iMOTION™による誘導モーター制御

About this document

Scope and purpose

このドキュメントは、可変速アプリケーション用の誘導モーターに iMOTION™システムを使用したいお客様を対象とします。

Intended audience

このドキュメントは、可変速アプリケーション用の誘導モーターに iMOTION™システムを使用したいお客様を対象とします。

Table of contents

About this document **1**
Table of contents **1**
1 誘導モーターの V/Hz 制御の概要 **2**
1.1 はじめに 2
1.2 スクリプト開発ワークフロー 4
2 V/Hz 制御構造 **5**
2.1 MCEWizard 入力エントリー要件 5
2.2 MCE による V/Hz 制御 8
2.2.1 ランプブロック付き参照速度生成器 8
2.2.2 ランプブロック付き周波数累算器による角度生成 9
2.2.3 PWM 生成/デッドタイム/ VDC バス電圧補償 9
2.3 V/Hz 制御のスクリプト言語部分 10
2.3.1 トルクブースト 10
2.3.2 弱め界磁 11
3 V/Hz 制御スクリプト言語の例 **13**
4 参考資料 **16**
改訂履歴 **17**

1 誘導モーターの V/Hz 制御の概要

1.1 はじめに

iMOTION™モーションコントロールエンジン (Motion Control Engine, MCE) の最新のソフトウェアリリースには、誘導モーターの開ループ V/Hz 制御に必要な機能を実現するためのスクリプトエンジンが含まれています。開ループ V/Hz 制御は、Figure 1 に示す「各相等価回路」と呼ばれる AC 機械モデルに基づいています。固定子巻線の主なインピーダンスはインダクタンス Lm で、通常は数十～数百 mH の範囲です。直列インダクタンス Ls は、5 HP 以下のモーター出力範囲で数百μH の範囲です。

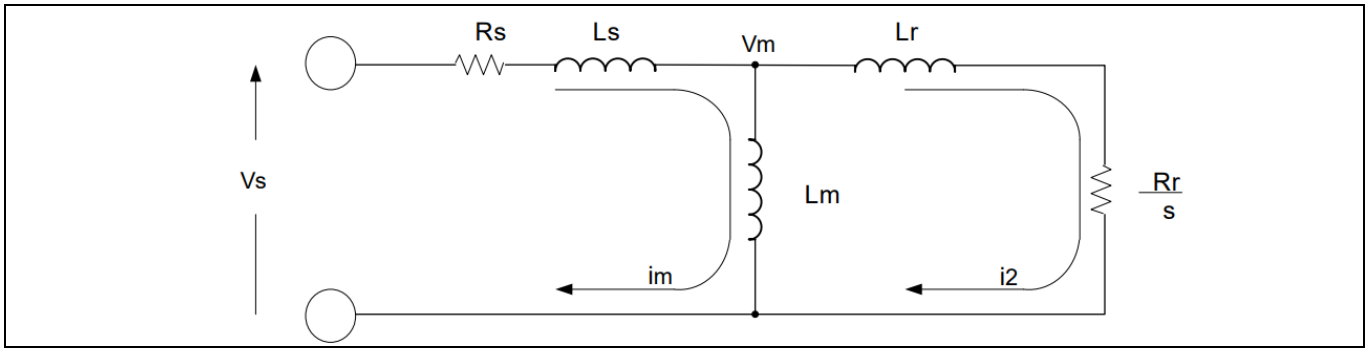


Figure 1 誘導モーターの等価回路

ここで:

Rs: 固定子の漏れインダクタンス

Ls: 固定子の漏れインダクタンス

Lm: 固定子の磁化インダクタンス

Lr: ローターの漏れインダクタンス

Rr: ローター抵抗

S: すべり周波数

上記の各相等価回路に基づいて、トルクは次の式で表すことができます。

$$T = k \times \frac{R_r}{s} \times {i_2}^2$$

ここで:

K: 定格磁束を含む定数

i2: ローター回路電流

トルクは常に制御されていません。AC 機械自体が軸荷重に応じたトルク発生を行います。負荷が増加すると、すべり周波数が増加し、それによってローター電流が増加し、トルクが増加します。したがって、完全なトルクを生成するには、モーターを最大磁束で磁化することが重要です。

V/Hz 制御の重要な概念は、モーターが基本速度までのすべての速度範囲で均一に磁化されるように、界磁磁束を一定に維持することです。磁束の磁化量を同じに保つために、印加電圧 Vs (より正確には Vm、磁化電圧) は電気角速度 ω に比例する必要があります。このように、Vs/ω を一定に保つことにより、結果として生じる磁化電流 i_m も一定に保たれます。これにより、回転速度に関係なく、磁化磁束も一定に

誘導モーターの V/Hz 制御の概要

保たれます。Vs は、固定子インピーダンスが固定子抵抗 Rs によって支配される低速領域を除いて Vm とほぼ同じです。したがって、磁化電圧 Vm が変化しないようにするために追加の電圧を Vs に印加する必要があります。低速範囲でのこの追加電圧は、いわゆる「トルクブースト」電圧です。速度が上がると Vs を上げる必要があり、それによって励起周波数も直線的に増加します。励起周波数が基本周波数 (通常は 60 Hz) に達すると、印加電圧はその限界 (多くの場合 AC230V または 460V) に達します。要求された速度が基本周波数を超えると、弱め界磁制御に移行します。この弱め界磁制御では、トルクが逆に減少するため、トルクと速度の積である電力は一定に保たれます。したがって、この領域は「定電力動作範囲」とも呼ばれます。Figure 2 に、速度 (Hz) と電圧の観点からこれらの動作を示します。

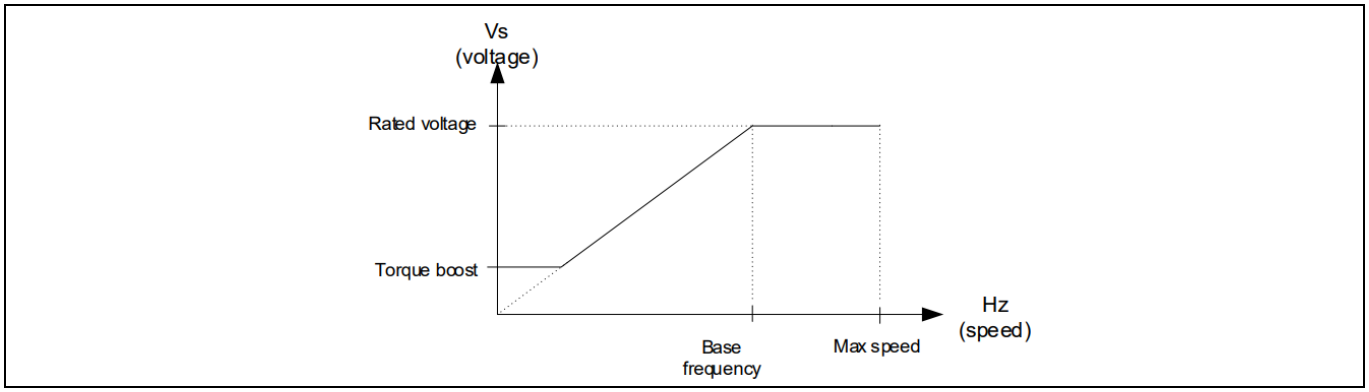
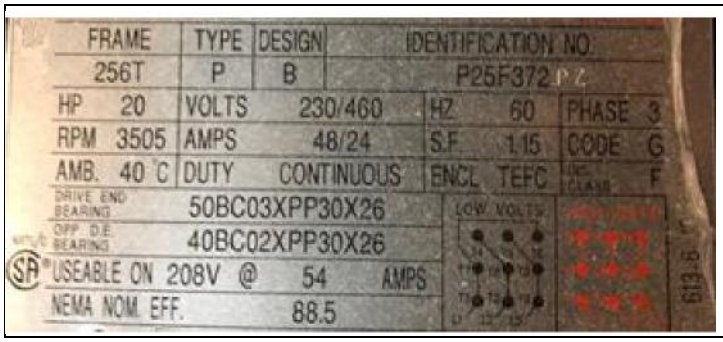


Figure 2　電圧対速度

このような制御を実現するために、必要なすべてのアプリケーション情報を、設定ツール MCEWizard に入力する必要があります。基本的に、それらの情報は銘板から入手でき、誘導モーターの場合に対しては銘板の情報は標準化されています。Figure 3 に、一般的な誘導モーターの銘板データの例を示します。銘板から入手する必要情報は次のとおりです。



1) VOLTS: 定格電圧

2) HZ: 定格電圧における基本周波数

3) RPM: 最大負荷印加時の定格電圧および基本周波数における定格速度

Figure 3　モーター銘板の例

これらの情報から、ユーザーは極数を計算する必要があります。極数は次のように計算されます。

$$p = \frac{120 \times Hz}{\mathrm{RPM}}$$

ここで: Hz = ヘルツ単位の基本周波数、RPM = 銘板データ内の RPM

P = 極数 (偶数である必要があります) であり、最も近い整数に丸められます。

Figure 3 の例では、120×60/3505 = 2.05 から切り捨てられた p = 2 です。

これらの図は、目的の V/Hz 制御システムを設定するために使用されます。

1.2 スクリプト開発ワークフロー

スクリプトプログラム開発の一般的なワークフローは、MCEWizard (またはその他のテキストエディター) を使用してスクリプトコードを記述し、'.mcs'拡張子の付いたスクリプト入力ファイルとして保存することから始まります。MCEWizard は、必要に応じてアナログ・デジタル・コンバータ (ADC) や汎用-入出力 (GPIO) ピンの利用可能な設定をするために使用され、'.ldf'拡張子の付いたスクリプトオブジェクトファイルを生成するスクリプトコードをコンパイルするためにも使用されます。ldf ファイルには、タスク 0 とタスク 1 のスクリプト命令の総数に関する情報と、スクリプトコードで定義されているグローバル変数のリストが含まれています。次に、MCEDesigner [3]を使用して ldf ファイルをターゲット MCE にダウンロードし、スクリプトプログラムで使用されるグローバル変数の値の監視もサポートします。スクリプト言語とその開発の詳細については、[2]を参照してください。

2 V/Hz 制御構造

実装されている V/Hz 制御部は、2 つの部分に分かれています。1 つは iMOTION™が提供する MCE (Motion Control Engine) で、もう 1 つは、プログラミングを独自に変更できるスクリプト言語によって補完され、それらをターゲットシステムにダウンロードする必要があります。V/Hz 制御では、2 つの変数を制御する必要があります。1 つは、指令された速度入力に比例し、提供された MCE ハードウェアによって生成される回転周波数であるため、プログラミングの必要はありません。もう 1 つは、モーターに印加される電圧で、これも指令された電圧に比例します。速度指令は、スクリプト言語によって印加電圧指令、つまり Vq に変換されます。MCE には、既製のファームウェアによるモーター制御のすべての要素が含まれており、ユーザーは、MCEWizard とスクリプト言語プログラミングによってソフトウェアスイッチとマルチプレクサを適切に選択することにより、V/Hz の制御を設定するだけで済みます。スクリプト言語は、プログラミングによって目的のユーザー機能を記述できる「C」のような言語であり、この場合、V/Hz 制御フロントエンド機能 (Figure 4 の破線で囲まれている部分) はスクリプト言語によって実装されます。

全体的な機能ブロックを Figure 4 に示します。

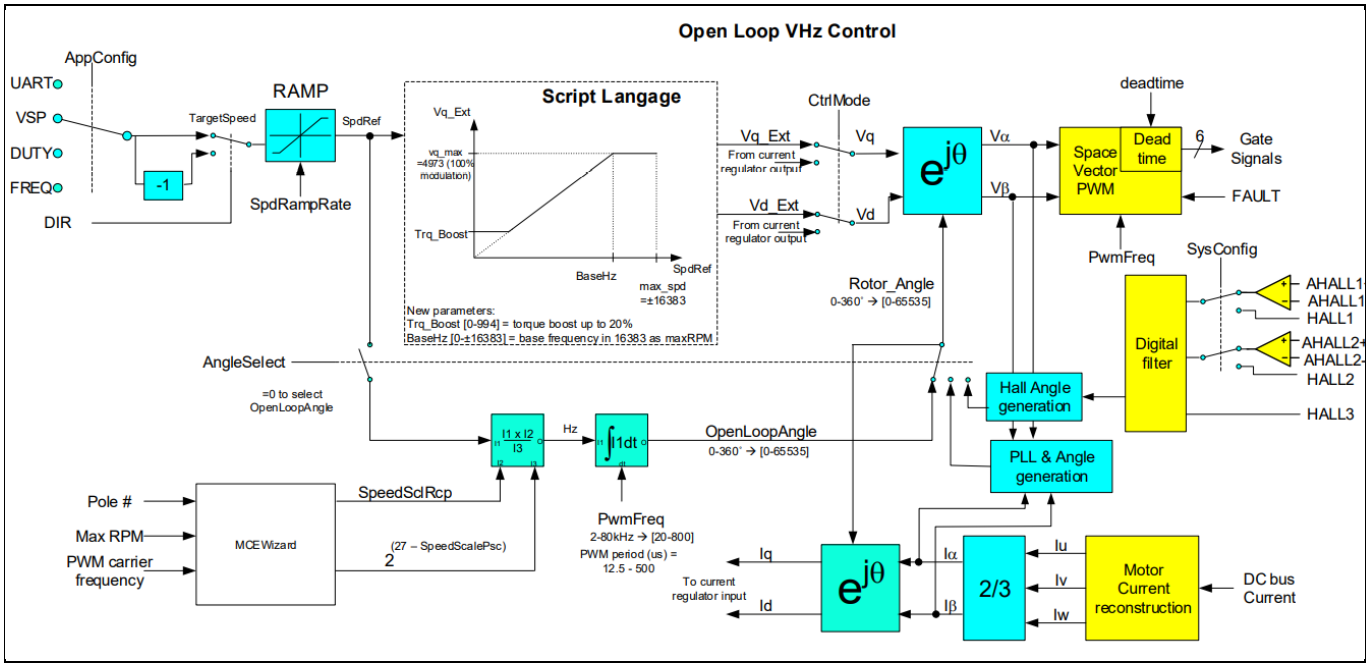


Figure 4 機能ブロック図

2.1 MCEWizard 入力エントリー要件

誘導モーターのオープンループ V/HZ 制御を行うために MCEWizard で以下の入力が必要とされます。

- モーターコントロールモード入力: 電圧開ループコントロール
- モーター角度選択:開ループ角度
- スクリプト機能オプション: 有効
- モーター1 の PWM 周波数
- モーター極数
- モーター最大回転数

V/Hz 制御構造

まず、Welcome ページで、2 つのチェックボックスをオンにする必要があります (Figure 5)。1 つは「I have modified the circuit board」、もう 1 つは「Enable advanced questions」です。これは、次の選択肢を利用できるようにするために必要です。

モーター1 PWM Frequency、Motor Poles、および Motor Max RPM は、アプリケーションの設計とモーターに依存するため、それに応じて入力する必要があります。「Motor Control Mode Input」は常に電圧開ループ制御である必要があり、「Motor Angle Select」はアプリケーションまたはモーター選択に関係なく常に開ループ角度である必要があります。

これらのパラメータエントリは、Figure 6 に示す「Base Configuration Options」ページと Figure 7 に示す「Advanced Mode」ページにあります。

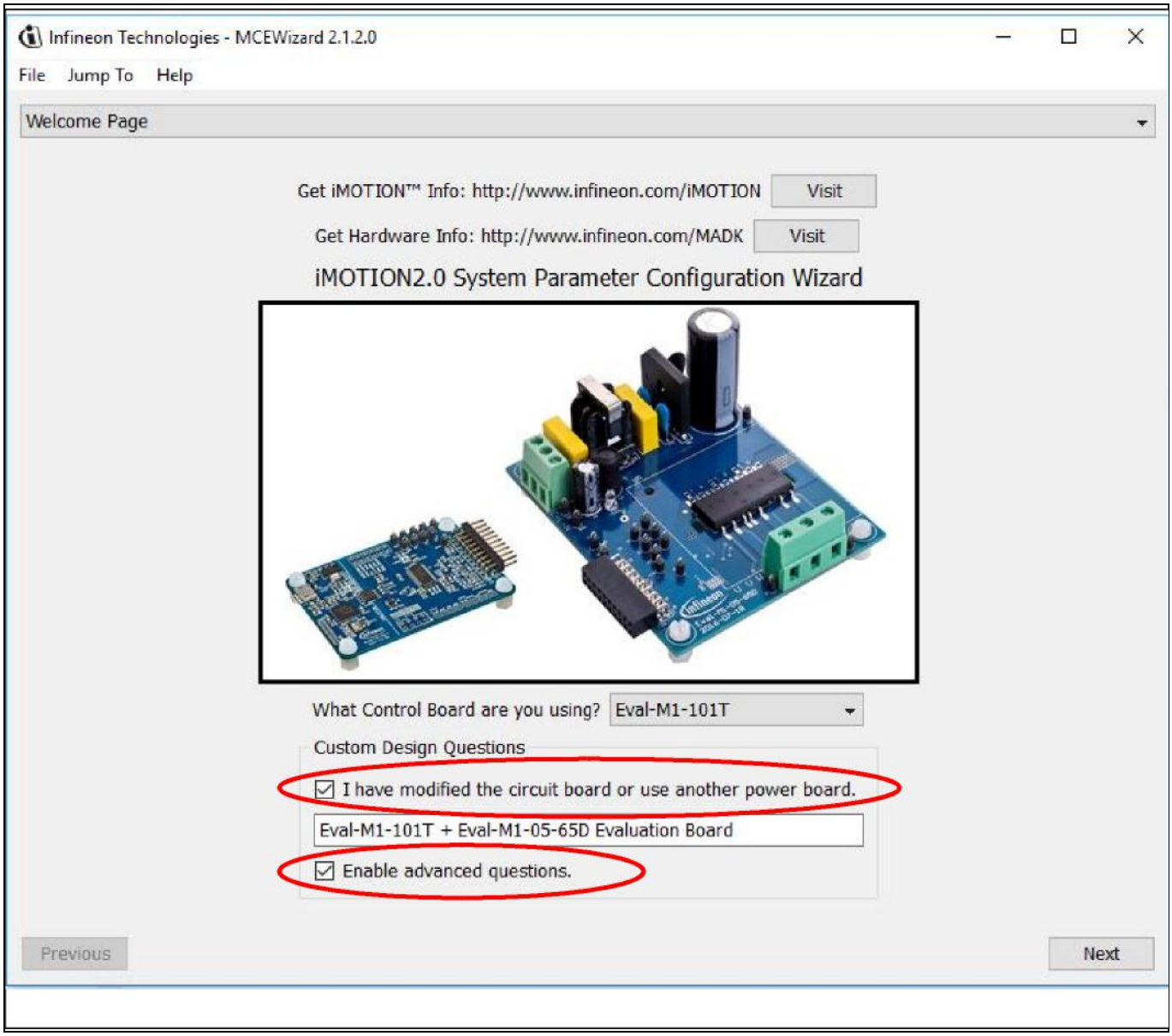


Figure 5 MCEWizard – Welcome ページ

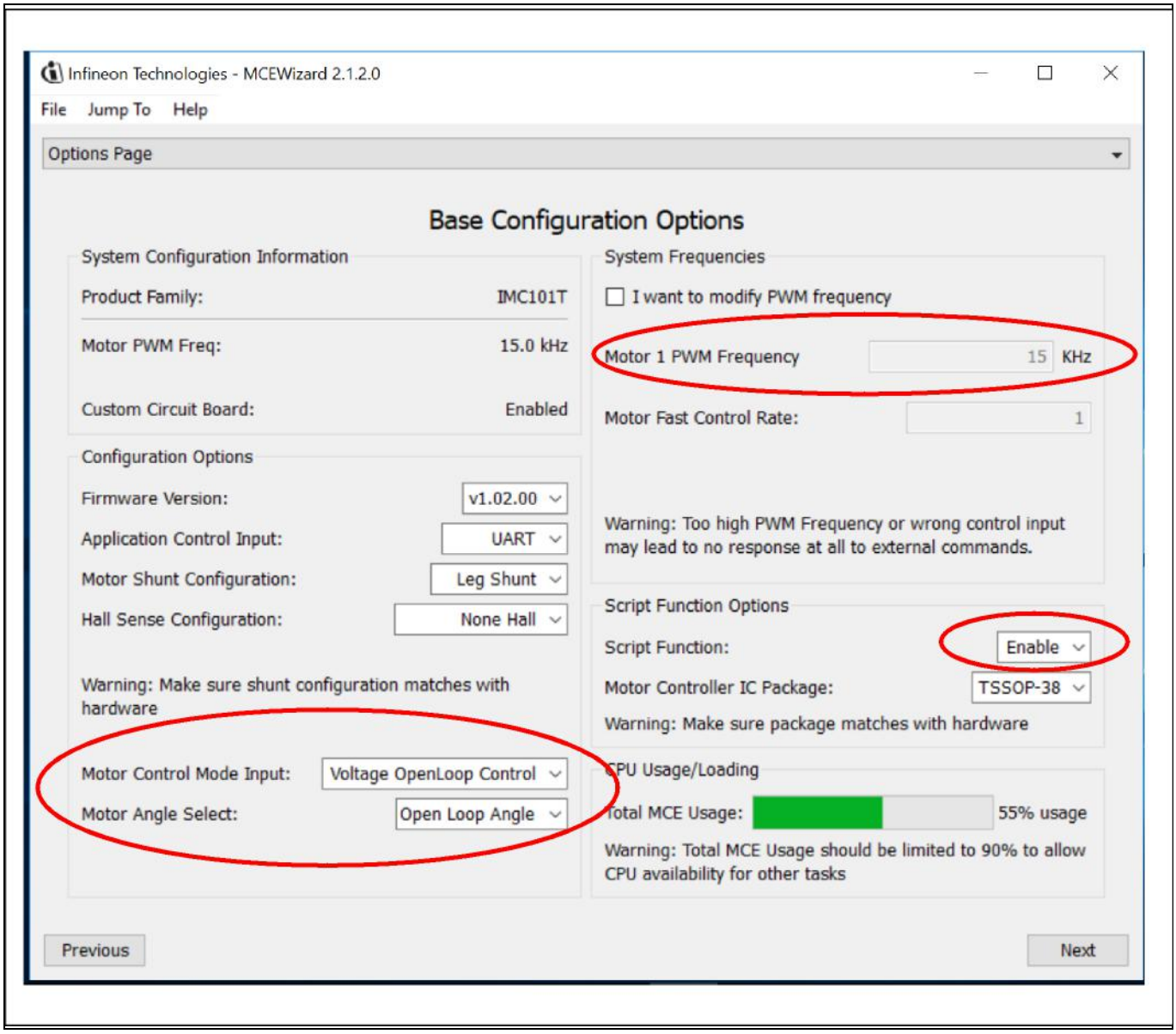


Figure 6　　MCEWizard - 基本設定オプション

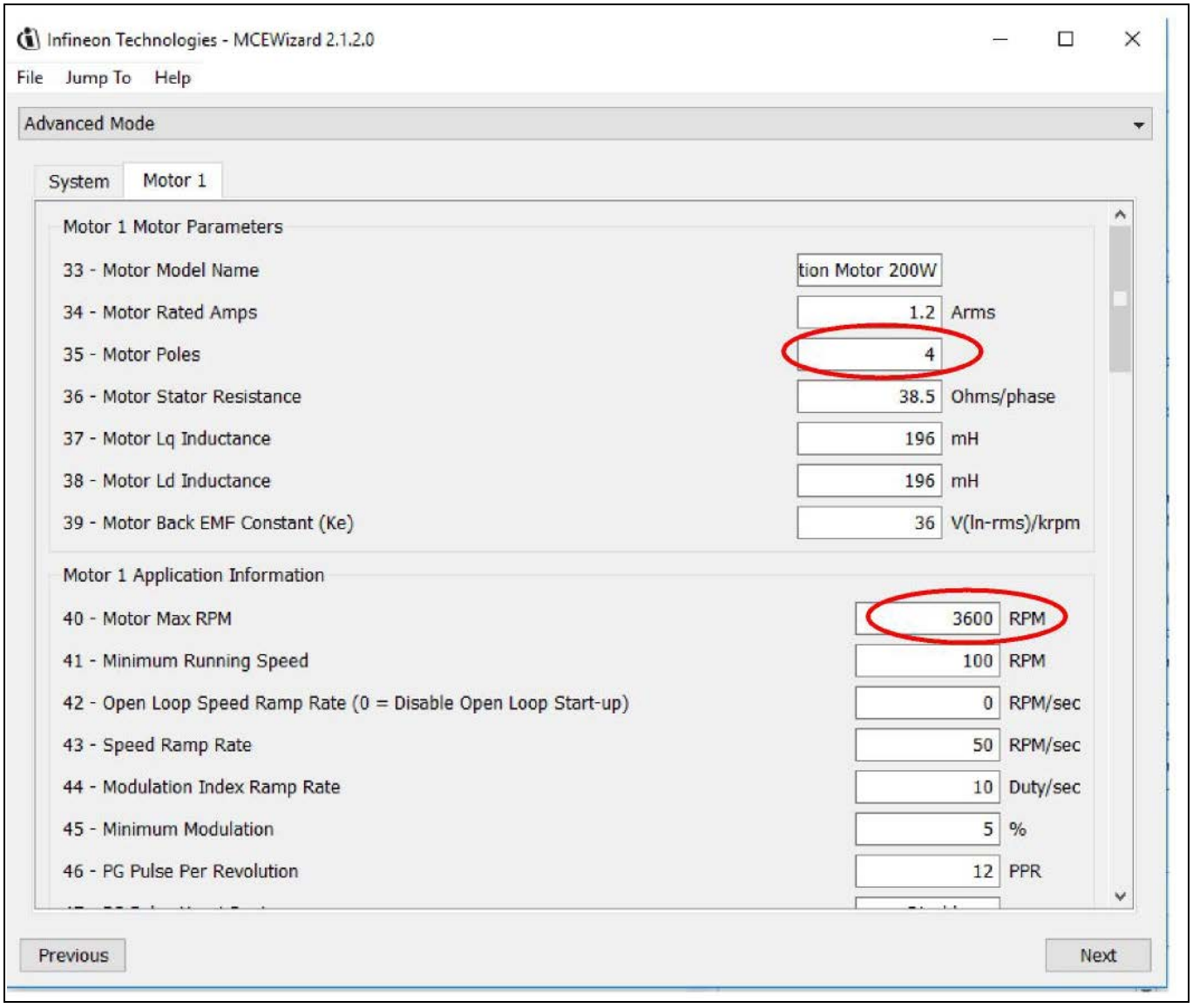


Figure 7　MCEWizard – Advanced モード

2.2　MCE による V/Hz 制御

スクリプト言語 (Figure 4 での破線で囲われている部分) を除く制御要素は、MCE 関数によって提供されます。すべての色付きのブロックは、MCE 関数にすでに配置されています。ユーザーは、主に MCEWizard 設定ツールで信号パススイッチと関連パラメーターを構成するだけで済みます。V/Hz 制御に関連する MCE 機能は、次のセクションに分かれています。

- ランプブロック付き参照速度生成器
- 周波数発生器/累算器
- PWM 生成

2.2.1　ランプブロック付き参照速度生成器

ランプブロック付きの参照速度生成器には、ユーザーインターフェースに応じて 4 つの入力選択があります。UART 通信、VSP アナログ入力、デューティ入力、周波数入力です。

V/Hz 制御構造

UART 以外の VSP アナログ、デューティ入力および周波数入力には、各入力値と、モーター停止点、モーター開始点、およびモーター最大速度に関係性があります。MCE リファレンスマニュアルのセクション 2.1.8 制御入力を参照してください。選択は、[0:2] (0 = UART 通信、 1 = VSP アナログ, 2 = 周波数, 3 = デューティ) のビット位置にあるパラメーターAppConfig (インデックス 71) によって行われます。VSP アナログ入力を選択する場合は、VSP ピンがアナログ電圧による速度指令を提供するように接続され、デューティ入力あるいは周波数入力の場合は、FREQUDUTY ピンが速度指令を提供するように接続されていることを確認してください。VSP アナログ入力、デューティ入力あるいは周波数入力の場合は、DIR ピンの情報により順方向/逆方向を指定します。DIR ピンの状態により、信号変数や TargetSpeed のプラス/マイナスの符号付けがなされ、ランプブロックに入ります。

2.2.2 ランプブロック付き周波数累算器による角度生成

このブロックは、モーターの電気周波数を統合して、電圧と電流の座標変換を実行するベクトル回転器と逆ベクトル回転器に渡される電気角度を生成します。モーターに適用される基本周波数は、この制御要素によって決定されます。

Figure 4 に示す電気角度変数「OpenLoopAngle」を生成する基本的なメカニズムは、周波数累算器によって積分器ブロックとして実装されます。各 PWM 搬送波周波数の更新時に、電気角度に適用される周波数累算器に適切な量が追加されます。適切な量の周波数増分、つまり Figure 4 の「Hz」は、MCEWizard 入力、モーターの極数、PWM キャリア周波数、および rpm 単位の最大速度から導き出されます。コマンド速度は、RPM のエンジニアリングユニットと最大速度= 16383 のように内部数との関係に従って再スケーリングする必要があります。

モーターの極数と最大速度により、モーターの固定子に適用される電気的な最大周波数が生成されます。PWM キャリア周波数と電気的最大周波数は、電気的角度を生成する周波数累算器への増分加算量を決定します。

これらの 3 つの MCEWizard パラメーターは、同じ入力情報から派生したスクリプト言語タスクパラメーター「BaseHz」と同期する必要があります。

基本的な角度生成メカニズムは単純で、数値データ範囲/解像度で以下に示されています。括弧番号はデータ範囲を示します。

周波数発生器:

OpenLoopAngle [0 – 65535] = Hz + previous_angle

previous_angle = OpenLoopAngle

例えば、極数が 4 で、最大速度が 3600 rpm の場合、電気的最大周波数は最大速度で 3600÷60×(4÷2)=120 Hz であり、PWM 更新レートが 12 kHz の場合、電気周波数 120 Hz を実現させるためには 1 電気回転内で 100 回の PWM 更新が必要です。したがって、この例では Hz = 65535/100 = 655 です。これらの計算は MCEWizard 内で自動的に実行され、ファームウェアは必要な角度生成を自動的に生成します。

2.2.3 PWM 生成/デッドタイム/ VDC バス電圧補償

Figure 4 に黄色で示されている PWM 変調器ブロックは、パルス幅変調されたデジタル信号の形式で、外部の 6 つのパワースイッチングデバイスに必要なゲート信号を生成します。

PWM のタイプは、静的パラメーターで定義された HwConfig の構成を選択することで選択できます。ビット位置[4:3]は、「0」- 3 相 PWM、および「3」- 2 相タイプ 3 PWM を定義します。

デッドタイムは PWMDeadtimeR と PWMDeadtimeF によって調整することができ、使用されるゲートドライバとパワーデバイスに依存しています。一般に、500 ns から 1 µs の間の値を選択することを推奨します。

V/Hz 制御構造

DC バス補償は、SysConfig レジスタのビット位置[0]を「1」に設定することで有効になります。DC バス補償は、DC バス電圧変動に応じて瞬時 PWM パルス幅を自動的に調整します。例えば、DC バスが通常 320 V で、400 V に変動する場合、対応する PWM パルス幅も調整され、320/400 =公称値の 80%に減少します。

2.3 V/Hz 制御のスクリプト言語部分

第 3 章に示されているスクリプト言語の実装には、2 つの部分があります。1 つは初期化タスクです。

最初に 1 回だけ実行し、もう 1 つは 50 ms ごとに定期的に実行されるタスクです。

初期化タスクは、以下のパラメーターを初期化します。

- VQ_MAX: 最大電圧コマンド内部ユニット、4973 は最大電圧です。ローカル変数です
- TrqBoost: VQ_MAX にスケーリングされたトルクブースト電圧。10%のトルクブーストの場合 497、グローバル変数です
- BaseHz: 最大回転数 (Max rpm) 16383 にマップされた基本周波数等価速度内部ユニット。

$$BaseHz = \frac{Base\ speed\ in\ frequency}{Max\ rpm\ in\ frequency} \times 16383$$

例えば、MCEWizard で max_rpm が 120 Hz にマップされていて、BaseHz を 60 Hz にしたい場合、BaseHz = 8191 です。次に、電圧コマンドと周波数は BaseHz まで比例します。BaseHz を超えると、60Hz～120 Hz の区間で弱め界磁動作が動作します。

- AngleSelect: 0 に設定して、開ループ制御を選択します
- CtrlModeSelect: 0 に設定して、電圧モード制御を選択します

初期化タスクでは、AngleSelect と CtrlModeSelect の 2 つの構成パラメーターを同期して更新する必要があります。これは、一方が更新され、もう一方が以前のステータスを保持しているときにグリッチを回避する必要があるためです。これにより、誤動作が発生する可能性があります。

本体のタスクは比較的単純で、ランプブロック出力 SpdRef から必要な電圧が生成され、出力 Vq_Ext に渡されます。電圧表彰は、100 % PWM 変調に対応する最大電圧制限として現在 4973 にマッピングされている VQ_MAX にクランプされます。基本周波数 BaseHz を超えて PWM 出力を生成し続け、クランプされた電圧で弱め界磁動作を引き起こします。

2.3.1 トルクブースト

トルクブースト機能は、AC 機械の動作で低速レンジ制御が必要な場合に役立ちます。トルクブースト機能がないと、負荷状態によっては誘導モーターが遅くなったり、コギングを起こしたり、ストール状態になることがあります。これらのすべての望ましくない現象は、低速動作範囲で十分な電圧がないために発生するトルクの不足に起因します。

誘導モーターを低速で作動したときに、モータインピーダンスの大部分は固定子抵抗 Rs となります。インピーダンスのインダクタンス部が DC 等価周波数近辺では無視できるようになるからです。したがって、磁化電流 Im は、トルクブースト機能なしで大幅に減少し、結果として生じる磁化磁束は大幅に減少します。

理想的には、磁化磁束を維持するために低速で正しい電圧が印加される場合、最小トルクブースト電圧 Trq_Boost は理論的に次のように表されます。

$$Trq_Boost[\%] = \frac{Im \times Rs}{Rated\ Voltage} \times 100$$

V/Hz 制御構造

実際には、インダクタンス部分の余地を確保するために、トルクブースト電圧は上記の式よりもいくらか大きくする必要があります。Figure 8 は、トルクブースト領域で周波数 (速度) が増加するにつれて、電圧が直線的かつ段階的に増加することを示しています。したがって、ギャップを最小限に抑えるために、理論値よりもわずかに大きい電圧に調整する必要があります。

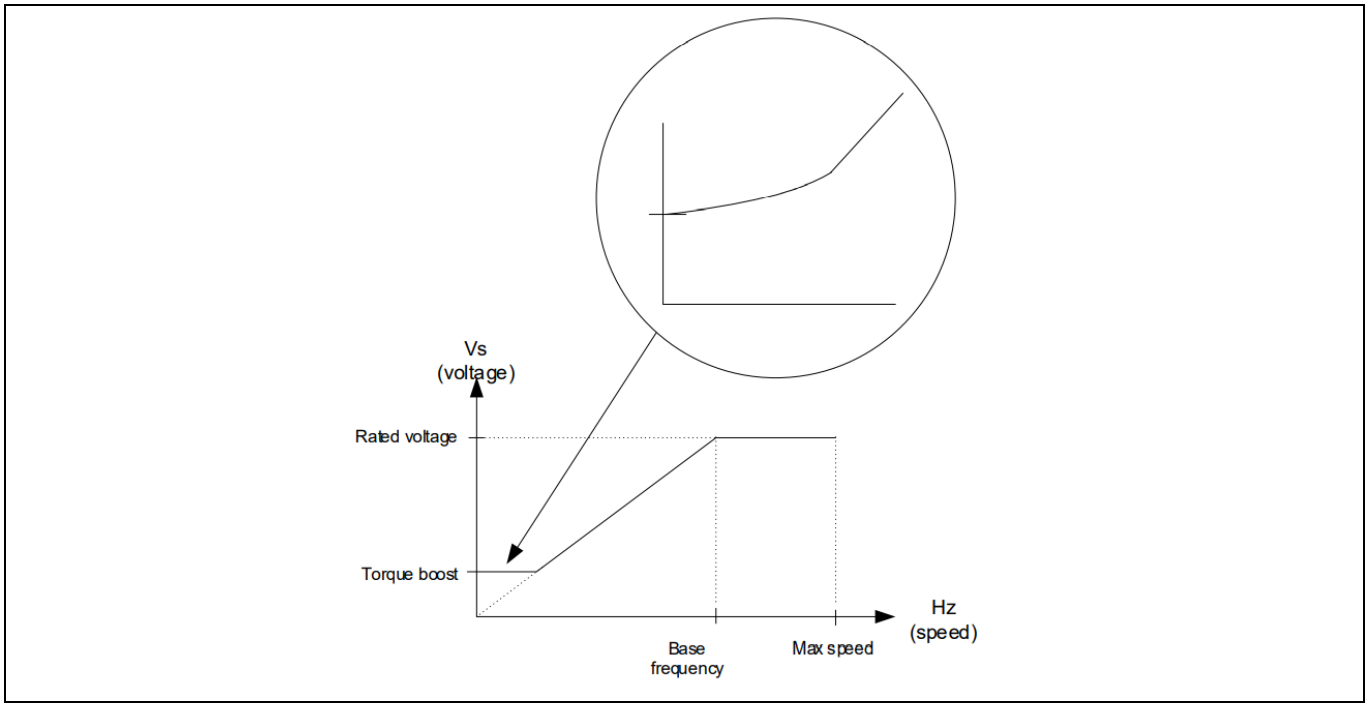


Figure 8　トルクブースト機能

2.3.2　弱め界磁

弱め界磁は、電圧コマンドと組み合わせて基本周波数と最大速度を適切に設定することで実現できます。これは、モーターに電圧と周波数を所定の値で印加することによる開ループ制御です。

弱め界磁を達成するために、ユーザーは、トルクを犠牲にしながらも、トルクを犠牲にすることで、基本速度を超える高速運転を実現する電力一定制御を行う必要があります。つまり、モーターの軸出力は、モーターサイズで指定された定格出力を超えることはできません。

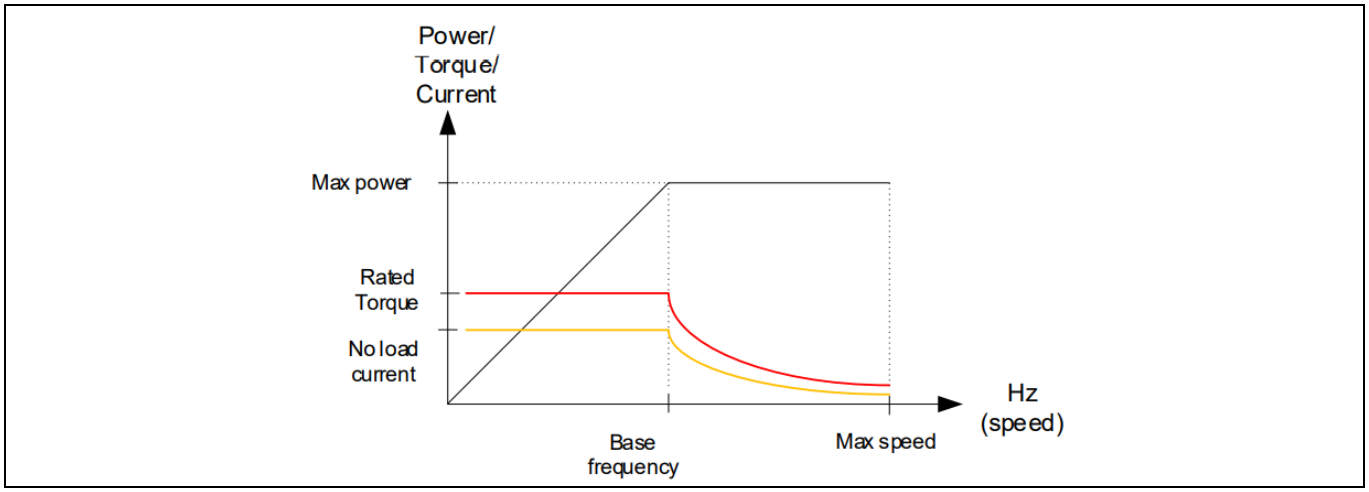


Figure 9　弱め界磁

V/Hz 制御構造

速度が基本周波数を超えると、トルクは速度の増加に反比例して減少する必要があります。そのため、「出力 = トルク x 速度」を最大出力に維持する必要があります。それに応じて、速度に反比例してモーター電流も減少します。

V/Hz 制御は、スクリプト言語によるこの弱め界磁操作を提供します。

3 V/Hz 制御スクリプト言語の例

```
#SET SCRIPT_USER_VERSION (1.00) /*Script version value should be 255.255*/
#SET SCRIPT_TASK0_EXECUTION_PERIOD (50) /*Script execution time for Task0 in mS, maximum value 65535*/
#SET SCRIPT_TASK1_EXECUTION_PERIOD (1) /*Script execution time for Task1 in 10mS, maximum value 65535*/
#SET SCRIPT_START_COMMAND (0x3) /* Start command, Task0:Bit0, Task1:Bit1; if bit is set, script executes after init */
#SET SCRIPT_TASK0_EXECUTION_STEP (10) /* Script Task0 step, This defines number of lines to be executed every 50mS*/
#SET SCRIPT_TASK1_EXECUTION_STEP (1) /* Script Task1 step, This defines number of lines to be executed every 1mS*/
/* motor example, Rs = 6ohm, Ls = 169mH, 4p, base freq=60Hz */
/*****************************************************************************************************************/
int TrqBoost,BaseHz;/* Global variable definition */
/*****************************************************************************************************************/
Script_Task0_init() /*Task0 initialization - only once at start*/
{
  int volt, VQ_MAX;   /*Local variable definition */
  VQ_MAX = 4973;   /* 100% duty command */
  TrqBoost =129;   /* 129 = 2.6%, 4973*2.6%, torque boost = VQ_MAX*% of troque boost (%) ~ Im x Rs /rated voltage */
  BaseHz =8191;     /* 8191 = 60Hz = 1800rpm for Max_RPM= 3600rpm =16383*/
  Vd_Ext = 0;       /* d-axis voltage to be zero */
  EnableCoherentUpdate();
  AngleSelect =0;    /*Set to open loop mode*/
  CtrlModeSelect =0;   /*voltage control mode */
  DoCoherentUpdate();
}
/*****************************************************************************************************************/
Script_Task0()         /*Task0, 50msec update */
{
  volt = SpdRef * VQ_MAX / BaseHz; /* voltage command scaled to VQ_MAX */
  if (volt > VQ_MAX)
  {
    volt = VQ_MAX;     /* feild weakening */
  }
  if (volt < TrqBoost)
  {
    volt = TrqBoost;   /* clamp to min voltage */
  }
  Vq_Ext = volt;       /* update the voltage command */
}
```

Figure 10 に、上記のスクリプト言語の例のモーター電流波形を示します。この例の領域のモーター仕様:

- 定格モーター電流 = 1.2 Arms
- 定格電圧 = 230 V
- 極数 = 4
- 最高速度 = 3600 rpm
- 基本周波数 = 60Hz

0 から 88Hz まで加速し、88Hz から逆回転方向まで減速します。加速中、モーター電流は 870 mA に達し、88Hz の定常状態で 500mA に落ち着きます。

V/Hz 制御スクリプト言語の例

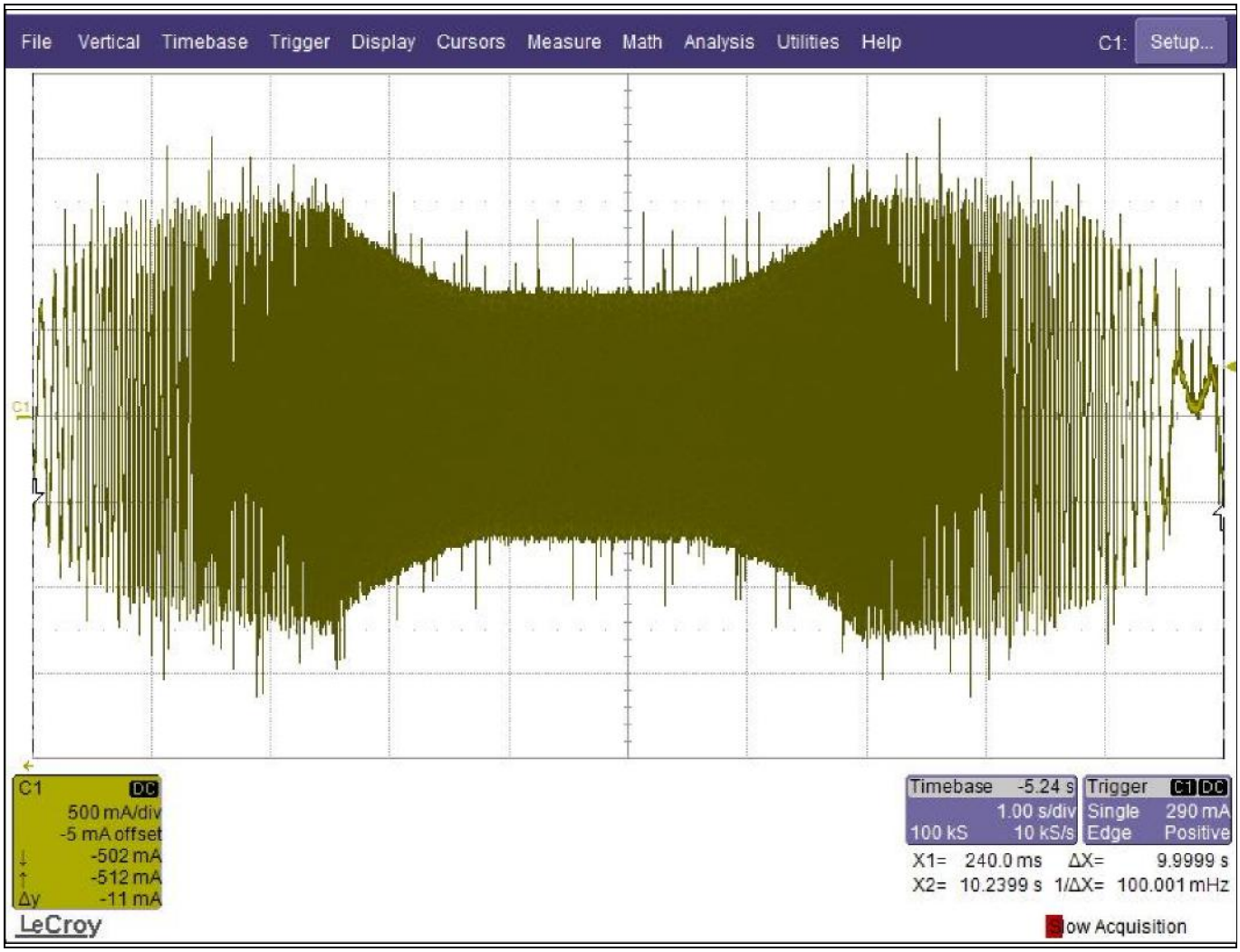


Figure 10　誘導モーターの電流波形

Figure 11 に、30/60/120 Hz での無負荷モーター電流を示します。ここで、電流振幅は 60 Hz (基本周波数) まで同じままであり、速度が弱め界磁範囲 (120 Hz) で基本周波数を超えると逆に減少します。

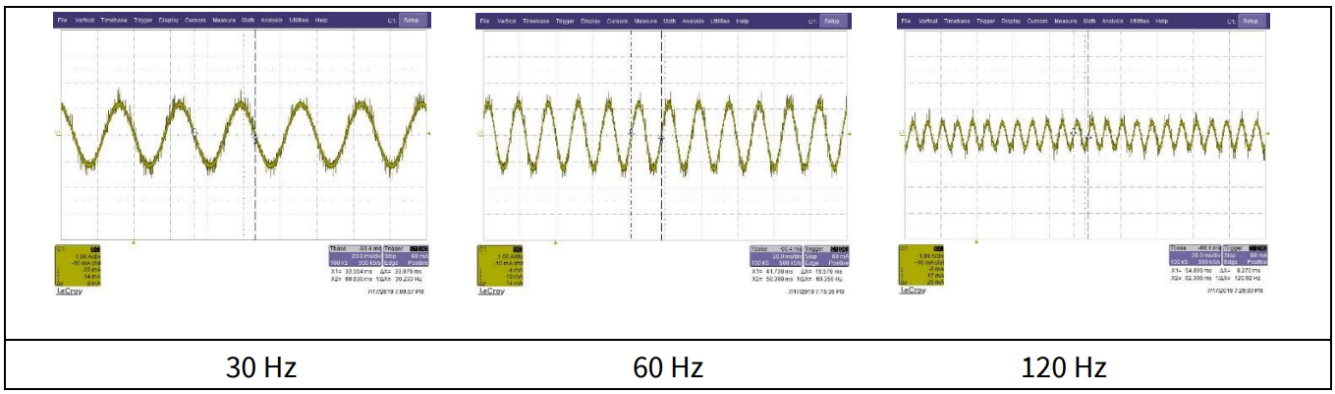


Figure 11　30/60/120Hz でのモーター電流

V/Hz 制御スクリプト言語の例

Figure 12 に、起動時の MCEDesigner スコープの図を示します。磁化電流が不足しているため、凝視時に十分なトルクがあるかどうかについて、始動磁束の詳細を調べるのに役立ちます。この例では、ランプブロックの後のモーター相電流 IU とモーター速度コマンド SpdRef を示しています。SpdRef が 500 カウントに達したときにトリガをかけて取得した波形となります。予想よりも磁化電流が低いことを示し、それによって始動時のトルクが不足します。電流は、始動時は一定の大きさでなければいけません。初期値は TrqBoost の値を 129 に設定していましたが、さらに大きくする必要があります。

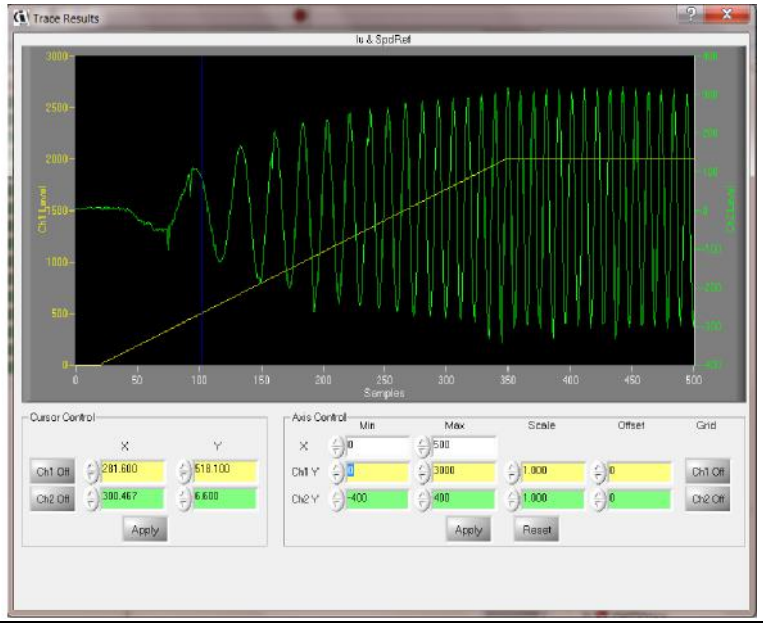


Figure 12　開始時の MCEDesigner スコープの図

4 参考資料

[1] iMOTION™ IMC100 High Performance Motor Control IC Series Datasheet (REV1.4)

[2] iMOTION™ Motor Control Engine Software Reference Manual (REV1.2)

[3] MCEDesigner User Guide (REV 2.0.1.0)

[4] Electric Drives – An Integrative Approach, Ned Mohan, 2000

[5] Power Electronics and AC Drives,B.K.Bose, 1986

改訂履歴

Document version	Date of release	Description of changes
V1.1	2022-02-10	本版は英語版 AN2019-18 Induction motor control by iMOTION™について、CYPRESS DEVELOPER COMMUNITY の参画者によって日本語に翻訳されたドキュメントです。

Trademarks
All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2022-02-10

Published by

Infineon Technologies AG

81726 Munich、 Germany

© 2022 Infineon Technologies AG. All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference

V1.0

重要事項

本文書に記載された情報は、いかなる場合も、条件または特性の保証とみなされるものではありません（「品質の保証」）。本文に記された一切の事例、手引き、もしくは一般的価値、および／または本製品の用途に関する一切の情報に関し、インフィニオンテクノロジーズ（以下、「インフィニオン」）はここに、第三者の知的所有権の不侵害の保証を含むがこれに限らず、あらゆる種類の一切の保証および責任を否定いたします。

さらに、本文書に記載された一切の情報は、お客様の用途におけるお客様の製品およびインフィニオン製品の一切の使用に関し、本文書に記載された義務ならびに一切の関連する法的要件、規範、および基準をお客様が遵守することを条件としています。

本文書に含まれるデータは、技術的訓練を受けた従業員のみを対象としています。本製品の対象用途への適合性、およびこれら用途に関連して本文書に記載された製品情報の完全性についての評価は、お客様の技術部門の責任にて実施してください。

本製品、技術、納品条件、および価格についての詳しい情報は、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください（**www.infineon.com**）。

警告事項

技術的要件に伴い、製品には危険物質が含まれる可能性があります。当該種別の詳細については、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください。

インフィニオンの正式代表者が署名した書面を通じ、インフィニオンによる明示の承認が存在する場合を除き、インフィニオンの製品は、当該製品の障害またはその使用に関する一切の結果が、合理的に人的傷害を招く恐れのある一切の用途に使用することはできないこと予めご了承ください。