

PLECS DEMO MODEL

Basic Current Controller Design for Motor Drives Using the PLECS Analysis Tools

PLECSの解析ツールを用いたモータ駆動用電流制御器の基本設計

Last updated in PLECS 5.0.2

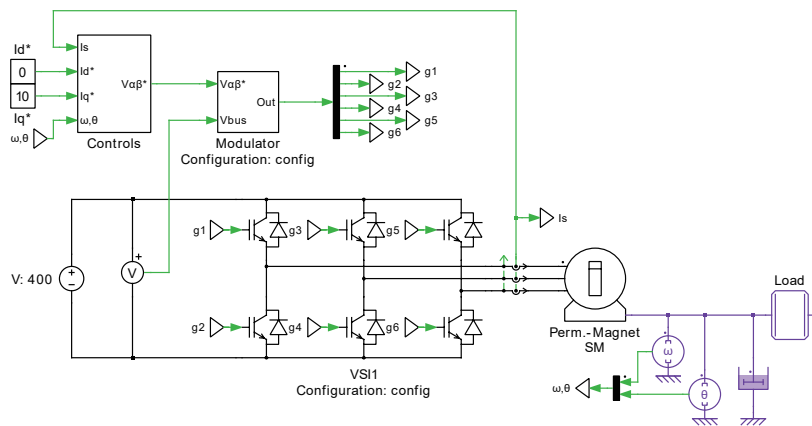
KESCO KEISOKU ENGINEERING SYSTEM

計測エンジニアリングシステム株式会社
<https://kesco.co.jp>

1 概要

このデモでは、PLECSのマルチトーン解析ツールを使用して、電流制御三相駆動システムのループゲイン $L(s)$ を取得する方法を示します。さらに、クロスオーバー周波数と必要な位相マージンの仕様に基づいたPI電流コントローラパラメータの計算を詳細に説明します。

図1: システムの概要



注意

このモデルには、次からアクセスできるモデル初期化コマンドが含まれています。

PLECS Standalone: シミュレーションメニュー + シミュレーション・パラメータ... → 初期化

PLECS Blockset: Simulinkモデルウィンドウで右クリック → モデル プロパティ → コールバック → InitFcn*

2 モデル

2.1 プラント

図1のインバータ回路は、400V_{dc}定電圧電源を備えた理想的な3レグブリッジとしてモデリングしています。6つのIGBTは空間ベクトル変調器によってスイッチングされ、ベクトル電流制御によって指令された相電圧を実現します。三相電流は閉ループ電流制御のために測定し、従来のPIコントローラはd軸とq軸の電流調整に使用します。機械的速度と角度を測定し、極対数によってスケールリングして、電気的速度と角度を決定します。

マシンモデル

ACモータは表面実装磁石を備えた突極性のない($L_{sd} = L_{sq}$)同期機です。相電流は、三相abcフレームから、ロータ位置に合わせて配置された2次元の回転リファレンスdqフレームに変換されます。dqフレームへの変換により、ACシステムが等価なDCシステムに変換されます。これにより、定常誤差ゼロで従来のPIコントローラを使用できるようになります。ただし、dqフレームへの変換では、q軸とd軸の間にクロスカップリングが生じるため、

コントローラの構造を考慮する必要があります。

$$u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_e L_{sd} i_{sq} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt}$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_e L_{sq} i_{sd} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_e \psi_f$$

dqフレームモデルは、上に示した方程式で記述できます。ここで、 ω_e は同期周波数、 ψ_m は永久磁石による固定子の鎖交磁束の振幅です。簡略化のため、磁石の強さは一定であり、マシンは飽和しないものと仮定しています。

2.2 コントローラの設計

プラント伝達関数

ロータフィールド指向制御(Rotor-Field Oriented Control: RFOC)を駆動システムに適用し、固定子電流が回転座標系で調整されます。d軸とq軸の電流は、指定されたクロスオーバー周波数と位相マージンを満たすように調整されたPIコントローラで制御します。これについては後で説明します。制御構造でデカップリング項とフィードフォワード項を使用することにより、回転座標系設計で動作する電流コントローラのプラントは大幅に簡略化され、次のように記述できます：

$$P(s) = \frac{i_{sd}}{u_d^*} = \frac{1}{R_s + sL_{sd}}$$

q軸の伝達関数は同じです。

時間遅延

デジタル制御では、主にPWM生成、ADCサンプリング、およびマイクロコントローラ上の制御アルゴリズムの計算時間により、常に時間遅延が発生します。全体的な時間遅延により、達成可能な制御帯域幅が減少し、閉ループシステムの安定性も低下します。特に調整方法がプラントの数学的モデルに依存してコントローラパラメータを導出する場合は、コントローラの設計プロセス中に予想される時間遅延を考慮する必要があります。このデモでは、2つの異なる時間遅延の要因を考慮しています：

- マイクロコントローラ上の制御アルゴリズムの有限な計算時間: $T_{calc} = T_{sw}/2$
- 単一更新モードで動作するパルス幅変調器によって生じる平均時間遅延: $T_{PWM} = T_{sw} = 2$

したがって、合計遅延に相当する T_d は、1つの制御計算タイムステップに合計されます：

$$T_d = T_{calc} + T_{PWM} = T_{sw}$$

この時間遅延を有理伝達関数として近似すると、コントローラの設計が簡素化されます。このために、パデ近似を使用できます。この例では、時間遅延は2次のパデ近似によって近似されます。伝達関数は次の形式になります。係数は関数`padecoef` ($T_d, 2$) を使用してOctaveまたはMATLABで計算します：

$$D_\Sigma(s) = \frac{1 - \frac{T_d}{2}s + \frac{T_d^2}{12}s^2}{1 + \frac{T_d}{2}s + \frac{T_d^2}{12}s^2}$$

コントローラの設計

並列形式のPIコントローラの連続時間伝達関数は次のように記述できます：

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$$

開ループ伝達関数 $L(s)$ は、プラント伝達関数 $P(s)$ 、PIコントローラ伝達関数 $D(s)$ 、および時間遅延近似 $D_z(s)$ の乗算です:

$$L(s) = P(s) \cdot D_z(s) \cdot D(s)$$

以下、プラントと等価遅延伝達関数は1つの伝達関数としてまとめます:

$$P_D(s) = P(s) \cdot D_z(s)$$

"閉形式クロスオーバー仕様"(Closed-Form Crossover Specification)法の主な考え方は、ループゲインが指定されたクロスオーバー周波数 ω_c と位相マージン φ_m になるように、PIコントローラパラメータ k_p 、 k_i を計算することです。意味のあるコントローラパラメータを取得するには、仕様が制御システムおよびプラントの制約と互換性がある必要があります。そうでない場合、閉形式の計算はシステムの動作を不安定にする可能性があります。

目的のクロスオーバー周波数 ω_c では、プラントの振幅 r_p と位相 φ_p は次のように定義します:

$$P_D(j\omega_c) = r_p \cdot e^{j\varphi_p}$$

これはOctave関数 $[r_p, \varphi_p] = \text{bode}(P_D, \omega_c)$ を使用して計算できます。

プラント伝達関数から計算されたパラメータ r_p 、 φ_p と2つの設計仕様 ω_c 、 φ_m を使用して、次の2つの式を使用して、PIコントローラパラメータ k_p および k_i を閉じた形式で計算できます:

$$k_p = \frac{-1}{r_p} \cdot \cos(\varphi_m - \varphi_p)$$

$$k_i = k_p \cdot (-\tan(\varphi_m - \varphi_p) \cdot \omega_c)$$

図2は、設計された制御パラメータによるループゲイン $L(s)$ を示しています。コントローラの帯域幅と位相マージンの要件を達成しています。

3 シミュレーション

PLECSは、小さな摂動信号に対する物理システムの周波数応答を測定できます。三相システムの小信号解析は、まず三相AC値を回転座標系に変換することによって実行できます。この変換により、定常動作点付近の小信号解析を構成できます。

注意

この例では、コントローラのデカップリングが達成され、システムがdqフレームで分離していると仮定しています。そうでない場合、プラントは多重入出力(Multiple Input Multiple Output: MIMO)システムとして動作します。このようなシステムには、より洗練された多変数コントローラを使用する必要があります。周波数解析はq軸に限定されますが、全体像を把握するには、q軸システムの摂動(またはd軸)がq軸システムとd軸システムの両方に及ぼす影響を観察することが重要です。

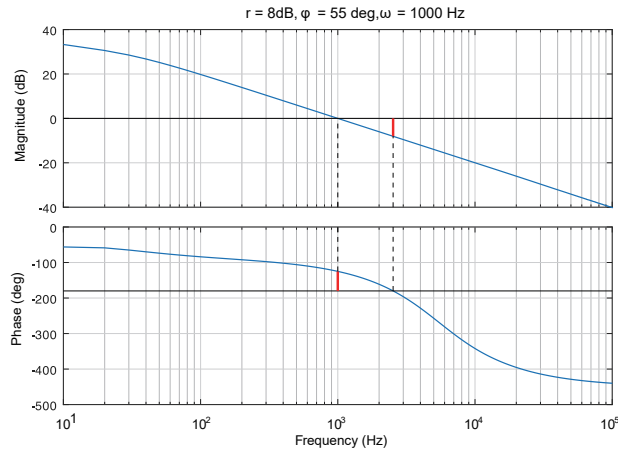
3.1 ループゲイン

解析を実行するには、シミュレーションメニューから**解析ツール...**を選択し、リストから"Loop Gain"解析を選択して、**解析開始**をクリックします。

このシミュレーションでは、制御対象のモーター駆動システムの開ループ伝達関数を取得するために、q軸電流にループゲイン・メーターを使用します。グラフから、システムはDC付近の積分器の特性を示し、リファレンス値

と制御値の間の定常誤差を排除していることがわかります。コントローラの帯域幅($\omega_c = 1000\text{Hz}$)と位相マージン($\varphi_m = 55^\circ$)の設計仕様が満たされていることを確認できます。システム振幅の傾きは、クロスオーバー周波数付近で-20dB/decadeで、ゲインマージンは8dBです。したがって、システムは安定しています。PLECSで測定した周波数応答は、[図2](#)に示す解析計算の周波数応答とよく一致しています。

図2: $\omega_c = 1000\text{Hz}$ および $\varphi_m = 55^\circ$ に対して解析的に計算されたループゲイン伝達関数



3.2 リファレンスから出力までの伝達関数

モータ駆動システムをプラントとするリファレンス出力伝達関数の周波数解析は、d軸またはq軸の設定値を摂動させ、対応するd軸またはq軸の量への影響を観察することによって取得できます。このシミュレーションでは、q軸電流設定値に摂動を与え、その摂動の影響がq軸電流に現れています。周波数解析では、開ループ伝達関数に基づいて予想されるローパスフィルタの特性が示されます。

3.3 制限

上記のシミュレーションの伝達関数は、スイッチング周波数の半分までの動作を示しています。これは、コントローラの計算時間を表す遅れ要素ブロック、変調器、スイッチングネットワークが非線形要素であるためです。変調器は、 $f_{sw}/2$ を超える摂動周波数では非線形になります。 $f_{sw}/2$ より高い周波数において、解析計算とPLECS解析ツールから対応する結果を得るには、これらの要素を手動で線形化する必要があります。

この線形化はこのデモモデルに実装されています。初期化スクリプトには、値'switched'または'averated'を取得できるパラメータ設定が含まれています。averated構成を使用すると、[図5](#)に示す結果が得られます。

4. まとめ

この例では、PLECS解析ツールを使用して物理システムのモデル内で伝達関数を直接測定する方法を示します。さらに、周波数領域の仕様に基いた解析コントローラの設計についても説明しています。

参考文献

[1] Guzzella, L.. "Analysis and Synthesis of Single-Input/Single-Output Control Systems." (2019).

図3: PLECSの物理システムモデルで測定したループゲイン伝達関数

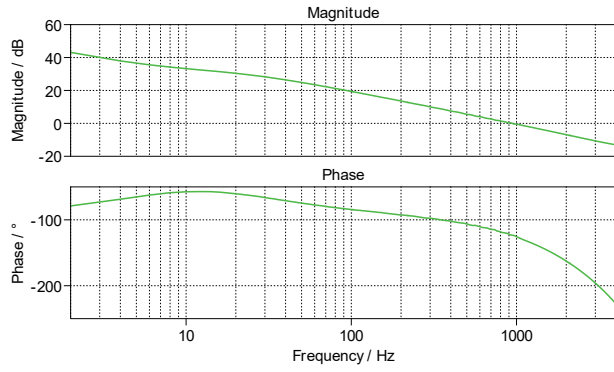


図4: PLECSの物理システムモデルで測定したリファレンス出力伝達関数

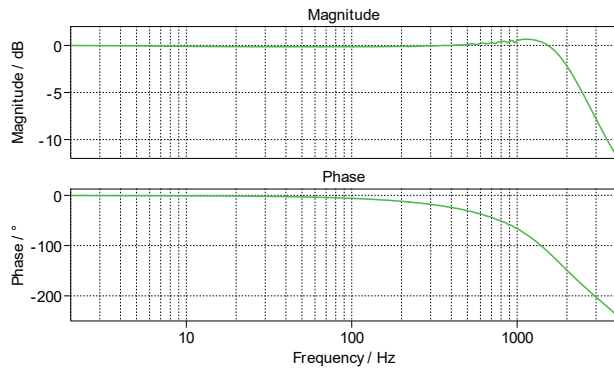
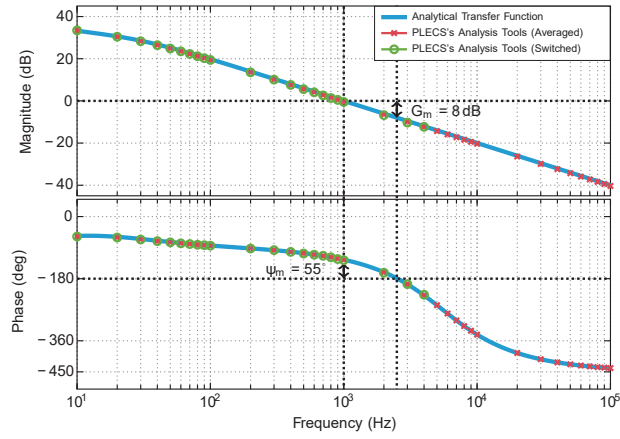


図5: 完全に線形化されたシステムを使用したループゲインの計算



改訂履歴:

PLECS 4.6.1 初版

PLECS 5.0.2 小信号解析に周波数応答解析がオプションとして追加



Pleximへの連絡方法:

☎ +41 44 533 51 00 Phone
✉ Plexim GmbH Mail
Technoparkstrasse 1
8005 Zurich
Switzerland
@ info@plexim.com Email
<https://www.plexim.com> Web



計測エンジニアリングシステムへの連絡方法:

☎ +81 3 6273 7505 Phone
✉ Keisoku Engineering System CO.,LTD. Mail
1-9-5 Uchikanda, Chiyoda-ku
Tokyo, 101-0047
Japan
<https://kesco.co.jp> Web

PLECS Demo Model

© 2002–2026 by Plexim GmbH

このマニュアルで説明されているソフトウェアPLECSは、ライセンス契約に基づいて提供されています。ソフトウェアは、ライセンス契約の条件の下でのみ使用またはコピーできます。Plexim GmbHの書面による事前の同意なしに、このマニュアルのいかなる部分も、いかなる形式でもコピーまたは複製することはできません。

PLECSはPlexim GmbHの登録商標です。MATLAB、Simulink、およびSimulink Coderは、The MathWorks, Inc.の登録商標です。その他の製品名またはブランド名は、それぞれの所有者の商標または登録商標です。

本マニュアルは、Plexim社の英文マニュアルを日本語に翻訳したものです。本マニュアルと英文マニュアルとで差異がある場合、英文マニュアルを正とします。

本マニュアルの内容に基づいて発生した負傷や損害などに対して、Plexim GmbHおよび計測エンジニアリングシステム株式会社は一切責任を負いません。製品とアプリケーションに関連したリスクを最小限に抑えるため、ユーザが適切な設計および保護対策を用意する必要があります。