

Application Note

自動トルクによるステップ・モーター・システムの電力損失の低減



Shivam Kumar, Venkata Naresh Kotikelapudi and Dipankar Mitra

概要

ステップ・モーター・システムは開ループの位置制御システムです。システム・コントローラおよびモーター・ドライバ IC は、印加される負荷トルクの大きさに関する情報も、ステップ損失を生じさせない最適な動作電流の大きさに関する情報も持っていない。ドライバは、負荷トルクの要求を知ることができないため、モーターは通常、最大負荷トルクを維持できる固定フルスケール電流で駆動されます。しかし、負荷が軽いのに大きな動作電流を使うことは、余計な I^2R 損失の原因になるため、不必要です。大きなコイル電流は、全体システム効率の低下以外に、モーターの発熱による熱の問題を引き起こし、ひいてはモーターの耐久性を低下させ、寿命を縮めます。

今回、テキサス・インスツルメンツは **DRV8462**、**DRV8452**、**DRV8461** ステップ・モーター・ドライバを発表しました。これらのドライバは、自動トルク・アルゴリズムを含む複数の新しい機能を備えています。自動トルク機能により、負荷トルクに応じてステップ・コイル電流を自動的に調整することで、システムの効率が向上します。自動トルク機能は外部センサを一切必要としません。代わりに、モーターに供給される電力を監視することで、負荷トルクに対して線形的に変化する内部信号を生成し、高速検出を可能にしています。このアプリケーション・レポートでは、自動トルク・アルゴリズムの利点と、効果を最大化するための調整方法について説明します。

目次

| | |
|------------------------------------|----|
| 1 ステップ・モーター・ドライバの電力効率..... | 3 |
| 2 自動トルク..... | 4 |
| 2.1 自動トルク: 学習の原理..... | 4 |
| 2.2 電流制御..... | 8 |
| 2.3 PD 制御ループ..... | 11 |
| 2.4 自動トルク調整パラメータの影響..... | 12 |
| 2.5 自動トルクによる効率向上..... | 21 |
| 3 ケース・スタディ..... | 22 |
| 3.1 アプリケーション 1: 現金自動預払機 (ATM)..... | 22 |
| 3.2 アプリケーション 2: 繊維機械..... | 24 |
| 3.3 アプリケーション 3: プリンタ..... | 28 |
| 4 まとめ..... | 28 |
| 5 関連資料..... | 28 |

図の一覧

| | |
|-------------------------------------------------------|----|
| 図 1-1. 標準型ステップ・ドライバによる電力損失..... | 3 |
| 図 2-1. 自動トルクによる省電力..... | 4 |
| 図 2-2. (ATQ_LRN + ATQ_CNT) と負荷トルクとの関係..... | 5 |
| 図 2-3. 自動トルク学習のフローチャート..... | 7 |
| 図 2-4. 自動トルク学習..... | 8 |
| 図 2-5. 負荷トルクの関数としての ATQ_CNT..... | 9 |
| 図 2-6. ATQ_TRQ_MIN、ATQ_TRQ_MAX、ATQ_UL、ATQ_LL の選択..... | 10 |
| 図 2-7. PD 制御ループ・パラメータの選択..... | 12 |
| 図 2-8. ATQ_TRQ_MIN = 0.6A、ATQ_UL = 40..... | 12 |
| 図 2-9. ATQ_TRQ_MIN = 0.74A、ATQ_UL = 45..... | 12 |
| 図 2-10. ATQ_TRQ_MIN = 0.93A、ATQ_UL = 50..... | 13 |
| 図 2-11. ATQ_TRQ_MIN = 1.2A、ATQ_UL = 60..... | 13 |
| 図 2-12. ATQ_UL = 40、ATQ_LL = 40..... | 13 |
| 図 2-13. ATQ_UL = 40、ATQ_LL = 20..... | 13 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| ☒ 2-14. 電力節減量と負荷トルクとの関係..... | 14 |
| ☒ 2-15. 省電力プロファイルの選択..... | 14 |
| ☒ 2-16. 適応型 ATQ_UL..... | 15 |
| ☒ 2-17. 非適応型 ATQ_UL を使用した電流波形..... | 15 |
| ☒ 2-18. 適応型 ATQ_UL を使用した電流波形..... | 15 |
| ☒ 2-19. KP = 1 での負荷過渡応答..... | 16 |
| ☒ 2-20. KP = 5 での負荷過渡応答..... | 16 |
| ☒ 2-21. KP = 7 での電流波形..... | 16 |
| ☒ 2-22. KD = 0、負荷トルクを 0.3Nm から 0.57Nm に変更..... | 17 |
| ☒ 2-23. KD = 5、ATQ_D_THR = 30、負荷トルクを 0.3Nm から 0.57Nm に変更..... | 17 |
| ☒ 2-24. KP = 1、FRZ = 1、AVG = 1..... | 17 |
| ☒ 2-25. KP = 1、FRZ = 1、AVG = 8. 遅い過渡に対して非常に安定しています。..... | 17 |
| ☒ 2-26. KP = 1、FRZ = 7、AVG = 8. 遅い応答..... | 17 |
| ☒ 2-27. ATQ_ERROR_TRUNCATE = 0 (高速負荷過渡中、ループが安定化するのに長い時間を要しています。)...... | 18 |
| ☒ 2-28. ATQ_ERROR_TRUNCATE = 2 (発振が小さくなっています。)...... | 18 |
| ☒ 2-29. モーター速度の関数としての ATQ_CNT..... | 18 |
| ☒ 2-30. ステップ周波数 3000pps..... | 19 |
| ☒ 2-31. ステップ周波数 4800pps..... | 19 |
| ☒ 2-32. ステップ周波数 6400pps..... | 19 |
| ☒ 2-33. ステップ周波数 8000pps..... | 19 |
| ☒ 2-34. 電源電圧の関数としての ATQ_CNT..... | 19 |
| ☒ 2-35. ATQ_LRN と VM との関係..... | 20 |
| ☒ 2-36. ATQ_CNT とモーター温度との関係..... | 20 |
| ☒ 3-1. ATM モーターの学習ルーチンのスナップショット..... | 23 |
| ☒ 3-2. 負荷がある状態とない状態の ATM モーターの動作、自動トルクなし..... | 23 |
| ☒ 3-3. 負荷がある状態とない状態の ATM モーターの動作、自動トルクなし..... | 23 |
| ☒ 3-4. 負荷がある状態とない状態の ATM モーターの動作、自動トルクあり..... | 24 |
| ☒ 3-5. 負荷がある状態とない状態の ATM モーターの動作、自動トルクあり..... | 24 |
| ☒ 3-6. 繊維機械モーターの学習ルーチンのスナップショット..... | 25 |
| ☒ 3-7. 負荷がある状態とない状態の繊維機械モーターの動作、自動トルクなし..... | 26 |
| ☒ 3-8. 負荷がある状態とない状態の繊維機械モーターの動作、自動トルクなし..... | 26 |
| ☒ 3-9. 負荷がある状態とない状態の繊維機械モーターの動作、自動トルクあり..... | 27 |
| ☒ 3-10. 負荷がある状態とない状態の繊維機械モーターの動作、自動トルクあり..... | 27 |
| ☒ 3-11. 負荷がある状態とない状態のプリンタ・モーターの動作、自動トルクなし..... | 28 |
| ☒ 3-12. 負荷がある状態とない状態のプリンタ・モーターの動作、自動トルクあり..... | 28 |

表の一覧

| | |
|-----------------------------------|----|
| 表 2-1. 自動トルク学習ルーチン用のレジスタ..... | 5 |
| 表 2-2. 電流制御用レジスタ..... | 8 |
| 表 2-3. PD 制御ループのパラメータ..... | 11 |
| 表 2-4. 負荷プロファイル A、B、C の電力節減量..... | 15 |
| 表 2-5. 自動トルクによる熱性能の向上..... | 21 |

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 ステップ・モーター・ドライバの電力効率

ステップ・モーターは、位置を監視するための外部センサをまったく使わなくても、入力の変動を出力の精密な位置変化に容易に変換できるため、広く使われています。位置と速度の精密な制御を実現するため、ステップ・コイルの電流は安定化されています。

モーターのトルクの式は式 1 で与えられます。モーターのトルクは、次のようにコイル電流とモーターの構造で決まります。

$$\tau_{\max} = K_T \times I \quad (1)$$

ここで、 τ_{\max} はサポートされている最大トルク、 K_T はモーターのトルク定数、 I はコイル電流です。

式 1 は、コイル電流 I が生成できるトルクの大きさと解釈できます。与えられた負荷トルクを維持するには、モーター・ドライバは常に、要求トルクよりも大きいトルクを生成できるコイル電流で動作させる必要があります。

従来型のモーター・ドライバでは、ピーク負荷トルク要求に基づいてフルスケール動作電流が設定されます。これにより、ピーク負荷が要求されたときに、モーターがステップを失うことはありません。そのため、負荷トルクに関係なく、電流は一定です。この結果、負荷トルクがピーク負荷より低い場合、図 1-1 に示すように、ドライバとモーターは抵抗性電源損失として入力電力の一部を消費します。

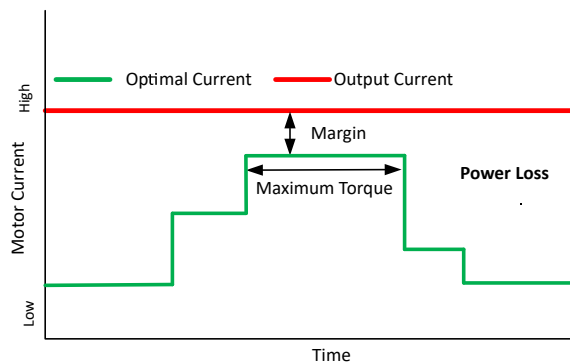


図 1-1. 標準型ステップ・ドライバによる電力損失

ほとんどのシステムでは、ピーク負荷トルクの要求が発生することはごくまれです。たとえば、ATM 機械では、ステップ・モーターがピーク負荷を供給するのは稼働時間全体の 15% 未満かもしれません。しかし、標準的なステップ・ドライバは、最終的に常時モーターにフルスケール電流を供給するため、不要な電力損失、システム・サイズの増大化、部品の寿命短縮によりシステム効率は低下します。

2 自動トルク

DRV8462、DRV8452、DRV8461 モーター・ドライバに実装された自動トルク・アルゴリズムは、負荷トルクに応じて出力電流を動的に変化させることで、システム効率を向上させます。負荷トルクが低い場合、抵抗性損失を低減するために出力電流は低くなり、負荷トルクが高くなると、出力電流は急激に増加してモーターのステップ損失を防止します。この概念を、[図 2-1](#) に示します。自動トルクにより効率が向上した結果、システムは低温で動作するため、部品の寿命が長くなります。自動トルク機能により、より安価で小型サイズのステッパ・モーターを利用することも可能です。

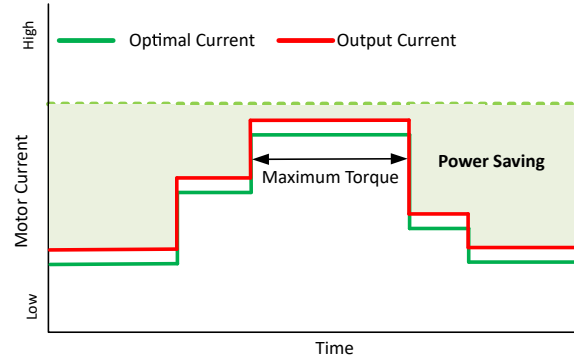


図 2-1. 自動トルクによる省電力

ステッパ・モーター・システムでは、電源から供給される合計電力は負荷のトルク要件のために供給されます。また、モーターの巻線抵抗やドライバのオン抵抗による抵抗損失などの電力損失に使用されます。これは、[式 2](#) によって示されます：

$$\text{Power delivered by supply} = \text{Constant losses} + \tau \times \omega \quad (2)$$

ここで、 τ は負荷トルク、 ω はモーター速度です。

[式 2](#) から、負荷トルクが増加すると、電源から供給される電力も増加することがわかります。自動トルク・アルゴリズムは、電源から供給される電力を監視して、負荷トルクに関する情報を取得します。一定の損失は、`ATQ_LRN` パラメータで表され、`ATQ_CNT` パラメータは負荷トルクをサポートするために必要な電力を表します ([セクション 2.1](#) を参照)。

2.1 自動トルク:学習の原理

このセクションでは、モーターのパラメータとモーターの動作条件を自動トルク・アルゴリズムが学習する手順を説明します。

[セクション 2](#) で説明したように、`ATQ_LRN` パラメータはシステムの固定損失で決まります。任意のモーターについて、`ATQ_LRN` はコイル電流に直接比例します。これは、[式 3](#) で表すことができます。

$$\text{ATQ_LRN} = \frac{k \times I_M}{V_{VM}} \quad (3)$$

ここで、 I_M はモーター電流、 V_{VM} はドライバへの電源電圧、 k は定数です。[式 3](#) に、`ATQ_LRN` とモーター電流の間の線形関係を示します。自動トルク学習ルーチンは、無負荷時に任意の 2 つの電流で `ATQ_LRN` の値を学習し、この関係を使用して他の電流での `ATQ_LRN` の値を補間します。

`ATQ_CNT` パラメータは、負荷トルクをサポートする、供給される電力の成分を表します。この関係は、[式 4](#) で表すことができます。

$$\text{ATQ_CNT} = \frac{k_1 \times \tau \times \omega}{I_{FS}} \quad (4)$$

ここで、 k_1 は特定の動作条件における定数で、 I_{FS} はステッパ・ドライバのフルスケール電流 (正弦波電流の波形のピーク) です。

[式 4](#) に、自動トルク・アルゴリズムの基本的な動作原理を定義します。`ATQ_CNT` パラメータを使用すると、ステッパ・モーターに印加される負荷トルクに基づいて、モーター・コイルの電流レギュレーションを実行できます。

図 2-2 に、(ATQ_LRN + ATQ_CNT) を示します。これは、2.8A 定格のハイブリッド・バイポーラ NEMA 24 ステップ・モーターの 2.5A フルスケール電流での負荷トルクの関数として測定されたものです。ATQ_LRN は負荷トルクに応じて変化しませんが、ATQ_CNT は負荷トルクに応じて線形的に変化します。

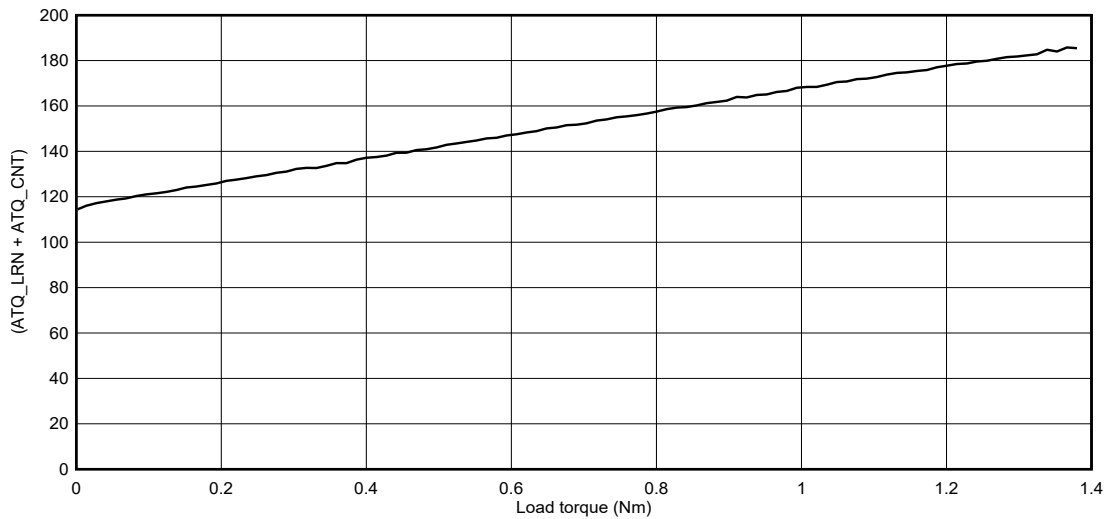


図 2-2. (ATQ_LRN + ATQ_CNT) と負荷トルクとの関係

2.1.1 自動トルク学習ルーチンの設定

自動トルク・アルゴリズムをイネーブルにした後、学習ルーチンを実行して、ATQ_LRN パラメータを推定する必要があります。

この学習ルーチンは、式 3 で説明されている ATQ_LRN とモーター電流の間の線形関係を使用します。ユーザーは、モーターに負荷トルクがかからない状態で、2 つの電流値を選択して学習を実行する必要があります。これら 2 つの電流値は、ATQ_LRN_MIN_CURRENT および ATQ_LRN_STEP レジスタによってプログラムされます。

- 初期電流レベル = $ATQ_LRN_MIN_CURRENT \times 8$
- 最終電流レベル = 初期電流レベル + ATQ_LRN_STEP

これら 2 つの電流の ATQ_LRN 値は、ATQ_LRN_CONST1 および ATQ_LRN_CONST2 レジスタに保存されます。これら 2 つのレジスタを使用して、アプリケーションの動作範囲内にある他のすべての電流の ATQ_LRN 値を補間します。

表 2-1 に、自動トルク学習ルーチンに関連するレジスタを示します。

表 2-1. 自動トルク学習ルーチン用のレジスタ

| レジスタ名 | 説明 |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ATQ_LRN_MIN_CURRENT[4:0] | 自動トルク学習ルーチンの初期電流レベルを表します。 |
| ATQ_LRN_STEP[1:0] | 初期電流レベルまでのインクリメントを表します。4 つのオプションをサポートしています。 <ul style="list-style-type: none"> • 00b: ATQ_LRN_STEP = 128 • 01b: ATQ_LRN_STEP = 16 • 10b: ATQ_LRN_STEP = 32 • 11b: ATQ_LRN_STEP = 64 例: ATQ_LRN_STEP = 10b かつ ATQ_LRN_MIN_CURRENT = 11000b の場合 <ul style="list-style-type: none"> • 初期学習電流レベル = $24 \times 8 = 192$ • 最終学習電流レベル = $192 + 32 = 224$ |
| ATQ_LRN_CYCLE_SELECT[1:0] | 学習ルーチンにより電流が他のレベルになった後の電流レベルにおける電氣的半周期の数を表します。4 つのオプションをサポートしています。 <ul style="list-style-type: none"> • 00b: 8 半周期 • 01b: 16 半周期 • 10b: 24 半周期 • 11b: 32 半周期 |

表 2-1. 自動トルク学習ルーチン用のレジスタ (continued)

| レジスタ名 | 説明 |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| LRN_START | このビットに「1b」を書き込むと、自動トルク学習ルーチンがイネーブルされます。学習が完了すると、このビットは自動的に「0b」になります。 |
| LRN_DONE | 学習が完了すると、このビットは「1b」になります。 |
| ATQ_LRN_CONST1[10:0] | 初期学習電流レベルにおける ATQ_LRN パラメータを示します。 |
| ATQ_LRN_CONST2[10:0] | 最終学習電流レベルにおける ATQ_LRN パラメータを示します。 |
| VM_SCALE | このビットが「1b」のとき、自動トルク・アルゴリズムは電源電圧の変動に応じて、ATQ_UL、ATQ_LL、および ATQ_LRN パラメータを自動的に調整します。 |

学習ルーチンのパラメータを設定する際に考慮すべき点はいくつかあります：

- 初期電流レベルは、最大動作電流の 30%～50% の範囲で選択することを推奨します。
- 最終的な電流レベルは 255 を超えないようにする必要があり、最大動作電流の 80%～100% の範囲で選択できます。
- 電流波形の歪み (高速または低い電源電圧のため) により、ATQ_LRN パラメータの読み取りが不正確になる可能性があります。学習電流レベルは、波形の歪みが見られる電流から離して選択する必要があります。
- ATQ_LRN_CYCLE_SELECT の値が小さいと、学習が速くなります。ただし、ノイズが発生しやすいシステムでは、より高い ATQ_LRN_CYCLE_SELECT を使用すると、より安定した ATQ_LRN パラメータ値が得られます。
- 学習は、モーターが定常状態の速度に達した後に実施する必要があります。
- モーターを変更した場合、またはモーター速度が $\pm 10\%$ 変化した場合は、再学習を行う必要があります。

簡単にまとめると、自動学習をイネーブルにするには、次の一連のコマンドを適用する必要があります：

- ATQ_EN に 1b を書き込みます。
 - 無負荷の状態でもーターを動作させます。
 - ATQ_LRN_MIN_CURRENT をプログラムします。
 - ATQ_LRN_STEP をプログラムします。
 - ATQ_LRN_CYCLE_SELECT をプログラムします。
 - ATQ_LRN_START に 1b を書き込みます。
 - このアルゴリズムは、電気的な半周期の ATQ_LRN_CYCLE_SELECT 数の間、初期電流レベルでもーターを動作させます。
 - 次に、アルゴリズムは、電気的な半周期の ATQ_LRN_CYCLE_SELECT 数の間、最終電流レベルでもーターを動作させます。
- 学習が完了すると、
 - ATQ_LRN_START ビットは「0b」に自動的にクリアされます。
 - ATQ_LRN_DONE ビットは「1b」になります。
 - ATQ_LRN_CONST1 および ATQ_LRN_CONST2 は、各レジスタに入力されます。
 - モーター電流は、ATQ_TRQ_MAX になります。

ATQ_LRN_CONST1 と ATQ_LRN_CONST2 がプロトタイプ・テストにより、わかる場合は、学習ルーチンを再起動せずに量産で使用することができます。量産では、次のコマンド・シーケンスを適用します：

- VREF は、プロトタイプ・テストの学習時と同じ値に設定されます。
- ATQ_LRN_MIN_CURRENT をプログラムします。
- ATQ_LRN_STEP をプログラムします。
- ATQ_LRN_CONST1 をプログラムします。
- ATQ_LRN_CONST2 をプログラムします。
- ATQ_EN に 1b を書き込みます。

図 2-3 に、自動トルク学習ルーチンについてまとめたフローチャートを示します。

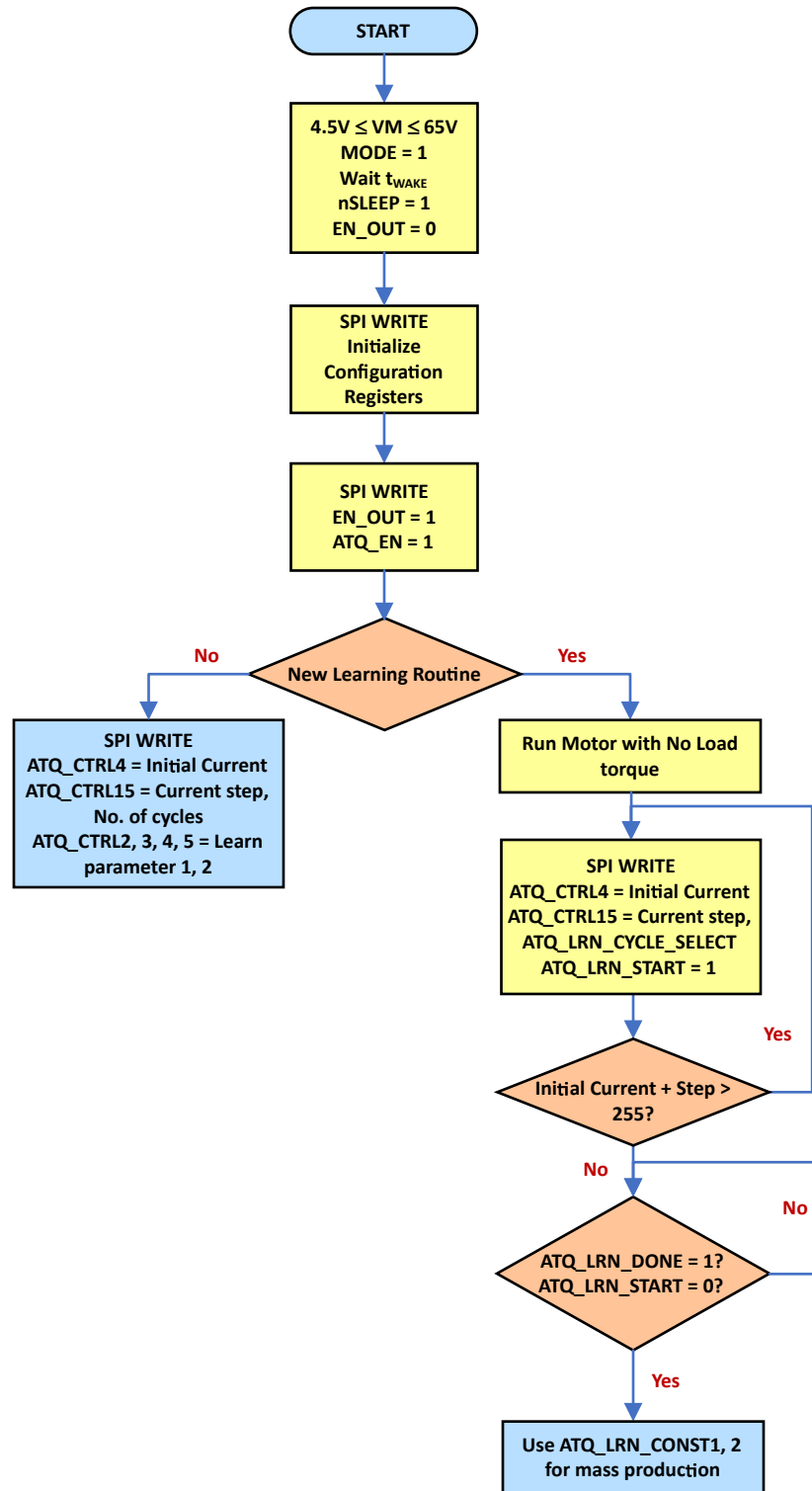


図 2-3. 自動トルク学習のフローチャート

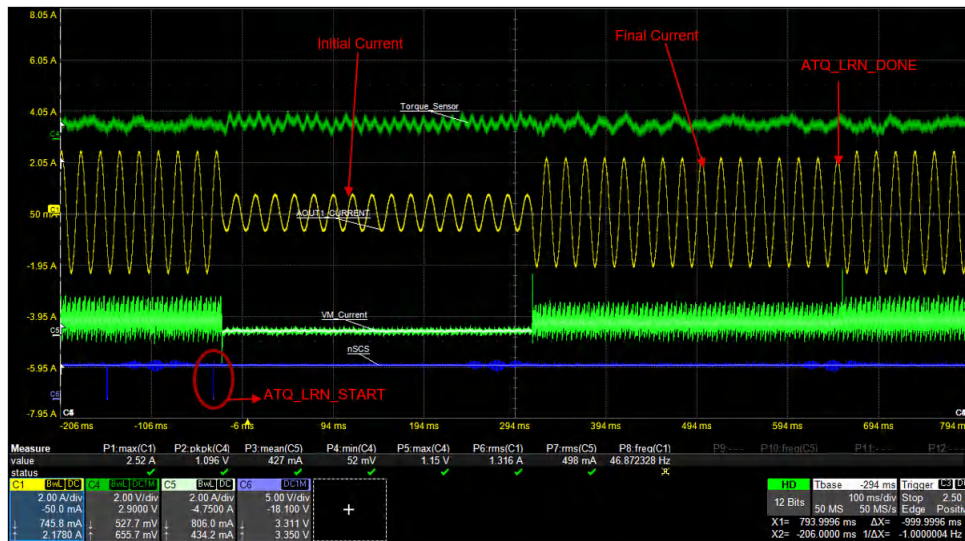


図 2-4. 自動トルク学習

各波形は上から順に負荷トルク、コイル電流、電源電流、nSCS です。

図 2-4 に、初期電流 (I_{FS1}) 740mA と最終電流 (I_{FS2}) 2.2A での自動学習プロセスを示しています。ATQ_LEARN_CYCLE_SELECT は、半周期 32 に対応します。

2.2 電流制御

このセクションでは、システムの抵抗性損失を最小限に抑えるため、加えられた負荷トルクに応じて自動トルク・アルゴリズムがモーター・コイル電流を変更する仕組みについて説明します。

表 2-2 に、電流制御に関連するレジスタを示します。

表 2-2. 電流制御用レジスタ

| パラメータ | 説明 |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ATQ_UL[7:0] ATQ_LL[7:0] | ATQ_CNT が、モーター電流の修正によって制御される範囲内でのヒステリシス帯域の境界の上限と下限。 |
| ATQ_TRQ_MIN[7:0] ATQ_TRQ_MAX[7:0] | 自動トルクがイネーブルのとき、プログラム可能な最小および最大電流制限。 |
| ATQ_TRQ_DAC[7:0] | 自動トルクがイネーブルのとき、モーター電流の値を出力します。ATQ_TRQ_DAC は、ATQ_TRQ_MIN と ATQ_TRQ_MAX の間で変動する場合があります。 |
| CNT_OFLW | ATQ_CNT が ATQ_UL より大きい場合、CNT_OFLW フラグは 1b になります。 |
| CNT_UFLW | ATQ_CNT が ATQ_LL より小さい場合、CNT_UFLW フラグは 1b になります。 |

式 4 に示すように、ATQ_CNT パラメータは負荷トルクに比例し、ステッパ・ドライバの電流設定に反比例します。

この関係の理想化された表現を図 2-5 に示します。

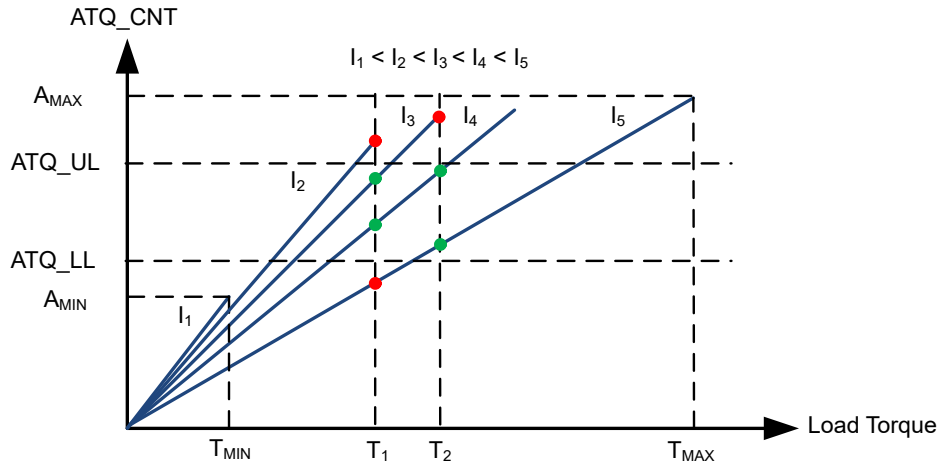


図 2-5. 負荷トルクの間数としての ATQ_CNT

自動トルク・アルゴリズムは、図 2-5 に示すように、モーター電流の修正によって、ユーザーがプログラム可能な ATQ_UL および ATQ_LL パラメータで定義されるヒステリシス帯域内に ATQ_CNT を制限します。

- モーターがステップ損失もストールも起こさないでサポートできる負荷トルクの最大値は、モーター電流に比例します。
- 負荷トルクの要求が増大すると (T_1 から T_2)、ATQ_CNT は ATQ_UL スレッシュホールドを上回り、それに応答して、アルゴリズムは電流を大きくして (I_3 から I_4)、帯域内に ATQ_CNT を導入します。
- 負荷トルクの要求が低下し (T_2 から T_1)、ATQ_CNT が ATQ_LL を下回ると、アルゴリズムは電流を低減して (I_5 から I_4)、ヒステリシス帯域内に ATQ_CNT を導入します。

2.2.1 電流制御パラメータの設定

以下の手順では、電流制御パラメータの値を選択する方法を説明しています。

ATQ_TRQ_MIN は、モーターに印加される最小負荷トルクをサポートするために必要な最小モーター電流です。

- このパラメータを求めるには、
 - 最小負荷トルク (T_{MIN}) でモーターに負荷をかけ、フルスケール電流 (I_{FS}) でモーターを駆動します。
 - ATQ_UL および ATQ_LL をゼロに設定し、KP を 1 に設定します。
 - モーターがストールするまで電流を低減します。
 - モーターがストールする電流 (I_A) に注意してください。
 - $ATQ_TRQ_MIN = 1.1 \times I_A$ に設定します。
- ATQ_TRQ_MAX を求めるには、
 - モーター電流が I_A のとき、最大負荷トルク (T_{MAX}) でモーターに負荷をかけ、モーターをストールさせます。
 - モーター電流を増やし始めます。モーターがストールから再始動する電流 (I_B) に注意します。
 - $ATQ_TRQ_MAX = 1.1 \times I_B$ に設定します。電流が ATQ_TRQ_MAX で、負荷トルクが T_{MAX} のときの ATQ_CNT (A_{MAX}) に注意してください。
- ATQ_UL の場合、
 - 初期値を $0.5 \times A_{MAX}$ に設定します。
 - アプリケーション固有の負荷プロファイル (ピーク負荷とアイドル負荷) を適用します。
 - モーターがストールした場合、モーターがストールしなくなるまで、ATQ_UL の値を小さくします。
 - 負荷プロファイルの適用後にモーターがストールしない場合、モーターがストールするまで、ATQ_UL を増加させます。
 - ATQ_UL の値が大きいほど、ピーク負荷時の電力をより節約できますが、負荷過渡が速い場合、モーターがストールする可能性があります。
 - ATQ_UL の値が小さいほど、ピーク負荷時の省電力性が低下しますが、モーターのストールおよびステップ損失の可能性も低下します。
- ほとんどのアプリケーションでは、ATQ_UL と ATQ_LL の差が 2 であることが適切な出発点です。
- VM_SCALE ビットは、ユーザーが ATQ_UL および ATQ_LL を設定した後でのみ、1b にする必要があります。

ATQ_UL、ATQ_LL、ATQ_TRQ_MAX、および ATQ_TRQ_MIN パラメータを選択した場合のフローチャートを図 2-6 に示します。

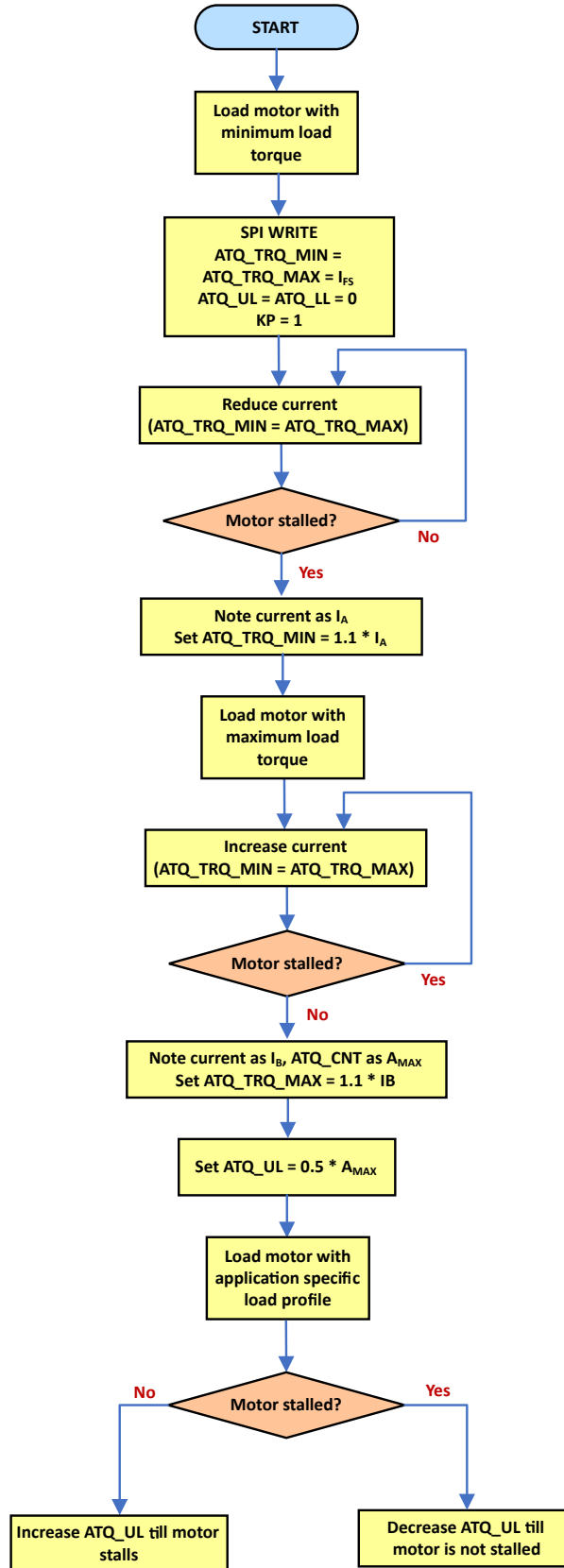


図 2-6. ATQ_TRQ_MIN、ATQ_TRQ_MAX、ATQ_UL、ATQ_LL の選択

2.3 PD 制御ループ

このセクションでは、内部 PD 制御ループが、誤差を最小限に抑えながら、突発的な負荷トルク過渡に対する応答を平滑化する仕組みについて説明します。

表 2-3 に、PD 制御ループ関連の主要パラメータを示します。

表 2-3. PD 制御ループのパラメータ

| パラメータ | 説明 |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| KP[7:0], KD[3:0] | PD 制御ループの比例、および差動ゲイン・パラメータ。 |
| ATQ_AVG[2:0] | <p>ATQ_CNT パラメータは、半周期の ATQ_AVG 数の移動平均です。したがって、ATQ_AVG の値が大きいと、急激なピーク負荷要求に対するループ応答時間が遅くなりますが、より高いトルク出力への唐突な動きがないスムーズな遷移が保証されます。値が小さいと、ループは急激な負荷要求に対して即座に応答します。</p> <ul style="list-style-type: none"> 010b - 2 サイクルの平均 100b - 4 サイクルの平均 111b - 8 サイクルの平均 その他の値: 平均化なし |
| ATQ_FRZ[2:0] | <p>電氣的な半サイクルの遅延の後、PD ループへの応答として電流が変化します。小さい値を使用すると、ピーク負荷の要求を満たすために、電流が急速に増加します。このパラメータの範囲は 1~7 です。</p> <p>001b - 最も速い応答時間。しかし、ループは不安定になる場合があります。</p> <p>111b - 最も遅い応答。しかし、ループは安定します。</p> |
| ATQ_D_THR[7:0] | <p>誤差の変化が ATQ_D_THR 未満の場合、KD は補正に寄与しません。誤差の変化が ATQ_D_THR より大きい場合にのみ、KD は寄与します。</p> <p>例: ATQ_D_THR = 10、 誤差の変化が 9 である場合、$u(t) = KP * e(t)$ 誤差の変化が 12 である場合、$u(t) = KP * e(t) + KD * de(t)/dt$</p> |
| ATQ_ERROR_TRUNCATE[3:0] | PD ループの式で使用される前に、誤差から切り捨てられた LSB ビット数。値が大きいと、電流波形の発振が減少します。 |

PD 制御アルゴリズムは次のように表されます。

$$u(t) = KP * e(t) + KD * de(t)/dt \quad (5)$$

ここで、

KP および KD = PD ループ定数

- $u(t)$ = コントローラの出力
- $e(t)$ = エラー信号

PD ループ・パラメータの調整に関するガイドラインは、以下のとおりです。

- KP = 1、KD = 0 に設定します。他のすべての PD ループ・パラメータは、それぞれのデフォルト値にする必要があります。
- アプリケーション固有の負荷プロファイルを適用します。
- モーターがストールした場合、KP、KD を増加し、モーターがストールしなくなるまで ATQ_D_THR を減少させます。
- モーターがストールしなくなったら、一定の負荷トルクでの電流波形を観察します。
- 電流波形に発振がある場合は、ATQ_FRZ、ATQ_AVG、および ATQ_ERROR_TRUNCATE を増加させます。
- ATQ_FRZ、ATQ_AVG、および ATQ_ERROR_TRUNCATE の値が非常に大きいと、負荷過渡応答が悪化する可能性があるため、PD 制御ループが安定していることを確認するために、負荷過渡応答をもう一度チェックすることを推奨します。

図 2-7 は PD 制御ループ・パラメータを選択するためのフローチャートです。

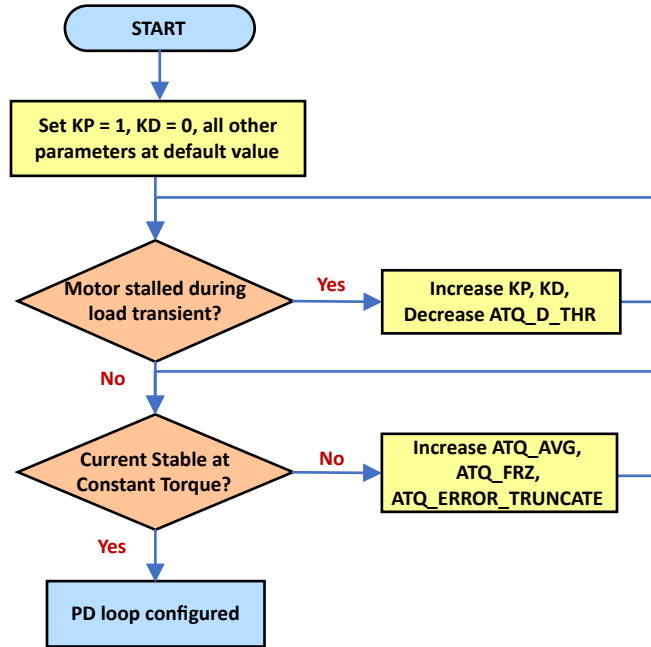


図 2-7. PD 制御ループ・パラメータの選択

2.4 自動トルク調整パラメータの影響

2.4.1 学習パラメータが負荷過渡応答に及ぼす影響

セクション 2.2.1 で説明したように、ATQ_TRQ_MIN と ATQ_UL の選択は、負荷トルク過渡に対する制御ループの応答方法に影響を与えます。この様子を図 2-8～図 2-11 に示します。

各波形は上から順に負荷トルク、コイル電流、電源電流です。

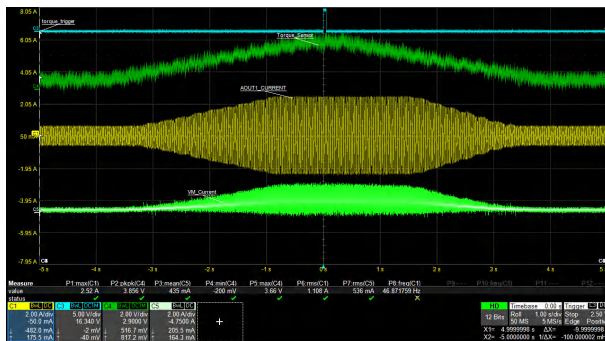


図 2-8. ATQ_TRQ_MIN = 0.6A, ATQ_UL = 40

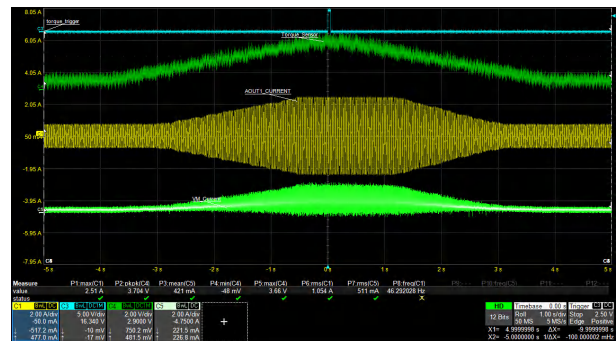


図 2-9. ATQ_TRQ_MIN = 0.74A, ATQ_UL = 45

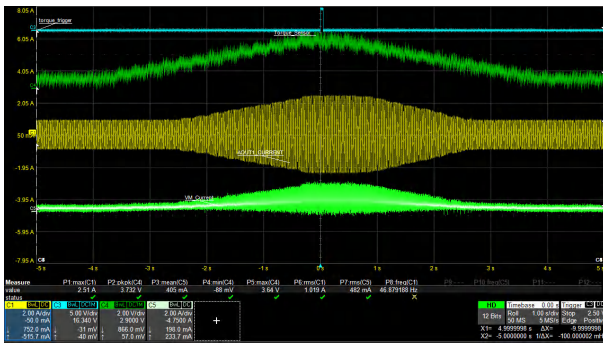


図 2-10. ATQ_TRQ_MIN = 0.93A、ATQ_UL = 50

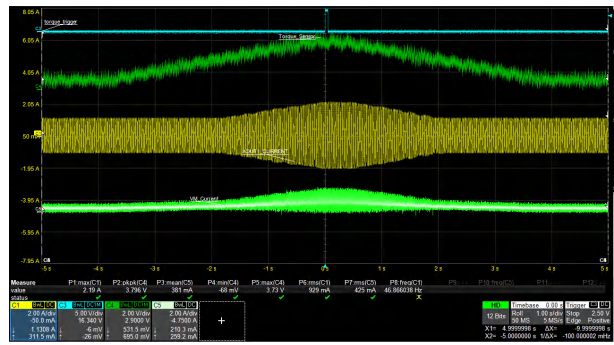


図 2-11. ATQ_TRQ_MIN = 1.2A、ATQ_UL = 60

- 最も小さい ATQ_UL を使った場合 (図 2-8)、その他の設定を使った場合よりも早く、モーター電流は ATQ_TRQ_MAX に達します。そのため、この設定で節約される電力の量は最も少ないですが、高速の負荷トルク過渡に対して最も速く応答します。
- 図 2-11 では、モーター電流が増えるのに長い時間がかかっています。この設定では最も多くの電力が節約されますが、負荷トルク過渡に対する応答は最も遅くなります。

2.4.2 ATQ_UL、ATQ_LL ヒステリシスの影響

ATQ_UL と ATQ_LL の差を大きくすることで、両者の間のヒステリシス幅を広げると、システム・ノイズに対するアルゴリズムの耐性が向上します。

- 図 2-12 に示すように、より小さいヒステリシスは、負荷の増加に対する応答と減少に対する応答の差が小さくなることを意味します。
- 図 2-13 に示すように、より大きいヒステリシスは、負荷が減少した際に電流が減少するのにより長い時間がかかる原因となり、ひいては負荷の減少に対する応答が遅くなり、効率がわずかに低下することにつながります。しかしそれは、ノイズの多い過渡が負荷に発生する状況では有効です。

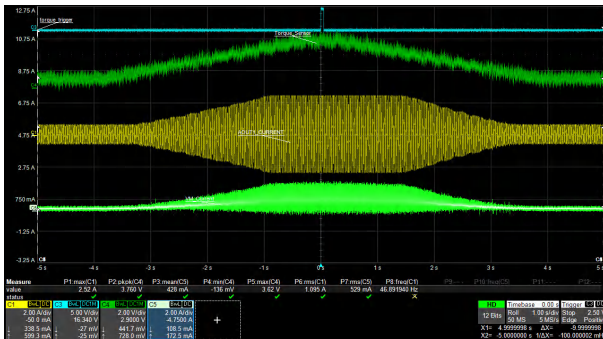


図 2-12. ATQ_UL = 40、ATQ_LL = 40

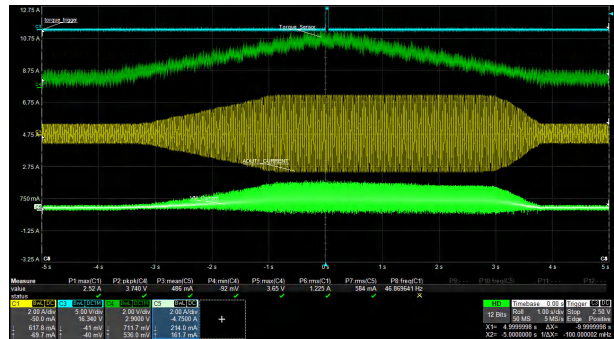


図 2-13. ATQ_UL = 40、ATQ_LL = 20

2.4.3 負荷プロファイルが電力節減量に及ぼす影響

このセクションでは、負荷トルク・プロファイル特性によって電力節減量が決まる仕組みについて説明します (図 2-14 を参照)。

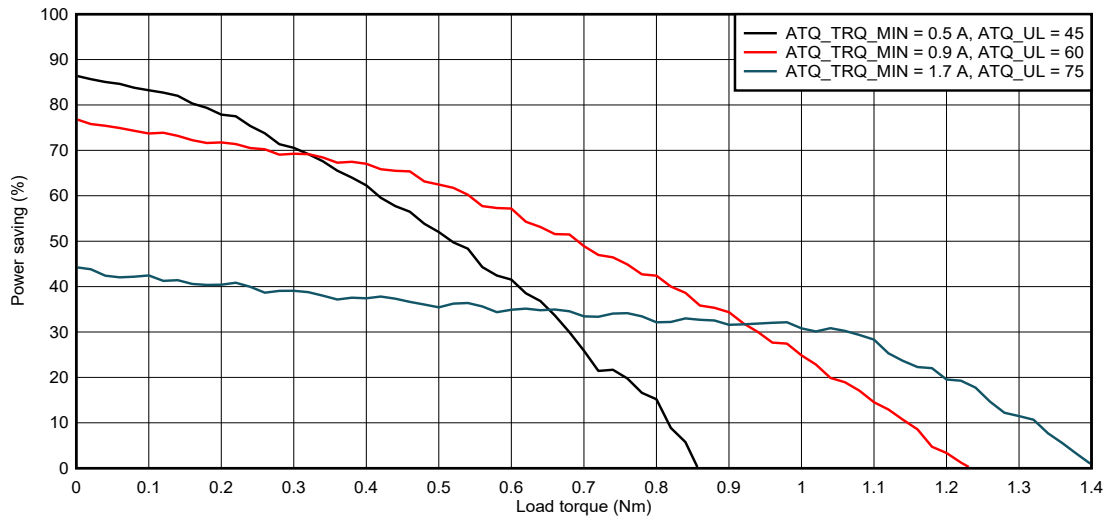


図 2-14. 電力節減量と負荷トルクとの関係

- ATQ_TRQ_MIN と ATQ_UL の値を小さくすると、軽負荷時の電力節減量は大きくなりますが、より小さい負荷トルクで省電力曲線がゼロに低下します。
- ATQ_TRQ_MIN と ATQ_UL の値を大きくすると、軽負荷時にある程度の電力が節約されるのみですが、より大きい負荷トルクで省電力曲線がゼロに低下します。

省電力プロファイルの選択は、図 2-15 の 3 つの仮想的な負荷トルク・プロファイルと 2 つの省電力プロファイルに示すように、ピーク負荷の周波数とデューティ・サイクルで決まります。

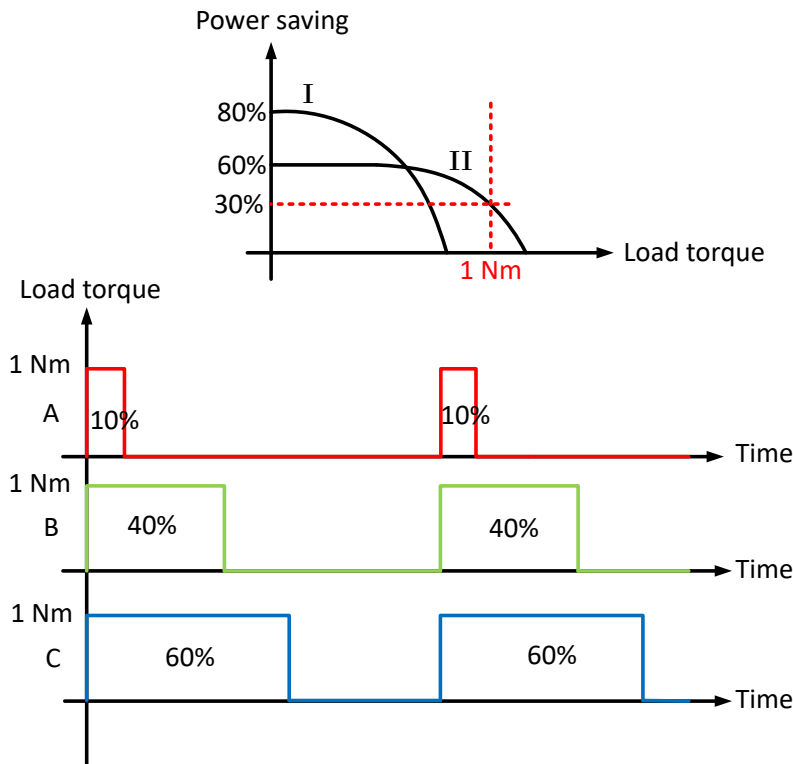


図 2-15. 省電力プロファイルの選択

表 2-4. 負荷プロファイル A、B、C の電力節減量

| 負荷プロファイル | ピーク負荷のデューティ | プロット I による電力節減量 | プロット II による電力節減量 |
|----------|-------------|-----------------|------------------|
| A | 10% | 72% | 57% |
| B | 40% | 48% | 48% |
| C | 60% | 32% | 42% |

- 表 2-4 に示すように、負荷プロファイル A の場合、省電力プロット I を使う方が多くの電力が節約されます。
- 負荷プロファイル B の場合、どちらの省電力プロットでも同量の電力が節約されます。
- 負荷プロファイル C の場合、省電力プロット II を使う方が多くの電力が節約されます。
- したがって、ピーク負荷デューティが小さい負荷プロファイルの場合、小さい ATQ_TRQ_MIN および ATQ_UL 値を選択します。
- ピーク負荷デューティが大きい場合、より大きい ATQ_TRQ_MIN および ATQ_UL 値を選択します。

2.4.4 適応型 ATQ_UL、ATQ_LL

各電流レベルでの ATQ_CNT の最大値に合わせて ATQ_UL を変化させると、省電力性能をさらに改善できます。図 2-16 の包絡線のプロットで示すように、このような適応型 ATQ_UL は、モーター電流の関数として ATQ_UL の値を連続的に更新するようにファームウェアに実装されています。

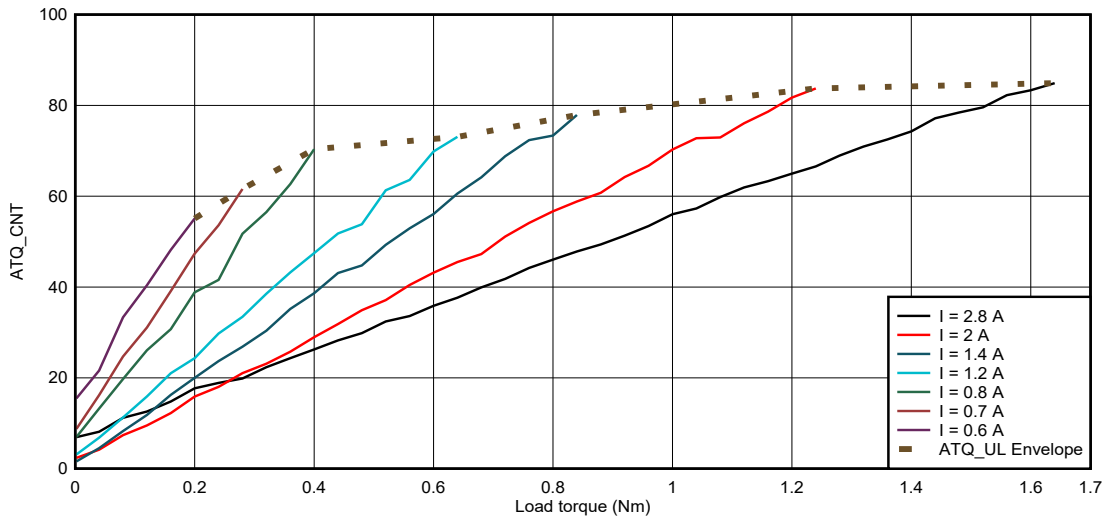


図 2-16. 適応型 ATQ_UL

適応型 ATQ_UL を使った図 2-18 の電流波形は、図 2-17 に示す非適応型の場合よりも多くの電力を節約できます。

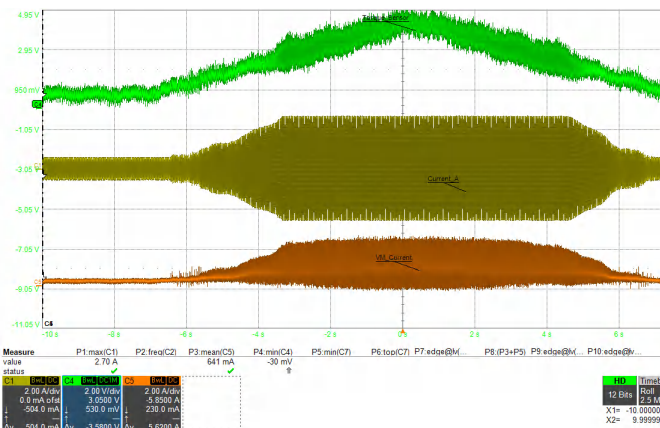


図 2-17. 非適応型 ATQ_UL を使用した電流波形

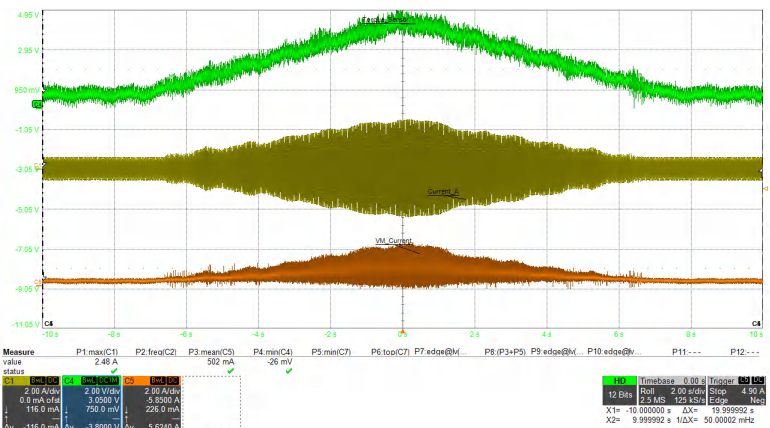


図 2-18. 適応型 ATQ_UL を使用した電流波形

2.4.5 PD パラメータの依存性曲線

このセクションでは、負荷過渡応答の PD 制御ループ・パラメータ依存性を示します。

2.4.5.1 KP 依存性

- 一般に、KP を大きくすると、制御システムの応答速度が速くなります (図 2-19 と図 2-20 を参照)。
- ただし、KP が大きすぎると、電流の波形は発振し始めます。
- KP がさらに大きくなると、発振も大きくなります。システムは不安定になり、発振により制御不能となる可能性もあります (図 2-21 を参照)。

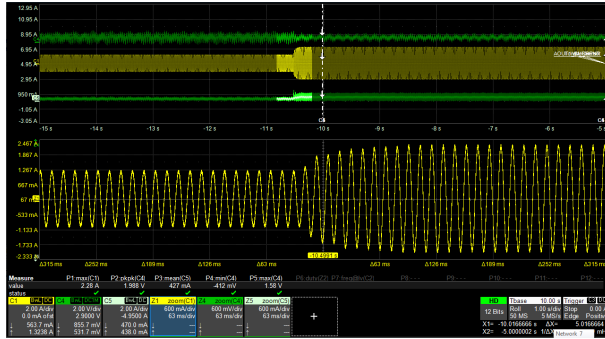


図 2-19. KP = 1 での負荷過渡応答

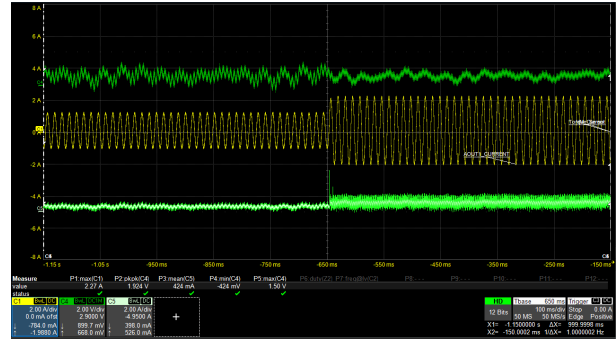


図 2-20. KP = 5 での負荷過渡応答

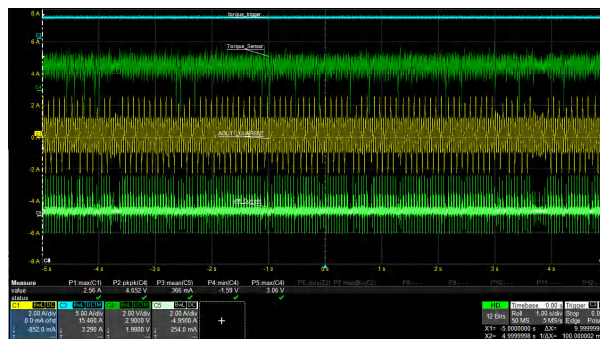


図 2-21. KP = 7 での電流波形

2.4.5.2 KD および ATQ_D_THR 依存性

- KD の値を大きくすると、制御システムは誤差項の変化に対する反応も大きくなるため、制御システム全体の応答速度は増加します (図 2-22 と図 2-23 を参照)。
- 微小応答はノイズの影響を非常に受けやすいため、KD の値を小さくすることを推奨します。
- KD にゼロでない値を選択した場合、システムのノイズ耐性を向上させるためには、値の大きい ATQ_D_THR を使用する必要があります。

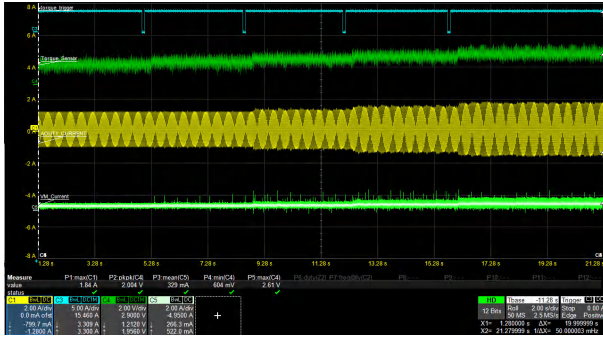


図 2-22. KD = 0、負荷トルクを 0.3Nm から 0.57Nm に変更

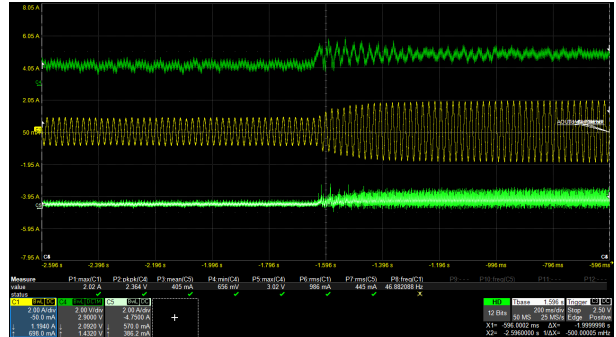


図 2-23. KD = 5、ATQ_D_THR = 30、負荷トルクを 0.3Nm から 0.57Nm に変更

2.4.5.3 ATQ_FRZ および ATQ_AVG 依存性

- ATQ_AVG の値が大きいと、急激なピーク負荷要求に対するループ応答時間が遅くなりますが、より高いトルク出力への唐突な動きがないスムーズな遷移が保証されます。
- ATQ_AVG の値が小さいことは、突然の負荷要求にループが即座に反応することを意味します。
- ATQ_FRZ に小さい値を使用すると、ピーク負荷の要求を満たすために、電流が急速に増加します。

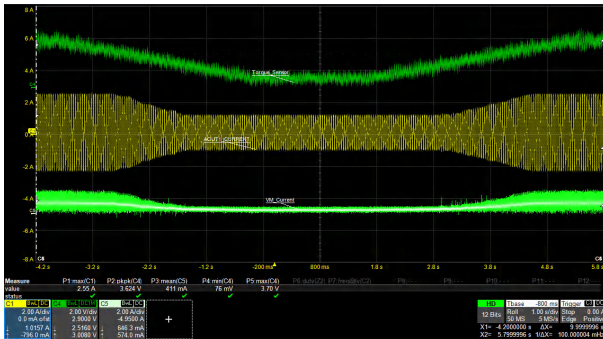


図 2-24. KP = 1、FRZ = 1、AVG = 1

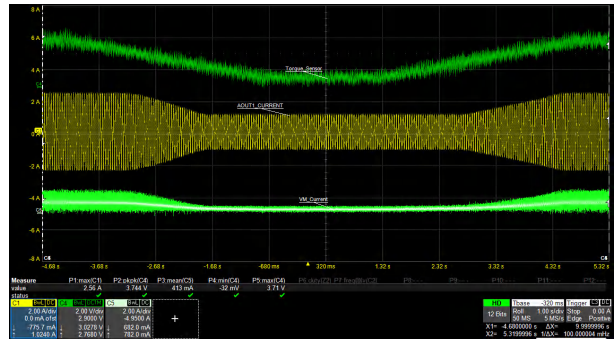


図 2-25. KP = 1、FRZ = 1、AVG = 8、遅い過渡に対して非常に安定しています。

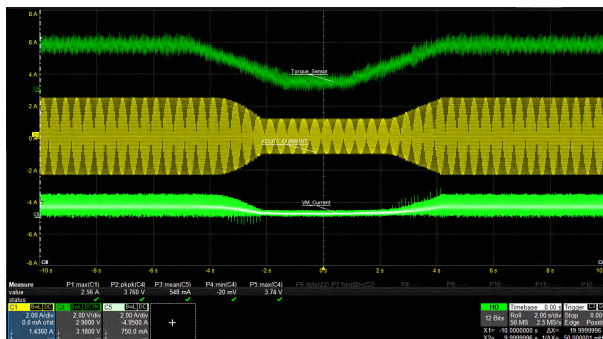


図 2-26. KP = 1、FRZ = 7、AVG = 8、遅い応答

2.4.5.4 ATQ_ERROR_TRUNCATE 依存性

ATQ_ERROR_TRUNCATE の値を大きくすると、電流波形の発振が減少します。

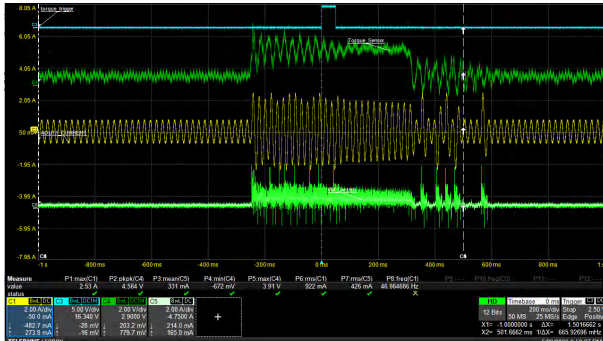


図 2-27. ATQ_ERROR_TRUNCATE = 0 (高速負荷過渡中、ループが安定化するのに長い時間を要しています。)

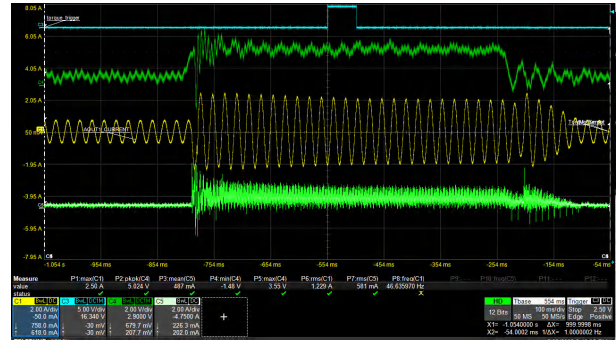


図 2-28. ATQ_ERROR_TRUNCATE = 2 (発振が小さくなっています。)

2.4.6 各種モーター速度での ATQ_CNT

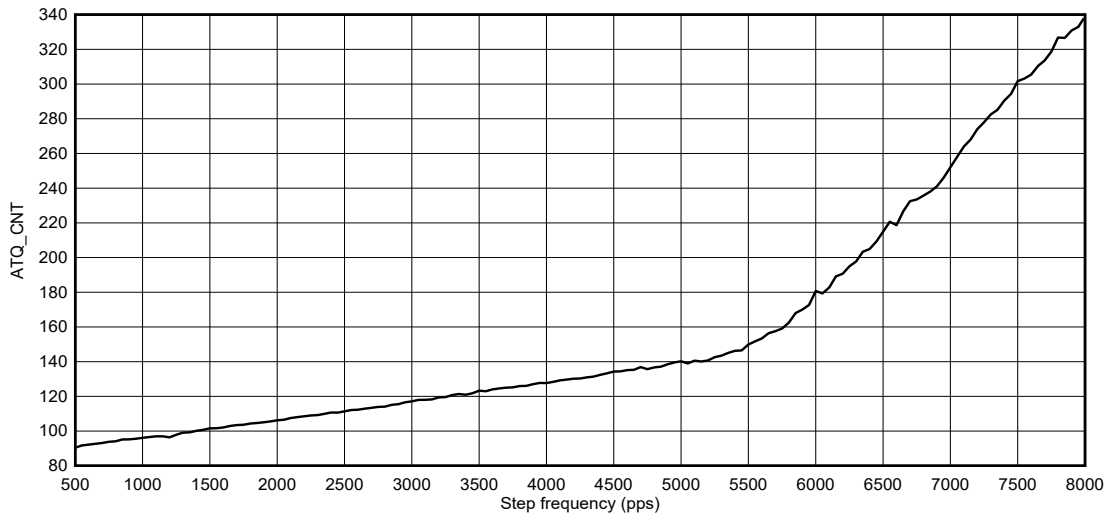


図 2-29. モーター速度の関数としての ATQ_CNT

図 2-29 に、モーター速度によって ATQ_CNT が変化する様子を示します。その他の動作条件はすべて同じです。明らかなように、ATQ_CNT と速度との関係のグラフには、異なる傾きを持つ 2 つの部分があります。

- 傾きが小さい部分は正弦波電流波形に対応します (図 2-30 と図 2-31 を参照)。
- 速度が上がリ、電流波形が三角波になり始めると (図 2-31 と図 2-33 を参照)、ATQ_CNT と速度との関係のグラフの傾きはより急になります。
- 与えられたモーター速度範囲に対して、ファームウェアは、図 2-29 などの曲線に基づいて、ATQ_LRN パラメータ、ATQ_UL、ATQ_LL を調整できます。
 - まず、モーター速度を変化させ、最大電流でこの曲線をプロットします。
 - 通常動作中に、任意の速度で、この曲線から補正係数を求め、それを ATQ_LRN パラメータ、ATQ_UL、ATQ_LL に適用します。

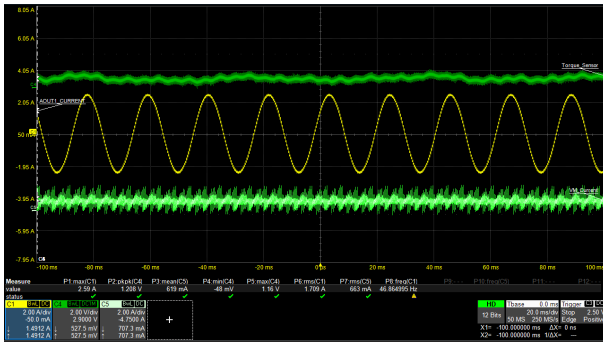


図 2-30. ステップ周波数 3000pps

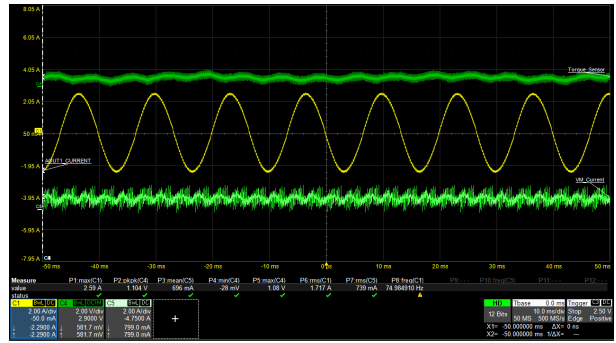


図 2-31. ステップ周波数 4800pps

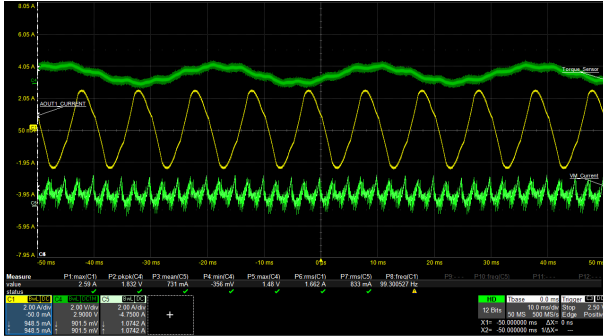


図 2-32. ステップ周波数 6400pps

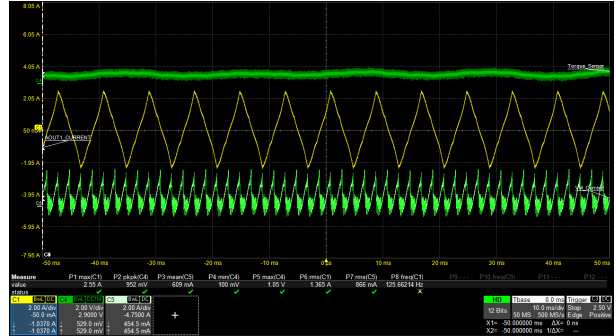


図 2-33. ステップ周波数 8000pps

2.4.7 各種電源電圧での ATQ_CNT

図 2-34 に、モーター電源電圧の関数としての ATQ_CNT の変化を示します。その他の動作条件はすべて同じです。

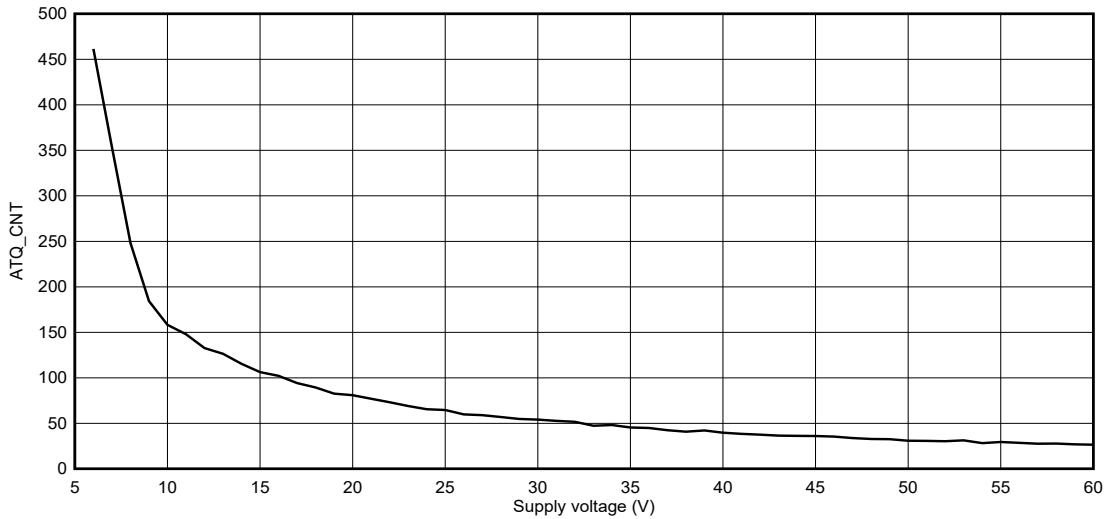


図 2-34. 電源電圧の関数としての ATQ_CNT

VM_SCALE ビットを「1b」に設定すると、自動トルク・アルゴリズムは電源電圧に応じて、ATQ_UL、ATQ_LL、および ATQ_LRN パラメータを自動的に調整します。

図 2-35 に、VM_SCALE ビットが「1b」に設定されている場合に、電源電圧に応じて ATQ_LRN パラメータが自動的に変化する様子を示します。

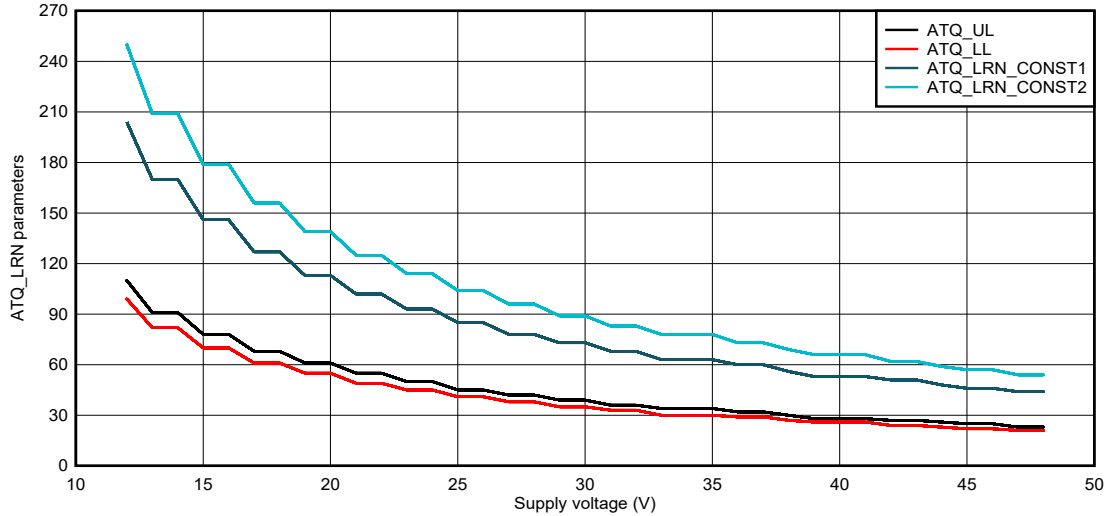


図 2-35. ATQ_LRN と VM との関係

2.4.8 モーター温度の推定

その他の動作条件をすべて一定に保った場合、ATQ_CNT 値の変化はモーターのケース温度の変化と相関があります。25Ω のコイル抵抗を持つステップ・モーターの例を以下に示します。この特性は、PCB とモーターの温度を監視するアプリケーションで利用できます。モーター温度の変化を経時的に監視することで、システムの堅牢性の向上と、モーターの予知保全が可能です。

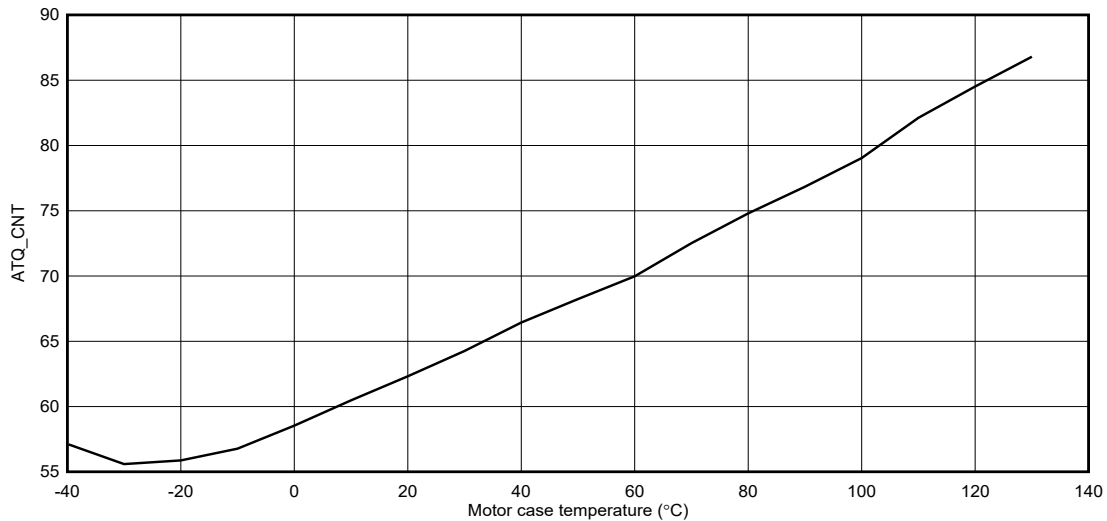


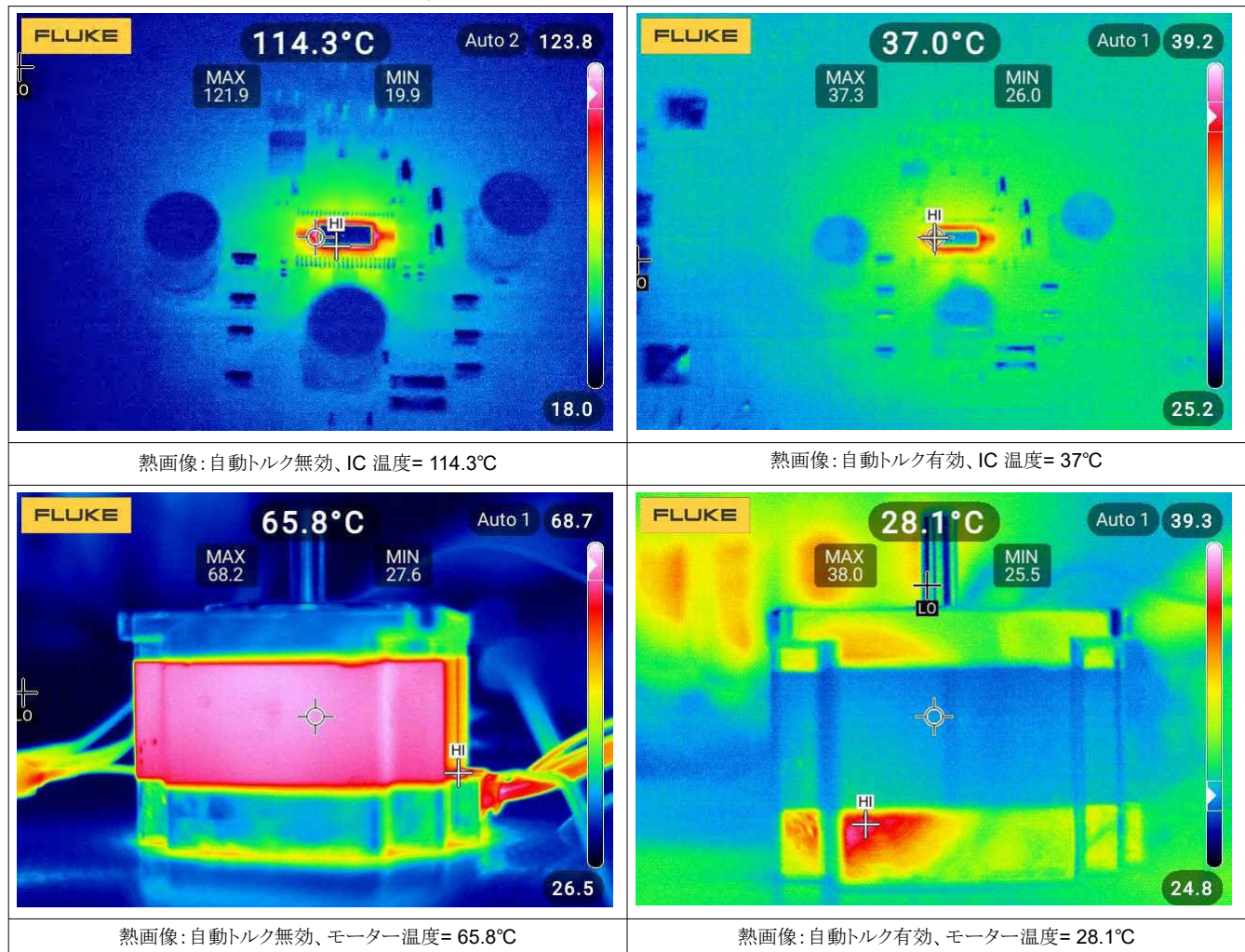
図 2-36. ATQ_CNT とモーター温度との関係

2.5 自動トルクによる効率向上

表 2-5 に、自動トルクによる熱性能の向上を示します。熱性能の画像は次の条件でキャプチャされています。

VM = 24V、1/16 マイクロステップ、4A フルスケール電流、3000pps の速度、無負荷、室温

表 2-5. 自動トルクによる熱性能の向上



自動トルクによって IC とモーターの温度が低下することにより、ステッパ・モーター・システムの長期的な信頼性が向上します。

3 ケース・スタディ

このセクションでは、自動トルクが消費電力の大幅な節減をもたらす具体例について説明します。

3.1 アプリケーション 1: 現金自動預払機 (ATM)

ステップ・モーターは、現金ディスペンサー、紙幣ピッカー、現金輸送ベルトなどの各種サブシステムのために ATM 内で使用されています。1 台の ATM に 15 個以上のステップ・モーターが内蔵されることもあります。

現金を分配していないときなど、負荷トルクがピーク負荷より小さいときは常に電力損失を低減できるため、自動トルクは ATM システムに有効な機能です。平均すると、一定の時間の間に ATM が使われている時間の割合は 10~15% に過ぎません。そのため、自動トルク機能を使うと ATM の消費電力を大幅に低減できます。電気代を低減することで消費者のコストを節約するため、エネルギー効率の優れた「グリーン」ATM の導入が業界全体で進められています。自動トルク機能は、メーカーがこれらの省電力目標を達成するのに役立ちます。

3.1.1 ATM モーターの動作条件

このセクションでは、ATM で使用される代表的なステップ・モーターの動作条件について説明します。

| パラメータ | 値 |
|---------------------|---------|
| モーター電流定格 | 2.8A |
| モーター・コイルの抵抗 (20°C時) | 1.5Ω |
| モーター・コイルのインダクタンス | 6.8mH |
| 保持トルク | 3.1Nm |
| モーター・フレーム・サイズ | NEMA 24 |
| モーター電源電圧 | 24V |
| マイクロステップ | 16 |
| ステップ周波数 | 3kHz |

3.1.2 自動トルク機能付き ATM モーター

測定データによると、現金輸送ベルトで使用される代表的なステップ・モーターでは、40ms ごとに約 300mNm の頻度で負荷トルクの変化が生じます。

ラボでは、このようなステップ・モーターの 1 つに、300mNm/40ms の頻度で 176mNm と 1.46Nm の負荷トルク過渡を加えました。ピーク負荷のオン時間は 500ms、ピーク負荷イベントの間隔は 4.5s でした。これは、デューティ・サイクル 10% のピーク負荷に対応します。

このモーターでは、自動トルク学習ルーチンは、次のパラメータ値を使用して、無負荷で実行されました。

- ATQ_LRN_MIN_CURRENT = 00110b
- ATQ_LRN_STEP = 11b
- ATQ_LRN_CYCLE_SELECT = 11b

図 3-1 に、このモーターの学習ルーチンのスナップショットを示します。

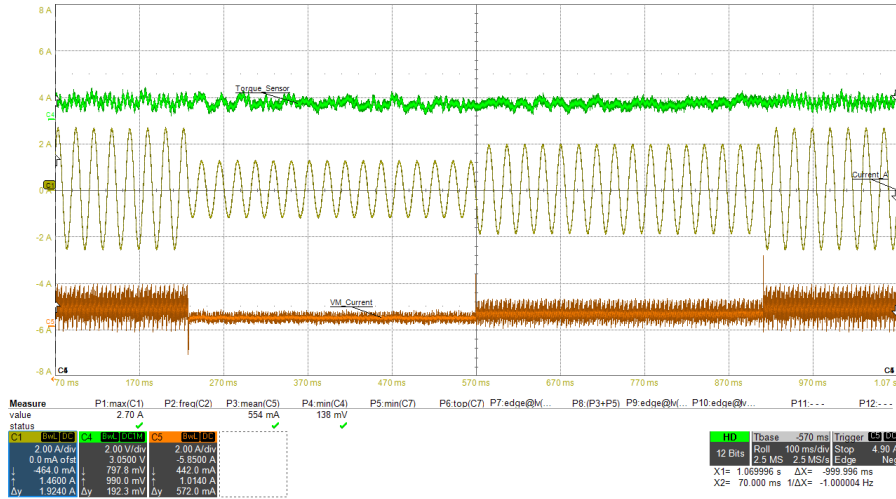


図 3-1. ATM モーターの学習ルーチンのスナップショット

ATQ_LRN パラメータの結果の値は次のとおりです。

- ATQ_LRN_CONST1 = 83
- ATQ_LRN_CONST2 = 120

電流制御と PD ループ制御のパラメータは、次のように選択しました。

- ATQ_TRQ_MAX = 120
- ATQ_TRQ_MIN = 35 (現金が輸送されていないときにモーターに供給する必要がある電流に対応)
- ATQ_UL = 45
- ATQ_LL = 43
- ATQ_LL = 43
- ATQ_FRZ = 1
- ATQ_AVG = 0

図 3-2～図 3-5 に、負荷トルクが変化した場合の出力電流と電源電流の波形 (自動トルクあり / なし) を示します。

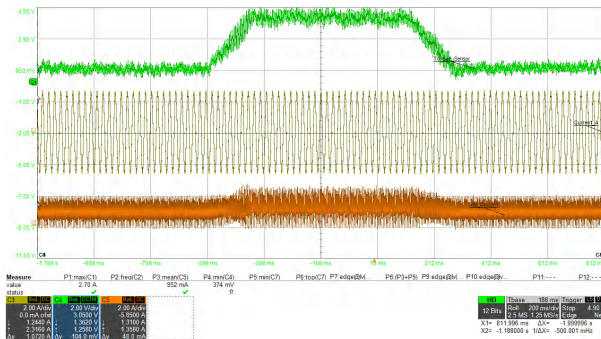


図 3-2. 負荷がある状態とない状態の ATM モーターの動作、自動トルクなし

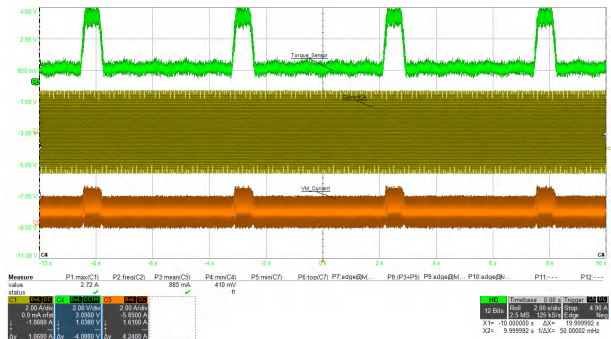


図 3-3. 負荷がある状態とない状態の ATM モーターの動作、自動トルクなし

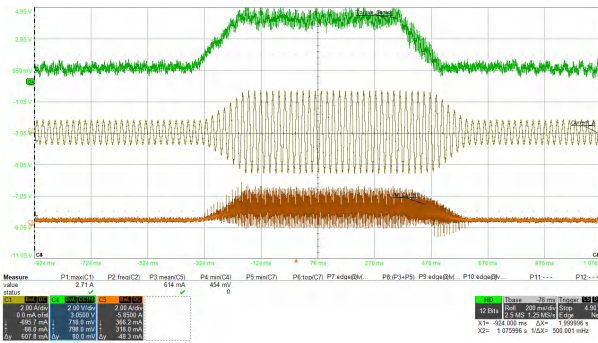


図 3-4. 負荷がある状態とない状態の ATM モーターの動作、自動トルクあり

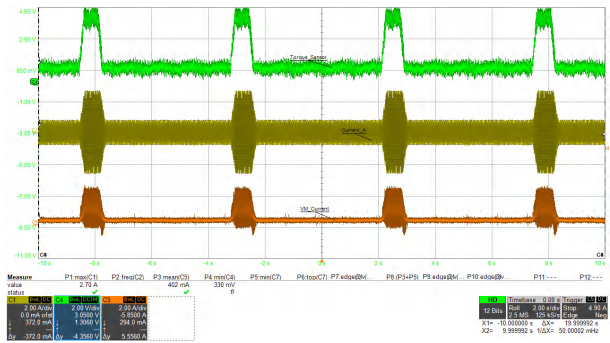


図 3-5. 負荷がある状態とない状態の ATM モーターの動作、自動トルクあり

これらの波形に示すように、自動トルクありの消費電流はかなり小さいです。ラボでの測定に基づく値を以下に示します。

- 自動トルクなしでの消費電力 = $24V \times 885mA = 21.24W$
- 自動トルクありでの消費電力 = $24V \times 402mA = 9.65W$
- これは、指定された負荷プロファイルでこのモーターの消費電力が 55% 節約されることを示しています。

モーター内の電力損失を以下に示します。

- 自動トルクなしでのモーターの電力損失 = $(2.8A \times 2.8A \times 1.5\Omega) = 11.76W$
- 自動トルクありでのモーターの電力損失 = $(0.1 \times 2.8A \times 2.8A + 0.9 \times 0.85A \times 0.85A) \times 1.5\Omega = 2.15W$
- これは、モーター・コイルの発熱が 82% 低減されることに相当し、寿命の延長と長期的な信頼性の向上につながります。

3.2 アプリケーション 2: 繊維機械

世界中のすべての主要な繊維機械メーカーは、エネルギー効率の優れた繊維機械を市場に投入してきました。自動トルクなどの新しい技術は、繊維機械の電力料金をさらに低減するのに役立ちます。

繊維編み機のローラー・モーターには、一般に高出力ステップ・モーターが使われています。巻き取り機では、吸引モーターとして高出力ステップが使われています。熱管理は、すべての繊維機械で重要な課題であり、自動トルク機能は、繊維機械の寿命全体を通じて温度変動を緩和することで、部品の寿命を延ばし、長期的信頼性を向上させます。

3.2.1 繊維機械モーターの動作条件

このセクションでは、繊維機械で使用されるステップ・モーターの動作条件について説明します。

| パラメータ | 値 |
|---------------------|---------|
| モーター電流定格 | 9A |
| モーター・コイルの抵抗 (20°C時) | 0.15Ω |
| モーター・コイルのインダクタンス | 0.6mH |
| 保持トルク | 3Nm |
| モーター・フレーム・サイズ | NEMA 24 |
| モーター電源電圧 | 24V |
| マイクロステップ | 16 |
| ステップ周波数 | 3kHz |

3.2.2 自動トルク機能付き繊維機械モーター

このアプリケーションでは、ステッパ・モーターに 1.5Nm/15ms の高い頻度で 50mNm～1.5Nm の負荷トルク過渡を加えました。ピーク負荷のオン時間は約 1s、ピーク負荷イベントの間隔は 4s でした。これは、デューティ・サイクル 20% のピーク負荷に対応します。

図 3-6 に、このモーターの学習ルーチンのスナップショットを示します。

自動トルク学習ルーチンは、次のパラメータ値を使用して、無負荷で実行されました。

- ATQ_LRN_MIN_CURRENT = 1011000b
- ATQ_LRN_STEP = 00b

ATQ_LRN パラメータの値は次のとおりです。

- ATQ_LRN_CONST1 = 43
- ATQ_LRN_CONST2 = 99

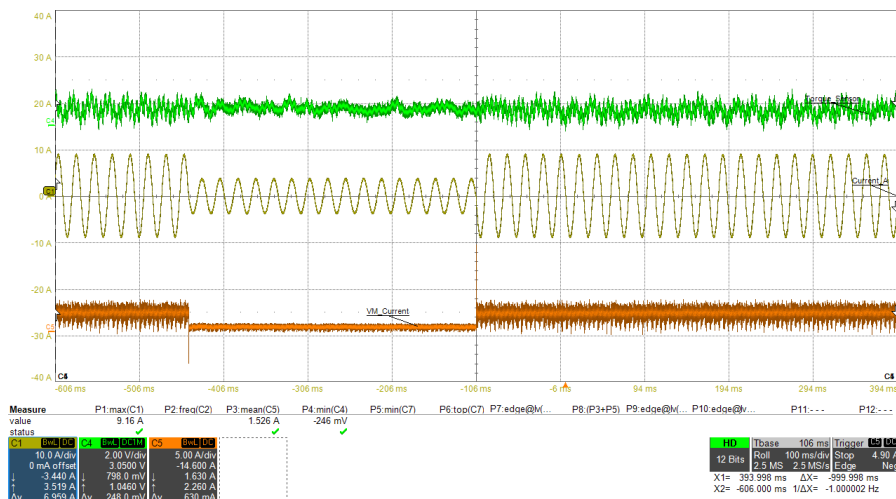


図 3-6. 繊維機械モーターの学習ルーチンのスナップショット

電流制御と PD ループ制御のパラメータは、次のように選択しました。

- ATQ_TRQ_MAX = 216
- ATQ_TRQ_MIN = 80
- ATQ_UL = 13
- ATQ_LL = 12
- KP = 1
- KD = 15
- ATQ_D_THR = 7
- ATQ_ERROR_TRUNCATE = 0
- ATQ_FRZ = 1
- ATQ_AVG = 0

図 3-7～図 3-10 に、負荷トルクが変化した際の実出力電流と電源電流の波形 (自動トルクあり / なし) を示します。予想どおり、自動トルクありの消費電流はかなり低減されています。

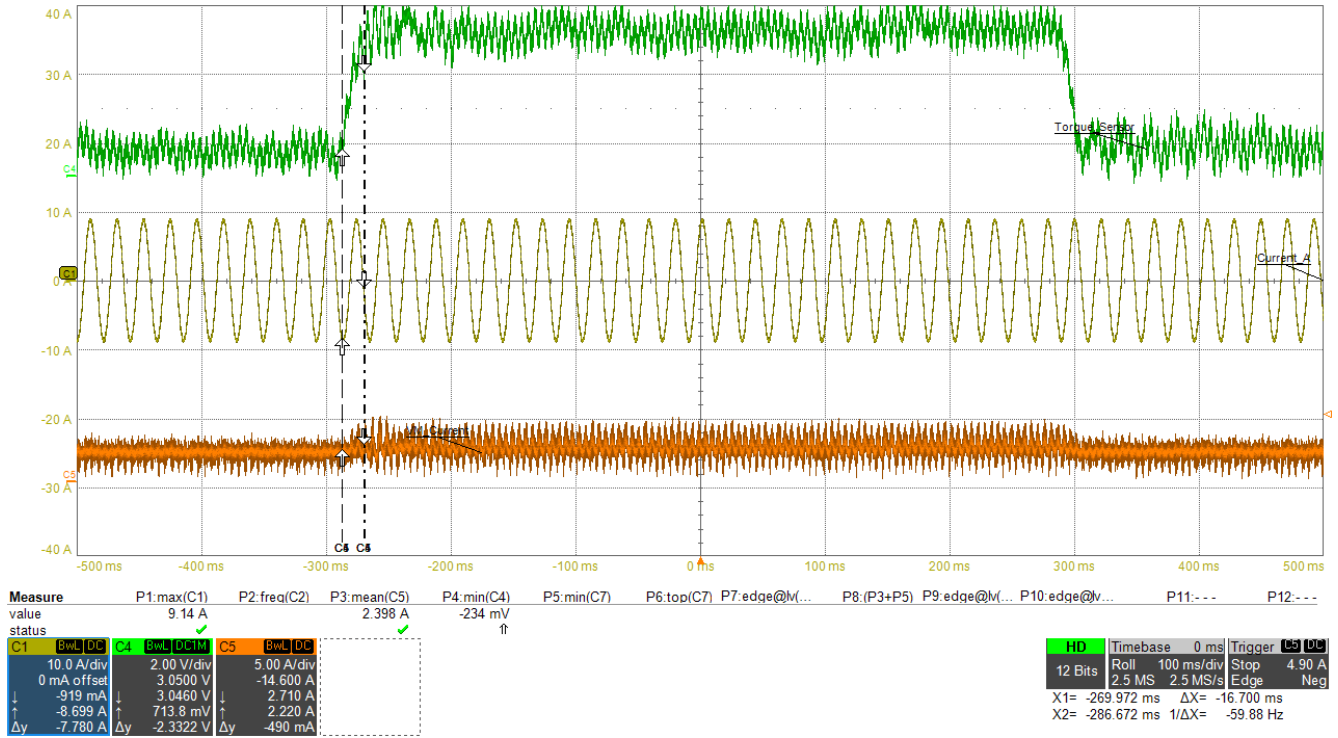


図 3-7. 負荷がある状態とない状態の繊維機械モーターの動作、自動トルクなし

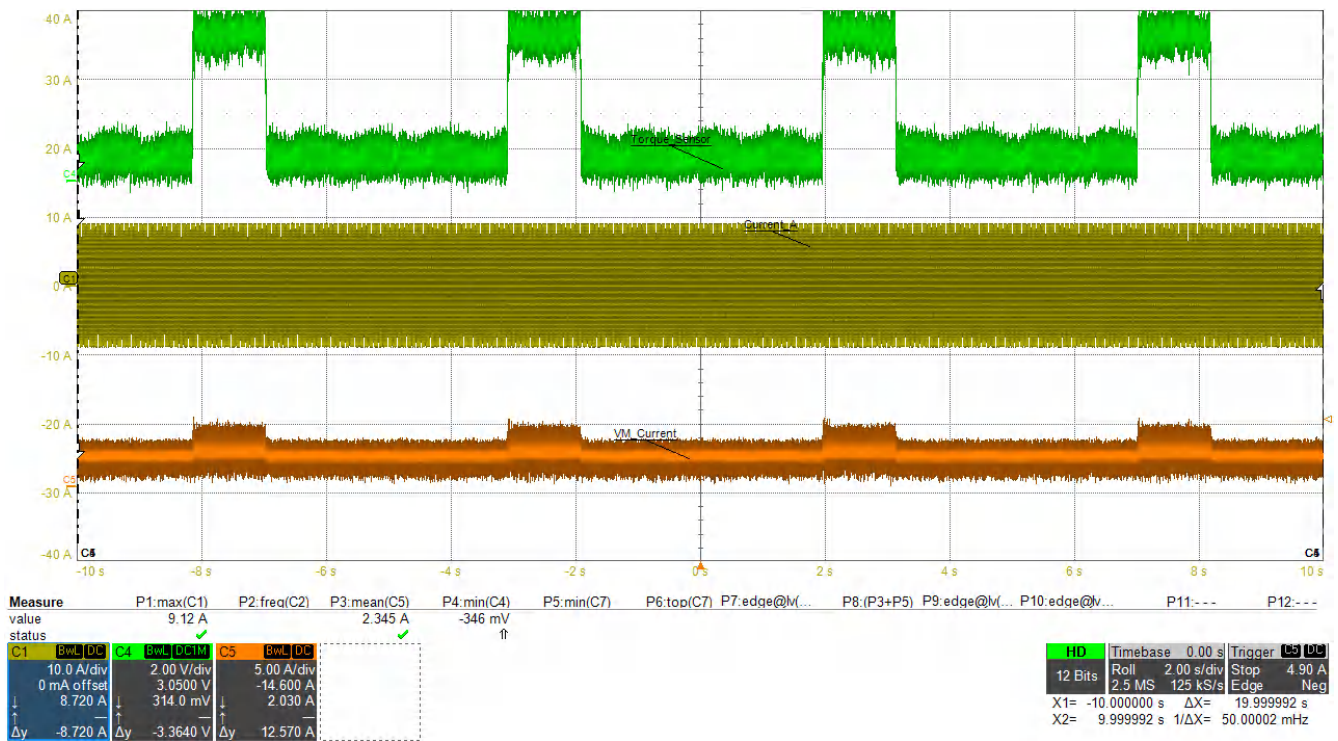


図 3-8. 負荷がある状態とない状態の繊維機械モーターの動作、自動トルクなし

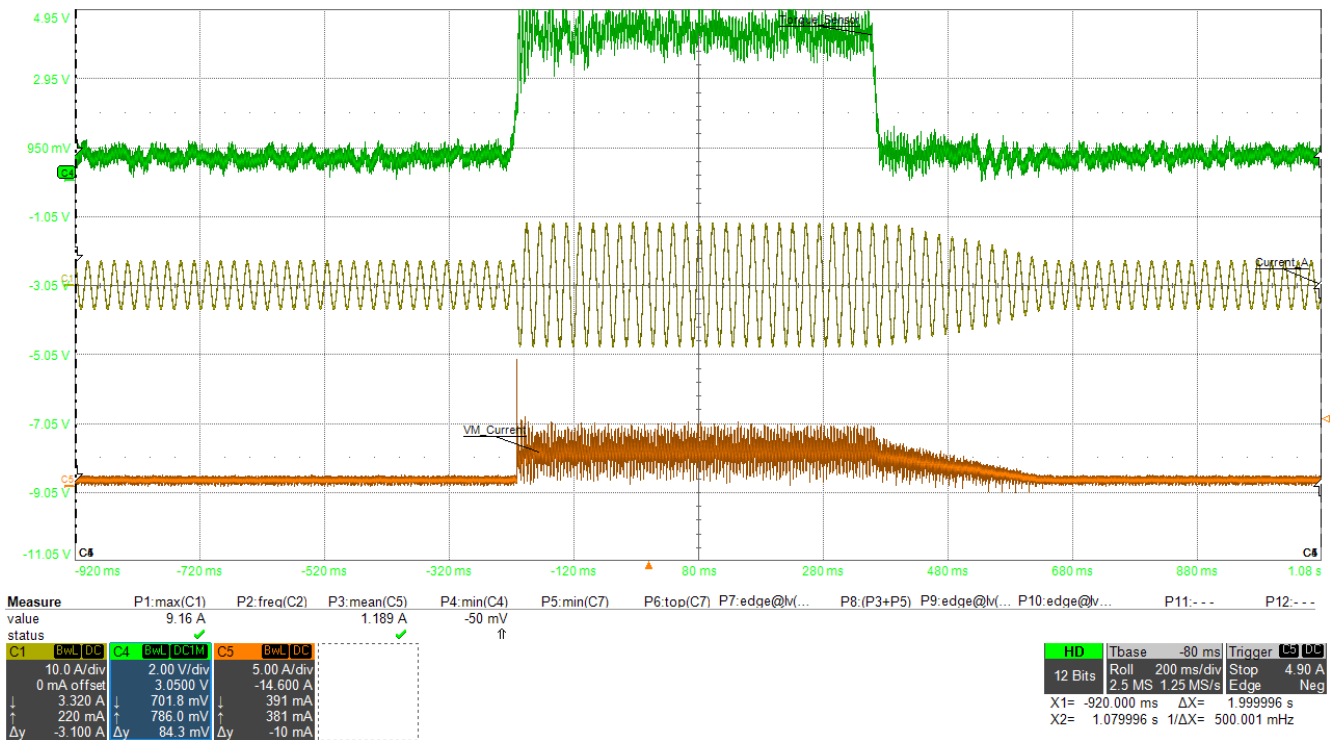


図 3-9. 負荷がある状態とない状態の繊維機械モーターの動作、自動トルクあり

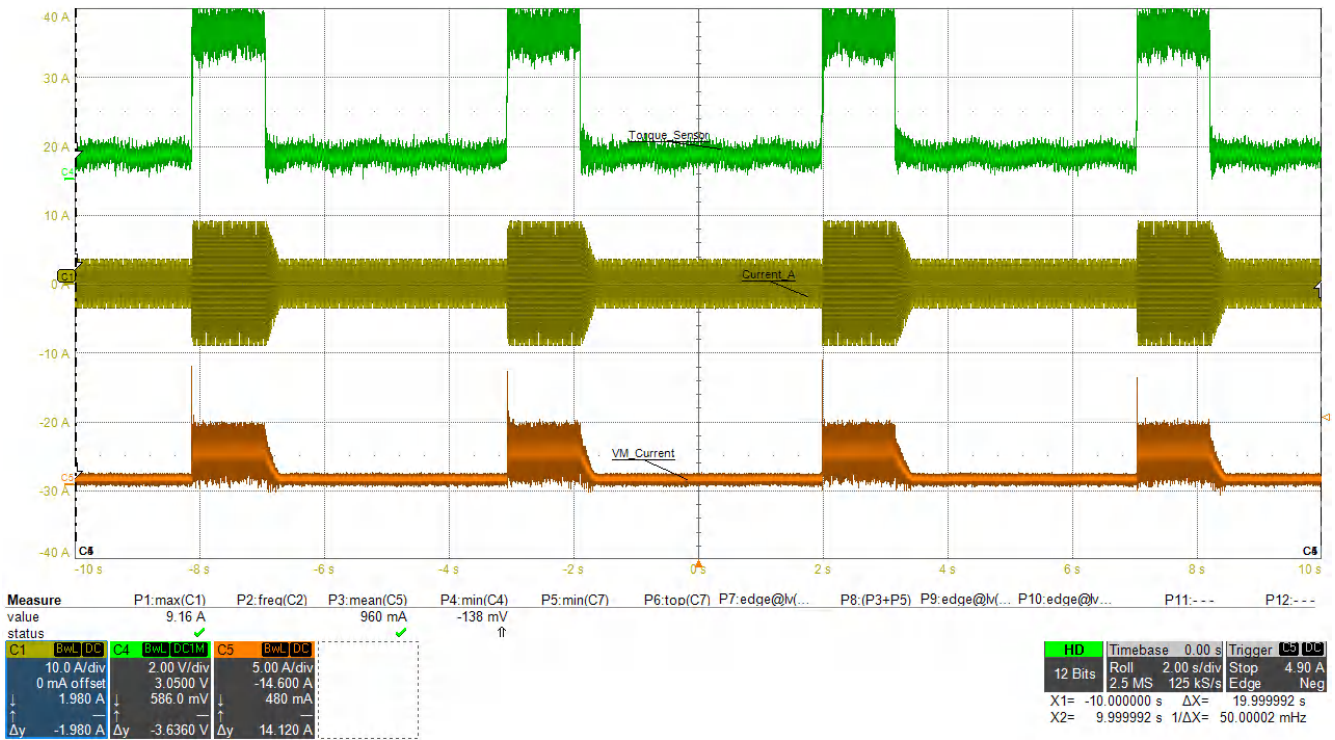


図 3-10. 負荷がある状態とない状態の繊維機械モーターの動作、自動トルクあり

ラボでの測定に基づく値を以下に示します。

- 自動トルクなしでの消費電力 = $24V \times 2.345A = 56.28W$
- 自動トルクありでの消費電力 = $24V \times 960mA = 23.04W$
- これは、消費電力が **55%** 節約されることを示しています。
- 自動トルクなしでのモーターの電力損失 = $(9A \times 9A \times 0.15\Omega) = 12.15W$
- 自動トルクありでのモーターの電力損失 = $(0.2 \times 9A \times 9A + 0.8 \times 3.6A \times 3.6A) \times 0.15\Omega = 4W$
- これは、モーター・コイルの発熱が **67%** 低減されることに相当します。

3.3 アプリケーション 3: プリンタ

代表的な家庭用インクジェット・プリンタは、スタンバイ時に約 **4W**、印刷時に約 **40W** を消費します。大型オフィス・プリンタは、家庭用インクジェット・プリンタの約 **10 倍** の電力を消費します。この電力損失の約 **50%** が、電子部品に起因すると推定されます。モデルの複雑さに応じて、1 台のプリンタには **2~15 個** のステップ・モーターが内蔵されています。自動トルク機能を使うと、プリンタがスタンバイ状態でないときの電力損失とエネルギー消費を大幅に低減できます。これは、プリンタが用紙を印刷していないときは常にコイル電流を減らすことで達成されます。

すべての主要なイメージング機器メーカーの製品は **ENERGY STAR** 規格に準拠しています。環境に配慮したグリーン・プリンタは、次第に市場で標準的になってきました。他のモデルに比べて消費電力が **60%** 少ないプリンタが、安価な製品であるにもかかわらず、市場で最もよく売れたという例があります。

3.3.1 自動トルク付きプリンタ・モーター

このアプリケーションでは、代表的なプリンタの条件を再現するため、プリンタで使用される **1.5A** 定格のステップ・モーターに負荷トルク過渡を加えると同時に、モーター速度を変化させました。

図 3-11 と図 3-12 に、自動トルクありとなしの条件での、出力電流と電源電流の波形を示します。

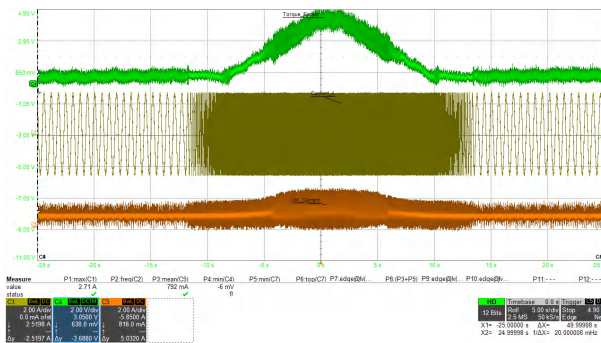


図 3-11. 負荷がある状態とない状態のプリンタ・モーターの動作、自動トルクなし

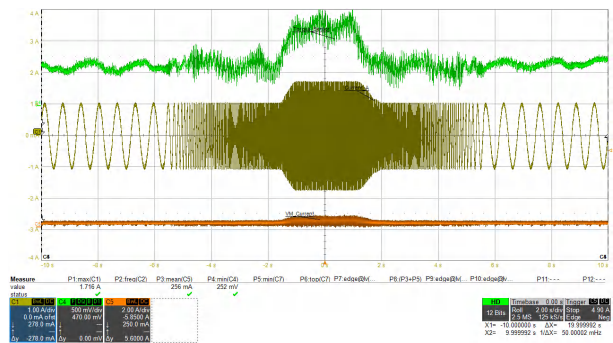


図 3-12. 負荷がある状態とない状態のプリンタ・モーターの動作、自動トルクあり

4 まとめ

テキサス・インスツルメンツの [DRV8462](#)、[DRV8452](#)、[DRV8461](#) モーター・ドライバの最先端の自動トルク・アルゴリズムは、モーターのステップ損失を防止すると同時に、ステップ・モーター・システムの電力損失を大幅に低減します。このアルゴリズムは、個々のアプリケーションの要求に合わせて詳細に設定できます。自動トルク機能は、ステップ・モーターとモーター・ドライバの電力損失を小さくすることで、機器メーカーの電力損失低減目標の達成と **ENERGY STAR** 認定の取得に貢献します。

5 関連資料

- テキサス・インスツルメンツ:『[DRV8462: 65V、5~10A ステップ・モーター・ドライバ、高効率およびノイズレス動作用](#)』データシート
- テキサス・インスツルメンツ:『[DRV8452: 50V、5A ステップ・モーター・ドライバ、高効率およびノイズレス動作用](#)』データシート
- テキサス・インスツルメンツ:『[DRV8461: 65V、3A ステップ・モーター・ドライバ、高効率およびノイズレス動作用](#)』データシート

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated