

Application Examples

Incorporating Magnetic Saturation of a PMSM for Drive Systems Modeling in PLECS®

Munadir Ahmed

PLECS®によるPMSMの磁気飽和を考慮した駆動システムのモデリング

Abstract

Saturable machine models are needed by drives engineers to develop, tune, and evaluate the performance of advanced control algorithms. PLECS is a simulation tool that allows for very efficient and robust modeling of drive systems and their associated controls. In this study, modeling of PMSM saturation for simulation of drive systems is discussed.

概要

マシンの飽和モデルは、自動車エンジニアが高度な制御アルゴリズムの性能を開発、調整、評価するために必要です。PLECSは、駆動システムとその関連制御の非常に効率的かつ堅牢なモデリングを可能にするシミュレーションツールです。本研究では、駆動システムのシミュレーションのためのPMSM飽和のモデリングについて説明します。

Version: 12-15

1 はじめに

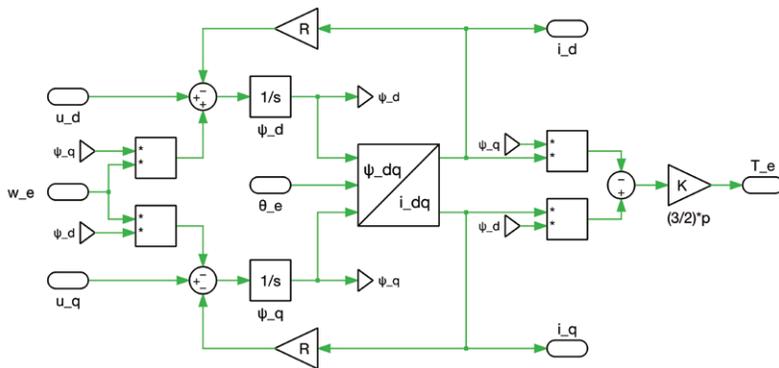
電気機械はさまざまな産業のシステムに不可欠な役割を果たしています。電気自動車[1]やスタータジェネレータ[2]などの用途では、コストと重量を最適化しながら高トルクの要求を満たすために、マシンを飽和状態まで駆動します。したがって、電気機械のパラメータは、通常の運転中に大幅に変化する可能性があります。制御を開発する場合、コントローラのゲインを調整するためにマシンパラメータがよく使用されます。マシンが飽和状態になると、マシンパラメータの変更を正しく補正するために、コントローラゲインをオンラインで変更する必要がある場合があります。正しく補正しないと、コントローラが不安定になる場合があります[3]。さらに、MTPA(Maximum Torque per Ampere)などの制御方式は、制御アルゴリズムの飽和効果を考慮せずに実装することは不可能です[4]。

設計段階では、エンジニアはPLECSのようなシミュレーション環境における機械制御のさまざまな方式の性能を開発、調整、ベンチマークします。高度な制御アルゴリズムを開発する場合、高速かつ堅牢なシミュレーションを維持しながら、マシンの飽和を正確に反映するマシンモデルを使用することが重要です。

2 PMSMの飽和効果のモデリング

駆動システムのシミュレーションでは、機械は同期基準座標系(dqモデル)でモデリングされます。この dqモデルは磁束ベースの実装であり、入力電圧がabcフレーム(u_{abc})からdqフレーム(u_{dq})に変換され、dqフレーム(Ψ_{dq})内の磁束鎖交が計算されます。次に、 Ψ_{dq} を使用してdq電流(i_{dq})を導き出します。永久磁石同期機(Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM)マシンの磁束ベースの実装を図1に示します。線形モデルでは、電流は、磁束鎖交を等価インダクタンス(L_{dq})で単純に割ることによって決定されます。線形モデルは、マシンが飽和状態になったときの L_{dq} の変化を考慮していないため、制限があります。したがって、飽和の影響はシミュレーションに反映されません。

図1: 磁束ベースPMSMモデル[5]の実装

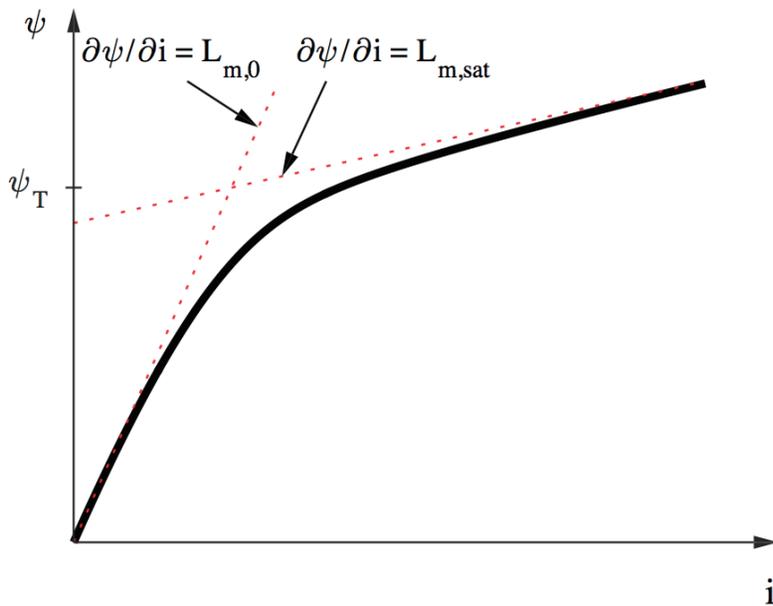


2.1 Analytical Fitを使用した飽和

dqモデルに飽和を組み込む1つの方法は、解析関数を使用して飽和の影響をモデリングすることです。高次多項式関数は、電流の関数として磁束鎖交を推定できる可能性があります。これら多項式の係数は、測定、FEAシミュレーション、または技術論文から収集されたカーブフィットデータによって決定され、物理的な意味を表すものではありません。さらに、これらの多項式が磁束鎖交の正確な推定値を提供する範囲は限られています。

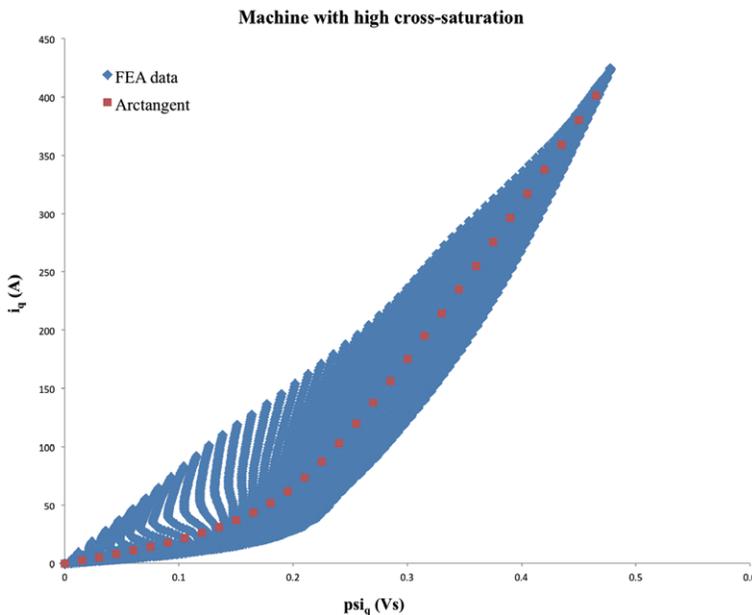
磁性材料は、不飽和領域と高飽和領域の両方において、磁束鎖交と電流の間に近似的な線形関係を示します。異なるのは傾きと切片だけです。図2は、磁化電流の関数としての磁束鎖交を示しています。最初は線形の増加があり、その後傾きが減少する期間が続くことがわかります。最終的に、関係は再び線形になります。逆正接関数は飽和効果をモデリングするのに適した方法を提供します[6]。多項式ではなく逆正接を使用する利点の1つは、定義の範囲が広いことです。さらに、この機能は、以下の4つのパラメータによって完全に特徴付けられます: 不飽和磁化インダクタンス、飽和磁化インダクタンス、遷移の位置、および遷移のタイトさを決定する要因。

図2: 逆正接関数に基づく可飽和機械の磁束と電流の関係



逆正接ベースの解析モデルにより、ユーザは非常に簡単かつ効率的な方法で飽和効果をシミュレーションに組み込むことができます。ただし、このモデルでは、 i_{dq} の増加により発生する ψ_{dq} の飽和のみを考慮します。相互飽和効果を考慮できないことは、解析モデルの大きな欠点です。図3は、相互飽和効果が高いマシンに対する解析モデルの限界を示しています。マシンデータは、InfolyticaのMotorSolveツールを使用して生成されました。

図3: Li-ion電池パックのCCCV充電のシミュレーション結果



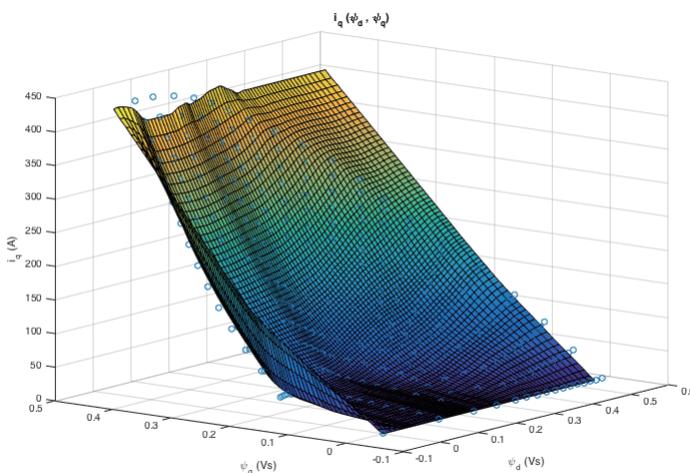
1つの解決策は、2Dサーフェスを記述する関数を使用することです。ただし、これにはパラメータを推定するために最適化ツールが必要になる場合があります [7]。高い相互飽和効果が発生するマシンの代替手法は、2次元(2D)ルックアップテーブルを使用することです。

2.2 2D Look-Up Tableを使用した飽和

動力計での測定やFEAツールから取得されたデータにより、 Ψ_{dq} を i_{dq} の関数として提供できます。この情報は、2D Look-Up Tableを使用して磁束ベースのPMSMモデルに組み込むことができます。ルックアップ テーブルは Ψ_{dq} を入力として、出力 i_{dq} を受け取るため、相互飽和効果をモデルに組み込むことができます。生の測定データまたはシミュレーションデータは、最初に Ψ_{dq} の定数のグリッドを生成するために処理する必要があり、 i_{dq} は補間と外挿を使用してこのグリッド上で決定されます。また、シミュレーションの安定性を確保するために、ルックアップテーブルの出力が平滑化データであることも重要です。

図4は、図3と同じマシンの i_q を Ψ_{dq} の関数として示しています。生成されたデータは、Pleximで開発したMATLABスクリプトを介して処理し、 Ψ_{dq} の関数として i_{dq} の2D Look-Up Tableを生成しました。このデータは、2Dルックアップ・テーブルコンポーネントを介してPLECS PMSMマシンモデルに関連付けられます。これにより、FEAツールやハードウェア測定から生成されたデータをPLECSシミュレーションに結びつけることができます。

図4: 高い相互飽和効果のマシン用に生成されたルックアップテーブル(表面: ルックアップテーブル、ドット: FEAデータ)

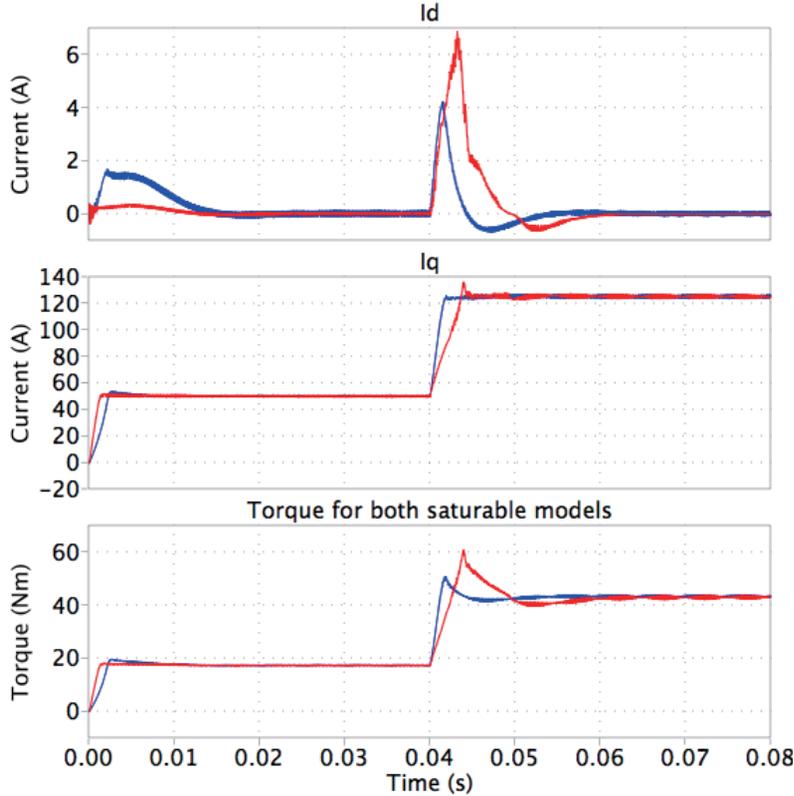


3 シミュレーション結果

Infolyticaの埋め込みPMSMチュートリアルモデルは、相互飽和が高いマシンを表しています。図3は、逆正接関数を使用してこのマシンの磁気飽和効果を捉える試みを示しており、強い相互飽和が存在する場合の解析モデルの限界を強調しています。図4は、同じマシンで磁気飽和効果を2D Look-Up Tableを使用して補足した様子を示しています。

ルックアップテーブルと解析モデルの両方に基づいて、可飽和PMSMのPLECSモデルを開発しました。どちらのマシンモデルも、マシンの慣性をゼロに設定し、回転速度(定常)に接続することにより、一定速度で実行します。 i_{dq} を目的のレベルに維持するために、同一のSynchronous Frame Regulatorを開発しました。シミュレーション中、 i_d はゼロに設定され、 i_q は50Aから125Aに段階的に増加します。DC-link電圧は、弱め磁束駆動でマシンが動作しないようにするのに十分です。図5は、同一条件下での2台のマシン動作と、過渡応答に対する過飽和の影響を示しています。同じ制御方式では、相互飽和を組み込んだモデルは解析関数を使用するモデルよりも過渡応答がより正確であることがわかります。

図5: 解析関数(青色)とルックアップテーブル(赤色)でモデリングした、高めの相互飽和を伴うマシンの i_d , i_q およびトルクの過渡応答



注意: この記事は、Bodo's Power Systems Magazineの2015年12月号に最初に掲載されました。

4 付録 - シミュレーションファイル

このアプリケーションノートには、PLECS BlocksetおよびPLECS Standaloneでさまざまなマシンモデルのシミュレーションに使用するサンプルファイルを添付しています:

Infolytica_Prius: このフォルダにはMATLABスクリプト、ルックアップテーブル変数、PLECS BlocksetおよびStandaloneモデルが含まれています。MATLABスクリプトは、生のFEAデータをルックアップテーブルに変換し、PLECSモデルで使用できる変数に表形式のデータを格納します。PLECSモデルは、トヨタ プリウスのマシンモデルでLinear、Analytical Fit-based、およびLook-up Table-basedモデルの性能を比較します。このマシンは相互飽和の影響が少ないです。

Infolytica_Tutorial: このフォルダにはMATLABスクリプト、ルックアップテーブル変数、PLECS BlocksetおよびStandaloneモデルが含まれています。MATLABスクリプトは、生のFEAデータをルックアップテーブルに変換し、PLECSモデルで使用できる変数に表形式のデータを格納します。PLECSモデルは、InfolyticaのMotorSolveチュートリアルで説明しているマシンに対して、Linear、Analytical Fit-based、およびLook-up Table-basedモデルの性能を比較します。マシンは高い相互飽和効果を生じます。

html: 2D Look-Up Tableの作成に使用するMATLAB関数とデータ入力および出力の説明が含まれています。

5 参考文献

- [1] C. Sullivan and S. Sanders, "Models for induction machines with magnetic saturation of the main flux path," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 4, pp. 907–917, 1995.
- [2] L. Chedot and G. Friedrich, "A cross saturation model for interior permanent magnet synchronous machine. application to a starter-generator." in *39th Industry Applications Conference Annual Meeting*, 2004.
- [3] S. Morimoto, T. Ueno, M. Sanada, A. Yamagiwa, Y. Takeda, and T. Hirasu, "Effects and compensation of magnetic saturation in permanent magnet synchronous motor drives." *Industry Applications Society Annual Meeting*, 1993.
- [4] Z. Li and H. Li, "Effects and compensation of magnetic saturation in permanent magnet synchronous motor drives," *15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012*, 2012.
- [5] S. Uebener and J. Bocker, "Application of an electric machine emulator for drive inverter tests within the development of electric drives," *European Electric Vehicle Congress*, 2012.
- [6] K. A. Corzine, B. T. Kuhn, S. D. Sudhoff, and H. J. Hegner, "An improved method for incorporating magnetic saturation in the q-d synchronous machine model." *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1998.
- [7] B. Stumberger, G. Stumberger, D. Dolinar, A. Hamler, and M. Trlep, "Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003.

改訂履歴:

12-15

初版

plexim

Pleximへの連絡方法:

☎ +41 44 533 51 00

Phone

+41 44 533 51 01

Fax

✉ Plexim GmbH

Mail

Technoparkstrasse 1

8005 Zurich

Switzerland

@ info@plexim.com

Email

<http://www.plexim.com>

Web

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>

Application Examples

© 2002–2013 by Plexim GmbH

このマニュアルに記載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の事前の書面による同意なしに、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。