

Application Note

3 相システム向けの TMCS2100-Q1 電流センサを使用したエンド オブライン キャリブレーション



Levi DeVries, Current Sensing Applications

概要

TMCS2100-Q1 は、3 相システムの電流によって生じる合成磁界を測定する周囲磁界センサです。デバイスに対して、特性評価時に特定のバスバー形状に調整された値をユーザーが事前にプログラムします。最終組み立て時の製造許容誤差により、バスバーに対するセンサの位置がずれることがあり、センサ出力に振幅誤差が生じる可能性があります。この誤差は、製造ラインで対処可能です。このアプリケーション ノートでは、製造フローにおいてユニットごとの誤差を測定するためのエンドオブライン (EOL) キャリブレーション手順および、ゲイン 2 と周波数補償レジスタの値を調整し、こうしたユニットごとの誤差を補正する方法について説明します。

目次

1 はじめに.....	2
2 誤差測定.....	3
2.1 概要.....	3
2.2 平衡 3 相キャリブレーション.....	3
2.3 クロストーク マトリクス キャリブレーション.....	5
2.4 ペア相インジェクション キャリブレーション.....	9
2.5 方法の比較.....	11
3 感度調整手順.....	12
3.1 計算方法.....	12
3.2 計算例.....	12
3.3 周波数補償値の調整.....	12
3.4 GUI カリキュレータ.....	13
4 トラブルシューティング.....	16
5 まとめ.....	17
6 参考資料.....	18

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

TMCS2100-Q1 は、絶縁バスバー電流測定用に設計された周囲磁界センサです。車載用 3 相インバータでは、各相のバスバー付近に 1 組のセンサ ペアが取り付けられます。センサは、対象のバスバーからの磁場だけでなく、すべての周囲磁場に敏感であるため、各センサは、隣接する 2 つのバスバーによって生成される磁場の一部も拾ってしまいます。この隣接するバスバーによる寄与は、クロストークと呼ばれます。

インバータがエンドオブライン (EOL) テストに達する前に、リファレンス機械的アセンブリから導出された特性評価済みゲイン値 (ゲイン 1、ゲイン 2、極性レジスタ値) で各 TMCS2100-Q1 デバイスはすでにプログラムされています。これらの値は、全周波数帯域でのクロストーク、位相、振幅の誤差を最小限に抑えるため、意図したバスバーの形状に合わせて調整されます。しかし、センサの配置、バスバー位置、センサ ゲインのわずかな変動など、製造許容誤差により、実際の磁気結合は特性評価された基準ユニットとはわずかに異なります。その結果、振幅誤差が発生します。3 相動作時のセンサ出力は、望ましい値よりもわずかに高いか低い場合があります。

EOL キャリブレーションは各ユニットでこの誤差を測定し、デバイスのゲイン 2 レジスタをトリミングすることで誤差を補正します。目標は、単一のバスバー応答ではなく、合成磁界出力 (3 相すべてに電流が流れているときにセンサが検出する信号) の振幅誤差を最小限に抑えることです。これは、信号チェーンにまだ存在するクロストークを含めて、システムの真の動作条件を反映しています。

本ドキュメントでは、DC オフセットのキャリブレーションについては説明しません。DC キャリブレーションはセンサ レベルでは対応できず、システム設計またはデジタル キャリブレーションで対応する必要があります。

2 誤差測定

2.1 概要

ここでは、アプリケーションで予測されるセンサの全誤差を測定するための、3つの異なるアプローチを示します (図 2-1)。最初の方法は「[平衡 3 相キャリブレーション](#)」セクションで説明しており、入力電流波形を複製して基準に対する誤差に計算することにより、通常動作条件でセンサを直接テストします。「[クロストーク マトリクス キャリブレーション](#)」セクションにある 2 番目の方法では、クロストーク マトリクスを使用して各成分の信号を線形結合することで、動作中に見られる合成信号を計算します。「[ペア相インジェクション キャリブレーション](#)」セクションに概要を示す 3 番目の方法では、3 相システムの方のレグを通して別のレグに戻す電流信号を測定して合成信号を計算します。これらの測定値に基づいて合成信号を計算できます。3 つの方法の比較概要については、「[方法の比較](#)」セクションを参照してください。

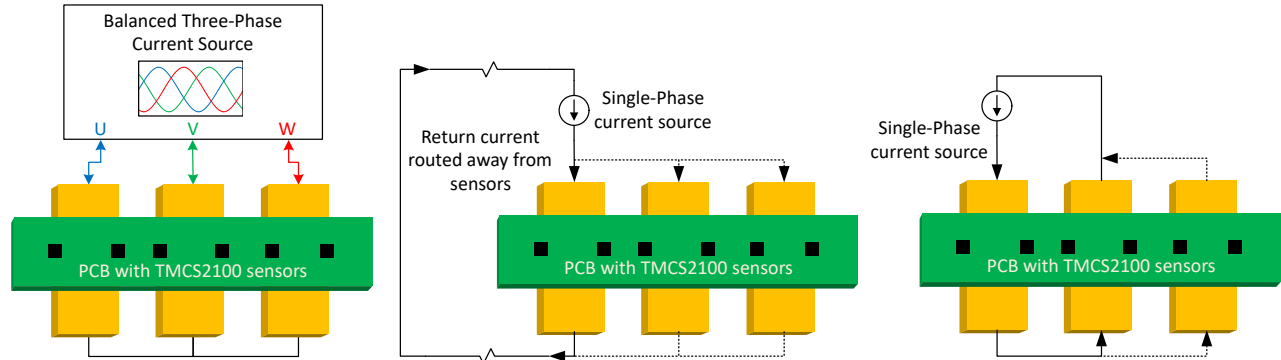


図 2-1. さまざまな誤差測定方法の概要

2.1.1 測定精度

キャリブレーション時に使用する測定精度により、キャリブレーションの精度が制限されるため、入力電流とデバイス出力の両方の測定時には、適切な測定手法を使用する必要があります。測定精度の詳細については、このドキュメントでは説明しませんが、関連するベスト プラクティスの一部をここに示します。

2.1.1.1 オフセット キャンセル

ゲイン キャリブレーションによってオフセット誤差が誤って補正され、ゲイン誤差が大きくなることを防止するため、測定時にセンサ オフセットをキャンセルする必要があります。オフセットを測定して値を保存し、後でその値を測定したキャリブレーション値から減算することで、オフセットをデジタル的にキャンセルできます。または、ピーク ツー ピーク信号を測定したり、フーリエ変換を適用して入力信号周波数の振幅を調べるなど、本質的にオフセットを除去する方法で測定を行うこともできます。

2.1.1.2 信号の大きさ

ノイズおよび残留オフセットの影響を克服できる十分な大きさの信号を TMCS2100-Q1 に入力するため、TI では、デバイス出力のフルスケール レンジ (FSR) の 10% 以上であるキャリブレーション信号を使用することを推奨します。電流が大きいほど、精度が高くなります。さらに、動作中に低いフルスケール レンジを使用する設計では、信号対雑音比を改善するために、より大きな電流を供給する必要がある場合があります。

2.2 平衡 3 相キャリブレーション

この方法では、テスト対象のバスバー システムに平衡 (ゼロサム) 3 相正弦波電流を印加し、その条件 (図 2-2) で TMCS2100-Q1 の振幅誤差を直接測定します。測定中、センサは想定されている動作環境と全く同じ条件に置かれるため、その結果は補正すべき誤差を直接示します。この方法は、3 相電流源が利用可能であり、テスト時間を最小限に抑える必要のある生産ステーションで実用的です。

TMCS2100-Q1 の周波数補償は、全周波数帯域の振幅応答をフラットにするように機能するため、理論上、入力電流の周波数が動作範囲内のどの周波数であっても、キャリブレーションの有効性に影響を与えることはありません。ただし、機

械的変動は全周波数帯域の振幅に二次的な影響を与える可能性があるため、動作範囲の中心で誤差を測定することを TI は推奨します。

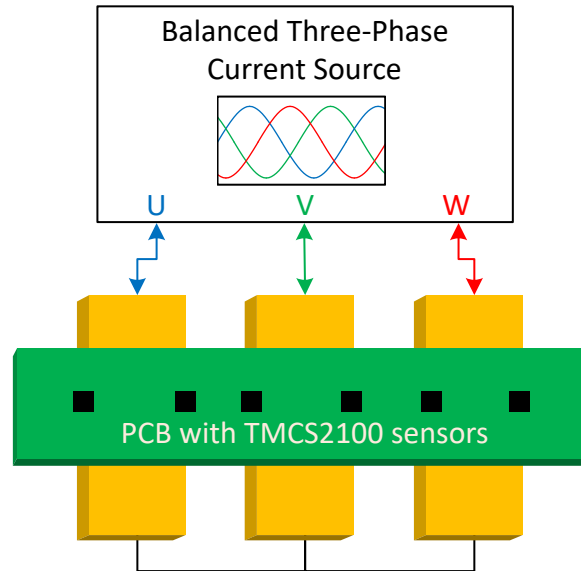


図 2-2. 平衡 3 相電流の接続図

2.2.1 装置要件

注

EOL でインバータ駆動ハードウェアを利用、制御できる場合、インバータを 3 相電流源として使用できるため、外部励起機器が不要になります。

項目	要件
3 相電流源	適切な負荷への接続時に平衡な正弦波出力を生成
平衡負荷	電流源の電力入力にマッチングした 3 相抵抗性負荷または RL 負荷。または、同期した電子負荷
リファレンス電流センサ	相ごとに 1 つ、精度 $\leq 0.1\%$
TMCS2100-Q1 プログラミング インターフェイス	すべての TMCS2100-Q1 デバイスへの I ² C アクセス

2.2.2 テスト構成

1. 平衡負荷経路で、3 相電源をインバータのバスバー システムに接続します。
2. 各相の導体を測定するリファレンス電流センサを 1 つずつ、TMCS2100-Q1 センサから離して、配置します。
3. TMCS2100-Q1 プログラミング インターフェイスを接続し、周波数補償値を含む初期レジスタ値をすべてのセンサにプログラムします。
4. 電源パラメータを設定します。

パラメータ	値
位相	電流の位相角は、同じ相の転流順序を使用して、最終アプリケーションの位相角と一致させる必要があります
周波数	公称動作範囲の中心
振幅	最小値は FSR の 10%

2.2.3 校正手順

1. 振幅データの取得: 公称テスト電流で平衡 3 相励起が有効になっている状態で、TMCS2100-Q1 の差動出力とリファレンス電流センサから同時にデータをキャプチャします。

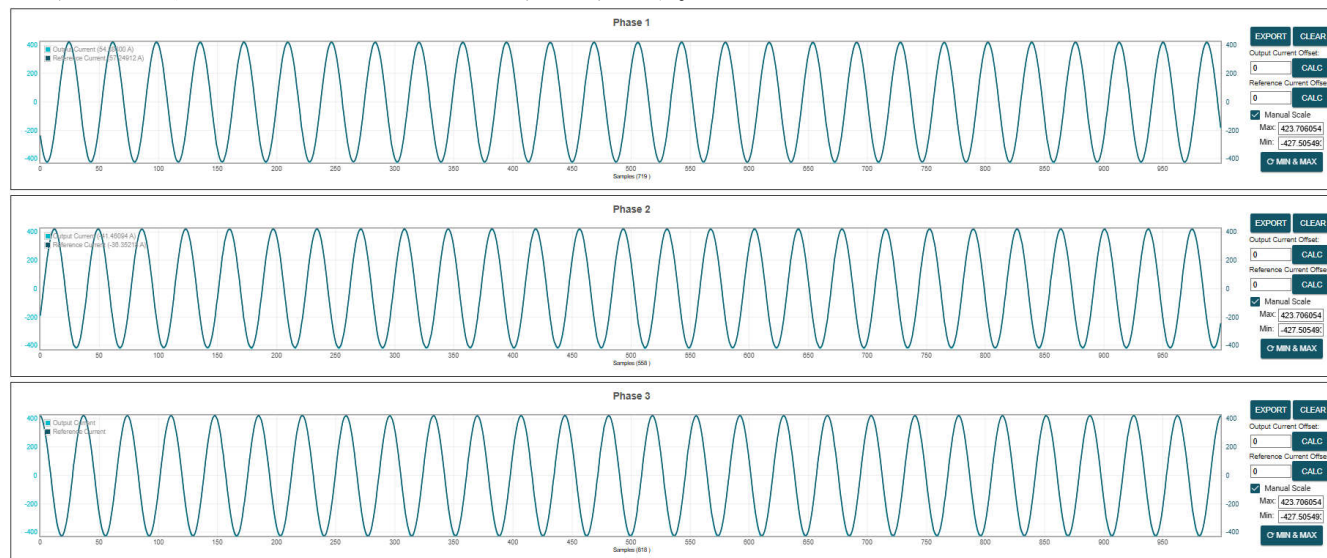


図 2-3. TMCS2100 特性評価ボード GUI を使用した 3 相データ キャプチャ

2. 予測される出力を計算し、振幅誤差を計算します。

$$V_{\text{expected}} = I_{\text{ref}} \times S_{\text{ideal}} \quad (1)$$

ここで、 S_{ideal} は特性評価時に確立された特性評価済み感度、または公称感度 (V/A) です。

$$\text{Error}(\%) = \frac{V_{\text{measured}} - V_{\text{expected}}}{V_{\text{expected}}} \times 100 \quad (2)$$

正の値は感度が公称値より高いことを示し、負の値は感度が公称値より低いことを示します。

3. ゲイン補正を適用します。
 - a. セクション 3.1 を使用して、一次および二次センサの C_{new} を計算します。
 - b. セクション 3.3 を使用して、両方のセンサの更新された周波数補償コードを計算します。
 - c. TMCS2100-Q1 センサを新しいデバイス値でプログラムします。

2.3 クロストーク マトリクス キャリブレーション

この方法では、一度に 1 つの相に通電し、3 つの TMCS2100-Q1 センサの応答 (I) をすべて測定することで、各バスバーの特性を個別に評価します。測定した 9 つの感度からクロストーク マトリクスが形成され、このマトリクスから、平衡 3 相動作での振幅誤差が数学的に計算されます。このとき、3 相すべてに同時に印加することはありません。この方法は、単相 DC 電流源のみが使用可能な生産ステーションで実用的であり、3 相信号を同時に印加する方法では得られない、相ごとの詳細な診断情報も得られます。また、この方法で生成されるクロストーク マトリクスは、アプリケーション ファームウェアで実行時に残留クロストークを除去するために使用でき、ゲイン 2 キャリブレーションのみよりも高い精度を実現できます (セクション 2.3.5 を参照)。

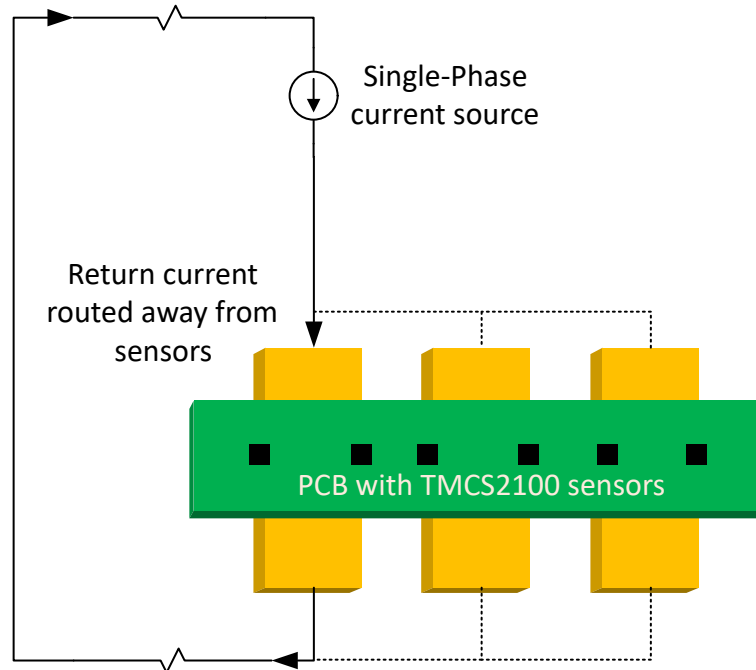


図 2-4. クロストーク マトリクス抽出用の単相接続図

2.3.1 理論的基礎

このセクションでは、単相感度の測定値と合成磁界振幅誤差との数学的関係を確立し、誤差計算の基礎としています。

2.3.1.1 クロストーク モデル

各センサ出力は、3 相の磁界の線形重ね合わせです。

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AA} & S_{AB} & S_{AC} \\ S_{BA} & S_{BB} & S_{BC} \\ S_{CA} & S_{CB} & S_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

マトリクスの各要素 S_{XY} は、V/A 単位で表される測定された感度で、次のように定義されます。

$$S_{XY} = \frac{V_X}{I_Y} \quad (4)$$

つまり、バスバー Y のみに電流を流したときのセンサ X の出力とバスバー Y の電流との比です。対角要素 S_{AA} 、 S_{BB} 、 S_{CC} は直接感度で、非対角要素はクロストーク感度を表します。非対角要素は、形状に応じて正または負になることがあります。

2.3.1.2 単相励起によるマトリクスの作成

一度に 1 つのバスバーに通電し、3 つのセンサ応答をすべて測定すると、テストごとに [S] の 1 列が得られます。

表 2-1.

通電相	測定	算出される感度
A のみ	V_A, V_B, V_C (電流 時) I_A	$S_{AA} = V_A / I_A$ $S_{BA} = V_B / I_A$ $S_{CA} = V_C / I_A$

表 2-1. (続き)

通電相	測定	算出される感度
B のみ	V_A, V_B, V_C (電流 時) I_B	$S_{AB} = V_A / I_B$ $S_{BB} = V_B / I_B$ $S_{CB} = V_C / I_B$
C のみ	V_A, V_B, V_C (電流 時) I_C	$S_{AC} = V_A / I_C$ $S_{BC} = V_B / I_C$ $S_{CC} = V_C / I_C$

2.3.1.3 平衡動作時の合成磁界振幅

振幅 I_0 の平衡 3 相電流については、各センサの合成磁界感度は、測定した各成分の感度から次のように計算されます。

A 相:

$$S_{\text{Total}, A} = \frac{|V_A|}{I_0} = \sqrt{\left(S_{AA} - \frac{1}{2}S_{AB} - \frac{1}{2}S_{AC}\right)^2 + \frac{3}{4}(S_{AB} - S_{AC})^2} \quad (5)$$

B 相:

$$S_{\text{Total}, B} = \frac{|V_B|}{I_0} = \sqrt{\left(S_{BB} - \frac{1}{2}S_{BA} - \frac{1}{2}S_{BC}\right)^2 + \frac{3}{4}(S_{BA} - S_{BC})^2} \quad (6)$$

C 相:

$$S_{\text{Total}, C} = \frac{|V_C|}{I_0} = \sqrt{\left(S_{CC} - \frac{1}{2}S_{CA} - \frac{1}{2}S_{CB}\right)^2 + \frac{3}{4}(S_{CA} - S_{CB})^2} \quad (7)$$

注

導出に関する注記:これらの式は、3 つの正弦波成分のフェーズ加算によって得られます。

X 相の振幅誤差は次の式で表されます。

$$\text{Error}_X(\%) = \frac{S_{\text{Total}, X} - S_{\text{ideal}, X}}{S_{\text{ideal}, X}} \times 100 \quad (8)$$

ここで $S_{\text{ideal}, X}$ (V/A 単位) は、X 相の理想的な感度です。

2.3.2 装置要件

項目	要件
単相電流源	FSR の 10% 以上の電流を生成できる可変 AC または DC 電流源
相スイッチング治具	各バスバーに電流を順番にルーティングするためのリレー マトリクスまたは手動パッチ パネル。各テスト中、通電していない相は開放状態にする必要があります
リファレンス電流センサ	電流源と直列に接続して使用する 1 つのセンサ。測定精度 $\leq 0.1\%$
TMCS2100-Q1 プログラミング インターフェイス	すべての TMCS2100-Q1 デバイスへの I ² C アクセス

2.3.3 校正手順

1. A 相の通電: マトリクスの列 1 を測定

- 試験電流を A 相のバスバーに流します。B 相と C 相は開放にし、電流を流さない状態にする必要があります。
- 次の 3 つの TMCS2100-Q1 差動出力をすべて同時に取得します。 V_A 、 V_B 、 V_C 。
- 次のリファレンス電流を記録します。 I_A 。
- 次の各デバイス感度を計算します。 $S_{AA} = V_A / I_A$ 、 $S_{BA} = V_B / I_A$ 、 $S_{CA} = V_C / I_A$

2. B 相と C 相についてステップ 1 を繰り返します。
3. 合成磁界振幅誤差を計算: 各相について、[セクション 2.3.1.3](#) の式を適用して S_{Total} 値を計算し、 S_{Total} と S_{Ideal} 値を比較します。
4. ゲイン補正を適用
 - a. [セクション 3.1](#) を使用して、一次および二次センサの C_{new} を計算します。
 - b. [セクション 3.3](#) を使用して、両方のセンサの更新された周波数補償コードを計算します。
 - c. TMCS2100-Q1 センサに新しいデバイス値をプログラムします。

2.3.4 動作例

セットアップ: テスト電流 $I_{test} = 50A$ 、特性評価済み感度 $S_{ideal} = 0.0500V/A$ (すべての相)。

測定されたマトリクス要素 (各 $S_{XY} = V_X / I_Y$, V/A 単位):

表 2-2.

	バスバー A 電流	バスバー B 電流	バスバー C 電流
センサ A	$S_{AA} = 0.0490$	$S_{AB} = 0.0024$	$S_{AC} = -0.0036$
センサ B	$S_{BA} = 0.0030$	$S_{BB} = 0.0504$	$S_{BC} = 0.0040$
センサ C	$S_{CA} = -0.0040$	$S_{CB} = 0.0036$	$S_{CC} = 0.0496$

A 相の合成磁界ゲイン:

$$|V_A|/I_0 = \sqrt{(0.0490 - 0.0012 + 0.0018)^2 + 0.75 \times (0.0024 + 0.0036)^2} = \sqrt{(0.0496)^2 + 0.75 \times (0.0060)^2} \quad (9)$$

$$= \sqrt{0.002460 + 0.000027} = 0.04987V/A$$

A 相の誤差:

$$Error_A = \frac{0.04987 - 0.0500}{0.0500} \times 100 = -0.26\% \quad (10)$$

同じ計算を B 相と C 相にも適用し、[S] のそれぞれの対角要素と非対角要素を使用します。3 相すべての誤差が求められたら、[セクション 3.1](#) のゲイン 2 補正式を各センサの一次および二次センサに適用し、必要に応じてマトリクス測定を繰り返して結果を確認します。

2.3.5 ランタイムのクロストーク キャンセル

クロストーク マトリクスキャリブレーション法は、各バスバーと各バスバーのセンサ間の結合を特性評価するため、クロストーク マトリクス [S] を使用して実行時にソフトウェアベースのクロストーク補償を実装し、処理時間を犠牲にして高い精度を実現できます。

[セクション 2.3.1.1](#) では、次の式が示されています。

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

この関係を逆にすると、センサ出力から真の相電流を復元できます。

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = [S]^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで、 $[S]^{-1}$ は測定されたクロストーク マトリクスの逆マトリクスです。3 つのセンサ出力すべてから同時に測定を行うと、この処理によりクロストークが低減された 3 相電流が得られます。

2.3.5.1 実装

1. [S] を調整しキャリブレーションされた値に合わせます。EOL キャリブレーションが完了した後、[S] のセンサ感度を、キャリブレーションされた新しいセンサ感度に合わせて調整する必要があります。[S] の各行について、センサ感度は、対応するバスバーで測定された誤差の量だけ低減する必要があります。
2. $[S]^{-1}$ を事前に計算します。キャリブレーションされた値に [S] を調整した後、テストステーションホストで [S] の逆マトリクスを計算します。これはユニットごとに 1 回だけ行う計算です。
3. 次の 9 つの係数を格納します。 $[S]^{-1}$ の要素をマイコンのメモリにプログラムします。これらは、ユニット固有のクロストークキャンセル値です。
4. 実行時に適用します。各測定サイクルで、3 つのセンサ出力に $[S]^{-1}$ を乗算して、補償された相電流を得ます。これには、3 つのセンサ出力すべてを使用して、サイクルごとに 9 回の積和演算が必要です。

2.4 ペア相インジェクション キャリブレーション

この方法では、より一般的なライン間インジェクション方式 (図 2-5) を使用します。DC テスト電流は 1 つの相のバスバーに流れ、2 番目のバスバーを介して戻り、3 番目のバスバーは開放のままになります。これを各相のペアについて繰り返す (オフセットキャンセルのために電流を両方向に流して実施する) ことで、公称 3 相動作条件での合成磁場振幅誤差を計算するのに十分な情報が得られます。

セクション 2.3 で説明している方法と同様に、この方法は解析的に平衡誤差を計算し、必要なのは単相 DC 電源のみです。セクション 2.3 とは異なり、外部の帰路を必要とせず、電流はインバータを流れます。トレードオフとして、個々のクロストークマトリクス要素をペア相データから求められないため、セクション 2.3.5 のようなランタイム補償はできません。

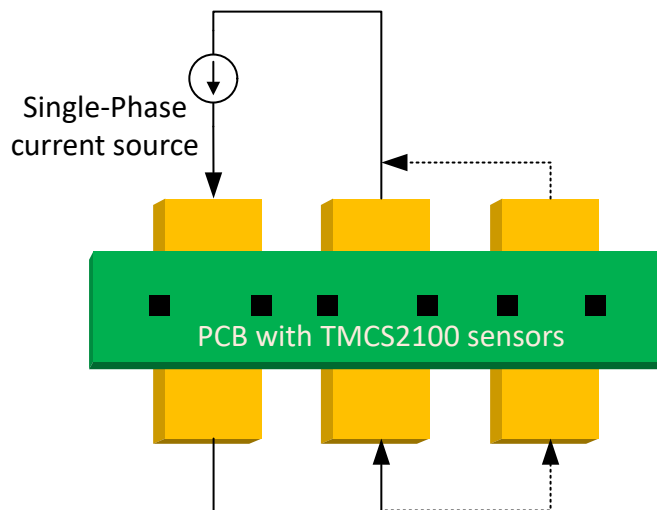


図 2-5. ペア相電流インジェクション

2.4.1 理論的基礎

各ライン間インジェクションでは、2 本のバスバーに大きさが等しい逆方向の電流 I を流します。この信号によって生成される電圧の測定値は、A 相と B 相をそれぞれ順方向電流とリターン電流の例として使用し、次の式で表すことができます。

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AA} & S_{AB} & S_{AC} \\ S_{BA} & S_{BB} & S_{BC} \\ S_{CA} & S_{CB} & S_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AA} & S_{AB} & S_{AC} \\ S_{BA} & S_{BB} & S_{BC} \\ S_{CA} & S_{CB} & S_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ -I \\ 0 \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} S_{AA} - S_{AB} \\ S_{BA} - S_{BB} \\ S_{CA} - S_{CB} \end{bmatrix} \quad (13)$$

これにより、あるバスバーから別のバスバーに流れる電流に対する、各バスバー センサの感度を計算できます (A から B に流れる電流に対するバスバー A の感度を $s_{A,A \rightarrow B}$ と表記)。

$$\begin{bmatrix} s_{A,A \rightarrow B} \\ s_{B,A \rightarrow B} \\ s_{C,A \rightarrow B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{A,A \rightarrow B} \\ V_{B,A \rightarrow B} \\ V_{C,A \rightarrow B} \end{bmatrix} \div I_{A \rightarrow B} = \begin{bmatrix} S_{AA} - S_{AB} \\ S_{BA} - S_{BB} \\ S_{CA} - S_{CB} \end{bmatrix} \quad (14)$$

また、他の 2 つの接続での電流についても同じです。

$$\begin{bmatrix} s_{A,A \rightarrow C} \\ s_{B,A \rightarrow C} \\ s_{C,A \rightarrow C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AA} - S_{AC} \\ S_{BA} - S_{BC} \\ S_{CA} - S_{CC} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} s_{A,B \rightarrow C} \\ s_{B,B \rightarrow C} \\ s_{C,B \rightarrow C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AB} - S_{AC} \\ S_{BB} - S_{BC} \\ S_{CB} - S_{CC} \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで、平衡 3 相電流に対するバスバーの合計感度を推定するための、[セクション 2.3.1.3](#) の式を思い出します。

$$S_{\text{Total},A} = \sqrt{\left(S_{AA} - \frac{1}{2}S_{AB} - \frac{1}{2}S_{AC}\right)^2 + \frac{3}{4}(S_{AB} - S_{AC})^2} \quad (17)$$

測定した $s_{A,A \rightarrow B}$ 、 $s_{A,A \rightarrow C}$ 、 $s_{A,B \rightarrow C}$ を使用すると、この式は次のように書き換えることができます。

$$S_{\text{Total},A} = \sqrt{\left(\frac{s_{A,A \rightarrow B} + s_{A,A \rightarrow C}}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}(s_{A,B \rightarrow C})^2} \quad (18)$$

すなわち、平衡 3 相信号に対するセンサの合計感度を計算できるということです。

2.4.2 装置要件

項目	要件
単相電流源	TMCS2100-Q1 フルスケールの 10% 以上の出力能力がある DC 電源
ライン間ルーティング治具	選択したバスバーのペア (一方に電流を流し、もう一方を通って戻る) に電源を接続し、3 番目のバスバーを開放にする手段。
リファレンス電流センサ	電源と直列に接続された 1 つのセンサ、精度 $\leq 0.1\%$
TMCS2100-Q1 プログラミング インターフェイス	すべての TMCS2100-Q1 デバイスへの I ² C アクセス

2.4.3 校正手順

各ペアを両方向の電流で駆動し、2 つの測定値を減算することで、オフセットを除去できます。3 つのセンサ チャネルすべてで同じ 3 つの電流フロー パスが読み取られることに注意してください。各インジェクションは、各センサの誤差計算に 1 項寄与します。

- キャリブレーション電流を A 相から B 相へ流し、すべてのセンサを読み取ります。
 - I_{test} をバスバー A に流し、バスバー B を経由して戻します。バスバー C は開いた状態にしておきます。
 - TMCS2100-Q1 の 3 つの差動出力をすべて同時に測定します。 $V_{A,A \rightarrow B}$ 、 $V_{B,A \rightarrow B}$ 、 $V_{C,A \rightarrow B}$ 、およびリファレンス電流 $I_{A \rightarrow B}$ 。
 - 極性を逆にし (I_{test} を B に流し、A を経由して戻し)、 $V_{A,B \rightarrow A}$ 、 $V_{B,B \rightarrow A}$ 、 $V_{C,B \rightarrow A}$ 、 $I_{B \rightarrow A}$ を測定します。
 - 各センサ X について、オフセットをキャンセルした応答を計算します。

$$s_{X,A \rightarrow B} = \frac{V_{X,A \rightarrow B} - V_{X,B \rightarrow A}}{I_{A \rightarrow B} + I_{B \rightarrow A}} \quad (19)$$

2. すべての感度値 $s_{X,X \rightarrow X}$ が測定されるまで、バスバー電流 $I_{A \rightarrow C}$ および $I_{B \rightarrow C}$ についてもステップ 1 を繰り返します。
3. 整合性チェック (オプション): 各センサについて、 $s_{X,A \rightarrow B} \equiv s_{X,A \rightarrow C} - s_{X,B \rightarrow C}$ を確認します。大きな不一致がある場合は、測定、配線、リーケージ、または直線性の問題があることを示します。
4. 合成磁界振幅誤差を計算します。各相について、式 18 を適用して S_{Total} を求め、その相の S_{Ideal} と比較し、式 8 を使用して誤差のパーセンテージを求めます。
5. ゲイン補正を適用します。各相について、以下を行います。
 - a. セクション 3.1 を使用して、一次および二次センサの C_{new} を計算します。
 - b. セクション 3.3 を使用して、両方のセンサの更新された周波数補償コードを計算します。
 - c. TMCS2100-Q1 センサに新しいデバイス値をプログラムします。

2.5 方法の比較

どの方法を選択するかは、主に EOL ステーションで利用可能な試験装置によって異なります。表 2-3 に、主な相違点をまとめます。

表 2-3. 測定方法の比較

条件	平衡 3 相キャリブレーション	クロストーク マトリクス キャリブレーション	ペア相インジェクション キャリブレーション
電源設備	3 相電源が必要 (インバータの使用を推奨)。負荷と電源を合わせて、平衡電流信号を生成する必要があります	単相 AC/DC 電流源で十分	単相 AC/DC 電流源で十分
ユニットあたりの基準測定数	相ごとに 1 つ (合計 3 つ)	他の相が開放の場合、必要な基準測定は 1 つのみ	電流が開放の相を流れない場合、必要な基準測定は 1 つのみ
エラーのタイプ	直接測定。非線形動作の影響を受けない	マトリクスから計算。直線性を仮定	ペア応答から計算。直線性を仮定
ランタイム クロストーク補償	使用不可。個別の結合係数を測定していないため	$[S]^{-1}$ を計算し、ファームウェアで適用することで、クロストークを完全に除去できます (セクション 2.3.5)	使用不可。ペア データからマトリクスを分離できないため
推奨される条件	3 相負荷 / 電源が使用可能で、スルーポイント優先の場合	単相または DC 負荷を使用する場合、非常に小さいクロストークが要求される場合、または相ごとの診断が必要な場合	単一バスバーの分離が物理的に不可能な単相ステーションの場合

3 感度調整手順

TMCS2100-Q1 の感度は、以下のプログラム可能な 4 つのレジスタ値で制御されます。ゲイン 1、ゲイン 2、極性ビットです。EOL キャリブレーション中は、ゲイン 2 のみが調整され、ゲイン 1 および極性ビットは変更されません。各相には、一次および二次の TMCS2100-Q1 センサを使用します。キャリブレーション中、両方のデバイスそれぞれのゲイン 2 値を更新する必要があります。キャリブレーションを一方のデバイスのみに適用すると、センサの特性評価が歪み、デバイスを適切に較正できなくなります。

8.2.2 MEM1 Register (Address = 0x11)

The Memory Register 1 is show below.

Table 8-12. MEM1 Register Field Descriptions

Bit	Field	Type	Description
15-14	OC_CONFIG	R/W	Register used to select the sensor channel for comparison or to disable the comparator for Over Current Detection Overcurrent Detection Configuration. 00b = Enable Sensor 1 01b = Enable Sensor 2 10b = Disable Comparator and Output 11b = Disable Comparator and Output
13-0	GAIN2	R/W	Gain Value for Gain 2

図 3-1. データシートからのゲイン 2 レジスタ値

3.1 計算方法

セクション 2 のいずれかの方法を使用して振幅誤差を決定すると、新しいゲイン 2 の値は次のように計算されます。

$$C_{\text{new}} = C_{\text{original}} + 0.01 \times (C_{\text{original}} - 18687.13) \times \text{Error} \quad (20)$$

記号	定義
C_{new}	デバイスにプログラムする新しいゲイン 2 の値 (符号なし整数、最も近い整数に丸めた値)
C_{original}	この調整の前における現在のゲイン 2 コード
エラー	符号付き振幅誤差パーセンテージ (たとえば、感度が公称値より 5% 低い場合は -5、感度が公称値より 3% 高い場合は +3)

値 18687.13 は、デバイスの内部ゲインに関連するデバイス定数です。

3.2 計算例

事前にプログラムされた特性評価コードが与えられた場合：一次ゲイン 2 = 6062、二次ゲイン 2 = 3160。

測定された振幅誤差：-0.895%

一次センサ：

$$C_{\text{new}} = 6062 + 0.01 \times (6062 - 18687.13) \times (-0.895) = 6062 + 113 = 6175 \quad (21)$$

二次センサ：

$$C_{\text{new}} = 3160 + 0.01 \times (3160 - 18687.13) \times (-0.895) = 3160 + 139 = 3299 \quad (22)$$

これら 2 つの値をプログラムすると、0.895% のアンダーシュートが補正されます。

3.3 周波数補償値の調整

TMCS2100-Q1 には、FREQ_SLP1 と FREQ_SLP2 の 2 つの周波数補償値が含まれており、特定の周波数ポイントでゲイン補正を適用して、センサの周波数応答を平坦にします。これらのレジスタに格納されているコードは、特性評価され

たゲイン 2 コードを使用して元々計算されたデルタ コード値 (式 20 の第 2 項) です。コードは元のゲイン 2 値を基準として表現されているため、EOL キャリブレーションの一部としてゲイン 2 を調整するたびにコードを再計算する必要があります。

3.3.1 ステップ 1: 周波数補償コードを誤差パーセンテージに変換する

各周波数補償レジスタについて、キャリブレーション前のゲイン 2 コード C_{original} を使用して、レジスタにエンコードされた誤差のパーセンテージを復元します。

$$\text{Error}_{\text{FS1}} = \frac{\text{FREQ_SLP1}_{\text{original}}}{0.01 \times (C_{\text{original}} - 18687.13)} \quad (23)$$

FREQ_SLP2 に関連する誤差の場合、式は次のようになります。

$$\text{Error}_{\text{FS2}} = \frac{\text{FREQ_SLP2}_{\text{original}}}{0.01 \times (C_{\text{original}} + \text{FREQ_SLP1}_{\text{original}} - 18687.13)} \quad (24)$$

3.3.2 ステップ 2: 新しい周波数補償コードを計算する

新しいゲイン 2 コード C_{new} を代入し、更新された周波数補償コードを求めます。

$$\text{FREQ_SLP1}_{\text{new}} = 0.01 \times (C_{\text{new}} - 18687.13) \times \text{Error}_{\text{FS1}} \quad (25)$$

$$\text{FREQ_SLP2}_{\text{new}} = 0.01 \times (C_{\text{new}} + \text{FREQ_SLP1}_{\text{new}} - 18687.13) \times \text{Error}_{\text{FS2}} \quad (26)$$

プログラムする前に、FREQ_SLP x_{new} を最も近い整数に丸めます。

3.3.3 計算例 (周波数補償の続き)

$C_{\text{original}} = 6062$ 、 $C_{\text{new}} = 6175$ 、 $\text{FREQ_SLP1}_{\text{original}} = -92$ 、および $\text{FREQ_SLP2}_{\text{original}} = -374$ とする場合、まず、周波数補償で使用される元の誤差のパーセンテージを計算します。

$$\text{Error}_{\text{FS1}} = \frac{-92}{0.01 \times (6062 - 18687.13)} = 0.729\% \quad (27)$$

$$\text{Error}_{\text{FS2}} = \frac{-374}{0.01 \times (6062 - 92 - 18687.13)} = 2.94\% \quad (28)$$

次に、これらのパーセンテージを使用して、新しい周波数補償レジスタ値を計算します。

$$\text{FREQ_SLP1}_{\text{new}} = 0.01 \times (6175 - 18687.13) \times 0.729\% = -91 \quad (29)$$

$$\text{FREQ_SLP2}_{\text{new}} = 0.01 \times (6175 - 91 - 18687.13) \times 2.94\% = -371 \quad (30)$$

同じ計算を、元のレジスタ値を使用して、二次センサについても繰り返します。

3.4 GUI カリキュレータ

これらの計算は、TMCS2100 特性評価用 GUI に完全に実装されており、誤差の測定や計算例の実行に使用できます。誤差測定では、TMCS2100 特性評価用評価基板からキャプチャしたデータを使用し、そのデータに FFT を実行して、支配的な周波数における振幅誤差と位相誤差を抽出します。

Calculate Errors

Amplitude and Phase ☒ Crosstalk

CALCULATE ERRORS

☐ Auto Calculate Errors

Phase 1:	Amplitude Error:	-0.5903	%	Phase Error:	-0.2006	°
Phase 2:	Amplitude Error:	-0.8953	%	Phase Error:	-0.7596	°
Phase 3:	Amplitude Error:	-0.4889	%	Phase Error:	0.1053	°

図 3-2. GUI による誤差計算の例

外部で誤差を測定した場合は、「manual amplitude errors」(手動振幅誤差) ボックスをオンにして、キャリブレーションに使用される誤差値を上書きします。

End-of-Line Calibration

CALCULATE EOL CAL VALUES

☒ Also adjust Freq Comp values

☐ Manual amplitude errors

図 3-3. EOL キャリブレーション オプション

「Also adjust Freq Comp values」(周波数補償値も調整) ボックスがオンになっている場合、GUI は FREQ_SLP 値を調整するために必要な計算も実行します。

End-of-Line Calibration

Use "PROGRAM" buttons below to apply EOL Cal.



Device	Slope 1	Slope 2	Gain 2
P1 Primary	43	101 → 100	7538 → 7604
P1 Secondary	65	153 → 152	1717 → 1817
P2 Primary	-92 → -91	-374 → -371	6062 → 6175
P2 Secondary	-113 → -112	-460 → -456	3160 → 3299
P3 Primary	-12	-1943 → -1934	4911 → 4978
P3 Secondary	-8	-1257 → -1251	9774 → 9818

PROGRAM TO TRIM

PROGRAM TO EEPROM

DONE

図 3-4. GUI による EOL レジスタの計算

4 トラブルシューティング

EOL キャリブレーションを適用した後、システムクロストーク性能が低下する場合、キャリブレーション値が両方のデバイスに正しく適用されていないことを示しています。次のような原因が考えられます。

- プログラミング前にメモリ制御ビットが設定されていない
- メモリレジスタ 0 が上書きされている
- ゲイン 2 の値の 1 つが、レジスタフィールドを飽和させている
- 通信エラーまたは計算エラーにより、ゲイン 2 レジスタのコードが破損している

これを修正するには、I2C 通信エラーを解消してください。修正したゲイン 2 の値が飽和している場合は、単純にゲイン 2 の値をクランプしないでください。代わりに、両方の **TMCS2100-Q1** デバイスのゲイン値を同じ量だけ変更する必要があります。[セクション 3.1](#) の式を使用して、可能な最大誤差補正値をパーセント単位で計算し、計算した補正値の代わりに、この補正値を適用します。飽和している、または飽和に近いゲイン 2 の値は、特性評価に使用した **FSR** が小さすぎることを示しています。一般に、特性評価の後には **16128** 未満のゲイン 2 値をお勧めします。

5 まとめ

TMCS2100-Q1 磁気電流センサのエンドオブライン キャリブレーションは、動作中にセンサが受ける総合信号を使って行うのが最も適しています。これは複数の方法で実現でき、そのうち **3** つをここで紹介します。インバータの動作中に磁界を直接測定するのは、概念的には最も簡単な選択肢ですが、より多くの測定ハードウェアと、測定のために大電流を制御する能力が必要です。別の方法では、各バスバーから信号を分離することで測定した個々の信号成分から、総合信号を計算します。最後に、ここで紹介する **3** 番目の方法では、最小限の機器要件で合成信号を計算する別の方法を提供します。すべての方法で同じ結果が得られますが、エンドオブラインでの要件は異なります。どの方法を選択するかは、最終的に、特定の製造フローにおいて何が実現可能であるかに依存します。

6 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、[「TMCS2100-Q1 コアレス マルチセンサ ホール効果電流センサ」](#)、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、TI は一切の責任を拒否します。

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](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月