



# PLECS DEMO MODEL

*Electric Vehicle with Active Damping*

アクティブダンピングを備えた電気自動車

Last updated in PLECS 4.3.1

# 1 概要

このデモでは測定誤差と機械的共振が、電気自動車(Electric Vehicle: EV)システムの性能に与える影響を示しています。観察された問題を軽減するための可能な制御ソリューションを提案し、その手法を追加する前後でのシステム全体のパフォーマンスを比較します。

**Note** 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。

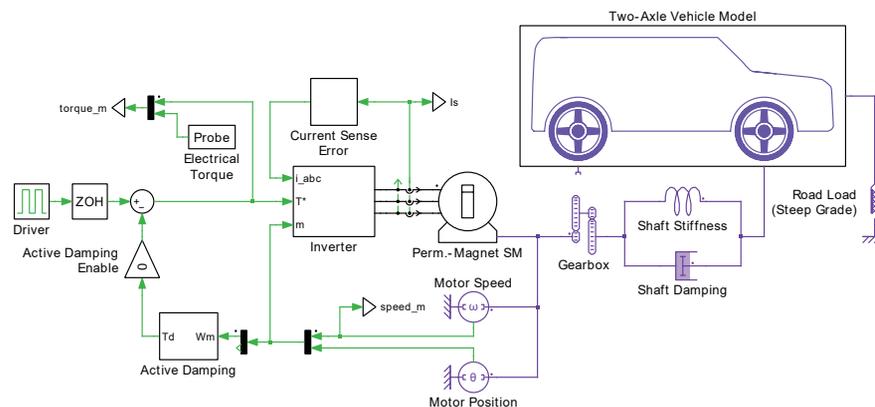
*PLECS Standalone*: シミュレーションメニュー + シミュレーション・パラメータ... → 初期化

*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 PLECSでの車両モデリング

図1: 全体のシステムモデル



PLECSの制御器および機械回路ブロックのコンポーネントを使用して、前輪駆動のEVモデルを開発しました。このEVモデルは、PLECSのdemossライブラリの"Two-Axle Vehicle with Driving Profile"に記載している、2つのスリップベースの車輪モデルに基づいています。

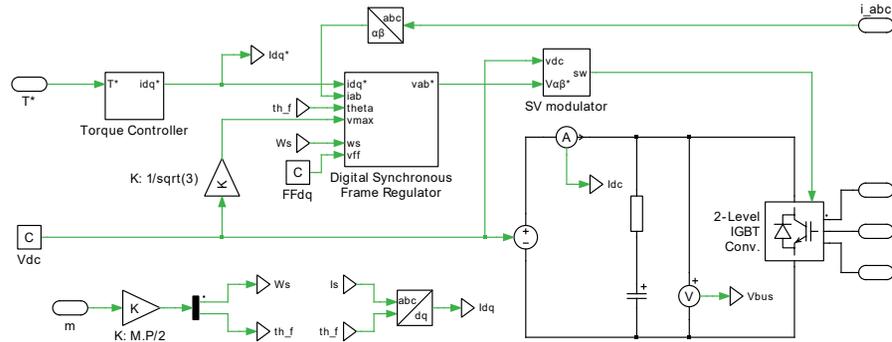
EVは、単速ギアボックスに取り付けられたY接続の永久磁石同期機(Permanent Magnet Synchronous Machine: PMSM)によって駆動します。ギアボックスとディファレンシャルをEVの前輪に接続する、ハーフシャフトの減衰特性と剛性特性をシステムモデルに組み込んでいます。

### 2.2 パワーエレクトロニクスシステム

車両に電力を供給する電池パックをモデリングするために、理想DC電圧源を使用しています。電池は、PMSMを駆動する2レベル電圧源インバータのDC側に接続しています。

基本的なTorque Controllerを実装して、トルク要求をRotor reference frame(dq)の電流設定値に変換します。電流設定値は測定した $\alpha\beta$ 電流、回転子位置、およびDC電圧と共に、Digital Synchronous Frame Regulatorに供給されます。レギュレータは、 $\alpha\beta$ リアレンスフレームに変換される電圧設定値を生成します。次に、空間ベクトル変調器を使用して、この電圧設定値を2レベルコンバータのスイッチング信号に変換します。

図2: 電気駆動サブシステム



### 2.3 システムの非理想性

モータトルクの急激なステップ変化は、モータの慣性振動を引き起こします。このウィンドアップ効果は、次の式で与えられるパワートレインの固有振動数の励起によって発生します:

$$f_0 = \frac{\sqrt{K_s}}{2\pi \cdot G \cdot \sqrt{J_m}}$$

ここで、 $K_s$ はシャフトの剛性係数、 $J_m$ はモータのロータ慣性、 $G$ はギア比に対応します。車輪/車両システムの慣性は、モータの慣性よりも大幅に大きいと想定されるため、無視されます。

電気駆動のモデリングでは多くの場合、すべての測定値が理想的で正確であると想定しています。しかし実際には、すべてのセンサにはある程度のオフセットとゲインの誤差が存在します。電流測定のゲイン誤差により、相電流の基本周波数の2倍でトルク振動が発生する可能性があります。これによりトルクリプルが発生し、前述のように機械システムの固有振動数が励起され、車両の操縦性が低下する可能性があります。

## 3 シミュレーション

### 3.1 ワインドアップと測定誤差の影響

添付したモデルを使用してシミュレーションを実行し、起動時のモータトルクのステップ変化によって引き起こされるウィンドアップ効果と、定常電流のセンサ誤差によって励起された持続的振動を確認します。車両は最初、急な坂道で静止しています。車両を坂道を加速するため100Nmのトルク要求を適用します。図3からわかるように、回転子速度は停止状態から790rpmまで急速に上昇します。その後、回転子は最大速度230rpmで逆方向に反転します。

シミュレーションでは、2つの相電流の測定におけるゲイン誤差をモデリングしており、一方の相電流は5%過大評価され、もう一方は5%過小評価されています。図4のように、これは生成されたモータトルクの低周波振動につながり、モータ速度の低周波振動に変換されます。低周波モータ速度振動のピークツーピーク振幅は、平均モータ速度の80%です。PLECS スコープのトレースを保存し、"Undamped @ v0"というラベルを付けます。

図3: アクティブダンピングを実装せずに開始したワインドアップ効果を示す結果

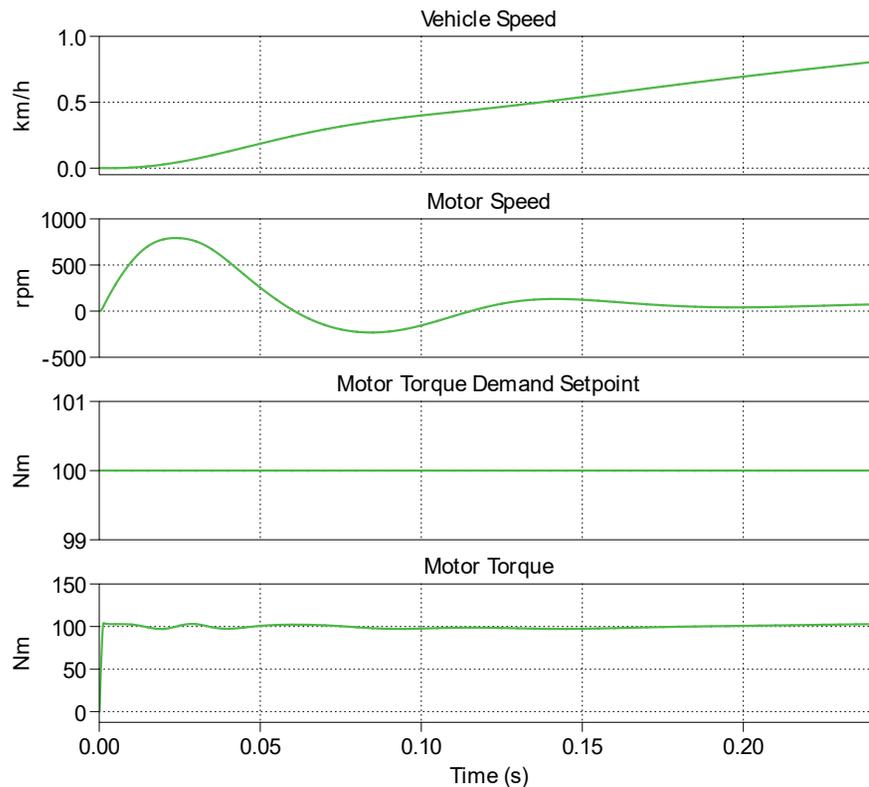
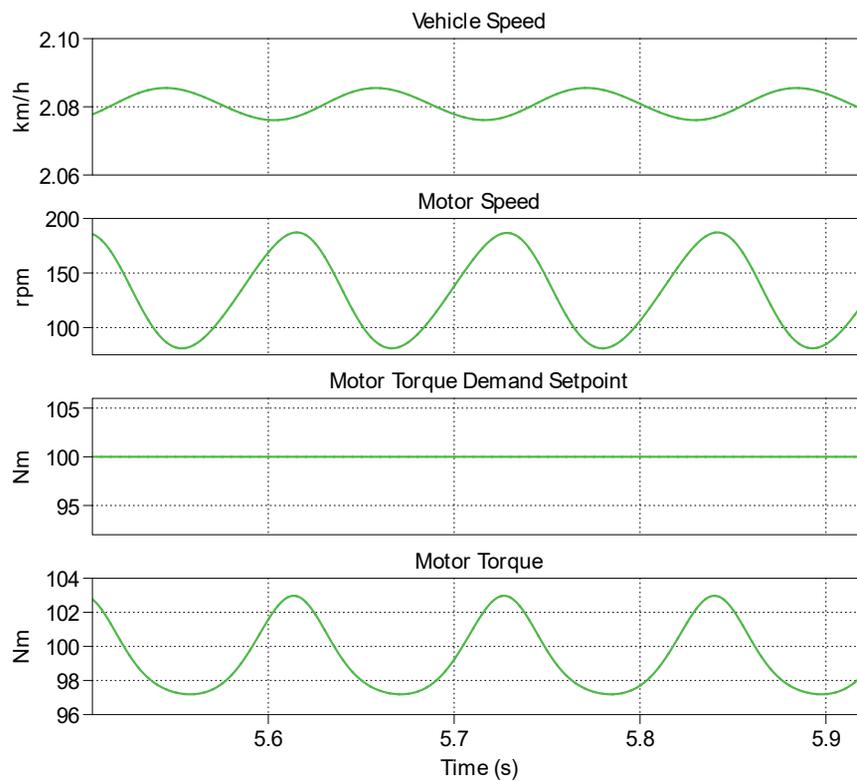


図4: アクティブダンピングを実装していない電流測定誤差による低周波振動



### 3.2 メカニカルダンピング

ワインドアップ効果を軽減するための1つの可能な解決策は、回転子シャフトの固有振動数と減衰係数を変更することです。これは、回転子シャフトに慣性を追加することで実現できます。しかし、これは車両全体の重量とコストの増加を招き、性能にも悪影響を与えるため、現実的な方法ではありません。

### 3.3 アクティブダンピング

ドライブトレインの振動を軽減するためのより現実的な解決策は、PMSMのトルク要求を積極的に制御することです。この方法では、回転子速度を測定し、外側の速度制御ループに送られます。この外部制御ループは、測定した回転子速度から補正トルクを生成するアンチワインドアップメカニズムを備えたデジタルPIコントローラで構成しています。この補正トルクは、ドライバのトルク要求とともに、トルクコントローラに供給されるトルク設定値を修正するために使用します。"Active Damping Enable"のゲイン(利得)パラメータの値を1に変更して、Active Dampingメソッドを有効にします。シミュレーションを再実行します。[図5](#)に示すように、外側の速度制御ループは、トルクコントローラに供給されるトルク要求信号を調整します。これにより、ダンピングがない場合に発生するワインドアップ効果が大幅に低減します。さらに、電流センサの測定誤差によって生じるモータ速度の低周波振動も、外側の速度制御ループによって積極的に減衰されます。[図6](#)に見られるように、モータ速度のフィードバックにより、定常トルク要求設定値が低周波に調整されます。これは、モータのピークツーピークの低周波速度振動の振幅が、定常状態での平均モータ速度の7.5%に減少することを意味します。PLECSスコープのトレースを保存し、これに"Damped @ v0"というラベルを付けます。

図5: アクティブダンピングアルゴリズムを実装して開始した結果

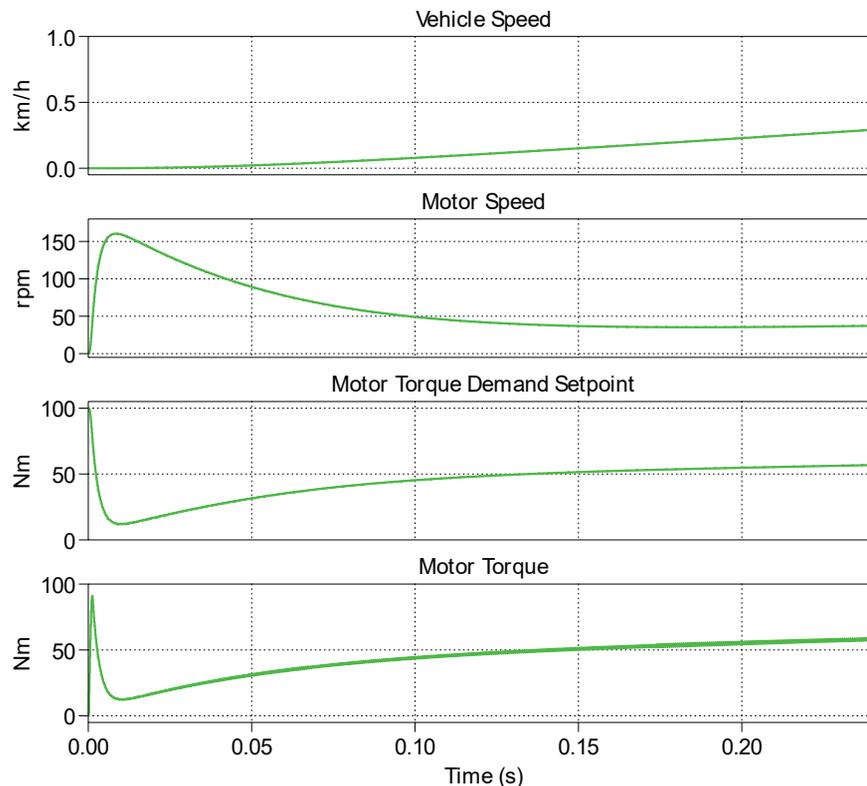
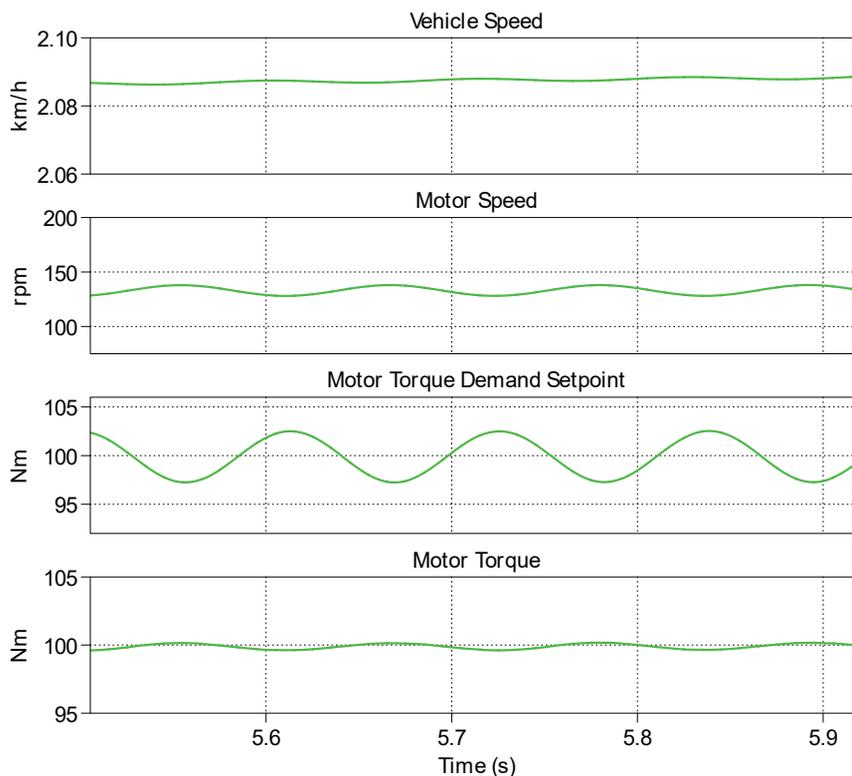


図6: アクティブダンピングによる電流測定誤差と低周波振動



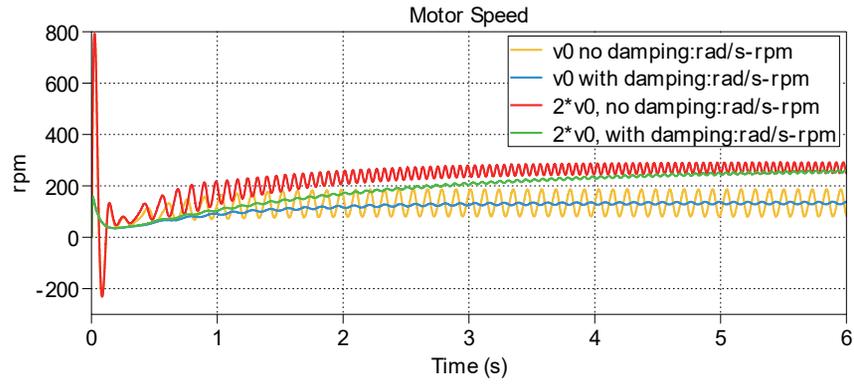
### 3.4 低速効果と高速効果

モータトルクがシステムの固有振動数( $f_0$ )を励起すると、定常状態のパワートレインの最大振動(電流センサ誤差による)が発生します。これが発生する速度から外れると定常状態の速度振動が減少します。本システムでは、パワートレインが $f_0$ で振動する車速( $v_0$ )は2km/hです。次に、定常状態の車速が2倍( $2v_0$ )になったときのモータ速度振動への影響を観察します。

路面荷重の"Viscous friction coefficient"を1500に変更します。アクティブダンピングを無効にしてシミュレーションを1回("Undamped @ 2v0"とラベル付け)、アクティブダンピングを有効にして("Damped @ 2v0"とラベル付け)を1回、シミュレーションを実行します。

図7で、赤色のトレースは、パワートレインシステムの $f_0$ を励起する定常速度( $v_0$ )で移動する減衰されていない車両に対応し、オレンジ色のトレースは $2v_0$ で走行する車両に対応します。ピークツーピークの定常振動の振幅(平均モータ速度に対する比率)は、 $2v_0$ で走行する車両では大幅に減少しています(80%対13%)。

図7: 公称速度と車両速度の2倍、ダンピングあり/なしのモータ速度の変化



実装された単純なアクティブダンピングアルゴリズムは、これらの振動を低減することができます。図7では、青色のトレースは $v_0$ で移動するダンピングされた車両に対応し、緑色のトレースは $2v_0$ で走行する車両に対応します。このアルゴリズムは、 $v_0$ で走行する車両ではモータ速度の振動を7.5%に低減し、 $2v_0$ で移動する車両の振動を5%に低減します。

## 参考文献

- [1] M. Menne, “Drehschwingungen im Antriebsstrang von Elektrostraßenfahrzeugen”, Aachen University of Technology, 2001.

改訂履歴:

PLECS 4.3.1 初版



**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>

*PLECS Demo Model*

© 2002-2023 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。