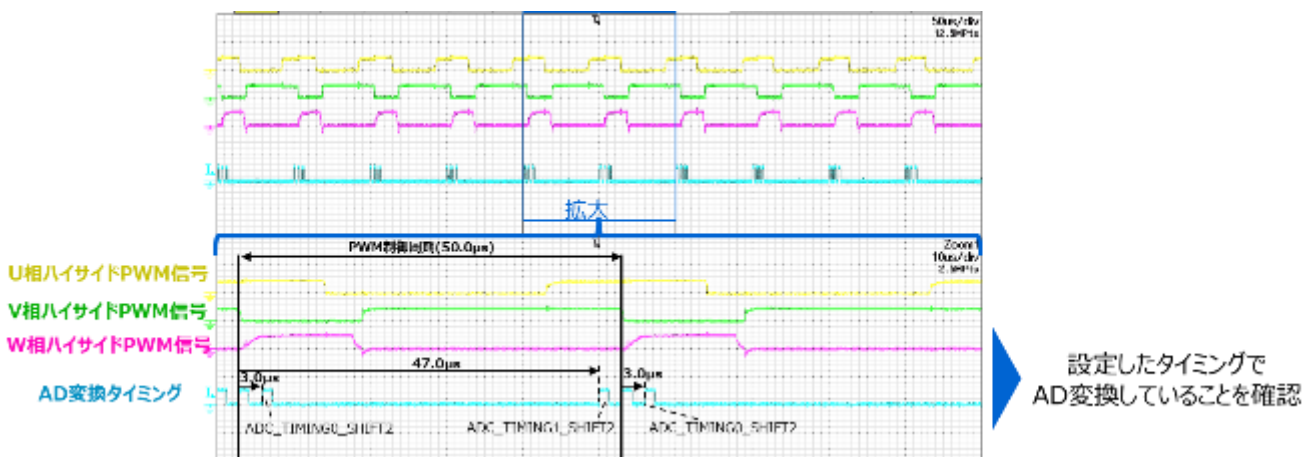
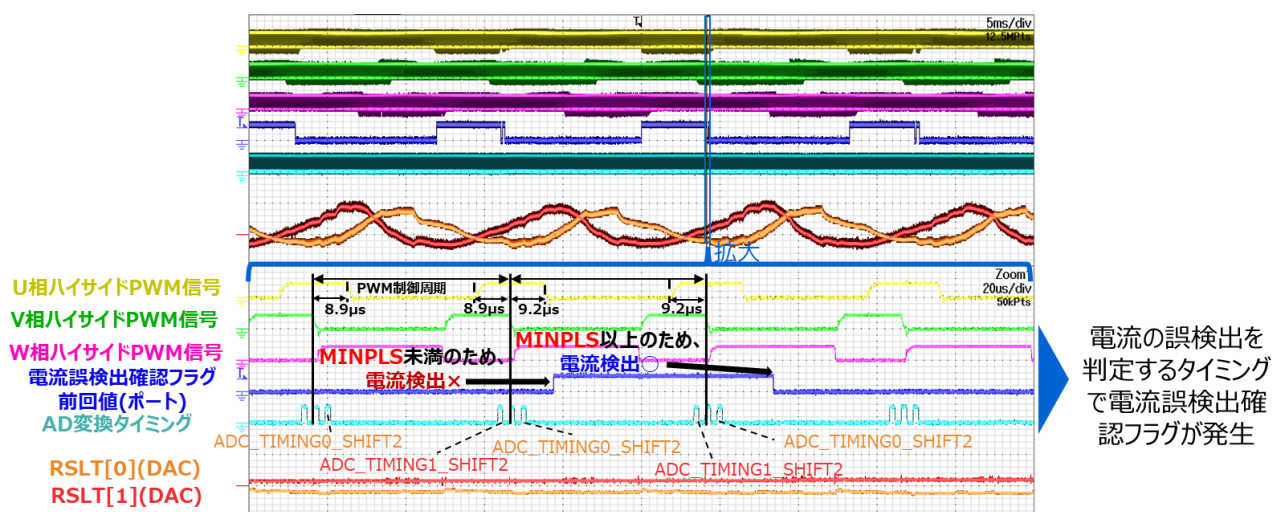


図 4.3 シフト 2PWM における電流検出タイミング

### 4.2.1. 電流誤検出確認フラグが発生の場合

電流誤検出確認フラグ([MCTLF]<PLSLFM>)が発生する場合の実験波形を図 4.4 に示します。  
この実験では、MINPLS の動作を確認するため、電流誤検出確認フラグがあえて立つように MINPLS(MINPLS\_SHIFT2)は  $9.1 \mu\text{s}$  に設定しています。

電流誤検出確認フラグがハイレベルの期間に検出した電流は、制御に使用していません。次の PWM 制御周期でフラグがローレベルに変化すると、その PWM 制御周期で検出した電流を制御に使用します。



電流の誤検出を判定するタイミングで電流誤検出確認フラグが発生

図 4.4 シフト 2PWM における電流検出タイミング

## 5. モーターパラメーター測定

### 5.1. モーターパラメーター測定の概要

リファレンス SW における FOC は、モーターパラメーターとして、以下の情報が必要です。

- ・ 抵抗
- ・ d 軸および q 軸インダクタンス
- ・ 逆起電力定数
- ・ 極数

### 5.2. 抵抗測定

U-V 間抵抗値の測定例を図 5.1 に示します。

モーターの抵抗は、テスターや LCR メーターを使用して測定します。

SW 上の抵抗値(MTR\_R)は、1 相あたりの抵抗値を設定する必要があります。

ここでは、U-V 間、V-W 間、W-U 間の抵抗値を測定して平均値を求めます。

$$MTR\_R = (U-V \text{ 間抵抗} + V-W \text{ 間抵抗} + W-U \text{ 間抵抗}) / 6$$

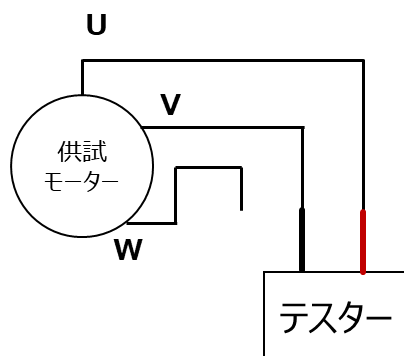


図 5.1 U-V 間の抵抗の測定例

### 5.3. インダクタンス測定

U-V 間の線間インダクタンスの変化のイメージを図 5.2 に示します。回転子の角度によってインダクタンスが変化します。

インダクタンスの最大値が q 軸インダクタンス(MTR\_LQ)[mH]、最小値が d 軸インダクタンス(MTR\_LD)[mH]に相当します。SW 上の q 軸インダクタンス(MTR\_LQ)、d 軸インダクタンス(MTR\_LD)は、1 相あたりのインダクタンス値を設定する必要があります。

U-V 間の線間インダクタンスの測定例を図 5.3 に示します。インダクタンスは、LCR メーターを使用して測定できます。

測定は、供試モーターの回転子を手で徐々に回しながら 1 回転させ、線間インダクタンスの最大値 Luv\_max、Lvw\_max、Lwu\_max および最小値 Luv\_min、Lvw\_min、Lwu\_min を取得してください。ここでは、U-V 間、V-W 間、W-U 間の線間インダクタンスから q 軸インダクタンスと d 軸インダクタンスの平均値を求めます。

$$MTR\_LQ = (Luv\_max + Lvw\_max + Lwu\_max) / 6$$

$$MTR\_LD = (Luv\_min + Lvw\_min + Lwu\_min) / 6$$

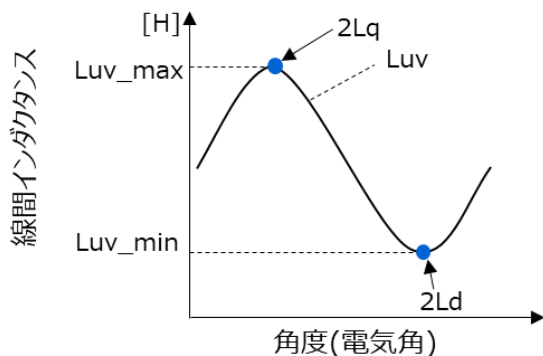


図 5.2 供試モーターを回転させたときの U-V 線間インダクタンスの変化のイメージ

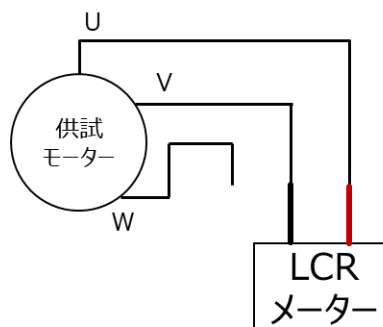


図 5.3 U-V 間のインダクタンスの測定例

#### 5.4. 逆起電力定数測定

逆起電力定数の測定例を図 5.4 に示します。逆起電力定数(MTR\_KE)[V/Hz]は、駆動モーターを使用して供試モーターを外部から回転させることによって測定できます。線間電圧ではなく、相電圧を測定する場合は、破線部で囲んだような外部回路を追加で接続する必要があります。ある一定速度で供試モーターを回転させたときに外部抵抗に発生する誘起電圧(相電圧)のイメージを図 5.5 に示します。

実波形の例として、駆動モーターで極数 4 の供試モーターを約 1,000rpm 回転させたときの誘起電圧(相電圧)の波形を図 5.6 に示します。

ここで、電気角周波数  $f$ [Hz]は、電気角 1 周期  $T$ [s]の逆数( $f=1/T$ )です。

測定した相電圧のピーク値  $V_{peak}$  から逆起電力定数を算出します。ただし、線間電圧を測定する場合は、測定した線間電圧のピーク値を $\sqrt{3}$  で割り、相電圧のピーク値  $V_{peak}$  に変換してから逆起電力定数を算出してください。

$$MTR\_KE = V_{peak} / f$$

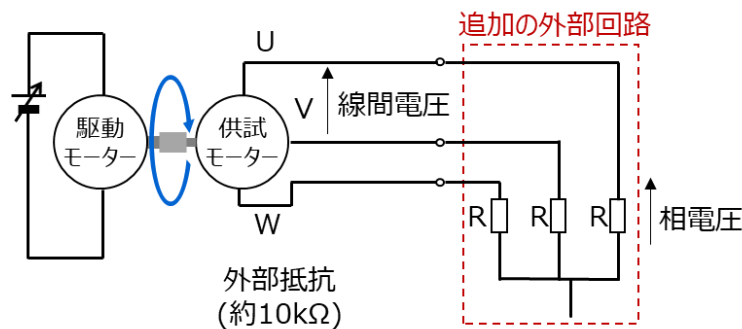


図 5.4 逆起電力定数の測定例  
(破線部は相電圧想定時のみ必要)

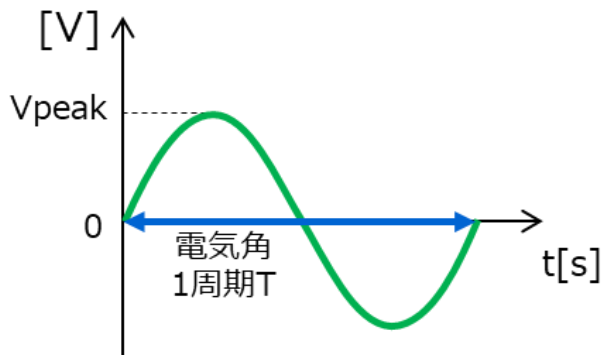


図 5.6 供試モーターをある一定速度で回転させた場合の誘起電圧(相電圧)のイメージ

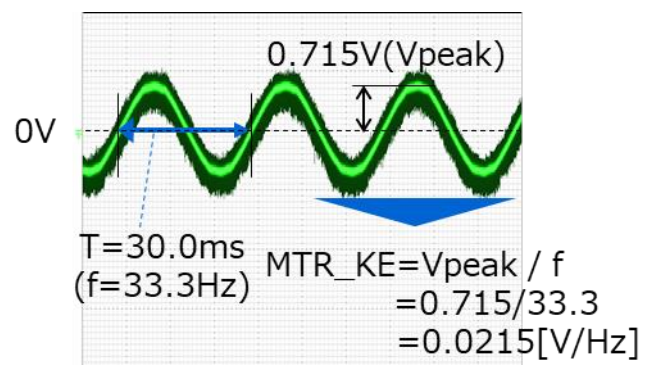


図 5.5 駆動モーターで極数 4 の供試モーターを回転させたときの誘起電圧波形(@1,000rpm)

## 5.5. 極数測定

極数(POLE)がデータシートに記載されていない場合もあります。極数が不明なモーターは、別のモーターを使用して供試モーターを一定速度で駆動させるか、またはモーターを1回転させたときの誘起電圧の変化から極数が確認できます。

極数4のモーターの極数測定のイメージを図5.7に示します。

極数4のモーターを手で1回転させた場合の誘起電圧変化の例を図5.8に示します。図より、電気角周期が2周期であり、極数が4であることが確認できます。

$$\text{POLE} = 2 \times (\text{モーター1回転中の電気的な周期回数})$$

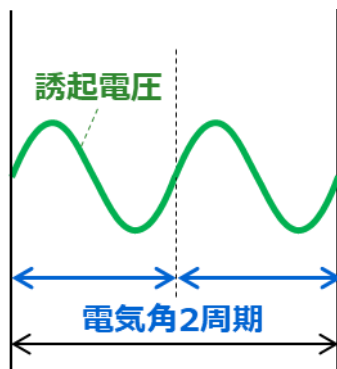


図 5.7 極数測定のイメージ(極数4のモーター)

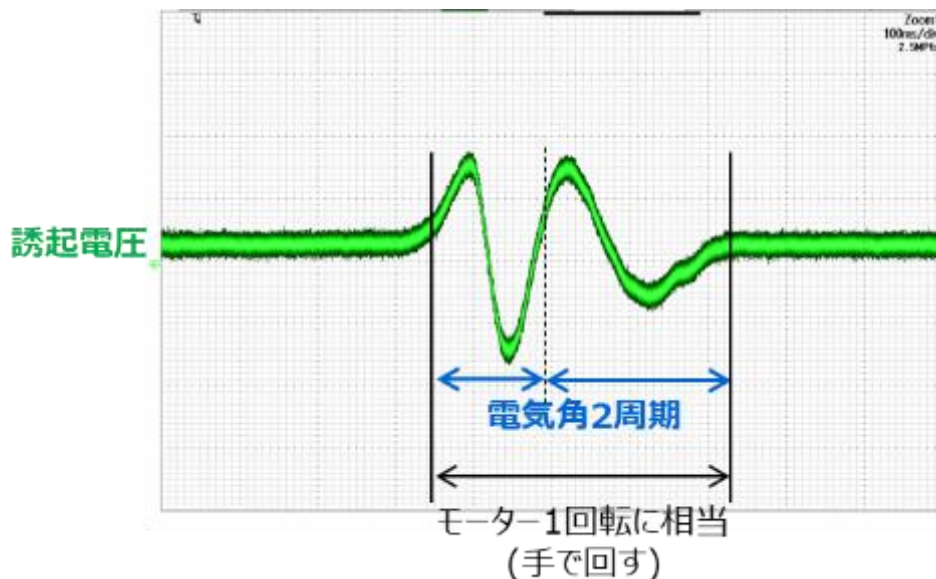


図 5.8 極数測定の例(極数4のモーター)

### 6. PI 制御ゲイン調整

#### 6.1. PI 制御ゲインの概要

PI(Proportional Integral)制御は、フィードバック制御の一種です。PI 制御は目標値(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 6.1 に示します。

P 制御だけでは目標値に近くはなりますが、偏差をゼロにはできません。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、不安定になります。一方、制御ゲインが小さい場合、制御の安定性は増しますが、応答性が悪化します。

PI 制御ゲインの安定動作範囲は条件によって変わります。以下に図 2.3 を再掲します。

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)

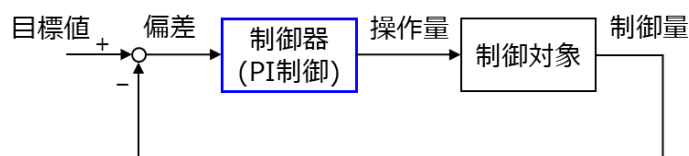


図 6.1 PI 制御のブロック図

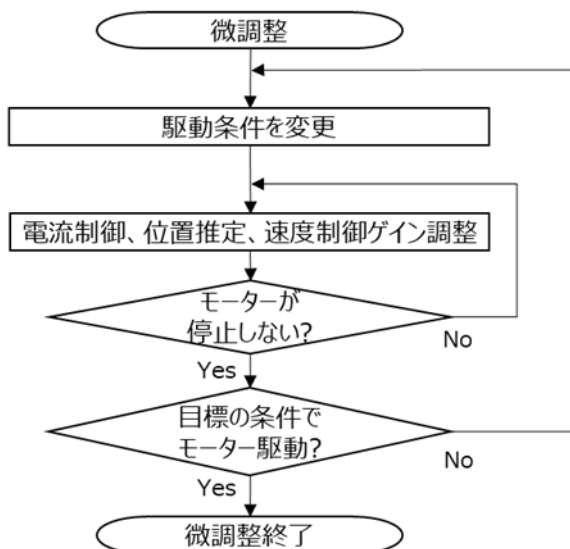


図 2.3 微調整のフローチャート (再掲)

### 6.2. 各 PI 制御ゲインの調整手順

FOC の実現には、使用するモーターに応じて PI 制御ゲインを適切に調整することが必要です。弊社が提供するリファレンス SW による FOC には、電流制御ゲイン、位置推定ゲイン、速度制御ゲインの 3 つの PI 制御ゲインがあります。

本資料では、これらの PI 制御ゲインを下記の①-③の順番で調整する方法を説明します。

なお、簡易調整と微調整では実施事項は同じですが、微調整は負荷変動や速度指令の変化など、実際のシステム要求に合うように実施してください。MTS を使用すると、ゲイン調整の初期値を自動で算出することができます。

#### 6.2.1. ①電流制御ゲイン(位置決めステージにおける調整を推奨)

位置決めステージでは、モーターが回転しておらず、位置推定や速度制御が機能していません。

このため、位置推定ゲインや速度制御ゲインの影響を受けずに電流制御ゲインのみの調整が可能です。

#### 6.2.2. ②位置推定ゲイン(チェンアップステージにおける調整を推奨)

チェンアップステージでは、位置推定による推定位置を使用します。このとき、速度制御は機能していないため、速度制御ゲインの影響を受けずに位置推定ゲインの調整が可能です。

#### 6.2.3. ③速度制御ゲインの調整(定常ステージで調整)

定常ステージでは、速度制御が機能します。実際のシステムに合わせて追従性や応答性を確認しながら、速度制御ゲインを調整します。

### 6.3. 電流制御の概要

電流制御ゲインの調整として、位置決めステージにおける調整方法を説明します。

位置決めステージのブロック図を図 6.2 に示します。位置決めステージでは、モーターが回転していません。このため、位置推定ゲインや速度制御ゲインとは無関係に電流制御ゲインのみの調整が可能です。

電流制御のブロック図を図 6.3 に示します。電流制御では電流指令と検出電流を一致させるように制御します。

図 6.3 では d 軸電流指令( $I_{dref}$ )と d 軸電流( $I_d$ )を一致させるように d 軸電圧( $V_d$ )を制御します。

なお、q 軸の電流制御についても図 6.3 と同様であり、q 軸電流指令( $I_{qref}$ )と q 軸電流( $I_q$ )を一致させるように q 軸電圧( $V_q$ )を制御します。位置決めおよび強制転流ステージでは、q 軸電流指令( $I_{qref}$ )はゼロとして制御します。電流制御ゲインの設定は、基本的に d 軸と q 軸で同じ値として問題ありません。

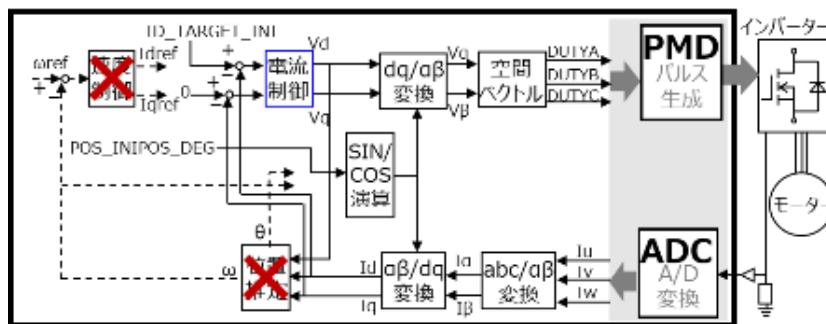


図 6.2 位置決めステージのブロック図

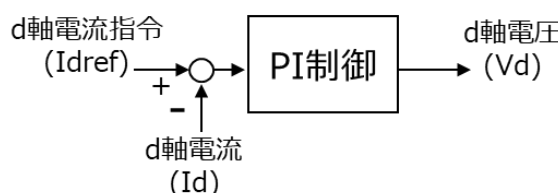


図 6.3 電流制御のブロック図



## 6.3.1. 電流制御ゲインの調整方法

電流制御ゲインの調整例を図 6.4 に示します。

ランプアップ時間(RAMP\_UP\_TIME\_INIPOS)を 0 に設定し、d 軸目標電流(ID\_TARGET\_INI)の値を設定します。

d 軸電流指令(Idref)と d 軸電流(Id)をモニターして電流制御ゲインを調整します。ゲイン調整のポイントは追従性と応答性です。波形を確認しながら電流制御ゲインを変更します。位置決め時、モーターが動くことによって波形が歪むことを避けるため、少しでも動いた場合は位置決め動作をはじめからやり直してください。

もし、モーターが動かなければ、モーターが動くまで ID\_TARGET\_INI に徐々に大きな値を設定してください。

図 6.4(a)は、ゲインが低過ぎるため応答性が悪い例です。

図 6.4(b)は、ゲインが適切のため応答性が良く、かつ追従性も良い例です。

図 6.4(c)は、ゲインが高過ぎるため振動しており、追従性が悪い例です。(b)のようになるようにパラメータ調整を実施してください。

なお、PI 制御の考え方は、位置推定ゲインや速度制御ゲインについても同様です。

モーターへの電力供給を停止して停止ステージに移行する際に、モーターの回転子が動く場合は POS\_INIPOS\_DEG を別の値に変更してください

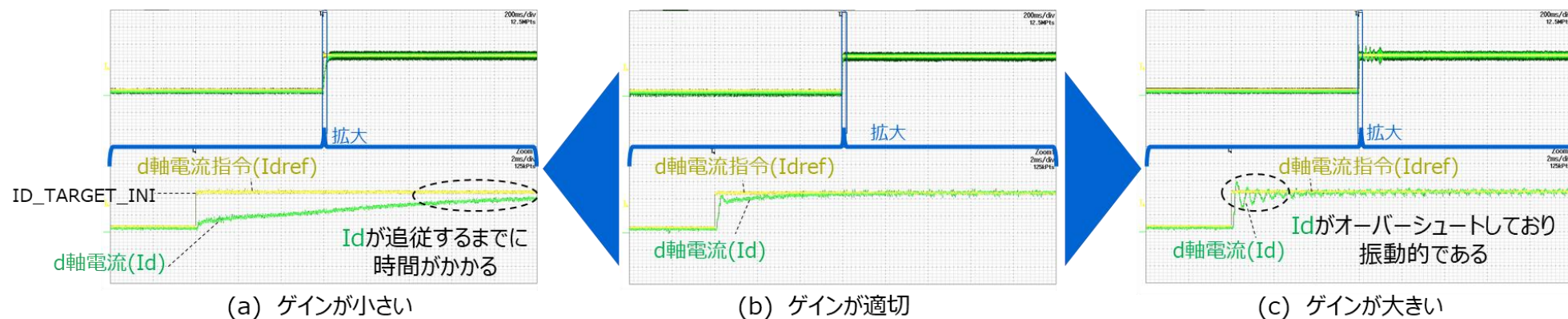


図 6.4 電流制御ゲインの調整例

6.4. 位置推定の概要

位置推定ゲインの調整例として、チェンジアップステージにおける調整方法を説明します。

位置推定ゲイン調整時のブロック図を図 6.5 に示します。チェンジアップステージでは、速度制御は機能していません。このため、速度制御ゲインとは無関係に位置推定ゲインの調整が可能です。

位置推定のブロック図を図 6.6 に示します。PI 制御では、 $E_d$  が 0 になるような推定速度  $\omega$  を求め、その結果から推定位置  $\theta$  を算出します

なお、チェンジアップステージでは、 $E_d < 0$  に変化した後、 $\omega$  の前回値を使用して  $E_d$  を演算するが、 $E_d < 0$  に変化するまでは、 $\omega$  に  $\omega_{ref}$  を代入して  $E_d$  を演算する。

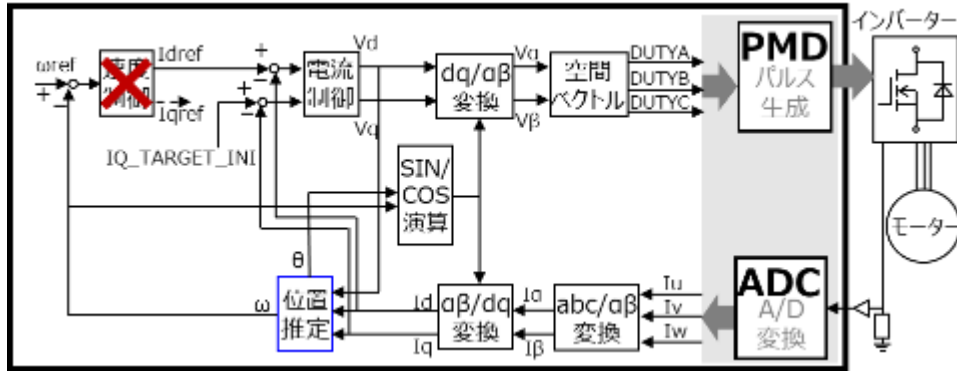


図 6.5 位置推定ゲイン調整のブロック図

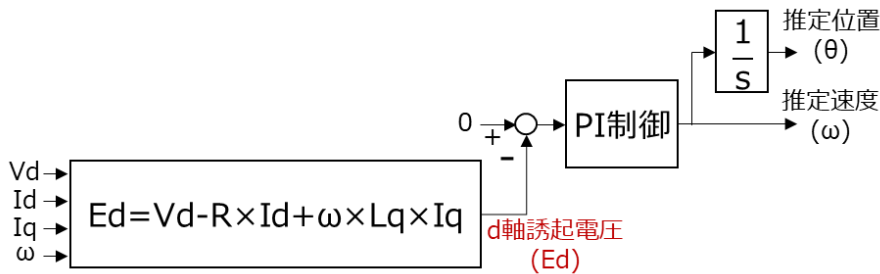


図 6.6 位置推定のブロック図

リファレンス SW における位置推定は、実際の位置に対して推定位置がずれたときに d 軸誘起電圧  $E_d$  が発生することを利用して

います。 $E_d$  が 0 のとき、位置推定誤差  $\Delta\theta$  が 0 になるため、PI 制御では、 $E_d$  が 0 になるような推定速度  $\omega$  を求め、位置  $\theta$  を算出します。

$E_d$ 、q 軸誘起電圧  $E_q$  の関係のイメージを図 6.7 に示します。

実際の d 軸に対して、推定 d 軸が進む場合は  $E_d > 0$  になります。一方、推定 d 軸が遅れる場合は  $E_d < 0$  になります。

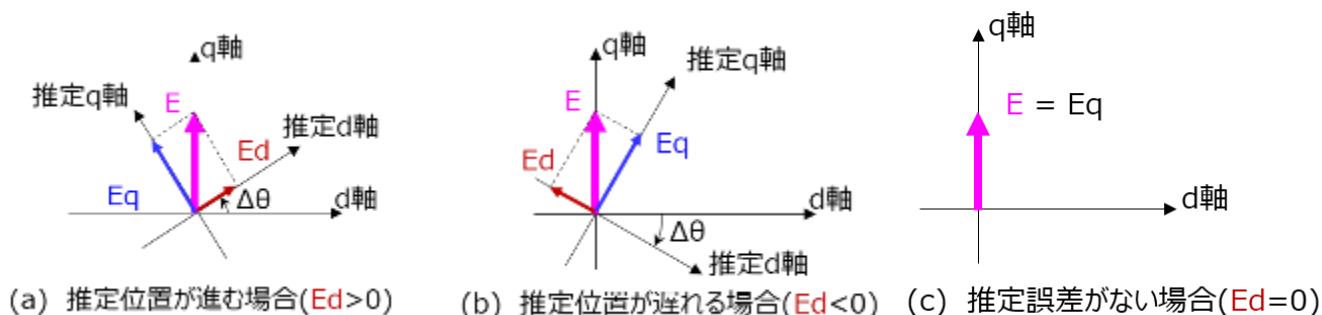


図 6.7 位置推定のイメージ

#### 6.4.1. 位置推定ゲインの調整

チェンジアップステージで位置推定ゲインの調整を行うために、以下の設定をしてください。

チェンジアップ切り替え周波数 (SPD\_CHANGE\_UP\_TH) と目標速度 (SPD\_TARGET) を同じ値に設定し、チェンジアップ後待ち時間 (WAIT\_TIME\_CHGUP) を数秒程度に設定してください。

ここで、SPD\_CHANGE\_UP\_TH は位置推定に十分な誘起電圧が発生する速度を設定する必要があります。これらの設定により、速度制御を機能させない状態で、位置推定の結果である推定位置を制御に使用します。このとき、速度制御の影響を受けずに、位置推定ゲインの調整が可能です。

なお、チェンジアップステージは、それまで d 軸始動電流 (ID\_TARGET\_INI) でモーター駆動していたところを q 軸始動電流 (IQ\_TARGET\_INI) に切り替えるステージです。

チェンジアップステージに切り替え後の位置推定誤差が大きいと、衝撃により脱調や過電流が起きることがあります。

切り替え時にモーターが急加速する場合は、IQ\_TARGET\_INI の値を小さく、停止してしまう場合は大きくしてください。

また、WAIT\_TIME\_CHGUP の時間経過後、定常ステージに切り替わり速度制御が動作するので、切り替わる前にモーターを停止させるように注意してください。モーターが安定して動作しない場合は駆動状態をオフに変更して、モーターを停止させてください。

位置推定ゲインの調整例を図 6.8 に示します。

Ed をモニターして位置推定ゲインを調整します。波形を確認しながら位置推定ゲインを変更します。

図 6.8 (a)は、ゲインが低過ぎるため、応答性・安定性が悪い例です。途中でモーターが振動し、脱調しています。

図 6.8 (b)は、ゲインが適切であるため、Ed が 0 付近で制御できており、運転が継続できています。

図 6.8 (c)は、ゲインが高過ぎるため、大きく振動して制御が不安定になる例です。(b)のようになるように調整を実施してください。

なお、簡易調整は位置推定の結果(推定位置)を制御に使用し、脱調しないでモーター駆動できることを目的としているため、運転が継続できていれば問題ありません。微調整は、定常ステージで実施する必要があるため、徐々に条件を厳しく(負荷増加)しながら実施してください。

各パラメータを調整しても定常ステージに切り替わり後すぐに停止する場合は、SPD\_CHANGE\_UP\_TH を実際に設定したい値よりも 大きな値に設定してください。定常ステージに安定して切り替わることを確認してから、SPD\_CHANGE\_UP\_TH を少しずつ下げて試してみてください。

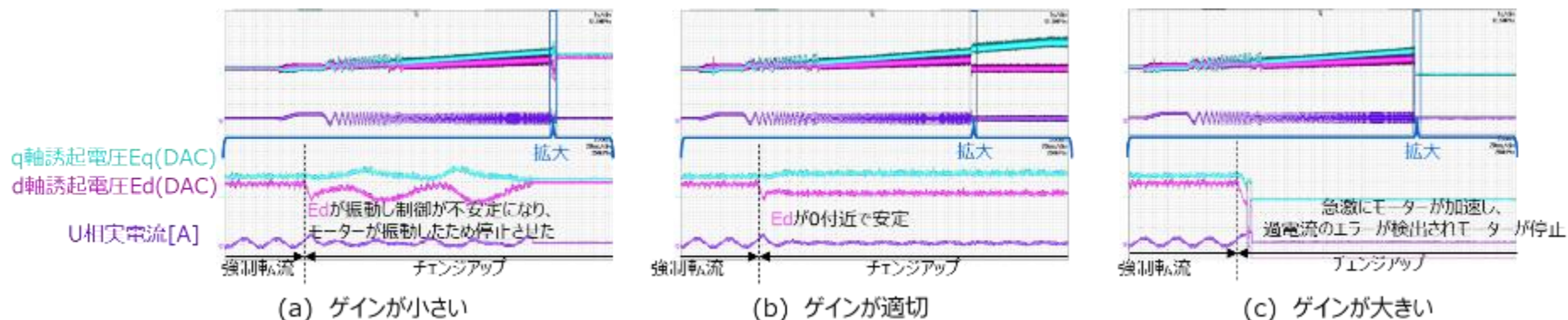


図 6.8 位置推定ゲインの調整例

### 6.5. 速度制御の概要

FOC のブロック図を図 6.9 に示します。FOC (通常ステージ) は、電流制御、位置推定、速度制御が機能します。速度制御のブロック図を図 6.10 に示します。指令速度( $\omega_{ref}$ )と差が生じる要因(負荷変動など)によって働きます。このため、速度制御ゲインはモーター単体での調整はあまり必要ではなく、システムに組み込んだ際に大きく影響します。

負荷変動による電流指令値の変化のイメージを図 6.11 に示します。

速度制御は、速度指令( $\omega_{ref}$ )と推定速度( $\omega$ )が一致するように、q 軸電流指令値( $I_{qref}$ )を変化させます。

例えば、負荷が増大して $\omega$ が低下すると、速度偏差が大きくなり、 $\omega$ を増加させるために  $I_{qref}$  を増加させます。また、 $\omega_{ref}$ が増加した場合も速度偏差が大きくなり、 $\omega$ を増加させるために  $I_{qref}$  を増加させます。速度制御は、 $\omega_{ref}$ 、 $\omega$ 、 $I_{qref}$  などを見ながら追従性や応答性を確認して調整します。

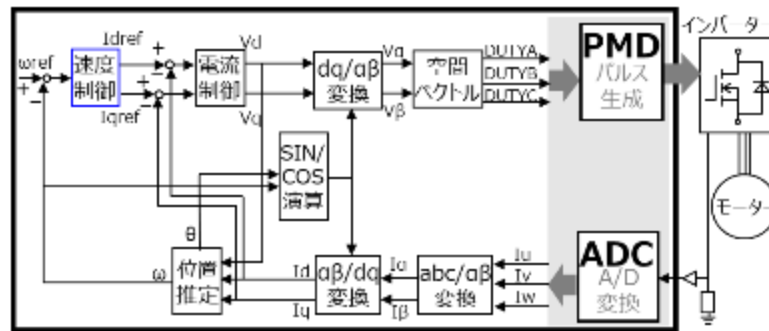


図 6.9 FOC のブロック図

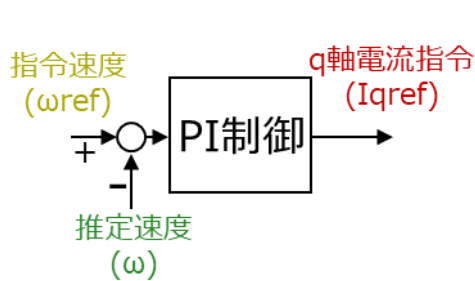


図 6.10 速度制御のブロック図

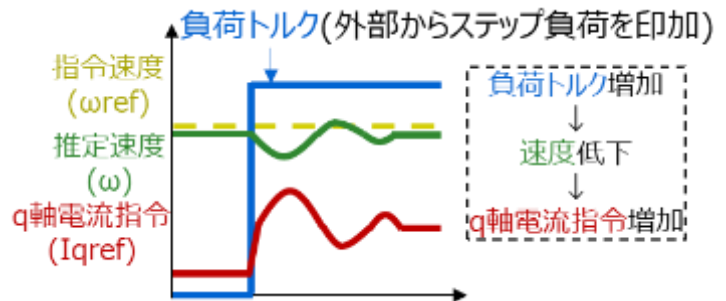


図 6.11 負荷変動による電流指令値の変化イメージ

### 6.5.1. 速度制御ゲインの調整

速度制御ゲインの調整例を図 6.12 に示します。

負荷変動する状態は、モーター駆動条件がより厳しいため脱調しやすくなります。ゲイン調整は、負荷を徐々に増加させる、またはステップ負荷を外部から印加して実施してください。負荷装置が無い場合、指令速度をステップで変化させて実施してもよいです。

ここでは、ステップ負荷を与えた場合の例を説明します。

図 6.12 (a)は、ゲインが低過ぎるため速度制御の出力である q 軸電流指令の応答性が悪く、推定速度が大きく振動している例です。

図 6.12 (b)は、ゲインが適切のため追従性が良くかつ応答性も良い例です。

図 6.12 (c)は、ゲインが高すぎるため振動しており、追従性が悪い例です。(b)のようになるように調整を実施してください。

なお、調整の初期は特に脱調しやすいため、ゲイン調整して無負荷または軽負荷で運転が継続できることを目指します。

徐々にモーター駆動条件を厳しくしながら、要求の条件で所望の運転ができるようにゲイン調整することを推奨します。

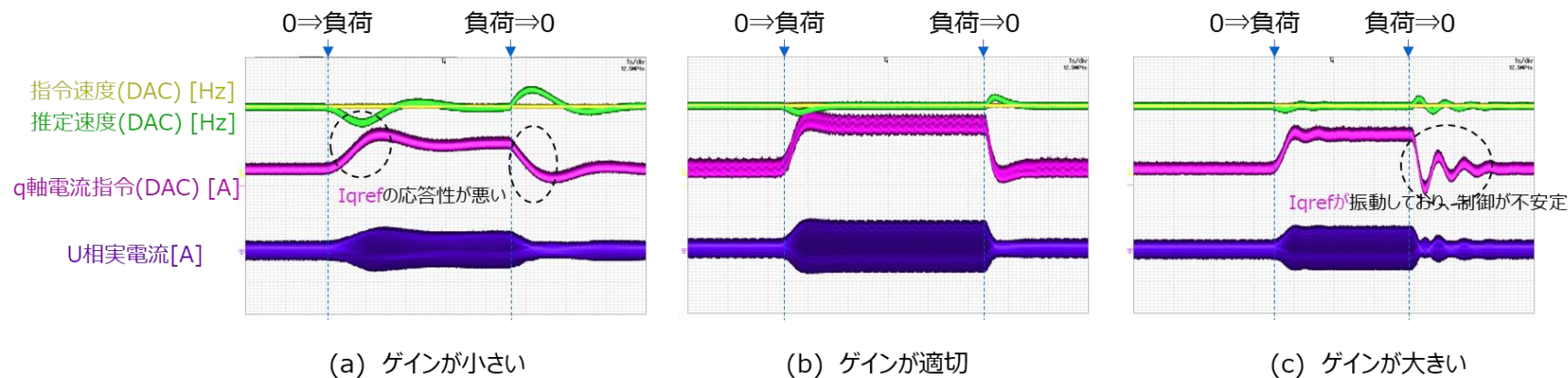


図 6.12 速度制御ゲインの調整例

## 7. MTS (Motor Tuning Support) による調整

### 7.1. MTS の概要

当社の提供するモーター制御開発支援の PC ツール MTS の主な特長は以下のとおりです。  
前述のとおり、下記モーターパラメータ測定および PI 制御ゲインの設定は手動で実施しても問題ありません。

特長 1：下記のモーターパラメータを自動測定できます：

- ・ 抵抗 (R)
- ・ q 軸インダクタンス (Lq)
- ・ d 軸インダクタンス (Ld)
- ・ 逆起電力定数 (Ke)
- ・ 慣性モーメント (J)
- ・ 最小パルス幅 (MINPLS)

特長 2：下記の PI 制御ゲインを自動計算できます。

- ・ 電流制御ゲイン
- ・ 位置推定ゲイン
- ・ 速度制御ゲイン

#### 7.1.1. MTS 画面の説明

MTS 画面のウィンドウ表示の一例を図 7.1 に示します。なお、MTS 画面のウィンドウ表示の一例であり、画面表示の構成はユーザーが変更可能です。

本資料は、モーターパラメータの自動測定および PI 制御ゲインの自動計算に関する内容を中心に説明します。

MTS に関する詳細なマニュアルは別資料( MTS ユーザーマニュアル )を参照してください。

注) 「Motor Tuning Support」ウィンドウを表示するには、次ページに記す事前準備が必要です。

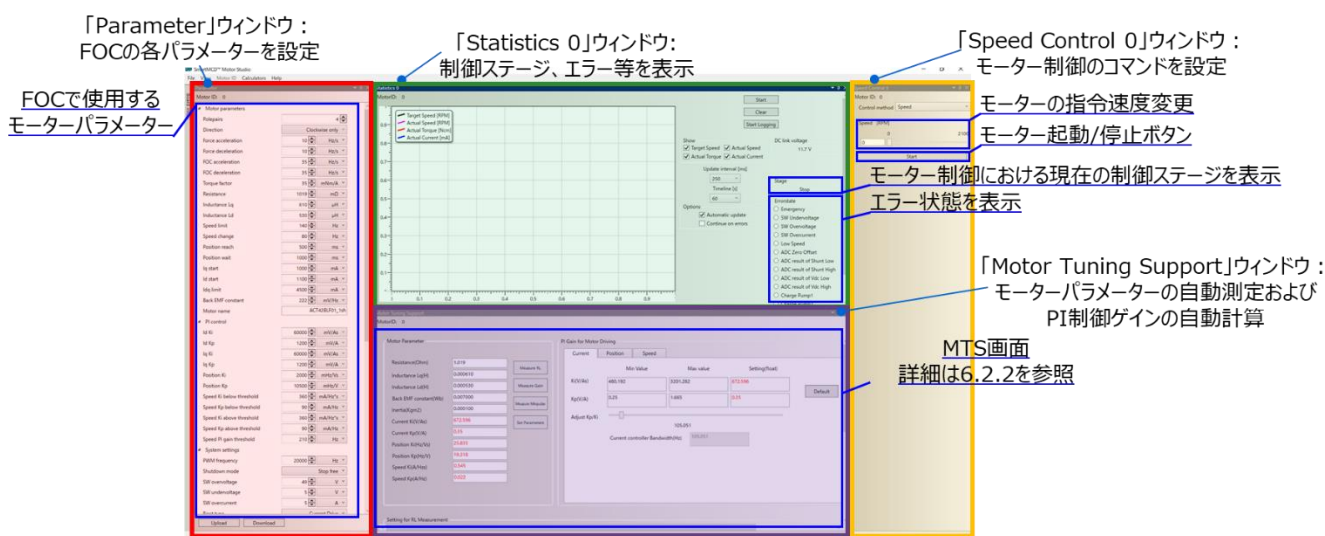


図 7.1 MTS 画面のウィンドウ表示の一例

## 7.1.2. MTS 使用前の準備

MTS を使用するには、必要な SW をインストールし、MTS の環境を構築してください。

MTS 画面を図 7.2 に示します。「Board infos」タブにカーソルを合わせると各情報が表示されます。「Motor Tuning Support」が No になっている場合は無効になっているので、モーターパラメータの自動測定および PI 制御ゲインの自動計算が実行できません。

注：「Motor Tuning Support」が No の場合、以下の理由が考えられます。

- ・ SmartMCD MTS\_Library\_64bit.msi ファイルが正常にインストールされていない。
- ・ ファームウェアで「Motor Tuning Support」が有効になっていない。

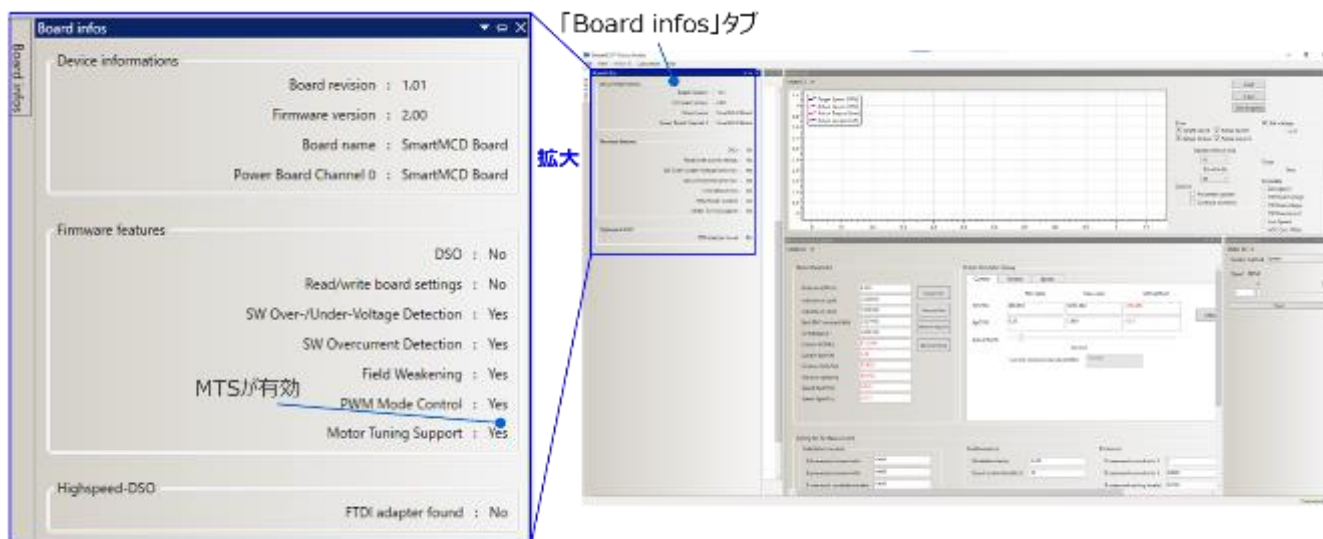


図 7.2 MTS 画面(基板情報表示)



### 7.1.3. MTS ウィンドウの説明

「Motor Tuning Support」ウィンドウの拡大図を図 7.3 に示し、各ブロックの説明を記載します。

前述のとおり、MTS に搭載している自動パラメーター取得アルゴリズムを動作させ、モーターのパラメーター(抵抗、インダクタンス、逆起電力定数、慣性モーメント、最小パルス幅)を自動で測定することができます。測定したモーターのパラメーターなどから、電流制御、位置推定、速度制御の PI 制御ゲインの初期値を自動で演算することができます。使用方法は 7.2 章を確認してください。

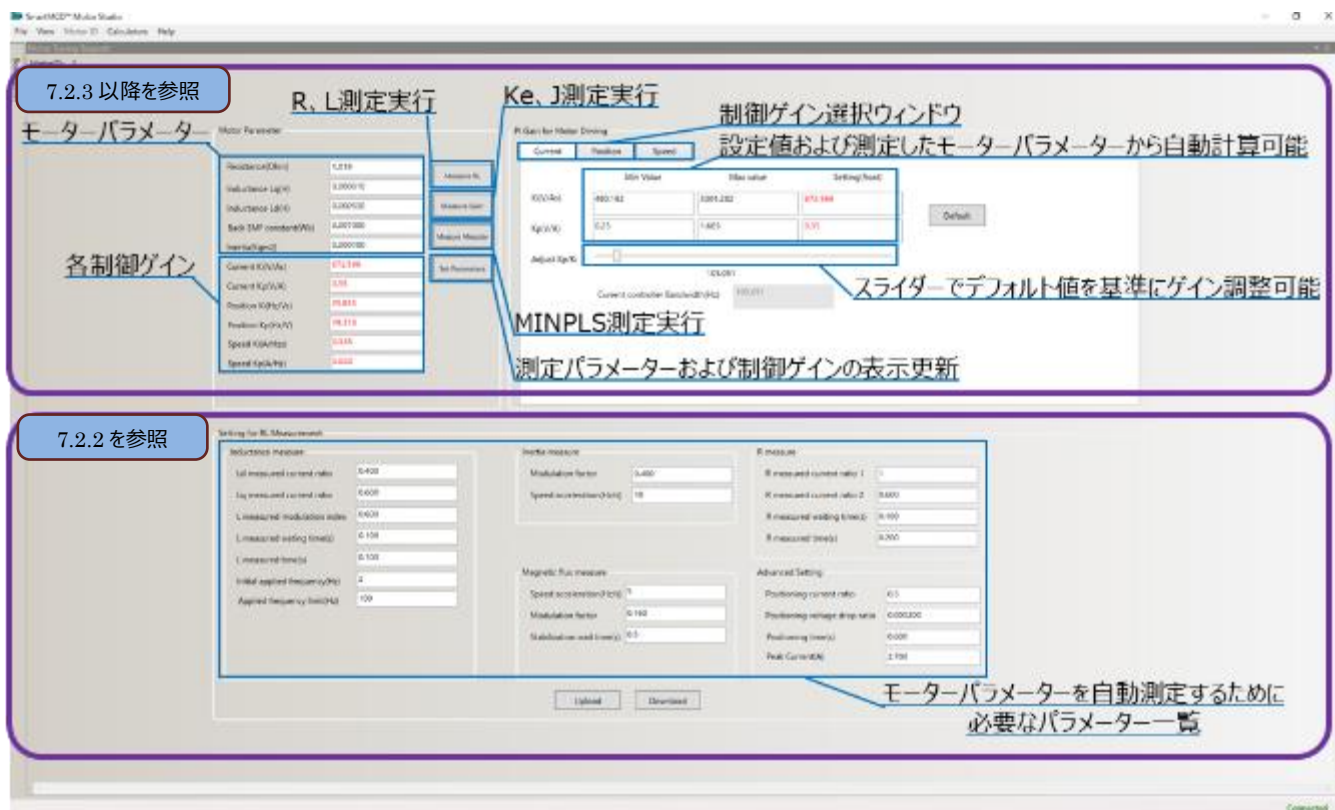


図 7.3 「Motor Tuning Support」ウィンドウの拡大図

### 7.2. MTS の使用方法

#### 7.2.1. モーターパラメータの自動測定および PI 制御ゲインの自動計算に必要なパラメータ一覧

7.2 では、モーターパラメータの自動測定および PI 制御ゲインの自動計算に関する、MTS の使用方法を説明します。

モーターパラメータの自動測定および PI 制御ゲインの自動計算に必要なパラメータ一覧設定が必要な各パラメータ一覧は表 6.1 に示します。

注) モーターパラメータが既知の場合は、必要に応じて直接手入力してモーターパラメータの測定の処理ステップを飛ばしても構いません。  
手入力した値を基にゲイン調整の計算・調整を実施してください。

表 7.1 MTS の設定パラメータ一覧

	MTS 画面上のパラメータ名	MTS 用ヘッダーファイル上のパラメータ名	単位	説明	備考
詳細 設定	Positioning current ratio	MEASURE_CURRENT_RATE	-	位置決め時の電流割合を設定	位置決め時にモーターが振動する場合は、設定値を大きくしてする。過電流保護が発生する場合は、設定値を小さくする。
	Positioning voltage drop ratio	INC_VOLT_RATE	-	位置決め電圧増加率を設定	設定値が大きすぎると印加電圧の増加が早いため過電流保護が働く可能性あり。 設定値が小さすぎると、印加電圧の増加が遅いため測定に時間がかかる可能性あり。
	Positioning time(s)	MEASURE_INIT_POS_LEN	s	位置決め時間を設定	基本的に変更する必要なし。起動を早めたい場合は小さくする。
	Peak Current(A)	MOTOR_RATED_CURRENT	A	モーターのピーク電流値を設定	使用モーターに合わせて設定してください。
R 測定	R measured current ratio 1	R_MEASURE_CURRENT_RATE1	-	抵抗測定電流割合 1 を設定	設定値が小さすぎると、誤差が大きくなる可能性あり。過電流保護が発生する場合は、設定値を小さくする。
	R measured current ratio 2	R_MEASURE_CURRENT_RATE2	-	抵抗測定電流割合 2 を設定	設定値が小さすぎると、誤差が大きくなる可能性あり。過電流保護が発生する場合は、設定値を小さくする。
	R measured waiting time(s)	R_MEASURE_WAIT_LEN	s	抵抗測定待ち時間を設定	基本的に変更する必要なし。
	R measured time(s)	R_MEASURE_LEN	s	抵抗測定時間を設定	基本的に変更する必要なし。
L 測定	Ld measured current ratio	L_MEASURE_CURRENT_D_RATE	-	d 軸インダクタンス測定電流割合を設定	設定値が小さすぎると、誤差が大きくなる可能性あり。過電流保護が発生する場合は、設定値を小さくする。
	Lq measured current ratio	L_MEASURE_CURRENT_Q_RATE	-	q 軸インダクタンス測定電流割合を設定	設定値が小さすぎると、誤差が大きくなる可能性あり。過電流保護が発生する場合は、設定値を小さくする。
	L measured modulation index	L_MEASURE_VOLT_RATE	-	インダクタンス測定時の印加電圧割合を設定	設定値が小さすぎると、誤差が大きくなる可能性あり。過電流保護が発生する場合は、設定値を小さくする。
	L measured waiting time(s)	L_MEASURE_WAIT_LEN	s	インダクタンス測定待ち時間を設定	基本的に変更する必要なし。
	L measured time(s)	L_MEASURE_LEN	s	インダクタンス測定時間を設定	基本的に変更する必要なし。

	MTS 画面上のパラメーター名	MTS 用ヘッダーファイル上の パラメーター名	単位	説明	備考
	Initial applied frequency (Hz)	INIT_FRQ	-	初期印加周波数を設定	基本的に変更する必要なし。 (注) 高周波印加電圧の周波数の初期値 = (1 / PWM 制御周波数 / (INIT_FRQ × 4))
	Applied frequency limit (Hz)	MIN_FRQ	-	印加周波数下限値を設定	基本的に変更する必要なし。 (注) 高周波印加電圧の周波数の下限値 = (1 / PWM 制御周波数 / (MIN_FRQ × 4))
Ke 測定	Speed acceleration (Hz/s)	FORCE_SPEED_INC	Hz/s	加減速制限を設定	逆起電力定数測定時の加速度が変化。
	Modulation factor	PHI_F_MEASURE_VDQ_RATE	-	逆起電力定数測定時の変調率を設定	小さすぎると、逆起電力定数の測定精度が下がる。
	Stabilization wait time(s)	PHI_F_MEASURE_WAIT_LEN	s	逆起電力定数測定安定待ち時間を設定	基本的に変更する必要なし。
J 測定	Modulation factor	J_MEASURE_VDQ_RATE	-	慣性モーメント測定時の変調率を設定	大きくすると、到達回転数が上がる。
	Speed acceleration (Hz/s)	J_MEASURE_ACC_MUL	Hz/s	慣性モーメント測定時の加速度を設定	慣性モーメント測定時の加速度が変化。
その他	Back EMF constant	MAGNETIC_FLUX	Wb	逆起電力定数を設定	-
	Inertia (Kgm <sup>2</sup> )	INERTIA	kg・m <sup>2</sup>	慣性モーメントを設定	-
	Direction	CW_CCW	-	回転方向を設定	正回転:Clockwise only(0) 逆回転:Counterclockwise only(1)

### 7.2.2. パラメータ設定ウィンドウ

「Motor Tuning Support」ウィンドウの一部拡大図を図 7.4 に示します。表 7.1 に示した必要な各パラメータの一覧が表示されています。これらは使用するモーターごとに設定する必要があるため、表 7.1 を参考に設定してください。なお、テキストボックスの値を変更するだけでは反映されません。赤字で表示されている変数がある場合は、「Upload」ボタンを押してください。

以降のスライドで、下記(A)、(B)、(C)、(D)の操作方法を説明します。

- (A):PWM モード設定に関するパラメータの測定
- (B):R、L の測定および電流制御ゲインの設定
- (C):Ke、J の測定および位置推定ゲイン、速度制御ゲインの設定
- (D):(A)-(C)の設定値を使用した FOC によるモーター駆動

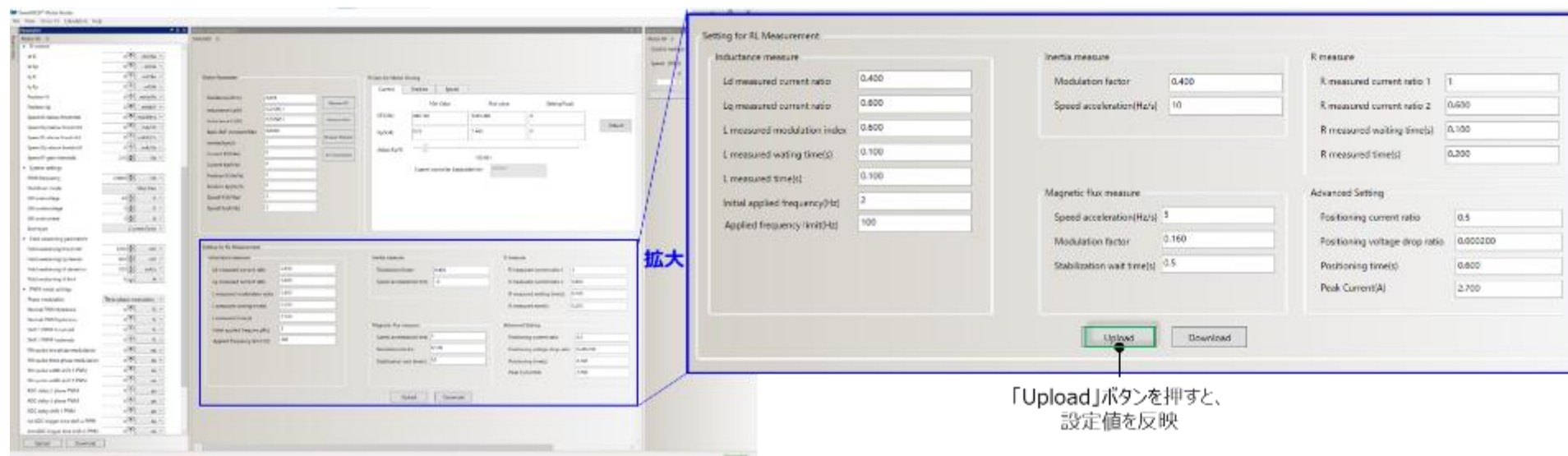


図 7.4 「Motor Tuning Support」ウィンドウの一部拡大図

### 7.2.3. (A):PWM モード設定に関するパラメータの測定

PWM モード設定に関するパラメータの測定の画面を図 7.5 に示します。

- 1) 「Measure Minpulse」 ボタンを押してください。
- 2) 測定中は、ボタンがグレイ表示になり「Stop」 ボタンが表示されます。測定を中断したい場合、「Stop」 ボタンを押してください。
- 3) 測定が完了すると、変更されたテキストボックスが赤字で表示されます。測定値を反映する場合は、「Set Parameters」 ボタンを押してください。

シフト 2PWM とシフト 1PWM の切り替えのヒステリシス(Shift 1 PWM hysteresis)、シフト 1PWM と通常 PWM の切り替えのヒステリシス(Normal PWM hysteresis)が 0 の場合、変調方式の切り替えが頻繁に起きる可能性があります。この場合は制御が不安定になる可能性があるため、0 以外の入力を推奨します。

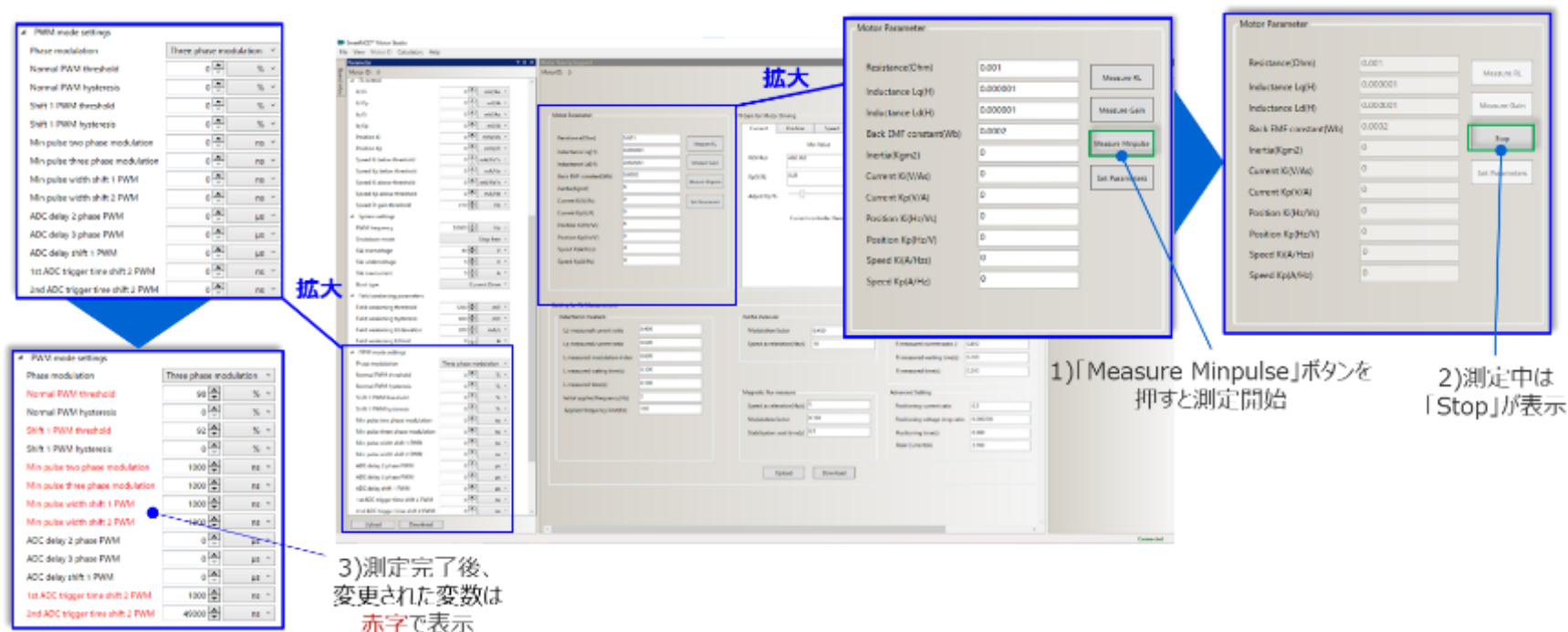


図 7.5 PWM モード設定に関するパラメータの測定の画面

### 7.2.4. (B):R、L の測定および電流制御ゲインの設定

◆ R、L の測定の画面を図 7.6 に示します。

1) 「Measure RL」 ボタンを押してください。

2) 測定中は、ボタンがグレイ表示に変わり「Stop」ボタンが表示されます。測定を中断したい場合、「Stop」ボタンを押してください。

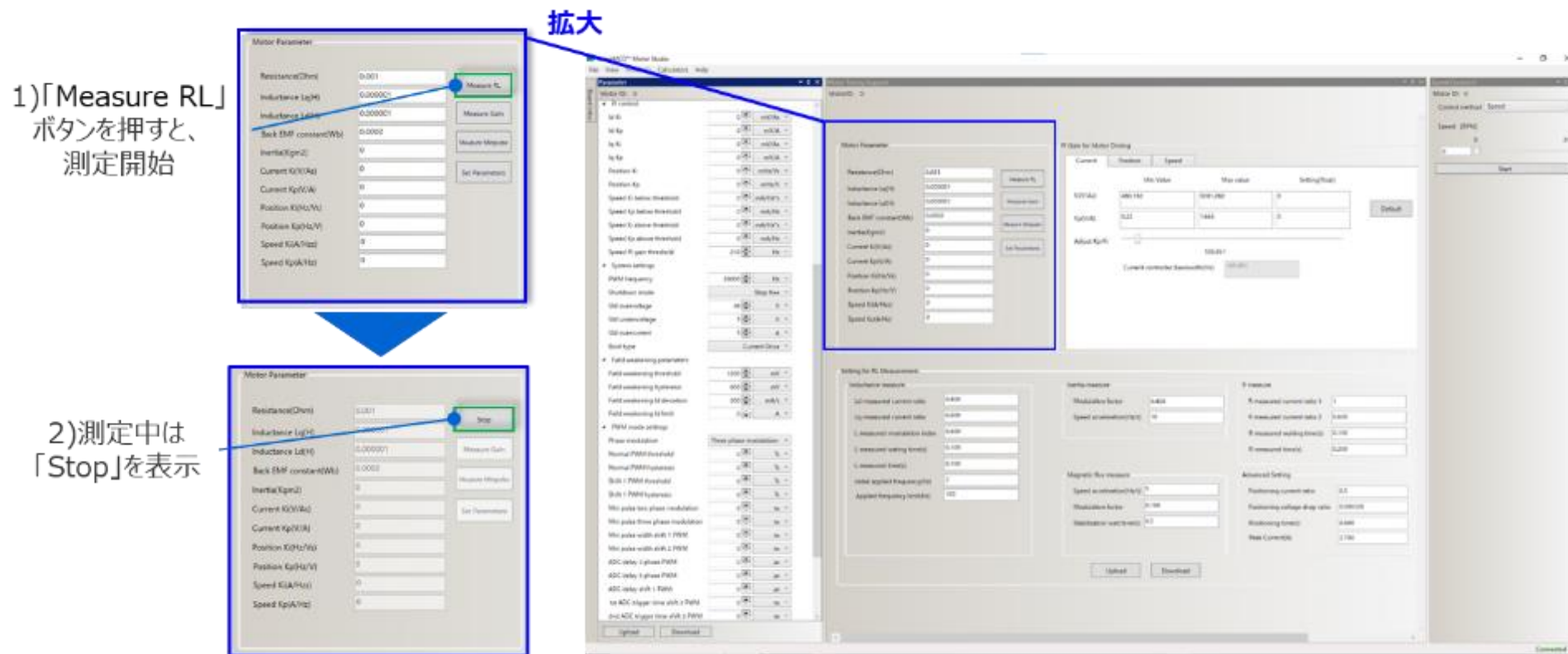


図 7.6 R、L の測定の画面

電流制御ゲインの初期値計算の画面を図 7.7 に示します。

- 3) R、L の測定が完了すると、電流制御ゲインの初期値を自動で計算します。この値が Default 値として、「Current」ゲインタブに入力されます。

測定または送信に失敗した場合、ログウインドウに失敗メッセージが表示されます。

失敗した場合は値が正しく測定できていないため、再測定する必要があります。R、L 測定に使用するパラメータを変更して再測定をしてください。

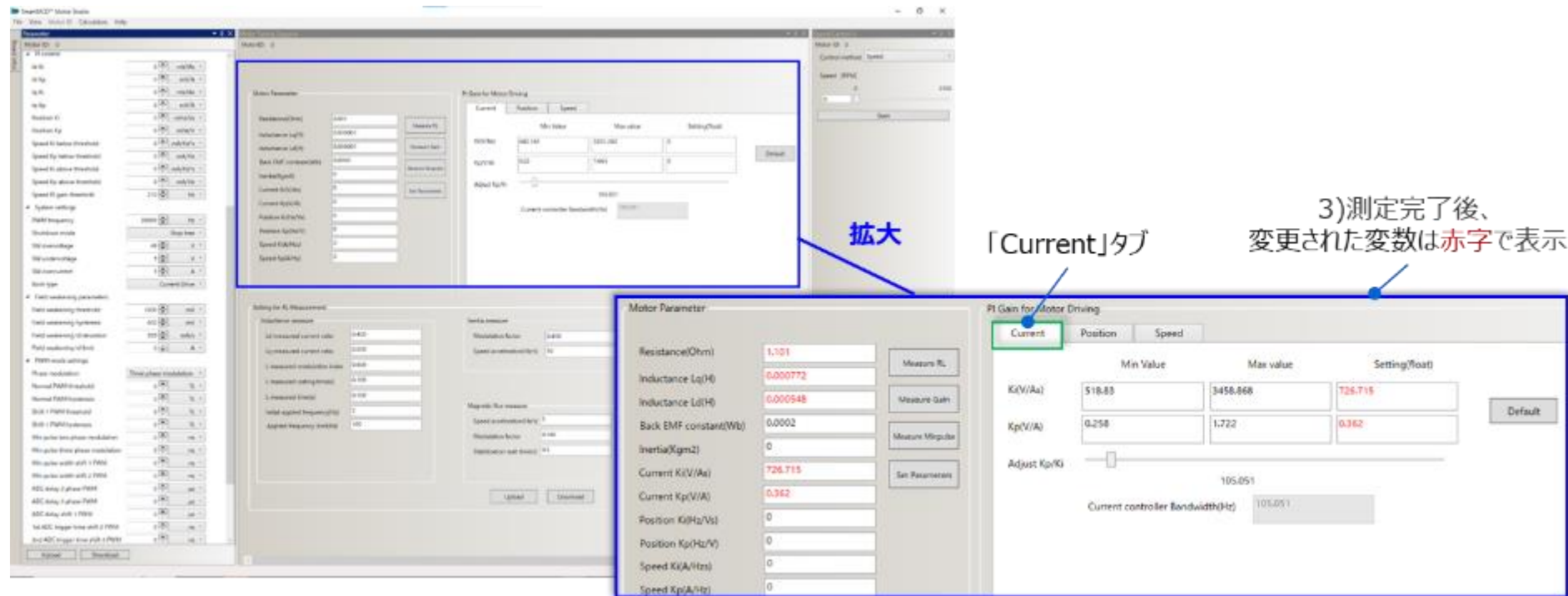


図 7.7 電流制御ゲインの初期値計算の画面

電流制御ゲイン調整の画面を図 7.8 に示します。

4) 測定値を「Parameter」ウィンドウ上に反映する場合は、「Set Parameters」ボタンを押してください。

電流制御ゲインは初期値から変更しなくても動作する可能性があります、調整したい場合は、最小値から最大値の範囲でスライダを調整可能です。もう一度初期値を設定したい場合は「Default」ボタンを押してください。

5) 「Upload」ボタンを押すと設定値が反映され、モーター制御に使用されます。

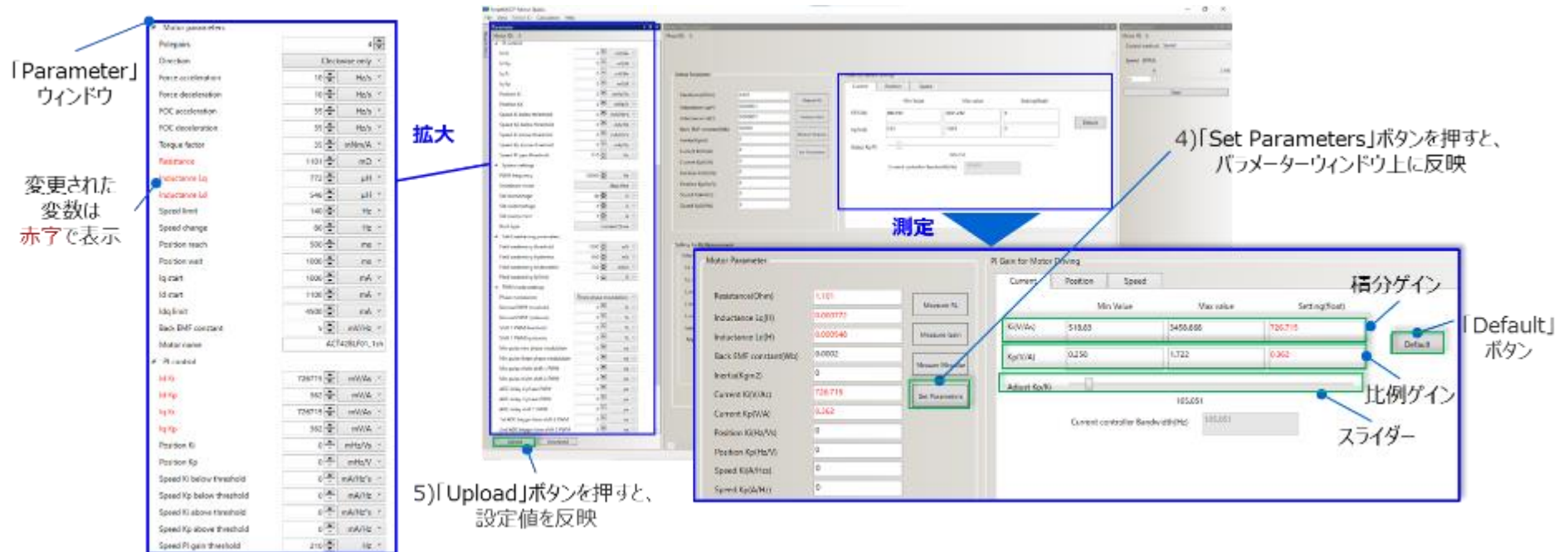


図 7.8 電流制御ゲイン調整の画面



### 7.2.5. (C):Ke、Jの測定および位置推定ゲイン、速度制御ゲインの設定

Ke、Jの測定時の画面を図7.9に示します。

- 1) 「Measure Gain」ボタンを押してください。
- 2) 測定が進行している間はボタンがグレイ表示になり「Stop」ボタンが表示されます。測定を中断したい場合「Stop」ボタンを押してください。

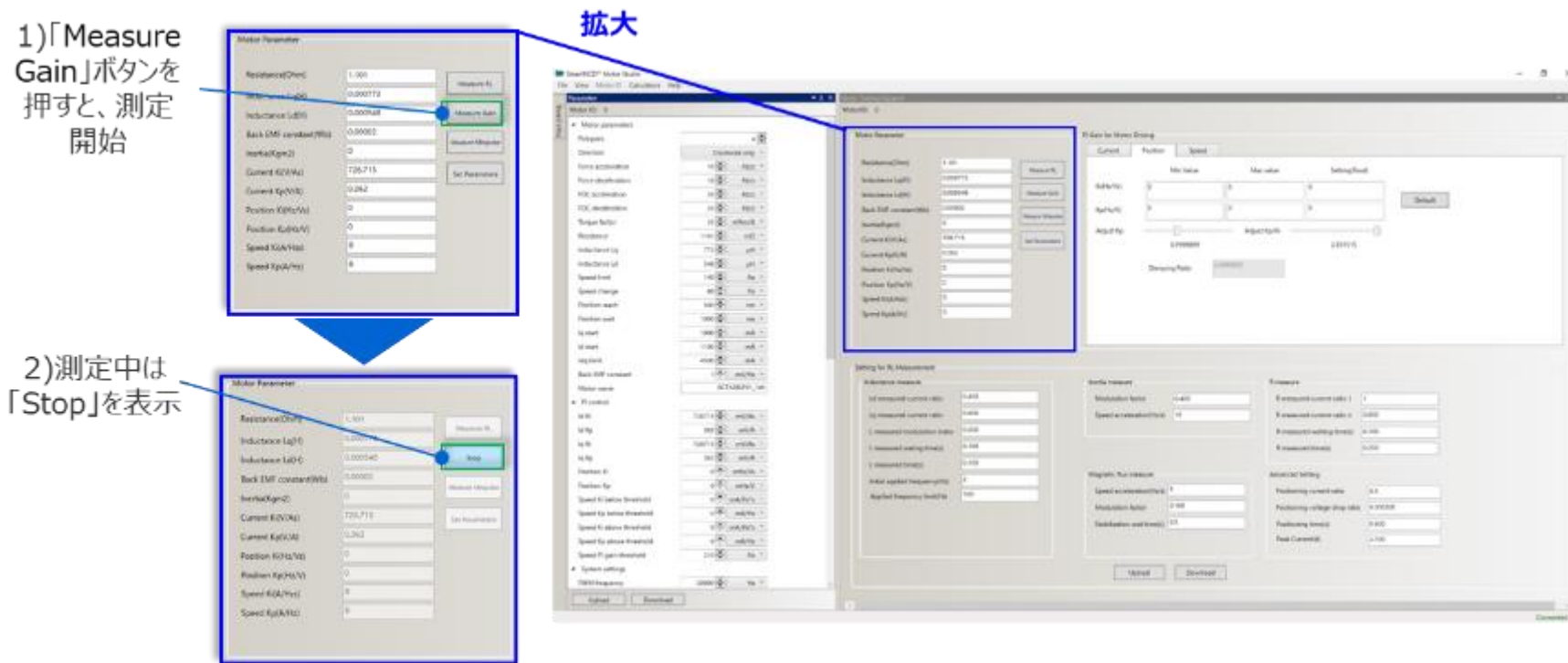


図 7.9 Ke、Jの測定時の画面

位置推定、速度制御ゲインの初期値計算の画面を図 7.10 に示します。

- 3)  $K_e$ 、 $J$  の測定が完了すると、位置推定ゲイン、速度制御ゲインの初期値を自動で計算します。これらの値が Default 値として、「Position」タブ、「Speed」タブに入力されます。

測定または送信に失敗した場合、ログウィンドウに失敗メッセージが表示されます。

失敗した場合は、値が正しく測定できていないため、再測定する必要があります。 $K_e$ 、 $J$  測定に使用するパラメータを変更して再測定をしてください。

The image shows a software interface for motor control parameter adjustment. It is divided into two main sections: 「Position」タブ (Position Tab) and 「Speed」タブ (Speed Tab). Each section contains a list of motor parameters and a PI gain adjustment section.

**「Position」タブ (Position Tab):**

- Motor Parameter:** Resistance (Ohm) 1.101, Inductance (uH) 0.000772, Inductance (mH) 0.000548, Back EMF constant (V) 0.00791, Inertia (kgm<sup>2</sup>) 0.00060, Current (KVA) 126.715, Current (KVA) 0.362, Position (KHz/V) 24.743, Position (KHz/V) 16.932, Speed (KHz/V) 0.004, Speed (KHz/V) 0.022.
- PI Gain for Motor Driving (Position):** Min Value 0.250, Max value 25.013, Setting (Gain) 24.743. Includes a slider for Adjust Kp (0.000000 to 2.581915) and a slider for Damping Ratio (0.000000).
- Annotations:** 「積分ゲイン」 (Integral Gain) points to the Kp field, 「「Default」ボタン」 (Default Button) points to the Default button, 「比例ゲイン」 (Proportional Gain) points to the Kd field, and 「スライダー」 (Slider) points to the Adjust Kp slider.

**「Speed」タブ (Speed Tab):**

- Motor Parameter:** Resistance (Ohm) 1.101, Inductance (uH) 0.000772, Inductance (mH) 0.000548, Back EMF constant (V) 0.00791, Inertia (kgm<sup>2</sup>) 0.00060, Current (KVA) 126.715, Current (KVA) 0.362, Position (KHz/V) 24.743, Position (KHz/V) 16.932, Speed (KHz/V) 0.004, Speed (KHz/V) 0.022.
- PI Gain for Motor Driving (Speed):** Min Value 0, Max value 20.251, Setting (Gain) 0.004. Includes a slider for Adjust Kp (0 to 0.3) and a slider for Damping Ratio (0.000000 to 0.1).
- Annotations:** 「積分ゲイン」 (Integral Gain) points to the Kp field, 「「Default」ボタン」 (Default Button) points to the Default button, 「比例ゲイン」 (Proportional Gain) points to the Kd field, and 「スライダー」 (Slider) points to the Adjust Kp slider.

**4) 「Set Parameters」ボタンを押すと、パラメータウィンドウに反映**

**3) 測定完了後、変更された変数は赤字で表示**

図 7.10 位置推定、速度制御ゲインの初期値計算の画面

位置推定、速度制御ゲイン設定の画面を図 7.11 に示します。

- 4) 測定値を「Parameter」ウィンドウ上に反映する場合は、それぞれ「Position」タブ、「Speed」タブで、「Set Parameters」ボタンを押してください。

位置推定ゲイン、速度制御ゲインは初期値のままでは、定常ステージに切り替え後に、エラーが発生し停止する可能性があります。この場合は、最小値から最大値の範囲でスライダーを調整可能です。もう一度初期値を設定したい場合は「Default」ボタンを押してください。

- 5) 「Upload」ボタンを押すと設定値が反映され、モーター制御に使用されます。

**「Parameter」ウィンドウ**

変更された変数は赤字で表示

拡大

5)「Upload」ボタンを押すと、設定値を反映

4)「Set Parameters」ボタンを押すと、パラメーターウィンドウ上に反映

図 7.11 位置推定、速度制御ゲイン設定の画面

## 7.2.6. (D):(A)-(C)の設定値を使用した FOC によるモーター駆動

モーター駆動の画面を図 7.12 に示します。

- 1) FOC では、「Parameter」ウィンドウ上の各値を使用するので、表 2.1 設定パラメータ一覧、表 3.1 および 3 章の内容を参考に設定してください。もし、赤字の変数があれば、設定が反映されていないため、「Upload」ボタンを押してください。
- 2) 「Speed Control 0」ウィンドウで、モーター制御のコマンドを設定してください。速度指令の変動や起動/停止は動作中に実施可能です。
- 3) 必要に応じて「Parameter」ウィンドウでモーター制御のパラメータや、「Motor Tuning Support」ウィンドウで各 PI 制御ゲインを調整してください。

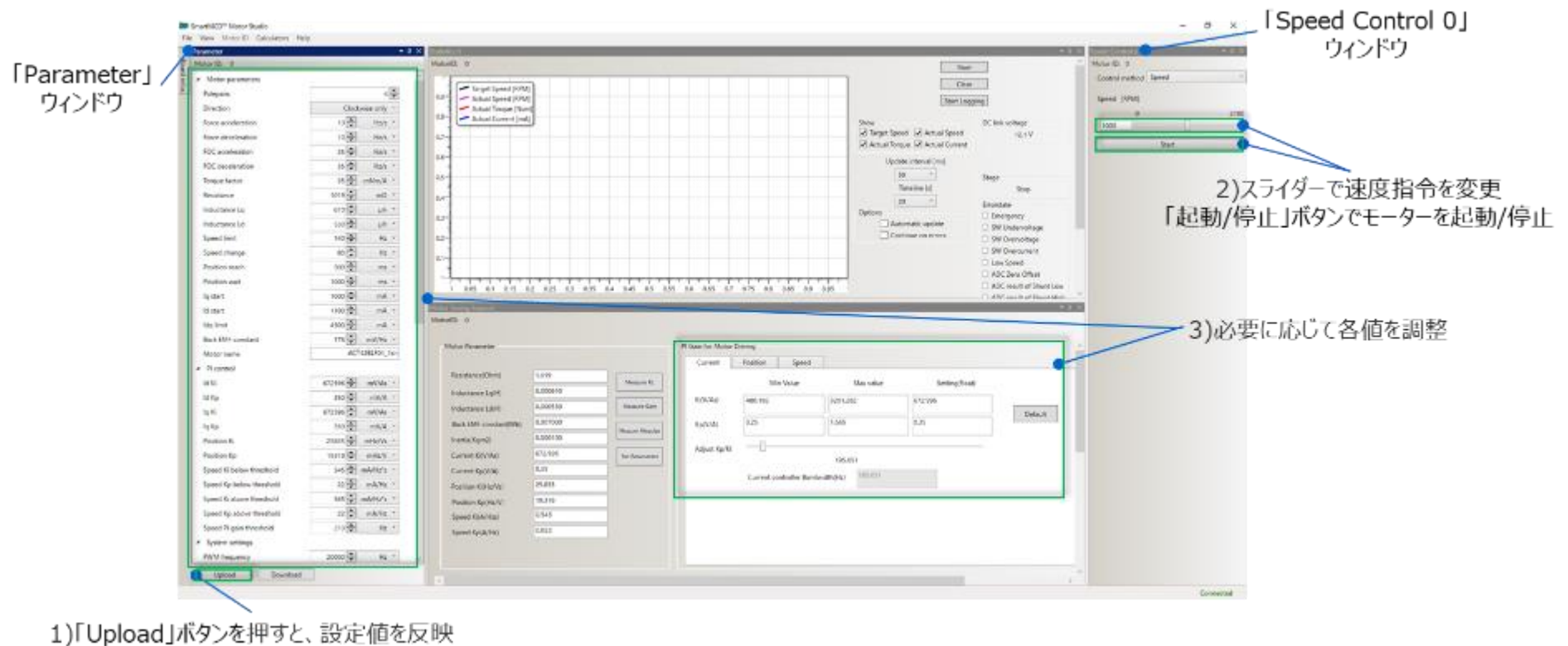


図 7.12 モーター駆動の画面

## 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。

\*SmartMCD™ は東芝デバイス&ストレージ株式会社の商標です。

## 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用途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。