

PLECS *DEMO MODEL*

Rainflow Counting and Lifetime Prediction

For a drive with direct torque control using PLECS simulation scripts

レインフロー法による疲労寿命予測

シミュレーションスクリプトを使用したDTC

Last updated in PLECS 4.6.1

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>

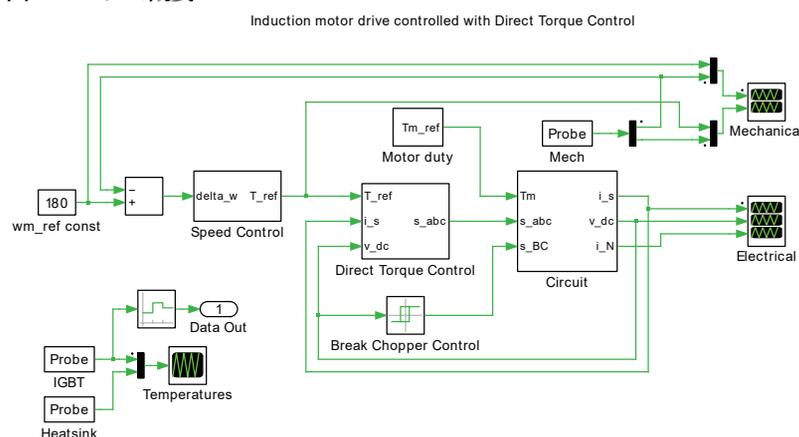
1 概要

このモデルは、直接トルク制御(Direct Torque-Controlled: DTC)モータ駆動における、さまざまな負荷条件下で半導体デバイスの寿命を予測するレインフロー法を備えています。この計算は、過渡電熱シミュレーションから得られたパワー半導体の温度プロファイルに基づいています。

2. モデル

システムの概要を図1に示します。このデモモデルは、DTCモデル自体ではなく、半導体の寿命を予測するためのレインフロー法に焦点を当てています。DTCアプリケーション自体は、demosライブラリの"Induction Machine Drive Controlled with DTC"を参照してください。デモモデルは、寿命解析を実行するためにシミュレーションスクリプトを使用します。シミュレーションスクリプト内のシミュレーション結果にアクセスするには、最上位の回路図に出力信号ポート("Data Out")を配置します。IGBTジャンクション温度とシミュレーション時間は、過渡シミュレーションからシミュレーションスクリプトに返されます。温度プロファイルの山と谷の解析を制限するために、コンバータのスイッチング動作による小さなリップルは、周期平均ブロックと1msの平均時間でフィルタリングします。寿命の計算は、小さなスイッチングリップルではなく、より大きな温度変動によって支配されます。

図1: システム概要



2.1 シミュレーションスクリプト

シミュレーションスクリプトは、PLECS Standaloneのシミュレーションメニューからシミュレーション・スクリプト、またはPLECS Blocksetバージョンの対応するmファイルRainflow_counting_script.mから開くことができます。PLECS StandaloneのXML-RPCインタフェースを使用して同じ寿命計算を実装するPythonスクリプトもあります。

このデモにはいくつかのファイルを同梱しています:

- find_peaks.m: シミュレートしたジャンクション温度プロファイル内のすべての極値点(谷と山)を計算するスクリプト
- gen_histogram.m: 計算したレインフローのヒストグラムを生成するスクリプト

- `detect_lifetime.m`: IGBTモジュールの寿命を推定するスクリプト
- `Rainflow_algorithm.m`: 実際のレインフロー法を実装するスクリプト
- `Rainflow_counting_plecs`: 過渡電熱シミュレーション用の熱設定ファイルが含まれるフォルダ
- *PLECS Standaloneのみ* - `python`: このデモモデルのPythonソースが含まれるフォルダ
- *PLECS Blocksetのみ* - `Rainflow_counting_script.m`: PLECSシミュレーションを実行する全体的なシミュレーションスクリプトと上記の個別のMファイル

スクリプトの概要

シミュレーション スクリプトはさまざまな部品で構成されており、アクションは次の順序で実行します:

- 負荷プロファイルの選択
- 半導体のジャンクション温度 $T_j(t)$ を計算する過渡電熱シミュレーションの実行
- 局所的な温度の最小値と最大値、およびそれらが発生する時間を検索
- 山と谷のデータに対してレインフロー法を実行。これにより、各レインフローの振幅、終了点、および時間幅を計算
- 振幅が等しい完全な温度サイクルの計数
- レインフローデータを使用して寿命を予測

プロット

スクリプトの実行中、さまざまなプロットを表示します。最初のプロットは、ジャンクション温度の実際の山と谷を示します。`cyc_amp1_s[]`および`cyc_freq_s[]`の情報は、特定のビン幅(デフォルトのビン幅は5°C)のヒストグラムに表示されます。

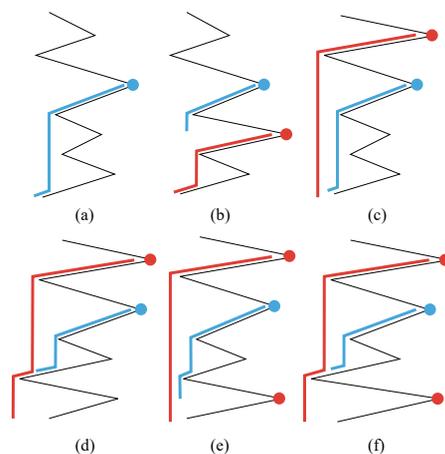
3. レインフロー法

開発されたアルゴリズムは、疲労解析におけるサイクルカウントのASTM規格に基づいています。レインフロー法の原理には4つのルールがあります:

- 1 レインフローはそれぞれの山と谷から開始
- 2 山で始まったフローの場合、後続のより高い山によって停止
- 3 谷で始まったフローの場合、後続のより低い谷によって停止
- 4 レインフローは、前のレインフローに遭遇すると停止。このルールは扱いが難しく、次の2つの条件が含まれます:
 - 1 前のレインフローは、山より低くない(それ以上)か、谷より高くない(深いか同じ)位置で開始されなければなりません(そうでない場合は、上記のルール2または3によって前のレインフローが停止します)。
 - 2 2つのレインフローが合流することがあります(屋根の構造によって異なります)。

山で始まるレインフローの停止を判断するには、その時の現在の山の高さ(P_{cur})が、その前の山(ルール4の条件1)を、それに続く山(ルール2)と比較します。 P_{cur} 以上の山が複数存在する場合、 P_{cur} に最も近い山($P_{pre,h,n}$)のみを考慮する必要があります。ことに注意してください。 $P_{pre,h,n}$ からのレインフローは、 P_{cur} よりも前のレインフローによって遮断される可能性があります。前のレインフローは残りの屋根にも流れ、同じ場所で P_{cur} からのレインフローを遮断します。後続の山については、 P_{cur} に最も近い高い山($P_{sub,h,n}$)のみを考慮する必要があります。そして、 $P_{pre,h,n}$ と P_{cur} の間の最低の谷($V_{pre,l}$)が $P_{sub,h,n}$ と P_{cur} の間の最低の谷($V_{sub,l}$)より低くない場合、ルール4の条件2が満たされます。そうでない場合、 P_{cur} からのレインフローは $P_{sub,h,n}$ の前に停止されます。谷から始まるレインフローも同じロジックに従いますが、ここでは明示的に示していません。

図2: 現在の山(青い点でマーク)から開始したレインフロー図: (a)ケース1、(b)ケース2、(c)ケース3、(d)ケース4、(e)ケース5、および(f)ケース6



開発したアルゴリズムでは、レインフロー法により、山から始まったレインフローについて6つのケースと、谷から始まったレインフローについて6つのケースがあります。以下の説明と図は、考慮すべき6つの異なるケースを示しています。 P_{cur} は青い点でマークし、 $P_{pre,h,n}$ および $P_{sub,h,n}$ は赤い点でマークしています。

- 1 $P_{pre,h,n}$ および $P_{sub,h,n}$ は存在しません: P_{cur} からのレインフローは終了とともに停止します。
- 2 $P_{pre,h,n}$ は存在しませんが、 $P_{sub,h,n}$ は存在します: P_{cur} からのレインフローは $P_{sub,h,n}$ の前に停止します。
- 3 $P_{pre,h,n}$ は存在しますが、 $P_{sub,h,n}$ は存在せず、ルール4の条件2が満たされていません: P_{cur} からの雨の流れは終わりに止まります。
- 4 $P_{pre,h,n}$ は存在しますが、 $P_{sub,h,n}$ は存在せず、ルール4の条件2が満たされています: P_{cur} からのレインフローは、 $P_{pre,h,n}$ またはそれ以前の山からの前の $P_{pre,h,n}$ によって遮断されます。
- 5 $P_{pre,h,n}$ および $P_{sub,h,n}$ の両方が存在し、ルール4の条件2が満たされていません: P_{cur} からのレインフローは $P_{sub,h,n}$ の前に停止します。
- 6 $P_{pre,h,n}$ および $P_{sub,h,n}$ の両方が存在し、ルール4の条件2が満たされます: P_{cur} からのレインフローは、 $P_{pre,h,n}$ またはそれ以前の山からの浸透性のレインフローによって遮断されます。

6つのケースの終点を図2に示します。谷から始まるレインフローの6つのケースは同じルールによって決定されるため、ここでは明示的に示されていません。

3.1 実装

計算では、レインフロー法は次のデータ構造を使用します:

- `A[i]`: i 番目の極値点 (山または谷点) で始まったレインフローの振幅。
- `i_flow_end[i]`: レインフローの終点。たとえば、式 `i_flow_end[7] = 11` は7番目の山頂で始まったレインフローが11番目の山頂で終了したことを意味します。
- `t_cyc_start[i]`: i 番目のレインフローの開始時刻。
- `t_cyc_end[i]`: i 番目のレインフローの停止時刻。

振幅が等しいレインフローまたは半サイクルは、振幅の降順にカウントされて並べ替えられます。振幅と周波数の情報は、`cyc_ampl_s[]`と`cyc_freq_s[]`の2つのリストに保存されます。

3.2 寿命評価

関数 `detect_lifetime()` は、IGBTモジュールの寿命を予測します: 入力パラメータは寿命モデルの a と b 、`histogram()` の `hists[]` と `bins[]`、および負荷サイクルの期間です。

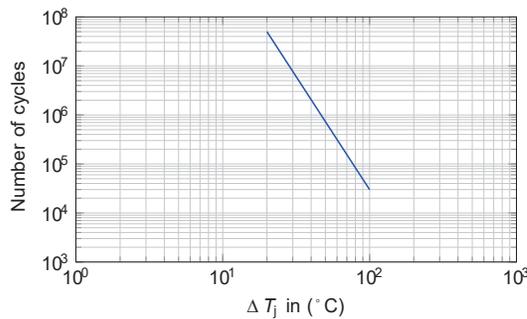
$$N_f = a \cdot (\Delta T)^b$$

寿命モデルは、故障までのサイクル数 N_f を T_f サイクルの振幅 ΔT_f に関連付けます。定数 a と b は、IGBTモジュールの加速パワーサイクル寿命曲線を当てはめることによって決定されます。マイナー則は、ジャンクション温度波形に現れる、異なる ΔT_f のサイクルによって引き起こされる損傷を正規化するために使用されます。正規化された損傷はリスト `acc_damage[]` に保存されます。これらの損傷の合計が、負荷サイクル下での合計損傷になります。IGBTモジュールは、このような負荷サイクルを何度も繰り返し、蓄積された損傷が1に達すると故障します。デバイスの予測寿命は、負荷サイクルの期間 t_{period} と故障が発生するまでの負荷サイクル数 PC の積です。

4 シミュレーション

この例では、2つの負荷デューティで動作する誘導モータ (Induction Motor: IM) 駆動のIGBTインバータパワーモジュールの寿命予測を示します。IM駆動回路と制御方式は、PLECSの `demos` ライブラリの "Induction Machine Drive Controlled with DTC" を参照してください。IGBT (この場合は POWEREX [1] PM75CLA060 パワーモジュール) のジャンクション温度をシミュレーションするために、インバータの熱モデルを追加します。このモジュールのパワーサイクル曲線は、三菱電機のPV-IPMアプリケーションノート [2] に記載されており、図3に示します。

図3: POWEREXのパワーモジュールPM75CLA060のパワーサイクルデータ



IMは180rad/sで回転しています。IEC 60034-1規格では、10種類の負荷サイクルが定義されています [3]。そのうちの2つは、このデモモデルでシミュレーションできます：

- **S1**は、定荷重シナリオを指します。この例では、負荷トルクは40Nmに固定されています。
- **S6**は、連続周期の負荷シナリオを指します。この例では、負荷トルクは20Nmと60Nmの間で周期的に変化します(5秒周期でデューティー比0.5を使用)。

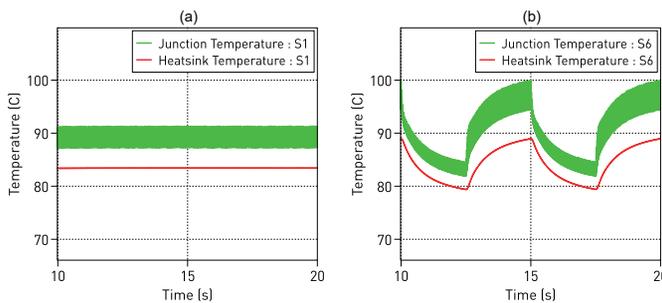
4.1 システム起動時のジャンクション温度

モータの始動電流が高く、ジャンクション温度の大きな変動が見られます。インバータモジュールとそのヒートシンクの初期温度は周囲温度と同じです。ヒートシンクの熱容量が比較的大きいため、ヒートシンクの温度が定常状態に達するまでに約7秒かかります。この7秒間の熱損傷は主にIM駆動と冷却開始によるものであり、デューティー比がインバータの寿命に与える影響を反映したものではありません。

4.2 ジャンクション温度サイクル

最初の起動過渡状態の後、モータ駆動と冷却システムは定常状態で動作します。IGBTのジャンクション温度の変動は駆動動作によって発生し、2つの負荷デューティーにおけるストレスを反映します。2つの負荷サイクルS1およびS6における定常状態のジャンクションおよびヒートシンクの温度を図4に示します。

図4: (a)S1デューティおよび(b)S6デューティにおける定常状態のジャンクションおよびヒートシンクの温度



4.3 レインフローの計測と寿命予測

レインフロー解析を実行するには、PLECS Standaloneのシミュレーションメニューからシミュレーション・スクリプトを開くか、PLECS BlocksetのmファイルRainflow_counting_script.mを開きます。変数Load_profileを使用すると、シナリオS1(Load_profile = 1)またはS6(Load_profile = 2)のどちらを実行するかを選択できます。

スクリプトの最初の出力は、図5に示すように、ジャンクション温度データの極値点です。ジャンクション温度の頂点と谷点を使用してレインフロー法を実行した後、generate_histogram()関数が呼び出されます。幅5°Cのサイクルビンに入る温度サイクルの数を計算します。負荷シナリオS6の場合、これは図6の結果になります。負荷シナリオS1の場合、 $\Delta T_j = 5^\circ\text{C}$ のビンサイズは1つだけで、フルサイクル数は46.5です。

図5: 負荷シナリオS6の極値点の抜粋。ジャンクション温度データは、平均間隔1msの周期平均化フィルタでフィルタリングされます。

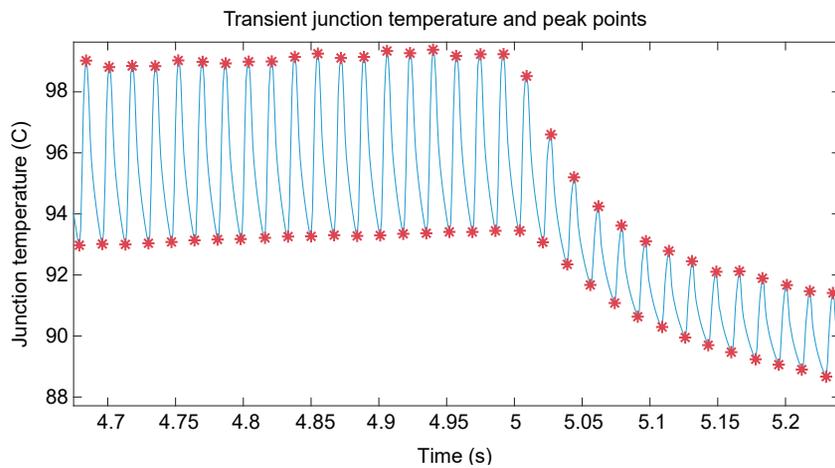
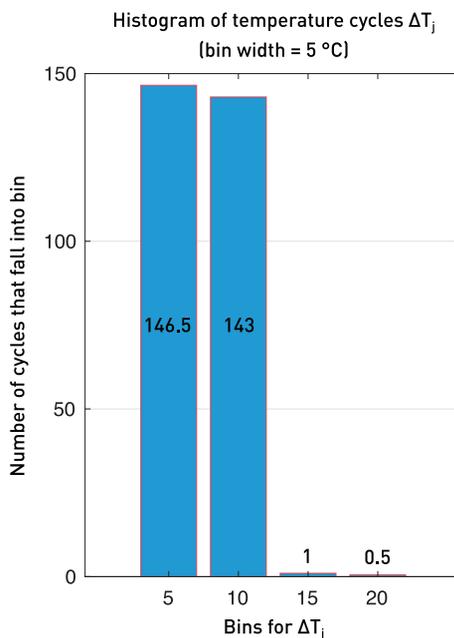


図6: ジャンクション温度サイクルのヒストグラム



ヒストグラムデータを使用した、デバイスの予測寿命は次のようになります:

- モータがS1デューティで動作している場合、ジャンクション温度サイクルはすべて5°C未満です。S1デューティでのインバータの予測寿命は16年です。
- モータがS6デューティで動作している場合、各負荷サイクル(5 秒)で15°Cおよび20°Cと比較的大きなジャンクション温度サイクルが発生します。S6デューティでのインバータの予測寿命は1.1年です。

5 まとめ

結果は、IGBTモジュールの寿命がわずかに数回の大きな T_j サイクルによって制限されることを示しています。モータが一定の負荷トルクと比較して周期的な負荷トルクの変動を受ける場合、インバータの寿命は大幅に短くなります。

参考文献

- [1] MITSUBISHI PM75CLA060FLAT-B Datasheet, [Online]. Available: https://www.mitsubishielectric-mesh.com/products/pdf/PM75CLA060_e.pdf. [Accessed: Aug. 3rd, 2021].
- [2] PV-IPM Application Note, [Online]. Available: https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/files/manuals/pv_ipm_note_e2.pdf. [Accessed: Aug. 3rd, 2021].
- [3] IEC 60034-1 Duty Cycles, [Online]. Available: <https://avsltd.com.sg/iec-duty-cycles/>. [Accessed: Aug. 3rd, 2021].

改訂履歴:

PLECS 4.6.1 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



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。